
**PENINGKATAN EFISIENSI PEMUPUKAN FOSFOR PADA
ULTISOL DENGAN MENGGUNAKAN
ABU TERBANG BATUBARA**

**Improvement of the Efficiency of Phosphorus Fertilization
in Ultisol using Coal Fly Ash**

Fahrunsyah*, Mulyadi, Agus Sarjono, Surya Darma

Program Studi/Jurusan Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda

*Penulis korespondensi: fahrunsyah@faperta.unmul.ac.id

Abstract

Ultisol is one type of soil that has a very wide distribution in Indonesia, but the use of this soil faces many obstacles. The main problem in ultisol utilization is the low availability of phosphorus (P) and the low absorption efficiency. Coal fly ash (CFA) is a material that can overcome these problems. The objective of this study was to examine the effect of Application CFA on several soil chemical properties (pH, exchangeable Al, exchangeable Ca and available P), plant growth, yield, and absorption efficiency of P fertilizer. This study used a completely randomized factorial design consisting of two factors. The first factor was CFA that consisted of three levels of treatment, namely: A0 = 0 t ha⁻¹ or without CFA, A1 = 40 t CFA ha⁻¹, A2 = 80 t CFA ha⁻¹. The second factor was P fertilizer that consisted of four levels of treatment, namely: P0 = 0 kg P ha⁻¹, P1 = 30 kg P ha⁻¹, P2 = 60 kg P ha⁻¹ and P3 = 90 kg P ha⁻¹. The results of the study showed that the application of 80 t CFA ha⁻¹ increased the pH by 13.41%, reduced exchangeable Al by 59.53% and increased exchangeable Ca 192.66% compared to control. The combination 80 t CFA ha⁻¹ and 90 kg P ha⁻¹ increased available P by 986.79% compared to control. The application of 80 t CFA ha⁻¹ resulted in the highest total plant dry weight and total P uptake. The treatment resulted in total plant dry weight of 172.96 g and total P uptake of 187.62 mg plant⁻¹, increased 62.39% and 100.21% respectively compared to the control. The application of 90 kg P fertilizer ha⁻¹ resulted in the highest total dry weight of maize, and total P uptake, namely 167.49 g and 174.39 mg plant⁻¹, respectively, which means that the total plant dry weight increased by 51.00% and the total uptake P increased 69.79% compared to control. The highest seed dry weight was obtained in the combination of 80 t CFA ha⁻¹ and 90 kg P ha⁻¹, namely 39.33 g, an increase of 715.53% compared to the control. The combination of 40 t CFA ha⁻¹ and 30 kg P ha⁻¹ resulted in the highest absorption efficiency of P fertilizer, namely 30.43%. This means that in this treatment, maize can absorb 30.43% of the applied P fertilizer.

Keywords: *coal fly ash, maize, phosphorus efficiency, ultisol*

Pendahuluan

Ultisol merupakan jenis tanah mineral masam yang mempunyai sebaran cukup luas dan jika dikelola dengan baik berpotensi untuk berkontribusi dalam meningkatkan produksi pangan sehingga mendukung ketahanan pangan. Luasan Ultisol di Indonesia adalah 45.794 ha atau sekitar 25% dari luas total daratan Indonesia (Prasetyo dan Suriadikarta, 2006).

Namun demikian, pemanfaatan Ultisol untuk budidaya tanaman menghadapi banyak kendala karena sifat fisik, kimia dan biologi tanah ini yang kurang mendukung pertumbuhan tanaman.

Salah satu permasalahan utama Ultisol adalah rendahnya ketersediaan fosfor (P) Menurut Thao *et al.* (2008), defisiensi P merupakan salah satu kendala penting bagi usaha tani di lahan masam. Rendahnya

ketersediaan P disebabkan kuatnya pengikatan P oleh aluminium (Al) dan besi (Fe), sehingga bisa jadi P total tinggi di dalam tanah namun ketersediaannya rendah karena sebagian besar P tersebut diikat oleh Al dan Fe sehingga tidak tersedia untuk tanaman.

Pada kebanyakan tanah, P-anorganik terdapat pada konsentrasi yang rendah di dalam larutan tanah, sedangkan sebagian besar dipegang/terikat oleh beragam mineral tanah (Hilsinger, 2001). Fosfor bersifat sangat reaktif dan hanya tersedia untuk diserap tanaman pada kisaran yang sempit sekitar pH netral. Pada tanah masam, P membentuk molekul berkelarutan rendah dengan Al dan Fe. Oleh karena itu, walaupun jumlah total P di dalam tanah tinggi namun pada banyak kasus P tersebut tidak tersedia untuk diserap tanaman (Lopez-Bucio *et al.*, 2000). Hal itu pula yang menyebabkan penambahan pupuk P pada tanah masam seperti Ultisol tidak meningkatkan ketersediaan P secara signifikan karena sebagian besar P yang ditambahkan akan diikat oleh Al dan Fe. dan hanya sebagian kecil dari P tadi dalam bentuk tersedia sehingga dapat diserap tanaman.

Abu terbang batubara (ATB), merupakan satu diantara bahan pembenah yang dapat digunakan sebagai alternatif untuk meningkatkan efisiensi pemupukan P. Hal ini didasarkan pada besarnya potensi ketersediaan ATB, cukup tingginya kandungan P pada ATB dan kemampuan ATB menetralkan pengaruh Al melalui peningkatan pH sehingga mampu meningkatkan ketersediaan P baik yang bersumber dari P tanah maupun P dari ATB. Selain itu, selama ini ATB masih dianggap sebagai limbah, sehingga penggunaan ATB tidak saja meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman tetapi juga sebagai upaya untuk menanggulangi limbah yang dapat mencemari lingkungan.

Efisiensi pemupukan P pada tanah masam termasuk tanah Ultisol sangat rendah. Pada umumnya efisiensi pemupukan P di tanah Ultisol kurang dari 10%. Pada kebanyakan tanah masam, sebanyak 90% dari P yang ditambahkan menjadi tidak tersedia untuk diserap tanaman dan berada dalam bentuk tidak larut (Sundara *et al.*, 2002). kelarutan Al yang tinggi menyebabkan terjadinya pengikatan P sehingga unsur hara ini tidak tersedia bagi tanaman dan penambahan P

tidak banyak memberikan manfaat bagi tanaman (Herviyanti *et al.*, 2012). Penggunaan ATB diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemupukan P yang ditunjukkan dari meningkatnya persentase P yang dapat diserap tanaman dari pupuk P yang diberikan. Peningkatan efisiensi pemupukan P karena pemberian ATB diantaranya melalui peningkatan pH sehingga Aluminium dapat tukar (Al-dd) yang mengikat P menjadi berkurang.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguji pengaruh pemberian ATB terhadap beberapa sifat kimia tanah (pH, Al-dd, Ca-dd dan P-tersedia) dan efisiensi pemupukan P pada Ultisol serta pertumbuhan dan produksi jagung manis.

Bahan dan Metode

Penelitian lapangan dilaksanakan di rumah plastik yang berlokasi di Desa Loa Kulu Kota, Kecamatan Loa Kulu, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur selama 4 (empat) bulan dari bulan Mei sampai Agustus 2020, dan dilanjutkan dengan analisis sampel tanah dan jaringan tanaman di Laboratorium Pusat Penelitian Lingkungan Hidup dan Sumber Daya Alam Universitas Mulawarman.

