

Model Hubungan Fraksi P dengan Sifat Kimia Tanah Sawah pada Tiga Kelompok Bahan Induk Berbeda di Jawa Barat

Correlation Model between Phosphorus Fractions with Chemical Properties of Paddy Soil of Three Types of Parent Materials in West Java

Bambang Susanto¹, Arief Hartono², Syaiful Anwar², Atang Sutandi², dan Supiandi Sabiham²

¹ Peneliti Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa Barat, Jl. Kayuambon No 80 Lembang, Bandung Barat, 40391 telp. 022-2786238, email: bptp-jabar@litbang-deptan.go.id

² Dosen Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB, Jalan Meranti, Kampus IPB Darmaga 16680

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 20 April 2018

Direview: 24 Mei 2018

Disetujui: 26 Desember 2018

Kata kunci:

Akumulasi P
Fraksionasi
Fraksi P
Bahan induk
Tanah sawah

Keywords:

P accumulation
Fractionation
P fractions
Parent material
Paddy field

Direview oleh:

Markus Anda, Neneng L.
Nurida

Abstrak. Akumulasi P tanah sawah di Jawa Barat sudah sangat tinggi dan ini menyebabkan P tersedia yang dapat dimanfaatkan tanaman menjadi sedikit. Bahan induk (aluvium, sedimen dan vulkan) berpengaruh terhadap dinamika, proses akumulasi, dan transformasi P di dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk fraksi P dan membuat model persamaan regresi untuk mengestimasi hubungan fraksi P dengan beberapa sifat kimia tanah. Metode penelitian yang digunakan yaitu survei lapang untuk pengambilan contoh tanah dan analisis tanah di laboratorium. Lokasi penelitian adalah tanah sawah di Jawa Barat. Pengambilan contoh tanah dilakukan secara komposit pada tiga garis transek dari utara ke selatan wilayah Jawa Barat pada 60 lokasi pada lapisan tanah 0-20 cm. Penetapan fraksi P tanah di laboratorium mengikuti prosedur fraksionasi secara sekuensial sesuai metode Tiessen dan Moir yang dimodifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akumulasi P tanah sawah di Jawa Barat didominasi fraksi residual-P, NaOH-P_o dan NaOH-P_i. Ketiga fraksi ini paling banyak ditemukan pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik, kemudian sedimen dan terakhir aluvium. Ada tiga faktor utama yang berpengaruh terhadap distribusi fraksi P, yaitu: 1) Fe dan Al oksida, 2) C-organik dan kadar klei tanah, dan 3) basa-basa dapat ditukar, terutama Ca_{ad}. Model persamaan regresi yang cukup baik dalam mengestimasi fraksi P tanah sawah adalah model estimasi untuk fraksi NaOH-P_i dan NaOH-P_o dengan nilai $R^2 > 0,4$ pada taraf $p < 0,05$.

Abstract. The accumulation of P in paddy fields of West Java is high, causing low available P for plants. The parent material (alluvium, sediment and volcanic materials) influences the dynamics, accumulation, and transformation of P in the soil. This study aims to determine the relationship of P fractions with selected soil chemical properties. The research method used was a field survey for soil sampling and soil analysis in the laboratory. The research location is paddy fields in West Java. Composite soil samples from 60 locations from three transects extending from north to south of the West Java where taken from a soil depth of 0-20 cm. Determination of soil P fraction follows the sequential fractionation procedure according to the modified Tiessen and Moir method. The results showed that the accumulation of P in paddy fields of West Java was dominated by residual-P, NaOH-P_o and NaOH-P_i fractions. These three fractions are most commonly found in the group of volcanic parent materials, then followed by sedimentary and alluvium parent materials. There were three main factors that influence the distribution of the P fraction, namely: 1) Fe and Al oxides both crystalline and amorphous, 2) organic C and soil clay content, and 3) base saturation especially exchangeable Ca. The regression equation models which are quite suitable for estimating the P fraction of paddy soil are the estimation models for NaOH-P_i and NaOH-P_o fractions with $R^2 > 0.4$ at $p < 0.05$.

Pendahuluan

Pemberian pupuk fosfor (P) pada tanah sawah sekitar 80-90% tersimpan dalam tanah dalam berbagai bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman dan hanya sekitar 10-20% yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman untuk tumbuh dan berproduksi (Gikonyo *et al.* 2008), sedangkan pada lahan kering atau padang rumput sekitar 70% tersimpan dalam tanah dan 30% tersedia bagi tanaman dalam bentuk P-anorganik dan P-organik (McLaren *et al.* 2015). Menurut Boschetti *et al.* (2008); Zamuner *et al.* (2008); Chakraborty *et al.* (2011); Kang *et al.* (2011), efisiensi pemupukan P sangat rendah (sekitar 10-15%) disebabkan karena P dari pupuk inorganik dan organik cenderung

terakumulasi, terjadinya perubahan konsentrasi larutan tanah dan P berasosiasi dengan mineral tanah dan bahan organik. Pupuk P yang diberikan di dalam tanah akan ditransformasikan menjadi senyawa-senyawa Al-P, Fe-P dan Ca-P, bahkan sebagiannya lagi menjadi bentuk-bentuk P organik baik yang bersifat labil ataupun terikat secara kemosorpsi oleh Al dan Fe hidrous oksida (Oberson *et al.* 2001; Schmidt *et al.* 1996; Verma *et al.* 2005; Zheng *et al.* 2002; Hartono *et al.* 2006; Tiessen dan Moir 2007; Jan *et al.* 2015). Dinamika P di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh teknik pengelolaan pertanian, sistem pengelolaan hara, pola tanam dan perubahan penggunaan lahan (Chen *et al.* 2003; Aguiar *et al.* 2013; Prakash *et al.* 2017).

Penelitian tentang akumulasi hara P telah banyak dilakukan, antara lain: Park *et al.* (2004), Li *et al.* (2015)

* Corresponding author: bamsusanto40@gmail.com

melakukan penelitian akumulasi P tanah sawah masing-masing di Park Korea dan China, Qin *et al.* (2010), Yuan *et al.* (2015) melakukan penelitian akumulasi P pada tanah sawah masam, Xie *et al.* (2004) dan Yang *et al.* (2006) melakukan penelitian akumulasi P pada tanah kalkareus, McLaren *et al.* (2015) melakukan penelitian akumulasi pada tanah padang rumput yang diberi pupuk. Di Indonesia, Sofyan *et al.* (2004) melakukan penelitian akumulasi P pada tanah sawah di Pulau Jawa. Enam tahun kemudian Setyorini *et al.* (2010) melaporkan bahwa telah terjadi akumulasi fosfor pada lahan sawah di wilayah Jawa Barat dan Banten, sekitar 84% dari total luas lahan sawah yang ada (1.124.825 ha) tergolong sedang sampai tinggi dan hanya 16% yang tergolong rendah status fosfornya.

Penelitian tentang fraksi P tanah merupakan aspek yang sangat penting untuk menggali mekanisme akumulasi P di lahan pertanian dan mengurangi resiko dampaknya bagi lingkungan perairan (Yuan *et al.* 2015). Taghipour dan Jalali (2014) melakukan penelitian kinetika pelepasan P dan fraksionasi P pada tanah kalkareus (pH tinggi). McLaren *et al.* (2015) menggunakan metode fraksionasi untuk mengidentifikasi bentuk P yang terakumulasi pada tanah padang rumput. Cavalcante *et al.* (2018) melakukan fraksionasi P untuk mengetahui bentuk fraksi P pada sedimen bendungan. Hartono *et al.* (2015) melakukan penelitian tentang bentuk-bentuk fraksi fosfor pada tanah sawah di Pulau Jawa yang hasilnya menunjukkan adanya akumulasi fraksi fosfor dalam bentuk NaOH-P_i yang terikat secara kemisorpsi dengan Fe dan Al pada permukaan tanah dan bentuk residual-P sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Selanjutnya Hartono *et al.* (2015) menyatakan bahwa kadar Fe dan Al baik yang terekstrak *dithionit-citrate-bicarbonate* (DCB) maupun ammonium oksalat serta $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$ dapat digunakan untuk memprediksi kadar fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, -P_o , NaOH-P_i , -P_o pada tanah sawah di Jawa.

P tersedia dan fraksi P tanah sangat dipengaruhi sumber batuan dan tingkat perkembangan bahan induk (Prasetyo dan Setyorini 2008; Augusto *et al.* 2017; Nishigaki *et al.* 2018), sifat fisikokimia tanah (Mehmood *et al.* 2015; Hou 2018; Maharjan *et al.* 2018) dan jenis penggunaan lahan (Prakash *et al.* 2017). Tanah sawah dari endapan aluvial mempunyai komposisi mineral dan sifat kimia yang sangat bervariasi, dipengaruhi oleh jenis bahan endapan yang menjadi bahan induk tanahnya. Secara umum tanah sawah alluvial mempunyai sifat kimia yang relatif baik, karena pembentukan tanahnya terjadi di daerah cekungan ataupun dataran yang merupakan areal terjadinya akumulasi bahan dan pengendapan. Oleh karenanya kandungan P potensialnya bervariasi mulai sangat rendah ($<15 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) hingga sangat tinggi (>60

$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$). Prakash *et al.* (2017) melaporkan bahwa tanah sawah dari endapan aluvial yang ditanami padi-gandum mengandung fraksi P anorganik paling tinggi sekitar 92,2-94,6% dari total P tanah. Sementara itu, tanah sawah berbahan induk vulkan masam mengandung total P_2O_5 yang rendah, sedangkan tanah sawah yang berbahan induk vulkan basa mengandung P tersedia dan total P_2O_5 yang tinggi (Anda *et al.* 2015). Daly *et al.* (2015) melakukan penelitian jerapan P, potensial P dan ketersediaan P pada tanah padang rumput yang berbeda bahan induk dan sifat kimia tanahnya, hasilnya menunjukkan bahwa tanah yang berbahan induk kalkareus memiliki kapasitas penyangga P yang lebih tinggi dibandingkan yang non kalkareus sehingga memiliki cadangan P yang cukup tinggi.

Lahan sawah di Jawa Barat berkembang dari tiga kelompok bahan induk yang berbeda yaitu aluvium, sedimen dan vulkan (BBSDLP 2014). Lahan sawah Jawa Barat bagian utara (Pantura) dan bagian selatan didominasi bahan aluvial berasal dari sistem pengendapan sungai yang panjang dengan berbagai jenis bahan hasil erosi (Prasetyo dan Setyorini 2008). Bagian tengah berada pada ketinggian 400-1162 m dpl didominasi bahan sedimen dari landform tektonik dan bahan vulkanik tua. Tanah sawah di bagian tengah Jawa Barat terbentuk dari lahan kering umumnya terdapat di daerah dataran rendah, dataran tinggi vulkan atau non vulkan yang pada awalnya merupakan lahan kering yang tidak pernah jenuh air. Bahan vulkan dapat mempengaruhi sifat tanah sawah melalui dua cara, yaitu mempengaruhi bahan induk tanah beserta tanah sawahnya dan mempengaruhi tanah sawah saja (Prasetyo *et al.* 2007).

Untuk mengetahui lebih detail mekanisme akumulasi P tanah sawah di Jawa Barat pada berbagai bahan induk yang berbeda diperlukan penelitian fraksionasi P yang dihubungkan dengan sifat kimia tanahnya pada tiga bahan induk yang berbeda dan menyederhanakan hubungan tersebut dalam suatu model regresi sebagaimana model yang dikembangkan oleh Achat *et al.* (2016) untuk memprediksi ketersediaan P-anorganik pada tanah lahan kering dengan memasukkan data sifat-sifat tanah ke dalam model regresi yang dihasilkan dan penelitian Augusto *et al.* (2017) yang meneliti hubungan antara ketersediaan P-anorganik dan P-organik dengan sifat fisikokimia bahan induk pada tanah dataran rendah daerah tropis menggunakan model persamaan sederhana untuk mengestimasi sumber P tersedia dalam bentuk P-anorganik dan P-organik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat model estimasi fraksi P tanah sawah yang berkembang dari tiga jenis bahan induk berbeda di Jawa Barat.

