

DINAMIKA FRAKSI FOSFOR DAN SIFAT KIMIA TANAH SAWAH TERKAIT INDEKS PERTANAMAN PADI SAWAH DAN PRAKTIK PENGAIRAN

Dynamics of Phosphorus Fractions and Chemical Properties of Paddy Soils as related to Paddy Rice Cropping Index and Irrigation Practices

Untung Sudadi^{1)*}, Laode Muhamad Asdiq Hamsin Ramadhan²⁾, Budi Nugroho¹⁾ dan Arief Hartono¹⁾

¹⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

²⁾ Alumni Program Studi Ilmu Tanah, Sekolah Pascasarjana IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

ABSTRACT

Dynamics of P fractions and other chemical properties of a paddy soil are related to paddy rice cropping index (CI) and soil water content at field condition (SFWC). This explorative research was aimed at to evaluating the effects of different CIs represented by ameliorations and fertilizations applied by, and SFWC to represent irrigation practiced by farmers of the studied paddy soils on dynamics of P fractions, other soil chemical properties, and paddy rice yield. Composite soil samples were taken from cultivated paddy fields with CI 100%, 200%, and 300% at 7, 9, 11, and 13 weeks after the initial waterlogging. Soil P were fractionated into soil P_{H_2O} , $P_{NaHCO_3\text{-inorganic}}$ (Pi), $P_{NaHCO_3\text{-organic}}$ (Po), $P_{NaOH\text{-Pi}}$, $P_{NaOH\text{-Po}}$, and P_{HCl} fractions. At the four soil sampling times, SFWC at CI 100% < 200% \approx 300%. At CI 100%, soil Po fractions tended to decrease, whilst Pi fractions tended to increase with the increasing SFWC. Soil P dynamics in all CIs were predominantly determined by C_{org} . Increase in C_{org} decreased Pi fractions at CI 100% and Po fractions at CI 200% but increased Pi fractions at CI 300%. Decreasing P_2O_5 and increasing rice straw doses decreased soil Eh. Predominant factor affected rice paddy yield was SFWC.

Keywords: P fertilizer, rice straw, soil field water-content, soil P fractions

ABSTRAK

Dinamika fraksi-fraksi P dan sifat kimia lainnya pada tanah sawah terkait dengan indeks pertanaman padi sawah (IP) dan kadar air tanah pada kondisi lapang (KAL). Penelitian eksploratif ini bertujuan mengevaluasi pengaruh IP berbeda yang direpresentasikan oleh dosis ameliorasi dan pemupukan serta KAL sebagai representasi praktik pengairan yang diaplikasikan oleh petani pada tanah sawah penelitian terhadap dinamika fraksi P, sifat kimia tanah lainnya dan produksi padi sawah. Contoh tanah komposit diambil pada lahan sawah yang sedang dibudidayakan petani dengan IP 100%, 200% dan 300% pada periode 7, 9, 11 dan 13 minggu setelah penggenangan awal. Fraksinasi P dilakukan untuk memperoleh fraksi P_{H_2O} , $P_{NaHCO_3\text{-inorganik}}$ (Pi), $P_{NaHCO_3\text{-organik}}$ (Po), $P_{NaOH\text{-Pi}}$, $P_{NaOH\text{-Po}}$ dan P_{HCl} tanah. Nilai KAL pada keempat waktu pengambilan contoh tanah pada IP 100% < IP 200% \approx IP 300%. Sifat-sifat kimia dan fraksi-fraksi Po pada IP 100% cenderung menurun, sedangkan fraksi-fraksi Pi cenderung meningkat dengan peningkatan KAL. Dinamika fraksi-fraksi P tanah pada ketiga IP terutama ditentukan oleh C_{org} . Peningkatan C_{org} tanah menurunkan kadar Pi pada IP 100% dan Po pada IP 200%, tetapi meningkatkan Pi pada IP 300%. Penurunan dosis P_2O_5 dan peningkatan dosis jerami menurunkan Eh tanah. Faktor yang paling berpengaruh terhadap produksi padi sawah adalah KAL.

Kata kunci : Pupuk P, jerami padi, kadar air lapang tanah, fraksi P tanah

PENDAHULUAN

Fosfor (P) tanah dijumpai dalam berbagai fraksi kimia (Tiessen dan Moir, 2008). Pada tanah sawah, kadar fraksi-fraksi P, yang merupakan salah satu faktor penentu produktivitas tanah sawah, antara lain dipengaruhi oleh indeks pertanaman dan kondisi pengairan. Indeks Pertanaman padi sawah (IP) menunjukkan berapa kali dalam setahun lahan digunakan untuk budidaya padi sawah. Pada tanah sawah, selain kondisi pengairan, pengaruh IP terhadap sifat-sifat kimia tanah juga terkait dengan dosis ameliorasi dan pemupukan. Peningkatan IP, dalam praktiknya, tidak selalu selaras dengan peningkatan dosis ameliorasi atau pupuk per tahun yang diaplikasikan oleh petani. Dosis per musim tanam pada IP 100% dapat lebih

tinggi dari pada IP 300%. Peningkatan rentang waktu sejak penggenangan awal juga tidak selalu selaras dengan peningkatan kadar air tanah pada kondisi lapang (KAL). Faktanya lahan sawah dapat dijumpai dalam berbagai kondisi KAL selama masa budidaya padi sawah, tergantung praktik pengelolaan air yang dilakukan petani. Dosis ameliorasi dan pupuk serta KAL mempengaruhi reaksi reduksi-oksidasi (redoks) tanah sehingga sangat menentukan dinamika sifat-sifat elektrokimia dan kimia tanah sawah.