Tanah Ultisol untuk penelitian diambil dari lahan yang terletak di Kelurahan Mangkurawang, Kecamatan Tenggarong, Kabupaten Kutai Kartanegara. ATB diperoleh dari area penimbunan abu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Cahaya Fajar Kaltim (PT. CFK) yang berlokasi di Desa Tanjung Batu, Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara. Media tanam yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis tanah Ultisol lapisan permukaan (0 – 20 cm) dengan karakteristik kimiawi : kemasaman tanah (pH H₂O) tergolong sangat masam, C-organik, N-total dan rasio C/N tergolong rendah, P-total tergolong rendah dan ketersediaan sangat rendah. Komplek pertukaran didominasi Al-dd dengan kadar 3,3 cmol kg⁻¹ sehingga Al-dd menempati 41,32% kompleks pertukaran. Kation-kation basa seperti Ca-dd, K-dd dan Na-dd tergolong rendah dan Mg-dd tergolong sedang. Komposisi kation basa dan masam tersebut menghasilkan KTK tergolong rendah dan KB tergolong sedang (Tabel 1). Bila status

kesuburan tanah yang digunakan sebagai media tanam ini dinilai menggunakan kriteria penilaian status kesuburan tanah dari Pusat Penelitian Tanah maka status kesuburan rendah ditandai dengan KTK rendah, KB sedang, P_2O_5 rendah, dan C-organik rendah. Karakteristik ATB yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut : pH H_2O sangat tinggi sehingga tergolong alkalis, C-organik dan N-total sangat rendah disebabkan dalam proses terbentuknya abu, batubara dibakar sehingga C dan N menguap, rasio C/N rendah, P-total tergolong sangat tinggi namun ketersediaan-nya sangat rendah, kompleks pertukaran seluruhnya ditempati kation-kation basa yang didominasi oleh Ca-dd,

sebaliknya kation masam yaitu Al-dd dan H-dd tidak terdeteksi, yang menghasilkan KB tergolong sangat tinggi yaitu 100% (Tabel 1). Rancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Lengkap Faktorial yang terdiri atas 2 faktor. Faktor I : ATB terdiri atas 3 (tiga) taraf perlakuan yaitu : $A_0 = 0$ ton ha^{-1} atau tanpa ATB, $A_1 = 40$ ton ha^{-1} ATB dan $A_2 = 80$ ton ha^{-1} ATB. Faktor II : Pupuk P terdiri atas 4 (empat) taraf perlakuan yaitu : $P_0 = 0$ kg ha^{-1} P, $P_1 = 30$ kg ha^{-1} P, $P_2 = 60$ kg ha^{-1} P dan $P_3 = 90$ kg ha^{-1} P. Dengan demikian terdapat 12 kombinasi perlakuan. Masing-masing perlakuan tersebut diulang sebanyak 3 (tiga) kali, sehingga terdapat $3 \times 4 \times 3 = 36$ unit percobaan.

Tabel 1. Karakteristik contoh tanah (Ultisol) dan ATB.

Parameter	Ultisol		ATB	
pH (H_2O)	4,45	SM	11,56	A
pH (KCl)	3,84		11,02	
C - organik (%)	1,12	R	0,16	SR
N - total (%)	0,11	R	0,02	SR
Rasio C/N	10,18	R	8,00	R
P - total (mg kg^{-1})	16,10	R	366,70	ST
P - tersedia (mg kg^{-1})	1,60	SR	5,18	SR
Ca-dd (cmol kg^{-1})	2,07	R	67,84	ST
Mg-dd (cmol kg^{-1})	1,08	S	0,33	SR
K-dd (cmol kg^{-1})	0,12	R	0,03	SR
Na-dd (cmol kg^{-1})	0,13	R	0,03	SR
Al-dd (cmol kg^{-1})	3,33		0,00	
H-dd (cmol kg^{-1})	1,33		0,08	
KTK ((cmol kg^{-1}))	8,06	R	68,23	ST
KB (%)	42,18	S	100,00	ST

Keterangan : SM = Sangat Masam; A = Alkalis; SR = Sangat Rendah R = Rendah; S = Sedang; T = Tinggi; ST = Sangat Tinggi (PPT (1983).

Tanah yang digunakan sebagai media tanam dalam penelitian ini dikeringudarkan, dibersihkan dan disaring dengan menggunakan ayakan lolos butir < 2 mm. Tanah tersebut kemudian ditimbang sebanyak 15 kg kering udara (setara dengan 13,50 kg kering oven) dan dimasukkan dalam pot yang berukuran tinggi 25 cm dan diameter bagian atas 35 cm. Selanjutnya ATB sesuai dengan dosis perlakuan dicampur merata dengan tanah, disiram sampai Kapasitas Lapang, disusun di rumah plastik sesuai hasil pengacakan dan diinkubasi selama 15 hari. Setelah selesai inkubasi, masing-masing pot diberi pupuk P sesuai dosis perlakuan serta

pupuk dasar yaitu urea dosis 150 kg ha^{-1} dan KCl dosis 75 kg ha^{-1} . Kemudian tiap pot ditanam masing-masing 2 biji benih jagung manis. Saat tanaman jagung berumur satu minggu dilakukan seleksi dan disisakan satu tanaman per pot. Untuk menjaga kelembaban tanah maka dilakukan penyiraman. Gulma yang tumbuh pada media tanam dibersihkan secara manual dengan cara dicabut dan ditanam kembali ke dalam pot. Saat tanaman berumur 35 hari dilakukan pemupukan N susulan menggunakan urea dosis 150 kg ha^{-1} . Pengamatan pertumbuhan tanaman yaitu tinggi tanaman dilakukan 2, 4, 6 dan 8 minggu setelah tanam

(mst) serta sesaat menjelang panen.. Tanaman jagung manis dipanen saat tanaman berumur sekitar 70 hari. Seluruh jaringan tanaman (tajuk, tongkol dan akar) dikeringkan dengan menggunakan oven selama 48 jam pada suhu 60^o C. Kemudian dilakukan penimbangan Bobot kering tanaman. Konsentrasi P akar, tajuk, biji serta tongkol dan klobot diperoleh dengan cara menganalisis masing-masing jaringan tanaman tersebut. Data serapan P tanaman didapat dengan cara mengalikan berat kering masing-masing jaringan tanaman dengan konsentrasinya. Efisiensi pemupukan P dihitung dengan rumus berikut ini:

$$RE = \frac{R_f - R_c}{F_{add}} \times 100\%$$

Keterangan :

RE	=	Efisiensi pemupukan P
R _f	=	Serapan hara dipupuk P
R _c	=	Serapan hara tidak dipupuk P
F _{add}	=	Hara P yang ditambahkan dari pupuk P

Untuk mengetahui karakteristik kimia tanah setelah panen, dilakukan pengambilan contoh tanah dari masing-masing pot dan dianalisis di laboratorium dengan metode analisis sama dengan analisis awal. Sifat tanah yang dianalisis meliputi: pH (H₂O), Al-dd, Ca-dd dan P-tersedia. Data tanaman dan tanah tersebut akan dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (uji F) dan dilanjutkan dengan menggunakan DMRT pada taraf 5% untuk membandingkan 2 (dua) rata-rata perlakuan.