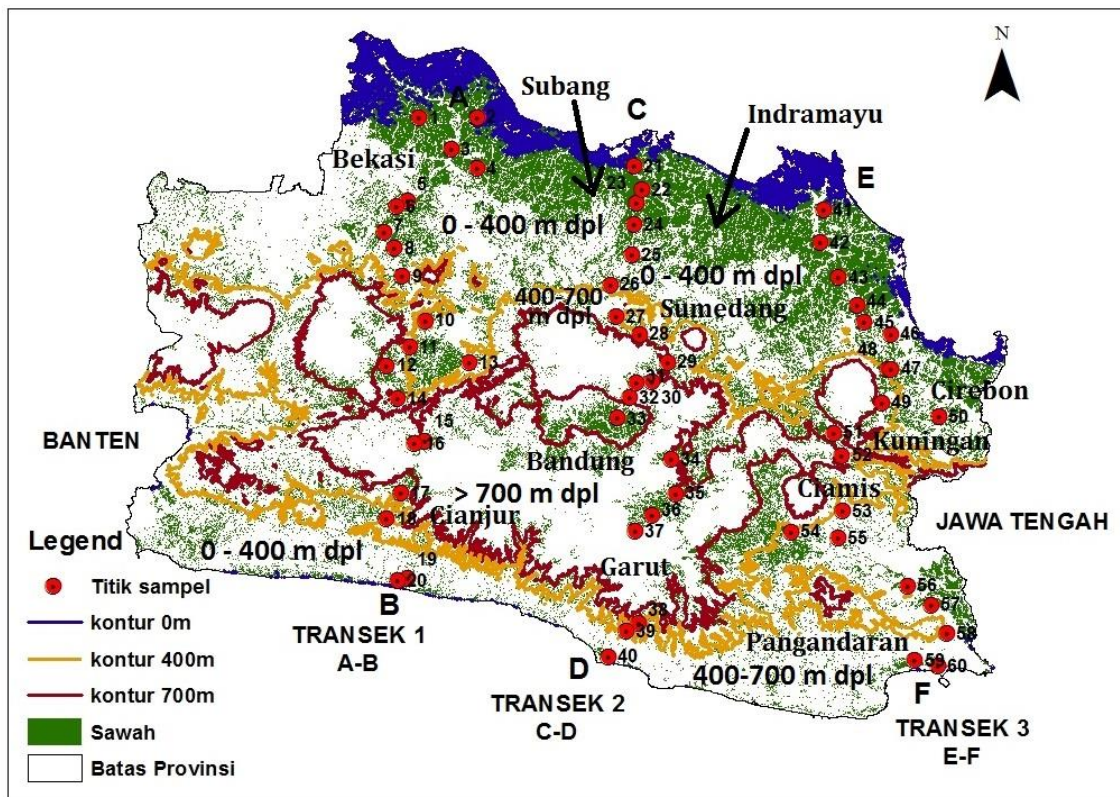
Bahan dan Metode

Sampel Tanah

Lokasi penelitian meliputi lahan sawah di wilayah Provinsi Jawa Barat. Penelitian di lapangan dilakukan melalui survei lapangan untuk pengambilan contoh tanah komposit dengan kedalaman 0-20 cm. Contoh tanah komposit diambil di 60 titik pada tiga transek dari utara ke selatan Jawa Barat (Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3). Transek 1 diambil sebanyak 20 titik sampel meliputi wilayah Karawang, Bekasi, Bogor Timur, Cianjur utara sampai Cianjur selatan. Transek 2 diambil sebanyak 20 titik sampel meliputi wilayah Subang, Sumedang, Bandung, Garut utara sampai selatan. Transek 3 diambil sebanyak 20 titik sampel meliputi wilayah Indramayu, Cirebon, Kuningan, Majalengka, Ciamis dan Pangandaran.

Penentuan 60 titik sampel komposit dengan tiga transek dari utara ke selatan Jawa Barat secara *purposive*

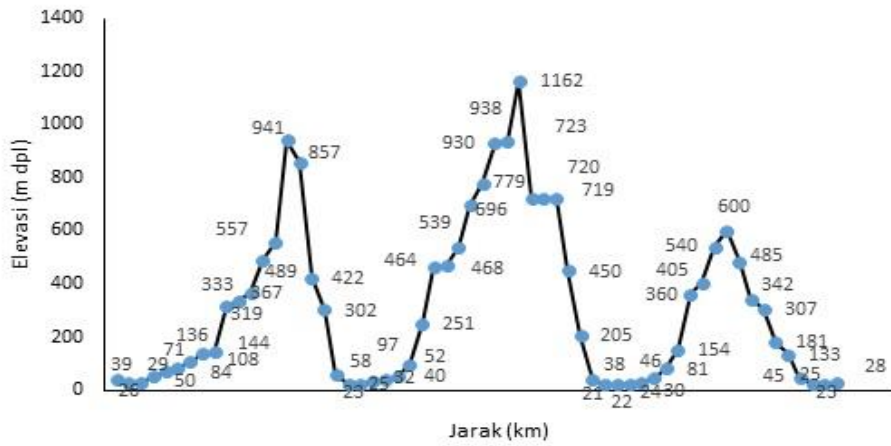
sampling dengan mempertimbangkan: 1) Peta Administrasi Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (Bakosurtanal 2009), 2) Peta Penggunaan Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Skala 1:10.000 (Pusdatin Kementan RI 2014), 3) Peta Status Hara Fosfat Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat dan Banten Skala 1:500.000 (Setyorini *et al.* 2010), 3) Data SRTM Provinsi Jawa Barat (Bakosurtanal 2003), dan 5) Peta Tanah Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (BBSDLP 2014). Data SRTM digunakan untuk membuat peta kontur sehingga diperoleh informasi ketinggian tempat atau elevasi per lokasi titik sampel. Untuk pengecekan titik ketinggian di setiap lokasi digunakan GPS (*Global Positioning System*). Informasi bahan induk untuk setiap lokasi titik sampel diperoleh dari database peta tanah (BBSDLP 2014). Dengan software Arc.GIS 10.1 dilakukan *overlay* (tumpang tindih) kelima peta di atas yang hasilnya digunakan untuk menentukan 60 titik sampel dan penentuan transek.



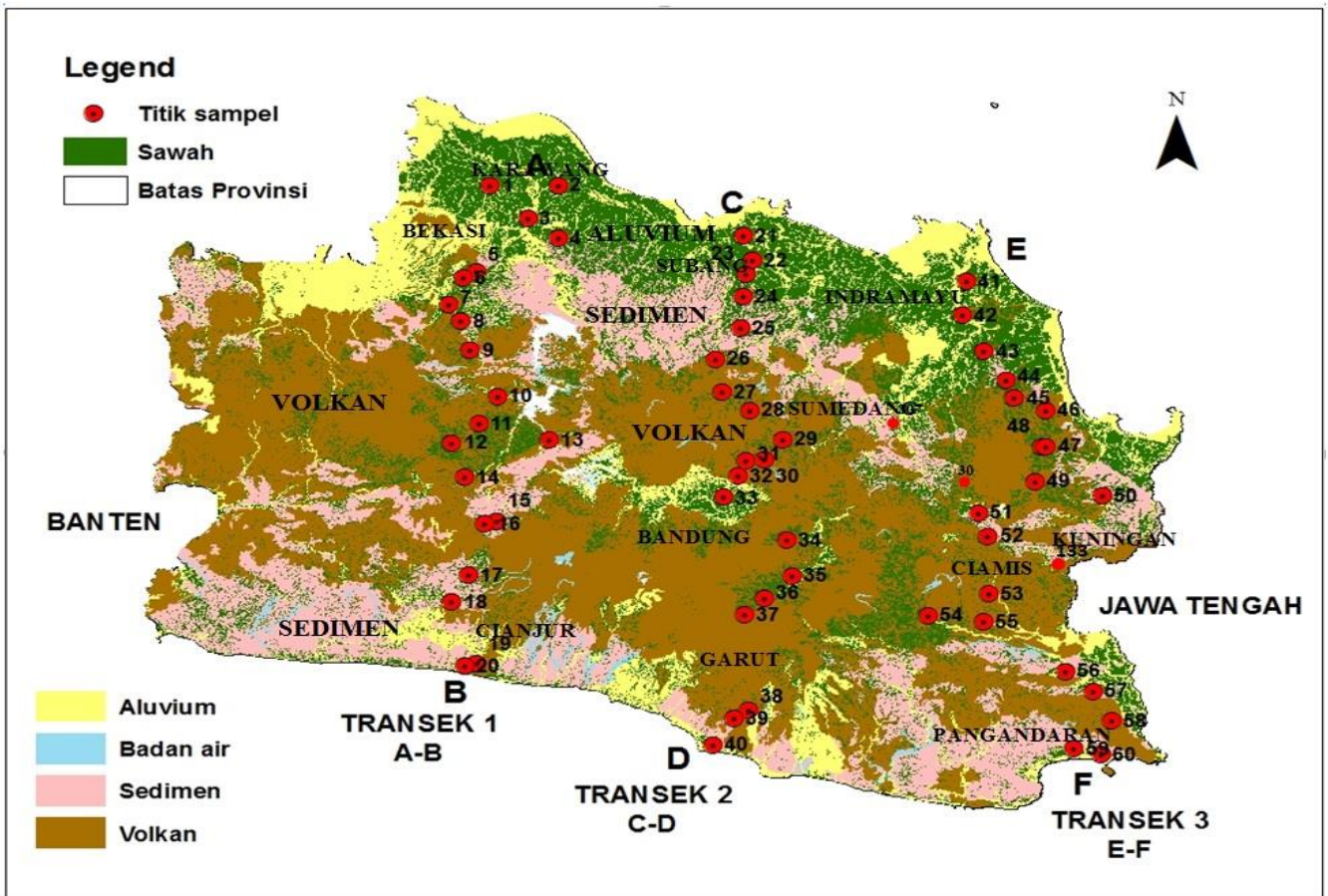
Gambar 1. Peta sebaran titik sampel komposit tanah sawah pada berbagai elevasi (m dpl) di tiga transek dari Utara ke Selatan (A-B, C-D, E-F) Jawa Barat

Picture 1. Distribution Map of composite soil sample of paddy field on different elevation (m asl) in three transects from North to South (A-B, C-D, E-F) of West Java

- Sumber:
- Peta Administrasi Digital Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (Bakosurtanal 2009)
 - Peta Penggunaan Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Skala 1:10.000 (Pusdatin Kementan RI 2014)
 - Data SRTM Jawa Barat (Bakosurtanal 2003)



Gambar 2. Grafik elevasi (m dpl) sebaran titik sampel pada tiga transek Utara ke Selatan Jawa Barat
 Picture 2. Graph of elevation (m asl) of composite soil sample distribution on three transects from north to south of West Java



Gambar 3. Peta sebaran titik sampel komposit tanah sawah pada tiga bahan induk tanah berdasarkan transek Utara ke Selatan Jawa Barat (Aluvium 17 sampel, Sedimen 14 sampel, Vulkanik 29 sampel)
 Picture 3. Distributin map of composite soil sample of paddy field on three parent materials based on trnssect from North to South of West Java (alluvium 17 samples, Sedimen 14 samples, volcanic 29 samples)

Sumber:

- Peta Administrasi Digital Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (Bakosurtanal 2009)
- Peta Penggunaan Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Skala 1:10.000 (Pusdatin Kementan)