Fosfor tanah dijumpai dalam tiga fraksi, yaitu: (1) $P_{larutan}$, (2) P_{labile} , dan (3) $P_{non\text{-labile}}$, yang saling berkeseimbangan. Fraksi ketiga lebih rendah ketersediaannya bagi tanaman daripada fraksi kedua dan fraksi kedua lebih rendah daripada fraksi pertama. Tiessen dan Moir (2008)

membagi P tanah ke dalam 5 fraksi, yaitu: (1) $P_{\text{Resin-Pi}}$ (Pinorganik), fraksi yang sangat tersedia bagi tanaman; (2) $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Pi}}$ dan $-P_o$ (Porganik), fraksi yang berkorelasi kuat dengan serapan tanaman dan mikroba serta yang tererap di permukaan mineral klei atau terpresipitasi sebagai Ca-P dan Mg-P; (3) $P_{\text{NaOH-Pi}}$ dan $-P_o$, fraksi yang terjerap lebih kuat secara kemosorpsi oleh Al- dan Fe-hidroksida; (4) P_{HCl} , fraksi Ca-P yang berkelarutan rendah, serta (5) P_{residual} , fraksi Pi- dan Po-terseleksi atau *occluded-P* yang sangat sukar larut.

Potensial redoks (Eh) adalah sifat kimia tanah yang pertama kali berubah akibat pengairan (Ethan, 2015; Fan *et al.*, 2008). Berkurangnya O_2 dalam pori tanah akibat terdesak air menjadikan tanah sawah lebih reduktif atau menurun Eh-nya. Selanjutnya, pengairan menyebabkan konvergensi pH, yaitu perubahan pH tanah menuju netral. Pada tanah masam yang banyak mengandung Fe, kondisi lebih reduktif akibat peningkatan KAL menyebabkan kenaikan pH yang dipengaruhi oleh reaksi keseimbangan $Fe(OH)_3 \rightarrow Fe(OH)_2 \cdot H_2O$. Kondisi lebih reduktif akibat pengairan pada tanah alkalin menyebabkan penurunan pH yang dipengaruhi oleh reaksi keseimbangan $CaCO_3 \rightarrow CO_2 \cdot H_2O$ (Ponnamperuma, 1978).

Peningkatan KAL akibat pengairan meningkatkan pelarutan ion-ion sehingga daya hantar listrik (DHL) larutan tanah meningkat dan menyebabkan sebagian fraksi P tanah yang semula tidak atau kurang tersedia bagi padi sawah menjadi lebih tersedia dan sebaliknya apabila KAL menurun (Chaudhari *et al.*, 2013). Peningkatan kelarutan P tanah tersebut disebabkan oleh: (1) reduksi $FePO_4 \cdot 2H_2O$ menjadi $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$, (2) pelepasan kembali fosfat yang semula terjerap, (3) hidrolisis $FePO_4$ dan $AlPO_4$ pada tanah masam, serta (4) pelepasan *occluded-P* sehingga Pi terlepas ke larutan tanah (Gao *et al.*, 2013). Mekanisme pertama dan ketiga dapat dipelajari dengan mengevaluasi dinamika kadar Fe_{terlarut} selama periode pengamatan.

Selain mempengaruhi C_{organik} , ameliorasi bahan organik pada tanah sawah juga meningkatkan pengaruh pengairan terhadap penurunan Eh dan konvergensi pH, karena O_2 tersedia segera dipercepat penurunan kadarnya untuk proses dekomposisi bahan organik. Pemupukan P akan segera meningkatkan kadar fraksi P_{tersedia} (Faktor Intensitas), namun tidak semuanya akan diserap tanaman karena sebagiannya akan berubah menjadi fraksi-fraksi yang lebih tidak tersedia (Faktor Kapasitas) melalui mekanisme jerapan P yang bersifat spesifik (Cyio, 2008).

Penelitian eksploratif ini bertujuan mengevaluasi pengaruh KAL sebagai representasi pengaruh praktik pengairan, serta ameliorasi dan pemupukan yang diaplikasikan petani sebagai representasi pengaruh IP terhadap dinamika fraksi P, sifat kimia tanah lainnya dan produksi padi sawah.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Lahan Sawah dan Pengambilan Contoh Tanah

Contoh tanah diambil dari masing-masing 5 petakan lahan sawah milik petani di Kecamatan Dramaga, Kabupaten Bogor, Jawa Barat dengan IP 100%, 200% dan 300%. Koordinat ketiga lahan sawah berturut-turut

$6^{\circ}32'51.8''$ LS, $106^{\circ}43'45.9''$ BT; $6^{\circ}33'03.2''$ LS, $106^{\circ}44'10.4''$ BT; dan $6^{\circ}33'02.4''$ LS, $106^{\circ}44'21.1''$ BT. Hasil analisis pendahuluan sifat kimia tanah sawah penelitian disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil wawancara dengan petani penggarap, lahan sawah dengan IP 100%, 200% dan 300% tersebut berturut-turut diameliorasi dengan 900, 1320, dan 4200 $kg \cdot ha^{-1}$ jerami; dan dipupuk P dengan dosis 120, 34.4, dan 36 $kg \cdot ha^{-1}$ P_2O_5 per musim tanam, ditanami bibit padi sawah varietas Inpari 5, Inpari 5, dan Cisedane. Dosis amelioran dan pupuk ditentukan oleh petani (Tabel 2).

