

**DISERTASI**

**PERUBAHAN TITIK MUATAN NOL DAN EFISIENSI  
P TANAMAN JAGUNG PADA ULTISOL AKIBAT  
PEMBERIAN CAMPURAN ABU TERBANG  
BATUBARA DAN KOTORAN AYAM**



**AGUS HERMAWAN  
NIM 20093601015**

**PROGRAM STUDI ILMU ILMU PERTANIAN  
FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2014**

**DISERTASI**

**PERUBAHAN TITIK MUATAN NOL DAN EFISIENSI  
P TANAMAN JAGUNG PADA ULTISOL AKIBAT  
PEMBERIAN CAMPURAN ABU TERBANG  
BATUBARA DAN KOTORAN AYAM**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Doktor dalam Bidang Ilmu Pengelolaan Lahan Pertanian



AGUS HERMAWAN  
NIM 20093601015

**PROGRAM STUDI ILMU ILMU PERTANIAN  
FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2014**

HALAMAN PENGESAHAN

PERUBAHAN TITIK MUATAN NOL  
DAN EFISIENSI P TANAMAN JAGUNG PADA ULTISOL  
AKIBAT PEMBERIAN CAMPURAN ABU TERBANG  
BATUBARA DAN KOTORAN AYAM

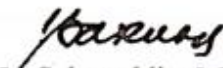
DISERTASI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Doktor dalam Bidang Ilmu Pengelolaan Lahan Pertanian


Oleh:

AGUS HERMAWAN  
NIM 20093601015

Inderalaya, Juli, 2014  
Promotor,

  
Ir. Sabaruddin, M.Sc., Ph.D.  
NIP19620421 199003 1 002


Ko-Promotor I,

  
Ir. Marsi, M.Sc., Ph.D.  
NIP 19600714 198503 1 005

Ko-Promotor II,

  
Ir. Renih Hayati, M.Sc., Ph.D.  
NIP 19610327 198610 2 001

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Pertanian  
Universitas Sriwijaya,

  
Dr. Ir. Erizal Sodikin  
NIP 19600211 198503 1 002

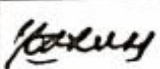
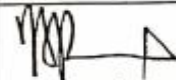
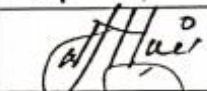



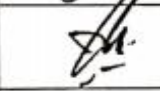
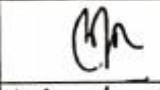
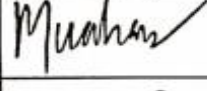

  
Ketua Program Studi  
Doktor Ilmu-Ilmu Pertanian,  
  
Dr. Ir. M. Umar Harun, M.S.  
NIP 19621213 198803 1 002

## HALAMAN PERSETUJUAN

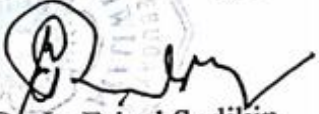
Karya tulis ilmiah berupa Laporan Akhir Disertasi ini dengan judul : “Perubahan Titik Muatan Nol dan Efisiensi P Tanaman Jagung pada Ultisol akibat Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Pascasarjana, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya pada Ujian Tertutup tanggal 19 Juni 2014 dan Ujian Terbuka tanggal 14 Juli 2014.

Inderalaya, Juli 2014

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Laporan Akhir Disertasi

No	Nama Dosen Penguji	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
1	Ir. Sabaruddin, M.Sc., Ph.D.	Ketua		13/07/2014
2	Ir. Marsi, M.Sc., Ph.D.	Anggota		
3	Ir. Renih Hayati, M.Sc., Ph.D.	Anggota		
4	Prof. Dr. Ir. Hermansah, M.S., M.Sc.	Anggota		
5	Prof. Dr. Ir. Dedik Budianta, M.S.	Anggota		
6	Dr. Ir. Yakup, M.S.	Anggota		
7	Dr. Ir. Dwi Setyawan, M.Sc.	Anggota		
8	Prof. Dr. Ir. Nuni Gofar, M.S.	Anggota		
9	Dr. Ir. M. Umar Harun, M.S.	Anggota		10/7/14
10	Dr. Ir. A. Napoleon, M.S.	Anggota		

Mengetahui,  
 Dekan Fakultas Pertanian  
 Universitas Sriwijaya



Dr. Ir. Erizal Sodikin  
 NIP 19600211 198503 1 002

Ketua Program Studi  
 Doktor Ilmu-Ilmu Pertanian



Dr. Ir. M. Umar Harun, M.S.  
 NIP.19621213 198803 1 002

## HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Agus Hermawan  
NIM : 20093601015  
Judul : Perubahan Titik Muatan Nol dan Efisiensi P Tanaman Jagung pada Ultisol akibat Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam

Menyatakan bahwa Laporan Akhir Disertasi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi Tim Promotor dan Ko-Promotor dan bukan merupakan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Akhir Disertasi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa ada paksaan dari siapapun.

Inderalaya, Juli 2014

Materai Rp. 6000,-

Agus Hermawan

## RINGKASAN

**AGUS HERMAWAN.** Perubahan Titik Muatan Nol dan Efisiensi P Tanaman Jagung pada Ultisol akibat Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam. (Promotor : **SABARUDDIN, MARSI, dan RENIH HAYATI**).

Kendala utama yang umum dijumpai pada tanah bermuatan terubahkan seperti Ultisol adalah rendahnya ketersediaan dan efisiensi pemupukan P tanaman akibat jerapan P tanah yang tinggi. Rendahnya muatan negatif tanah, yang dicirikan oleh nilai titik muatan nol (TMN) yang tinggi, merupakan penyebab utama tingginya jerapan P. Pada tanah bermuatan terubahkan, peningkatan pH tanah akan meningkatkan muatan negatif dan menurunkan TMN. Oleh karena itu, status jerapan P dapat dimodifikasi melalui peningkatan pH atau menurunkan nilai TMN tanah. Abu terbang batubara merupakan produk samping pembakaran batubara yang jumlahnya melimpah dan berpotensi untuk meningkatkan pH tanah masam. Salah satu kendala dalam pemanfaatan abu terbang batubara untuk pertanian adalah tingginya dosis optimum yang dibutuhkan (5-20%, b/b). Hal ini diduga disebabkan karena kandungan C-organik pada abu terbang batubara yang sangat rendah. Pencampuran abu terbang batubara dengan bahan organik merupakan alternatif yang dapat diterapkan untuk mengatasi kendala ini. Bahan organik juga diketahui dapat menurunkan nilai TMN dan meningkatkan muatan negatif tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan komposisi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam dengan nilai TMN yang rendah dan muatan negatif tinggi, serta mengkaji pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam terhadap status TMN, muatan negatif, jerapan dan ketersediaan P tanah serta efisiensi P tanaman jagung pada Ultisol.

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium dan rumah kaca Fakultas Pertanian Unsri. Tanah yang digunakan diambil dari lahan Arboretum Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Unsri. Abu terbang batubara diperoleh dari PLTU di Muara Enim, Sumatera Selatan. Kotoran ayam diambil dari peternakan ayam di Inderalaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan. Penelitian ini terdiri dari 2 tahap percobaan. Percobaan tahap 1 dilakukan dengan menerapkan berbagai komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) (b/b), meliputi: 0, 25, 50, 75, dan 100 persen ATB, dan waktu inkubasi, yang meliputi: 15, 30, 45 dan 60 hari. Percobaan disusun menurut Rancangan Acak Lengkap Faktorial dengan 3 ulangan. Percobaan tahap 2 disusun menurut Rancangan Acak Lengkap Faktorial dengan 3 ulangan dengan menerapkan perlakuan dosis campuran ATB-KA dengan komposisi terbaik berdasarkan hasil percobaan tahap 1 (50% ATB) yaitu : 0, 15, 30, 45, dan 60 ton ha<sup>-1</sup> dan perlakuan dosis pupuk P yaitu: 0, 87, 174, 261, dan 348 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dengan komposisi 50 % ATB dan diinkubasi selama 45 hari mempunyai potensi terbaik untuk digunakan sebagai amelioran guna menurunkan titik muatan nol (TMN) dan meningkatkan muatan negatif tanah. Kombinasi campuran ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan 45 hari inkubasi mempunyai TMN dan jerapan P yang lebih rendah, muatan negatif dan P-tersedia campuran yang lebih tinggi dibandingkan pada komposisi campuran dan waktu

inkubasi yang lain. Pemberian campuran ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi selama 45 hari pada dosis 30 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> dapat menurunkan TMN (meningkatkan muatan negatif) tanah. Jerapan P minimum sebesar 108,33 mg kg<sup>-1</sup> dan P-tersedia maksimum sebesar 102,21 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,71 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Efisiensi P tanaman jagung dapat ditingkatkan dengan pemberian campuran ATB-KA yang dikombinasikan dengan pemupukan P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Dosis optimum ATB-KA pada kombinasinya dengan pupuk P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> adalah sebesar 28,60 ton ha<sup>-1</sup>, dengan efisiensi serapan P sebesar 42,41%, dan efisiensi agronomis P sebesar 82,53 mg berat kering berangkas tanaman/mg P pupuk.

## SUMMARY

**AGUS HERMAWAN.** Changes of Point of Zero Charge and P Efficiency by Corn on Ultisol due to Application of Coal Fly Ash-Chicken Manure Mixture. (Promoted by **SABARUDDIN, MARSI, and RENIH HAYATI**).

The important constraint of soil dominated by variable charge, such as Ultisols is low P availability and low P use efficiency due to high soil P adsorption. The low negative charge on soil colloid surface, which characterized by high values of point of zero charge (PZC), is the main cause of the high P adsorption. In soil dominated by variable charge, an increase in the soil pH will increase the negative charge and decrease the PZC. Therefore, P adsorption status may be modified through increasing soil pH or decreasing soil PZC. Coal fly ash is by-product of coal burning available in abundant quantity and known can increase soil pH. However, the optimum rate of coal fly ash for agricultural land was relatively high (5-20%, w/w). Mixing of coal fly ash with organic matter is an alternative that can be applied to decrease application rate. Organic matter are also known can decrease soil PZC and increase soil negative charges. This research objective was to obtain the composition of fly ash-chicken manure mixture (FA-CM) with low of PZC and high negative charge, and to study the effect of FA-CM application on the changes of soil PZC, negative charge, P adsorption and availability and P use efficiency by corn in Ultisols.

The studi was conducted in the laboratory and greenhouse, Faculty of Agriculture, Sriwijaya University. The bulk soil used in this study was collected from Arboretum, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Sriwijaya Univesity. Coal fly ash was obtained from a coal-fired thermal power station in Muara Enim District, South Sumatra. Chicken manure was taken from the chicken farm in Inderalaya, Ogan Ilir District, South Sumatra. The study consisted of two experimental stages. The experiment stage 1 was arranged according to the Factorial Completely Randomized Design with 3 replicates. The treatments tested were ratio (w/w) of fly ash to chicken manure (FA-CM) (0, 25, 50, 75, and 100 percent) and the incubation time (15, 30, 45 and 60 days). The treatments tested in the experiments stage 2 were the dose of FA-CM mixture (50% FA (w/w) and 45 days of incubation), namely: 0, 15, 30, 45, dan 60 ton ha<sup>-1</sup>, and P fertilizer doses which include: 0, 87, 174, 261, and 348 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. The experiment were arranged according to the Factorial Completely Randomized Design, with 3 replicates.

The results showed that the mix of 50% FA with 45 days incubation has better potential for use as ameliorant to decrease soil PZC and increase soil negatif charge. The combination of the mix of 50% FA with 45 days incubation have a lower PZC and higher negative charge compared to the other combinations. FA-CM mixture as a soil ameliorant decreased P adsorption but it increased available P in Ultisols by increasing both soil pH and negative charges. The application of FA-CM at 30 tons ha<sup>-1</sup> and P at 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> resulted in better increases in soil charges than any other combinations. However, the lowest P adsorption (108.33 mg kg<sup>-1</sup>) and the highest available P (102.21 mg kg<sup>-1</sup>) was resulted in by the applications of 42.64 tons of FA-CM ha<sup>-1</sup> and 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.



The P efficiency by corn had been increased through the addition of FA-CM in combination with P fertilization at the rate of 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. The optimum rate of FA-CM in combination with P fertilizer at the rate of 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> is 28.60 tons ha<sup>-1</sup>, with P uptake efficiency of 42.41% and agronomic P efficiency of 82.53 mg shoot dry weight/mg P from fertilizer.

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT. Hanya berkat rahmat dan karunia-Nya jua, penulis dapat melalui tahapan demi tahapan studi, yang prosesnya kadang penuh gairah namun ada kalanya kosong tanpa semangat, dengan selamat, hingga tersusunlah disertasi ini. Disertasi dengan judul “Perubahan Titik Muatan Nol dan Efisiensi P Tanaman Jagung pada Ultisol akibat Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam” mustahil terwujud tanpa perkenan dan kehendak Allah SWT.

Tugas yang berat tapi mulia telah ditimpakan kepada Bapak Ir. Sabaruddin, M.Sc., Ph.D, Bapak Ir. Marsi, M.Sc., Ph.D dan Ibu Ir. Renih Hayati, M.Sc., Ph.D selaku Promotor dan Ko-Promotor. Tidak ada kata yang pantas untuk diucapkan sebagai ungkapan rasa terima kasih kepada ketiga beliau, yang setiap saat dengan tangan terbuka dan hati yang tulus selalu menerima keluhan, selalu memberikan perhatian, dukungan, arahan dan bimbingan, sehingga membangkitkan motivasi yang kuat bagi penulis untuk menyelesaikan disertasi ini. Penulis meyakini bahwa kerja keras para Promotor akan menambah panjang catatan emas di hadapan Allah SWT.

Kepada Bapak Prof. Dr. Ir. Hermansah, M.S., M.Sc., selaku penguji tamu pada Ujian Tertutup dan Ujian Terbuka, kepada Bapak Prof. Dr. Ir. Dedik Budianta, M.S., Bapak Dr. Ir. Yakup, M.S., Bapak Dr. Ir. Dwi Setyawan, M.Sc., Ibu Prof. Dr. Ir. Nuni Gofar, M.S., Bapak Dr. Ir. M. Umar Harun, M.S., Bapak Dr. Ir. Adipati Napoleon, M.S., dan Bapak Dr. Ir. A. Madjid Rohim, M.S., selaku tim penguji yang terlibat langsung sejak seminar proposal penelitian hingga ujian akhir disertasi ini, disampaikan ucapan terima kasih sangat atas berbagai masukan dan koreksi konstruktif yang telah diberikan, sehingga penulis semakin menyadari betapa banyak kekurangan dan kelemahan yang penulis miliki. Hal ini menjadi motivasi tersendiri bagi penulis untuk memperbaiki diri dan menapak lebih maju dalam mencari ilmu.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Prof. Dr. Badia Parizade, MBA selaku Rektor Universitas Sriwijaya, Bapak Dr. Ir. Erizal Sodikin selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya, Bapak Dr. Ir. M. Umar Harun, M.S selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu-Ilmu Pertanian, dan Ibu Prof. Dr. Hilda Zulkifli, M.Si., DEA selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya, yang telah memberikan izin dan bantuan selama penulis mengikuti pendidikan.

Pelaksanaan penelitian tidak akan berjalan lancar tanpa tersedianya dana fasilitas yang memadai. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan yang telah memberikan beasiswa kepada penulis untuk menempuh pendidikan melalui Program BPPS. Laporan disertasi ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian yang didanai melalui Program Penelitian Unggulan Kompetitif Unsri Tahun Anggaran 2013. Untuk itu ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Rektor Universitas Sriwijaya. Kepada Bapak Dr. Ir. Adipati Napoleon, M.S. selaku Ketua Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya beserta staf dan karyawan, yang telah memberikan izin dan pelayanan untuk pemakaian

fasilitas laboratorium, penulis mengucapkan terima kasih. Bantuan Ibu Ismaini, S.T., M.Si., Pak Suwito, Pak Dedi, Sdr. Yuda Nopriandi, dan Sdr. Riky F. Sembiring dalam pelaksanaan penelitian dan proses analisis tanah dan tanaman di laboratorium sangat penulis hargai.

Apabila semua pihak yang terlibat dalam penelitian dan penulisan disertasi ini disebut satu per satu maka akan sangat panjang. Oleh karena itu, dengan tidak mengurangi makna bantuan yang telah diberikan, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada rekan-rekan sejawat serta berbagai pihak baik secara langsung atau tidak langsung yang telah turut membantu dalam penyelesaian disertasi ini. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan dengan berlipat ganda.

Penghargaan khusus diperuntukkan bagi Ayahanda H. A. Karim Yusuf (Alm.) dan Ibunda Hj. Nurma Karim, serta Ibu Hj. Yahida Hattimoeddin dan Ibu Hj. Yahibar Aznal, juga adik-adik-ku tersayang, yang senantiasa mendoakan dan memberikan dorongan semangat. Kepada istri dan anak-anakku tercinta, dr. Lylayuveri, Sp.KJ (Almh.), Muhammad Mirshan Aulia, Muhammad Irfan Fadhil, dan Muhammad Iqbal Farras, terima kasih atas dukungan, keikhlasan, kesabaran, dan cinta kasih yang senantiasa diberikan. Semoga persembahan kecil ini dapat menjadi motivasi bagi ananda bertiga untuk berjuang dan menapak maju dalam menuntut ilmu.

Sangat disadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna. Masukan dan saran ke arah yang lebih baik sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga buah karya ini dapat bermanfaat.

Palembang, Juli 2014  
Agus Hermawan

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Palembang tanggal 29 Agustus 1968, merupakan anak pertama dari 8 bersaudara dari pasangan H. A. Karim Yusuf (Alm.) dan Hj. Nurma Karim. Pada tahun 2000 penulis menikah dengan dr. Lylayuveri, Sp.KJ (Almh.) yang telah berpulang ke rahmatullah pada tahun 2011, dan dikaruniai 3 orang anak, yaitu Muhammad Mirshan Aulia (13 tahun), Muhammad Irfan Fadhil (10 tahun), dan Muhammad Iqbal Farras (4 tahun).

Penulis menyelesaikan pendidikan SD pada tahun 1982 di SD Xaverius Belitang, OKU Timur, pendidikan SMP pada tahun 1984 di SMP Negeri 1 Belitang, OKU Timur, dan pendidikan SMA pada tahun 1987 di SMA Negeri 1 Belitang, OKU Timur. Pada tahun 1991 penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya.

Sejak tahun 1993 sampai sekarang penulis bertugas sebagai tenaga pengajar pada Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya. Pada tahun 1997 penulis menyelesaikan pendidikan Magister pada Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung, melalui Program Beasiswa TMPD dari Dirjen Dikti, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan. Pada tahun 2009, penulis kembali mendapatkan kesempatan dan mendapatkan Beasiswa BPPS dari Dirjen Dikti, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan untuk menempuh pendidikan pada Bidang Ilmu Pengelolaan Lahan Pertanian, Program Studi Doktor Ilmu-Ilmu Pertanian, Program Pascasarjana, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya.

Selama mengikuti pendidikan pada Program Studi Doktor Ilmu-Ilmu Pertanian, penulis telah menulis satu artikel pada *Agrivita Journal of Agricultural Science* (indexed in: Elsevier-Scopus, DOAJ), tiga artikel pada jurnal nasional, masing-masing pada *Sains Tanah – Journal of Soil Science and Agroclimatology*, *Jurnal Agrista*, dan *Jurnal Agroekoteknologi Tropika*. Satu makalah telah dipresentasikan dan dimuat pada *Prosiding Seminar Nasional Lahan Sub Optimal (PUR-PLSO, IRRI, IPB)*.

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN .....	iv
RINGKASAN .....	v
SUMMARY .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
RIWAYAT HIDUP .....	xi
DAFTAR ISI .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian .....	8
1.4. Hipotesis .....	8
1.5. Kebaruan Penelitian .....	8
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....	10
2.1. Tanah Bermuatan Terubahkan .....	10
2.2. Abu Terbang Batubara .....	14
2.3. Bahan Organik .....	21
2.4. Ketersediaan P dan Efisiensi P Tanaman .....	25
2.5. Tanaman Jagung .....	28
BAB 3. METODE PENELITIAN .....	31
3.1. Tempat dan Waktu .....	31
3.2. Bahan dan Alat .....	31
3.3. Pelaksanaan Penelitian .....	32

	Halaman
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	38
4.1. Karakteristik Tanah, Abu Terbang Batubara, dan Kotoran Ayam Awal .....	38
4.2. Pengaruh Pencampuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam terhadap Beberapa Karakteristik Kimia Campuran .....	41
4.3. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara- Kotoran Ayam terhadap pH, TMN, dan Muatan Negatif Tanah ....	52
4.4. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara- Kotoran Ayam terhadap Jerapan P dan P-tersedia Tanah .....	63
4.5. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara- Kotoran Ayam Terhadap Serapan P dan Efisiensi P Tanaman Jagung .....	72
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	79
DAFTAR PUSTAKA .....	81
LAMPIRAN .....	89

## DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1. Komposisi kimia tanah pertanian dan abu terbang batubara.....	15
2.2. Pengaruh potensial penambahan abu terbang batubara pada tanah terhadap proses-proses yang terjadi pada ekosistem teresterial (Carlson dan Adriano, 1993) .....	19
2.3. Kandungan hara tanaman jagung dengan hasil biji 9,45 ton ha <sup>-1</sup> .....	30
2.4. Serapan hara pada berbagai periode tumbuh tanaman jagung .....	30
4.1. Karakteristik abu terbang batubara, kotoran ayam dan tanah awal ..	39
4.2. Jerapan P maksimum dan kebutuhan P tanah awal .....	40
4.3. Pengaruh pencampuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan waktu inkubasi terhadap pH H <sub>2</sub> O (1:1), titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) campuran .....	42
4.4. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap pH H <sub>2</sub> O (1:1) tanah .....	53
4.5. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap pH KCl (1:1) tanah .....	53
4.6. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap titik muatan nol (TMN) tanah .....	59
4.7. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap muatan negatif ( $\Delta$ pH (pH H <sub>2</sub> O – TMN)) tanah .....	60
4.8. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap kandungan P-tersedia (mg kg <sup>-1</sup> ) tanah .....	69
4.9. Pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P terhadap serapan P tanaman jagung pada fase anthesis (mg tanaman <sup>-1</sup> ) .....	74
4.10. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap efisiensi P tanaman jagung .....	76

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1.1. Kerangka pemikiran penelitian .....	6
1.2. Rangkaian kegiatan penelitian .....	7
2.1. Perubahan muatan negatif dan positif yang ditimbulkan akibat perubahan pH .....	13
2.2. Mekanisme reaksi kompleksasi ion Al terlarut oleh (a) asam organik dan (b) protonasi anion organik .....	22
2.3. Reaksi netralisasi kemasaman tanah akibat pelepasan ion $\text{Ca}^{2+}$ dari pupuk kandang .....	23
2.4. Jerapan spesifik asam oksalat pada permukaan hidrus-oksida Al atau Fe (M) .....	23
2.5. Reaksi pertukaran ligan (M= permukaan senyawa logam; $\text{OH}_2$ dan $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ = ligan anorganik; dan HA = ligan organik) .....	25
4.1. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan pH $\text{H}_2\text{O}$ pada berbagai waktu inkubasi .....	43
4.2. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan titik muatan nol (TMN) campuran pada berbagai waktu inkubasi .....	43
4.3. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) campuran pada berbagai waktu inkubasi .....	45
4.4. Hubungan antara kandungan C-organik campuran dengan pH $\text{H}_2\text{O}$ , titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) campuran .....	46
4.5. Hubungan muatan negatif dengan jerapan P dan P-tersedia campuran .....	48
4.6. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan jerapan P pada berbagai waktu inkubasi .....	49
4.7. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan P-tersedia pada berbagai waktu inkubasi .....	51
4.8. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan pH $\text{H}_2\text{O}$ dan TMN tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	57
4.9. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung ...	57
4.10. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan kapasitas tukar kation (KTK) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	58



4.11. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan kandungan C-organik tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung ...	61
4.12. Hubungan antara kandungan C-organik tanah dengan pH H <sub>2</sub> O dan TMN pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung ...	61
4.13. Hubungan antara kandungan C-organik dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	62
4.14. Hubungan antara kandungan C-organik dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	62
4.15. Hubungan antara dosis ATB-KA dan jerapan P tanah pada berbagai dosis pupuk P ((a) tidak ditanami jagung; (b) ditanami jagung) .....	64
4.16. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan P-organik tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	65
4.17. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan Fe-P tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	66
4.18. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan Al-P tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung .....	66
4.19. Hubungan antara dosis ATB-KA dan P-tersedia tanah pada berbagai dosis pupuk P ((a) tidak ditanami jagung; (b) ditanami jagung) .....	71
4.20. Hubungan antara dosis ATB-KA dan serapan P tanaman jagung .....	73
4.21. Hubungan antara dosis pupuk P dan serapan P tanaman jagung .....	73
4.22. Hubungan antara kandungan P-tersedia tanah dan serapan P tanaman Jagung .....	74
4.23. Hubungan antara dosis ATB-KA dan efisiensi P tanaman jagung pada berbagai dosis pupuk P .....	77

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Data dan hasil analisis keragaman titik muatan nol (TMN), pH H <sub>2</sub> O, pH KCl dan ΔpH pada setiap komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan waktu inkubasi .....	90
2. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati pada perlakuan komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (% ATB) dan waktu inkubasi (hari) .....	94
3. Data dan hasil analisis keragaman berupa karakteristik kimia tanah Ultisol yang ditanami jagung dengan perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk TSP .....	95
4. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati dengan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dan dosis pupuk P pada percobaan yang ditanami jagung .....	102
5. Data dan hasil analisis keragaman berupa karakteristik kimia tanah Ultisol yang tidak ditanami jagung dengan perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk TSP .....	103
6. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati dengan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dan dosis pupuk P pada percobaan yang tidak ditanami jagung .....	106
7. Data dan hasil analisis keragaman serapan P tanaman jagung akibat pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P .....	107
8. Data dan hasil analisis keragaman efisiensi P tanaman jagung akibat pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P .....	108

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol, merupakan tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut. Intensitas pelapukan dan pencucian yang tinggi menyebabkan komponen penyusun tanah didominasi oleh mineral bermuatan terubahkan, seperti liat tipe 1:1 (Kaolinit, Haloisit), aluminosilikat amorf dan oksida-hidrus Al dan Fe (Uehara dan Gillman, 1981; Sposito, 2008). Muatan terubahkan ini muncul karena fraksi-fraksi tanah tersebut bersifat amfoter yang menyebabkan muatan bersih (*netto*) pada koloid tanah dapat berubah-ubah. Muatan koloid tanah dapat menjadi negatif, nol, atau positif, tergantung pada perubahan pH larutan (Shamshuddin dan Anda, 2008).

Fenomena muatan terubahkan tersebut, memunculkan istilah titik muatan nol (TMN) atau *point of zero charge* (PZC) atau  $pH_0$ . TMN didefinisikan sebagai nilai pH larutan tanah dimana muatan positif dan negatif pada koloid tanah adalah sama, atau pada kondisi pH dimana muatan bersih (*netto*) pada koloid tanah sama dengan nol. TMN mencerminkan besarnya muatan bersih sistem koloid tanah pada pH tertentu atau besarnya muatan koloid ditentukan oleh hubungan pH dan TMN. Jika nilai TMN mendekati atau lebih tinggi dari nilai pH aktual tanah, maka permukaan koloid cenderung bermuatan positif dan sebaliknya (Sakurai *et al.*, 1988; Sposito, 2008).

TMN merupakan peubah yang penting dalam sistem pengelolaan tanah bermuatan terubahkan, karena berhubungan erat dengan ketersediaan hara tanaman. Ultisol umumnya mempunyai TMN yang lebih tinggi atau mendekati nilai pH aktualnya (Uehara dan Gillman, 1981; Shamshuddin dan Anda, 2012). Fenomena ini dipengaruhi oleh tingginya kandungan hidrus-oksida Al dan Fe serta rendahnya kandungan bahan organik tanah (Sakurai *et al.*, 1989; Sakurai *et al.*, 1996). Sabaruddin *et al.* (2001) melaporkan bahwa Ultisol pada lapisan atas (0-17 cm) dengan tutupan lahan berupa hutan konservasi, hutan pinus, dan akasia di Sumatera Selatan mempunyai TMN sebesar 3,57 – 4,23 dengan pH H<sub>2</sub>O

sebesar 4,18 – 5,73. Pada lapisan bawah, nilai TMN cenderung lebih tinggi dan pH H<sub>2</sub>O cenderung menjadi lebih rendah. Hal ini disebabkan karena komponen tanah menjadi lebih didominasi oleh hidrus-oksida Al dan Fe akibat menurunnya kandungan bahan organik. Uehara dan Gillman (1981) mengemukakan bahwa nilai TMN yang lebih tinggi atau mendekati nilai pH aktualnya mencerminkan rendahnya muatan negatif tanah.

Kandungan unsur hara dalam bentuk kation, seperti basa-basa dapat ditukar, dan dalam bentuk anion, seperti ion fosfat, yang umumnya rendah pada Ultisol, terutama disebabkan oleh tingginya nilai TMN atau rendahnya muatan negatif tanah. Kondisi ini menyebabkan kation-kation hara menjadi lebih mudah mengalami pencucian. Anion hara seperti fosfat menjadi tidak tersedia bagi tanaman karena dijerap pada permukaan koloid tanah yang bermuatan positif. Hal ini ditunjukkan oleh tingginya kapasitas jerapan P pada tanah-tanah bermuatan terubahkan dan mengakibatkan ketersediaan dan efisiensi P menjadi rendah (von Uexkull, 1986; Syers *et al.*, 2008).

Upaya untuk meningkatkan muatan negatif tanah dapat dilakukan dengan meningkatkan pH atau menurunkan TMN tanah (Shamshuddin dan Anda, 2008). Pengapuran merupakan upaya yang banyak dilakukan untuk meningkatkan pH tanah yang secara tidak langsung akan meningkatkan muatan negatif tanah. Namun demikian, peningkatan pH akibat pengapuran bersifat sementara dan dengan waktu pH akan kembali asal. Selain itu, harga kapur pertanian yang semakin meningkat, seringkali menyebabkan praktik pengapuran menjadi tidak ekonomis. Oleh karena itu, penurunan TMN merupakan alternatif yang dapat diterapkan dalam upaya untuk meningkatkan muatan negatif tanah, tanpa harus meningkatkan pH sampai tingkat yang tidak ekonomis (Uehara dan Gillman, 1981).

Abu batubara merupakan salah satu bahan yang dapat digunakan untuk meningkatkan pH dan menurunkan TMN tanah. Material ini merupakan produk samping pembakaran batubara yang jumlahnya melimpah dan akan semakin meningkat dengan meningkatnya konsumsi batubara sebagai sumber energi. Laju daur-ulang global produk samping pembakaran batubara, termasuk abu terbang

batubara sekitar 50% dan sisanya ditimbun pada lahan urug (*landfill*) yang justru berpotensi untuk mencemari lingkungan di sekitarnya (Heidrich *et al.*, 2013).