Hasil dan Pembahasan

Beberapa sifat kimia tanah setelah panen

Pemberian ATB berpengaruh nyata terhadap pH H₂O, Al-dd, Ca²⁺ dan P-tersedia (Tabel 2). Kontrol menghasilkan pH H₂O paling rendah yaitu 4,16. Rendahnya nilai pH H₂O karena memang tanah yang digunakan adalah Ultisol yang merupakan jenis tanah yang telah mengalami pencucian yang sangat intensif sehingga kation-kation basa banyak yang tercuci dan yang tersisa adalah kation-kation masam. Kondisi demikian yang menyebabkan terjadinya kemasaman yang tinggi pada Ultisol. Aplikasi ATB mampu meningkatkan pH H₂O, dan

peningkatan itu seiring dengan meningkatnya dosis ATB (Tabel 2). Perlakuan A2 menghasilkan pH H₂O tertinggi yaitu 4,72 berbeda nyata dengan perlakuan lainnya dan meningkatkan pH H₂O sebesar 0,56 unit. Perlakuan A1 meningkat pH H₂O sebesar 0,38 unit. Terjadinya peningkatan pH H₂O ini disebabkan ATB yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai pH H₂O yang sangat tinggi (alkalis) yaitu 11,56 sehingga ketika ATB tersebut ditambahkan pada media tanam yang mempunyai pH rendah maka akan meningkatkan pH H₂O media tanam tersebut. Menurut Rautaray *et al.* (2003), aplikasi ATB yang bersifat alkalis menyebabkan kapur yang terkandung dalam ATB tersebut akan bereaksi cepat dengan komponen asam tanah, sehingga menurut Adriano dan Weber (2001) menghasilkan peningkatan nilai pH tanah masam. Penjelasan lebih detail tentang itu dikemukakan oleh Pathan *et al.* (2003), yang menyatakan kemampuan ATB meningkatkan pH tanah masam karena keberadaan CaO pada ATB, yang bereaksi dengan CO₂ membentuk CaCO₃ sehingga pH tanah meningkat.

Peningkatan nilai pH karena pemberian ATB karena H⁺ yang terdapat dalam konsentrasi yang tinggi pada Ultisol dinetralisasi oleh ion OH⁻ yang berasal dari hidrolisis kation-kation basa (khususnya Ca) yang terdapat dalam ATB. Kenaikan nilai pH semakin besar seiring dengan meningkatnya dosis ATB disebabkan semakin banyak ATB maka semakin banyak pula ion OH⁻ yang dihasilkan. Persamaan reaksi berikut menjelaskan dihasilkannya OH⁻ ketika ATB ditambahkan kedalam tanah. $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$. Dari hasil hidrolisis ini dihasilkan ion OH⁻ sehingga pH meningkat (Teixeira *et al.*, 1992). Perubahan pH akan semakin nyata apabila dosis ATB ditingkatkan (Pathan *et al.*, 2003). Kation-kation basa dalam ATB seperti Ca dan Mg menyebabkan ATB mempunyai kapasitas penetral tinggi (Haering dan Daniel, 1991). Pemberian ATB menyebabkan terjadinya penurunan Al-dd, dan penurunan itu makin besar seiring dengan peningkatan dosis ATB. Kadar Al-dd pada kontrol sebesar 3,41 cmol kg⁻¹ berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Pemberian ATB dosis 40 t ha⁻¹ (A1) dan 80 t ha⁻¹ (A2) masing-masing mampu menurunkan Al-dd sebesar 33,14 % dan 59,53 %. Kemampuan ATB dalam

menurunkan kadar Al-dd sesuai dengan hasil penelitian Fahrumsyah *et al.* (2018), yang melaporkan terjadi penurunan 93,06% Al-dd dibanding kontrol ketika diberi ATB 80 t ha⁻¹ yang sama/setara dengan perlakuan A2 dalam penelitian ini. Penurunan Al-dd karena

pemberian ATB ada hubungannya dengan peningkatan pH tanah. Pemberian ATB meningkatkan ion OH⁻ di dalam tanah sehingga mampu mengikat Al-dd membentuk senyawa Al (OH)₃ yang bersifat mengendap sehingga terjadi penurunan Al-dd.

Tabel 2. Pengaruh ATB dan pupuk p serta kombinasinya terhadap beberapa sifat kimia tanah setelah panen.

Perlakuan ATB	Pupuk P				Rata-Rata
	P0	P1	P2	P3	
pH H ₂ O					
A0	4,03	4,14	4,28	4,20	4,16 c
A1	4,45	4,60	4,55	4,57	4,54 b
A2	4,75	4,70	4,67	4,76	4,72 a
Rata-Rata	4,41	4,82	4,50	4,51	
Al-dd (cmol kg ⁻¹)					
A0	3,44	3,33	3,55	3,33	3,41 a
A1	1,89	2,44	2,33	2,45	2,28 b
A2	1,11	1,44	1,33	1,63	1,38 c
Rata-Rata	2,15	2,41	2,41	2,47	
Ca-dd (cmol kg ⁻¹)					
A0	1,08	1,02	1,12	1,10	1,09 c
A1	2,68	2,10	2,10	2,21	2,28 b
A2	3,04	2,97	3,30	3,46	3,19 a
Rata-Rata	2,27	2,16	2,17	2,26	
P-tersedia (mg kg ⁻¹)					
A0	2,12 s	2,39 e	3,64 de	3,87 de	3,01 c
A1	6,27 cde	7,84 cd	8,24 cd	10,81 c	8,30 b
A2	9,75 c	16,99 b	19,29 ab	23,04 a	17,27 a
Rata-Rata	6,05 c	9,08 b	10,39 ab	12,57 a	

Keterangan: ATB : A0 = 0 t ha⁻¹, A1 = 40 t ha⁻¹, A2 = 80 t ha⁻¹, Pupuk P : P0 = 0 kg ha⁻¹, P1 = 30 kg ha⁻¹, P2 = 60 kg ha⁻¹, P3 = 90 kg ha⁻¹. Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut DMRT 5%.

Pengaruh pemberian ATB juga nampak pada Ca-dd, yaitu memberikan pengaruh sangat nyata terhadap Ca-dd. Aplikasi ATB meningkatkan kandungan Ca-dd. dan peningkatan itu semakin besar dengan semakin meningkatnya dosis ATB. Kadar Ca-dd paling tinggi diperoleh pada perlakuan A2 yaitu 3,19 cmol kg⁻¹ berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Peningkatan Ca-dd ini karena ATB yang digunakan mempunyai kandungan Ca sangat tinggi yaitu 67,84 cmol kg⁻¹ (Tabel 1). ATB kaya akan Ca dan Mg silikat dan aluminosilikat serta Ca dan Mg oksida (Brouwers dan Van Eijk, 2003), sehingga pemberian ATB dapat meningkatkan ketersediaan Ca, Mg, K dan P (Inthasan *et al.*, 2002). Ketersediaan P meningkat karena

pemberian ATB. Media tanam yang tanpa diperlakukan dengan ATB (Kontrol) mempunyai P-tersedia 3,01 mg kg⁻¹ yang tergolong sangat rendah, setelah diberi ATB meningkat dan peningkatan itu semakin besar seiring dengan meningkatnya dosis ATB. Hasil penelitian Prasetyo *et al.* (2010) mendapatkan hal yang sama yaitu ATB dapat meningkatkan ketersediaan P, dan peningkatan itu semakin besar seiring dengan meningkatnya dosis ATB. Peningkatan ketersediaan P terjadi karena meningkatnya pH tanah karena aplikasi ATB dan karena tingginya kandungan P-total dalam ATB yang mencapai 366,70 mg kg⁻¹. Di dalam ATB, memang ketersediaan P tersebut tergolong sangat rendah karena pH ATB yang

sangat tinggi menyebabkan P banyak terikat pada Ca, namun ketika ATB ditambahkan pada tanah yang mempunyai pH rendah maka terjadi kenaikan pH tanah tersebut, sehingga P baik yang bersumber dari ATB maupun P dari tanah akan menjadi tersedia. Tabel 2 menunjukkan bahwa pH H₂O dan Ca-dd semakin meningkat dengan meningkatnya dosis ATB, dan sebaliknya Al-dd semakin menurun ketika dosis ATB ditingkatkan.