Contoh tanah komposit dari 5 titik acak diambil di setiap dari 5 petakan sawah dengan IP 100%, 200%, dan 300% pada 7, 9, 11, dan 13 minggu setelah penggenangan awal di pertanaman pertama musim hujan 2015 (akhir Februari sampai awal Mei 2015), sehingga diperoleh 60 contoh tanah komposit sebagai bahan utama penelitian.

Contoh tanah diambil dengan cara menancapkan pipa paralon berdiameter 1.25 inchi sepanjang 60 cm ke dalam tanah sampai kedalaman 20 cm. Pipa yang telah berisi tanah ditutup bagian bawahnya dengan telapak tangan dan diangkat secara perlahan. Contoh tanah dari setiap 5 titik acak dimasukkan ke dalam satu kantong plastik hitam, ditutup rapat, dicampurkan merata di dalam kantong plastik, diambil sekitar 200 g, dipindahkan ke tabung kedap udara, dan disimpan dalam lemari pendingin di laboratorium pada suhu 4 °C. Hal ini untuk menjaga agar contoh tanah semaksimal mungkin tetap berada dalam kondisi KAL. Sebelum pengambilan contoh tanah dilakukan pengamatan kondisi tanah terkait praktik pengairan.

Analisis Tanah

Analisis sifat kimia tanah dilakukan terhadap Eh dan pH (H_2O 1:2.5, potensiometrik, Eh-pH meter), DHL (pasta tanah 1:1, EC meter), C_{organik} (Walkley & Black), Fe_{terlarut} (pasta tanah 1:1, AAS) dan fraksionasi P. Fraksionasi P dilakukan menurut metode Tiessen dan Moir (2008) yang dimodifikasi, yaitu fraksi *Resin-P* diganti dengan P_{H_2O} . Dalam penelitian ini, kadar fraksi P_{residual} tidak ditetapkan. Setelah fraksi P_{H_2O} , selanjutnya secara sekuensial dilakukan penetapan fraksi $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Pi}}$ dan P_{total} serta perhitungan $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Po}}$, $P_{\text{NaOH-Pi}}$ dan P_{total} serta perhitungan $P_{\text{NaOH-Po}}$ dan $P_{\text{HCl-Pi}}$.

Analisis Data

Hasil penelitian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara sifat-sifat kimia dan kadar fraksi-fraksi P tanah sebagai ordinat dengan KAL pada masa 7-13 minggu setelah penggenangan awal yang diurutkan dari nilai KAL terendah ke tinggi sebagai absis pada kondisi IP 100%, 200%, dan 300%. Analisis data juga dilakukan untuk menentukan persamaan regresi linier sederhana dan berganda menggunakan metode *backward stepwise* serta korelasi antar fraksi-fraksi P, Eh, pH, DHL, Fe_{terlarut} dan C_{org} tanah, dosis jerami, dosis pupuk P, KAL dan produksi GKP padi sawah menggunakan *software* MS Excell dan SPSS.

Tabel 1. Hasil analisis pendahuluan sifat kimia tanah sawah penelitian sebelum aplikasi amelioran dan pupuk pada awal minggu kedua setelah penggenangan awal

IP Padi sawah (%)	H ₂ O 1:1	H ₂ O 1:2.5	H ₂ O 1:1	Walkley & Black	Kjeldahl	HCl 25%	N NH ₄ OAc pH 7.0	
	Eh (mV)	pH	DHL (S.cm ⁻¹)	C _{organik} (%)	N _{total} (%)	P _{total} (ppm)	K _{dapat ditukar} (cmolc.kg ⁻¹)	KTK (cmolc.kg ⁻¹)
100	211	5.39	65.24	1.80	0.08	350	0.23	38.17
200	207	5.22	114.28	2.04	0.08	415	0.08	38.64
300	177	5.30	126.36	2.38	0.09	417	0.12	32.77

Tabel 2. Dosis ameliorasi dan pemupukan yang diaplikasikan petani pada tanah sawah penelitian

IP Padi sawah (%)	Pola Tanam	Dosis amelioran dan pupuk (kg.ha ⁻¹) per musim tanam padi sawah								Produksi GKP (ton.ha ⁻¹) per musim tanam padi sawah
		Urea	TSP	KCl	NPK	Jerami	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
100	Kacang Tanah-Bengkoang-Padi Sawah	125	125	0	500	900	133	133	75	3
200	Bera-Padi Sawah-Padi Sawah	77	77	154	0	1320	35.4	35.4	46.2	4.4
300	Padi Sawah-Padi Sawah-Padi Sawah	200	0	0	240	4200	128	36	36	7.2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dinamika Fraksi Fosfor dan Sifat Kimia Tanah

Pada periode 7-13 minggu setelah penggenangan awal, KAL tanah sawah penelitian dengan IP 100%, 200% dan 300% berada pada kisaran 42-51%, 81-83% dan 82-100% (Gambar 1). Peningkatan KAL menyebabkan penurunan Eh dan konvergensi pH tanah. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Chong *et al.* (2009). Eh semakin turun dengan meningkatnya KAL dan IP (Gambar 1). Hal ini berkaitan dengan peningkatan dosis jerami dari 900 kg.ha⁻¹ pada IP 100% ke 1320 dan 4,200 kg.ha⁻¹ pada IP 200% dan 300%. Semakin tinggi dosis jerami semakin tinggi dan cepat laju konsumsi oksigen untuk proses dekomposisinya, sehingga semakin menurunkan Eh (Duane *et al.*, 2012).