Abu terbang batubara diketahui dapat meningkatkan pH pada tanah masam karena kaya akan Ca dan Mg silikat, aluminosilikat dan oksida Ca dan Mg (Brouwers dan Van Eijk, 2003; Yunusa *et al.*, 2006; Murugan dan Vijayarangam, 2013). Abu terbang batubara mempunyai karakteristik mineralogi yang lebih kompleks dibanding bahan kapur dimana reaksi netralisasinya juga melibatkan mineral lain, seperti Ca dan Mg silikat dan aluminosilikat, disamping oksida Ca dan Mg (Brouwers dan Van Eijk, 2003).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis optimum untuk aplikasi abu terbang batubara pada tanah pertanian relatif sangat besar, yaitu 5 sampai 20 % (b/b), sehingga muncul masalah transportasi dan metode pemberian yang membutuhkan biaya tinggi (Elliot dan Zhang, 2005). Pencampuran abu terbang batubara dan bahan organik merupakan alternatif yang dapat diterapkan untuk menurunkan dosis yang diberikan, selain juga akan dapat meningkatkan kualitas amelioran yang dihasilkan. Bahan organik diketahui dapat meningkatkan jumlah muatan negatif dan menurunkan TMN tanah. Asam-asam organik dengan gugus fungsional yang sangat reaktif dan mempunyai afinitas yang tinggi terhadap Al dan Fe, melalui reaksi deprotonasi akan menghasilkan muatan negatif dan selanjutnya akan mempengaruhi pH dan TMN tanah (Haynes dan Mokolobate, 2001; Tan, 2003). Asam-asam organik diketahui dapat meningkatkan ketersediaan P melalui pembentukan senyawa kompleks organo-metal antara asam organik dengan ion logam seperti Al, Fe dan Mn (Tan, 2003; Yang *et al.*, 2013). Hasil penelitian mengungkapkan bahwa pemberian bahan organik berupa blotong dan pupuk kandang dapat menurunkan nilai TMN, meningkatkan pH dan jumlah muatan negatif tanah yang diikuti dengan menurunnya jerapan P dan meningkatnya P-tersedia tanah (Ali dan Supardi, 1999; Mulyadi, 2000).

Beberapa peneliti sebelumnya mengungkapkan bahwa pencampuran bahan organik dan abu terbang batubara dengan komposisi 1:1 diketahui dapat meningkatkan ketersediaan hara kompos yang dihasilkan (Bhattacharya dan Chattopadhyay, 2004; Venkatesh dan Eevera, 2008). Hasil-hasil penelitian juga mengungkapkan bahwa penambahan campuran bahan organik dan abu terbang

batubara dengan komposisi 1:1 hingga dosis 40-80 ton ha<sup>-1</sup> dapat meningkatkan ketersediaan hara dan respon tanaman secara signifikan tanpa menimbulkan resiko terjadinya kontaminasi pada tanah, air dan tanaman (Sajwan *et al.*, 2006; Aggarwal *et al.*, 2009; Arivazhagan, 2011).

Respon positif tanah dan tanaman akibat pemberian campuran abu terbang batubara dan bahan organik seperti diungkapkan oleh hasil-hasil penelitian di atas diduga juga dapat disebabkan oleh terjadinya perubahan nilai muatan negatif tanah atau TMN tanah. Meskipun demikian, informasi mengenai pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terhadap karakteristik fisikokimia tanah, khususnya perubahan TMN pada tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol, relatif masih sedikit. Oleh karena itu penelitian tentang pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam untuk memperbaiki status TMN tanah serta meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemupukan P pada Ultisol masih sangat diperlukan.

## 1.2. Perumusan Masalah

Masalah utama yang umum dijumpai pada tanah bermuatan terubahkan seperti Ultisol untuk pengembangan pertanian, khususnya tanaman pangan, adalah tingginya kapasitas jerapan P yang menjadi penyebab utama rendahnya ketersediaan P dan efisiensi pemupukan P. Kapasitas jerapan P yang tinggi ini terutama disebabkan oleh rendahnya muatan negatif tanah yang dicirikan oleh tingginya nilai titik muatan nol (TMN) tanah.

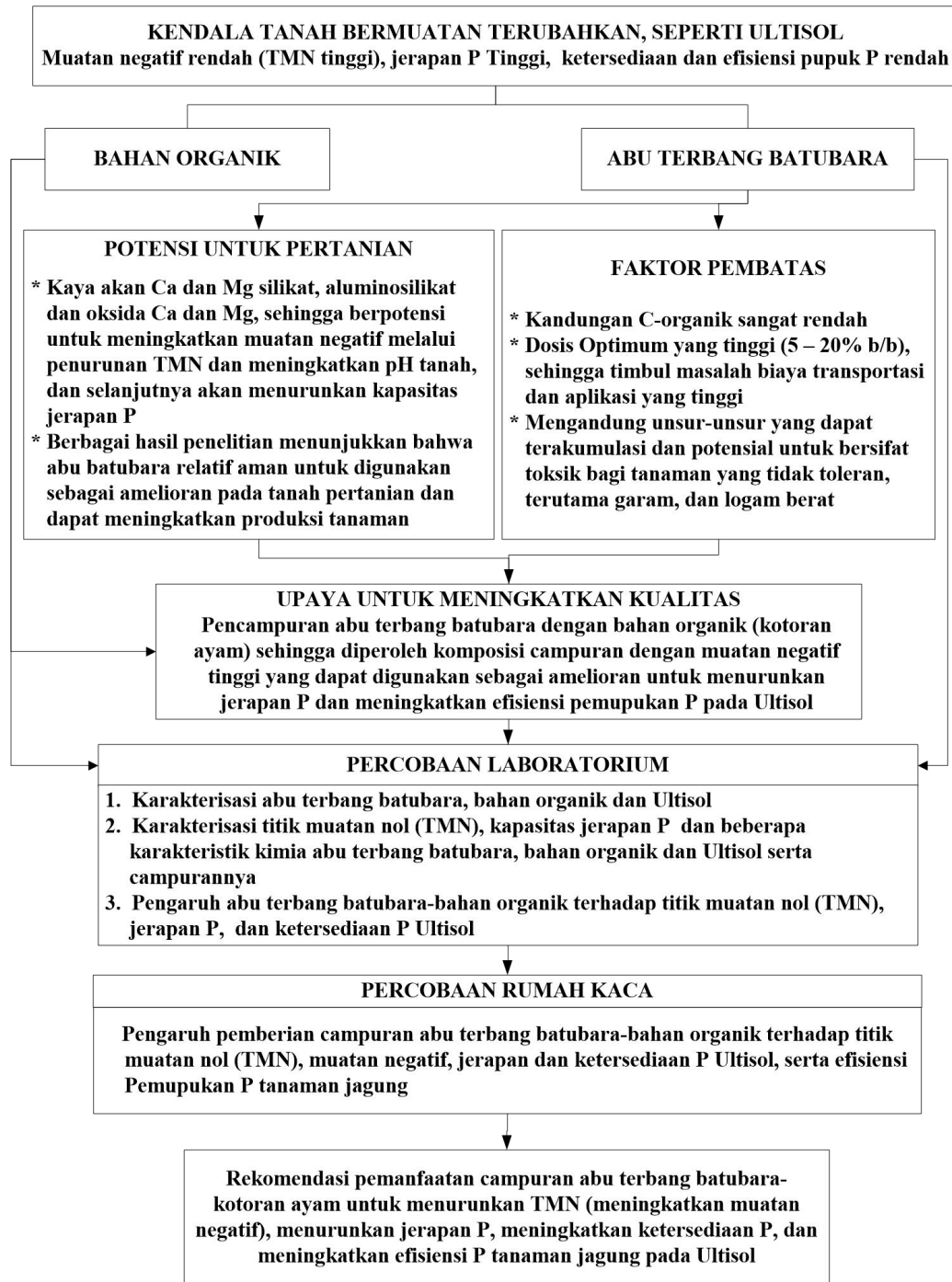
Pengendalian nilai TMN tanah atau modifikasi sifat permukaan komponen tanah akan dapat meningkatkan ketersediaan dan efisiensi P melalui peningkatan jumlah muatan negatif dan penurunan kapasitas jerapan P. Modifikasi sifat permukaan komponen tanah dapat dilakukan diantaranya melalui pemberian bahan-bahan yang dapat menurunkan nilai TMN tanah seperti abu terbang batubara.

Abu batubara merupakan produk samping yang dihasilkan oleh PLTU dan kegiatan industri yang berbahan bakar batubara. Jumlahnya di Indonesia melimpah, pada tahun 2011 diperkirakan jumlahnya mencapai 4 juta ton dan akan terus meningkat pada tahun-tahun mendatang. Sebagian besar material ini hanya

digunakan sebagai pengisi pada galian bekas tambang atau ditimbun pada suatu tempat yang justru berpotensi untuk mencemari lingkungan (Pandey dan Singh, 2010). Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa abu batubara relatif aman untuk digunakan sebagai amelioran pada tanah pertanian dan dapat meningkatkan produksi tanaman (Mitra *et al.*, 2003; Aggarwal *et al.*, 2009; Venkatesh dan Eevera, 2008) dan US-EPA telah menetapkan bahwa abu batubara bukan merupakan limbah berbahaya (*non-hazardous*) (*American Coal Ash Association Educational Foundation*, 2009).

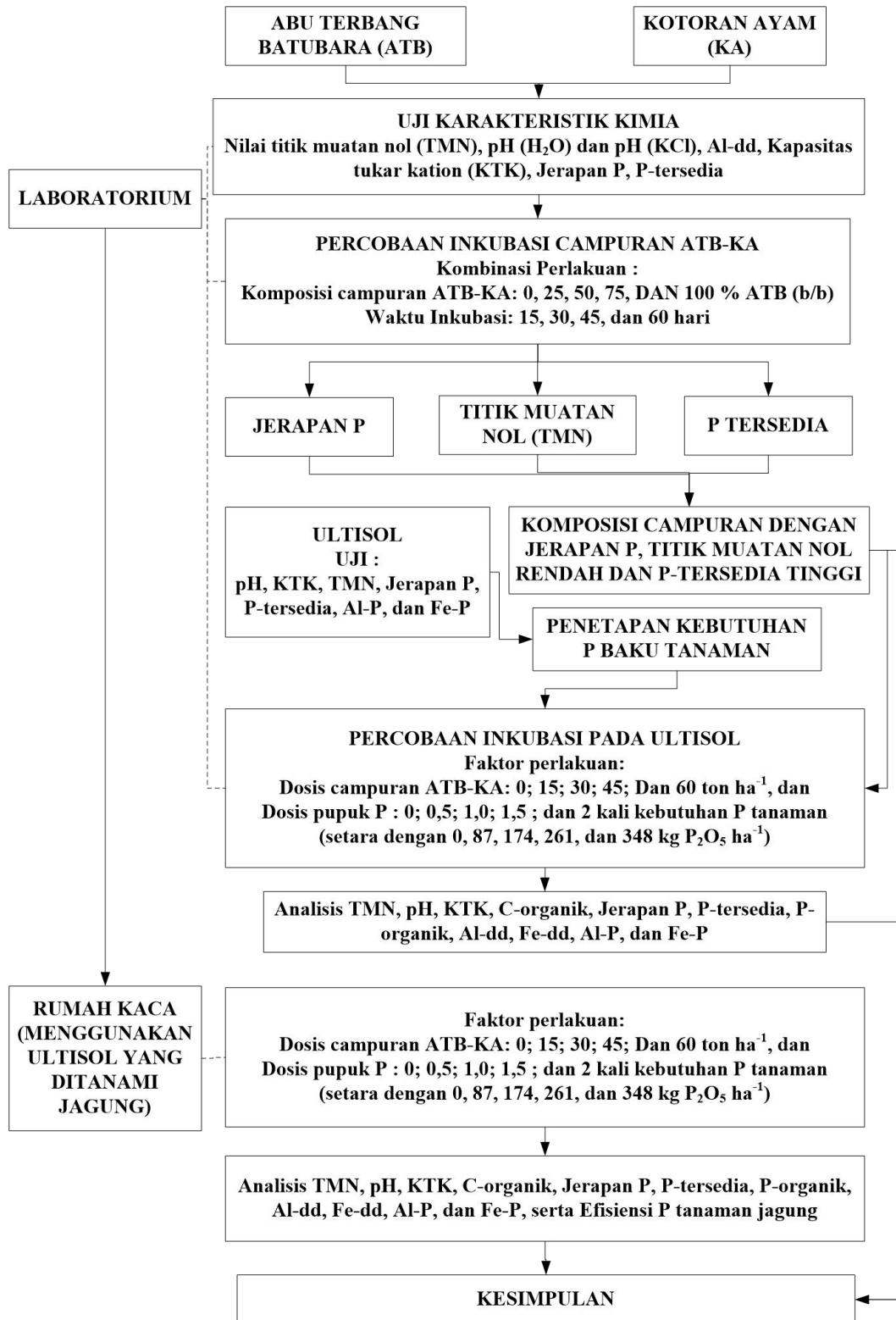
Abu terbang batubara diketahui dapat meningkatkan pH tanah masam karena kaya akan Ca dan Mg silikat, aluminosilikat dan oksida Ca dan Mg (Brouwers dan Van Eijk, 2003; Yunusa *et al.*, 2006; Murugan dan Vijayarangam, 2013). Abu terbang batubara merupakan material kompleks yang didominasi oleh silika (Si) (sekitar 54,59%) (Ricou *et al.*, 2001; Pandey dan Singh, 2010; Jumaeri *et al.*, 2007). Silika diketahui dapat menurunkan TMN tanah dan menurunkan jerapan P, menggantikan P dari kompleks pertukaran, dan meningkatkan ketersediaan P (Savant *et al.*, 1999).

Pencampuran abu terbang batubara dan bahan organik merupakan alternatif yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kualitas amelioran yang dihasilkan. Bahan organik seperti kotoran ayam diketahui dapat menurunkan TMN dan meningkatkan muatan negatif tanah melalui reaksi deprotonasi asam-asam organik dan pembentukan senyawa kompleks organo-metal antara asam organik dengan ion logam seperti Al, Fe dan Mn (Tan, 2003; Yang *et al.*, 2013). Pemberian campuran abu terbang batubara dan bahan organik seperti kotoran ayam diharapkan akan dapat berperan dalam memperbaiki kendala kimiawi tanah melalui peningkatan jumlah muatan negatif, penurunan nilai TMN dan penurunan kapasitas jerapan P tanah, sehingga ketersediaan dan efisiensi pemupukan P dapat ditingkatkan. Kerangka pemikiran dan rangkaian kegiatan penelitian ini disajikan pada Gambar 1.1 dan Gambar 1.2.



Gambar 1.1. Kerangka pemikiran penelitian





Gambar 1.2. Rangkaian pelaksanaan kegiatan penelitian

### 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengevaluasi pengaruh komposisi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terhadap status TMN, muatan negatif, jerapan P dan P-tersedia campuran,
2. Mengevaluasi pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam terhadap perubahan status TMN, muatan negatif, jerapan P dan ketersediaan P pada Ultisol, dan
3. Mengevaluasi pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam terhadap efisiensi pemupukan P tanaman jagung pada Ultisol.

### 1.4. Hipotesis

Hipotesis yang diajukan adalah sebagai berikut:

1. Campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam dengan komposisi 50% abu terbang batubara akan menurunkan TMN serta meningkatkan ketersediaan P yang lebih baik dibandingkan pada komposisi campuran yang lain,
2. Kombinasi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terpilih dengan dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 1 kali kebutuhan P tanaman akan dapat menurunkan TMN dan meningkatkan ketersediaan P Ultisol yang lebih baik dibandingkan pada perlakuan dosis campuran yang lain, dan
3. Kombinasi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terpilih dengan dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 1 kali kebutuhan P tanaman akan dapat meningkatkan efisiensi pemupukan P tanaman jagung yang lebih baik dibandingkan pada kombinasi perlakuan yang lain.

### 1.5. Kebaruan Penelitian

Potensi peningkatan kualitas kimiawi tanah bermuatan terubahkan seperti Ultisol masih sangat dimungkinkan antara lain melalui modifikasi nilai TMN tanah untuk meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemupukan P. Permasalahan ketersediaan dan efisiensi P yang merupakan penghambat produktivitas tanaman

pada tanah bermuatan terubahkan seperti Ultisol belum sepenuhnya terpecahkan. Pemberian campuran abu terbang batubara dan bahan organik seperti kotoran ayam diharapkan akan dapat menjadi alternatif dalam memperbaiki kendala kimiawi tanah melalui peningkatan muatan negatif, penurunan nilai TMN dan penurunan kapasitas jerapan P tanah, dalam upaya untuk meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemupukan P tanaman.

Kebaruan yang diharapkan diperoleh dari penelitian ini antara lain adalah: 1) didapatkan komposisi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terbaik dengan nilai TMN yang rendah serta muatan negatif dan kandungan P tersedia yang tinggi sebagai amelioran untuk menurunkan TMN dan kapasitas jerapan P tanah; 2) diketahui pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terhadap status TMN, muatan negatif, jerapan P dan ketersediaan P tanah serta efisiensi pemupukan P tanaman jagung pada Ultisol.

Data dan informasi hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan dalam: 1) pengelolaan tanah bermuatan terubahkan seperti Ultisol, 2) pengembangan penelitian lanjutan yang berkaitan dengan pemanfaatan limbah abu terbang batubara untuk pertanian, dan 3) menjadi alternatif dalam pengelolaan limbah abu terbang batubara yang dapat memberi nilai tambah terhadap limbah yang dihasilkan.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Tanah Bermuatan Terubahkan

Tanah bermuatan terubahkan merupakan tanah-tanah yang muatan pada permukaan koloidnya berubah dengan perubahan pH dan disebut juga tanah bermuatan tergantung pH (Uehara dan Gilman, 1981). Muatan total tanah sangat dipengaruhi oleh perubahan pH larutan tanah. Tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol, merupakan tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut.

Proses pelapukan dan pencucian yang intensif dalam waktu lama menyebabkan tanah ini mempunyai pH dan kandungan basa-basa yang rendah serta umumnya didominasi oleh liat dengan aktifitas rendah (*low activity clay*), seperti mineral liat tipe 1:1 (Kaolinit, Haloisit), aluminosilikat amorf dan oksida-hidrus Al dan Fe. Mineral-mineral liat ini mempunyai muatan terubahkan (*variable charge*) (Uehara dan Gillman, 1981; Sposito, 2008).

Sumber muatan pada tanah dengan muatan terubahkan dapat berasal dari senyawa atau fraksi anorganik dan organik yang bersifat amfoter (Sakurai *et al.*, 1988; Sposito, 2008). Muatan tanah dihasilkan dari reaksi protonasi dan deprotonasi group hidroksil pada permukaan pinggiran mineral silikat tipe 1:1 (kaolinit, haloisit), oksida-hidrus Al dan Fe (AlOH dan FeOH) yang berasal dari mineral gibsit, boehmit, goethit, ferihidrit dan hematit, dan aluminosilikat yang bersifat amorf seperti alofan dan imogolit (Uehara dan Gilman, 1981; Sollins *et al.*, 1988). Fraksi anorganik seperti mineral liat tipe 1:1 dan oksida-hidrus Al dan Fe umumnya dijumpai pada tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut seperti Ultisol (Uehara dan Gilman, 1981; Sollins *et al.*, 1988; Sposito, 2008). Sementara itu, fraksi organik berasal dari koloid humus yang bersifat amorf. Muatan terubahkan dari fraksi humus ini terjadi akibat penambahan atau kehilangan ion  $H^+$  dari gugus-gugus fungsional seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan amina (-NH<sub>2</sub>). Selain itu, fraksi humus yang bersenyawa dengan logam Al dan Fe juga termasuk sebagai sumber muatan terubahkan (Stevenson, 1994; Sollins *et al.*, 1988; Sposito, 2008).

Terdapat dua fenomena penting yang merupakan ciri dasar mineral yang berpengaruh terhadap beberapa sifat fisiko-kimia tanah bermuatan terubahkan, yaitu: (1) luas permukaan sistem koloid (*surface area*), dan (2) kepekatan muatan listrik pada permukaan koloid. Muatan sebenarnya (*actual charge*) yang terdapat pada permukaan koloid, dipengaruhi oleh komposisi fase padat (*solid phase*) dan komposisi fase cair (*liquid phase*), yang terlibat dalam reaksi asam-basa (Sollins *et al.*, 1988; Sposito, 2008). Dengan demikian, pH larutan tanah yang mengatur tingkat protonasi dan deprotonasi mempengaruhi mekanisme terjadinya perubahan muatan tanah (Sposito, 2008). Oleh karena itu, pada tanah bermuatan terubahkan, muatan pada permukaan koloid dapat berubah-ubah tergantung pada aktifitas dan konsentrasi ion penentu potensial (*potential determining ions*) ( $H^+$  dan  $OH^-$ ) yang berasal dari oksida-hidrus Al, Fe, atau dari gugus fungsional senyawa organik. Muatan netto pada permukaan koloid ditentukan oleh kelebihan ion yang dijerap, sehingga koloid tanah dapat bermuatan negatif, nol, atau positif (Sakurai *et al.*, 1988; Shamshuddin dan Anda, 2008; Sposito, 2008).

Berdasarkan fenomena tersebut dikenal istilah Titik Muatan Nol (TMN) atau *Point of Zero Charge* (PZC) atau disebut juga sebagai  $pH_0$ . TMN didefinisikan sebagai nilai pH larutan tanah dimana muatan positif ( $H^+$ ) dan negatif ( $OH^-$ ) sama, atau pada kondisi pH dimana muatan permukaan koloid tanah netto sama dengan nol. Dengan demikian, nilai TMN tanah mencerminkan besarnya muatan netto dari sistem koloid tanah pada pH tertentu (Uehara dan Gillman, 1981; Sakurai *et al.*, 1988).

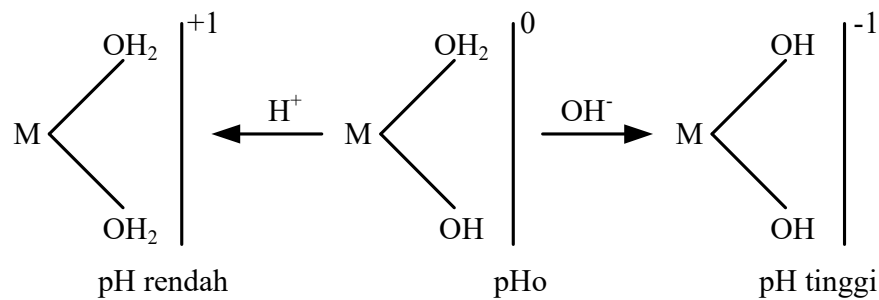
Adanya dominasi kandungan mineral liat tipe 1:1 (Kaolinit, Haloisit), aluminosilikat amorf dan oksida-hidrus Al dan Fe yang bersifat amfoter pada tanah-tanah bermuatan terubahkan menyebabkan nilai TMN tanah tinggi dan cenderung mendekati atau lebih tinggi dari pH larutan (Uehara dan Gilman, 1981). Hal ini disebabkan karena tanah didominasi oleh komponen-komponen dengan TMN tinggi. Sebagai contoh, TMN kaolinit dan gibsit berturut-turut di sekitar 4,6 dan 5,0, kemudian sistem oksida Al dan Fe berkisar antara 7 - 9 (Spark, 2003; Sposito, 2008), sebaliknya silikat dan bahan organik mempunyai nilai TMN yang rendah, yaitu berkisar pada pH 2 (Sollins *et al.*, 1988; Sposito, 2008).

Nilai TMN tanah umumnya lebih rendah dari nilai TMN bahan oksida-hidrus murni, karena sistem tanah yang bersifat heterogen (Uehara dan Gilman, 1981; Sposito, 2008). Nilai TMN dari beberapa oksida adalah:  $\text{SiO}_2$  (berkisar pH 2),  $\text{TiO}_2$  (berkisar pH 4,5),  $\text{MnO}_2$  (berkisar pH 4,0),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (berkisar antara pH 6,5 – 8,0), dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (berkisar antara pH 7,5 – 9,5) (Spark, 2003; Sposito, 2008). Nilai TMN Oksisol dan Ultisol Sao Paulo Brazil dilaporkan oleh Alves dan Lavorenti (2005) berturut-turut berkisar pada pH 3,5-6,1 (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 4,8-5,5) dan 2,9-4,8 (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 3,7-5,2). Sementara itu, Appel *et al.* (2003) melaporkan nilai TMN Oksisol dan Ultisol Puerto Rico berturut-turut pada pH 4,2 (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 5,2) dan pH 3,7 (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 4,90) dan Mahbub (2010) melaporkan bahwa TMN pada Ultisol Jasinga berkisar pH 4,14 (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 4.32). Sabaruddin *et al.* (2001) melaporkan bahwa Ultisol pada lapisan atas (0-17 cm) dengan tutupan lahan berupa hutan konservasi, hutan pinus, dan akasia di Sumatera Selatan mempunyai TMN sebesar 3,57 – 4,23 dengan pH  $\text{H}_2\text{O}$  sebesar 4,18 – 5,73. Pada lapisan bawah, nilai TMN cenderung lebih tinggi dan pH  $\text{H}_2\text{O}$  cenderung menjadi lebih rendah yang disebabkan karena komponen tanah menjadi lebih didominasi oleh hidrus-oksida Al dan Fe akibat menurunnya kandungan bahan organik. Data di atas menunjukkan rendahnya muatan negatif pada tanah-tanah bermuatan terubahkan yang dicerminkan oleh nilai TMN tanah yang cenderung mendekati atau lebih tinggi dari pH aktualnya.

Status TMN pada tanah bermuatan terubahkan merupakan parameter yang penting untuk mendeskripsikan muatan pada permukaan koloid tanah dan berhubungan erat dengan ketersediaan hara pada larutan tanah (Sakurai *et al.*, 1988; Appel *et al.*, 2003). Jika pH larutan tanah lebih rendah dari TMN, maka muatan permukaan lebih positif yang menunjang terjadinya pertukaran anion dan sebaliknya jika pH lebih besar dari pada TMN, maka muatan nettonya lebih negatif dan mendorong terjadinya pertukaran kation (Sakurai *et al.*, 1988; Shamshuddin dan Anda, 2008; Sposito, 2008).

Permukaan oksida pada koloid tanah berisi molekul air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dan ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) yang berikatan dengan Al atau Fe (M). Meningkatnya pH akan meningkatkan disosiasi ion  $\text{H}^+$  dari molekul air membentuk group hidroksil lebih banyak, sehingga muatan permukaan menjadi lebih negatif. Sementara itu,

penurunan pH menyebabkan proporsi molekul air meningkat dan permukaan menjadi lebih positif (Sposito, 2008). Perubahan muatan negatif dan positif akibat perubahan pH pada permukaan koloid tanah bermuatan terubahkan seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1 sebagai berikut (Shamshuddin dan Anda, 2008):



Gambar 2.1. Perubahan muatan negatif dan positif yang ditimbulkan akibat perubahan pH

Muatan negatif tanah yang rendah akibat tingginya nilai TMN dan pH yang rendah menyebabkan anion-anion hara seperti fosfat menjadi tidak tersedia bagi tanaman karena dijerap pada permukaan koloid liat 1:1, oksida-oksida atau oksida hidrus dari Fe dan Al, serta ion  $\text{Al}^{+3}$  dan  $\text{Fe}^{+3}$ . Hal ini merupakan penyebab tingginya kapasitas jerapan P pada tanah-tanah bermuatan terubahkan dan mengakibatkan ketersediaan dan efisiensi P menjadi rendah (Sollins *et al.*, 1988; Syers *et al.*, 2008).

Oleh karena itu, modifikasi nilai TMN tanah agar menjadi lebih rendah dari pH aktual tanah merupakan upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan ketersediaan dan efisiensi P pada tanah-tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol. Dengan perubahan nilai TMN tersebut maka pola jerapan fosfat di dalam tanah diharapkan juga akan berubah, sehingga pelepasan P menjadi lebih besar dan efisiensi pemupukan P dapat ditingkatkan (Sakurai *et al.*, 1991; Mahbub, 2010). Hal ini antara lain dapat dilakukan dengan memberikan bahan amelioran yang mampu meningkatkan muatan negatif atau menurunkan TMN tanah. Bahan-bahan yang potensial untuk digunakan dalam meningkatkan pH dan muatan negatif atau menurunkan TMN tanah diantaranya adalah abu terbang batubara

(Seoane dan Lerios, 2001; Stevens dan Dunn, 2004; Tarkalson *et al.*, 2010) dan bahan organik (Sakurai *et al.*, 1996; Van Ranst *et al.*, 1998).

## 2.2. Abu Terbang Batubara

Abu terbang batubara (*coal fly ash*) merupakan residu pembakaran batubara yang masuk ke aliran gas buang, umumnya didominasi oleh partikel halus (0,01 – 100  $\mu\text{m}$ ) dan terkumpul pada alat kontrol emisi, seperti elektrostatis presipitator atau filter mekanis, atau yang terlepas dari cerobong. Abu terbang merupakan bagian terbesar, yaitu sekitar 80% atau lebih dari total abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara pada suhu 400 - 1500 °C (Carlson dan Adriano, 1993; Ramme dan Tharaniyil, 2013).

Produksi abu batubara diprediksi akan terus meningkat, seiring dengan meningkatnya pemanfaatan batubara sebagai sumber energi. Produksi abu batubara dunia diperkirakan mencapai hampir 780 juta metrik ton pada tahun 2010, dengan laju daur-ulang global hanya sekitar 50%, sisanya ditimbun pada lahan urug (*landfill*) (Heidrich *et al.*, 2013). Di Indonesia, kebutuhan batubara dalam negeri tahun 2011 mencapai 78,97 juta ton yang sebagian besar digunakan sebagai bahan bakar PLTU (sekitar 85%), dan sisanya sebagai sumber energi untuk metalurgi, industri semen, pupuk dan tekstil (ESDM, 2010). Dengan kadar abu rata-rata sekitar 5%, dan sekitar 80 % adalah abu terbang, maka akan dihasilkan sekitar 3,4 juta ton abu terbang (Carlson dan Andriano, 1993; Wardhani, 2008).

Peraturan Pemerintah No. 85 Tahun 1999 tentang Perubahan Atas Peraturan Pemerintah No. 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), menyebutkan bahwa abu terbang dan abu dasar dikategorikan sebagai limbah B3 karena terdapat kandungan oksida logam berat yang akan mengalami pelindian secara alami dan mencemari lingkungan. Meskipun demikian, *the U.S. Environmental Protection Agency* telah menetapkan bahwa abu terbang batubara termasuk sebagai limbah “*non-hazardous*” dan tidak menyebabkan pencemaran pada air. Konstituen kimia pada abu batubara umum ditemukan pada berbagai produk sehari-hari dan material alami, termasuk tanah dan batuan. Abu terbang batubara telah banyak digunakan di banyak negara dan



tidak menyebabkan masalah kesehatan masyarakat (*American Coal Ash Association Educational Foundation, 2009*). Hasil Penelitian memperlihatkan bahwa kandungan unsur penyusun pada abu terbang batubara cenderung yang lebih rendah dibandingkan kandungan unsur-unsur yang terdapat di dalam tanah (Tabel 2.1).

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa toksisitas abu batubara tergolong relatif rendah. Pengujian terhadap pelarutan unsur mikro melalui uji TCLP (*toxicity concentration leaching procedures*) pada contoh abu batubara bahwa kadar unsur yang diuji meliputi As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, Se, dan Zn seluruhnya jauh di bawah baku mutu (Pathan *et al.* 2003). Uji toksisitas contoh abu batubara dari PLTU Ombilin dan PLTU Asam Asam menunjukkan bahwa bahan-bahan uji tersebut relatif tidak berbahaya terhadap kutu air, ikan mas, dan mencit (Wardani, 2008).

Tabel 2.1. Komposisi kimia tanah pertanian dan abu terbang batubara

Unsur Penyusun	Tanah		Abu terbang batubara	
	a	b	a	b
Unsur Makro (%)				
N	0,01-1,0	0,11-0,14	-	0.2
P	0,005-0,2	0,07-0,18	0,04-0,8	1,08
K	0,04-3.0	0,31-0,39	0,15-3,5	1,08
Ca	0,7-50	0,2-0,97	0,11-22,2	3,4
Mg	0,06-0,6	0,34-0,53	0.04-7.6	0,14
S	0,01-2,0	0,002-0,004	0,1-1,5	0.002
Unsur Mikro/Logam Berat (mg/kg)				
Mo (2-40)	0,2-5,0	2,6-3,0	7-160	4.0
B	2-100	-	10-618	-
Cu	2-100	4,5-10	14-2800	20
Co	1-40	40-178	7-520	58
Se (5-10)	0,1-2,0	2,2-2,5	0,2-134	3,6
Zn (300)	10-300	59-96	10-3500	79
Ni (50)	10-1000	6,5-94	6.3-4300	13
As (20-50)	0,1-40	3,5	2,3-6300	6,2
Pb (100)	2-100	153-163	3,1-5000	35
Mn	100-4000	119-1090	58-3000	739
Hg	-	-	0,02-1,0	-
Cr (10)	5-3000	21-54	10-1000	330
Cd	0,01-7,0	0,4-2,4	0,7-130	1,9

Keterangan:

<sup>a</sup>)Page *et al.* 1979 dan <sup>b</sup>)Goyal *et al.*, 2002 dalam Jala (2005).