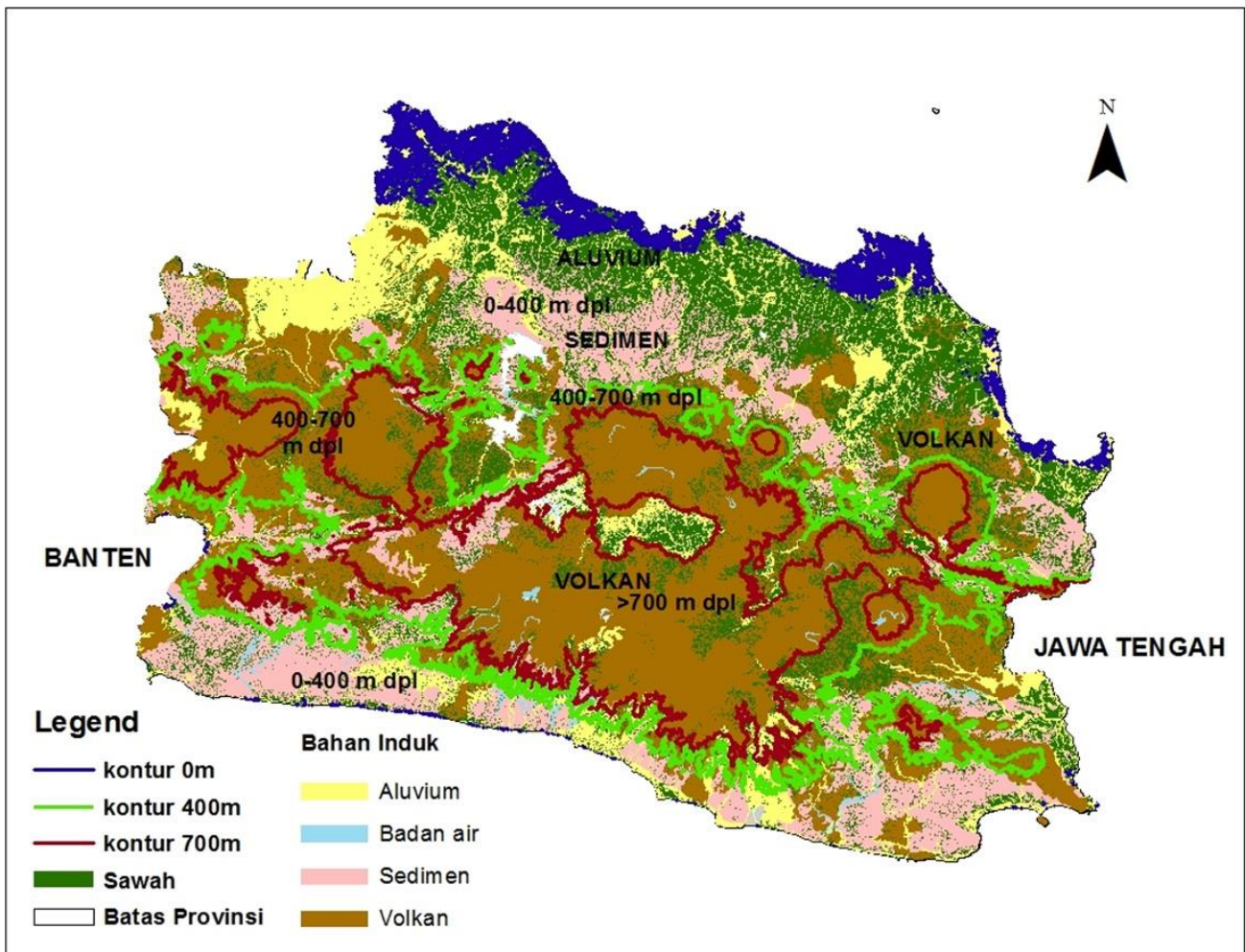
Metode pengambilan contoh tanah komposit di lapangan (60 titik pengamatan) menggunakan sistem acak dari luasan lahan sawah kurang lebih satu hektar yang kondisinya homogen diambil 5-8 titik menggunakan bor tanah tipe belgi dengan kedalaman 0-20cm, kemudian dikompositkan dan diambil kurang lebih 1 kg dan dimasukkan kedalam kantong plastik dan diberi label untuk dianalisis di laboraorium.

Analisis Beberapa Sifat Kimia Tanah

Analisis sifat kimia tanah dilakukan di Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor terhadap beberapa sifat kimia tanah yang dianggap berperan dalam transformasi P di dalam tanah. Sifat kimia tanah awal yang diukur di laboratorium antara lain: pH

H₂O, C-organik (Walkley and Black), N-total (Kjedahl), P HCl 25%, P Bray-I, KTK (NH₄OAc pH 7), K dan Na dapat ditukar ditetapkan dengan *flame photometer*, Ca dan Mg dapat ditukar ditetapkan dengan AAS (*atomic absorption spectrophotometry*), dan tekstur tanah tiga fraksi (pasir, debu, liat) menggunakan metode pipet. Analisis sifat kimia tanah yang dilakukan mengacu pada Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Air, Tanaman dan Pupuk (Balai Penelitian Tanah 2005).

Kadar Fe Al terekstrak *dithionite-citrate-bicarbonate* (DCB) (Fe_d dan Al_d) ditetapkan sesuai metode Mehra and Jackson (1960). Kadar Fe Al terekstrak oksalat (Fe_o dan Al_o) ditetapkan dengan ekstraksi 0,3 mol L⁻¹ amonium oksalat pada pH 3 selama 4 jam dalam ruang gelap (McKeague and Day 1966). Ekstrak Fe and Al dalam bentuk Fe_d, Al_d, Al_o dan Fe_o disaring menggunakan



Gambar 4. Peta sebaran lahan sawah pada tiga jenis bahan induk yang berbeda (alluvium, sedimen, vulkan) di Jawa Barat

Picture 4. Distribution Map of paddy field on different parent materials (alluvium, sediment, volcanic) in West Java

Sumber: - Peta Administrasi Digital Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (Bakosurtanal 2009)
 - Peta Penggunaan Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Skala 1:10.000 (Pusdatin Kementan RI 2014)
 - Data SRTM Jawa Barat (Bakosurtanal 2003)
 - Peta Tanah Provinsi Jawa Barat Skala 1:250.000 (BBSDLP 2014)

saringan dengan ukuran 0,45 µm. Kadar Fe_d dan Fe_o kemudian ditetapkan dengan AAS, sedangkan Al_d dan Al_o ditetapkan menggunakan metode kolorometri.

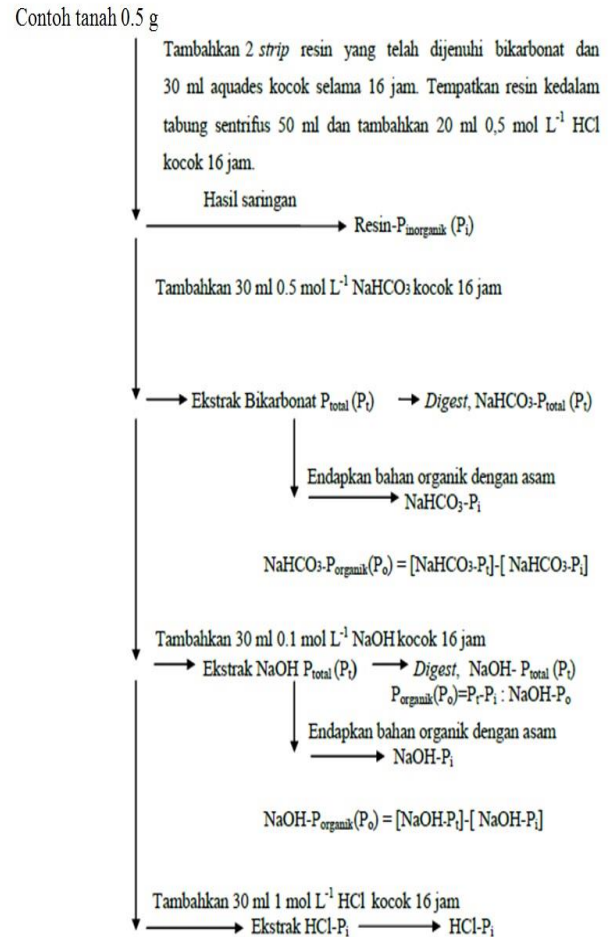
Penetapan Fraksi P

Prosedur penetapan fraksi P secara sekuensial mengacu pada prosedur fraksionasi yang dilakukan oleh Hedley *et al.* (1982) yang dimodifikasi oleh Tiessen dan Moir (1993), Hartono *et al.* (2006) dan Hartono *et al.* (2015). Prosedur ini dapat mengkarakterisasi fraksi P-anorganik (P_i) dan P-organik (P_o) yang didasarkan pada kelarutannya. Metode fraksionasi secara sekuensial yang dilakukan sebagai berikut:

- (i) resin strip dijenuhi bikarbonat (resin-P_{inorganik}/P_i) yaitu fraksi yang berada dalam larutan tanah atau sumber P_i terlarut yang siap tersedia untuk tanaman (Tiessen *et al.* 1984; Yang dan Post 2011)
- (ii) P_i and P_{organik} (P_o) terekstrak 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃ yaitu P yang berkorelasi kuat dengan P yang diserap oleh tanaman dan mikroba, NaHCO₃-P_i merupakan sumber P_i yang dapat dilepaskan melalui pertukaran ligan dengan ion bikarbonat dan sumber P_i ini tersedia bagi tanaman dalam waktu yang pendek (Yang dan Post 2011), sedangkan NaHCO₃-P_o merupakan sumber P_o yang dapat dimanfaatkan tanaman setelah mengalami mineralisasi (Tiessen dan Moir 2007)
- (iii) P_i and P_o terekstrak 0.1 mol L⁻¹ NaOH yaitu P yang terikat lebih kuat secara kemosorpsi pada permukaan Fe and Al berbentuk amorf atau kristalin dan merupakan sumber P_i dan P_o agak labil (Tiessen dan Moir 2007) yang sedikit tersedia bagi tanaman (Bunemann 2008)
- (iv) P_i terekstrak 1 mol L⁻¹ HCl yaitu berbentuk Ca-P yang merupakan bagian dari mineral primer apatit dengan kelarutan rendah dan hanya dapat dimanfaatkan tanaman setelah dilepaskan melalui pelapukan (Yang dan Post 2011).

Penetapan P-total dilakukan secara terpisah menggunakan metode pengabuan basah menggunakan asam nitrat dan asam perklorat. Residual-P ditetapkan dengan mengurangkan total-P dengan penjumlahan dari resin-P_i, NaHCO₃-P_i, -P_o, NaOH-P_i, -P_o, dan HCl-P_i. Residual-P diinterpretasikan sebagai *occluded* P (P_i dan P_o yang dijerap pada permukaan Fe dan Al oksida dalam agregat tanah) dan rekalsitran berbentuk anorganik dan organik (Tiessen and Moir 1993; Dobermann *et al.* 2002; Velasquez *et al.* 2016a). Velasquez *et al.* (2016b), Costa *et al.* (2016) dan Herrera *et al.* (2016) mengelompokkan fraksi P menjadi tiga yaitu: (i) fraksi P labil (Resin-P_i, NaHCO₃-P_i dan -P_o), (ii) fraksi P agak labil (NaOH-P_i dan -P_o), dan (iii) fraksi P tidak labil (HCl-P_i dan Residual-P/*occluded* P). Prosedur penetapan fraksionasi fosfor

dijelaskan pada Gambar 5. P dalam larutan ditetapkan sesuai dengan prosedur dari Murphy and Riley (1962).