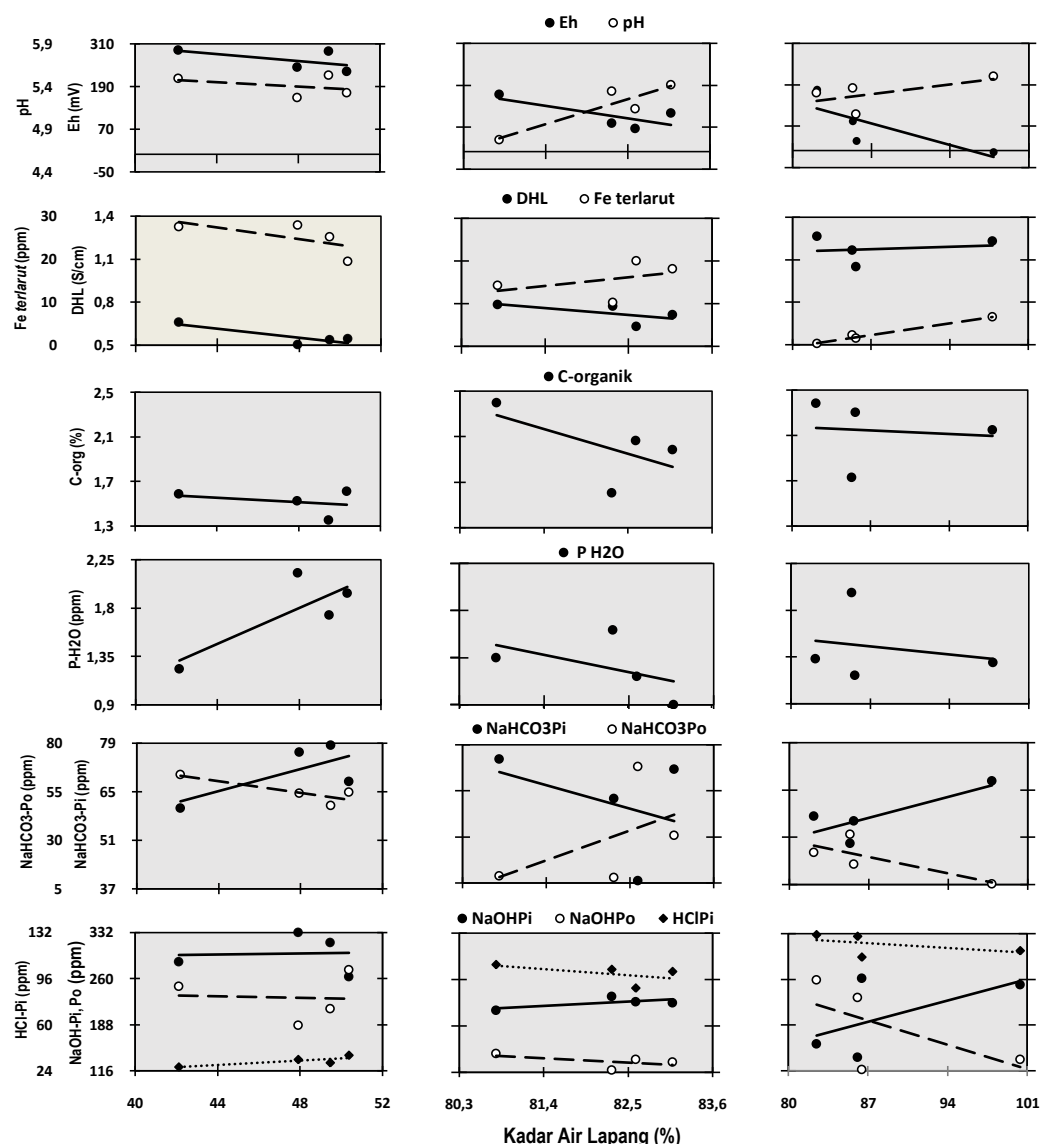
Nilai pH tanah pada IP 100% sedikit menurun, namun pada IP 200% dan 300% terjadi tren peningkatan pH dengan meningkatnya KAL atau menurunnya Eh. Penurunan Eh menyebabkan reduksi Fe(OH)₃ menjadi Fe(OH)₂ dan melepaskan OH⁻ sehingga meningkatkan pH tanah menurut reaksi: Fe(OH)₃ + e⁻ → Fe(OH)₂ + OH⁻.

Peningkatan KAL pada tanah sawah umumnya meningkatkan nilai DHL. Hal tersebut pada penelitian ini tidak terjadi pada IP 100% dan 200%, namun pada IP 300% DHL cenderung meningkat dengan meningkatnya KAL (Gambar 1). Hal ini diduga berkaitan dengan ameliorasi jerami hingga 4200 kg.ha⁻¹ per musim tanam padi sawah. Menurut Iranpour *et al.* (2014), nilai DHL tanah sawah akan meningkat seiring dengan peningkatan dosis ameliorasi bahan organik dan dekomposisinya yang melepaskan ion-ion hara ke larutan tanah, diantaranya NH₄⁺, sebagai hasil proses amonifikasi bahan organik. Pembentukan NH₄⁺ lebih cepat terjadi pada tanah dengan kadar N dan bahan organik tinggi (Nayak *et al.*, 2009; Pampolino *et al.*, 2008) seperti yang terjadi pada tanah penelitian dengan IP 300% yang mengandung 2.38% C_{organik} dan 0.09% N_{total} (Tabel 3).