Nilai dalam kurung mengindikasikan tingkat kritisnya di dalam tanah (Kabata-Pendias, 2011)

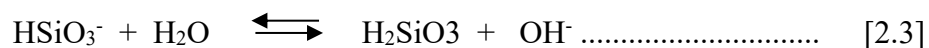
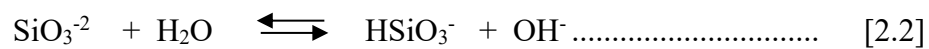
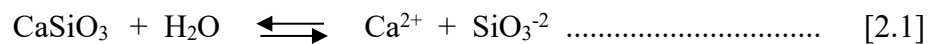
Hingga saat ini abu batubara telah dimanfaatkan antara lain untuk bahan campuran pada industri semen dan beton, sebagai bahan untuk pembuatan zeolit sintetik, dan sebagai material penyerap logam berat pada pengolahan limbah cair (Ramme dan Tharaniyil, 2013; Heidrich *et al.*, 2013). Meskipun demikian, sebagian besar produk pembakaran batubara ini masih belum dimanfaatkan dan hanya digunakan sebagai bahan pengisi pada lahan galian bekas tambang atau ditimbun pada suatu tempat yang justru berpotensi untuk mencemari lingkungan (Pandey dan Singh, 2010).

Karakteristik fisika kimia dan kandungan hara makro dan mikro pada abu terbang batubara membuatnya menjadi sangat potensial untuk memperbaiki kualitas tanah dan tanaman (Carlson dan Adriano, 1993; Pandey dan Singh, 2010; Singh *et al.*, 2011). Abu terbang batubara merupakan material kompleks yang mengandung mineral amorfus dan kristalin yang umumnya adalah mineral ferro-aluminosilikat, menyerupai aluminosilikat lainnya seperti liat (*clay*) (Adriano *et al.*, 1980; Mattigod *et al.*, 1990). Abu terbang batubara tersusun terutama dari senyawa silikat ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), oksida Fe, Ca, Mg, Na dan K serta logam lain dalam jumlah yang lebih sedikit, dimana secara umum semua unsur tersebut juga terdapat di dalam tanah (Adriano *et al.*, 1980; Pandey dan Singh, 2010). Sebagai ilustrasi, komposisi beberapa oksida yang terdapat pada abu terbang batubara adalah sebagai berikut:  $\text{SiO}_2$  (54,59 %);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (31,69 %); MgO (4,38 %); CaO (4,27 %) dan ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3,19 %) (Jumaeri *et al.*, 2007). Karakteristik abu terbang batubara ini menunjukkan potensinya untuk menurunkan kemasaman tanah, TMN dan meningkatkan muatan negatif, terutama pada tanah-tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol .

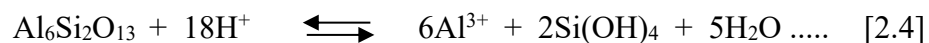
Abu terbang batubara mempunyai karakteristik mineralogi yang lebih kompleks dibanding bahan kapur dan reaksi netralisasinya juga melibatkan mineral lain, seperti Ca dan Mg silikat dan aluminosilikat, disamping oksida Ca dan Mg (Brouwers dan Van Eijk, 2003; Pandey dan Singh, 2010). Alkalinitas abu terbang batubara mencapai sekitar 60% setara kalsium karbonat (*calcium carbonate equivalence/CCE*). Abu terbang batubara dengan kandungan kalsium dan magnesium oksida yang tinggi mempunyai kapasitas netralisasi sekitar 50%

(CCE) (Kapasitas netralisasi kapur murni adalah 100% CCE) (Ritchey *et al.*, 1996).

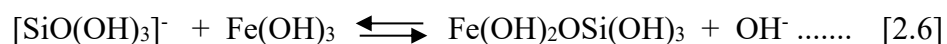
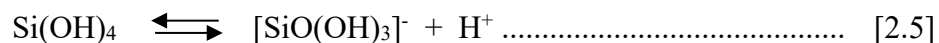
Netralisasi kemasaman oleh mineral Ca silikat terjadi melalui pembentukan asam silisik dan ion OH<sup>-</sup> yang selanjutnya akan menurunkan kelarutan sumber kemasaman tanah seperti Al, Fe, dan Mn. Proses hidrasi dan penetralan kemasaman dari Ca silikat ditunjukkan pada persamaan reaksi sebagai berikut (Savant *et al.*, 1999):



Senyawa aluminosilikat pada abu terbang batubara diidentifikasi sebagai mullit (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>) dan silimanit (Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>) (Ricou *et al.*, 2001; Brouwers dan Van Eijk, 2003). Proses reaksi netralisasi kemasaman oleh aluminosilikat, seperti mullite, ditunjukkan pada persamaan reaksi sebagai berikut (Yunusa *et al.*, 2006):



Di dalam tanah, asam monosilisik (Si(OH)<sub>4</sub>) dapat dijerap oleh oksida Al dan atau Fe. Jerapan Si(OH)<sub>4</sub> oleh seskuioksida diilustrasikan dengan persamaan reaksi sebagai berikut (Savant *et al.*, 1999):



Hasil-hasil penelitian juga membuktikan bahwa pemberian abu terbang batubara dapat meningkatkan pH tanah masam dan dapat berfungsi sebagai pengganti kapur (Tarkalson *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2011). Selain itu, Savant *et al.* (1999) juga mengemukakan bahwa disamping meningkatkan pH, pemberian silikat juga akan meningkatkan kelarutan P dalam tanah yang terutama disebabkan karena menurunnya jerapan P oleh hidroksida Al dan Fe.

Selanjutnya, 90-99% abu terbang batubara tersusun oleh unsur Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na dan K dengan Si dan Al sebagai penyusun utama (Kishor *et al.*, 2010). Ca ditemukan sebagai kation dominan pada abu terbang diikuti oleh Mg, Na dan K. pH abu terbang batubara dapat bervariasi 4,5-12,0 yang terutama dipengaruhi oleh kandungan sulfur di batubara asal. Al di dalam abu terbang umumnya terikat pada struktur aluminosilikat larut, sehingga toksisitas biologisnya menjadi terbatas (Kishor *et al.*, 2010; Pandey dan Singh, 2010). Selain itu, abu terbang batubara juga mengandung unsur mikro (*trace element*) seperti As, B, Ca, Mo, S, Se, Cu, Cr dan Cd yang terkonsentrasi di dalam partikel abu yang lebih kecil (Adriano *et al.*, 1980; Carlson dan Adriano, 1993; Pandey dan Singh, 2010).

Carlson dan Adriano (1993) mengungkapkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan oleh banyak peneliti bahwa penambahan abu terbang batubara pada tanah dapat memenuhi kekurangan hara tanaman, yaitu unsur B, Ca, Cu, K, Mg, Mo, S, dan Zn. Abu terbang batubara dapat menyediakan unsur hara mikro yang cukup banyak dibanding hara makro, secara berurutan yaitu: Cu = Fe ~ B ~ Mo > Ca > S > Zn >> Mn > N > Mg > P > K (Schumann dan Sumner, 2000). Meskipun demikian, penambahan abu terbang batubara pada dosis yang berlebihan akan dapat menimbulkan efek negatif terutama akibat tingginya konsentrasi garam terlarut, potensi toksik dari unsur mikro, penurunan ketersediaan N dan P, dan terjadinya ketidakseimbangan hara oleh adanya peningkatan pH yang berlebihan. Ringkasan pengaruh potensial penambahan abu terbang batubara terhadap karakteristik tanah dan ekosistem disajikan pada Tabel 2.2 (Carlson dan Adriano, 1993).

Sejumlah penelitian inkubasi di laboratorium menunjukkan bahwa penambahan abu terbang batubara pada tanah berpasir akan menghambat respirasi mikroba, jumlah, ukuran, aktifitas enzim dan mineralisasi nitrogen tanah. Pengaruh negatif dapat disebabkan oleh keberadaan garam-garam terlarut dan unsur mikro (*trace element*) pada tingkat yang berlebihan (Garau *et al.*, 1991). Konsentrasi garam terlarut dan unsur mikro diketahui akan menurun pada abu terbang batubara yang telah melapuk melalui proses pencucian, sehingga dengan waktu efek yang merugikan akan menurun (Sims *et al.*, 1995).

Tabel 2.2. Pengaruh potensial penambahan abu terbang batubara pada tanah terhadap proses-proses yang terjadi pada ekosistem teresterial (Carlson dan Adriano, 1993)

Proses	Dampak penambahan abu batubara pada tanah, dosis:		
	<100 ton ha <sup>-1</sup>	100 - 400 ton ha <sup>-1</sup>	>400 ton ha <sup>-1</sup>
Mineralisasi N	Secara umum tidak berpengaruh; Dapat menurun pada tanah dengan BO rendah	Secara umum tidak berpengaruh; Dapat menurun pada tanah dengan BO rendah	Dapat menurun
Respirasi mikrobia	Tidak ada pengaruh hingga sedikit menurun	Menurun	Menurun signifikan hingga menghambat
Alkalinisasi tanah	Tidak ada pengaruh hingga meningkat	Sangat meningkat untuk abu segar dan alkalin	Sangat meningkat untuk abu segar dan alkalin
Salinisasi tanah	Tidak berpengaruh hingga meningkat	Sangat meningkat untuk abu segar	Sangat meningkat untuk abu segar
Kelarutan unsur dalam tanah	Tidak berpengaruh hingga sedikit menurunkan kelarutan unsur acidophilic termasuk Cd, Zn	Umumnya menurunkan kelarutan unsur acidophilic termasuk Cd, Zn; meningkatkan kelarutan As, B, Mo, Se	Menurunkan kelarutan unsur acidophilic termasuk Cd, Zn; meningkatkan kelarutan As, B, Mo, Se
Perkembangan akar	Tidak berpengaruh hingga sedikit meningkat pada tanah bertekstur liat	Umumnya meningkat; kemungkinan menurun pada tanaman sensitif garam dan B jika digunakan abu segar	Umumnya meningkat jika digunakan abu segar; menurun jika digunakan abu segar
Pertumbuhan tanaman	Umumnya tumbuh lebih baik; kemungkinan menurun pada tanaman sensitif garam dan B jika digunakan abu segar	Umumnya tumbuh lebih baik; menurun pada tanaman sensitif garam dan B jika digunakan abu segar	Menurun pada sebagian besar tanaman; Kemungkinan tidak berpengaruh pada tanaman yang toleran
Serapan hara	Tidak ada pengaruh hingga sedikit meningkat untuk sebagian besar unsur hara	Umumnya meningkatkan unsur hara kecuali N dan P; Sangat meningkat untuk As, B, Mo, and Se dengan abu segar, dapat menyebabkan keracunan B pada tanaman sensitif	Umumnya menurunkan serapan N dan P, menyebabkan defisiensi; meningkatkan kadar unsur-unsur lain; Kadar As, B, Mo dan Se sangat meningkat, menyebabkan toksisitas B
Bioakumulasi	Kemungkinan sedikit meningkat untuk sebagian besar unsur hara kecuali N and P	Umumnya meningkatkan unsur hara kecuali N and P, khususnya jika digunakan abu segar; keracunan B, Mo dan Se pada tanaman sensitif jika digunakan abu segar	Meningkat untuk sebagian besar unsur hara kecuali N and P; dapat menimbulkan masalah keracunan As, B, Mo dan Se khususnya jika digunakan abu segar

Hasil penelitian Arivazhagan *et al.* (2011) menunjukkan bahwa aplikasi abu terbang batubara dapat meningkatkan hasil tanaman sereal, kacang-kacangan, umbi-umbian, sayuran dan tebu secara signifikan. Hasil penelitian yang dilakukan pada banyak lokasi ini menunjukkan bahwa aplikasi abu terbang batubara pada dosis 50 ton ha<sup>-1</sup> memberikan peningkatan hasil tanaman sereal 5 – 20 %, tanaman sayuran 5 -20 %, tanaman perkebunan 20 – 30 %, tanaman jagung 36 -40 %, tanaman gandum sebesar 40%, tanaman padi sebesar 65%, dan tanaman tebu 15 – 30 % di atas kontrol.

Hasil penelitian Singh *et al.* (2011) juga menunjukkan bahwa penambahan abu terbang batubara dengan dosis 120 hingga 180 ton ha<sup>-1</sup> secara signifikan dapat memperbaiki pertumbuhan tanaman leguminosa (tinggi tanaman dan panjang akar, rasio brangkasan tanaman-akar, berat segar dan berat kering) dan hasil tanaman (berat biji dan buah per tanaman) dan konsentrasi pigmen (klorofil a dan b). Penambahan abu terbang batubara kelas C pada tanah dengan dosis 505 Mg ha<sup>-1</sup> tidak menyebabkan pengaruh negatif terhadap komunitas mikroba tanah dan memperbaiki populasi fungi, termasuk jamur mikoriza dan bakteri gram negatif yang diperlihatkan dari analisis komunitas asam lemak (Schutter dan Fuhmann, 1999). Pati dan Sahu (2004) menggunakan 7 konsentrasi penambahan abu terbang batubara ke tanah (0, 2.5, 5, 10, 15, 25 and 50%; w/w) untuk mengetahui toksisitasnya terhadap cacing tanah (*Drawida willsi*) dan mempelajari evolusi CO<sub>2</sub> dan aktifitas enzim (*dehydrogenase*, *protease* dan *amylase*) dengan dan tanpa *D. willsi*. Mereka menemukan sedikit atau tidak ada penurunan respirasi tanah dan aktifitas enzim hingga konsentrasi penambahan abu terbang batubara sebesar 2,5%. Dengan peningkatan konsentrasi abu terbang batubara, seluruh aktifitas enzim di atas secara signifikan mengalami penurunan. Disamping itu, terjadi stimulasi respirasi tanah dan aktifitas mikroba secara signifikan pada konsentrasi penambahan abu terbang batubara hingga sebesar 5 % pada perlakuan dengan cacing tanah. Adanya peningkatan aktifitas mikroba ini dapat disebabkan oleh adanya substrat yang dihasilkan oleh cacing tanah.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu terbang batubara memberikan respon tanaman yang lebih baik jika dikombinasikan dengan penambahan bahan organik. Pencampuran bahan organik dan abu

terbang batubara dengan komposisi 1:1 dapat meningkatkan ketersediaan hara dan pembentukan asam humat pada kompos yang dihasilkan (Bhattacharya and Chattopadhyay, 2002; Bhattacharya and Chattopadhyay, 2004; Venkatesh and Eevera, 2008; Anbalagan dan Manivannan, 2012). Abu terbang batubara yang dikomposkan dengan jerami gandum dan 2% batuan P (w/w) selama 90 hari dapat meningkatkan karakteristik kimia dan mikrobiologi kompos dan abu terbang batubara hingga 40-60 % dan tidak menimbulkan pengaruh negatif pada C:N rasio atau populasi mikroba (Gaird dan Gaur, 2004). Selanjutnya, penambahan campuran bahan organik dan abu terbang batubara dengan komposisi 1:1 hingga dosis 40-80 ton ha<sup>-1</sup> dapat meningkatkan ketersediaan hara dan respon tanaman secara signifikan tanpa menimbulkan resiko terjadinya kontaminasi pada tanah, air dan tanaman (Schumann dan Sumner, 1999; Sajwan *et al.*, 2006).

Dengan demikian dapat dikatakan bahwa abu terbang batubara mempunyai potensi yang besar untuk dimanfaatkan sebagai amelioran, terutama pada tanah-tanah marginal. Pemberian abu terbang batubara diharapkan akan dapat menyediakan hara bagi tanaman dan memperbaiki karakteristik fisikokimia tanah, seperti meningkatkan pH dan muatan negatif, menurunkan TMN, dan selanjutnya akan meningkatkan ketersediaan P melalui penurunan jerapan P tanah.

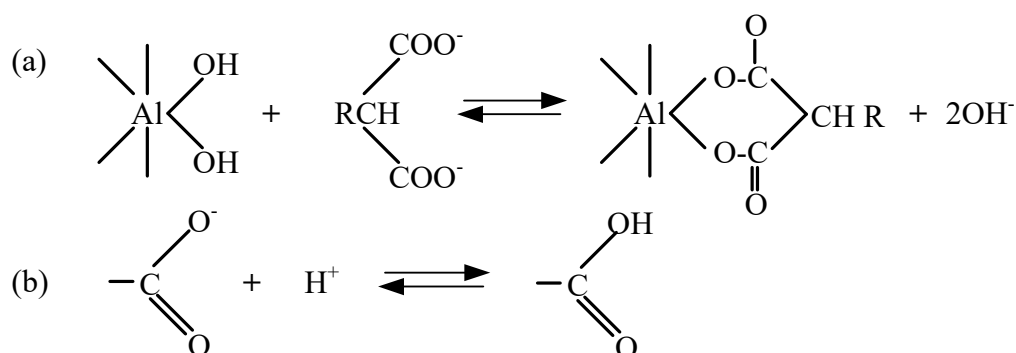
### **2.3. Bahan Organik**

Pemberian bahan organik, seperti kotoran ayam, ke dalam tanah diketahui dapat memberikan manfaat ganda, karena dapat memperbaiki sifat-sifat fisika, biologi dan kimia tanah. Pengaruh bahan organik terhadap sifat fisika tanah antara lain adalah terhadap perbaikan struktur tanah, aerasi, retensi air serta kemudahan dalam pengolahan tanah. Secara kimia, bahan organik dapat meningkatkan kapasitas pertukaran ion, meningkatkan pH dan mengurangi tingkat keracunan Al. Selain itu, bahan organik juga merupakan sumber hara N, P, K, S, Ca, Mg, dan unsur mikro bagi tanaman. Bahan organik berpengaruh positif terhadap aktifitas mikroorganisme tanah yang selanjutnya akan mempengaruhi tingkat kesuburan tanah (Tan, 2003). Pada tanah-tanah yang didominasi oleh sistem oksida-hidrus Al dan Fe dengan kadar bahan organik rendah, seperti Ultisol, pemberian bahan

organik dapat mempengaruhi karakteristik fisikokimia tanah, seperti meningkatkan pH dan muatan negatif tanah, menurunkan TMN dan kapasitas jerapan P tanah serta tingkat keracunan Al (Haynes dan Mokolobate, 2001; Tan, 2003).

Dalam proses dekomposisi bahan organik akan dihasilkan asam-asam organik seperti asam sitrat, oksalat, tartrat, malonat, dan salisilat sebagai hasil antara. Pada tahap akhir dekomposisi akan terbentuk asam humat dan fulvat, yang keduanya sering disebut dengan humus. Asam-asam organik hasil dekomposisi bahan organik ini memiliki gugus-gugus fungsional yang sangat reaktif, yaitu –COOH, –OH (fenolik, alkoholik), quinon, hidroksiquinon, laktat, eter, dan lain-lain, dalam berbagai kombinasi pada asam-asam organik. Gugus-gugus –COOH dan –OH yang terutama terlibat dalam berbagai reaksi di dalam tanah (Tan, 2003).

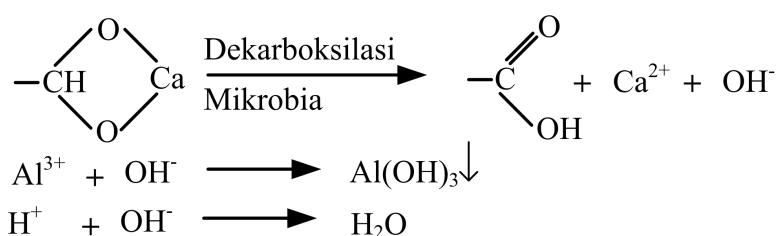
Asam organik seperti humat dan fulvat diketahui mempunyai afinitas yang tinggi terhadap Al dan Fe, sehingga berperan penting dalam pengikatan Al dan Fe yang akan mempengaruhi pH dan muatan negatif tanah. Pengaruh selanjutnya antara lain adalah terhadap penurunan jerapan P dan menyebabkan P menjadi lebih tersedia (Tan, 2003; Djuniwati *et al.*, 2012). Mekanisme reaksi penetralan sumber kemasaman tanah (ion  $\text{Al}^{+3}$  dan ion  $\text{H}^{+}$ ) antara lain terjadi melalui kompleksasi ion Al terlarut oleh asam organik (Hue *et al.*, 1986) dan atau melalui reaksi protonasi anion organik (Bessho dan Bell, 1992), seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2.



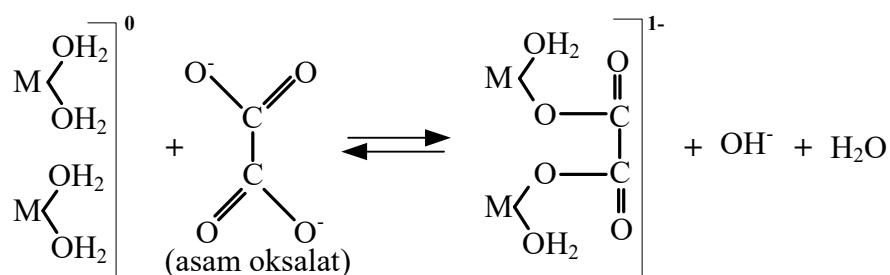
Gambar 2.2. Mekanisme reaksi kompleksasi ion Al terlarut oleh (a) asam organik dan (b) protonasi anion organik



Disamping itu, Ano dan Ubochi (2007) mengemukakan bahwa netralisasi kemasaman tanah akibat pemberian pupuk kandang dapat terjadi oleh pelepasan ion  $\text{Ca}^{2+}$  ke dalam larutan tanah dan segera mengalami hidrolisis. Kalsium hidroksida yang terbentuk akan bereaksi dengan ion  $\text{Al}^{3+}$  membentuk  $\text{Al}(\text{OH})_3$  yang tidak larut, dan ion  $\text{OH}^-$  yang terbentuk bereaksi dengan ion  $\text{H}^+$  membentuk  $\text{H}_2\text{O}$ . Mekanisme reaksinya diilustrasikan pada Gambar 2.3 (Ano dan Ubochi, 2007). Selain itu, asam organik hasil dekomposisi bahan organik juga dapat dijerap pada permukaan hidrus-oksida Al atau Fe yang akan menghasilkan muatan negatif pada kompleks jerapan dan ion hidroksida pada larutan tanah (Haynes dan Mokolobate, 2001), seperti diilustrasikan pada Gambar 2.4 (Hue, 1992).



Gambar 2.3. Reaksi netralisasi kemasaman tanah akibat pelepasan ion  $\text{Ca}^{2+}$  dari pupuk kandang.



Gambar 2.4. Jerapan spesifik asam oksalat pada permukaan hidrus-oksida Al atau Fe (M)

Meningkatnya muatan negatif akibat pemberian bahan organik selanjutnya dapat mempengaruhi karakteristik fisika-kimia tanah-tanah bermuatan terubahkan, antara lain terhadap penurunan TMN dan meningkatkan kapasitas tukar kation. Asam-asam organik hasil dekomposisi bahan organik, dilaporkan dapat

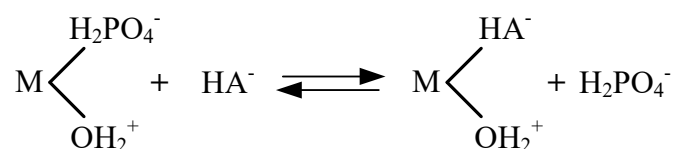
menurunkan nilai TMN tanah, dengan tingkat efektifitas berturut-turut: asam sitrat > asam malat > asam aspartat > asam p-hidroksi benzoat. Meningkatnya muatan negatif akibat reaksi-reaksi yang melibatkan gugus fungsional asam-asam organik seperti diuraikan di atas diduga menjadi penyebab utama menurunnya TMN tanah (Huang dan Schnitzer, 1986; Huang *et al.*, 2005).

Peningkatan jumlah muatan negatif dan kapasitas tukar kation tanah akibat pemberian bahan organik antara lain disebabkan oleh adanya ionisasi gugus fungsional dari asam-asam organik yang dapat menghasilkan sejumlah muatan negatif pada permukaan koloid tanah (Tan, 2003). Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa koloid organik, ternyata mampu mempertukarkan kation jauh melebihi fraksi liat. Stevenson (1994) memperkirakan lebih dari 80 persen KTK tanah, disebabkan oleh kandungan bahan organik yang ada dalam tanah tersebut.

Sakurai *et al.* (1996) mengemukakan bahwa meningkatnya kandungan bahan organik tanah pada tanah bermuatan terubahkan akan meningkatkan muatan negatif dan menurunkan TMN tanah. Hasil penelitian Ali dan Sufardi (1999) juga menunjukkan bahwa pemberian pupuk kandang diketahui dapat menurunkan status TMN tanah Typic Haplohumults Saree, yang diikuti oleh meningkatnya pH-H<sub>2</sub>O, jumlah muatan negatif dan kapasitas tukar kation tanah setelah 45 hari inkubasi.

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian bahan organik dapat menurunkan kelarutan Al, menurunkan jerapan P dan meningkatkan ketersediaan P pada tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol (Haynes dan Mokolobate, 2001; Marsi dan Sabaruddin, 2011; Djuniwati *et al.*, 2012). Yang *et al.* (2013) mengungkapkan bahwa pemberian asam fulvat pada tanah masam dapat menurunkan kelarutan Al dan meningkatkan pH, kapasitas tukar kation, ketersediaan P tanah, setelah 21 hari inkubasi. Pengikatan Al dan Fe oleh asam organik yang membentuk kompleks yang sukar larut menyebabkan jerapan P oleh kedua kation tersebut akan berkurang. Asam organik dapat menurunkan kelarutan Al dan jerapan P antara lain melalui pembentukan senyawa kompleks organo-metal antara asam organik dengan Al yang menjerap P atau melalui proses pertukaran ligan/ terjadinya kompetisi antara asam organik dengan P pada

kompleks jerapan (Tan, 2003). Reaksi pertukaran ligan yang dapat meningkatkan ketersediaan P dalam larutan tanah, diilustrasikan pada Gambar 2.5 (Djuniwati *et al.*, 2012):



Gambar 2.5. Reaksi pertukaran ligan (M= permukaan senyawa logam; OH<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> = ligan anorganik; dan HA = ligan organik)

Berdasarkan uraian di atas dapat dikatakan bahwa bahan organik mempunyai peranan penting dalam mempengaruhi karakteristik fisikokimia tanah. Pemberian bahan organik seperti kotoran ayam diharapkan akan dapat menurunkan TMN tanah dan meningkatkan muatan negatif tanah dan selanjutnya akan menurunkan jerapan P dan meningkatkan ketersediaan P, baik melalui pelepasan P dari ikatan Al dan Fe atau melalui mineralisasi P dari bahan organik.

#### 2.4. Ketersediaan P dan Efisiensi P Tanaman

Ketersediaan P di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh jumlah dan jenis mineral tanah, pH tanah, pengaruh kation dan anion, tingkat kejenuhan P, bahan organik, waktu dan suhu, serta pengaruh penggenangan. Pada beberapa jenis tanah kandungan P lebih tinggi dari yang diperlukan untuk pertumbuhan optimum tanaman, tetapi P ini dalam keadaan tidak tersedia bagi tanaman. Rata-rata konsentrasi P dalam larutan tanah adalah 0.05 ppm dan sangat bervariasi di antara jenis tanah. Konsentrasi P dalam larutan yang diperlukan oleh kebanyakan tanaman bervariasi dari 0.003 sampai 0.3 ppm dan bergantung pada spesies tanaman dan tingkat produksinya, sedangkan kemampuan tanaman mengambil P dari larutan tanah juga bervariasi bergantung pada spesies (genotipe) dan dipengaruhi oleh interaksi antara tanaman dan mikroba (Havlin *et al.*, 1999).

Bentuk P dalam larutan tanah dipengaruhi oleh pH tanah. Pada pH tanah di bawah 6,0 umumnya P berada dalam bentuk monovalen (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>), sedangkan

bentuk  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$  dan  $\text{HPO}_4^{2-}$  hanya sedikit. Laju serapan P oleh tanaman tertinggi terjadi pada pH tanah 5,0 – 6,0 dengan bentuk fosfat dominan yang diserap tanaman adalah  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Pada pH tanah 7,2 fosfat dominan yang diserap tanaman dalam berada bentuk  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Tanaman mengambil  $\text{HPO}_4^{2-}$  lebih lambat daripada  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (Marschner, 1990; Havlin *et al.* 1999).

Unsur hara P di dalam tanah bersifat immobil dan sebagian besar P tanah dijerap menjadi bentuk tidak tersedia bagi tanaman. Berdasarkan tingkat mobilitasnya di dalam tanah, bentuk-bentuk P dapat dibedakan menjadi: P larut, P labil (terjerap), dan P non labil (P mineral primer dan sekunder), dan P organik. P larut berada dalam reaksi keseimbangan dengan P labil, P non labil, dan P organik. Berdasarkan tingkat kecepatan ketersediaannya bagi tanaman, bentuk P tanah dikelompokkan menjadi: sangat cepat tersedia, yaitu bentuk P larut; cepat tersedia yang meliputi bentuk P-anorganik (Fe, Al, dan Ca-P); dan lambat tersedia yang meliputi bentuk organik-P dan residu-P (Tisdale dan Nelson, 1985; Havlin *et al.*, 1999).

Ketersediaan P tanaman sangat tergantung kepada mobilitasnya di dalam tanah dan keseimbangan antara bentuk P larut dan P labil (terjerap). Bila P dalam larutan tanah meningkat, maka P akan segera dijerap oleh koloid tanah menjadi bentuk tidak tersedia. Kemudian, bila P dalam larutan tanah menurun karena diserap tanaman misalnya, maka P terjerap akan segera dilepas ke dalam larutan sehingga menjadi tersedia tanaman. Proses jerapan dan pelepasan P di dalam tanah mengendalikan bentuk-bentuk P tanah yang sangat mempengaruhi ketersediaan P tanah dan efisiensi penggunaan P oleh tanaman (Tisdale dan Nelson, 1985; Hardjowigeno, 2007).

Laju pelepasan P dari bentuk tidak larut sangat lambat dan memberikan kontribusi kecil terhadap pertumbuhan tanaman. Kondisi ini akan menyebabkan terbentuknya zona deplesi P di sekitar perakaran tanaman. Ujung akar akan mendapatkan P melalui perpanjangan akar ke daerah tanpa deplesi. Tanaman umumnya akan beradaptasi secara morfologi dan biokimia untuk mengurangi daerah deplesi dan meningkatkan konsentrasi P secara cepat terutama di daerah sekitar akar. Beberapa spesies mengembangkan sistem percabangan akar yang

tinggi dengan lebih banyak akar rambut sehingga lebih efisien dalam penyerapan P (Marschner, 1990).

Efisiensi penggunaan hara (*nutrient use efficiency*) oleh tanaman adalah suatu ukuran kuantitatif serapan hara untuk pertumbuhan dan produksi tanaman berkaitan dengan hara yang ditambahkan ke dalam tanah dan ketersediaannya bagi tanaman (Robert, 2008). Efisiensi penggunaan hara oleh tanaman mencerminkan jumlah hara yang diserap tanaman dan dapat dikonversi menjadi hasil (*yield*) (Johnston dan Syers, 2009). Dengan demikian, efisiensi penggunaan hara sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor agronomis, seperti faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaan hara dalam tanah dan kontak akar dengan hara serta kemampuan tanaman dalam menyerap hara dari dalam tanah (Marschner, 1990; Shen *et al.*, 2013; Norton, 2013).