Pemberian P tidak berpengaruh nyata terhadap pH H₂O, Al-dd dan Ca-dd. Hal ini disebabkan pupuk P tidak mempunyai bahan yang mampu mempengaruhi pH, Al-dd dan Ca-dd Kombinasi ATB dan pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap pH H₂O, Al-dd, dan Ca-dd namun berpengaruh nyata terhadap P-tersedia. Tidak terjadinya interaksi antara ATB dengan pupuk P terhadap pH H₂O, Al-dd dan Ca-dd berarti ATB dan pupuk P tidak berperilaku sama pada level-level atau terhadap perubahan level-level diantara kedua faktor tersebut. Bila dibandingkan pengaruh utama ATB dan pupuk P dengan pengaruh kombinasi ATB dan pupuk P, maka peningkatan ketersediaan P pada kombinasi ATB dan pupuk P jauh lebih besar. Hal ini karena ATB maupun pupuk P mampu meningkatkan ketersediaan P sehingga ketika ATB dan pupuk P diberikan bersama maka terjadi peningkatan ketersediaan P. Perlakuan A2P3 menghasilkan P-tersedia tertinggi yaitu 23,04 mg kg⁻¹ tidak berbeda nyata dengan A2P2 serta meningkat 986,79% dibanding kontrol (Tabel 2).

Pengaruh ATB terhadap peningkatan P tersedia pada seluruh taraf pupuk P, tanpa pemberian ATB dihasilkan P tersedia dalam jumlah terbatas disajikan pada Tabel 1. Ketika diberi perlakuan ATB dengan dosis 40 t ha⁻¹ maka terjadi kenaikan P-tersedia dan ketersediaan P lebih tinggi diperoleh ketika diaplikasikan ATB dosis 80 t ha⁻¹. Secara rata-rata pengaruh ATB pada seluruh taraf pupuk P tertinggi diperoleh pada A2 yaitu 17,27 mg kg⁻¹ meningkat 473,75% dibanding kontrol dan 108,07% dibanding A1 (Tabel 2).

Tinggi tanaman

Pemberian ATB berpengaruh sangat nyata terhadap seluruh parameter tinggi tanaman yang diamati (Tabel 3). Kontrol menghasilkan tanaman yang lebih rendah dibanding tanaman

yang diaplikasikan ATB pada seluruh waktu pengamatan. Hal ini mengindikasikan media tanam yang digunakan yaitu tanah Ultisol tidak dapat mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal yang disebabkan kesuburannya yang rendah. Menurut Mokolobate dan Haynes (2002), tingginya kemasaman, kandungan bahan organik yang rendah, keterbatasan N, P, Ca dan Mg serta kelarutan Al, Fe dan Mn yang tinggi merupakan permasalahan yang dihadapi dalam upaya memanfaatkan Ultisol untuk budidaya tanaman. Hal itu menurut Wahyudi (2009) menggambarkan kualitas kesuburan Ultisol yang rendah sehingga menjadi pembatas untuk mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman. Hasil penelitian Shenoy dan Kalagudi (2005) menunjukkan bahwa P adalah salah satu unsur hara yang membatasi pertumbuhan tanaman yang dibudidayakan pada tanah Ultisol. Ketersediaan P yang sangat rendah pada media tanam yang tidak diberi ATB (kontrol) menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat yang tergambar dari rendah dan berbeda nyata kontrol dengan tanaman yang diberi perlakuan ATB.

Pemberian ATB meningkatkan tinggi tanaman, dan peningkatan itu semakin besar dengan semakin banyaknya dosis ATB yang diberikan. Perlakuan A2 menghasilkan tanaman tertinggi pada seluruh waktu pengamatan yang berbeda nyata dengan kontrol dan A1. Semakin tingginya tanaman dengan meningkatnya dosis ATB ada hubungannya dengan semakin tingginya P-tersedia dalam tanah sehingga meningkatkan serapan P oleh tanaman untuk mendukung pertumbuhan tanaman. karena P merupakan salah satu unsur hara esensial yang sangat diperlukan tanaman dan keberadaannya tidak dapat digantikan oleh unsur hara lainnya. Zhang *et al.* (2008) menyatakan bahwa setelah N maka P merupakan unsur hara yang diperlukan tanaman dalam jumlah banyak. Baligar *et al.* (2001) menyatakan bahwa P terlibat secara langsung pada sebagian besar proses kehidupan dan menjadi komponen dari semua sel hidup tanaman.

Peran P sangat penting dalam proses respirasi, fotosintesis, pengaturan fisiologis dan biokimia tanaman, penyimpanan energi dalam metabolisme tanaman yaitu melalui transformasi ADP ke ATP. Ketersediaan P yang cukup sangat penting Aplikasi ATB meningkatkan

ketersediaan P, baik melalui tambahan P tersedia yang bersumber dari ATB maupun melalui peningkatan pH yang dapat mengubah P total asli tanah dan P total dari ATB menjadi P-tersedia. Peningkatan ketersediaan P menghasilkan peningkatan P yang dapat diserap tanaman, yang setelah melalui proses fotosintesis akan didistribusikan pada seluruh

komponen tanaman untuk mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman. Menurut Kasno *et al.* (2006), pemupukan P pada tanah masam dapat meningkatkan produktivitas tanah yang dicerminkan oleh peningkatan tinggi tanaman dan hasil jagung. Pemberian pupuk P berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman pada seluruh waktu pengamatan.

Tabel 3. Pengaruh ATB dan pupuk P serta kombinasinya terhadap tinggi tanaman.

Perlakuan ATB	Pupuk P				Rata-Rata
	P0	P1	P2	P3	
2 mst (cm)					
A0	25,47	27,20	32,50	30,10	28,82 b
A1	28,40	35,07	32,90	35,77	33,03 a
A2	28,70	33,77	35,50	38,50	34,12 a
Rata-Rata	27,52 b	32,01 a	33,63 a	34,79 a	
4 mst (cm)					
A0	42,73	75,33	79,50	84,17	70,43 c
A1	52,17	86,33	92,57	100,40	82,87 b
A2	62,77	92,37	97,67	105,67	89,62 a
Rata-Rata	52,56 c	84,68 b	89,91 a	96,74 a	
6 mst (cm)					
A0	82,77	115,67	129,30	121,77	122,38 c
A1	107,70	144,70	146,50	151,97	137,72 b
A2	118,03	150,17	155,10	176,70	150,00 a
Rata-Rata	102,83 c	136,84 b	143,63 ab	150,14 a	
8 mst (cm)					
A0	125,13	158,07	172,87	173,50	157,39 c
A1	161,40	200,87	202,53	201,97	191,69 b
A2	186,13	202,20	208,93	209,13	201,60 a
Rata-Rata	157,56 b	187,04 a	194,78 a	194,87 a	
Saat Panen (cm)					
A0	136,73	162,53	175,37	175,57	162,55 c
A1	170,43	203,07	203,77	205,97	195,81 b
A2	195,40	207,67	212,13	212,63	206,96 a
Rata-Rata	167,52 b	191,09 a	197,09 a	198,06 a	

Keterangan : ATB : A0 = 0 t ha⁻¹, A1 = 40 t ha⁻¹, A2 = 80 t ha⁻¹, Pupuk P : P0 = 0 kg ha⁻¹, P1 = 30 kg ha⁻¹, P2 = 60 kg ha⁻¹, P3 = 90 kg ha⁻¹. Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji DMRT 5%.