Kadar Fe_{terlarut} pada IP 100% cenderung menurun selama periode 7-13 minggu setelah penggenangan awal dan sebaliknya pada IP 200% dan 300% (Gambar 1). Budidaya padi sawah yang hanya sekali setahun pada IP 100% menyebabkan tanah berada pada kondisi oksidatif yang berlangsung lebih lama, yaitu pada periode pertanaman kacang tanah dan bengkoang, sehingga dekomposisi bahan organik berlangsung lebih intensif, menurunkan nisbah C/N dan menghasilkan asam humat yang dapat membentuk kompleks dengan dan menurunkan kadar Fe_{terlarut}. Pada IP 200% dan 300%, peningkatan Fe_{terlarut} berkaitan dengan proses dekomposisi bahan organik pada kondisi lebih anaerobik yang menyebabkan reduksi Fe³⁺ menjadi Fe²⁺ menurut reaksi: Fe₂O₃ + 1/2 CH₂O + 4H⁺ → 2 Fe²⁺ + 5/2 H₂O + 1/2 CO₂ (Sahrawat *et al.*, 2012).

Pemupukan 120 kg.ha⁻¹ P₂O₅ per musim tanam padi sawah (Tabel 2) menyebabkan fraksi-fraksi P tanah pada IP 100% cenderung meningkat selama periode pengamatan dan memiliki kadar tertinggi (Gambar 1). Tingginya kadar P di larutan tanah akan menyebabkan peningkatan penyerapan P (Idris dan Ahmed, 2012), sehingga meningkatkan kadar fraksi P padatan yang dalam hal ini adalah fraksi P_{NaOH-Pi} dan P_{HCl-Pi}. Hartono *et al.* (2006) mendapatkan peningkatan fraksi P_{NaOH-Pi} pada tanah yang ditambahkan 300 mg.kg⁻¹ P setelah diinkubasi 90 jam. Pada IP 200% dan 300%, penggenangan menyebabkan pelarutan fraksi P_{HCl-Pi} menjadi P_{NaOH-Pi} yang ditandai oleh menurunnya kadar fraksi P_{HCl-Pi} dan meningkatnya kadar P_{NaOH-Pi} (Gambar 1).

Secara umum, dinamika fraksi-fraksi P tanah sawah pada ketiga IP yang diteliti disebabkan oleh proses keseimbangan antara Faktor Intensitas (IF) dengan Faktor Kapasitas (CF). CF menunjukkan kapasitas fase padatan tanah untuk melepaskan ion hara yang berkurang kadarnya dalam larutan tanah (IF) akibat serapan oleh tanaman, pencucian atau volatilisasi dan sebaliknya. Perubahan fraksi P juga dipengaruhi oleh dinamika sifat kimia pada ketiga IP selama periode pengamatan.



IP Padi Sawah	100%				200%				300%			
Kondisi Lahan*	tt	tt	m	m	tt	tt	m	m	tt	m	m	tg
Masa Pengairan (Minggu**)	13	9	11	7	7	9	13	11	11	13	9	7
Dosis Amelioran dan Pupuk (kg.ha⁻¹) per Musim												
Jerami	900				1320				4200			
N	133				35.4				128			
P₂O₅	120				37.7				36			
K₂O	75				46.2				36			
Pola Tanam	Padi Sawah – Kacang Tanah – Bengkoang				Padi Sawah – Padi Sawah – Bera				Padi Sawah – Padi Sawah – Padi Sawah			

* tt: tidak tergenang; m= macak-macak; tg: tergenang

** setelah penggenangan awal di pertanaman pertama musim hujan 2015, yaitu pada akhir Februari sampai awal Mei 2015

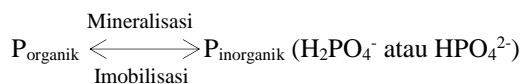
Gambar 1. Hubungan kadar fraksi-fraksi P dan sifat-sifat kimia tanah lainnya dengan kadar air kondisi lapang pada tanah sawah dengan IP 100%, 200% dan 300% selama masa pengairan 7 sampai 13 minggu setelah penggenangan awal.

Hubungan Fraksi P dengan Sifat Kimia Tanah

Berdasarkan hasil analisis regresi linier berganda, dari 5 sifat kimia tanah yang dievaluasi, yang berpengaruh paling nyata terhadap dinamika fraksi P pada IP 100% hanya kadar C_{org} terhadap fraksi-fraksi Pi (Tabel 3, persamaan (2), r = -0.496; p = 0.036*). Semakin rendah

kadar C_{org} maka semakin tinggi kadar fraksi-fraksi Pi. Menurunnya kadar C_{org} menunjukkan terjadinya dekomposisi bahan organik yang juga melepaskan ion hara dalam bentuk organik termasuk Po. Peningkatan kadar Po mendorong terjadinya mineralisasi Po menjadi Pi sehingga meningkatkan kadar Pi.

Secara umum, dalam tanah terjadi mineralisasi dan imobilisasi P secara berkesinambungan (Gupta *at al.*, 2007) menurut reaksi:



Sifat kimia tanah yang berpengaruh paling nyata terhadap dinamika fraksi P pada IP 200% adalah kadar C_{org} dan DHL secara simultan terhadap fraksi-fraksi Po (Tabel

3, persamaan (8), $R^2 = 0.418$; $p = 0.010^*$). Persamaan ini menunjukkan bahwa setiap penurunan 0.01% C_{org} dan peningkatan 0.01 S.cm^{-1} DHL secara simultan akan diikuti oleh peningkatan $1.23+0.57 = 1.8$ ppm Po. Peningkatan fraksi-fraksi Po tersebut diduga berasal dari proses dekomposisi jerami dan imobilisasi Pi dari pupuk P.