Syers *et al.* (2008) mengemukakan bahwa efisiensi penggunaan hara P (*P use efficiency*) dari pupuk oleh tanaman dapat dihitung berdasarkan serapan P dan produksi dan atau berat kering tanaman. Nilai serapan P tanaman dihitung melalui perkalian antara kandungan P jaringan tanaman (%) dan berat kering tanaman. Peningkatan serapan hara akan meningkatkan kandungan hara pada daun dan berat biomasa. Peningkatan bobot tajuk tanaman akan meningkatkan aktivitas fotosintesis dan akan meningkatkan suplai fotosintat yang berpengaruh terhadap peningkatan produksi. Selain itu, pada saat pematangan, fotosintat pada tanaman dengan biomasa yang tinggi akan lebih banyak tersuplai ke biji dibandingkan dengan tanaman dengan biomasa yang rendah (Marschner, 1990). Hal ini menunjukkan bahwa produksi atau hasil tanaman berhubungan erat dengan biomasa atau berat kering tanaman.

Efisiensi penggunaan hara P dapat diketahui dengan pendekatan berdasarkan nilai efisiensi serapan P, dan efisiensi penggunaan P atau efisiensi agronomis P tanaman. Efisiensi serapan P menggambarkan besarnya hara P dari pupuk yang diserap oleh tanaman. Efisiensi serapan P tanaman dihitung dengan membagi antara serapan P bersih (serapan P pada perlakuan pupuk P – serapan P pada perlakuan tanpa pupuk P) dan dosis pupuk P yang ditambahkan. Efisiensi penggunaan P tanaman atau efisiensi agronomis mencerminkan dugaan besarnya hara dari pupuk yang dikonversi menjadi bahan kering tanaman/biomasa.

Efisiensi agronomis dihitung dengan membagi berat kering tanaman bersih (berat kering tanaman pada perlakuan pupuk P – berat kering tanaman pada perlakuan tanpa pupuk P) dan dosis pupuk P yang ditambahkan (Malhi *et al.*, 2002; Syers *et al.*, 2008; Johnston dan Syers, 2009; Norton, 2013).

Efisiensi pemupukan P pada tanah bermuatan terubahkan, seperti Ultisol, umumnya tergolong rendah sampai sangat rendah, yaitu sekitar 20-30% dari pupuk yang ditambahkan (Syers *et al.*, 2008; Norton, 2013). Rendahnya efisiensi pemupukan P ini antara lain disebabkan oleh tingginya kapasitas jerapan P yang disebabkan oleh rendahnya muatan negatif tanah. Hal ini menyebabkan pupuk P yang ditambahkan menjadi tidak tersedia, disamping kandungan P tanah umumnya tergolong rendah (Syers *et al.*, 2008).

Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan efisiensi P tanaman, antara lain dapat dilakukan melalui pemberian campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam. Kedua bahan ini mempunyai karakteristik yang potensial untuk memperbaiki sifat fisikokimia tanah, seperti meningkatkan pH, muatan negatif, dan menurunkan TMN tanah, yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap penurunan jerapan P, sehingga ketersediaan P akan meningkat. Dengan demikian diharapkan efisiensi penggunaan P oleh tanaman juga akan dapat ditingkatkan.

## **2.5. Tanaman Jagung**

Jagung merupakan serelia terpenting di dunia setelah gandum dan padi. Di Indonesia, jagung merupakan komoditi tanaman pangan kedua terpenting setelah padi. Secara taksonomi, tanaman jagung termasuk dalam divisi Spermatophyta, kelas Angiospermae, subklas Monocotyledon, ordo Graminales, famili Graminae, genus *Zea* dan spesies *Zea mays* L. Berdasarkan letak bunganya tanaman jagung merupakan tanaman berumah satu, dimana letak bunga jantan terpisah dengan bunga betina pada satu tanaman (Subekti *et al.*, 2009).

Tanaman jagung tergolong tanaman C4 yang sangat efisien dalam penggunaan energi matahari, penggunaan air, translokasi asimilat dan serapan hara serta mempunyai laju pertumbuhan dan nisbah biji jerami yang lebih tinggi dibanding tanaman C3. Jagung membutuhkan sinar matahari yang cukup terutama pada saat biji mulai masak (Belfield dan Brown, 2008).

Jagung dapat tumbuh baik di daerah beriklim panas dan di daerah yang beriklim sedang dan memiliki masa hidup 70-210 hari. Umumnya jagung dapat ditanam pada tempat yang mempunyai ketinggian 0 sampai 1300 meter di atas permukaan laut. Keadaan suhu sangat berpengaruh sejak tanaman muncul di atas permukaan tanah sampai berbunga. Suhu minimum yang menghambat pertumbuhan tanaman jagung adalah 3 °C, dan suhu maksimum 45 °C, suhu optimum untuk pertumbuhan berkisar 24 °C hingga 30 °C, dengan curah hujan kurang lebih 200 mm per bulan (Sutoro, *et al.*, 1988). Tanaman jagung sangat sensitif terhadap cekaman air. Saat perkecambahan tanaman jagung membutuhkan air yang banyak yaitu antara 19 % sampai 60 % kandungan air tanah dalam keadaan kapasitas lapang. Cekaman air menyebabkan metabolisme tanaman akan terganggu dan menyebabkan kerusakan pada pertumbuhan tanaman jagung (Souza *et al.*, 2009).

Jagung dapat ditanam di hampir semua jenis tanah. Umumnya tanaman jagung dapat tumbuh dengan baik pada tanah yang gembur, beraerasi dan drainase baik. Tanaman jagung toleran terhadap pH agak masam sampai alkali. Kisaran pH tanah yang optimal untuk pertumbuhan tanaman jagung adalah sekitar 5,6-7,5 (Belfield dan Brown, 2008). Tanaman jagung peka terhadap keracunan Al, Fe, Cu dan Zn. Gejala keracunan Al mulai terlihat bila tanah mempunyai kejenuhan Al antara 40-60 % (Sanchez, 1976). Sistem perakaran tanaman jagung terdiri dari dua kelompok akar yang jelas yaitu akar sementara dan akar permanen. Akar sementara atau akar primer ini hanya berfungsi selama perkecambahan, kemudian segera ditambah dengan akar-akar lateral seminal (sekunder) yang muncul dari buku pertama di atas pangkal batang. Akar lateral seminal ini kemudian diganti oleh akar adventitious permanen yang muncul dari buku-buku yang lebih tinggi secara berurutan (Subekti *et al.*, 2009).

Untuk memperoleh pertumbuhan tanaman yang baik dan hasil yang tinggi, unsur-unsur hara yang tersedia dan dapat dimanfaatkan tanaman jagung harus dalam keadaan cukup. Beberapa faktor yang mempengaruhi ketersediaan hara dalam tanah untuk dapat diserap tanaman antara lain adalah total pasokan hara, kelembaban tanah dan aerasi, suhu tanah, dan sifat fisik maupun kimia tanah. Keseluruhan faktor ini berlaku umum untuk setiap unsur hara (Marschner, 1990).

Kandungan hara pada tanaman jagung yang memberi hasil 9,45 ton biji ha<sup>-1</sup> dapat dilihat pada Tabel 2.3. Serapan hara sangat cepat terjadi selama fase vegetatif dan pengisian biji. Unsur N dan P terus-menerus diserap tanaman sampai mendekati matang, sedangkan K terutama diperlukan saat *silking*. Sebagian besar N dan P dibawa ke titik tumbuh, batang, daun, dan bunga jantan, lalu dialihkan ke biji. Sebanyak 2/3-3/4 unsur K tertinggal di batang. Olson dan Sander (1988) mengemukakan bahwa pola serapan hara tanaman jagung dalam satu musim mengikuti pola akumulasi bahan kering.

Tabel 2.3. Kandungan hara tanaman jagung dengan hasil biji 9,45 ton ha<sup>-1</sup>.

Unsur Hara	Kandungan hara (kg ha <sup>-1</sup> )	
	Biji	Batang
N	129	62
P	31	8
K	39	157
Ca	15	39
Mg	11	33
S	12	9

Sumber: Olson and Sander (1988)

Tabel 2.4. Serapan hara pada berbagai periode tumbuh tanaman jagung

Unsur Hara (kg ha <sup>-1</sup> )	Periode Tumbuh (hari)				
	0-25	26-50	51-75	76-100	101-115
N	8	35	31	20	6
P	4	27	36	25	8
K	9	44	31	14	2

Sumber : Larson dan Hanway (1977).

Besarnya persentase dan jumlah serapan hara tanaman jagung pada berbagai periode tumbuh tanaman, dan kandungan hara pada biji tanaman jagung disajikan pada Tabel 2.4. Serapan hara pada tanaman jagung berbeda menurut umur, susunan organ tanaman dan varietas tanaman. Serapan N dan P tanaman jagung meningkat sesuai dengan periode tumbuh sampai menjelang masak, sedangkan K mencapai tingkat cukup pada saat polinisasi (Larson dan Hanway, 1977).





## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Tempat dan Waktu**

Penelitian dilakukan di Laboratorium dan Rumah Kaca Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya. Pelaksanaan penelitian ini berlangsung selama 10 bulan yang dimulai pada bulan November 2012 sampai dengan bulan Agustus 2013.

#### **3.2. Bahan dan Alat**

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah: tanah lapisan bawah (*subsoil*) yang diambil dari Lahan Arboretum, Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya, Indralaya; Abu terbang batubara diperoleh dari PLTU di Muara Enim Sumatera Selatan; Kotoran ayam, diperoleh dari tempat peternakan ayam di daerah Inderalaya; Pupuk Urea (46% N), TSP (45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), dan KCl (60% K<sub>2</sub>O); Benih jagung Hibrida varietas BISI-2; dan bahan-bahan kimia untuk analisis di laboratorium seperti untuk penetapan nilai titik muatan nol (TMN) (0.1 N HCl, 0.1 N NaOH, 2 N NaCl), jerapan P (larutan KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> pa, 0,01 M CaCl<sub>2</sub>), P-Bray I (larutan 0,025 N HCl, 0,03 N NH<sub>4</sub>F), C-organik (1 N K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat), KTK (1 M NH<sub>4</sub>OAc, pH 7,0), Al-P (1 M NH<sub>4</sub>F pH=7), Fe-P (0,1 N NaOH), dan organik-P (1 M HCl), Al-dd (1 M KCl, 1 M NaOH dan 0,02 N HCl, indikator penolptalein/PP).

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah: neraca analitik; botol plastik 50 mL, beaker glass (volume 1 L dan 100 mL), erlenmeyer (volume 50 mL dan 100 mL), pipet (2, 5, dan 10 mL), biuret 2 mL, pengaduk magnetik, kertas saring Whatmann 42, pH meter, autoklaf, spektrofotometer, flamefotometer, mesin pengocok (*bed shaker*), polybag volume 15 L, sprayer, meteran.

### 3.3. Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini merupakan serangkaian percobaan yang terdiri dari percobaan di laboratorium dan di rumah kaca, yaitu :

1. Percobaan skala laboratorium, meliputi karakterisasi tanah, abu terbang batubara dan pupuk organik sebelum perlakuan, dan percobaan yang menerapkan berbagai komposisi abu terbang batubara dan kotoran ayam untuk mempelajari perubahan nilai TMN campuran.
2. Percobaan skala rumah kaca, meliputi percobaan yang dilakukan untuk mempelajari pengaruh penambahan campuran abu batubara- kotoran ayam terpilih dan pupuk P terhadap perubahan nilai TMN, serta hubungannya dengan jerapan P dan ketersediaan P pada tanah Ultisol serta pengaruhnya terhadap respon dan efisiensi pemupukan P pada tanaman jagung.

Tahapan pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.3.1. Karakterisasi abu terbang batubara, kotoran ayam dan tanah awal

Analisis karakteristik abu terbang batubara, kotoran ayam dan tanah awal dilakukan terhadap sifat-sifat yang berkaitan erat dengan ketersediaan P tanah, meliputi: pH H<sub>2</sub>O (1:1), pH KCl (1:1), status TMN, C-organik, Kapasitas tukar kation (KTK), P-tersedia, jerapan P, Al-dd, Fe-dd, Al-P, Fe-P, dan P-organik.

Analisis pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl (1:1) menggunakan pH meter, status TMN ditetapkan menggunakan metode titrasi garam (Sakurai *et al.*, 1988). C-organik dengan metode Walkley dan Black, Kapasitas tukar kation (KTK) menggunakan ekstrak 1 N NH<sub>4</sub>OAc pH 7,0, P-tersedia menggunakan pengekstrak Bray I, Fe-dd dan Al-dd tanah menggunakan 1 N KCl (Sulaeman *et al.*, 2005).

Jerapan P maksimum dianalisis dengan metode Fox dan Kamprath (1970) yang dimodifikasi (Djokosudardjo, 1982) dengan menggunakan pengekstrak 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. Penetapan bentuk Al-P, Fe-P, dan organik P mengikuti prosedur Kuo (1996). Bentuk Al-P diduga dengan menggunakan ekstrak 1 M NH<sub>4</sub>F pH=7, bentuk Fe-P dengan 0,1 N NaOH, dan bentuk organik-P dengan 1 M HCl (Zhang, 2009). Selanjutnya konsentrasi P dalam filtrat ditetapkan dengan prosedur *molybdate-ascorbic* dan menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 660 nm. Analisis abu terbang batubara, kotoran ayam dan tanah awal

dilakukan pada Laboratorium Kimia, Biologi dan Kesuburan Tanah, Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya.

### **3.3.2. Pengaruh komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan waktu inkubasi terhadap perubahan titik muatan nol (TMN)**

#### **a. Rancangan percobaan**

Percobaan dilakukan menurut Rancangan Acak Lengkap Faktorial, dengan 3 ulangan. Faktor perlakuan yang diterapkan adalah komposisi abu terbang batubara terhadap total campuran abu terbang batubara - kotoran ayam (b/b), meliputi: 0 (A1), 25 (A2), 50 (A3), 75 (A4), dan 100 (A5) persen, dan waktu inkubasi, yang meliputi: 15 (W1), 30 (W2), 45 (W3) dan 60 (W4) hari sebagai faktor perlakuan kedua. Berat campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam dalam setiap pot adalah setara 2 kg atas dasar berat kering mutlak. Tempat percobaan adalah di Laboratorium Kimia, Biologi dan Kesuburan Tanah, Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya.

#### **b. Pelaksanaan percobaan**

Abu terbang batubara dan kotoran ayam yang digunakan untuk percobaan atau analisis terlebih dahulu dikering-anginkan, kemudian digerus dan disaring masing-masing dengan ayakan berdiameter lubang 2,0 mm untuk kotoran ayam dan 0,05 mm untuk abu terbang batubara. Untuk persiapan inkubasi diambil abu terbang batubara yang telah disaring dan dimasukkan ke dalam pot percobaan.

Untuk mendapatkan campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam yang merata pada setiap unit percobaan, kedua bahan tersebut diaduk-aduk sampai bercampur merata. Pada saat pengadukan dilakukan penambahan air bebas ion menggunakan sprayer hingga kadar air pada campuran diperkirakan mendekati atau telah mencapai kapasitas lapang dan kemudian baru dimasukkan ke dalam pot percobaan. Kadar air kapasitas lapang adalah kandungan air yang diikat pada pori campuran dan tidak bergerak secara gravitasi. Pada kondisi ini apabila tanah digenggam akan membentuk gumpalan, namun dengan sentuhan yang tidak keras gumpalan tersebut akan buyar. Setiap pot percobaan kemudian ditimbang untuk memperoleh berat awal. Selisih berat awal dengan berat pada setiap hari inkubasi

merupakan jumlah air bebas ion yang ditambahkan untuk menjaga agar kadar air campuran tetap berada di sekitar kapasitas lapang.

Pot-pot percobaan kemudian ditata sesuai dengan rancangan percobaan yang digunakan. Percobaan berlangsung pada suhu kamar dan pengadukan campuran dilakukan bersamaan dengan penambahan air, yaitu setiap hari selama periode inkubasi. Percobaan inkubasi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam ini berlangsung selama 60 hari, yaitu sesuai dengan perlakuan waktu inkubasi yang diterapkan.

Analisis sifat kimia campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dilakukan setelah inkubasi berjalan 15, 30, 45, dan 60 hari dengan mengambil contoh campuran dari unit-unit perlakuan secara komposit. Karakteristik kimia campuran yang dianalisis adalah pH H<sub>2</sub>O (1:1), titik muatan nol (TMN), C-organik, Kapasitas tukar kation (KTK), P-tersedia, dan jerapan P.

### **3.3.3. Pengaruh pemberian campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam terhadap perubahan TMN, efisiensi pemupukan P tanaman jagung**

#### **a. Rancangan percobaan**

Percobaan skala rumah kaca ini dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai TMN, jerapan P, P-tersedia, efisiensi pemupukan P dan respon tanaman jagung dengan menerapkan perlakuan dosis campuran abu terbang batubara - kotoran ayam dan perlakuan dosis pupuk P, masing-masing sebagai faktor perlakuan. Campuran abu terbang batubara - kotoran ayam yang digunakan pada percobaan tahap ini adalah komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam yang mempunyai TMN rendah dan P-tersedia tinggi. Komposisi campuran ini diperoleh berdasarkan hasil percobaan tahap sebelumnya yaitu percobaan inkubasi perlakuan campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam. Komposisi campuran abu terbang batubara dan kotoran ayam yang digunakan adalah 1:1 (50% abu terbang batubara dan 50% kotoran ayam)

Perlakuan dosis pupuk P ditetapkan berdasarkan jumlah P yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi 0,2 µg P mL<sup>-1</sup> dalam larutan keseimbangan yang merupakan kebutuhan P baku tanaman secara umum (Fox dan Kamprath, 1970; Sanchez dan Uehara, 1980). Perhitungan kebutuhan P untuk mencapai konsentrasi

0,2  $\mu\text{g mL}^{-1}$  dalam larutan keseimbangan dilakukan berdasarkan kapasitas jerapan P maksimum tanah (Fox dan Kamprath, 1970). Menurut Djokosudardjo (1982), hubungan penjenjutan tapak penjerapan dengan konsentrasi P di dalam larutan (c) dan konstanta energi ikatan (k) Langmuir dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$s = kc / (1+kc) \dots\dots\dots [3.1]$$

dimana:

s = persen kejenuhan tapak penjerapan P;

k = konstanta energi dari tapak penjerapan; dan

c = konsentrasi kesetimbangan, yaitu 0,2  $\mu\text{g P mL}^{-1}$  larutan.

Kebutuhan P tanah kemudian dapat ditentukan dengan perkalian antara jerapan P maksimum dan persen penjenjutan P.

Faktor perlakuan yang diterapkan adalah dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam meliputi : 0 (A0); 15 (A1); 30 (A2); 45 (A3); dan 60 (A4) ton  $\text{ha}^{-1}$ . Faktor perlakuan kedua adalah dosis pupuk P, meliputi: 0 (P0); 0,5 (P1); 1,0 (P2); 1,5 (P3); dan 2,0 (P4) kali kebutuhan P tanaman, atau setara dengan 0, 87, 174, 261, dan 348 kg  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Pupuk P yang digunakan adalah pupuk TSP (45%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Percobaan dilakukan dengan 2 seri percobaan, yaitu dengan dan tanpa tanaman jagung. Percobaan dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap Faktorial dengan 3 ulangan untuk seri percobaan dengan tanaman jagung dan 2 ulangan untuk seri percobaan tanpa tanaman jagung. Berat tanah dalam setiap polibag adalah setara 10 kg kering mutlak. Tempat percobaan adalah di rumah plastik yang dibuat pada Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya, Inderalaya.

#### **b. Pelaksanaan percobaan**

Tanah yang digunakan pada untuk penelitian ini diambil dari lahan Arboretum Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Unsri, Inderalaya. Tanah diambil pada lokasi yang telah mengalami pengupasan lapisan atas, sehingga horison A dan AB sudah tidak ada lagi. Pengambilan tanah dilakukan pada beberapa tempat, kemudian dicampur secara komposit sampai homogen. Sebelum digunakan untuk percobaan atau analisis, tanah tersebut terlebih dahulu dikering-anginkan. Setelah

kering angin, tanah ditumbuk dan disaring dengan ayakan berdiameter lubang 2,0 mm dan dimasukkan ke dalam polibag. Banyaknya tanah yang digunakan dalam setiap polibag adalah 10 kg kering mutlak.

Campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dipersiapkan berdasarkan komposisi campuran terbaik berdasarkan hasil percobaan tahap sebelumnya, yaitu komposisi 50% abu terbang batubara dan diberikan sesuai dengan perlakuan. Sebelum digunakan, campuran abu terbang batubara-kotoran ayam terlebih dahulu digerus dan disaring dengan ayakan 100-mesh, untuk memudahkan pencampuran dengan tanah. Kemudian, dilakukan pemberian perlakuan campuran abu terbang batubara- kotoran ayam dan perlakuan pupuk P dengan tanah yang telah disiapkan. Bersamaan dengan itu juga diberikan pupuk KCl (60%  $K_2O$ ) dengan dosis  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  dan sepertiga dosis pupuk Urea (46% N) sebagai pupuk dasar. Selanjutnya, campuran ditambahkan air hingga kadar air campuran berada di sekitar kapasitas lapang sambil diaduk hingga tercampur merata, kemudian campuran dimasukkan ke dalam polibag sesuai dengan perlakuan.

Selanjutnya dilakukan penanaman benih jagung, sebanyak 3 benih polibag<sup>-1</sup>. Setelah tanaman berumur 10 hari, dilakukan pengurangan tanaman dengan meninggalkan 1 tanaman yang tumbuh paling baik. Pemeliharaan tanaman dilakukan dengan penyiraman tanaman setiap hari, pemupukan susulan, penyiangan terhadap gulma yang tumbuh dan pengendalian hama penyakit menggunakan pestisida jika diperlukan. Pemupukan urea susulan dilakukan 2 kali, yaitu setelah tanaman jagung berumur 30 hari dan 45 hari. Pupuk urea yang diberikan dengan dosis  $300 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Peubah tanaman yang diukur adalah serapan P tanaman saat fase anthesis. Serapan P tanaman diperoleh berdasarkan hasil perkalian antara kandungan P tanaman (%) dengan berat kering brangkasan tanaman saat fase anthesis ( $\text{mg tanaman}^{-1}$ ). Pada saat fase anthesis juga dilakukan analisis contoh tanah yang diambil dari setiap perlakuan meliputi pH  $H_2O$  (1:1), pH KCl (1:1), status titik muatan nol (TMN), C-organik, Kapasitas tukar kation (KTK), P-tersedia, Al-dd, Fe-dd, jerapan P, Al-P, Fe-P, dan P-organik.

### 3.3.4. Analisis data

Data yang diperoleh dari setiap tahap percobaan selanjutnya dianalisis secara statistik antara lain melalui analisis keragaman (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap peubah yang diamati dan dilanjutkan dengan uji BNJ untuk mengetahui beda pengaruh antara perlakuan yang dicobakan pada peubah yang diamati. Uji regresi dan korelasi juga dilakukan untuk mengetahui bentuk dan keeratan hubungan antar perlakuan dan peubah, serta antar peubah yang diuji.

Untuk melihat keragaman dalam efisiensi penggunaan hara P oleh tanaman jagung akibat pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P dilakukan berdasarkan nilai efisiensi serapan P dan efisiensi penggunaan P atau efisiensi agronomis. Efisiensi serapan P menggambarkan besarnya hara P dari pupuk yang diserap oleh tanaman. Efisiensi penggunaan P tanaman atau efisiensi agronomis mencerminkan dugaan besarnya hara dari pupuk yang dikonversi menjadi bahan kering tanaman/biomasa (Syers *et al.*, 2008; Johnston dan Syers, 2009; Norton, 2013).

Efisiensi serapan P (ESP) dan efisiensi agronomis P (EAP) dihitung dengan menggunakan rumus (Syers *et al.*, 2008; Johnston dan Syers, 2009; Norton, 2013):

$$\text{ESP (\%)} = ((S_x - S_o) / \text{dosis pupuk P}) \times 100\% \dots\dots\dots [3.2]$$

$$\text{EAP (mg BK mg P}^{-1}\text{)} = (B_x - B_o) / \text{dosis pupuk P} \dots\dots\dots [3.3]$$

Dimana:

$S_o$  = Serapan P tanaman pada perlakuan tanpa pupuk P

$S_x$  = Serapan P tanaman pada perlakuan pupuk P

$B_o$  = Berat kering tanaman pada perlakuan tanpa pupuk P

$B_x$  = Berat kering tanaman pada perlakuan pupuk P



## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Karakteristik Tanah, Abu Terbang Batubara, dan Kotoran Ayam Awal

Hasil analisis karakteristik tanah, abu terbang batubara dan kotoran ayam yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1. Hasil analisis sifat kimia tanah (Tabel 4.1) menunjukkan bahwa tanah yang digunakan pada penelitian ini termasuk tanah masam, dengan nilai titik muatan nol (TMN) sebesar 4,25, kapasitas tukar kation (KTK) tergolong sedang, kandungan C-organik dan N-total tergolong sangat rendah, dan Aluminium dapat ditukar (Al-dd) sebesar  $1,88 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ . Kadar P-tersedia tanah tergolong rendah, dan sebagian P berada dalam bentuk P-organik, Al-P, dan Fe-P, yaitu berturut-turut sebesar 29,00, 23,60, dan 6,19 mg P  $\text{kg}^{-1}$ . Kandungan basa dapat ditukar, seperti K dan Na tanah tergolong rendah, serta Ca dan Mg tergolong sangat rendah. Tekstur tanah tergolong liat. Karakteristik tanah ini menunjukkan bahwa disamping kemasaman tanah dan kandungan basa-basa yang rendah, ketersediaan P yang rendah dapat menjadi faktor pembatas bagi pertumbuhan tanaman. Ketersediaan P tanah yang rendah antara lain disebabkan karena tingginya jerapan P oleh komponen tanah yang membentuk senyawa P yang tidak larut (Sposito, 2008).

Intensitas pelapukan dan pencucian basa-basa yang tinggi pada tanah mineral masam, seperti Ultisol, menyebabkan tanah ini umumnya mempunyai kandungan basa-basa, kapasitas tukar kation dan bahan organik yang rendah serta didominasi oleh bahan residual seperti kaolinit, besi dan aluminium oksida (Hardjowigeno, 2007; Sposito, 2008; Tan, 2008). Tanah-tanah yang didominasi oleh mineral liat tipe 1:1 (kaolinit, haloisit) dan oksida-hidrus Al dan Fe umumnya mempunyai muatan terubahkan (*variable charge*) dengan nilai titik muatan nol (TMN) yang tinggi (Shamshuddin dan Anda, 2008). Hasil analisis tanah (Tabel 4.1) menunjukkan bahwa nilai TMN tanah ini relatif tinggi yaitu sebesar 4,25 pada pH H<sub>2</sub>O sebesar 4,54 yang mencerminkan rendahnya muatan negatif tanah. Oleh karena itu jerapan P tanah yang tinggi pada tanah ini ( $846,94 \text{ mg kg}^{-1}$ ) diduga akibat rendahnya muatan negatif tanah, sehingga P dalam

tanah dijerap oleh senyawa Al dan Fe oksida dan hidroksida, ion  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$  serta liat tanah (Tan, 1998).

Tabel 4.1. Karakteristik abu terbang batubara, kotoran ayam dan tanah awal

Jenis Analisis	Satuan	Hasil Analisis		
		Tanah <sup>*)</sup>	Abu Terbang	Kotoran Ayam
pH H <sub>2</sub> O	-	4,54 (m)	8,75	8,14
pH KCl	-	3,93	8,70	7,54
TMN	-	4,25	8,65	7,50
C-Organik	g kg <sup>-1</sup>	1,70 (sr)	1,10	123,80
N-total	g kg <sup>-1</sup>	0,20 (sr)	0,40	12,10
C/N	-	8,50	2,75	10,23
P-Bray I	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg <sup>-1</sup>	6,60 (r)	10,35	109,05
K-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	0,35 (r)	0,06	31,95
Na-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	0,22 (r)	2,72	4,35
Ca-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	0,80 (sr)	4,80	21,00
Mg-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	0,13 (sr)	0,28	1,80
KTK	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	17,40 (s)	9,53	59,60
Al-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	1,88	ttd <sup>**)</sup>	ttd
H-dd	cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	0,36	ttd	ttd
Al-P	mg P kg <sup>-1</sup>	23,60	1,13	19,13
Fe-P	mg P kg <sup>-1</sup>	6,19	16,5	37,95
P-Organik	mg P kg <sup>-1</sup>	29,00	19,34	31,20
Jerapan P Maks.	mg P kg <sup>-1</sup>	846,94	626,61	657,82
Tekstur		Liat		
Pasir	g kg <sup>-1</sup>	416	288	-
Debu	g kg <sup>-1</sup>	71	561	-
Liat	g kg <sup>-1</sup>	513	151	-

Keterangan:

<sup>\*)</sup> Kriteria menurut PPT (1983): m = masam; sr = sangat rendah; r = rendah; s = sedang.

<sup>\*\*)</sup> ttd = tidak terdeteksi

Berdasarkan jerapan P maksimum tanah selanjutnya ditentukan kebutuhan P baku tanaman yang digunakan sebagai faktor perlakuan pada penelitian ini. Konsentrasi 0,2 mg P kg<sup>-1</sup> dalam larutan tanah dianggap sebagai konsentrasi optimal atau kebutuhan P baku tanaman secara umum (Fox dan Kamprath, 1970; Sanchez dan Uehara, 1980). Menurut Djokosudardjo (1982), hubungan penjenjuran tapak penjerapan dengan konsentrasi P di dalam larutan (c) dan

konstanta energi ikatan ( $k$ ) Langmuir dapat dinyatakan seperti pada persamaan [3.1] yang telah disajikan pada Bab III. Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa kebutuhan P untuk mencapai konsentrasi  $0,2 \text{ mg P kg}^{-1}$  dalam larutan tanah berkisar antara  $165,4$  sampai  $179,8 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$  tanah, dengan rata-rata sebesar  $174$  (Tabel 4.2). Kebutuhan P ini digunakan sebagai perlakuan dosis 1 kali kebutuhan P tanaman.

Tabel 4.2. Jerapan P maksimum dan kebutuhan P tanah awal

Jerapan P Tanah Awal	Persamaan Kurva			Variabel Jerapan			Kebutuhan P ( $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ )
	p	q	$R^2$	b	k	s	
	..... $10^{-2}$ .....						
1	0,0749	0,120	0,98	831,60	1,60	24,30	176
2	0,0823	0,116	0,98	858,83	1,41	22,06	165
3	0,0736	0,117	0,96	850,38	1,60	24,21	180

Keterangan:

$Y = p + qX$  setara dengan  $C/(x/m) = 1/kb + C/b$ ; dimana  $p$  = konstanta,  $q$  = koefisien arah,  $R^2$  = koefisien determinan,  $C = P$  larut ( $\text{mg/l}$ ),  $x/m = P$  terjerap ( $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $b$  = jerapan P maksimum ( $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $k$  = konstanta energi ikatan P, dan  $s$  = persen penjumlahan tapak jerapan,  $s = kc / (1+kc)$  dengan  $c$  = konsentrasi kesetimbangan, yaitu  $0,2 \text{ mg P kg}^{-1}$  (Fox dan Kamprath, 1970; Djokosudardjo, 1982)

Abu terbang batubara yang digunakan pada penelitian ini bersifat basa (pH 8,75), dengan TMN sebesar 8,65. Jika digunakan kriteria kadar hara dalam tanah (PPT, 1983), abu terbang batubara ini mempunyai kandungan basa dapat ditukar, seperti Ca, Mg, K, dan Na yang bervariasi dari rendah sampai tinggi. Kadar P tersedia material ini tergolong rendah dengan kapasitas jerapan P sebesar  $626,61 \text{ mg kg}^{-1}$ . Kadar C-organik dan N-total juga tergolong sangat rendah. Proses pembakaran batubara pada suhu tinggi mengakibatkan kadar C organik dan N pada abu yang dihasilkan menurun dengan drastis (Seshadri *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2011). Kapasitas tukar kation (KTK) yang rendah ( $9,53 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ ) pada abu terbang batubara antara lain disebabkan karena kadar C-organik pada abu terbang batubara sangat rendah dan ukuran partikel abu terbang batubara yang didominasi oleh partikel berukuran debu (Tabel 4.1).