Defisiensi P nampak jelas pada kontrol karena menghasilkan tanaman paling rendah pada seluruh waktu pengamatan, dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Terhambatnya pertumbuhan tanaman dalam hal ini tinggi tanaman disebabkan tanah Ultisol yang digunakan sebagai media tanam mempunyai ketersediaan P tergolong sangat rendah yaitu 1,60 mg kg⁻¹ (Tabel 1). Defisiensi P merupakan kendala yang sering terjadi pada tanah mineral

masam (El-Azouni, 2008). Rendahnya ketersediaan P, disebabkan oleh interaksi antara P anorganik dengan kation Fe, Al dan Ca dan immobilisasi menjadi kompleks organik oleh jasad renik (Bertham dan Nusantara, 2011).

Aplikasi pupuk P menghasilkan tanaman yang lebih tinggi dan berbeda nyata dibanding kontrol. Peningkatan tinggi tanaman makin besar dengan semakin meningkatnya dosis pupuk P dan tanaman tertinggi diperoleh pada

perlakuan P3 namun tidak berbeda nyata dengan P2, bahkan pada 2 mst, 8 mst dan saat panen tidak berbeda nyata dengan P1. Artinya bila didasarkan dari parameter tinggi tanaman maka kebutuhan P untuk tanaman jagung sudah terpenuhi pada dosis P2. Kombinasi ATB dan pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter tinggi tanaman. Namun, kombinasi ATB dan pupuk P menghasilkan tanaman yang lebih tinggi dibanding jika hanya diberi ATB atau pupuk P (Tabel 3).

Bobot kering tanaman

Pemberian ATB berpengaruh sangat nyata terhadap bobot kering akar, tajuk, biji, dan total tanaman namun tidak berpengaruh nyata terhadap bobot kering tongkol dan klobot (Tabel 4). Perlakuan tanpa ATB (kontrol) menghasilkan bobot kering yang paling rendah pada semua parameter bobot kering tersebut dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya yaitu A1 dan A2. Bobot kering total tanaman paling rendah diperoleh pada kontrol yaitu 106,51 g tanaman⁻¹ berbeda nyata dengan A1 dan A2. Hal ini memberikan gambaran bahwa tanaman kekurangan hara khususnya P. Menurut Mustonen (2012), kekurangan P tersebar luas di agroekosistem tropika dan menjadi salah satu pembatas utama pertumbuhan tanaman. Hal ini disebabkan cadangan P tanah secara alamiah rendah dan tingginya fiksasi P oleh Fe dan Al.

Rendahnya ketersediaan P berdampak pada pertumbuhan tanaman, hal ini disebabkan P menurut Amhakhian *et al.* (2010) merupakan salah unsur hara utama dan terpenting kedua setelah N yang diperlukan untuk peningkatan produksi tanaman pada kebanyakan tanah tropik. Pada umumnya P merupakan satu dari unsur hara esensial utama untuk pertumbuhan dan produksi tanaman dan defisiensinya akan menjadi pembatas serius bagi tanaman pada kebanyakan tanah terlapuk lanjut dengan kandungan Fe dan Al tinggi.

Aplikasi ATB dengan dosis 40 t ha⁻¹ (A1) dan 80 t ha⁻¹ masing-masing meningkatkan bobot kering total sebesar 44,77 % dan 62,39% dibanding kontrol. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang melaporkan pertumbuhan dan hasil tanaman meningkat disebabkan pengaruh pemberian ATB. Hasil penelitian Fahrussyah *et al.* (2019)

mendapatkan bahwa aplikasi ATB 20 t ha⁻¹, 40 t ha⁻¹ dan 80 t ha⁻¹ mampu meningkatkan berat kering total tanaman jagung manis masing-masing 93,45%, 169,72% dan 237,19%. Aggarwal *et al.* (2009) melaporkan bahwa pertumbuhan dan produksi tanaman gandum dan sorgum meningkat karena pemberian ATB. Penelitian Kishor *et al.* (2010) mendapatkan bahwa hasil panen gandum, kacang hijau, rumput bermuda, alfalfa, semanggi putih dan lain-lain meningkat karena aplikasi ATB.

Bila dilihat dari komponen tanamannya, maka sebagian besar bobot kering tanaman dalam bentuk tajuk dan sebaliknya paling sedikit pada akar. Menarik dicermati perbandingan bobot kering biji dengan bobot kering total. Pada kontrol perbandingan bobot kering biji dengan bobot kering total lebih besar dibanding perlakuan lain. Perbandingan ini makin kecil seiring dengan meningkatnya dosis ATB. Dengan kata lain, pemberian ATB meningkatkan persentase terbentuknya bobot kering biji. Aplikasi P berpengaruh nyata terhadap bobot kering akar, tajuk, biji dan total tanaman namun tidak berbeda nyata pada bobot kering tongkol dan klobot.

Aplikasi P meningkatkan bobot kering tanaman pada seluruh parameter tanaman yang diamati, peningkatan itu makin besar sering dengan meningkatnya dosis P yang diberikan dan berbeda nyata dibanding kontrol untuk parameter tanaman yang diamati kecuali bobot kering tongkol dan klobot yang tidak berbeda nyata. Bobot kering total tanaman tertinggi diperoleh pada perlakuan P3 yaitu 167,49 g tanaman⁻¹ meningkat 51,00% dibanding kontrol (Tabel 4). Hal ini menunjukkan bahwa tanaman respon terhadap P yang diberikan, dan respon tanaman terhadap pemberian pupuk P ini hanya bisa terjadi karena media tanaman yang digunakan mempunyai ketersediaan P yang sangat rendah.

Pemberian pupuk P menambah ketersediaan P dalam tanah sehingga penyerapan P oleh tanaman meningkat dalam mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman yang tergambar dari bobot kering tanaman (Tabel 4). Keberadaan P sangat diperlukan tanaman sebab P berperan penting dalam menyusun asam nukleat, phitin dan fosfolipid (Amhakhian *et al.*, 2010), penyimpanan dan transper energi dalam bentuk

ATP dan ADP (Mosali *et al.*, 2006) sehingga tanaman membutuhkan P untuk pertumbuhan dan produksinya (Hardjowigeno, 2003). Kombinasi ATB dan pupuk P berpengaruh nyata terhadap bobot kering biji, namun tidak berpengaruh nyata komponen bobot kering lainnya. Bobot kering biji tertinggi diperoleh

pada perlakuan A2P3 yaitu 38,33 g tanaman⁻¹ yang berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Bobot kering biji tersebut meningkat 715,53% dibanding kontrol. Persentase peningkatan bobot kering biji tersebut lebih tinggi dibanding persentase kenaikan bobot biji tertinggi pada pengaruh utama ATB dan pupuk P.

Tabel 4. Pengaruh ATB, pupuk P dan kombinasinya terhadap bobot kering tanaman.