Kadar C_{org} , $\text{Fe}_{\text{terlarut}}$ dan Eh secara simultan berpengaruh sangat nyata dan paling nyata terhadap dinamika fraksi- fraksi Pi pada IP 300%.

Tabel 3. Persamaan regresi linier berganda hubungan antara fraksi P tanah (Y) dengan sifat-sifat kimia tanah (X) yang signifikan korelasinya pada tanah sawah dengan IP 100%, 200% dan 300% pada periode 7, 9, 11, dan 13 minggu setelah penggenangan awal

Y*	X*	r parsial	p	Persamaan*	R ² atau r	p	n
IP 100%							
(1) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Pi}+\text{NaOH-Po}+\text{HCl-Pi}}$	Eh	-0.212	0.413	$Y_{(1)} = 793.71 - 0.43 \text{ Eh}$	-0.209	0.406	18**
	C_{org}	-0.041	0.873	$- 12.84 C_{\text{org}}$			
(2) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaOH-Pi}+\text{HCl-Pi}}$	C_{org}			$Y_{(2)} = 601.46 - 128.48 C_{\text{org}}$	-0.496	0.036	18**
(3) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	C_{org}			$Y_{(3)} = 90.52 + 125.18 C_{\text{org}}$	0.423	0.080	18**
(4) $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	C_{org}			$Y_{(4)} = 87.12 + 126.22 C_{\text{org}}$	0.427	0.078	18**
IP 200%							
(5) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Pi}+\text{NaOH-Po}+\text{HCl-Pi}}$	DHL			$Y_{(5)} = 689.03 - 191.10 \text{ DHL}$	0.199	0.400	20
(6) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaOH-Pi}+\text{HCl-Pi}}$	pH			$Y_{(6)} = -487.28 + 165.23 \text{ pH}$	0.219	0.354	20
(7) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	C_{org}	0.562	0.012	$Y_{(7)} = 137.13 + 57.38 C_{\text{org}}$	0.417	0.010	20
	DHL	-0.451	0.053	$- 122.47 \text{ DHL}$			
(8) $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	C_{org}	0.563	0.012	$Y_{(8)} = 135.73 + 57.60 C_{\text{org}}$	0.418	0.010	20
	DHL	-0.451	0.052	$- 122.88 \text{ DHL}$			
IP 300%							
(9) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Pi}+\text{NaOH-Po}+\text{HCl-Pi}}$	pH	0.605	0.008	$Y_{(9)} = - 1080.73 + 253.97 \text{ pH}$ $+ 165.60 C_{\text{org}} - 8.50 \text{ Fe}_{\text{terlarut}}$	0.621	0.001	20
	C_{org}	0.684	0.002				
	$\text{Fe}_{\text{terlarut}}$	-0.563	0.015				
(10) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Pi}+\text{NaOH-Pi}+\text{HCl-Pi}}$	Eh	-0.772	0.000	$Y_{(10)} = 188.90 - 0.69 \text{ Eh}$ $+ 119.63 C_{\text{org}} - 4.68 \text{ Fe}_{\text{terlarut}}$	0.723	0.000	20
	C_{org}	0.682	0.002				
	$\text{Fe}_{\text{terlarut}}$	-0.463	0.053				
(11) $P_{\text{H}_2\text{O}+\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	Eh			$Y_{(11)} = 170.31 + 0.49 \text{ Eh}$	0.363	0.039	20
(12) $P_{\text{NaHCO}_3\text{-Po}+\text{NaOH-Po}}$	Eh			$Y_{(12)} = 168.91 - 0.49 \text{ Eh}$	0.465	0.03	20

* Kadar fraksi P dan $\text{Fe}_{\text{terlarut}}$ dalam ppm; C_{org} %; DHL S cm^{-1} ; ** 2 data outliers tidak digunakan

Persamaan (10) pada Tabel 3 ($R^2 = 0.723$; $p = 0.00^{**}$) menunjukkan bahwa setiap penurunan 1 mV Eh dan 0.01 ppm $\text{Fe}_{\text{terlarut}}$ serta peningkatan 0.01% C_{org} secara simultan akan meningkatkan kadar fraksi Pi sejumlah $0.69+1.19+0.05 = 1.93$ ppm. Peningkatan kadar Pi antara lain berasal dari ameliorasi jerami (C/N tinggi). Ameliorasi jerami meningkatkan kebutuhan oksigen untuk proses dekomposisinya dan menyebabkan kadar oksigen tanah lebih cepat berkurang sehingga proses reduksi lebih intensif dan semakin cepat menurunkan nilai Eh tanah.

Hubungan Sifat Kimia dan Fraksi P dengan IP dan KAL

Dosis P_2O_5 dan jerami yang merepresentasikan IP berpengaruh paling nyata terhadap Eh. Persamaan regresi (Tabel 4) menunjukkan bahwa penurunan 10 kg.ha^{-1} per musim dosis P_2O_5 akan meningkatkan 16 mV Eh jika peubah dosis jerami tetap dan peningkatan 100 kg ha^{-1} per musim dosis jerami akan menurunkan 1.0 mV Eh jika peubah dosis P_2O_5 tetap. Meningkatnya Eh menunjukkan perubahan kondisi tanah yang menjadi semakin oksidatif.

Ketersediaan P pada kondisi yang lebih oksidatif akan berkurang karena difiksasi oleh Fe^{3+} dalam bentuk FePO_4 yang sukar larut. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penambahan dosis P_2O_5 pada sawah penelitian kurang efisien karena P dari pupuk P_2O_5 sebagian besar

akan diubah menjadi bentuk P tidak tersedia yaitu FePO_4 sebagai akibat dari peningkatan Eh.