Kotoran ayam yang digunakan dalam penelitian ini tergolong basa dengan TMN pada pH 7,50. Kandungan basa-basa seperti Na, Ca, Mg dan K yang tinggi, kapasitas tukar kation (KTK) tergolong tinggi. Kadar N-total dan C-organik berturut-turut sebesar 12,10 g kg<sup>-1</sup> dan 123,80 g kg<sup>-1</sup> dengan C/N sebesar 10,23. Kapasitas jerapan P kotoran ayam yang digunakan relatif tinggi (657,82 mg kg<sup>-1</sup>). Meskipun demikian, ketersediaan P tergolong tinggi (109,05 mg kg<sup>-1</sup>) dan sebagian P berada dalam bentuk ikatan sebagai Al-P, Fe-P dan P-organik. Pencampuran abu terbang batubara dan kotoran ayam dengan karakteristik yang relatif berbeda ini diharapkan akan dapat meningkatkan kualitasnya sebagai amelioran untuk meningkatkan kualitas tanah dan produksi tanaman.

## **4.2. Pengaruh Pencampuran Abu Terbang Batubara dan Kotoran Ayam terhadap Beberapa Karakteristik Kimia Campuran**

### **4.2.1. Perubahan pH, Titik Muatan Nol dan Muatan Negatif Campuran**

Data dan hasil analisis keragaman terhadap nilai pH H<sub>2</sub>O, titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif pada berbagai komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dan waktu inkubasi disajikan pada Lampiran 1. Hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa perlakuan komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam, waktu inkubasi dan interaksi keduanya berpengaruh sangat nyata terhadap perubahan pH H<sub>2</sub>O, titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif campuran ( $P < 0,01$ ) (Lampiran 1). Perlakuan komposisi campuran ATB-KA dan waktu inkubasi cenderung menurunkan pH campuran, masing-masing dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,71 dan 0,20, serta cenderung menurunkan TMN campuran, masing-masing dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,72 dan 0,17. Muatan negatif campuran cenderung meningkat secara kuadrat akibat perlakuan komposisi ATB-KA dan waktu inkubasi, masing-masing dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,65 dan 0,14 (Lampiran 2). Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh komposisi campuran terhadap perubahan pH dan TMN campuran lebih besar dibanding waktu inkubasi.

Hasil uji beda nyata jujur (BNJ) menunjukkan bahwa nilai pH campuran pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi selama 45 hari nyata lebih rendah dibandingkan dengan nilai pH pada

kombinasi perlakuan yang lain, tetapi berbeda tidak nyata dibandingkan dengan nilai pH pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi selama 60 hari, dengan nilai pH pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 25% ATB dan waktu inkubasi selama 45 hari, dengan nilai pH pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 25% ATB dan waktu inkubasi selama 60 hari, dan dengan nilai pH pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 75% ATB dan waktu inkubasi selama 60 hari (Tabel 4.3).

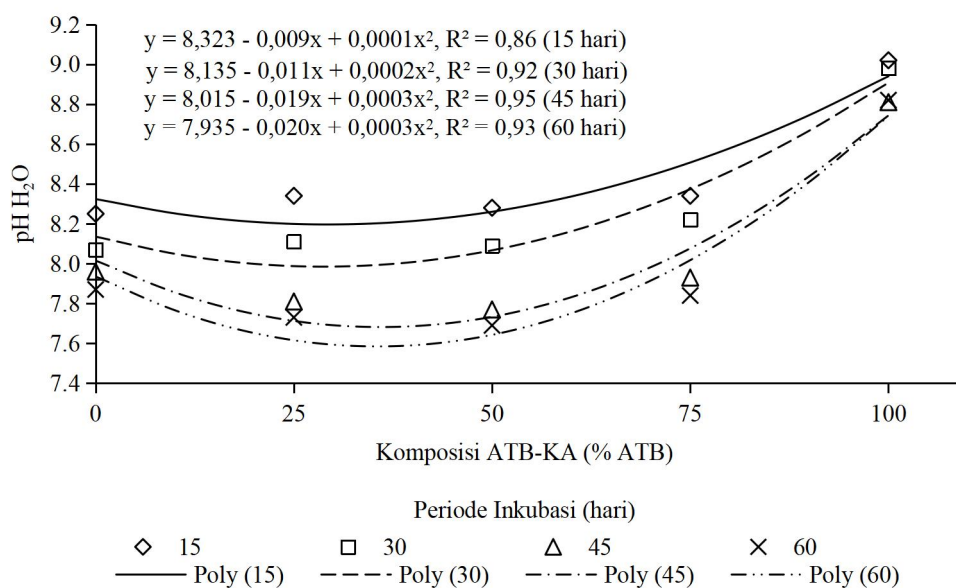
Tabel 4.3. Pengaruh komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan waktu inkubasi terhadap pH H<sub>2</sub>O (1:1), titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) campuran

Campuran ATB:KA (% ATB)	Waktu Inkubasi (Hari)			
	15	30	45	60
pH H <sub>2</sub> O (1:1)				
0	8,25 HIJ	8,07 EFG	7,96 DEF	7,87 BCD
25	8,34 J	8,11 F-I	7,81 A-D	7,73 AB
50	8,28 IJ	8,09 E-H	7,77 ABC	7,69 A
75	8,34 J	8,22 G-J	7,93 CDE	7,84 A-D
100	9,02 L	9,01 L	8,81 K	8,82 K
BNJ <sub>(0,01)</sub> = 0,17				
TMN				
0	7,47 EF	7,04 B-E	6,71 BC	6,89 B-E
25	7,40 DEF	6,79 BCD	6,58 B	6,55 B
50	7,33 C-F	6,67 B	5,84 A	5,76 A
75	7,90 FG	6,77 BCD	6,66 B	6,74 BC
100	8,70 H	8,70 H	8,68 H	8,50 GH
BNJ <sub>(0,01)</sub> = 0,65				
$\Delta$ pH (pH H <sub>2</sub> O – TMN)				
0	0,78 BCD	1,03 CDE	1,25 DE	0,98 CDE
25	0,94 B-E	1,32 DEF	1,23 DE	1,18 DE
50	0,95 CDE	1,43 EF	1,93 F	1,93 F
75	0,44 ABC	1,45 EF	1,27 DE	1,10 DE
100	0,32 AB	0,31 A	0,13 A	0,32 AB
BNJ <sub>(0,01)</sub> = 0,62				

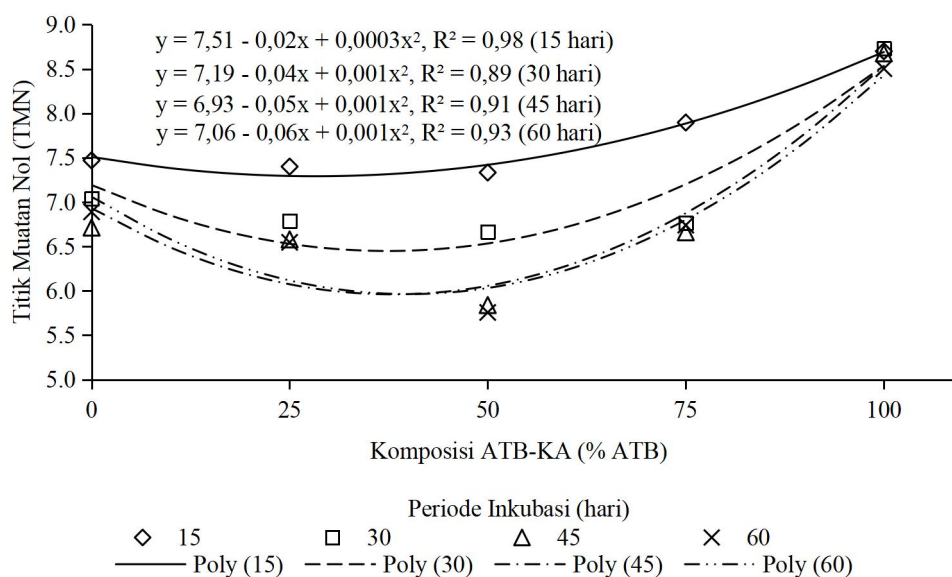
Keterangan : Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P < 0,01)

Nilai TMN pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi 45 hari berbeda tidak nyata dibandingkan dengan nilai TMN pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi 60 hari, tetapi nyata lebih rendah dibandingkan dengan nilai TMN

pada kombinasi perlakuan yang lain (Tabel 4.3). Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 juga menunjukkan bahwa komposisi campuran 50% ATB dengan waktu inkubasi selama 45 dan 60 hari cenderung mempunyai pH dan TMN yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai pH dan TMN pada komposisi campuran yang lain.



Gambar 4.1. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan pH H<sub>2</sub>O pada berbagai waktu inkubasi

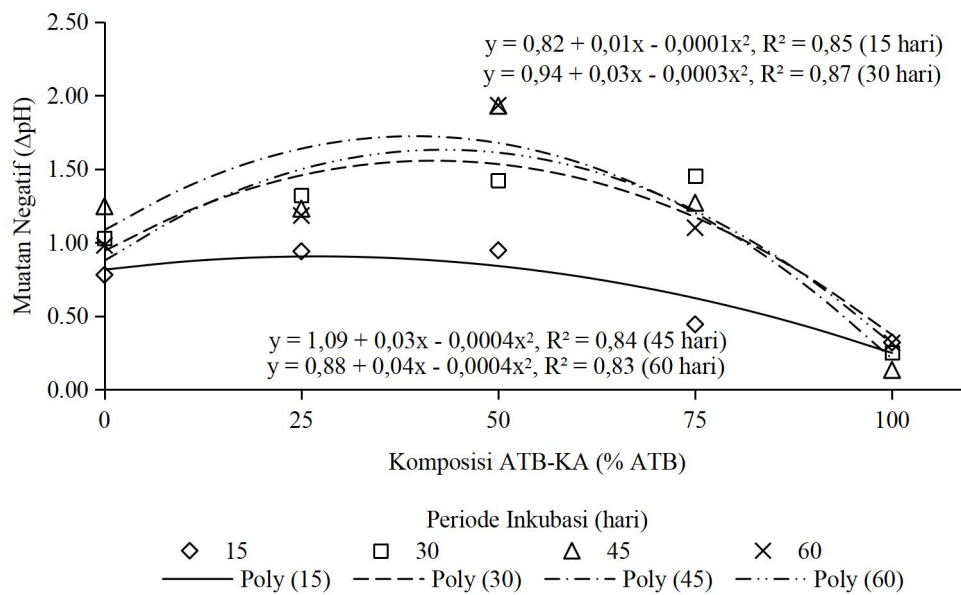


Gambar 4.2. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan titik muatan nol (TMN) campuran pada berbagai waktu inkubasi

Perubahan pH dan TMN campuran ini diduga berkaitan dengan proses dekomposisi bahan organik pada campuran. Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa C-organik mempunyai hubungan yang sangat erat dengan pH campuran ( $r = -0,58^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) dan TMN campuran ( $r = -0,51^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 2). Penelitian terdahulu melaporkan adanya peningkatan aktifitas mikroba yang ditandai dengan meningkatnya respirasi, populasi bakteri pelarut P dan aktifitas enzim urease, protease, amylase, dehydrogenase dan fosfatase pada campuran abu terbang batubara dan bahan organik berupa pupuk kandang (Bhattacharya dan Chattopadhyay, 2002; Anbalagan dan Manivannan, 2012) dan dengan lumpur organik (Lai *et al.*, 1999; Pati dan Sahu, 2003). Meningkatnya proses dekomposisi bahan organik dapat menyebabkan terjadinya penurunan pH antara lain oleh adanya pelepasan  $\text{CO}_2$  dari proses respirasi mikroorganisme yang dapat bereaksi dengan ion  $\text{H}^+$  membentuk asam lemah ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) dan juga melalui proses nitrifikasi yang menghasilkan ion  $\text{H}^+$  (Stevenson, 1994; Tan, 2003).

Perubahan pH dan TMN campuran akibat pengaruh interaksi perlakuan komposisi ATB-KA dan waktu inkubasi ini menyebabkan terjadinya peningkatan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) campuran. Nilai pH dan TMN mempunyai hubungan negatif yang sangat erat dengan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) campuran, dengan nilai  $r$  berturut-turut sebesar  $-0,85^{**}$  dan  $-0,97^{**}$  ( $P < 0,01$ ) (Lampiran 2). Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 juga menunjukkan bahwa penurunan pH cenderung diikuti dengan penurunan nilai TMN yang lebih besar, sehingga muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) campuran menjadi meningkat (Gambar 4.3).

Muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi 45 hari nyata lebih tinggi dibandingkan dengan muatan negatif pada kombinasi perlakuan yang lain, kecuali terhadap kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi 60 hari, terhadap kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 25% ATB dan waktu inkubasi 30 hari, dan terhadap kombinasi perlakuan ATB-KA dengan komposisi 75% ATB dan waktu inkubasi 30 hari (Tabel 4.3). Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan muatan negatif campuran telah berlangsung optimal pada waktu inkubasi 45 hari dan maksimum terjadi pada komposisi 50% ATB.

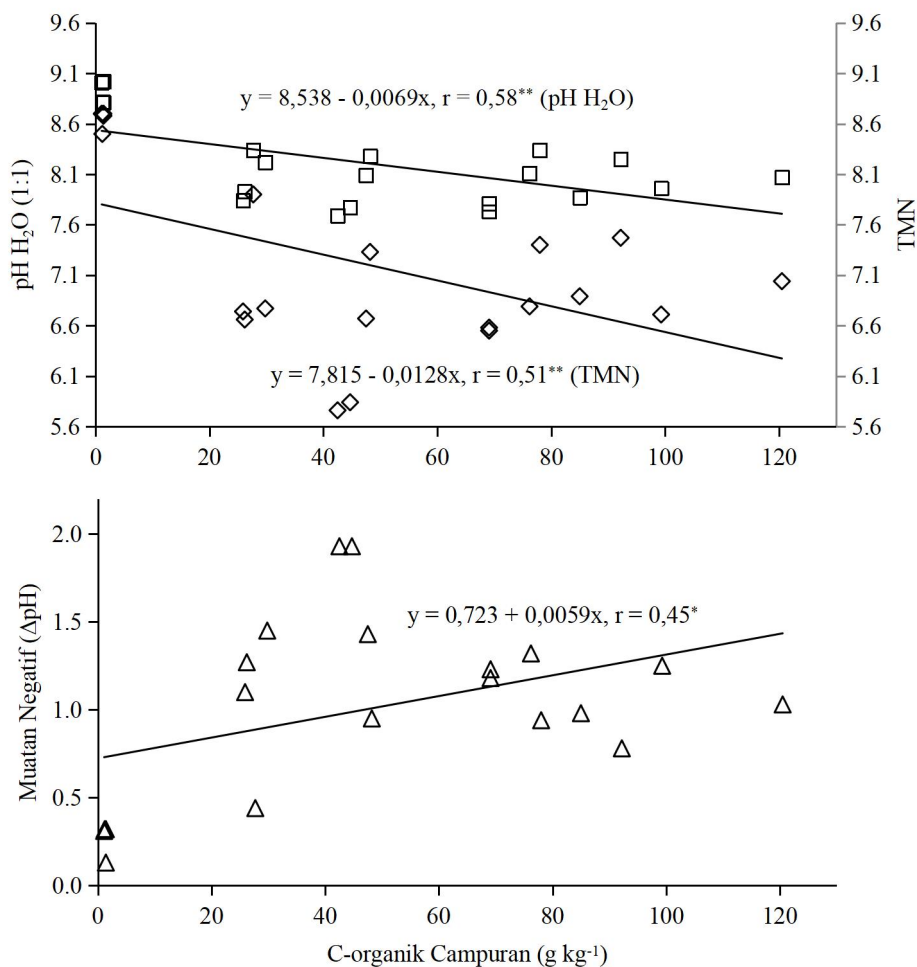


Gambar 4.3. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) campuran pada berbagai waktu inkubasi

Meningkatnya muatan negatif campuran yang ditandai oleh menurunnya nilai TMN menjadi semakin lebih rendah dari pH aktualnya diduga berkaitan dengan dekomposisi abu terbang batubara dan kotoran ayam yang berlangsung selama waktu inkubasi. Kandungan C-organik dari kotoran ayam pada campuran diduga berperan dalam mempengaruhi status pH, TMN dan muatan negatif campuran. Campuran ATB-KA dengan proporsi ATB yang lebih tinggi mempunyai kandungan C-organik yang rendah dan cenderung mempunyai pH dan TMN yang lebih tinggi dan mempunyai muatan negatif yang lebih rendah, dan sebaliknya (Gambar 4.4).

Nilai kapasitas tukar kation (KTK) campuran juga cenderung lebih rendah pada campuran ATB-KA dengan proporsi ATB yang lebih tinggi (Lampiran 1). Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya muatan negatif cenderung diikuti oleh peningkatan KTK campuran. Hasil ini menunjukkan bahwa bahan organik pada kotoran ayam berperan dalam mempengaruhi muatan negatif campuran. Nilai pH, TMN, KTK dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) campuran mempunyai hubungan yang erat dengan kadar C-organik dengan nilai  $r$  berturut-turut sebesar  $-0,58^{**}$  ( $P < 0,01$ ),  $-0,51^*$  ( $P < 0,05$ ),  $0,94^{**}$  ( $P < 0,01$ ) dan  $0,41^*$  ( $P < 0,05$ ) (Lampiran 2).





Gambar 4.4. Hubungan antara kandungan C-organik campuran dengan pH H<sub>2</sub>O, titik muatan nol (TMN) dan muatan negatif (ΔpH) campuran

Ionisasi gugus fungsional senyawa organik akan menghasilkan sejumlah muatan negatif pada permukaan koloid, sehingga status TMN menjadi turun (Tan, 2003). Asam-asam organik hasil dekomposisi mempunyai gugus fungsional dengan afinitas tinggi terhadap Al dan Fe, seperti hidroksil (-OH), dan karboksil (-COOH) (Tan, 2003). Jerapan spesifik asam organik oleh oksida-hidrus Al dan Fe, kompleksasi Al dan Fe serta reaksi protonasi-deprotonasi asam-asam organik dapat menyebabkan meningkatnya muatan negatif pada permukaan koloid dan nilai TMN menjadi turun (Haynes dan Mokolobate, 2001; Huang *et al.*, 2005). Senyawa organik hasil dekomposisi bahan organik kotoran ayam juga dapat berfungsi sebagai penyumbang elektron (Uehara dan Gillman, 1981; Stevenson, 1994) dan menyebabkan konsentrasi elektrolit pada permukaan koloid menjadi

meningkat. Reaksi-reaksi seperti disebutkan di atas akan menyebabkan turunnya nilai TMN serta meningkatnya muatan negatif dan kapasitas tukar kation (KTK) campuran.

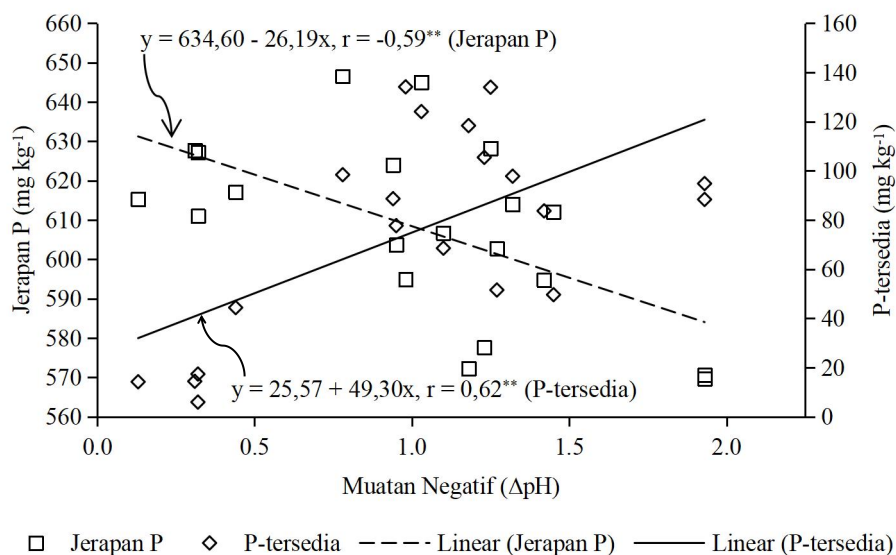
Selain itu, abu terbang batubara didominasi oleh mineral aluminosilikat dan mengandung oksida-oksida, seperti silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kalsium ( $\text{CaO}$ ) dan magnesium ( $\text{MgO}$ ) yang tinggi. Reaksi hidrolisis senyawa oksida dan aluminosilikat pada abu terbang batubara yang menghasilkan muatan negatif (Ricou *et al.*, 2001; Brouwers dan Van Eijk, 2003), menyebabkan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) menjadi meningkat dan menyebabkan penurunan nilai TMN menjadi semakin lebih rendah dari pH aktual.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa abu terbang batubara dan kotoran ayam mempunyai peran yang saling menunjang dalam mempengaruhi pH, TMN, muatan negatif dan KTK campuran. Kombinasi perlakuan terbaik diperoleh pada campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi selama 45 hari. Pada kombinasi perlakuan ini diperoleh nilai TMN yang rendah dan muatan negatif yang tinggi. Bahan organik diduga berperan dalam proses dekomposisi abu terbang batubara, sehingga senyawa aluminosilikat dan oksida pada abu terbang batubara menjadi lebih larut. Demikian juga sebaliknya, kandungan basa dan hara pada abu terbang batubara diduga juga berperan dalam meningkatkan laju dekomposisi bahan organik yang menghasilkan asam-asam organik. Hasil penelitian Bhattacharya dan Chattopadhyay (2002), Bhattacharya dan Chattopadhyay (2004), Venkatesh dan Eevera (2008), serta Anbalagan dan Manivannan (2012) juga mengungkapkan bahwa peningkatan aktifitas mikroba, ketersediaan hara dan pembentukan asam humat pada kompos yang dihasilkan pada campuran bahan organik dan abu terbang batubara dengan komposisi 1:1 karena kedua bahan tersebut mempunyai karakteristik yang saling melengkapi.

#### **4.2.2. Perubahan Jerapan P dan P-tersedia Campuran**

Data hasil analisis jerapan P dan P-tersedia pada setiap perlakuan campuran ATB-KA selama periode inkubasi disajikan pada Lampiran 1. Perubahan nilai muatan negatif akibat pencampuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan

waktu inkubasi tampak menyebabkan terjadinya perubahan jerapan P pada campuran. Jerapan P campuran mempunyai hubungan negatif sangat erat dengan muatan negatif campuran ( $r = -0,59^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Gambar 4.5).

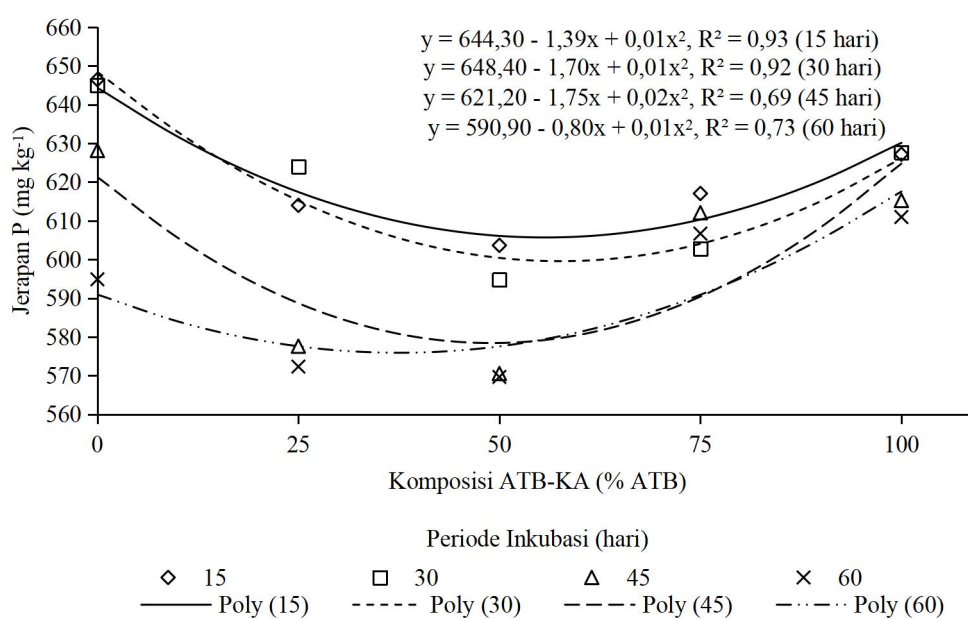


Gambar 4.5. Hubungan muatan negatif dengan jerapan P dan P-tersedia campuran

Hasil uji regresi korelasi (Lampiran 2) menunjukkan bahwa komposisi campuran ATB-KA dan jerapan P mempunyai hubungan kuadrat, dengan persamaan regresi:  $\text{Jerapan P} = 626,20 - 1,41x + 0,01x^2$ ,  $R^2 = 0,43$ . Berdasarkan persamaan regresi tersebut, diketahui bahwa jerapan P minimum diperoleh pada campuran ATB-KA dengan komposisi 50 % ATB. Sementara itu, waktu inkubasi dan jerapan P mempunyai bentuk hubungan yang linier, dan jerapan P mempunyai hubungan negatif sangat erat ( $r = -0,59^{**}$ ) dengan waktu inkubasi dengan persamaan regresi:  $\text{Jerapan P} = 637,60 - 0,79x$ ,  $R^2 = 0,35$ . Hasil ini menunjukkan bahwa komposisi campuran ATB-KA dan waktu inkubasi mempunyai pengaruh terhadap penurunan jerapan P campuran.

Gambar 4.6 memperlihatkan bahwa pada komposisi campuran 50% abu terbang batubara dengan waktu inkubasi 45 dan 60 hari cenderung mempunyai jerapan P yang lebih rendah, dan penurunan jerapan P cenderung lebih besar hingga 45 hari inkubasi dibandingkan dengan penurunan jerapan P yang terjadi

pada 60 hari inkubasi. Hal ini berkaitan dengan penurunan TMN dan meningkatnya muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) (Tabel 4.3) campuran yang lebih besar pada komposisi campuran 50% ATB dibandingkan dengan penurunan TMN dan meningkatnya muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada komposisi campuran yang lain. Hasil analisis korelasi (Lampiran 2) menunjukkan bahwa penurunan jerapan P mempunyai hubungan yang sangat erat dengan menurunnya TMN ( $r = 0,61^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) dan meningkatnya muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) ( $r = -0,59^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) campuran.



Gambar 4.6. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan jerapan P pada berbagai waktu inkubasi

Meningkatnya muatan negatif campuran yang bersumber dari gugus fungsional asam-asam organik dari dekomposisi kotoran ayam (Uehara dan Gillman, 1981; Stevenson, 1994) dan hidrolisis oksida-oksida pada abu terbang batubara (Ricou *et al.*, 2001; Browsers dan Van Eijk, 2003) secara bersama-sama diduga berperan dalam menurunkan jerapan P campuran yang lebih baik pada komposisi campuran 50% abu terbang batubara dibandingkan dengan penurunan jerapan P pada komposisi campuran yang lain.

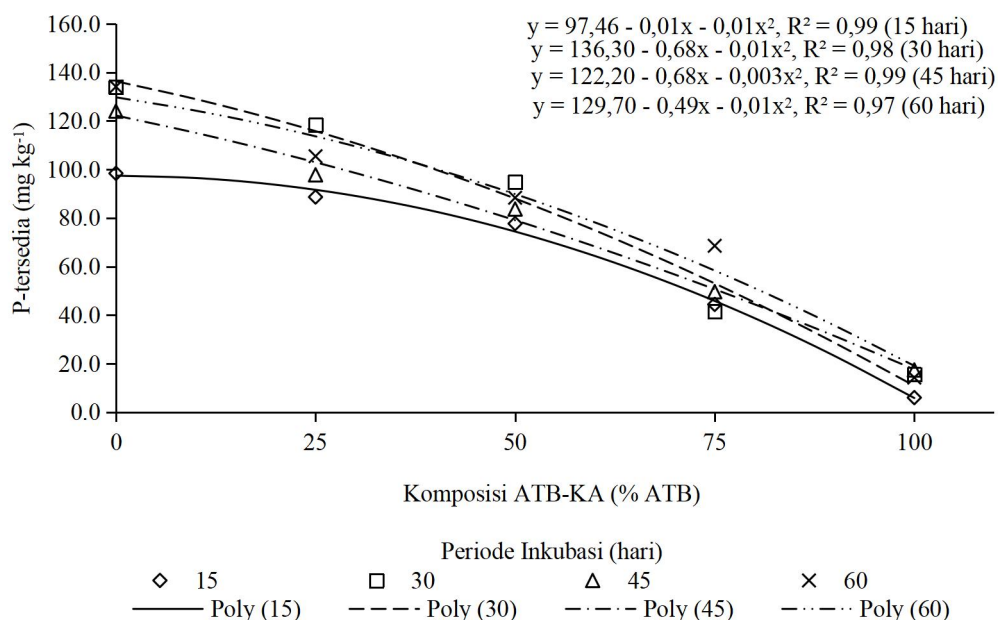
Penurunan jerapan P campuran ini memberikan kontribusi terhadap peningkatan kadar P-tersedia pada campuran. Meningkatnya jumlah muatan negatif ( $\Delta pH$ ) menyebabkan menurunnya daya tarik elektrostatis terhadap anion fosfat. Akibatnya anion fosfat menjadi lebih larut dan ketersediaan P menjadi meningkat (Uehara dan Gillman, 1981). Muatan negatif campuran mempunyai hubungan positif sangat erat dengan P-tersedia campuran ( $r = 0,62^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Gambar 4.5). Jerapan P yang rendah pada kombinasi perlakuan campuran ATB-KA dengan komposisi 50% ATB pada waktu inkubasi 45 dan 60 hari cenderung mempunyai kandungan P-tersedia yang lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan P-tersedia pada waktu inkubasi yang lebih singkat (Lampiran 2).

Meskipun demikian, kandungan P-tersedia dan jerapan P campuran mempunyai hubungan negatif yang tidak nyata, dengan dengan nilai  $r$  sebesar  $-0,21^m$ ,  $P > 0,05$  (Lampiran 2). Hubungan antara P-tersedia dan jerapan P yang tidak nyata ini dapat disebabkan karena tingginya kandungan P-tersedia pada kotoran ayam (Tabel 4.1). Hasil uji regresi korelasi (Lampiran 2) menunjukkan bahwa komposisi campuran ATB-KA cenderung meningkatkan P tersedia campuran secara linier dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,91, dengan persamaan regresi:  $P\text{-tersedia} = 129,20 - 1,07x$ . Sementara itu, waktu inkubasi dan P-tersedia mempunyai hubungan positif yang tidak nyata ( $r = 0,21^m$ ,  $P > 0,05$ ), dengan persamaan regresi:  $P\text{-tersedia} = 56,67 + 0,50x$ ,  $R^2 = 0,05$ .