Gambar 5. Prosedur fraksionasi P tanah (Hedley *et al.* 1982; Tiessen dan Moir 1993; Hartono *et al.* 2015)

Picture 5. Procedure of soil P fractionation (Hedley *et al.* 1982; Tiessen dan Moir 1993; Hartono *et al.* 2015)

Analisis Statistik

Data fraksi P hasil analisis laboratorium kemudian dikorelasikan dengan data sifat kimia tanah. ANOVA (*Analysis of Variance*) digunakan untuk menguji pengaruh bahan induk terhadap masing-masing fraksi P. PCA (*Principle Component Analysis*) digunakan untuk menentukan variabel-variabel sifat kimia yang paling berpengaruh terhadap distribusi fraksi P tanah sawah di Jawa Barat dan analisis regresi metode stepwise untuk membuat model matematik yang menjelaskan hubungan fraksi P dengan sifat kimia tanah. Alat statistik yang digunakan adalah program SPSS versi 20.

Hasil dan Pembahasan

Bahan induk tanah sawah

Berdasarkan hasil overlay peta penggunaan lahan sawah (Pusdatin Kementan 2014) dan peta tanah diketahui bahwa lahan sawah di Jawa Barat berkembang pada tiga bahan induk yang berbeda yaitu: aluvium, sedimen dan vulkanik seperti Gambar 4 (BBSDLP 2014). Bahan aluvium di lokasi penelitian berupa endapan liat dari dataran banjir sungai meander, dataran aluvial, lahan koluvial, basin lakustrin, basin aluvial dan lahan aluvio-koluvial. Bahan sedimen berupa batupasir, batuliat dan batupasir, batu gamping, batuliat dan batugamping, batuliat berkapur, dan batuliat berkapur dan batupasir berasal dari dataran tektonik, dataran tektonik datar, dataran tektonik berombak, dataran tektonik bergelombang, perbukitan tektonik dan perbukitan karst. Bahan vulkanik berupa andesit, andesit dan basalt, serta andesit, basalt dan tuf berasal dari dataran vulkan, dataran vulkan tua, aliran lahar subresen, lereng vulkan bawah, lereng vulkan tengah, perbukitan vulkan tua dan pegunungan vulkan tua (BBSDLP 2014).

Lahan sawah yang berkembang dari endapan alluvial sangat potensial karena berasal dari hasil pengendapan atau akumulasi dan pada umumnya datar serta dekat dengan sumber air atau sungai. Tanah sawah dari endapan aluvial mempunyai komposisi mineral dan sifat kimia yang sangat bervariasi, dipengaruhi oleh jenis bahan endapan yang menjadi bahan induk tanahnya. Secara umum tanah sawah aluvial mempunyai sifat kimia yang relatif baik, karena pembentukan tanahnya terjadi di daerah cekungan ataupun dataran yang merupakan areal terjadinya akumulasi bahan dan pengendapan (Prasetyo dan Setyorini 2008). Di lokasi penelitian bahan aluvium berasal dari endapan sungai-sungai besar yang ada di Jawa Barat seperti: Citanduy, Cimanuk dan Citarum. Sungai Citanduy mengalir dari hulu yang berada di antara Gunung Sawal dan kompleks Gunung Galunggung, Gunung Telaga Bodas, Gunung Cakrabuana dan Gunung Sadakeling dan bermuara di dekat kota Cilacap menuju ke Samudra Hindia membentuk suatu delta yang disebut "Muara Citanduy". Cimanuk adalah sungai yang berada di bagian timur Provinsi Jawa Barat. Cimanuk berhulu di Pegunungan Mandalagiri di Kabupaten Garut pada ketinggian sekitar 1700 meter di atas permukaan laut (mdpl), mengalir ke arah timur laut sepanjang 180 km dan bermuara di Laut Jawa di Kabupaten Indramayu. Citarum adalah sungai terpanjang dan terbesar di Tatar Pasundan Provinsi Jawa Barat. Panjang aliran sungai ini sekitar 300 km. Hulu Citarum berada di lereng Gunung Wayang, di tenggara Kota Bandung, di wilayah

Desa Cibereum, Kertasari, Bandung, dan muaranya di Ujung Karawang.

Lahan sawah yang berkembang dari bahan sedimen berupa batupasir, batuliat dan batugamping maupun campuran dari ketiganya di wilayah Jawa Barat berada pada landform tektonik dengan topografi berombak sampai berbukit, sehingga lahan sawahnya berbentuk teras-teras dengan luasan yang kecil. Jenis tanah yang berkembang pada bahan sedimen antara lain: inseptisol, alfisol, ultisol dan oxisol yang menurut Prasetyo (2009) disebut tanah-tanah merah atau tanah marginal menurut Suharta (2010). Pada umumnya tanah ini sudah mengalami proses pelapukan pada tingkat lanjut, sehingga mineral pasirnya didominasi oleh mineral tahan lapuk seperti kuarsa, opak, dan mineral liatnya didominasi oleh mineral dengan muatan tergantung pH, seperti kaolinit yang disertai gibsit, goethit dan hematit. Tanah ini bereaksi sangat masam hingga agak alkali, dengan kandungan basa-basa dapat tukar rendah, kapasitas tukar kation bervariasi dari sangat rendah hingga tinggi, dan berkorelasi positif dengan C-organik dalam tanah (Prasetyo 2009; Suharta 2010).

Lahan sawah yang berkembang dari bahan vulkan berupa andesit, basalt dan tuf dari vulkan tua, pada umumnya menghasilkan jenis tanah yang berwarna merah memiliki pH agak masam. Tanah merah yang terbentuk dari bahan vulkan andesitik-basaltik dan bahan batu kapur akan cenderung mempunyai kandungan fraksi liat yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh komposisi awal mineral dari bahan induk tersebut yang kaya akan mineral mudah lapuk, sehingga ketika tanah berkembang menjadi tanah merah, mineral mudah lapuk tersebut sudah melapuk dari fraksi pasir ke fraksi liat. Sebaliknya, tanah merah yang mempunyai bahan induk bersifat masam seperti batuan sedimen pasir, batuan beku granit ataupun batuan tufa, akan cenderung mempunyai kandungan fraksi pasir yang tinggi, karena batuan tersebut didominasi oleh mineral yang tahan terhadap pelapukan seperti kuarsa dan opak, sehingga bila pelapukan berlanjut mineral tahan lapuk kuarsa dan opak yang tersisa pada fraksi pasirnya (Prasetyo 2009).

Sifat kimia tanah sawah

Beberapa sifat kimia tanah sawah yang berkembang dari tiga bahan induk yang berbeda di Jawa Barat disajikan pada Tabel 1. Secara umum tekstur tanah sawah di Jawa Barat tergolong halus dengan kadar klei yang tinggi berkisar 25-71% dengan nilai rerata 52%. Nilai rerata kadar klei paling tinggi adalah tanah sawah yang berbahan induk aluvium (58%) diikuti sedimen (52%) dan vulkan (48%). Tingginya kadar klei tanah sawah berbahan

aluvium disebabkan adanya endapan liat yang berasal dari dataran aluvial maupun dataran banjir sungai meander (BBSDLP 2014).

Nilai rerata pH tidak berbeda nyata antar bahan induk, masing-masing sebesar 5,3 (aluvium), 5,1 (sedimen) dan 5,0 (volkanik). Jika dilihat sebaran per kelompok bahan induk nilai pH ini cukup beragam yaitu aluvium 4,3-6,9, sedimen 4,4-6,6 dan volkan 4,0-6,1. Nilai pH tanah sawah tidak secara nyata dipengaruhi oleh bahan induk, hal ini dikarenakan pada saat tanah sawah digenangi akan terjadi peningkatan pH sampai mendekati netral untuk yang pH tanahnya masam, dan sebaliknya pada tanah sawah yang pHnya tinggi akan terjadi penurunan pH mendekati netral. Nilai pH tanah sawah sangat mempengaruhi ketersediaan P tetapi tidak mempengaruhi sifat kimia tanah yang lain (Prasetyo *et al.* 2004) dan nilai pH tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah berada pada rentang 6,0-6,5 (Havlin *et al.* 2005). Hal ini dapat dilihat dari hasil penelitian yang menunjukkan ada korelasi negatif antara pH dengan fraksi NaOH-P_i ($r = - 0,345$; $p = 0,01$), NaOH-P_o ($r = - 0,340$; $p = 0,01$) dan NaHCO₃-P_o ($r = - 0,340$; $p = 0,01$) (Tabel 5) yang mengindikasikan bahwa dengan meningkatnya pH tanah sawah mendekati netral dengan adanya penggenangan terjadi penurunan jumlah ketiga fraksi tersebut disebabkan P yang terikat pada permukaan mineral liat serta mineral Fe dan Al oksida akan terlepas ke dalam larutan tanah dan meningkatkan ketersediaan P.

Tanah sawah di Jawa Barat berbahan induk volkanik memiliki kadar C-organik, N-total, P-potensial, Fe_d, Al_o, Al_o+1/2Fe_o dan Fe_o/Fe_d yang paling tinggi dibandingkan

dengan tanah sawah yang berbahan induk sedimen dan aluvium (Tabel 1). Kadar Al_d tanah sawah pada semua kelompok bahan induk nilai reratanya sebesar 0,20 g kg⁻¹ jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai rerata Fe_d-nya (3,01 g kg⁻¹). Hal ini mengindikasikan bahwa tanah sawah di Jawa Barat banyak mengandung mineral Fe oksida berbentuk kristalin dan telah mengalami pelapukan lanjut. Tingginya kadar Fe oksida pada tanah sawah akan berpengaruh terhadap besarnya jerapan P. C-organik berkorelasi kuat dengan N-total ($r = 0,792$; $p = 0,000$) menunjukkan adanya kedekatan hubungan C dan N di dalam tanah sawah, tetapi berkorelasi lemah dengan Al_o+1/2Fe_o ($r = 0,358$; $p = 0,005$), Fe_d ($r = 0,323$; $p = 0,009$), dan Al_d ($r = 0,307$; $p = 0,017$) (Tabel 1). Kedekatan hubungan antara C dan N di dalam tanah dapat dijadikan pertanda bahwa tanah sawah di Jawa Barat mempunyai C:N rasio yang relatif kecil dan jerami padi merupakan sumber utama C dan N tanah sawah (Yang and Post 2011).