Perlakuan ATB	Pupuk P				Rata-Rata
	P0	P1	P2	P3	
Bobot Kering Akar (g tanaman ⁻¹)					
A0	2,80	8,41	9,12	10,07	7,60 b
A1	7,54	12,31	12,34	12,56	11,19 a
A2	10,75	12,68	13,84	14,80	13,02 a
Rata-Rata	7,03 b	11,13 a	11,76 a	12,48 a	
Bobot Kering Tajuk (g tanaman ⁻¹)					
A0	39,14	56,46	68,54	75,01	59,79 c
A1	66,66	93,22	94,99	97,99	88,22 b
A2	94,39	93,00	103,67	113,81	101,22 a
Rata-Rata	66,73 c	80,89 b	89,07 ab	95,61 a	
Bobot Kering Biji (g tanaman ⁻¹)					
A0	4,70 e	17,50 c	18,44 c	18,73 c	14,85 c
A1	12,98 d	28,41 b	29,62 b	31,47 b	25,62 b
A2	16,71 cd	28,00 b	29,93 b	38,33 a	28,24 a
Rata-Rata	11,46 c	26,64 b	26,00 b	29,51 a	
Bobot Kering Tongkol dan Klobot (g tanaman ⁻¹)					
A0	22,56	24,74	27,05	27,58	25,48 b
A1	25,06	27,96	27,83	32,83	28,42 ab
A2	29,49	31,24	31,90	29,28	30,48 a
Rata-Rata	25,70	27,98	28,93	29,90	
Bobot Kering Total (g tanaman ⁻¹)					
A0	69,19	107,11	123,32	131,39	107,76 c
A1	112,24	164,89	164,78	174,86	154,19 b
A2	151,33	164,92	179,35	196,23	172,96 a
Rata-rata	110,92 c	145,64 b	155,82 ab	167,49 a	

Keterangan : ATB : A0 = 0 t ha⁻¹, A1 = 40 t ha⁻¹, A2 = 80 t ha⁻¹, Pupuk P : P0 = 0 kg ha⁻¹, P1 = 30 kg ha⁻¹, P2 = 60 kg ha⁻¹, P3 = 90 kg ha⁻¹. Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji DMRT 5%.

Hal ini disebabkan kedua bahan yaitu ATB dan pupuk P mempunyai kemampuan dalam meningkatkan ketersediaan P sehingga memungkinkan tanaman menyerap P lebih banyak.

Serapan fosfor

Pemberian ATB berpengaruh sangat nyata terhadap serapan P jagung manis pada akar, tajuk, biji, dan total tanaman tetapi tidak

berpengaruh nyata terhadap serapan P pada tongkol dan klobot (Tabel 5). Serapan total P terendah diperoleh pada kontrol yaitu 93,71 mg tanaman⁻¹ berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Rendahnya serapan total P ini karena media tanam yang digunakan yaitu tanah Ultisol mempunyai ketersediaan P yang tergolong sangat rendah yaitu 1,60 mg kg⁻¹ sehingga mempengaruhi suplai P terhadap tanaman yang dibudidayakan pada media tanam tersebut. Menurut Darman (2008) konsentrasi P yang

tersedia dan kemampuan tanaman untuk menyerap P menentukan penentu penyerapan P oleh tanaman.

Pemberian ATB meningkatkan serapan total P dan peningkatan itu makin besar seiring dengan meningkatnya dosis ATB. Serapan P meningkat 57,83% pada A1 dan 100,21% pada A2. Kemampuan ATB dalam meningkatkan serapan P disebabkan terjadinya peningkatan ketersediaan P karena penambahan ATB (Tabel 2).

Tabel 5. Pengaruh ATB dan pupuk P serta kombinasinya terhadap serapan fosfor.

Perlakuan ATB	Pupuk P				Rata-Rata
	P0	P1	P2	P3	
Serapan P- Akar (mg tanaman ⁻¹)					
A0	1,22	4,71	5,56	6,46	4,49 c
A1	3,50	9,65	7,93	8,75	7,46 b
A2	7,37	8,65	9,38	11,00	9,10 a
Rata-Rata	4,03 b	7,67 a	7,6 a	8,74 a	
Serapan P-Tajuk (mg tanaman ⁻¹)					
A0	24,90	40,65	49,62	54,68	42,46 c
A1	45,36	70,00	72,09	77,20	66,16 b
A2	75,83	77,40	87,93	97,24	84,60 a
Rata Rata	48,70 c	62,68 b	69,88 ab	76,37 a	
Serapan P- Biji (mg tanaman ⁻¹)					
A0	5,71	21,01	22,44	29,50	19,66 c
A1	18,88	41,60	48,43	52,52	40,36 b
A2	29,45	49,35	53,13	70,63	50,64 a
Rata-Rata	18,01 c	37,32 b	41,33 b	50,88 a	
Serapan P-Tongkol dan Klobot (mg tanaman ⁻¹)					
A0	30,11	23,73	26,83	27,69	27,09 b
A1	25,23	33,34	33,22	43,89	33,92 b
A2	40,59	43,22	45,69	43,63	43,28 a
Rata-Rata	31,98	33,43	35,25	38,40	
Serapan Total P (mg tanaman ⁻¹)					
A0	61,93	90,16	104,44	118,32	93,71 c
A1	92,97	154,59	161,66	182,36	147,90 b
A2	153,24	178,62	196,14	222,48	187,62 a
Rata-Rata	102,71 c	141,12 b	154,08 b	174,39 a	

Keterangan : ATB : A0 = 0 t ha⁻¹, A1 = 40 t ha⁻¹, A2 = 80 t ha⁻¹, Pupuk P : P0 = 0 kg ha⁻¹, P1 = 30 kg ha⁻¹, P2 = 60 kg ha⁻¹, P3 = 90 kg ha⁻¹. Angka yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji DMRT 5%.

Pemberian ATB pada media tanam dengan ketersediaan P sangat rendah akan meningkatkan ketersediaan P pada media tanam tersebut sehingga meningkatkan P yang dapat diserap tanaman. Hal ini disebabkan pemberian ATB yang mempunyai pH 11,56 pada media

tanam dengan pH 4,45 akan meningkatkan pH media tanam tersebut. Ketersediaan unsur hara termasuk P tergantung pada kemasaman tanah. Peningkatan pH tanah menyebabkan peningkatan P tersedia baik yang bersumber dari P asli tanah maupun P yang berasal dari ATB.

Pola yang sama untuk serapan pada masing-masing bagian tanaman akar, tajuk, biji serta tongkol dan klobot yaitu pemberian ATB meningkatkan serapan P dan peningkatan itu semakin besar dengan semakin besarnya dosis ATB yang diberikan (Tabel 5). Perlakuan A2 menghasilkan serapan P tertinggi pada seluruh komponen tanaman tersebut dan berbeda nyata dengan kontrol dan A1. Bila dibandingkan antar komponen tanaman, maka serapan P paling besar pada tajuk dan paling sedikit pada akar. Secara keseluruhan (dari 3 perlakuan), rata-rata serapan pada masing-masing komponen tanaman (akar, tajuk, biji serta tongkol dan klobot) masing-masing 4,78%, 43,90%, 25,14% dan 26,18%.

Bila dicermati maka persentase serapan P pada biji terhadap serapan total P meningkat pada perlakuan yang diberi ATB. Persentase serapan P pada biji terhadap serapan total P pada kontrol yaitu 20,98%, sedang pada A1 dan A2 masing-masing 27,29% dan 26,99%. Pemberian pupuk P berpengaruh sangat nyata terhadap serapan Total P. Aplikasi pupuk P mampu meningkatkan serapan total P, dan peningkatan itu semakin besar dengan semakin meningkatnya dosis pupuk P (Tabel 5). Serapan total P tertinggi pada A2 berbeda nyata dengan perlakuan lainnya dan meningkat sebesar 69,79% dibanding kontrol. Peningkatan serapan

total P ini disebabkan terjadinya peningkatan P-tersedia karena pemberian pupuk P yang memungkinkan tanah menyerap P lebih banyak. Pemberian kombinasi ATB dan pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap serapan P baik serapan total P maupun serapan P pada komponen tanaman seperti akar, tajuk, biji dan tongkol dan klobot (Tabel 4). Artinya tidak terjadi interaksi antara ATB dengan pupuk P.