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa kandungan P-tersedia campuran cenderung meningkat dengan semakin lamanya waktu inkubasi, dan cenderung menurun dengan meningkatnya proporsi abu terbang batubara pada campuran. Hal ini menunjukkan bahwa sumber P utama pada campuran berasal dari kotoran ayam. Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukkan bahwa jerapan P yang rendah pada kombinasi perlakuan campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dengan komposisi 50% ATB pada waktu inkubasi 45 dan 60 hari cenderung mempunyai kandungan P-tersedia yang lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan P-tersedia pada waktu inkubasi yang lebih singkat.

Kadar P-tersedia yang lebih tinggi pada komposisi 0% dan 25% abu terbang batubara diduga lebih disebabkan oleh tingginya kadar P yang bersumber dari kotoran ayam (Tabel 4.1) dan pengaruh dari kandungan C-organik pada campuran.

Hasil uji korelasi (Lampiran 2) menunjukkan terdapat hubungan positif yang sangat erat antara P-tersedia dengan C-organik campuran dengan nilai  $r$  sebesar  $0,92^{**}$  ( $P < 0,01$ ). Hasil yang senada juga diungkapkan oleh Bhattacharya dan Chattopadhyay (2002), dimana penambahan pupuk kotoran sapi dan abu terbang batubara dapat meningkatkan ketersediaan P campuran secara nyata pada periode inkubasi 50 hari, dan diduga disebabkan oleh meningkatnya populasi bakteri pelarut P yang mempunyai kemampuan mengubah kelarutan P ke dalam bentuk terlarut.



Gambar 4.7. Hubungan antara komposisi campuran ATB-KA dan P-tersedia pada berbagai waktu inkubasi

Ketersediaan P yang lebih rendah pada komposisi 75% dan 100% abu terbang batubara diduga juga disebabkan oleh kandungan P yang rendah ( $10,35 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ) pada abu terbang batubara. Pada komposisi campuran 75% abu terbang batubara, kandungan P-tersedia yang lebih rendah diduga akibat kandungan C-organik yang ditambahkan tidak mencukupi bagi mikroba untuk melarutkan P dari abu terbang batubara dan sumbangan P dari kotoran ayam relatif lebih sedikit. Pada komposisi 50% abu terbang batubara, C-organik diduga

tersedia cukup sebagai sumber energi bagi mikroba, sehingga pelepasan P dari abu terbang batubara menjadi lebih besar.

Hasil senada juga telah dilaporkan oleh Bhattacharya dan Chattopadhyay (2002) dan Anbalagan dan Manivannan (2012) bahwa pembentukan asam humat dan kandungan P-tersedia meningkat secara nyata pada komposisi abu terbang batubara dan bahan organik 1:1 dibandingkan dengan kandungan P-tersedia pada proporsi bahan organik yang lebih rendah atau lebih tinggi yang berkaitan dengan ketersediaan C-organik sebagai sumber energi bagi mikroba dalam proses dekomposisi. Kemampuan asam-asam organik dalam meningkatkan ketersediaan P antara lain melalui mekanisme persaingan anion organik dengan P untuk menempati bidang tapak jerapan yang bermuatan positif, modifikasi muatan permukaan koloid oleh molekul organik, dan pelepasan P dari ikatan logam-P dengan pembentukan kompleks logam-organik (Stevenson, 1994; Djuniwati *et al.*, 2011).

### **4.3. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara-Kotoran Ayam terhadap pH, TMN, dan Muatan Negatif Tanah**

#### **4.3.1. Reaksi Tanah (pH)**

Hasil analisis pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah setiap kombinasi perlakuan dosis campuran ATB-KA dan dosis pupuk P pada percobaan tanpa dan dengan tanaman jagung disajikan pada Lampiran 4 dan Lampiran 5. Hasil analisis keragaman terhadap data pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah yang ditanami jagung menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA dan interaksi pemberian campuran ATB-KA dengan perlakuan dosis pupuk P masing-masing berpengaruh sangat nyata terhadap pH tanah pada fase anthesis tanaman jagung, sementara perlakuan pupuk P berpengaruh tidak nyata (Lampiran 4). Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai pH H<sub>2</sub>O pada tanah yang ditanami jagung cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan nilai pH pada tanah yang tidak ditanami jagung. Pada tanah yang tidak ditanami jagung, perlakuan dosis campuran ATB-KA juga cenderung meningkatkan pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah. Hasil analisis regresi korelasi (Lampiran 6) menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA cenderung

meningkatkan pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah secara linier, masing-masing dengan nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) sebesar 0,99.

Tabel 4.4. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap pH H<sub>2</sub>O (1:1) tanah

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Tidak ditanami jagung					
0	4,13	4,10	3,99	3,98	3,99
15	4,57	4,73	4,79	4,73	4,84
30	5,88	5,65	5,76	5,65	5,70
45	6,44	6,48	6,42	6,51	6,50
60	7,40	7,05	6,87	6,97	6,88
Ditanami jagung					
0	4,28 a	4,30 a	4,34 a	4,25 a	4,23 a
15	5,12 b	5,10 b	5,20 b	5,23 b	5,29 b
30	6,06 c	6,33 c	6,17 c	6,38 c	6,29 c
45	6,98 d	7,10 d	7,01 d	6,94 d	6,90 d
60	7,19 d	7,10 d	7,25 d	7,23 d	7,21 d

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 0,47

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P < 0,05)

Tabel 4.5. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap pH KCl (1:1) tanah

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Tidak ditanami jagung					
0	3,94	3,90	3,77	3,75	3,77
15	4,37	4,50	4,55	4,47	4,59
30	5,64	5,41	5,50	5,40	5,40
45	6,20	6,24	6,16	6,26	6,20
60	7,15	6,79	6,60	6,70	6,60
Ditanami jagung					
0	4,03 a	3,99 a	4,02 a	3,93 a	3,89 a
15	4,76 b	4,72 b	4,80 b	4,71 b	4,72 b
30	5,60 c	5,70 c	5,47 c	5,69 c	5,60 c
45	6,37 de	6,43 de	6,29 de	6,25 de	6,22 de
60	6,65 ef	6,51 de	6,65 ef	6,70 f	6,55 de

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 0,40

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P < 0,05)



Penurunan kemasaman tanah akibat pemberian campuran ATB-KA diduga merupakan pengaruh dari sifat alkalin dan oksida basa pada abu terbang batubara dan asam-asam organik hasil dekomposisi bahan organik kotoran ayam. Abu terbang batubara bersifat alkalin dan kaya akan basa-basa seperti Ca dan Mg, diketahui dapat berfungsi sebagai bahan kapur yang berperan dalam meningkatkan pH tanah (Seoane dan Leiros, 2001; Yunusa *et al.*, 2006). Beberapa hasil penelitian juga mengungkapkan bahwa pemberian abu terbang batubara dan kombinasinya dengan bahan organik dapat meningkatkan pH tanah masam (Mittra *et al.*, 2003; Manoharan *et al.*, 2007; Kishor *et al.*, 2010).

Bahan organik diketahui dapat mempengaruhi pH tanah. Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa kandungan C-organik tanah mempunyai hubungan positif yang sangat erat dengan pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl dengan nilai r pada tanah yang ditanami jagung masing-masing sebesar 0,88\*\* (Lampiran 4) dan pada tanah yang tidak ditanami jagung masing-masing sebesar 0,95\*\* (Lampiran 7). Meningkatnya pH tanah akibat pemberian bahan organik seperti kotoran ayam dapat terjadi melalui kompleksasi Al dalam larutan tanah pada gugus fungsional asam organik yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik dan perakaran tanaman (Haynes dan Mokolobate, 2001; Ano dan Ubochi, 2007). Reaksi protonasi anion asam organik ( $\text{RCOO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{RCOOH}$ ) (Bessho dan Bell, 1992) atau melalui reaksi dekarboksilasi anion asam organik yang mengkonsumsi proton dan melepaskan CO<sub>2</sub>, dengan reaksi:  $\text{R-CO-COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{RCHO} + \text{CO}_2$  (Haynes dan Mokolobate, 2001) juga dapat menurunkan tingkat kemasaman tanah.

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah dengan perlakuan dosis campuran ATB-KA yang dikombinasikan dengan setiap dosis pupuk P meningkat secara nyata seiring dengan meningkatnya dosis campuran ATB-KA hingga dosis 45 ton ha<sup>-1</sup>. Nilai pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah dengan perlakuan campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan setiap dosis pupuk P tidak menunjukkan perbedaan yang nyata jika dibandingkan dengan nilai pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl tanah pada perlakuan campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dosis 60 ton ha<sup>-1</sup> pada setiap dosis pupuk P yang dicobakan. Kecenderungan yang serupa juga tampak pada percobaan tanpa tanaman jagung.

Peningkatan pH tanah antara lain dapat disebabkan oleh adanya akumulasi asam-asam organik dari campuran ATB-KA. Ionisasi gugus fungsional senyawa organik akan menghasilkan sejumlah muatan negatif pada permukaan koloid dan dapat mengkompleks ion Al dan H, sehingga terjadi peningkatan pH tanah (Stevenson, 1994; Haynes dan Mokolobate, 2001). Selain itu, abu terbang batubara bersifat alkalin dan didominasi oleh senyawa aluminosilikat serta senyawa oksida seperti CaO, MgO, dan K<sub>2</sub>O, melalui reaksi hidrolisis akan dihasilkan ion hidroksida (OH<sup>-</sup>) (Ricou *et al.*, 2001; Browsers dan Van Eijk, 2003) sehingga menyebabkan kelarutan ion Al dan Fe sebagai sumber kemasaman tanah akan menurun dan pH tanah meningkat. Hasil uji korelasi antara pH tanah dan kadar Al-dd dan Fe-dd tanah pada tanah yang ditanami jagung (Lampiran 4) dan tidak ditanami jagung menunjukkan (Lampiran 7) menunjukkan bahwa pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl mempunyai hubungan negatif yang sangat erat dengan kadar Al-dd dan Fe-dd tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan pH H<sub>2</sub>O dan pH KCl akibat perlakuan yang diterapkan berhubungan sangat erat dengan penurunan kadar Al-dd dan Fe-dd dalam tanah. Penelitian terdahulu juga mengungkapkan bahwa penurunan kadar Al-dd tanah (Wright *et al.*, 1998) dan peningkatan pH tanah yang terjadi antara lain disebabkan oleh adanya pengaruh kapur (*liming effect*) dari abu terbang batubara (Seone and Leiros, 2001; Yunusa *et al.*, 2006).

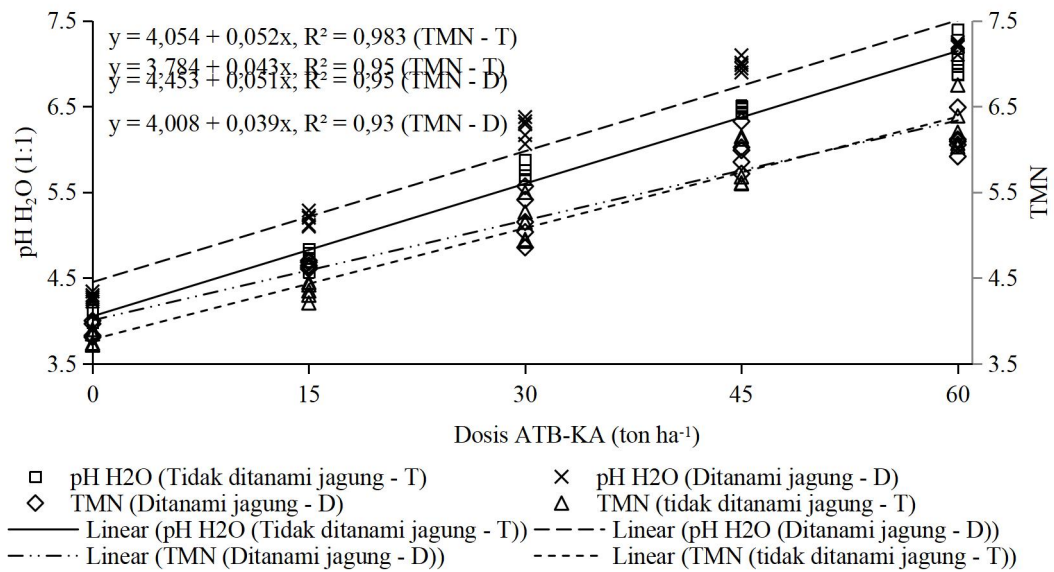
#### 4.3.2. Titik Muatan Nol dan Muatan Negatif Tanah

Data titik muatan nol (TMN) tanah akibat pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung disajikan pada Lampiran 3 dan Lampiran 5. Berdasarkan hasil analisis keragaman terhadap data TMN dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah yang ditanami jagung (Lampiran 3) diketahui bahwa perlakuan dosis campuran ATB-KA, perlakuan dosis pupuk P, serta interaksi keduanya berpengaruh nyata terhadap perubahan nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah. Dosis ATB-KA dan pupuk P pada percobaan dengan tanaman jagung cenderung meningkatkan TMN tanah secara linier, masing-masing dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,93 dan 0,02. Kecenderungan yang sama juga terjadi terhadap nilai muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah, dimana nilai muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah cenderung meningkat secara linier dengan

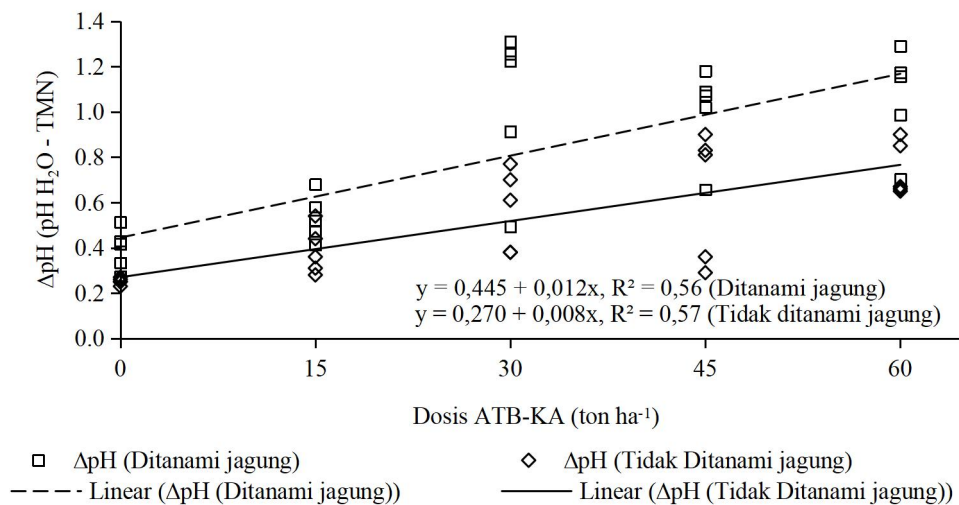
meningkatnya dosis ATB-KA ( $R^2 = 0,56$ ) dan dosis pupuk P ( $R^2 = 0,20$ ) (Lampiran 4). Sementara itu, pada tanah yang tidak ditanami jagung, nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah juga cenderung meningkat secara linier dengan meningkatnya dosis ATB-KA ( $R^2 = 0,95$  (TMN) dan  $R^2 = 0,57$  ( $\Delta\text{pH}$ )) dan dosis pupuk P ( $R^2 = 0,02$  (TMN) dan  $R^2 = 0,22$  ( $\Delta\text{pH}$ )) (Lampiran 6). Hasil ini menunjukkan bahwa baik ATB-KA maupun pupuk P berperan dalam mempengaruhi nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah dan terdapat kecenderungan bahwa ATB-KA memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap perubahan nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah dibanding pupuk P.

Perubahan pH tanah akibat perlakuan yang diterapkan menyebabkan terjadinya perubahan nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah. Nilai pH tanah mempunyai hubungan positif sangat erat dengan nilai TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ), baik pada percobaan dengan tanaman jagung ( $r = 0,97^{**}$  (TMN) dan  $r = 0,80^{**}$  ( $\Delta\text{pH}$ ),  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = 0,98^{**}$  dan  $r = 0,75^{**}$  ( $\Delta\text{pH}$ ),  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Pada tanah yang didominasi oleh muatan terubahkan seperti Ultisol, perubahan pH menyebabkan terjadinya perubahan nilai TMN tanah (Uehara dan Gilman, 1981; Shamshuddin dan Anda, 2008).

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai pH dan TMN tanah meningkat secara linier dengan meningkatnya dosis ATB-KA, baik pada percobaan dengan tanaman jagung maupun tidak ditanami jagung. Terdapat kecenderungan bahwa nilai TMN menjadi semakin lebih rendah dari nilai pH atau  $\Delta\text{pH}$  menjadi lebih besar dengan meningkatnya dosis ATB-KA yang diberikan. Hal ini mencerminkan terjadinya peningkatan muatan negatif tanah. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa muatan negatif tanah cenderung meningkat secara linier dengan meningkatnya dosis ATB-KA yang diberikan. Sposito (2008) mengemukakan bahwa nilai TMN yang lebih rendah dari pH aktualnya mencirikan besarnya muatan negatif pada permukaan koloid tanah. Peningkatan muatan negatif tanah ini selanjutnya juga memberikan pengaruh terhadap peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) tanah (Gambar 4.10). Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA cukup efektif dalam meningkatkan muatan negatif dan KTK tanah serta menurunkan TMN tanah menjadi lebih rendah dari pH aktualnya.



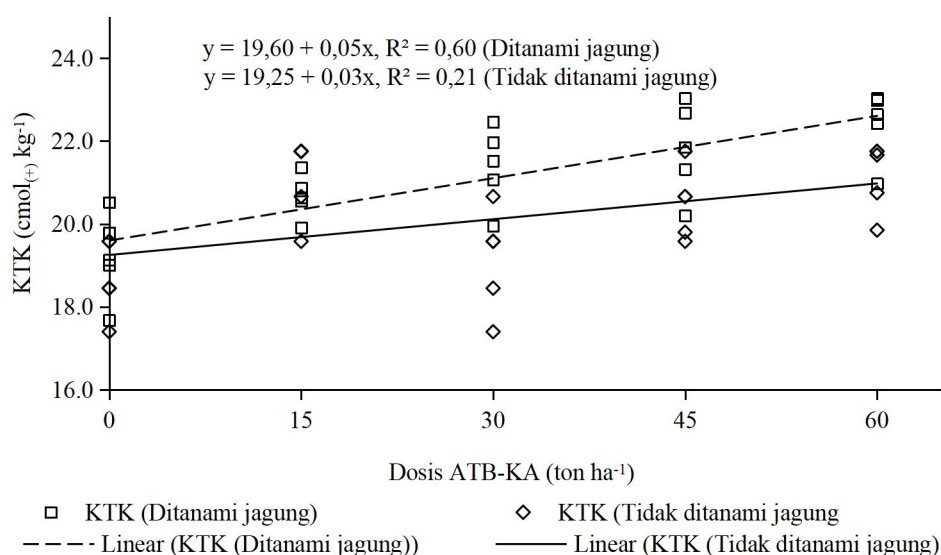
Gambar 4.8. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan pH H<sub>2</sub>O dan TMN tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung



Gambar 4.9. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung

Hasil uji BNJ (Tabel 4.6) menunjukkan bahwa diantara kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 45 dan 60 ton ha<sup>-1</sup> pada setiap perlakuan dosis pupuk P mempunyai nilai TMN yang tidak berbeda nyata, dan mempunyai nilai TMN yang nyata lebih tinggi dibandingkan dengan nilai TMN pada kombinasi

perlakuan yang lain. Sementara itu, Tabel 4.7 menunjukkan bahwa muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada tanah yang ditanami jagung dengan perlakuan kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 30 ton  $\text{ha}^{-1}$  dan pupuk P dosis 174 kg  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  berbeda tidak nyata dibandingkan dengan nilai muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada semua kombinasi perlakuan yang lain, dan nyata lebih tinggi dibandingkan dengan nilai muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 15 ton  $\text{ha}^{-1}$  dan pupuk P dosis 0 dan 87 kg  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , serta nyata lebih tinggi dibandingkan dengan nilai muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) pada kombinasi perlakuan tanpa ATB-KA dan pupuk P dosis 0, 87, 261 dan 348 kg  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .



Gambar 4.10. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan kapasitas tukar kation (KTK) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung

Abu terbang batubara dan kotoran ayam, masing-masing berpotensi untuk meningkatkan muatan negatif tanah. Anion-anion yang berasal dari gugus fungsional senyawa organik (Ano dan Ubochi, 2007; Jones et al., 2009; Sukla *et al.*, 2011) serta disosiasi aluminosilikat dan oksida-oksida basa pada abu terbang batubara (Browsers dan Van Eijk, 2003; Yunusa *et al.*, 2006) diduga berperan dalam meningkatkan muatan negatif dan menurunkan TMN tanah menjadi lebih rendah dari pH aktualnya. Disamping itu, bahan organik dari kotoran ayam pada

campuran ATB-KA juga memberikan pengaruh terhadap status TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah. Hal ini ditunjukkan dengan adanya hubungan positif yang sangat erat ( $P < 0,01$ ) antara kandungan C-organik tanah dengan status TMN dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah, baik pada percobaan dengan ditanami maupun pada percobaan yang tidak ditanami jagung (Lampiran 4 dan Lampiran 6).

Tabel 4.6. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap titik muatan nol (TMN) tanah

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Tidak ditanami jagung					
0	3,90	3,85	3,72	3,72	3,74
15	4,21	4,42	4,35	4,45	4,30
30	5,50	5,27	5,15	4,95	4,93
45	6,15	6,12	5,61	5,68	5,60
60	6,75	6,39	6,20	6,07	6,03
Ditanami jagung					
0	4,00 ab	3,97 a	3,83 a	3,82 a	3,81 a
15	4,70 c	4,63 c	4,68 c	4,65 c	4,61 bc
30	5,57 e-h	5,41 dg	4,86 cd	5,15 c-f	5,04 cde
45	6,33 ij	6,02 g-j	5,99 g-j	5,85 ghi	5,72 f-i
60	6,49 j	6,12 hij	6,09 hij	6,05 hij	5,92 g-j

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 0,62

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata ( $P < 0,05$ )

Nilai pH dan TMN tanah (Gambar 4.8), muatan negatif tanah (Gambar 4.9) dan KTK tanah (Gambar 4.10) pada tanah yang ditanami jagung cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan nilai pH dan TMN, muatan negatif dan KTK pada tanah yang tidak ditanami jagung. Hal ini diduga disebabkan karena kandungan C-organik tanah yang lebih tinggi pada tanah yang ditanami jagung (Gambar 4.11). Kondisi ini menunjukkan terjadinya peningkatan siklus C yang lebih tinggi pada tanah yang ditanami jagung dibanding pada tanah yang tidak ditanami jagung. C-organik tanah diketahui mempunyai peranan dan pengaruh yang besar terhadap peningkatan pH dan muatan negatif tanah (Jones *et al.*, 2009; Sukla *et al.*,

2011) dan penurunan nilai TMN tanah menjadi lebih rendah dari pH aktualnya (Sakurai *et al.*, 1991).

Tabel 4.7. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$  (pH H<sub>2</sub>O – TMN)) tanah

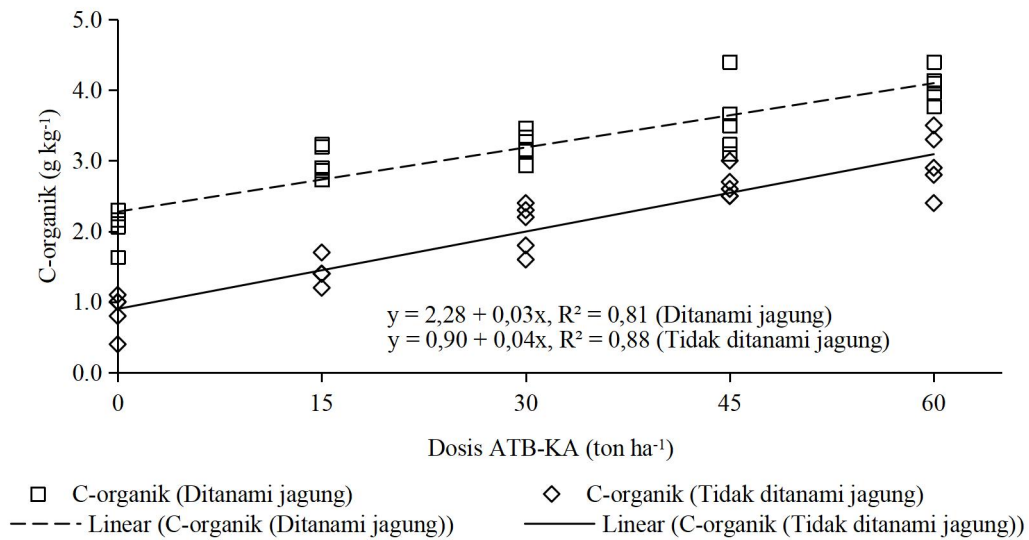
Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Tidak ditanami jagung					
0	0,23	0,25	0,27	0,26	0,25
15	0,36	0,31	0,44	0,28	0,54
30	0,38	0,38	0,61	0,70	0,77
45	0,29	0,36	0,81	0,83	0,90
60	0,65	0,66	0,67	0,90	0,85
Ditanami jagung					
0	0,27 a	0,33 ab	0,51 a-f	0,43 a-d	0,42 a-d
15	0,41 abc	0,47 a-e	0,52 a-f	0,58 a-f	0,68 a-f
30	0,49 a-f	0,91 a-f	1,28 f	1,22 def	1,26 ef
45	0,66 a-f	1,07 a-f	1,02 a-f	1,09 b-f	1,18 def
60	0,70 a-f	0,99 a-f	1,16 c-f	1,17 c-f	1,29 f

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 0,80

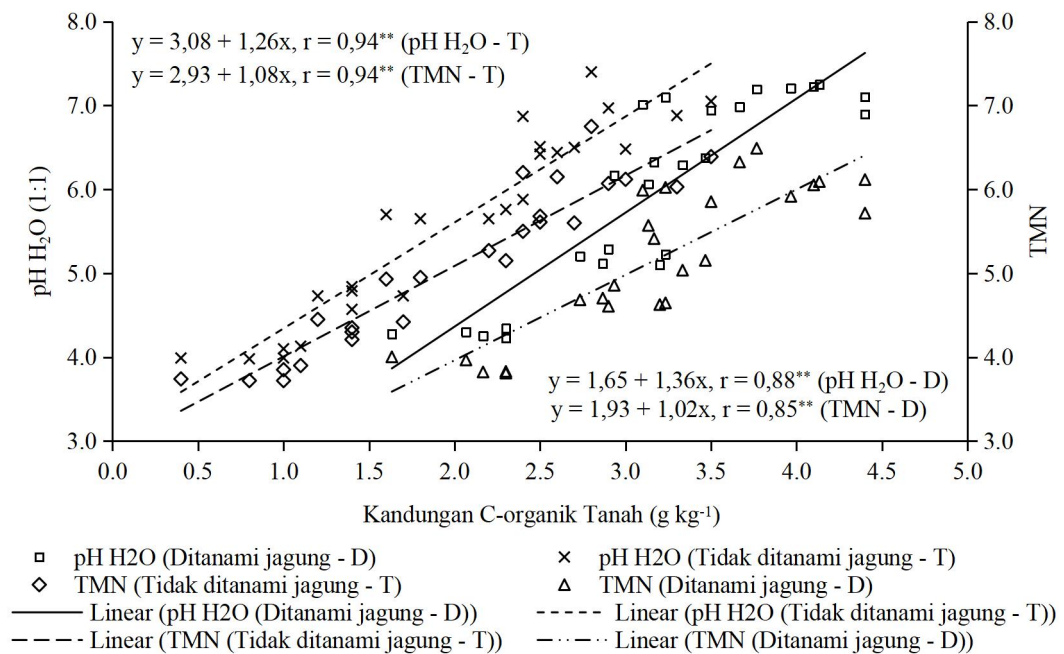
Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P < 0,05)

Sistem perakaran tanaman (rizosfer) diketahui berperan penting dalam siklus bahan organik di dalam tanah (Hinsinger *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2013). Hasil penelitian mengungkapkan bahwa sekitar 20% (Nguyen, 2003) atau berkisar 10-50% (Hinsinger *et al.*, 2005) karbon yang diasimilasi melalui fotosintesis dilepas melalui akar tanaman ke tanah sebagai rizodeposit. Rizodeposit ini merupakan komponen penting dalam siklus C di dalam tanah (Jones *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2013). Selama pertumbuhan, akar tanaman melepaskan sejumlah karbon (C) organik ke dalam rizosfer berupa senyawa organik seperti asam organik, gula, asam amino, dan senyawa fenolat melalui sekresi bebas dan berupa mucigel yang berfungsi melindungi akar dan untuk memperbaiki kontak akar dengan tanah (Jones *et al.*, 2009; Sukla *et al.*, 2011). Berbagai senyawa organik yang dilepas oleh akar tanaman ini merupakan sumber C utama bagi mikroorganisme, sehingga aktifitas mikroorganisme di sekitar perakaran tanaman menjadi lebih tinggi dan secara tidak langsung akan memberikan

kontribusi terhadap peningkatan kandungan C-organik tanah (Jones *et al.*, 2009; Kuzyakov, 2010).

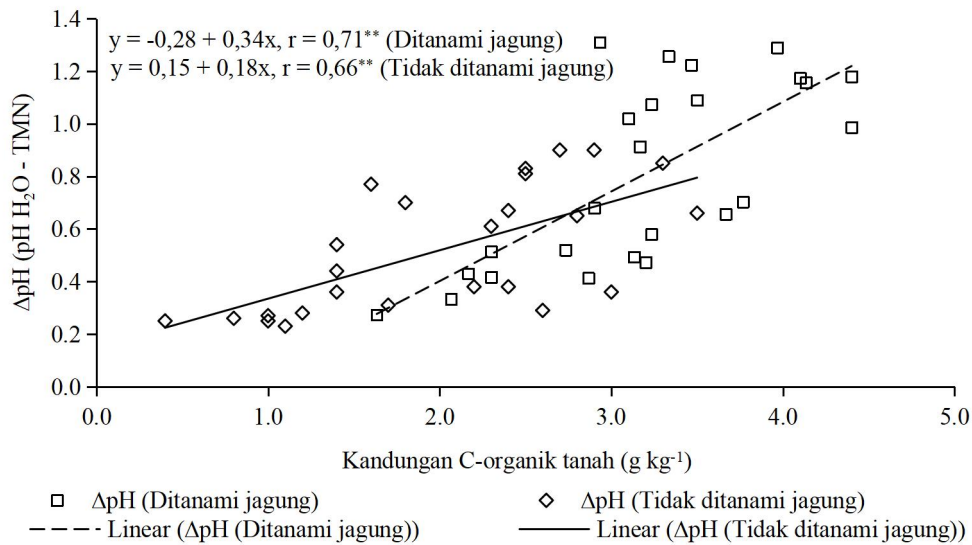


Gambar 4.11. Hubungan antara dosis ATB-KA dengan kandungan C-organik tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung

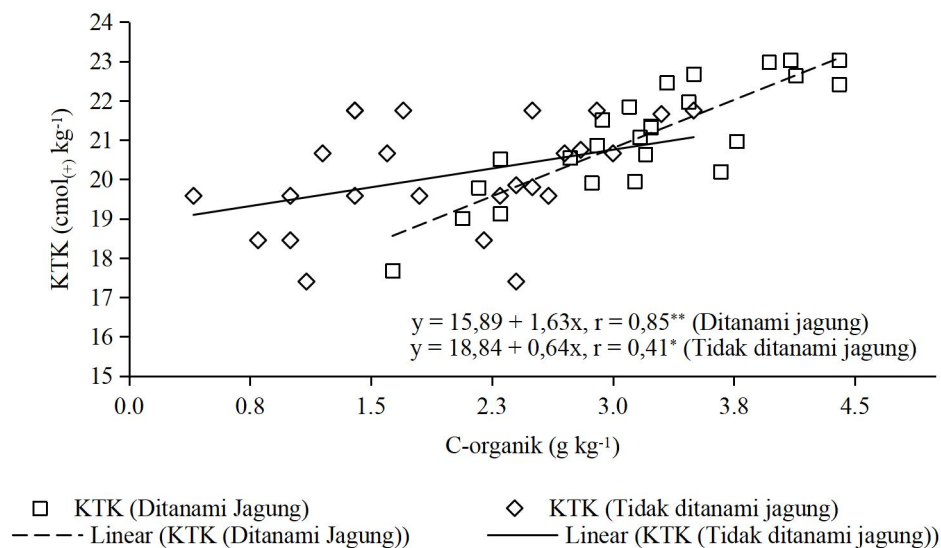


Gambar 4.12. Hubungan antara kandungan C-organik tanah dengan pH H<sub>2</sub>O dan TMN pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung





Gambar 4.13. Hubungan antara kandungan C-organik dan muatan negatif ( $\Delta\text{pH}$ ) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung



Gambar 4.14. Hubungan antara kandungan C-organik dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai pH dan TMN tanah mempunyai hubungan linier dan positif sangat erat dengan kandungan C-organik tanah, demikian juga dengan muatan negatif tanah (Gambar 4.13) dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah (Gambar 4.14). Peningkatan pH, muatan negatif dan KTK

tanah ini dapat terjadi melalui reaksi netralisasi muatan positif tanah oleh gugus fungsional asam organik. Asam-asam organik dengan gugus fungsional yang sangat reaktif berperanan penting dalam meningkatkan pH dan muatan negatif tanah (Ano dan Ubochi, 2007; Kuzyakov, 2010).