Rasio Fe_o/Fe_d mengindikasikan tingkat kristalinitas Fe-oksida (Lair *et al.* 2009). Nilai Fe_o/Fe_d tergolong tinggi untuk semua bahan induk dan paling tinggi adalah kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium (0,76), diikuti kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen (0,71) dan terakhir kelompok tanah sawah berbahan induk volkan (0,70). Tingginya rasio Fe_o/Fe_d mengindikasikan adanya pengaruh yang kuat dari material volkanik (Nishigaki *et al.* 2018) dan secara umum tanah sawah di Jawa Barat didominasi bentuk Fe-oksida kristalin dan amorf. Hal ini berkaitan dengan masih cukup tingginya

Tabel 1. Beberapa sifat kimia tanah sawah pada tiga jenis bahan induk di Jawa Barat

Table 1. Selected chemical properties of paddy field with three parent materials in West Java

Karakteristik tanah	Semua Contoh Tanah	Bahan Induk					
		Aluvium		Sedimen		Volkan	
----- Rerata (kisaran) -----							
Kadar klei (%)	52 (25-71)	58	b (42-71)	52	ab (36-67)	48	a (25-71)
pH H ₂ O	5,1 (4,0-6,9)	5,3	a (4,3-6,9)	5,1	a (4,4-6,6)	5,0	a (4,0-6,1)
C-organik (%)	2,09 (0,70-4,30)	2,03	b (1,1-2,7)	1,59	a (0,7-2,3)	2,37	b (1,2-4,3)
N-total (%)	0,18 (0,07-0,40)	0,16	ab (0,08-9,29)	0,14	a (0,07-0,21)	0,20	b (0,12-0,40)
P-potensial (g 100g ⁻¹)	96 (4-322)	85	a (34-180)	75	a (28-138)	112	a (4-322)
KTK cmol (+) kg ⁻¹	34 (14-73)	39	b (23-66)	40	b (17-73)	29	a (14-44)
Kejenuhan Basa (%)	13 (4-40)	13	a (8-21)	12	a (6-19)	14	a (4-40)
Fe _d (g kg ⁻¹)	3,01 (0,86-5,45)	2,68	a (0,86-4,62)	2,91	a (0,97-4,69)	3,21	a (0,96-5,45)
Al _d (g kg ⁻¹)	0,20 (0,11-0,34)	0,18	a (0,11-0,29)	0,21	a (0,11-0,34)	0,20	a (0,11-0,32)
Fe _o (g kg ⁻¹)	1,99 (0,96-4,51)	1,85	a (1,05-2,49)	1,87	a (1,04-2,78)	2,13	a (0,96-4,51)
Al _o (g kg ⁻¹)	1,41 (0,79-4,00)	1,33	a (0,80-2,46)	1,40	a (0,84-2,41)	1,45	a (0,79-4,00)
Al _o +1/2Fe _o (g kg ⁻¹)	2,40 (1,38-4,85)	2,25	a (1,53-3,33)	2,34	a (1,59-3,37)	2,52	a (1,38-4,85)
Fe _o /Fe _d	0,72 (0,33-1,22)	0,76	a (0,38-1,22)	0,71	a (0,33-1,07)	0,70	a (0,35-1,12)
Jumlah sampel (N)	60	17		14		29	

Keterangan: angka yang diikuti huruf yang sama pada baris yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

kadar C-organik pada tanah sawah di Jawa Barat yang berkorelasi nyata dengan Fe_d dan Al_d . Menurut Nishigaki *et al.* (2018), jika rasio Fe_o/Fe_d rendah, mengindikasikan bahwa tanah tersebut didominasi oleh bentuk Fe-oksida kristalin terutama goethite dan hematite.

Total-P dan Fraksi P tanah sawah

Nilai fraksi total-P tanah sawah di Jawa Barat berkisar antara 312-3820 mg P kg⁻¹ dengan rerata 1257 mg P kg⁻¹. Kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik memiliki rerata fraksi residual-P (*occluded*-P) paling tinggi diantara ketiga bahan induk (1476 mg P kg⁻¹), diikuti tanah sawah berbahan induk sedimen (1019 mg P kg⁻¹) dan terakhir yang berbahan induk aluvium (925 mg P kg⁻¹). Fraksi residual-P berkorelasi nyata dengan Fe_d ($r = 0,315$; $p = 0,05$) dan Al_d ($r = 0,268$; $p = 0,05$) untuk semua contoh tanah (Tabel 5). Hal ini mengindikasikan bahwa tanah sawah di Jawa Barat banyak mengandung Fe dan Al oksida kristalin yang berperan dalam akumulasi P. Menurut Yang dan Post (2011), sejalan dengan perkembangan tanah dimana proses pelapukan berlanjut, terjadi peningkatan mineral Al dan Fe oksida dan menurunnya pH tanah, mineralisasi P dari bahan organik akan dijerap pada permukaan mineral dan lebih jauh masuk ke dalam struktur mineral Fe dan Al oksida menjadi *occluded*-P.

Kadar P setiap fraksi dan perhitungan rasionya terhadap total-P disajikan pada Tabel 2. Kadar P fraksi resin-P_i atau P tersedia dalam larutan untuk semua jenis bahan induk tanah sawah hanya sebesar 1,6% terhadap total-P. Kadar rerata resin-P_i tertinggi dijumpai pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik (21 mg P kg⁻¹), diikuti kelompok bahan induk aluvium (18 mg P kg⁻¹)

dan terakhir sedimen (17 mg P kg⁻¹), tetapi secara statistik tidak berbeda nyata. Fraksi resin-P_i sangat dipengaruhi oleh faktor dari luar terutama pemupukan P dan tidak terlalu dipengaruhi oleh bahan induk tanah (Zheng *et al.* 2002; McKenzie *et al.* 1992a,b; Hartono *et al.* 2006). Kebiasaan petani padi sawah di Jawa Barat yang selalu memberikan pupuk P setiap musim tanam menyebabkan tidak adanya perbedaan yang nyata antar kelompok bahan induk. Fraksi resin-P_i berkorelasi positif dengan fraksi P yang lain kecuali dengan fraksi NaHCO₃-P_o yang berkorelasi negatif. Korelasi yang paling tinggi dan nyata adalah dengan fraksi NaHCO₃-P_i ($r = 0,721$; $p < 0,01$) diikuti fraksi HCl-P_i ($r = 0,668$; $p < 0,01$), fraksi NaOH-P_i ($r = 0,438$; $p < 0,01$), NaOH-P_o ($r = 0,383$; $p < 0,01$) dan terakhir residual-P ($r = 0,366$; $p < 0,01$) (Tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa fraksi P yang lain merupakan sumber P tersedia bagi tanaman padi selain pupuk P, dimana NaHCO₃-P_i, HCl-P_i, NaOH-P_i, NaOH-P_o dan residual-P akan melepaskan P pada saat Resin-P_i mulai berkurang dalam larutan tanah.

Nilai rerata NaHCO₃-P_{total} (-P_i) dan NaOH-P_i tanah sawah masing-masing sebesar 64 mg P kg⁻¹ (5,3% dari total-P) dan 406 mg P kg⁻¹ (33,7% dari total-P) untuk semua contoh tanah. Nilai rerata NaHCO₃-P_{total} (-P_i) per kelompok bahan induk, vulkanik memiliki nilai tertinggi (76 mg P kg⁻¹) dibanding dua kelompok yang lain. Demikian juga nilai rerata fraksi NaOH-P_i paling tinggi pada tanah sawah berbahan induk vulkanik (508 mg P kg⁻¹) diikuti sedimen (328 mg P kg⁻¹) dan terkecil aluvium (309 mg P kg⁻¹). Kadar HCl-P_i berkisar antara 10-149 mg P kg⁻¹ dengan nilai rerata per kelompok bahan induk sebesar 66 mg P kg⁻¹ (aluvium), 64 mg P kg⁻¹ (vulkanik) dan 42 mg P kg⁻¹ (sedimen).

Tabel 2. Fraksi P tanah sawah pada tiga bahan induk tanah di Jawa Barat

Table 2. P fraction of paddy field with three parent materials in West Java

Fraksi P	Semua contoh tanah	Bahan Induk		
		Aluvium	Sedimen	Volkan
----- (mg P kg ⁻¹) rerata (% total P) -----				
Resin-P _i (P tersedia)	19 (1,6)	18 a (1,43)	17 a (1,35)	21 a (1,67)
NaHCO ₃ -P _i (P labil)	53 (4,4)	46 ab (3,66)	42 a (3,34)	64 b (5,09)
NaHCO ₃ -P _o (P labil)	34 (0,9)	9 a (0,72)	12 a (0,95)	12 a (0,95)
NaHCO ₃ -P _i (P labil)	64 (5,3)	55 a (4,38)	54 a (4,30)	76 b (6,05)
NaOH-P _i (P agak labil)	87 (7,2)	64 a (5,10)	67 a (5,33)	113 b (8,99)
NaOH-P _o (P agak labil)	319 (26,5)	245 a (19,49)	261 a (20,76)	395 b (31,42)
NaOH-P _i (P agak labil)	406 (33,7)	309 a (24,59)	328 a (26,09)	508 b (40,41)
HCl-P _i (P tidak labil)	60 (4,9)	66 b (5,25)	42 a (3,34)	64 b (5,09)
Residual-P (P tidak labil)	656 (54,5)	478 a (38,03)	579 a (46,06)	809 a (64,36)
Total-P	1257	925 a	1019 a	1476 a
Jumlah sampel (N)	60	17	14	29

Keterangan: angka yang diikuti huruf yang sama pada baris yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Kontribusi labil- P_i (Resin- P_i dan $\text{NaHCO}_3\text{-}P_i$) terhadap total-P untuk semua bahan induk tanah sawah relatif kecil hanya sebesar 6%. Mineral sekunder- P_i , yaitu fraksi- P_i yang terekstrak 0,1M NaOH yang didefinisikan sebagai P-anorganik yang dijerap pada permukaan mineral sekunder Fe dan Al, dan mineral primer P yang didefinisikan sebagai apatit-P atau bentuk Ca-P yang terekstrak 1M HCl juga berkontribusi relatif kecil terhadap fraksi total-P untuk semua bahan induk tanah sawah masing-masing sebesar 7% dan 5%. Fraksi residual-P atau *occluded*-P adalah fraksi P tanah yang berkontribusi paling tinggi terhadap fraksi total-P untuk semua bahan induk tanah sawah (54%). Fraksi organik-P berkontribusi sebesar 27% terhadap fraksi total-P tanah sawah di Jawa Barat yang disumbangkan oleh fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-}P_o$ dan $\text{NaOH-}P_o$.

Menurut Hartono *et al.* (2005), tanah yang mengandung bahan induk volkan andesitik memiliki jerapan P maksimum yang paling besar dibandingkan dengan bahan induk yang lain yaitu sekitar 971 mg P kg^{-1} . Oleh karena itu pada tanah sawah yang berkembang dari bahan volkanik dijumpai fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-}P_i$, $\text{NaOH-}P_i$, $-P_o$, $\text{HCl-}P_i$, residual-P dan total-P yang paling banyak. Sedangkan resin- P_i dan $\text{NaHCO}_3\text{-}P_o$ ditemukan tidak berbeda nyata karena fraksi ini merupakan P labil yang dipengaruhi oleh pemupukan.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa tidak semua fraksi P tanah sawah di Jawa Barat dipengaruhi oleh perbedaan bahan induk. Fraksi P tanah sawah yang nyata dipengaruhi oleh bahan induk yaitu fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-}P_i$, $\text{NaOH-}P_i$, $\text{NaOH-}P_o$ dan $\text{HCl-}P_i$, sedangkan fraksi resin- P_i , $\text{NaHCO}_3\text{-}P_o$ dan residual-P tidak dipengaruhi oleh perbedaan bahan induk. Fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-}P_i$, $\text{NaOH-}P_i$, $\text{NaOH-}P_o$ dan $\text{HCl-}P_i$ pada kelompok bahan induk volkanik paling banyak dijumpai dan berbeda nyata dengan kelompok bahan induk yang lain, kecuali $\text{HCl-}P_i$ yang lebih kecil dibanding kelompok bahan aluvium. Keempat fraksi P tersebut memang sangat berhubungan dengan faktor tanah seperti bahan induk, jenis mineral liat, kadar C-organik dan kadar Fe dan Al oksida. Hal ini berbeda dengan fraksi Resin- P_i yang lebih dominan dipengaruhi oleh faktor luar terutama jumlah pupuk P yang diberikan.

Kadar bahan organik tanah yang masih cukup tinggi pada tanah sawah di Jawa Barat (C-organik 0,7%-4,3%) dapat mempengaruhi fiksasi P yaitu melalui pembentukan kompleks fosfo humat (Havlin *et al.* 2005). Selain mempengaruhi fiksasi, bahan organik juga dapat mengurangi fiksasi P karena selama perombakan bahan organik dihasilkan asam-asam organik seperti oksalat dan sitrat, dimana anion dari asam organik ini akan menjadi pesaing ion fosfor yang dapat mengurangi fiksasi P. Adanya Fe dan Al oksida dalam tanah (sesquoksida) juga

mempengaruhi fiksasi P. Tanah-tanah yang kaya oksida Fe dan Al dan bertekstur liat memiliki kemampuan fiksasi paling tinggi. Fiksasi oleh oksida Fe lebih kuat dibandingkan oleh oksida Al, karena sebagian besar oksida Fe bersifat nonkristalin yang memiliki luas permukaan lebih besar sehingga mampu menyerap ion fosfor lebih banyak (Munawar 2011).