Dosis P_2O_5 dan KAL berpengaruh paling nyata terhadap fraksi Po. Persamaan regresi (Tabel 4) menunjukkan bahwa peningkatan 10 kg.ha^{-1} per musim dosis P_2O_5 akan meningkatkan 26 ppm fraksi-fraksi Po jika peubah KAL tetap dan peningkatan 1% KAL akan meningkatkan 3.6 ppm fraksi-fraksi Po jika peubah dosis P_2O_5 tetap.

Kadar Pi pada tanah sawah penelitian sudah cukup tinggi. Akibatnya, penambahan dosis pupuk P_2O_5 akan menstimulasi imobilisasi P oleh mikroba yang mengubah bentuk Pi menjadi Po. Setelah aplikasi pupuk fosfat yang bersifat mudah larut akan terjadi imobilisasi secara cepat terhadap Pi yang ditambahkan (Bünemann *et al.*, 2012).

Hubungan Produksi Padi Sawah dengan IP, KAL, Fraksi P dan Sifat Kimia Tanah

Hasil analisis regresi linier berganda (Tabel 5) menunjukkan bahwa dari faktor-faktor produksi padi sawah yang dievaluasi, yaitu IP yang direpresentasikan oleh dosis P_2O_5 dan jerami, praktik pengairan yang direpresentasikan oleh KAL, serta dinamika fraksi-fraksi P dan sifat-sifat kimia tanah lainnya, yang paling memengaruhi produksi padi sawah adalah KAL (Tabel 5, persamaan (2); $r = 0.785$; $p = 0.00^{**}$).

Berdasarkan persamaan (2) (Tabel 5), produksi padi akan meningkat 0.07 ton.ha^{-1} apabila KAL meningkat 1%.

Peningkatan KAL menurunkan Eh. Pada Eh lebih rendah, ketersediaan P, K, Fe, Mn dan Si yang merupakan hara esensial bagi padi sawah akan meningkat (Ponnamperuma,

1985) sehingga meningkatkan pertumbuhan dan produksi padi sawah.

Tabel 4. Persamaan regresi linier berganda hubungan antara fraksi P dan sifat-sifat kimia tanah (Y) dengan dosis jerami dan pupuk P serta KAL (X) yang signifikan korelasinya pada periode 7, 9, 11, dan 13 minggu setelah penggenangan awal

Y*	X*	r	p	Persamaan*	R ² atau r	p	n**
(1) Eh	P ₂ O ₅	0.699	0.000	Eh = -81.12 + 1.62 P ₂ O ₅	0.660	0.000	58
	Jerami	-0.331	0.077	- 0.02 Jerami			
(2) C _{org}	KAL			C _{org} = 0.83 + 0.02 KAL	0.448	0.000	58
(3) F _e terlarut	P ₂ O ₅	0.285	0.007	Fe ²⁺ = 19.87 + 0.07 P ₂ O ₅	0.509	0.000	58
	Jerami	-0.364	0.000	- 0.01 Jerami			
(4) DHL	KAL	0.225	0.023	DHL = 0.22 + 0.004 KAL	0.575	0.000	58
	Jerami	0.578	0.000	+ 3.72E ⁻³ Jerami			
(5) pH	P ₂ O ₅			pH = 5.26 + 0.001 P ₂ O ₅	0.264	0.045	58
(6) P _{H₂O+NaHCO₃-Po+NaOH-Po} atau Po ₍₁₎	P ₂ O ₅	0.609	0.000	Po ₍₁₎ = -260.00 + 2.58 P ₂ O ₅	0.453	0.000	58
	KAL	0.435	0.000	+ 4.12 KAL			
(7) P _{NaHCO₃-Po+NaOH-Po} atau Po ₍₂₎	P ₂ O ₅	0.608	0.000	Po ₍₂₎ = -208.93 + 2.62 P ₂ O ₅	0.456	0.000	58
	KAL	0.434	0.000	+ 3.61 KAL			
(8) P _{H₂O+NaHCO₃-Pi+ NaHCO₃-Po +NaOH-Pi+ NaOH-Po+HCl-Pi} atau P _{total}	P ₂ O ₅	0.487	0.000	P _{total} = 134.39 + 3.00 P ₂ O ₅	0.319	0.000	58
	KAL	0.321	0.015	+ 3.97 KAL			

* Fraksi P dan F_eterlarut dalam ppm; C_{org} %; DHL S cm⁻¹; dosis P₂O₅ dan jerami kg ha⁻¹musim⁻¹; KAL %; ** 2 data outliers tidak digunakan

Tabel 5. Persamaan regresi linier berganda hubungan antara produksi (Y) dengan dosis jerami dan pupuk P, KAL, fraksi P serta sifat-sifat kimia tanah (X) yang signifikan korelasinya pada periode 7, 9, 11, dan 13 minggu setelah penggenangan awal

Y*	X*	r	p	Persamaan*	R ² atau r	p	n**
(1) Produksi	P ₂ O ₅			Produksi = 6.66 - 0.03 P ₂ O ₅	-0.685	0.000	58
(2) Produksi	KAL			Produksi = -0.47 + 0.07 KAL	0.785	0.000	58
(3) Produksi	Eh	-0.518	0.000	Produksi = 4.78 - 0.01 Eh - 0.04 F _e terlarut + 1.97 DHL	0.764	0.000	58
	F _e terlarut	-0.425	0.001				
	DHL	0.529	0.000				
(4) Produksi	P _{H₂O+NaHCO₃-Po+NaOH-Po}			Produksi = 6.18 - 0.01 P _{H₂O+NaHCO₃-Po+NaOH-Po}	-0.269	0.041	58

* Produksi dalam ton ha⁻¹; fraksi P dan F_eterlarut ppm; DHL S cm⁻¹; dosis P₂O₅ dan jerami kg ha⁻¹ musim⁻¹; KAL %; ** 2 data outliers tidak digunakan.