Efisiensi pemupukan fosfor

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa efisiensi pemupukan P dihitung dengan menggunakan indikator efisiensi penyerapan P, efisiensi fisiologis dan efisiensi agronomis. Efisiensi penyerapan pupuk merupakan rasio antara jumlah hara yang diserap oleh tanaman dengan jumlah hara yang diaplikasikan lewat pupuk. Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa secara keseluruhan pemberian perlakuan ATB dan pupuk P hanya menghasilkan rata-rata efisiensi serapan P sebesar 14,48 %.

Pada perlakuan ATB, efisiensi penyerapan P pada perlakuan tanpa ATB (A0) hanya menghasilkan efisiensi serapan P sebesar 11,24%, artinya pada seluruh taraf pemberian P jumlah pupuk yang dapat diserap tanaman tanpa pemberian ATB hanya sebesar 11,24% sedang 88,76% dari pupuk yang diberikan tidak dapat diserap tanaman.

Tabel 5. Pengaruh ATB, pupuk dan kombinasinya terhadap efisiensi penyerapan pupuk P.

Perlakuan ATB	Pupuk P				Rata-Rata
	P0	P1	P2	P3	
A0	-	13,94	10,49	9,28	11,24
A1	-	30,43	16,96	14,71	20,70
A2	-	12,53	10,59	11,40	11,51
Rata-Rata	-	18,97	12,68	11,80	14,48

Keterangan : Perlakuan ATB : A0 = 0 t ha⁻¹, A1 = 40 t ha⁻¹, A2 = 80 t ha⁻¹, Pupuk P : P0 = 0 kg ha⁻¹, P1 = 30 kg ha⁻¹, P2 = 60 kg ha⁻¹, P3 = 90 kg ha⁻¹.

Rendahnya efisiensi serapan P pada perlakuan tanpa ATB ini disebabkan sebagian besar P yang berasal dari pupuk P difiksasi oleh tanah. Rendahnya mobilitas P anorganik tanah disebabkan oleh reaktivitas ion P yang besar terhadap banyak anasir tanah dan konsekuensinya terjadi retensi yang kuat terhadap sebagian besar P tersebut (Frossard *et al.*, 1995) yang disebabkan oleh pengendapan P oleh Fe, Al dan Ca (Selles *et al.*, 2007). Kondisi

tersebut menurut Sundara *et al.* (2002), menyebabkan pemberian pupuk P yang pada awalnya tersedia bagi tanaman menjadi tidak tersedia karena P dari pupuk P tersebut secara cepat bereaksi dengan tanah sehingga tidak dapat diserap tanaman. Perlakuan A1 menghasilkan efisiensi penyerapan pupuk sebesar 20,13%, yang berarti efisiensi serapan P meningkat hampir 2 kali lipat dari kontrol (Tabel 6). Peningkatan efisiensi serapan P tersebut

disebabkan pemberian ATB meningkatkan pH sehingga Al-dd yang berperan penting dalam mengikat P menjadi berkurang. Menurut Mokolobate dan Haynes (2002), meningkatnya pH tanah masam dapat menurunkan jerapan P sehingga dapat meningkatkan ketersediaan P. Ketika dosis ATB ditingkat yaitu perlakuan A2 maka efisiensi penyerapan pupuknya menurun dibanding perlakuan A1. Hal ini diduga karena adanya peningkatan P tersedia yang bersumber dari ATB, sehingga serapan P yang bersumber dari pupuk P berkurang.

Efisiensi penyerapan pupuk P pada pemberian pupuk P tertinggi diperoleh pada P1 yaitu 18,97 %. Walaupun menghasilkan serapan tertinggi namun hanya 18,97% dari pupuk P yang diberikan yang mampu diserap tanaman, yang berarti hanya sebagian kecil dari P yang berasal dari pupuk P yang dapat diserap tanaman. Menurut Hinsinger (2001), pada kebanyakan tanah masam, P an organik dijumpai dalam konsentrasi yang cukup rendah di dalam larutan tanah, sedangkan proporsi terbesar dipegang kuat oleh beragam mineral tanah. Penambahan pupuk P pada tanah tersebut menurut Sundara *et al.* (2002) menyebabkan P terlarut bereaksi dengan anasir tanah dan membentuk senyawa yang kurang larut. Pada tanah masam, variscit terbentuk ketika P ditambahkan dan hasilnya kebanyakan P yang ditambahkan tidak tersedia untuk diserap tanaman karena berada dalam bentuk tidak larut.

Peningkatan pemberian pupuk P menghasilkan efisiensi serapan P yang makin rendah. Walaupun P yang bersumber dari pupuk P diserap tanaman lebih besar dengan semakin meningkatnya dosis pupuk P namun persentase P dari pupuk yang diserap tanaman semakin berkurang. Efisiensi serapan P pada P1, P2 dan P3 masing-masing 18,97%, 12,68% dan 11,80%. Menurunnya efisiensi serapan P tersebut dapat dijelaskan dengan menggunakan hukum pengembalian yang makin berkurang (*Law of Diminishing Return*) yaitu ketika tanah dalam keadaan defisiensi hara, penambahan hara sangat meningkatkan hasil, penambahan lebih lanjut juga meningkatkan hasil namun tidak seproporsional penambahan pertama. Perlakuan A1P1 menghasilkan efisiensi serapan tertinggi yaitu 30,45%. Artinya perlakuan A1P1 menyerap hampir sepertiga dari pupuk P yang diberikan. Hasil ini menunjukkan bahwa dari sisi

efisiensi serapan P perlakuan A1P1 merupakan kombinasi yang optimal. Namun berdasarkan tinggi tanaman, bobot kering tanaman, dan serapan P, kombinasi tersebut tidak merupakan perlakuan yang memberikan hasil tertinggi.

Kesimpulan

Pemberian 80 t ATB ha⁻¹ menaikkan pH sebesar 13,41%, menurunkan Al-dd 59,53% dan meningkatkan Ca-dd 192,66% dibanding kontrol. Kombinasi 80 t ATB ha⁻¹ dan 90 kg pupuk P ha⁻¹ meningkatkan P-tersedia sebesar 986,79% dibanding kontrol.

Pemberian 80 t ATB ha⁻¹ menghasilkan bobot kering total tanaman tertinggi (172,96 g) dan serapan total P tertinggi (187,62 mg tanaman⁻¹), masing-masing meningkat 62,39% dan 100,21% dibanding kontrol. Pemberian 90 kg pupuk P ha⁻¹ menghasilkan bobot kering total tanaman dan serapan total P tertinggi yaitu masing-masing 167,49 g dan 174,39 mg tanaman⁻¹, yang berarti bobot kering total tanaman meningkat 51,00 % dan serapan total P meningkat 69,79 % dibanding kontrol. Bobot kering biji tertinggi diperoleh pada perlakuan kombinasi 80 t ATB ha⁻¹ dan 90 kg pupuk P ha⁻¹ yaitu 39,33 g, meningkat 715,53 % dibanding kontrol.