Kadar klei yang tinggi pada tanah sawah di Jawa Barat yang didominasi mineral klei silikat tipe 1:1 (kaolinit) mempunyai kapasitas fiksasi yang lebih tinggi dibanding mineral tipe 2:1, karena muatan positif pada mineral tersebut berkembang pada pH rendah (Munawar 2011). Sifat fisika dan kimia yang lain yang berpengaruh terhadap transformasi P, jerapan P dan pelepasan P dalam tanah adalah C-organik, Fe_d , Al_d , Fe_o , Al_o , dan $\text{Al}_o+1/2\text{Fe}_o$ (Hartono *et al.* 2005; 2006 dan 2015).

Secara umum, P pada tanah sawah di Jawa Barat terakumulasi paling banyak dalam bentuk residual-P, $\text{NaOH-}P_o$ dan $\text{NaOH-}P_i$ dengan jumlah yang berbeda antar kelompok bahan induk. Hal ini mendukung dan mempertajam hasil penelitian Hartono *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa P tanah sawah di Jawa Barat terakumulasi paling banyak dalam bentuk fraksi $\text{NaOH-}P_i$ dan residual-P. Hasil penelitian ini juga memperjelas tentang bentuk akumulasi P yang tinggi pada tanah sawah di Jawa Barat seperti yang dinyatakan Setyorini *et al.* (2010). Dengan hasil tersebut, maka perlu rekomendasi pengelolaan hara P tanah sawah yang berbeda antar kelompok bahan induk. Pemberian bahan organik dan silikat dilaporkan dapat melepaskan P dari fraksi $\text{NaOH-}P_i$ menjadi bentuk P tersedia (Hartono dan Bilhaq 2014).

Faktor yang berpengaruh terhadap sebaran fraksi P tanah sawah di Jawa Barat

Penentuan faktor yang paling berpengaruh terhadap fraksi P tanah sawah pada tiga kelompok bahan induk yang berbeda di Jawa Barat digunakan Analisis Komponen Utama (*Principal Component Analysis/PCA*) sebagai salah satu metode dalam analisis multivariat yang melibatkan banyak variabel. Karena melibatkan banyak variabel ada kemungkinan antar variabel saling mempengaruhi (multikolinearitas) yang dapat menyebabkan masalah dalam menentukan variabel yang paling berpengaruh terhadap distribusi fraksi P. PCA digunakan untuk mengidentifikasi sejumlah faktor yang relatif kecil untuk menjelaskan sejumlah besar variabel yang saling berhubungan (multikolinearitas). Sehingga variabel-variabel dalam satu faktor atau Principal Komponen (PC) mempunyai korelasi yang tinggi, sedangkan korelasi dengan variabel-variabel pada PC lain relatif rendah. Nilai korelasi setiap variabel dalam setiap PC disebut *loading*

Tabel 3. *Principal Component (PC)* dan factor loading ** yang diekstrak dari 8 variabel sifat kimia tanah sawah a pada tiga jenis bahan dinduk yang berbeda di Jawa Barat*

Table 3. *Principal Component (PC)* and loading factor** extracted from 8 variables of selected chemical properties on three different parent materials in West Java*

Bahan Induk/Variabel	Principal Component (PC)		
	PC1	PC2	PC3
A. Aluvium			
Klei	0,110	-0,111	-0,823
C-organik	-0,185	<u>0,872</u>	0,201
N-total	0,084	<u>0,871</u>	0,010
P HCL 25%	<u>0,758</u>	0,340	-0,060
KB	0,303	0,015	<u>0,795</u>
Fe _d	<u>0,715</u>	-0,003	0,014
Al _o	<u>0,732</u>	-0,502	0,233
Al _o +1/2Fe _o	<u>0,840</u>	-0,373	0,184
B. Sedimen			
Klei	0,246	<u>0,688</u>	0,029
C-organik	-0,106	<u>0,640</u>	0,592
N-total	0,015	<u>0,790</u>	0,301
P HCL 25%	<u>0,872</u>	0,228	0,031
KTK	-0,918	-0,091	-0,144
KB	0,404	0,441	-0,231
Fe _d	<u>0,704</u>	0,478	0,345
Al _d	<u>0,670</u>	-0,079	0,467
Fe _o	0,169	<u>0,764</u>	-0,178
Al _o	0,175	-0,161	<u>0,949</u>
Al _o +1/2Fe _o	0,266	0,229	<u>0,864</u>
C. Vulkanik			
Klei	-0,191	0,074	<u>0,807</u>
C-organik	<u>0,847</u>	0,356	-0,091
N-total	<u>0,823</u>	0,315	-0,101
P HCL 25%	<u>0,562</u>	-0,214	0,413
Fe _d	0,308	<u>0,747</u>	0,455
Al _d	0,595	0,144	<u>0,676</u>
Fe _o	0,081	<u>0,826</u>	0,062
Al _o +1/2Fe _o	0,173	<u>0,823</u>	-0,078

Keterangan:

- *Principal Component (PC)* adalah faktor atau komponen yang dapat mewakili variable-variabel asli
- ** *Factor loading* adalah nilai korelasi antara setiap factor (PC) dan variable-variabel analisis
- *Factor loading* dari variabel yang diberi garis bawah digunakan untuk interpretasi PC

factor. Setiap PC dapat diwakili oleh satu variabel yang paling tinggi nilai *loading factornya*. PCA dilakukan terhadap tiga kelompok bahan induk, aluvium sebanyak 17 contoh tanah, sedimen 14 contoh tanah, dan vulkan 29 contoh tanah.

Hasil PCA pada kelompok bahan induk aluvium menghasilkan tiga PC (PC₁, PC₂, PC₃) yang diekstrak dari sembilan variabel sifat kimia pada 17 contoh tanah sawah (Tabel 5). PC₁ mampu menjelaskan 36%, PC₂ 23% dan PC₃ 15% dari total keragaman. Tingginya nilai *loading factor* PC₁ didapatkan dari variabel Al_o+1/2Fe_o, P HCl

25%, Fe_d dan Al_o, sehingga PC₁ diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan oksida tanah. C-organik dan N-total memberikan *loading factor* yang tinggi untuk PC₂ dan diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan C-organik. PC₃ diinterpretasikan sebagai faktor basa-basa dapat ditukar dengan variabel kejenuhan basa (KB).

Pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen, hasil PCA juga menghasilkan tiga PC (PC₁, PC₂, PC₃) yang diekstrak dari sembilan variabel sifat kimia pada 14 contoh tanah sawah, akan tetapi berbeda pada *loading factornya* (Tabel 5). PC₁ mampu menjelaskan 40%, PC₂ 18% dan PC₃ 15% dari total keragaman. Tingginya nilai *loading factor* PC₁ didapatkan dari variabel P HCl 25%, Fe_d dan Al_d, sehingga PC₁ diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan mineral oksida kristalin. Kadar klei, C-organik, N-total dan Fe_o memberikan *loading factor* yang tinggi untuk PC₂ dan diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan mineral klei tanah. PC₃ diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan mineral oksida Al amorf dengan variabel Al_o dan Al_o+1/2Fe_o.

Sementara itu, hasil PCA pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik, juga menghasilkan tiga PC (PC₁, PC₂, PC₃) yang diekstrak dari sembilan variabel sifat kimia pada 29 contoh tanah sawah, akan tetapi berbeda pada *loading factornya* (Tabel 5). PC₁ mampu menjelaskan 42%, PC₂ 17% dan PC₃ 15% dari total keragaman. Tingginya nilai *loading factor* PC₁ didapatkan dari variabel C-organik, N-total dan P HCl 25% sehingga PC₁ diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan C-organik. Fe_o, Al_o+1/2Fe_o dan Fe_d memberikan *loading factor* yang tinggi untuk PC₂ dan diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan mineral oksida tanah. PC₃ diinterpretasikan sebagai faktor yang berhubungan dengan mineral klei dengan variabel kadar klei dan Al_d.

Model persamaan regresi pendugaan fraksi P tanah sawah pada tiga kelompok bahan induk yang berbeda

Model persamaan regresi pendugaan fraksi P tanah sawah pada tiga kelompok bahan induk yang berbeda di Jawa Barat disajikan pada Tabel 4. Model persamaan ini diperoleh dari regresi stepwise terhadap nilai faktor yang dihasilkan dari PCA.

Berdasarkan model persamaan regresi yang dihasilkan, fraksi Resin-P_i pada kelompok tanah berbahan induk aluvium dapat diduga dari faktor oksida dan basa-basa dapat ditukar terutama Ca_{dd}. Pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen, fraksi Resin-P_i dapat diduga dari faktor oksida saja. Demikian juga pada kelompok tanah

sawah berbahan induk vulkan, fraksi Resin-P_i dapat diduga dari satu faktor oksida saja. Namun demikian, dari ketiga model persamaan regresi tersebut, model persamaan regresi pada kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium yang paling baik dilihat dari nilai R² dan signifikansinya (R² = 0,341; p < 0,05) meskipun nilai R²-nya masih kecil.

Model persamaan regresi untuk pedugaan fraksi NaHCO₃-P_i pada kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium paling baik jika dibandingkan dengan yang berbahan induk vulkan dan sedimen dengan nilai R² masing-masing sebesar 0,363 p < 0,01; 0,232 p < 0,01 dan 0,324 p = 0,116 meskipun nilai R²-nya juga masih kecil. Model persamaan pendugaan fraksi NaHCO₃-P_i untuk kelompok tanah sawah yang berbahan induk aluvium dan

vulkanik berhubungan dengan faktor C-organik, yang berbahan induk vulkan berhubungan dengan oksida tanah, sedangkan yang berbahan induk sedimen berhubungan dengan mineral klei tanah dan mineral oksida amorf.

Untuk fraksi NaHCO₃-P_o, model persamaan yang didapatkan untuk kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium masih paling baik dengan nilai R² = 0,548 p < 0,01, diikuti kelompok tanah sawah berbahan induk vulkan (R² = 0,186 p < 0,05), dan terakhir yang berbahan induk sedimen (R² = 0,047 p = 0,457). Pada kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium, fraksi NaHCO₃-P_o berhubungan erat dengan faktor kejenuhan basa dan oksida tanah dimana oksida berikatan dengan P membentuk ligan dengan ikatan yang lebih kuat. Untuk kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik, NaHCO₃-P_o berhubungan dengan faktor oksida tanah, sedangkan kelompok tanah

Tabel 4. Model persamaan regresi pendugaan fraksi P tanah sawah di Jawa Barat

Table 4. Regression Equation regression models for estimating of P fractions of paddy field in West Java

Bahan Induk/ Fraksi P	Model persamaan regresi	R ²	Sign. F
A. Aluvium*			
Resin-P _i	Y = 18 - 5PC ₃ + 4PC ₁	0,341	0,044
NaHCO ₃ -P _i	Y = 46 + 10PC ₂	0,363	0,008
NaHCO ₃ -P _o	Y = 9 + 3PC ₃ - 2PC ₁	0,548	0,003
NaOH-P _i	Y = 64 + 11PC ₁ + 11PC ₂	0,350	0,039
NaOH-P _o	Y = 245 - 48PC ₃ + 40PC ₂	0,435	0,014
HCl-P _i	Y = 66 + 12PC ₂	0,234	0,042
Residual-P	Y = 478 - 193PC ₃	0,244	0,037
B. Sedimen**			
Resin-P _i	Y = 17 - 5PC ₃	0,125	0,215
NaHCO ₃ -P _i	Y = 42 - 8PC ₃ + 6PC ₂	0,324	0,116
NaHCO ₃ -P _o	Y = 12 + 2PC ₃	0,047	0,457
NaOH-P _i	Y = 67 + 24PC ₁ + 12PC ₂	0,767	0,000
NaOH-P _o	Y = 261 + 67PC ₁	0,468	0,007
HCl-P _i	Y = 42 - 16PC ₃	0,308	0,039
Residual-P	Y = 579 + 127PC ₁	0,216	0,094
C. Vulkanik***			
Resin-P _i	Y = 21 + 3PC ₁	0,038	0,319
NaHCO ₃ -P _i	Y = 64 + 17PC ₁	0,232	0,009
NaHCO ₃ -P _o	Y = 12 + 4PC ₁	0,186	0,022
NaOH-P _i	Y = 113 + 62PC ₁	0,757	0,000
NaOH-P _o	Y = 395 + 160PC ₁ + 77PC ₂	0,711	0,000
HCl-P _i	Y = 64 - 7PC ₃	0,037	0,324
Residual-P	Y = 809 + 444PC ₃	0,425	0,000