SIMPULAN

Nilai Eh, pH, dan DHL, serta kadar Feterlarut, C_{org}, P_{NaHCO₃-Po} dan P_{NaOH-Po} pada IP 100% cenderung menurun, sedangkan P_{H₂O}, P_{NaHCO₃-Pi}, P_{NaOH-Pi} dan P_{HCl-P} cenderung meningkat dengan peningkatan KAL. Kadar P_{NaOH-Pi} dan P_{NaOH-Po}, fraksi P dan sifat-sifat kimia tanah lainnya kecuali DHL, pada IP 200% dan 300%, menunjukkan tren perubahan yang selaras, karena KAL pada kedua IP tersebut relatif sama. Dinamika fraksi-fraksi P pada ketiga IP terutama ditentukan oleh C_{org}. Kadar Pi pada IP 100% meningkat dengan menurunnya C_{org}. Penurunan C_{org} dan peningkatan DHL pada IP 200% diikuti oleh peningkatan Po. Penurunan Eh dan Feterlarut serta peningkatan C_{org} pada IP 300% meningkatkan Pi. Penurunan dosis P₂O₅ dan peningkatan dosis jerami menurunkan Eh. Faktor yang paling berpengaruh terhadap produksi padi sawah adalah KAL.

UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan terima kasih kepada G. Saputra, S. Yaenah, M. Afiton dan C.T. Hasibuan atas bantuannya dalam pengamatan lapang dan analisis laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Bünemann, E.K., A. Oberson, F. Liebisch, F. Keller, K.E. Annaheim, O. Huguenin-Elle and F. Frossard. 2012. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. *Soil Biol. Biochem.*, 51: 84-95.
- Chaudhari, P.R. and D.V. Abire. 2013. Electrical conductivity and dielectric constant as indication of available total macro and micro nutrients in the soil. *Intern. J. Physics. Math. Sci.*, 3: 13-17.
- Chong, Y.Q., L.Z. Yang, Z.H. Cao and S.H. Yin. 2009. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. *Geoderma*, 151: 31-41.
- Cyio, M.B. 2008. Efektifitas bahan organik dan tinggi genangan terhadap perubahan Eh, pH dan status Fe, P, dan Al terlarut pada tanah Ultisol. *Agroland.*, 15: 257-269.
- Duane, T., S. Gardiner and S. James. 2012. Wet soil redox chemistry as affected by organic matter and nitrate. *Am. J. Clim. Change.*, 1: 205-209.
- Ethan, S. 2015. Effect of flooding on chemistry of paddy soils. *J. Inovat. Sci. Eng. Techno.*, 2: 413-420.

- Fan, M.S., R.F. Liang, E.S. Zhang, S.H. Lu and X.J. Liu. 2008. Nutrient management strategy of paddy rice-upland crop rotation system. *Chinese J. Appl. Ecol.*, 19: 421-432.
- Gaol, M.D.L., M.S. Supriadi dan M. Sambiring. 2013. Survey dan pemetaan status fosfat lahan sawah pada daerah irigasi Bahal Gajah/Tiga Bolon, Kecamatan Sidamanik Kabupaten Simalungun. *Agroekoteknologi*, 1: 1226-1234.
- Gupta, R.K., J.K. Ladha, J. Singh, G. Singh and H. Pathak. 2007. Yield and phosphorus transformation in a rice-wheat system with crop residue and phosphorus management. *Soil. Sci. Am. J.*, 7: 1500-1507.
- Hartono, A., S. Funakawa and T. Kosaki. 2006. Transformation of added phosphorus to acid upland soil with different soil properties in Indonesia. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 52: 734-744.
- Idris, O.A.A. and S. Ahmed. 2012. Phosphorus sorption capacity as a guide for phosphorus availability of selected Sudanese soil series. *African. Crop Sci.*, 20: 59-65.
- Iranpour, M., A. Lakzian and R. Korrasami. 2014. Effect of cadmium and organic matter on soil pH, electrical conductivity and their roles in cadmium availability in soil. *JMEAST*, 18: 643-646.
- Nayak, P., D. Patel, B. Ramakrishnan, A.K. Mishra and R.N. Samantaray. 2009. Long-term application effects of chemical fertilizer and compost on soil organic carbon under intensive rice-rice cultivation. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 83: 259-269.
- Pampolino, M.F., E.V. Laureles, H.C. Gines and R.J. Buresh. 2008. Soil carbon and nitrogen changes in long-term continuous lowland rice cropping. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2: 798-807.
- Ponnamperuma, F.N. 1978. The chemistry of submerged soils and the growth of rice, p. 421-441 *In Soil and Rice*. International Rice Research Institute. Los Banos.
- Ponnamperuma, F.N. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soil relative to soil fertility, p. 71-89 *In Wetland Soils: Characterization, Classification and Utilization*. International Rice Research Institute. Los Banos.
- Sahrawat, K.L. 2012. Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice system. *Ach. Agron. Soil Sci.*, 58: 423-436.
- Tiessen, H. and J.O. Moir. 2008. Characterization of available P by sequential extraction, p. 293-306 *In: M.R. Carter and E.G. Gregorich (Eds.). Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton.
-