Perlakuan kombinasi ATB dosis 40 t ha⁻¹ dan pupuk P dosis 30 kg ha⁻¹ menghasilkan efisiensi penyerapan pupuk P tertinggi yaitu 30,43 %.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Rektor Universitas Mulawarman dan Dekan Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman beserta jajarannya sehingga kami memperoleh pembiayaan untuk melaksanakan penelitian melalui Sumber Pendanaan PNBPF Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman.. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak PT. Cahaya Fajar Kaltim yang telah membantu penyediaan abu terbang batubara.

Daftar Pustaka

- Adriano, D.C. and Weber, J.T. 2001. Influence of fly ash on soil physical properties and turfgrass establishment. *Journal of Environmental Quality* 30(2): 596-601.

- Aggarwal, S., Singk, G.R. and Yadav, B.R. 2009. Utilization of fly ash for crop production : effect on the growth of wheat and sorghum crops and soil properties. *Journal of Agricultural Physics* 9 : 20 -23.
- Amhakhian, S.O., Oyewole, C.I. and Isitekhale, H.H. 2010. Effects of different levels of phosphorus on the growth and yield of maize (*Zea mays L*) in ofere (basement complex) soils Kogi State North Central Ecological Zone Nigeria. *Continental Journal of Agricultural Science* 4: 20 – 28..
- Baligar, V.C., Fageria, N.K. and He, Z.L. 2001. Nutrient use efficiency in plants cummun. *Soil Science and Plant Analysis* 32 : 921 – 950.
- Bertham, Y.H dan Nusantara, A.D. 2011. Mekanisme adaptasi genotipe baru kedelai dalam mendapatkan hara fosfor dari tanah masam. *Jurnal Agronomi Indonesia* 39(1) : 24 – 30.
- Darman, S. 2008. Ketersediaan dan serapan hara P tanaman jagung manis pada oxic distrudepts palolo akibat pemberian ekstrak kompos limbah buah kakao. *Jurnal Agroland* 15(4): 323-329.
- El-Azouni, I.M. 2008. Effect of phosphate solubilizing fungi on growth and nutrient uptake of soybean (*Glycine max L.*) plants. *Journal of Applied Sciences Research* 4(6): 592-598.
- Fahrusyah, Kusuma, Z., Prasetya, B. and Handayanto, E. 2018. Improvement of some chemical properties of an Ultisol of East Kalimantan through application of combined coal fly ash and oil palm empty fruit bunch. *Bioscience Research* 15(3) : 1805 – 1815.
- Fahrusyah, Kusuma, Z., Prasetya, B. and Handayanto, E. 2019. Utilization of coal fly ash and oil palm empty fruit bunch compost to improve the uptake of soil phosphorus and yield of maize grown on ultisol. *Journal of Ecological Engineering* 20(6) : 1 – 8.
- Frossard, E., Brossard, M., Hedley, M.J. and Metherell, A. 1995. Reactions Controlling the Cycling of P in Soils. In: *Phosphorus in the Global Environment*. Edited by Tiessen, H. and Scope. Published John Wiley & Sons Ltd.
- Ginting, E.N., Rahutomo, S. dan Sutarta, E.S. 2018. Efisiensi serapan hara beberapa jenis pupuk pada bibit kelapa sawit. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit* 26(2): 79-90.
- Haering, K.C. and Daniel, W.L 1991. Fly ash: Characteristics and use in mined land reclamation. *Virginia Coal & Energy Journal* 3 : 33 – 46.
- Hardjowigeno, S. 2003. Ilmu Tanah. Akademi Pressindo, Jakarta.
- Herviyanti, F., Ahmad, R., Sofyani, Darmawan, Gusnidar dan Saidi, A. 2012. Pengaruh pemberian bahan humat dari ekstraksi batubara muda dan pupuk P terhadap sifat kimia Ultisol serta produksi tanaman jagung. *Jurnal Solum* 9(1): 15 – 24.
- Hilsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as effected by root-induced chemical changes. *Plant and Soil* 237 : 173 – 195.
- Inthasan, J., Hirunburana, H., Herrmann, L. and Stahr, K. 2002. Effects of fly ash application on soil properties, nutrient and environment in Northern Thailand. *Symposium No 24, 17th CCSS, Paper 249* : 1 – 6.
- Kasno, A., Setyorini, D. dan Tuberkih, E. 2006. Pengaruh pemupukan fosfat terhadap produktivitas tanah Inceptisol dan Ultisol. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia* 8(2) : 91 – 98.
- Kishor, P., Ghosh, A.K. and Kumar, D. 2010. use of flyash in agriculture: a way to improve soil fertility and its productivity. *Asian Journal of Agricultural Research* 4(1):1-14, doi: 10.3923/ajar.2010.1.14
- López-Bucio, J., de La Vega, O.M., Guevara-García, A. and Herrera-Estrella, L. 2000. Enhanced phosphorus uptake in transgenic tobacco plants that overproduce citrate. *Nature Biotechnology* 18(4) : 450 – 453.
- Mokolobate, M.S. and Haynes, R.J. 2002. Comparative liming effect of four organic residues applied to acid soil. *Biology and Fertility Soils* 35(2) : 79 – 85.
- Mosali, J., Desta, K., Teal, R.K. and Freeman, K.W. 2006. Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake and use efficiency. *Journal of Plant Nutrition* 29: 2147 – 2163.
- Pathan, S.M., Aylmore, L.A.G. and Colmer, T.D. 2003. Properties of several fly ash materials in relation to use as soil amendments. *Journal of Environmental Quality* 32 : 687 – 693.
- Prasetyo, B.H. dan Suriadikarta, D.A. 2006. Karakteristik, potensi dan teknologi pengelolaan tanah Ultisol untuk pengembangan pertanian lahan kering di Indonesia. *Jurnal Litbang Pertanian* 25(2) : 39 – 46.
- Prasetyo, T.B., Yasin, S. dan Yeni, E. 2010. Pengaruh pemberian abu batubara sebagai sumber silika (Si) bagi pertumbuhan dan produksi tanaman padi (*Oryza sativa L.*). *Jurnal Solum* 7(1):1-10, doi: 10.25077/js.7.1.1-6.2010
- Rautaray, S.K., Ghosh, B.C and Mitra, B.N. 2003. Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils. *Bioresource Technology* 90 (3) : 275 – 283.
- Selles, F., Campbell, C., Zentner, R., James, D. and Basnyat, P. 2007. Withholding phosphorus after long-term additions—soil and crop responses. *Better Crops with Plant Food* 91(4):19-21.

- Shenoy, V.V and Kalagudi, G.M. 2005. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. *Biotechnology Advances* 23 : 501 - 513.
- Sundara, B., Natarajan, V. and Hari, K. 2002. Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields. *Field Crops Research* 77 (1) : 43 – 49.
- Teixeira, E.C., Samama, J. and Brun, A 1992. Studi of differen leaching methods of metallic element from coal fly ash. *Environmental Technology Journal* 13 : 1187 – 1192
- Thao, H.T.B., George, T., Yamakawa, T. and Widowati, L.R. 2008. Effects of soil aggregate size on phosphorus extractability and uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and corn (*Zea mays* L.) in two Ultisols from the Philippines. *Soil Science and Plant Nutrition* 54 (1) : 148 – 158.
- Wahyudi, I. 2009. Perubahan konsentrasi aluminium dan serapan fosfor oleh tanaman pada Ultisol akibat pemberian kompos. *Buana Sains* 9(1):1-10.
- Zhang, H., Yu, H., Ye, X. and Xu, F. 2008. Evaluation of phosphorus efficiency in rapeseed (*Brassica napus* L.) Recombinant inbred lines at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica* 34(12) : 2152 – 2159.