Keterangan:

- * Bahan induk aluvium : PC₁ mewakili variabel Al_o+1/2Fe_o, P HCL25%, Al_o, dan Fe_d
PC₂ mewakili variabel C-organik dan N-total
PC₃ mewakili variabel Kejenuhan Basa (KB)
- ** Bahan induk sedimen : PC₁ mewakili variabel P HCL25%, Fe_d, dan Al_d
PC₂ mewakili variabel N-total, Fe_o, kadar klei, dan C-organik
PC₃ mewakili variabel Al_o dan Al_o+1/2Fe_o
- *** Bahan induk vulkanik : PC₁ mewakili variabel C-organik, N-total, dan P HCL25%
PC₂ mewakili variabel Fe_o, Al_o+1/2Fe_o, dan Fe_d
PC₃ mewakili variabel kadar klei dan Al_d

sawah berbahan induk sedimen berhubungan dengan faktor mineral oksida kristalin. Model persamaan regresi untuk pendugaan fraksi $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen tidak dapat digunakan karena nilai R^2 yang terlalu kecil.

Model persamaan paling baik adalah model persamaan untuk menduga fraksi NaOH-P_i untuk semua kelompok bahan induk dan yang tertinggi nilai R^2 -nya adalah tanah sawah berbahan induk sedimen ($R^2 = 0,767$ $p < 0,01$), diikuti yang berbahan induk vulkanik ($R^2 = 0,757$ $p < 0,01$) dan terakhir yang berbahan induk aluvium ($R^2 = 0,350$ $p < 0,05$). Fraksi NaOH-P_i berhubungan dengan faktor mineral oksida kristalin dan mineral klei tanah untuk kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen. Pada kelompok tanah sawah yang berbahan induk vulkanik, fraksi NaOH-P_i berhubungan dengan faktor C-organik, dan yang berbahan induk aluvium, fraksi ini berhubungan dengan faktor oksida tanah dan C-organik. Adanya C-organik dan oksida Fe dan Al dalam tanah akan mempengaruhi fiksasi P melalui pembentukan kompleks fosfo humat (Havlin *et al.* 2005). Hasil korelasi (Tabel 5) juga menunjukkan adanya korelasi yang nyata antara fraksi NaOH-P_i dengan C-organik ($r = 0,627$; $p = 0,01$), Fe_d ($r = 0,532$; $p = 0,01$), Al_d ($r = 0,457$; $p = 0,01$), Fe_o ($r = 0,381$; $p = 0,01$) dan $\text{Al}_o+1/2\text{Fe}_o$ ($r = 0,270$; $p < 0,05$).

Model persamaan untuk pendugaan fraksi NaOH-P_o juga memiliki R^2 yang tinggi terutama untuk kelompok tanah sawah yang berbahan induk vulkanik ($R^2 = 0,711$ $p < 0,01$) dan fraksi ini berhubungan dengan faktor C-organik dan mineral oksida tanah. Kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen dan aluvium, model persamaan yang dihasilkan untuk menduga fraksi NaOH-P_o juga memiliki R^2 yang cukup tinggi yaitu masing-masing sebesar 0,468 dan 0,435 dengan nilai p masing-masing sebesar $< 0,01$ dan $< 0,05$. Pada kelompok sedimen, fraksi NaOH-P_o berhubungan mineral oksida kristalin, dan pada kelompok aluvium, fraksi ini berhubungan dengan faktor C-organik dan basa dapat ditukar terutama Ca_{dd} yang akan berikatan dengan P membentuk senyawa Ca-P dan mengendap.

Model persamaan regresi untuk pendugaan fraksi HCl-P_i pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen dan aluvium memiliki R^2 masing-masing sebesar 0,308 dan 0,234. Fraksi HCl-P_i ini nyata dipengaruhi oleh faktor mineral oksida Al amorf pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen, dan fraksi ini nyata dipengaruhi oleh faktor C-organik pada kelompok tanah sawah berbahan induk aluvium. Akan tetapi model persamaan ini tidak cukup baik untuk menduga fraksi HCl-P_i pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik dengan nilai R^2 yang sangat kecil (0,037), sehingga model persamaan regresi ini tidak dapat digunakan

Fraksi Residual-P cukup baik diduga dengan model

persamaan regresi yang dihasilkan pada kelompok tanah sawah yang berbahan induk vulkanik dan aluvium dengan nilai R^2 masing-masing 0,425 dan 0,244, akan tetapi model persamaan yang didapat untuk kelompok bahan induk sedimen tidak dapat digunakan dengan nilai R^2 0,216 dan $p > 0,05$. Fraksi Residual-P dipengaruhi oleh faktor jenis mineral klei pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik dan berhubungan erat dengan faktor basa-basa yang dapat ditukar terutama Ca_{dd} pada kelompok tanah sawah yang berbahan induk aluvium. Pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen, fraksi Residual-P berhubungan dengan faktor mineral oksida kristalin. Hal ini dapat dilihat dari korelasi yang nyata antara fraksi Residual-P dengan Fe_d dan Al_d dengan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,315 dan 0,268, nilai p untuk keduanya 0,05.

Jika dilihat secara keseluruhan dari model persamaan regresi yang didapatkan, nilai koefisien diterminannya masih terlalu kecil, kecuali model persamaan regresi yang didapatkan untuk menduga fraksi NaOH-P_i pada kelompok tanah sawah berbahan induk sedimen dan vulkanik. Hal ini kemungkinan disebabkan karena jumlah dan keragaman datanya kurang yang dapat dilihat dari nilai keragaman kumulatif yang sebesar 73%-74%. Oleh karena itu model persamaan ini perlu divalidasi dengan menambah jumlah data yang lebih banyak untuk meningkatkan keragaman dan nilai R^2 -nya.

Dengan diperolehnya model persamaan di atas diharapkan dapat dijadikan acuan dalam menduga adanya fraksi P tanah sawah pada bahan induk yang berbeda dengan melihat karakteristik sifat kimia tanahnya dan mengetahui bentuk P yang terakumulasi dalam tanah serta faktor-faktor yang mempengaruhinya, sehingga akan mempermudah dalam pengelolaan hara P terutama manajemen pemupukan P untuk tanaman padi sawah yang ramah lingkungan. Selain itu dapat juga dijadikan dasar dalam menentukan kebijakan ataupun teknologi yang mampu mengurangi bentuk fraksi P yang bersifat stabil (residual-P dan HCl-P_i) menjadi bentuk P yang agak labil (NaOH-P_i dan NaOH-P_o) yang selanjutnya menjadi bentuk P yang labil ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ dan Resin-P_i) sehingga mudah tersedia bagi tanaman padi.

Kesimpulan

Akumulasi P tanah sawah di Jawa Barat didominasi oleh fraksi residual-P, NaOH-P_o dan NaOH-P_i . Ketiga fraksi ini paling banyak ditemukan pada kelompok tanah sawah berbahan induk vulkanik, kemudian sedimen dan terakhir aluvium. Di dalam tanah ketiga fraksi ini merupakan sumber P yang bersifat agak labil dan lambat tersedia bagi tanaman dan merupakan sumber P untuk P labil (Resin-P_i , $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ dan -P_o). Secara umum Fraksi

P tanah sawah di Jawa Barat pada semua kelompok bahan induk dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu: 1) oksida Fe dan Al baik kristalin maupun amorf, 2) C-organik dan kadar klei tanah, dan 3) basa-basa dapat ditukar terutama Ca_{dd} . Fraksi P tanah sawah di Jawa Barat dapat diestimasi melalui model persamaan regresi dengan menghubungkan fraksi P dengan ketiga faktor yang mempengaruhinya tersebut. Model persamaan regresi yang cukup baik dalam mengestimasi fraksi P tanah sawah adalah model estimasi untuk fraksi $NaOH-P_1$ dan $NaOH-P_o$ dengan nilai $R^2 > 0,4$ pada taraf $p < 0,05$.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Achat DL, Pousse N, Nicolas M, Bre´doire F, Augusto L. 2016. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry*. 127:255–272.
- Aguiar ACF, Candido CS, Carvalho CS, Monroe PHM, Moura EG. 2013. Organic matter fraction and pools of phosphorus as indicators of the impact of land use in the Amazonian periphery. *Ecol Indic*. 30:158–164.
- Anda M, Suryani E, Husnain, Subardja D. 2015. Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. *Soil & Tillage Research*. 150:10–20.
- Augusto L, Achat DL, Jonard M, Vidal D, Ringeval B. 2017. Soil parent material-a major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems. *Glob. Change Biol*. 1-17.
- [Bakosurtanal] Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional. 2003. SRTM Provinsi Jawa Barat. Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional, Cibinong, Bogor.
- [Bakosurtanal] Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional. 2009. Peta Administrasi Provinsi Jawa Barat Digital Skala 1:250.000. Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional, Cibinong, Bogor.
- [BBSDL] Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. 2014. Peta Tanah Provinsi Jawa Barat Digital Skala 1:250.000. Cimanggu, Bogor.
- Boschetti NG, Quintero CE, Giuffre L. 2008. Phosphorus fractions of soils under *Lotus corniculatus* as affected by different phosphorus fertilizers. *Biol. Fert. Soils*. 45:379–384.
- Bunemann EK. 2008. Enzyme additions as a tool to assess the potential bioavailability of organically bound nutrients. *Soil Biol. Biochem*. 40:2116-2129.
- Cavalcante H, Araújo F, Noyma NP, Becker V. 2018. Phosphorus fractionation in sediments of tropical semi-arid reservoirs. *Science of the Total Environment*. 619–620:1022–1029.
- Chakraborty D, Nair VD, Chrysostome M, Harris WG. 2011. Soil phosphorus storage capacity in manure-impacted Alaquods: Implications for water table management. *Agr. Ecosyst. Environ*. 142:167–175.
- Chen CR, Condon LM, Davis MR, Sherlock RR. 2003. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *For Ecol Manag*. 177:539–557
- Costa MG, Gama-Rodrigues AC, Gonçalves JLM, Gama-Rodrigues EF, Sales MVS, Aleixo S. 2016. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. *Forests*. 7:1-15.
- Daly K, Styles D, Lalor S, Wall DP. 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. *European Journal of Soil Science*. 66:792–801.
- Dobermann A, Geroge T, Thevs N. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Sci. Am. J*. 66: 652-660.
- Gikonyo EW, Zaharah AR, Hanafi MM, Anuar AR. 2008. Evaluation of phosphorus pools and fractions in an acid tropical soil recapitalized with different phosphorus sources. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal*. 39:1385-1405.
- Hartono A, Bilhaq R. 2014. Effects of silicate application on the release pattern of native inorganic phosphorus from Andisol Soil in Lembang using successive resin extraction. *J. ISSAAS*. 20:43-50.
- Hartono A, Funakawa S, Kosaki T. 2005. Phosphorus sorption-desorption characteristics of selected acid upland soils in Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr. J*. 51(6):787-799.
- Hartono A, Funakawa S, Kosaki T. 2006. Transformation of added phosphorus to acid upland soil with different soil properties in Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr. J*. 51(6):734-744.
- Hartono A, Anwar S, Satwoko A, Koyama K, Omoto T, Nakao A, Yanai J. 2015. Phosphorus fractions of paddy soils in Java, Indonesia. *J. ISSAAS*. 21 (2): 20-30.
- Havlin JL, Beaton JD, Nelson SL, Nelson WL, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Hedley M, Stewart J, Chauban B. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 46:970-976.
- Herrera WFB, Rodrigues M, Teles APB, Barth G, Pavinato PS. 2016. Crop Yields and Soil Phosphorus Lability under Soluble and Humic-Complexed Phosphate Fertilizers. *Agron. J*. 108:1692–1702.
- Hou E, Tan X, Heenan M, Wen D. 2018. A global dataset of plant available and unavailable phosphorus in natural soils derived by Hedley method. *SCIENTIFIC DATA* | 5:180166 [DOI:10.1038/sdata.2018.166. www.nature.com/sdata/. 13p.
- Jan J, Barovec J, Kopacek J, Hejzlar J. 2015. Assessment of phosphorus associated with Fe and Al (hydr)oxides in sediments and soils. *J Soils Sediments*. July 2015. 11p. <https://www.researchgate.net/publication/277647856>.