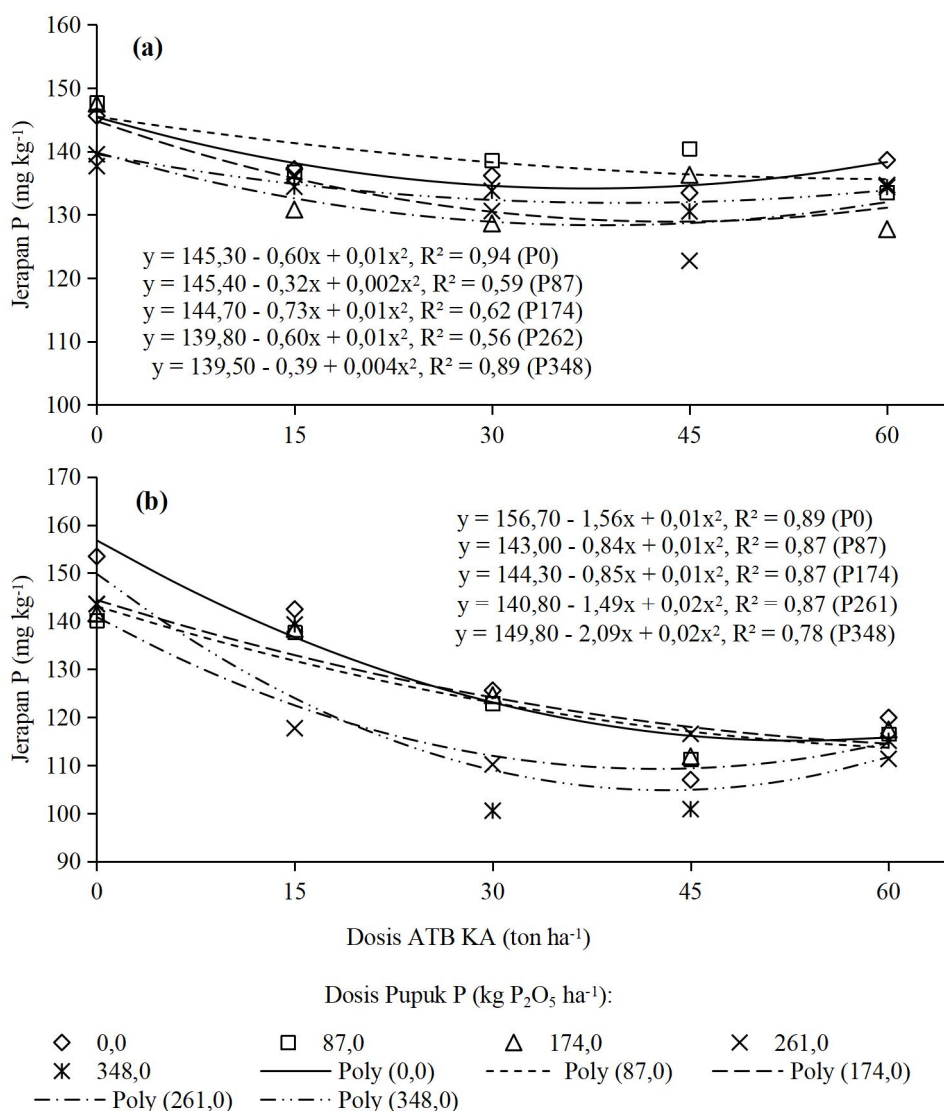
Meningkatnya pH tanah dengan meningkatnya kandungan C-organik tanah akibat perlakuan yang diterapkan dapat terjadi antara lain melalui mekanisme deprotonasi gugus fungsional asam organik yang menghasilkan muatan negatif, atau terlepasnya ikatan Al atau Fe dari permukaan oksida dan hidroksida logam dan membentuk kompleks dengan asam organik atau ion  $Al^{3+}$  akan bereaksi dengan ion  $OH^-$  membentuk senyawa  $Al(OH)_3$  yang mengendap. sehingga muncul tapak jerapan baru pada kompleks koloid (Tan, 1998; Ano dan Obuchi, 2007). Stevenson (1994) dan Uehara dan Gillman (1981) mengemukakan bahwa peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) tanah dapat terjadi akibat terbukanya muatan negatif yang semula berikatan dengan kation seperti Al atau Fe atau melalui peningkatan muatan negatif tanah akibat deprotonasi gugus permukaan oksida dan hidroksida logam dan pada tepi patahan mineral liat, serta deprotonasi gugus fungsional pada bahan organik tanah.

#### **4.4. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara-Kotoran Ayam terhadap Jerapan P dan P-tersedia Tanah**

##### **4.4.1. Jerapan P Tanah**

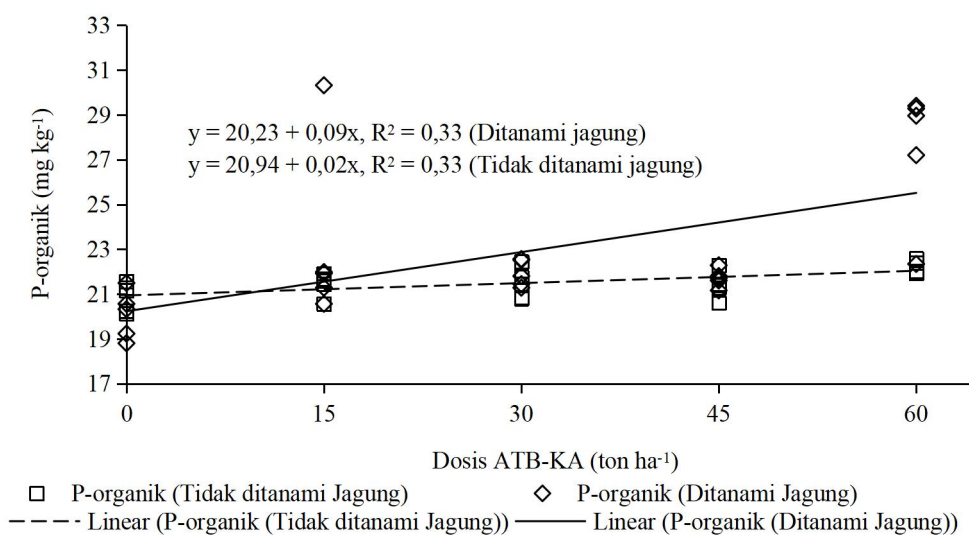
Jerapan P tanah cenderung menurun secara linier dan sangat erat dengan meningkatnya dosis ATB-KA, baik pada tanah yang ditanami (Lampiran 4) maupun pada tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6), masing-masing dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,30 ( $r = -0,55^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) dan 0,62 ( $r = -0,79^{**}$ ,  $P < 0,01$ ). Sementara itu perlakuan dosis pupuk P juga mempunyai hubungan linier yang negatif, tetapi tidak erat dengan penurunan jerapan P tanah, baik pada tanah yang ditanami (Lampiran 4) maupun pada tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6), masing-masing dengan nilai koefisien korelasi ( $r$ ) sebesar  $-0,36^{in}$  dan  $-0,24^{in}$  ( $P > 0,05$ ). Meningkatnya pH tanah dan menurunnya TMN tanah menjadi lebih rendah dari pH aktualnya (Gambar 4.8),

serta meningkatnya muatan negatif tanah (Gambar 4.9) diduga menjadi penyebab menurunnya jerapan P tanah. Hal ini juga ditunjukkan dengan adanya hubungan negatif yang sangat erat antara jerapan P tanah dengan pH H<sub>2</sub>O, TMN, dan muatan negatif tanah, masing-masing dengan nilai r sebesar -0,59\*\*, -0,51\*\*, dan -0,63\*\* (P < 0,01) pada tanah yang ditanami jagung (Lampiran 4), dan sebesar -0,85\*\*, -0,79\*\*, dan -0,85\*\* (P < 0,01) pada tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6).

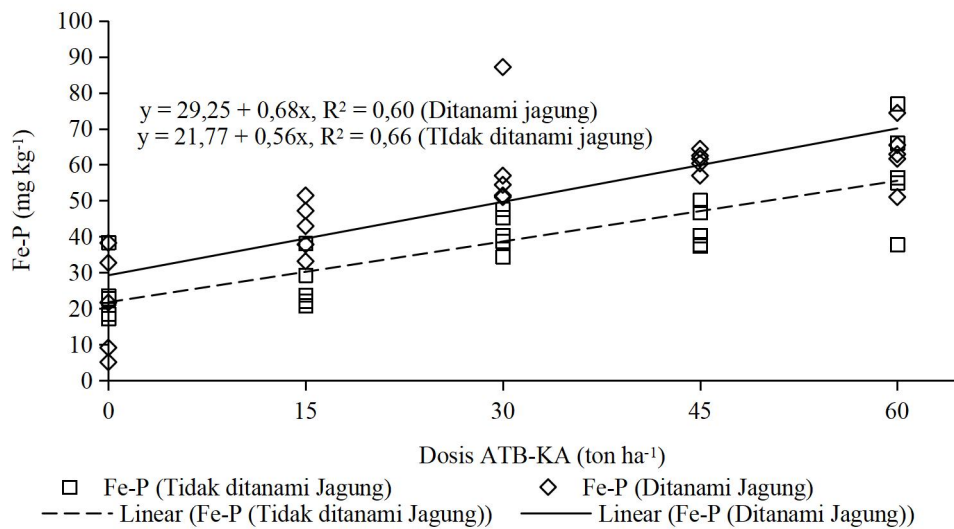


Gambar 4.15. Hubungan antara dosis ATB-KA dan jerapan P tanah pada berbagai dosis pupuk P ((a) tidak ditanami jagung; (b) ditanami jagung)

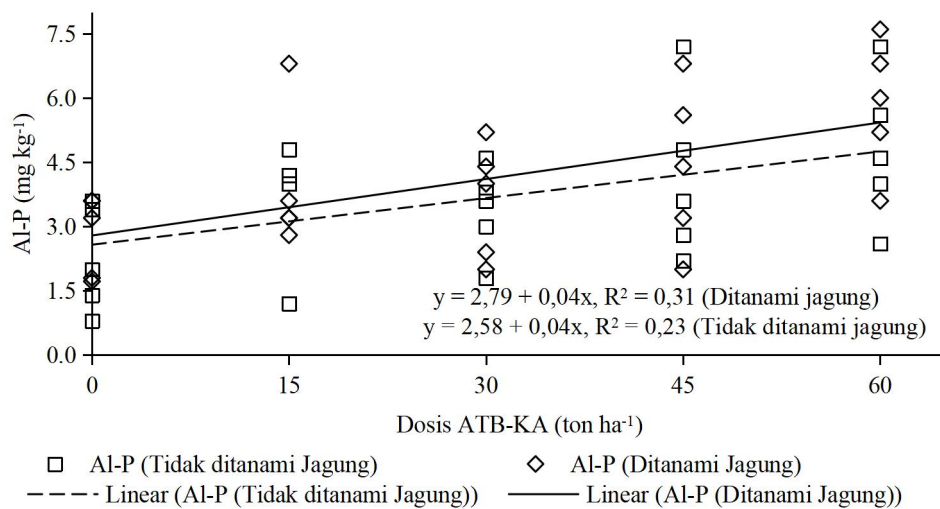
Gambar 4.15 menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA pada setiap dosis pupuk P mempunyai bentuk hubungan kuadrat yang negatif dengan jerapan P tanah, baik pada percobaan tanpa tanaman jagung maupun dengan tanaman jagung. Terdapat kecenderungan bahwa meningkatnya dosis pupuk P dan meningkatnya dosis ATB-KA hingga dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> cenderung menurunkan jerapan P tanah. Koloid liat maupun organik yang bermuatan negatif juga dapat menyerap P melalui mekanisme reaksi pertukaran ligan atau jembatan kation (*cation bridging*) (Sollins, 1991; Tan, 1998; Djuniwati *et al.*, 2012). Mekanisme reaksi ini diduga menyebabkan jerapan P tanah cenderung tidak menurun pada dosis campuran ATB-KA yang lebih tinggi. Pada percobaan yang tidak ditanami jagung, jerapan P terendah sebesar 127,07 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,21 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, dan pada percobaan yang ditanami jagung, jerapan P terendah sebesar 108,33 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,71 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Gambar 4.15).



Gambar 4.16. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan P-organik tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung



Gambar 4.17. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan Fe-P tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung



Gambar 4.18. Hubungan antara dosis ATB-KA dan kandungan Al-P tanah pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa jerapan P pada tanah yang ditanami jagung cenderung lebih rendah dibandingkan dengan jerapan P pada tanah yang tidak ditanami jagung. Hal ini antara lain dapat disebabkan oleh muatan negatif pada tanah yang ditanami jagung cenderung lebih tinggi dibanding muatan negatif pada tanah yang tidak ditanami jagung (Gambar 4.9). Selain itu, jerapan P yang

lebih rendah ini dapat disebabkan karena kompleks jerapan telah dijenuhi oleh P. Hal ini ditunjukkan oleh kandungan P-organik (Gambar 4.16), Fe-P (Gambar 4.17), dan Al-P (Gambar 4.18) pada tanah yang ditanami jagung cenderung lebih tinggi dibanding kandungan P-organik, Fe-P, dan Al-P pada tanah yang tidak ditanami jagung.

Kandungan P-organik tanah dipengaruhi dan mempunyai hubungan positif sangat erat dengan dosis ATB-KA, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,57^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = 0,56^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Sementara itu, dosis pupuk P berhubungan positif dan erat dengan kandungan P-organik tanah, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,41^*$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = 0,47^*$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6).

Peningkatan kandungan P-organik tanah ini antara lain disebabkan oleh meningkatnya kandungan C-organik tanah akibat perlakuan yang diterapkan. P-organik tanah mempunyai hubungan positif yang erat dengan kandungan C-organik tanah, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,44^*$ ,  $P < 0,05$ ) (Lampiran 4), maupun pada tanah yang tidak ditanami jagung ( $r = 0,41^*$ ,  $P < 0,05$ ) (Lampiran 6). Meningkatnya ketersediaan sumber energi bagi mikroorganisme akan memacu pertumbuhan dan aktivitasnya, sehingga kandungan P-organik tanah meningkat. Unsur P dibutuhkan mikroorganisme dalam pembentukan fosfolipid sebagai komponen penting membran sel berbagai organisme (Stevenson, 1994; Tan, 2003).

Dosis ATB-KA mempunyai hubungan positif sangat erat dengan kandungan Fe-P tanah, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,77^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = 0,81^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Dosis ATB-KA mempunyai hubungan positif sangat erat dengan kandungan Al-P tanah, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,56^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = 0,48^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Dosis pupuk P berhubungan positif tidak erat dengan kandungan Fe-P dan Al-P tanah pada tanah yang ditanami jagung ( $r = 0,24^m$  dan  $r = 37^m$ ,  $P > 0,01$ ) (Lampiran 4), tetapi mempunyai hubungan positif yang erat dengan kandungan Fe-P tanah ( $r = 0,45^*$ ,  $P < 0,01$ ) dan sangat erat dengan kandungan Al-P tanah ( $r = 0,71^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) pada

tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6). Kandungan Fe-P dan Al-P tanah ini mempunyai hubungan negatif yang erat dengan kandungan Fe-dd dan Al-dd tanah, baik pada tanah yang ditanami jagung ( $r = -0,59^{**}$  dan  $r = -0,46^*$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4), maupun tidak ditanami jagung ( $r = -0,87^{**}$  dan  $r = -0,44^*$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Hasil ini menunjukkan terjadinya penetralan sumber kemasaman di dalam tanah, sehingga pH tanah menjadi meningkat (Tabel 4.4) dan berpengaruh terhadap peningkatan muatan negatif tanah (Tabel 4.7).

Peningkatan kandungan P-organik, Fe-P, dan Al-P tanah akibat perlakuan yang diterapkan menunjukkan terjadinya penjenruhan P di dalam tanah, dan selanjutnya jerapan P tanah menjadi menurun. Bentuk-bentuk P-organik, Fe-P, dan Al-P, merupakan bentuk-bentuk P yang terjerap yang tidak tersedia bagi tanaman dan berada dalam kesetimbangan dengan P larut. Oleh karena itu, bentuk-bentuk ikatan P ini merupakan sumber P cadangan di dalam tanah dan akan tersedia bagi tanaman (Havlin *et al.*, 1999; Nursyamsi *et al.*, 2011).

#### 4.4.2. P-tersedia Tanah

Data hasil analisis kandungan P-tersedia tanah akibat pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P pada percobaan dengan ditanami dan tidak ditanami jagung disajikan pada Lampiran 3 dan Lampiran 5. Berdasarkan hasil analisis keragaman terhadap data kandungan P-tersedia tanah yang ditanami jagung (Lampiran 3) diketahui bahwa perlakuan dosis campuran ATB-KA, perlakuan dosis pupuk P, serta interaksi keduanya berpengaruh sangat nyata terhadap kandungan P-tersedia tanah ( $P < 0,01$ ). Perlakuan dosis ATB-KA mempunyai hubungan linier yang positif dan sangat erat dengan peningkatan kandungan P-tersedia tanah, baik pada tanah yang ditanami (Lampiran 4) maupun pada tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6), masing-masing dengan nilai koefisien korelasi ( $r$ ) sebesar  $0,71^{**}$  dan  $0,85^{**}$  ( $P < 0,01$ ). Sementara itu perlakuan dosis pupuk P juga mempunyai hubungan linier positif tetapi tidak erat dengan peningkatan P-tersedia tanah pada percobaan dengan tanaman jagung ( $r = 0,33^{tn}$ ,  $P > 0,05$ ) (Lampiran 4) dan mempunyai hubungan positif erat pada tanah yang tidak ditanami jagung ( $r = 0,42^*$ ,  $P < 0,05$ ) (Lampiran 6).

Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian ATB-KA dapat meningkatkan ketersediaan P tanah yang antara lain disebabkan oleh penurunan jerapan P tanah. P-tersedia tanah mempunyai hubungan negatif yang sangat erat dengan jerapan P tanah, baik pada percobaan dengan tanaman jagung ( $r = -0,80^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 4) maupun pada tanah yang tidak ditanami jagung ( $r = -0,68^{**}$ ,  $P < 0,01$ ) (Lampiran 6). Selain itu, kandungan P-tersedia tanah mempunyai hubungan positif sangat erat dengan pH H<sub>2</sub>O, TMN, dan muatan negatif ( $\Delta$ pH) tanah, dengan nilai r berturut-turut sebesar  $0,81^{**}$ ,  $0,73^{**}$ , dan  $0,77^{**}$ , ( $P < 0,01$ ) pada percobaan dengan tanaman jagung (Lampiran 4), dan berturut-turut sebesar  $0,85^{**}$ ,  $0,79^{**}$ , dan  $0,85^{**}$ , ( $P < 0,01$ ) pada tanah yang tidak ditanami jagung (Lampiran 6).

Tabel 4.8. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap kandungan P-tersedia ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) tanah

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Tidak ditanami jagung					
0	3,75	14,40	24,75	29,55	48,60
15	26,40	38,85	64,80	72,45	79,80
30	54,00	70,50	79,80	89,25	94,95
45	72,45	83,40	94,20	105,30	107,40
60	80,60	91,50	98,25	106,50	97,95
Ditanami jagung					
0	5,57 a	13,18 ab	21,45 abc	24,05 a-d	51,25 d-h
15	34,20 b-e	48,45 c-g	39,95 b-f	63,60 f-k	84,50 i-m
30	61,50 e-j	78,88 h-l	73,25 g-l	92,60 lm	89,20 j-m
45	83,80 i-m	85,40 im	91,40 klm	110,90 m	83,10 i-m
60	74,10 g-l	79,80 h-l	60,37 e-i	70,70 g-l	79,90 i-l

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 28,57

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata ( $P < 0,05$ )

Hasil uji BNJ rerata data P-tersedia tanah pada percobaan yang ditanami jagung (Tabel 4.8) menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 30 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> mempunyai kandungan P-tersedia yang berbeda tidak nyata dibandingkan dengan kandungan P-tersedia pada perlakuan ATB-KA dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan semua dosis

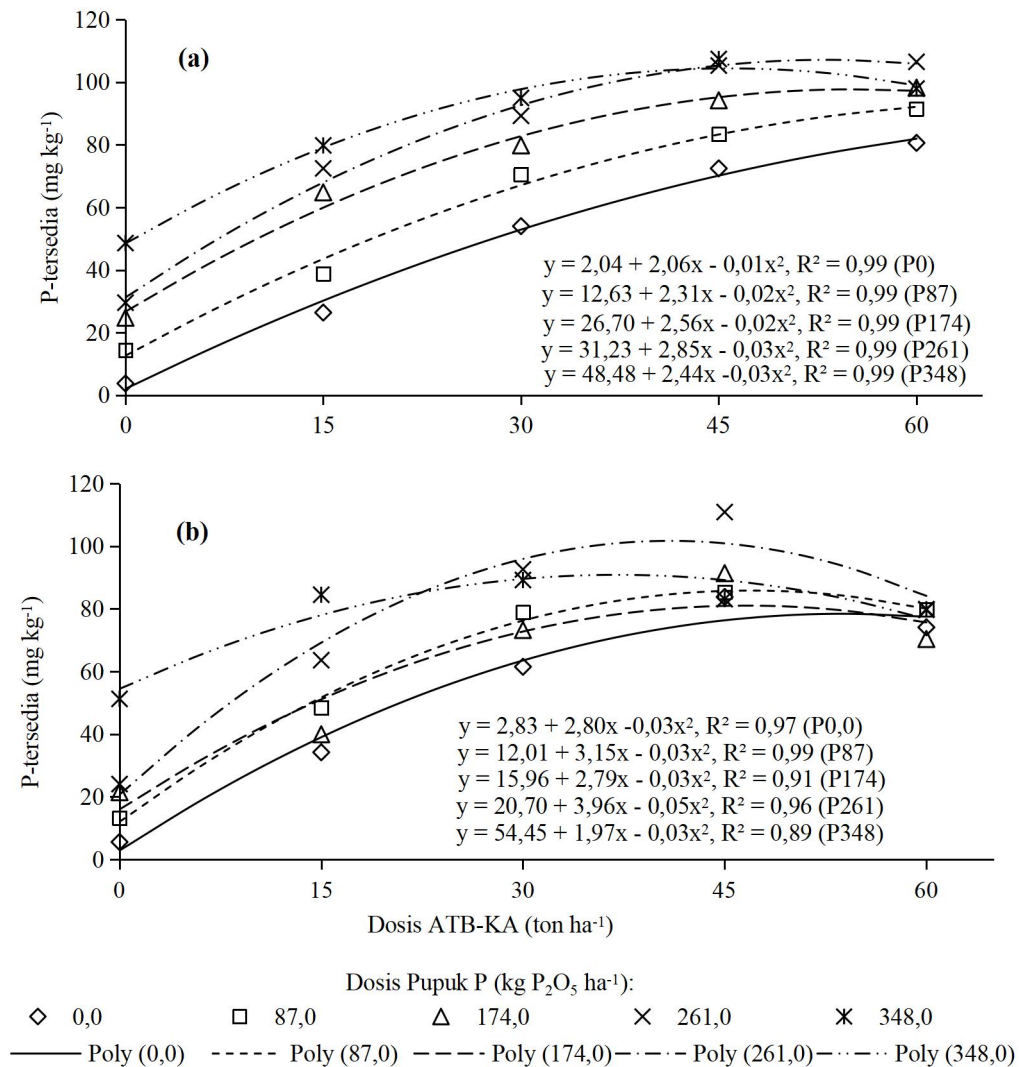


pupuk P, berbeda tidak nyata dibandingkan dengan kandungan P-tersedia pada perlakuan ATB-KA dosis 15, dan 30 ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 348 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, tetapi nyata lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan P-tersedia tanah pada kombinasi perlakuan yang lain. Selain itu, terdapat kecenderungan bahwa diantara perlakuan ATB-KA dosis 30-60 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 87-348 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> mempunyai kandungan P-tersedia tanah yang tidak berbeda secara nyata. Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian ATB-KA dapat meningkatkan kandungan P-tersedia tanah.

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA pada setiap dosis pupuk P mempunyai bentuk hubungan kuadratik yang positif dengan kandungan P-tersedia tanah, baik pada percobaan tanpa tanaman jagung maupun dengan tanaman jagung. Pemberian kombinasi campuran ATB-KA dan pupuk P hingga dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> dan dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> cenderung meningkatkan kandungan P-tersedia tanah. Pada percobaan yang tidak ditanami jagung, kandungan P-tersedia maksimum sebesar 105,54 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,21 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, dan pada percobaan yang ditanami jagung, kandungan P-tersedia maksimum sebesar 102,21 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,71 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Gambar 4.19).

Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dapat meningkatkan ketersediaan P tanah melalui penurunan jerapan P tanah akibat meningkatnya muatan negatif tanah. Hidrolisis senyawa oksida seperti CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, serta senyawa silanol (Si-OH) pada abu terbang batubara yang menghasilkan muatan negatif (Brouwers dan Van Eijk, 2003) dapat menetralkan muatan positif pada permukaan koloid tanah sehingga jerapan P tanah menjadi berkurang dan P-tersedia menjadi meningkat. Penurunan jerapan P dan peningkatan P-tersedia dengan pemberian bahan organik disebabkan oleh terbentuknya senyawa kompleks organo-metal antara asam organik dengan ion logam seperti Al, Fe dan Mn yang menjerap P atau dapat pula disebabkan oleh proses pertukaran anion atau terjadinya kompetisi antara asam

organik dengan P dalam memperebutkan tapak pertukaran (Djuniwati *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013).



Gambar 4.19. Hubungan antara dosis ATB-KA dan P-tersedia tanah pada berbagai dosis pupuk P ((a) tidak ditanami jagung; (b) ditanami jagung)

Peningkatan P-tersedia dapat terjadi melalui mineralisasi P dari senyawa organik (kotoran ayam) dan dari abu terbang batubara (Tan, 2003; Arivazhagan *et al.*, 2011), atau pelepasan P dari kompleks jerapan oleh adanya perbaikan kondisi fisiko-kimia tanah, seperti meningkatnya pH tanah (Ano dan Abuchi, 2007; Shen

*et al.*, 2011), menurunnya nilai TMN tanah (Uehara dan Gillman, 1981; Shamshuddin dan Anda, 2008), dan menurunnya jerapan P tanah (Nguyen *et al.*, 2010; Marsi dan Sabaruddin, 2011). Selain itu, pemberian pupuk P selain dapat berpengaruh langsung dalam meningkatkan P-tersedia tanah, juga dapat berpengaruh terhadap jerapan P melalui pelepasan ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) dari pupuk yang dapat bersenyawa dengan kation Al dan Fe atau melalui mekanisme jerapan  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  oleh hidrus oksida Al dan Fe (Tan, 1998; Havlin *et al.*, 1999). Penjenuhan tapak jerapan oleh P ini selanjutnya akan menurunkan jerapan P dan meningkatkan ketersediaan P dalam larutan tanah.

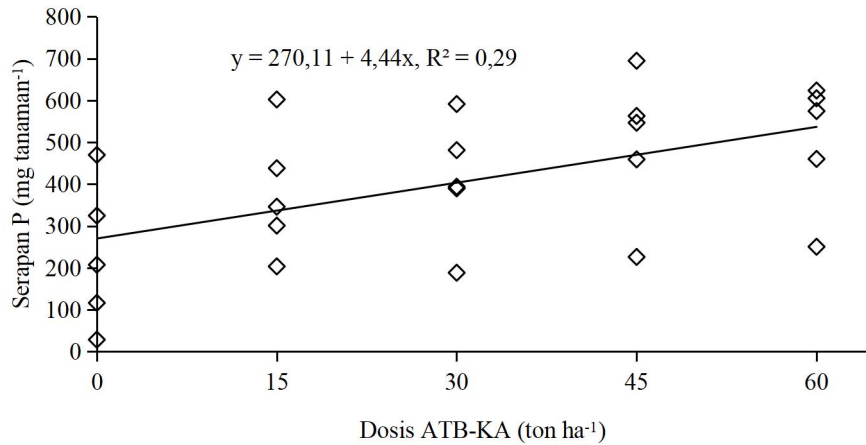
#### **4.5. Pengaruh Pemberian Campuran Abu Terbang Batubara-Kotoran Ayam Terhadap Serapan P dan Efisiensi P Tanaman Jagung**

##### **4.5.1. Serapan P Tanaman**

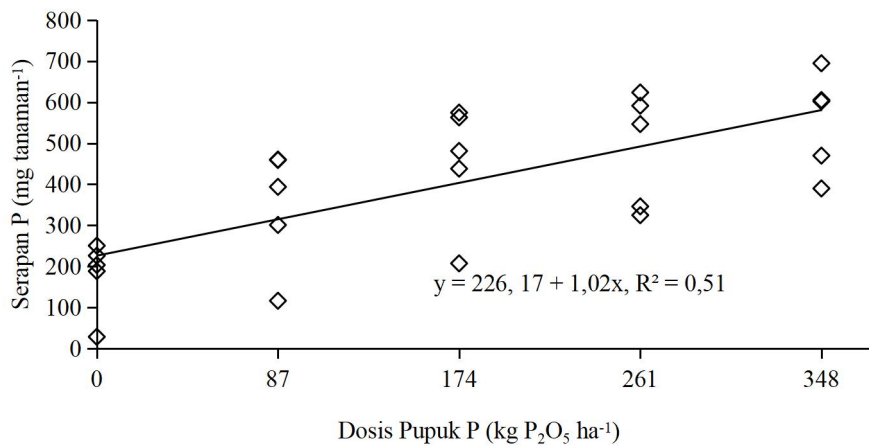
Data dan hasil analisis keragaman serapan P tanaman jagung fase anthesis pada setiap kombinasi perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan dosis pupuk P disajikan pada Lampiran 5. Hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam, dosis pupuk P, dan interaksi keduanya berpengaruh sangat nyata terhadap serapan P tanaman jagung pada fase anthesis (Lampiran 7). Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 juga menunjukkan bahwa peningkatan dosis ATB-KA dan dosis pupuk P cenderung meningkatkan serapan P tanaman. Dengan demikian, peningkatan ketersediaan P tanah (Tabel 4.8) melalui penurunan jerapan P (Gambar 4.15) yang disebabkan oleh meningkatnya muatan negatif (Tabel 4.7) dan penurunan TMN (Tabel 4.6) tanah akibat perlakuan yang diterapkan dan selanjutnya dapat meningkatkan serapan P tanaman jagung.