- Kang J, Amoozegar A, Hesterberg D, Osmond DL. 2011. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. *Geoderma* 161, 194–201.
- Lair GJ, Zehetner F, Hrachowitz M, Franz N, Maringer FJ, Gerzabek MH. 2009. Dating of soil layers in a young floodplain using iron oxide crystallinity. *Quaternary Geochronology*. 4:260–266.
- Li YY, Yang R, Gao R, Wei HA, Chen AL, Li Y. 2015. Effect of long-term phosphorus fertilization and straw incorporation on phosphorus fraction in subtropical paddy soil. *J. Integr. Agr.* 14: 365-373.
- McKeague JA, Day JH. 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46:13-22.
- McKenzie RH, Stewart JWB, Dormaar JF, and Schaafe JB. 1992a. Long-term rotation and fertilizer effects on phosphorus transformation: I. In a Chernozemic soil. *Can. J. Soil Sci.* 72:569-579.
- McKenzie RH, Stewart JWB, Dormaar JF, and Schaafe JB. 1992b. Long-term rotation and fertilizer effects on phosphorus transformation: II. In a Luvisolic soil. *Can. J. Soil Sci.* 72:581-589.
- McLaren TI, Simpson RJ, McLaughlin MJ, Smernik RJ, McBeath TM, Guppy CN, Richardson AE. 2015. An assessment of various measures of soil phosphorus and the net accumulation of phosphorus in fertilized soils under pasture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178:543–554.
- Maharjan M, Maranguit D, Kuzyakov Y. 2018. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. *European Journal of Soil Biology*. 87:17–24.
- Mehmood A, Akhtar MS, Khan KS, Khalid A, Imran M, Rukh S. 2015. Relationship of Phosphorus Uptake with Its Fractions in Different Soil Parent Materials. *International Journal of Plant & Soil Science*. 4(1):45-53.
- Mehra PO, Jackson ML. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7: 317-327.
- Munawar A. 2011. *Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman*. PT. Penerbit IPB Pres. Bogor: Kampus IPB Taman Kencana. 240p
- Murphy J, Riley JP. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27: 31-36.
- Nishigaki T, Sugihara S, Kobayashi K, Hashimoto Y, Kilasara M, Tanaka H, Watanabe T, Funakawa S. 2018. Fractionation of phosphorus in soils with different geological and soil physicochemical properties in southern Tanzania. *SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION*. ISSN: 0038-0768 (Print) 1747-0765 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/tssp20>, doi.org/10.1080/00380768.2018.1436406. 10p.
- Oberson A, Friesen DK, Rao IM, Buhler S, Forssard E. 2001. Phosphorus transformation in an Oxisol under contrasting land use system: the role of soil microbial biomass. *Plant Soil*. 237: 197-210.
- Park M, Singvilay O, Shin W, Kim E, Chung J, Sa T. 2004. Effect of long-term compost and fertilizer application on soil phosphorus status under paddy cropping system. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35: 1635-1644.
- Prakash D, Benbi DK, Saroa GS. 2017. Land-use effects on phosphorus fractions in Indo-Gangetic alluvial soils. *Agroforest Syst.* Springer Science+Business Media Dordrecht. 12p.
- Prasetyo BH, Adiningsih JS, Subagyono K, Simanungkalit RDM. 2004. *Mineralogi, Kimia, Fisika, Biologi Tanah Sawah. Dalam : Agus F, Adimiharja A, Hardjowigeno S, Fagi AM, Hartatik W (Ed.). Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolannya*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Prasetyo BH, Suganda H, Kasno A. 2007. Pengaruh bahan vulkan pada sifat tanah sawah. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 25:45-58.
- Prasetyo BH, Setyorini D. 2008. Karakteristik tanah sawah dari endapan alluvial dan pengelolannya. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 2 (1):1-14.
- [Pusdatin Kementan RI] Pusat Data dan Informasi Kementerian Pertanian Republik Indonesia. *Peta Penggunaan Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Skala 1:10.000*. 2014. Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Jakarta.
- Qin H L, Quan Z, Liu X L, Li M D, Zong Y, Wu J S, Wei W X. 2010. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soil of different planting years in suburbs of Changsha. *Agricultural Sciences in China*. 9:1641-1649.
- Schmidt JP, Buwol SW, Kamprath EJ. 1996. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivations: fraction analyses. *Soil Sci Soc Am J.* 60:1168-1172.
- Setyorini D, Nurjaya, Kasno A, Suryono J, Priyono A, Mulyani A. 2010. *Peta Status Hara Lahan Sawah Provinsi Jawa Barat Banten Skala1:500.000*. Balai Penelitian Tanah, Bogor: Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian.
- Sofyan A, Nurjaya, Kasno A. 2004. Nutrient status of sawah soil for fertilizer recommendation. *In Sawah Soil and Management of Technology*. Agus F, Adimihardja A, Hardjowigeno, Fagi AM, Hartatik W (Eds). Center for Soil and Agroklimat Research and Development. Bogor. Indonesia. p. 83-114.
- Suharta N. 2010. Karakteristik dan permasalahan tanah marginal dari batuan sedimen masam di Kalimantan. *Jurnal Litbang Pertanian*. 29(6):139-146.
- Sulaeman, Suparto, Eviati. 2005. *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Air, Tanaman dan Pupuk*. Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian, Bogor. 136 pp.
- Taghipour M, Jalali M. 2014. Effect of nanoparticles on kinetics release and fractionation of phosphorus. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.045>. 32p.
- Tiessen H, Moir JO. 1993. *Characterization of Available P Sequential Extraction in Soil Sampling and Method Analysis*. Ed MR Carter. Canadian Society of Soil Science Lewis Publisher. Boca Raton. Florida.
- Tiessen H, Moir JO. 2007. *Characterization of available P by sequential extraction*, in *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition, edited by Carter MR, Gregorich EG, CRC Press, Boca Raton. pp. 293-306.
- Velásquez G, Ngo PT, Rumpel C, Calabi-Floody M, Redel Y, Turner BL, Condon LM, Mora ML. 2016a. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols. *Geoderma*. 271: 27–31.

- Velásquez G, Calabi-Floody M, Poblete-Grant P, Rumpel C, Demanet R, Condron L, Mora ML. 2016b. Fertilizer effects on phosphorus fractions and organic matter in Andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 16 (2):294-304.
- Verma S, Subehia SK, Sharma SP. 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biol Fertil Soils*. 41:295-300.
- Wang Y, Chen X, Whalen JK, Cao Y, Quan Z, Lu C, Shi Y. 2015. Kinetics of inorganic and organic phosphorus release influenced by low molecular weight organic acids in calcareous, neutral and acidic soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 178:555–566.
- Xie LH, Lu JL, Zhang YP, Liu LH. 2004. Influence of longterm fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Organic and inorganic phosphorus and available phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 15:790-794.
- Yang CM, Yang LZ, Lee JH. 2006. Organic phosphorus fractions in organically amended paddy soils in continuously and intermittently flooded conditions. *Journal of Environmental Quality*. 35:1142-1150.
- Yang X, Post WM. 2011. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*. 8:2907-2916.
- Yuan LY, Rui Y, Ru G, An WH, Lei CA, Yong L. 2015. Effects of long-term phosphorus fertilization and straw incorporation on phosphorus fractions in subtropical paddy soil. *Journal of Integrative Agriculture*. 14(2):365–373.
- Zamuner EC, Picone LI, Echeverria HE. 2008. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil Till. Res*. 99, 131–138.
- Zheng Z, Simard RR, Lafond J, Patent LE. 2002. Pathways of soil phosphorus transformation after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci Soc Am J*. 66:999-1007.

Tabel 5. Matrik Korelasi Fraksi P dengan beberapa sifat kimia tanah sawah di Jawa Barat

Table 5. Correlation Matrix between P fractions with selected chemical properties of paddy soil in West Java

Fraksi P dan Sifat Kimia Tanah	Resin-Pi	NaHCO3-Pi	NaHCO3-Po	NaOH-Pi	NaOH-Po	HCl-Pi	Residual-P	Total-P	pH	Klei	C-org	N-total	P-pot	KTK	KB	Fed	Ald	Feo	Alo	Alo+1/2Feo
Resin-Pi	1	.721**	-.444**	.438**	.383**	.668**	.366**	.496**	.072	-.053	-.046	.025	.581**	-.116	-.139	.118	-.032	.141	-.077	.009
NaHCO3-Pi		1	-.262*	.612**	.518**	.685**	.426**	.601**	-.165	-.229	.284*	.340**	.733**	-.266*	.012	.106	.128	.180	-.127	-.014
NaHCO3-Po			1	.174	.130	-.334**	-.218	-.146	-.340**	-.044	.369**	.260*	-.161	-.051	.187	.052	.336**	-.049	.026	-.003
NaOH-Pi				1	.912**	.217	.355**	.639**	-.345**	-.230	.627**	.653**	.710**	-.412**	.002	.532**	.457**	.381**	.056	.270*
NaOH-Po					1	.167	.370**	.658**	-.340**	-.136	.609**	.653**	.631**	-.387**	-.051	.603**	.450**	.450**	.140	.387**
HCl-Pi						1	.121	.240	.159	-.150	.148	.089	.295*	.063	.061	-.138	-.208	.234	-.244	-.091
Residual-P							1	.937**	-.125	.179	-.063	-.030	.652**	-.173	-.184	.315*	.268*	.193	-.183	-.058
Total-P								1	-.214	.069	.179	.218	.784**	-.278*	-.155	.445**	.362**	.318*	-.121	.070
pH									1	-.123	-.242	-.318*	-.234	.570**	.017	-.232	-.426**	-.104	-.061	-.116
klei										1	-.139	-.065	-.055	.091	.028	.108	.168	-.085	.026	-.025
C-org											1	.792**	.250	-.180	.237	.335**	.307*	.323*	.188	.358**
N-total												1	.308*	-.227	.094	.318*	.194	.301*	.160	.320*
P-pot													1	-.410**	-.094	.397**	.389**	.150	.017	.101
KTK														1	-.330*	-.494**	-.431**	-.159	-.188	-.264*
KB															1	.133	.295*	-.014	.133	.114
Fed																1	.533**	.631**	.246	.588**
Ald																	1	.146	.165	.236
Feo																		1	-.165	.420**
Alo																			1	.826**
Alo+1/2Feo																				1

* korelasi nyata pada taraf 0.05

** korelasi nyata pada taraf 0.01