Tabel 4.9 menunjukkan bahwa serapan P tanaman jagung pada kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 45 ton  $\text{ha}^{-1}$  dan pupuk P dosis 348 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{ha}^{-1}$  berbeda tidak nyata dibandingkan dengan serapan P tanaman pada perlakuan ATB-KA dosis 45 ton  $\text{ha}^{-1}$  yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 174 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{ha}^{-1}$  dan dosis 261 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{ha}^{-1}$ , serta berbeda tidak nyata dibandingkan dengan serapan P tanaman pada perlakuan ATB-KA dosis 60 ton  $\text{ha}^{-1}$  yang dikombinasikan dengan

pupuk P dosis 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> dan 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, tetapi nyata lebih tinggi dibandingkan dengan serapan P tanaman pada kombinasi perlakuan yang lain.



Gambar 4.20. Hubungan antara dosis ATB-KA dan serapan P tanaman jagung



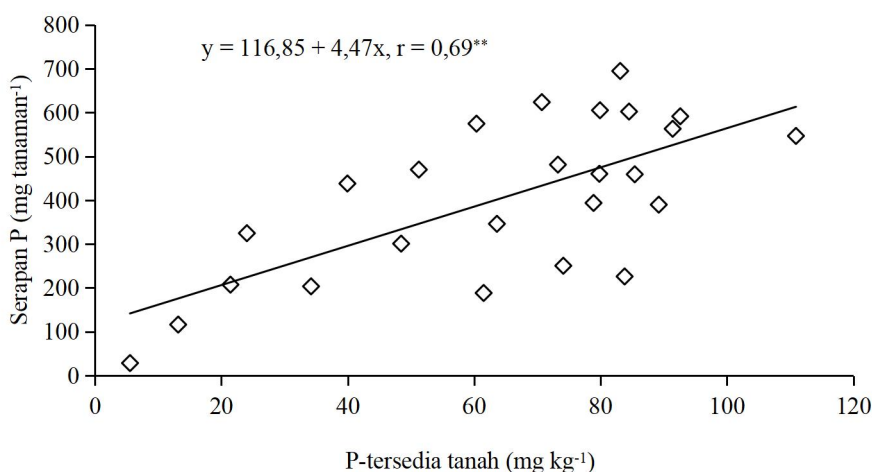
Gambar 4.21. Hubungan antara dosis Pupuk P dan serapan P tanaman jagung

Tabel 4.9. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap serapan P tanaman jagung pada fase anthesis (mg tanaman<sup>-1</sup>)

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
0	28,5 a	116,3 ab	207,5 abc	324,8 b-e	469,8 e-i
15	203,5 abc	300,9 b-e	438,1 d-i	346,1 c-f	602,2 hij
30	188,4 abc	393,8 c-h	481,2 e-i	591,3 g-j	389,9 c-g
45	226,1 abc	459,1 d-i	562,9 g-j	546,6 f-j	694,7 j
60	250,5 bcd	460,2 e-i	574,6 g-j	623,7 ij	605,1 ij

BNJ<sub>(0,05)</sub> = 209,7

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P &lt; 0,05)



Gambar 4.22. Hubungan antara kandungan P-tersedia tanah dan serapan P tanaman jagung

Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian ATB-KA dosis 45 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pemupukan P dosis 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> mempunyai serapan P yang berbeda tidak nyata dibandingkan dengan serapan P pada kombinasi perlakuan dosis ATB-KA dan dosis pupuk P yang lebih tinggi. Penurunan jerapan P dan peningkatan ketersediaan P tanah akibat pemberian campuran ATB-KA (Gambar 4.15 dan Gambar 4.19) menyebabkan serapan P tanaman menjadi meningkat. Serapan P tanaman mempunyai hubungan negatif sangat erat dengan jerapan P ( $r = -0,67^{**}$ ,  $P < 0,01$ ), dan mempunyai hubungan positif sangat erat dengan P-tersedia tanah ( $r = 0,69^{**}$ ,  $P < 0,01$ ). Gambar 4.22 menunjukkan bahwa meningkatnya P-tersedia tanah cenderung meningkatkan serapan P tanaman

jagung. Havlin *et al.* (1999) mengemukakan bahwa serapan P tanaman sangat dipengaruhi oleh ketersediaannya di dalam tanah. Beberapa hasil penelitian juga menunjukkan adanya peningkatan serapan P tanaman jagung seiring dengan meningkatnya ketersediaan P tanah akibat penambahan pupuk organik dan pupuk P (Mahbub, 2004; Darman, 2008). P berperan dalam penyusunan fosfolipid, inti sel dan protein serta sebagai sumber energi untuk proses-proses metabolisme tanaman (Marschner, 1990). Meningkatnya serapan P tanaman akan meningkatkan pembentukan biomasa tanaman, yang antara lain ditandai oleh meningkatnya berat kering berangkasan tanaman (Syers *et al.*, 2011; Norton, 2013).

#### 4.5.2. Efisiensi P Tanaman

Data dan hasil analisis keragaman efisiensi serapan P tanaman jagung fase anthesis pada setiap kombinasi perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan dosis pupuk P disajikan pada Lampiran 8. Hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa perlakuan dosis ATB-KA, dosis pupuk P dan interaksi keduanya berpengaruh sangat nyata terhadap efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman jagung pada fase anthesis ( $P < 0,01$ ).

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman cenderung lebih tinggi pada perlakuan pupuk P dosis rendah yang dikombinasikan dengan pemberian ATB-KA. Hasil senada dikemukakan oleh Purnomo *et al.* (2001) bahwa peningkatan takaran P pada kombinasinya dengan pupuk kandang cenderung menurunkan efisiensi penggunaan pupuk tersebut untuk tanaman jagung pada tanah Oksisol.

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 45 ton  $ha^{-1}$  dan pupuk P dosis 87 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  memberikan efisiensi serapan P tanaman yang berbeda tidak nyata dibandingkan dengan efisiensi serapan P pada perlakuan ATB-KA dosis 30 ton  $ha^{-1}$  yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 87, 174, dan 261 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , berbeda tidak nyata dibandingkan dengan efisiensi serapan P pada kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 45 ton  $ha^{-1}$  dan pupuk P dosis 174 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , berbeda tidak nyata dibandingkan dengan efisiensi serapan P pada perlakuan ATB-KA dosis 60 ton  $ha^{-1}$  yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis

87 dan 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, tetapi nyata lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi serapan P tanaman jagung pada kombinasi perlakuan yang lain. Sementara itu, efisiensi agronomis P pada kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 30 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> berbeda tidak nyata dibandingkan dengan efisiensi agronomis P pada kombinasi perlakuan ATB-KA dosis 15 ton ha<sup>-1</sup> dan pupuk P dosis 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, berbeda tidak nyata dibandingkan dengan efisiensi agronomis P pada perlakuan ATB-KA dosis 45 dan 60 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, tetapi nyata lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi agronomis P pada kombinasi perlakuan yang lain (Tabel 4.10).

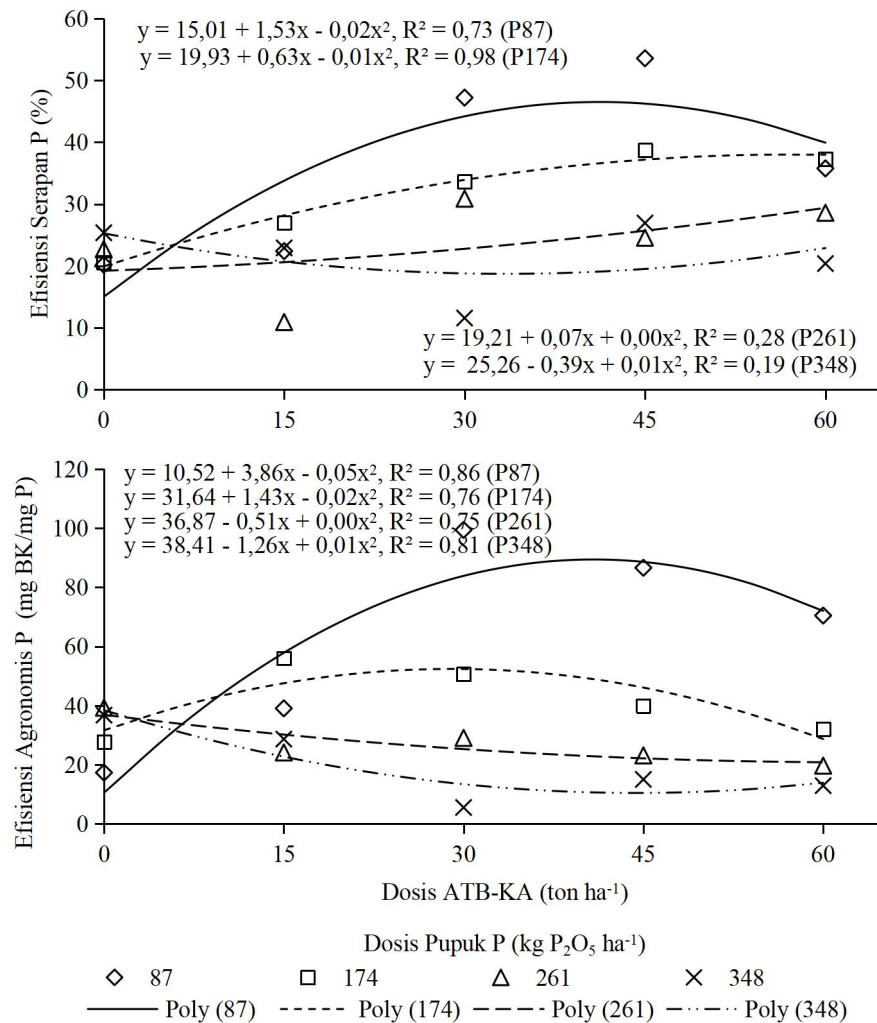
Tabel 4.10. Pengaruh pemberian campuran ATB-KA dan pupuk P terhadap efisiensi P tanaman jagung

Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )				
	0	87	174	261	348
Efisiensi Serapan P (%)					
0	-	20,20 ab	20,57 ab	22,70 ab	25,36 abc
15	-	22,40 ab	26,96 abc	10,93 a	22,91 ab
30	-	47,20 cd	33,65 a-d	30,88 a-d	11,58 a
45	-	53,56 d	38,71 bcd	24,56 abc	26,93 abc
60	-	35,76 bcd	37,25 bcd	28,59 abc	20,38 ab
BNJ <sub>(0,05)</sub> = 23,44					
Efisiensi Agronomis P (mg berat kering tanaman/ mg pupuk P)					
0	-	17,31 ab	27,69 abc	39,26 a-d	36,76 a-d
15	-	39,04 a-d	56,01 b-e	24,13 abc	28,65 abc
30	-	99,39 e	50,61 a-e	29,06 abc	5,53 a
45	-	86,58 de	39,92 a-d	23,13 abc	15,01 ab
60	-	70,43 cde	32,07 abc	19,68 ab	12,90 ab
BNJ <sub>(0,05)</sub> = 50,31					

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama berbeda tidak nyata (P < 0,05)

Meningkatnya serapan P tanaman akibat peningkatan dosis ATB-KA dan dosis pupuk P yang diberikan tampaknya tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman. Serapan P tanaman mempunyai hubungan positif yang tidak erat dengan efisiensi serapan P ( $r = 0,26^m$ ,  $P > 0,05$ ) dan efisiensi agronomis P ( $r = 0,11^m$ ,  $P > 0,05$ ) tanaman. Dalam hal ini, meningkatnya serapan P dan meningkatnya berat kering berangkas tanaman

yang terjadi tidak sebanding dengan peningkatan hara P dari pupuk yang ditambahkan. Hal ini antara lain dapat disebabkan oleh kontak akar dengan hara P dan kemampuan tanaman dalam menyerap hara P dari dalam tanah (Marschner, 1990; Shen *et al.*, 2013), sehingga meningkatnya ketersediaan P tidak lagi menyebabkan terjadinya peningkatan efisiensi serapan P oleh tanaman.



Gambar 4.23. Hubungan antara dosis ATB-KA dan efisiensi P tanaman jagung pada berbagai dosis pupuk P

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman pada perlakuan ATB-KA yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis rendah (87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) cenderung lebih tinggi dibandingkan



dengan efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman pada perlakuan ATB-KA yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis yang lebih tinggi. Efisiensi serapan P dan efisiensi agronomis P tanaman dan dosis ATB-KA yang dikombinasikan dengan pupuk P mempunyai hubungan kuadratik, dan tertinggi diperoleh pada dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> dengan persamaan berturut-turut:  $y = 15,01 + 1,53x - 0,02x^2$ ,  $R^2 = 0,73$  dan  $y = 10,52 + 3,86x - 0,05x^2$ ,  $R^2 = 0,86$  (Gambar 4). Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh dosis optimum ATB-KA untuk mencapai 90 % (Syers *et al.*, 2008) efisiensi P maksimum adalah sebesar 28,60 ton ha<sup>-1</sup>, dengan efisiensi serapan P sebesar 42,41%, dan efisiensi agronomis P sebesar 82,53 mg berat kering berangkas tanaman/mg P dari pupuk. Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian campuran ATB-KA dapat meningkatkan efisiensi pemupukan P tanaman jagung. Malhi *et al.* (2002) dan Syers *et al.* (2008) mengemukakan bahwa efisiensi penggunaan P tanaman berkisar antara 10 – 30% akibat tingginya jerapan P tanah.

Hasil ini menunjukkan bahwa pemberian ATB-KA dapat menurunkan dosis pupuk P menjadi 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> atau menjadi 0,5 kali kebutuhan P baku tanaman untuk mencapai konsentrasi 0,2 µg P mL<sup>-1</sup> dalam larutan keseimbangan. Pada dosis pupuk P yang lebih tinggi, terlihat adanya kecenderungan penurunan efisiensi penggunaan P oleh tanaman jagung dengan meningkatnya dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam yang diberikan. Kondisi ini menunjukkan adanya peranan campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dalam meningkatkan efisiensi P, terutama pada dosis P rendah.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa peningkatan serapan P tanaman akibat perlakuan yang diterapkan (Tabel 4.8) tidak selalu menyebabkan terjadinya peningkatan efisiensi penggunaan P oleh tanaman (Tabel 4.9). Beberapa ahli mengemukakan bahwa efisiensi penggunaan hara P dari pupuk dipengaruhi oleh faktor lingkungan tanaman, sehingga tidak semua hara P yang diserap dapat digunakan untuk pembentukan jaringan tanaman dan biji (Marschner, 1990; Syers *et al.*, 2008).

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

1. Campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dengan komposisi 50 % ATB dan diinkubasi selama 45 hari mempunyai potensi terbaik untuk digunakan sebagai amelioran guna menurunkan titik muatan nol (TMN) dan meningkatkan muatan negatif tanah. Kombinasi campuran ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan 45 hari inkubasi mempunyai TMN dan jerapan P yang lebih rendah, muatan negatif dan P-tersedia campuran yang lebih tinggi dibandingkan pada komposisi campuran dan waktu inkubasi yang lain.
2. Pemberian campuran ATB-KA dengan komposisi 50% ATB dan waktu inkubasi selama 45 hari pada dosis 30 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 174 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> dapat menurunkan TMN (meningkatkan muatan negatif) tanah. Jerapan P minimum sebesar 108,33 mg kg<sup>-1</sup> dan P-tersedia maksimum sebesar 102,21 mg kg<sup>-1</sup> diperoleh pada dosis ATB-KA sebesar 41,71 ton ha<sup>-1</sup> yang dikombinasikan dengan pupuk P dosis 261 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.
3. Efisiensi P tanaman jagung dapat ditingkatkan dengan pemberian campuran ATB-KA yang dikombinasikan dengan pemupukan P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Dosis optimum ATB-KA pada kombinasinya dengan pupuk P dosis 87 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> adalah sebesar 28,60 ton ha<sup>-1</sup>, dengan efisiensi serapan P sebesar 42,41%, dan efisiensi agronomis P sebesar 82,53 mg berat kering berangkasan tanaman/mg P pupuk.

#### **5.2. Saran**

1. Penelitian ini dilaksanakan pada kondisi yang relatif terkendali, sehingga diperlukan penelitian lanjutan pada kondisi lapangan dengan menggunakan berbagai jenis dan varietas tanaman.

2. Penelitian lebih lanjut dalam upaya untuk menurunkan dosis abu terbang batubara masih sangat terbuka, antara lain melalui aktivasi abu terbang batubara membentuk zeolit sintetis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adriano, D.C., A.L. Page, A.A. Elsewi, A.C. Chang, and I. Straughan. 1980. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: A review. *J. Environ. Qual.* 9: 333- 344.
- Aggarwal, S, G.R. Singh and B.R. Yadav. 2009. Utilization of fly ash for crop production: Effect on the growth of wheat and sorghum crops and soil properties. *J. Agric. Physics* 9: 20-23.
- Ali, S.A. dan Sufardi. 1999. Pengaruh beberapa amandemen tanah terhadap muatan koloid dan sifat fisikokimia tanah typic Haplohums (Ultisols). *J. Tanah Tropika* 8: 139-152.
- Alves, M.E. and A. Lavorenti. 2005. Point of zero salt effect: Relationships with clay mineralogy of representative soils of the Sao Paulo State, Brazil. *Pedosphere* 15: 545-553.
- American Coal Ash Association Educational Foundation. 2009. CCP Fact Sheet 2: Coal combustion products: Not a hazardous waste. ACAA.
- Anbalagan, M. and S. Manivannan. 2012. Effect of organic additives on the microbial population and humic acid production during recycling of fly ash through vermitechnology. *International J. Res. Environ. Sci. and Tech.* 2: 96-100.
- Ano, A.O., and C.I. Ubochi. 2007. Neutralization of soil acidity by animal manures: Mechanism of reaction. *Afr. J. Biotech.* 6: 364-368.
- Appel, C., L.Q. Ma, R.D. Rhue, and E. Kennelley. 2003. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma* 113:77-93.
- Arivazhagan, K., M. Ravichandran, S.K. Dube, V.K. Mathur, R.K Khandakar, K. Yagnanarayana, M.M. K Pasha, A.K. Sinha, B.D. Sarangi, V.K.M. Tripathi, S.K. Gupta, R. Singh, M. Ali, A.S. Thakurs and R. Narayare. 2011. Effect of coal fly ash on agricultural crops: Showcase project on use of fly ash in agriculture in and around Thermal Power Station Areas of National Thermal Power Corporation Ltd., India. World of Coal Ash (WOCA) Conference. Denver, CO, USA.
- Belfield, S. and C. Brown. 2008. Field crop manual: Maize (A guide to upland production in Cambodia). Canberra.
- Bessho, T. dan L.C. Bell, 1992. Soil solid and solution phase changes and mungbean response during amelioration of aluminium toxicity with organic matter. *Plant Soil* 140: 183-196.
- Bhattacharya, S.S. and G.N. Chattopadhyay. 2002. Increasing bioavailability of phosphorus from fly ash through vermicomposting. *J. Environ. Qual.* 31: 2116-2119.

- Bhattacharya, S.S. and G.N. Chattopadhyay. 2004. Transformation of nitrogen during vermicomposting of fly ash. *Waste Manag. Res.* 22: 488-491.
- Brouwers, H.J.H. and R.J. Van Eijk. 2003. Chemical reaction of fly ash. p.791-800. *In: Grieve, G., and G. Owens (Eds.). Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). The Cement and Concrete Institute of South Africa.*
- Carlson, C.L. and D.C. Adriano. 1993. Environmental impacts of coal combustion residues. *J. Environ. Qual.* 22:227-247.
- Darman, S. 2008. Ketersediaan dan serapan hara P tanaman jagung manis pada Oxic Dystrudepts Palolo akibat pemberian ekstrak kompos limbah buah kakao. *J. Agroland* 15: 323 – 329.
- Djokosudardjo, S. 1982. Pengaruh pemberian fosfor terhadap tingkat keefisienan pemupukan beberapa macam tanah di Indonesia. Disertasi. Fakultas Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Djuniwati, S., B. Nugroho, and H.B. Pulunggono. 2012. The changes of P-fractions and solubility of phosphate rock in Ultisol treated by organic matter and phosphate rock. *J. Trop. Soils* 17: 203-210.
- Elliot, A.D. and D. Zhang. 2005. Controlled release zeolite fertilisers: A value added product produced from fly ash. 2005 World of Coal Ash (WOCA) Conference. Lexington, KY, USA.
- Fox, R. L. and E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 902-907.
- Gaind, S. and A.C. Gaur, 2004. Evaluation of fly ash as a carrier for diazotrophs and phosphobacteria. *Biores. Tech.* 95: 187-190.
- Garau, M.A., J.L. Dalmau, and M.T. Felipo. 1991. Nitrogen mineralization in soil amended with sewage sludge and fly ash. *Biol. Fertil. Soils* 12:199-201.
- Hardjowigeno, S. 2007. Ilmu tanah. Cetakan ke 6. Aneka Pressindo. Jakarta.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers an introduction to nutrient management. 6th Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Haynes, R.J., and M.S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 59: 47-63.
- Heidrich, C., H. Feuerborn, and A. Weir. 2013. Coal combustion products: A global perspective. 2013 World of Coal Ash (WOCA) Conference. Lexington, KY. USA.
- Hinsinger, P, G.R. Gobran, P.J. Gregory, and W.W. Wenzel. 2005. Research review: Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from rootmediated physical and chemical processes. *New Phyt.* 168: 293–303.

- Hinsinger, P., A.G. Bengough, D. Vetterlein, and I.M. Young. 2009. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil* 321: 117-152.
- Huang, P.M. and M. Schnitzer. 1986. Interaction of soil minerals with natural organics and microbes. *Soil Sci. Am. Inc. USA*
- Huang, P.M., M. Wang and C. Chiu. 2005. Soil mineral–organic matter–microbe interactions: Impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiologia* 49: 609-635.
- Hue, N.V. 1992. Correcting soil acidity of highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23:241-264.
- Hue, N.V., Craddock G.R., and F. Adams 1986. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 28-34.
- Johnston, A.E. and J. Keith Syers. 2009. A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops* 93: 14-16.
- Jones, D.L, C. Nguyen, and R.D. Finlay. 2009. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil–root interface. *Plant Soil* 321: 5-33.
- Jumaeri, W. Astuti dan W.T.P. Lestari. 2007. Preparasi dan karakterisasi zeolit dari abu layang batubara secara alkali hidrotermal. *Reaktor* 11: 38-44.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4th Edition. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. FL. USA
- Kishor, P., A.K. Ghosh and D. Kumar. 2010. Use of fly ash in agriculture: A way to improve soil fertility and its productivity. *Asian J. Agric. Res.* 4: 1-14.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. p. 869-919. *In*: D.L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3.* SSSA No.5. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Kuzyakov, Y. 2010. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biol. and Biochem.* 42: 1363-1371.
- Lai, K.M., Ye, D.Y., J.W.C., Wong. 1999. Enzyme activities in a sandy soil amended with sewage sludge and coal fly ash. *Water, Air and Soil Pollut.* 113: 261-272.
- Larson, W.E. and J.J. Hanway. 1977. Corn production. p. 625-669. *In* G.F. Sprague (ed.). *Corn and corn improvement. Monograph 18.* Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Mahbub, I.A. 2004. Pengaruh mikoriza dan kapur super fosfat terhadap ketersediaan P tanah, serapan P tanaman dan hasil jagung pada Ultisol. *J. Agronomi* 8:121-124.
- Mahbub, M. 2010. Variable charge of Ultisols due to phosphate application and incubation time. *J. Trop. Soils* 15: 103-109.
- Malhi, S.S., L.K. Haderlein, D.G. Pauly, and A.M. Johnston. 2002. Improving fertilizer phosphorus use efficiency. *Better Crops* 86: 8-9.

- Manoharan, V., I.A.M. Yunusa and R. Lawrie. 2007. Influence of coal fly ash application on trace element mobility and distribution in soil, plant and leachate. 2007 World of Coal Ash (WOCA). Covington, Kentucky, USA.
- Marschner, H. 1990. Mineral nutrition of higher plants. Fourth Printing. Academic Press Limited, San Diego, CA. USA.
- Marsi and Sabaruddin. 2011. Phosphate adsorption capacity and organic matter effect on dynamics of P availability in upland Ultisol and lowland Inceptisol. *J. Trop. Soils* 16: 107-114.
- Mattigod, S.V., D. Rai, L.E. Eary, and C.C. Ainsworth. 1990. Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements. *J. Environ. Qual.* 19:188-201.
- Mittra, B.N., S. Karmakar, D.K. Swain, and B.C. Ghosh. 2003. Fly ash - a potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system. 2003 Internasional Ash Utilization Symposium. University of Kentucky.
- Mulyadi, M. 2000. Kajian pemberian blotong dan terak baja pada tanah Kandiodoxs Pelaihari dalam upaya memperbaiki sifat kimia tanah, serapan N, Si, P dan S serta pertumbuhan Tebu. Tesis. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Murugan, S and M.Vijayarangam. 2013. Effect of fly ash in agricultural field on soil properties and crop productivity: A review. *Int. J. Eng. Res. and Tech. (IJERT)* 2: 54-60.
- Nguyen, C. 2003. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. *Agronomie* 23: 375-396
- Nguyen, C.Q., C Guppy and P. Moody. 2010. Effect of P and Si amendment on the charge characteristics and management of a Geric soil. 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Norton, R. 2013. Agronomic practices and input-use efficiency. p.109-139. *In*: Manjit S.K and S.S. Banga (Eds). *Combating Climate Change: An Agricultural Perspective*. CRC Press. New York. USA.
- Nursyamsi, D., L. Anggria dan Nurjaya. 2011. Pengaruh pemberian P-alam terhadap jerapan dan bentuk-bentuk P tanah pada Dystrudept Cibatok, Bogor. *J. Tanah dan Iklim* 34:1-12.
- Olson, R.A. and D.H. Sander. 1988. Corn production. p.639-686. *In*: Sprague G.F. and J.W. Dudley (Eds.). *Corn and corn improvement*. 3rd Ed. Monograph 18. Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Pandey, V.C. and N. Singh. 2010. Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agric. Ecosyst. and Environ.* 136: 16-27.
- Pati, S.S. and S.K. Sahu, 2004. CO<sub>2</sub>, evolution and enzyme activities (dehydrogenase, protease and amylase) of fly ash amended soil in the

- presence and absence of earthworms (*Drawida willsi* Michaelsen) under laboratory conditions. *Geoderma* 118: 289-301.
- Purnomo, J., K. Idris, Suwarno, dan E.L. Sisworo. 2001. Pengaruh fosfat alam dan pupuk kandang terhadap efisiensi pemupukan P pada Oxisol Sumatera Barat. Hal 305-312. Dalam: *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*. BATAN, Jakarta.
- Ramme, B.W and M.P. Tharaniyil, 2013. *We energies coal combustion products utilization handbook*. 3rd Edition. Wisconsin Electric Power Company. Milwaukee, Wisconsin. USA.
- Ricou, P.H., I. Lecuyer and P. Le Cloirec. 2001. Experimental design methodology applied to adsorption of metallic ions onto fly ash. *Wat. Res.* 35: 965-976.
- Ritchey, K.D., Korcak, R.F., Feldhake, C.M., Baligar, V.C., Clarke, R.B., 1996. Calcium-sulfate or coal combustion byproduct spread on the soil surface to reduce evaporation, mitigate subsoil acidity and improve plant growth. *Plant and Soil* 182:209-219.
- Robert, T.L. 2008. Improving nutrient use efficiency. *Turk. J. Agric. For.* 32: 177-182.
- Sabaruddin, K., S. Ishizuka, K. Sakurai, S. Tanaka, S. Kubota, M. Hirota, S.J. Priatna, and Juairiah. 2001. Characteristics of Ultisols under different wildfire history in South Sumatra, Indonesia: I. Physico-chemical properties. *Tropics* 10: 565-580.
- Sajwan, K.S., S. Paramasivam, A. K. Alva and S.V. Sahi. 2006. Fly ash-organic byproduct mixture as soil amendment. p. 387-399. *In: Twardowska, I., Allen, H. E., Haggblom, M. H., and Stefaniak, S. (Eds.). Soil and water pollution monitoring protection and remediation*. Springer, Dordrecht. Netherlands.
- Sakurai, K., A. Nakayama, T. Watanabe, and K. Kyuma. 1989. Influences of aluminum ions on the determination of ZPC (zero point of charge) of variable charge soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 35: 623-633.
- Sakurai, K., S. Kozasa, B. Puriyakorn, P. Preechanya, V. Tanpibal, K. Muangnil, and B. Prachaiyo. 1996. Mineralogical and physico-chemical properties of four Thai soils with special reference to specific surface area (SSA) and zero point of charge (ZPC). *Soil Sci. Plant Nutr.* 42: 93-103.
- Sakurai, K., Y. Nakamura, and K. Kyuma. 1991. Changes in zero point of charge (ZPC), phosphate retention, and specific surface area of some variable charge soils after several chemical treatments. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37: 435-444.
- Sakurai, K., Y. Ohdate, and K. Kyuma. 1988. Comparison of salt titration and potentiometric titration methods for the determination of zero point of charge (ZPC). *Soil Sci. Plant Nutr.* 34: 171-182.
- Sanchez, P.A. 1976. *Properties and management of soil in tropic*. John Wiley and Sons, New York.



- Sanchez, P.A. and G. Uehara. 1980. Management considerations for acid soils with phosphorus fixation capacity. The role of phosphorus in agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison.
- Savant, N.K., G.H. Korndorfer, L.E. Datnoff and G.H. Snyder. 1999. Silicon nutrition and sugarcane production : A review. *J. Plant Nutr.* 22: 1853-1903.
- Schumann, A.W. and M.E. Sumner. 1999. Plant nutrient availability from mixtures of fly ashes and biosolids. *J. Environ. Qual.* 28: 1651-1657.
- Schutter, M.E. and J.J. Fuhrmann. 1999. Microbial responses to coal fly ash under field conditions. *J. Environ. Qual.* 28: 648-652.
- Seoane, S., and Leiros, M.C., 2001. Acidification–neutralization processes in a lignite mine spoil amended with fly ash and limestone. *J. Environ. Qual.* 30: 1420-1431.
- Seshadri, B, N.S. Bolan, R. Naidu, and K. Brodie. 2010. The role of coal combustion products in managing the bioavailability of nutrients and heavy metals in soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 378-398.
- Shamshuddin, J. and M. Anda. 2008. Charge properties of soils in Malaysia dominated by kaolinite, gibbsite, goethite and hematite. *Bull. Geol. Soc. of Malaysia.* 54: 27-31.
- Shamshuddin, J. and M. Anda. 2012. Enhancing the productivity of Ultisols and Oxisols in Malaysia using Basalt and/or Compost. *Pedologist* 55: 382-391.
- Shen, J., C. Li, G. Mi, L. Li, L. Yuan, R. Jiang and F. Zhang. 2013. Maximizing root/ rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China. *J. Exp. Bot.* 64: 1181-1192.
- Shen, J., L. Yuan, J. Zhang, H. Li, Z. Bai, X. Chen, W. Zhang, and F. Zhang. 2011. Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol.* 156: 997-1005.
- Sims, J.T., B.L. Vasilas, M. Ghodrati. 1995. Development and evaluation of management strategies for the use of coal fly ash as a soil amendments. P. 8.1-8.16. *In: Tyson, S.S., T.H. Blackstock, and J.M. Hunger (Eds.). Proceeding of the 11th International Symposium of the Am. Coal Ash Assoc., Orlando, FL. USA*
- Singh, S., D.P. Gond, A. PaI, B.K. Tewary and A. Sinha. 2011. Performance of several crops grown in fly ash amended soil. *World of Coal Ash (WOCA) Conference. Denver, CO, USA.*
- Sollins, P. 1991. Effects of phosphorus sorption on soil microstructure in soils of the humid tropics. p. 168-176. *In: Tiessen, H., D. Lopez-Hernandez and I.H. Salcedo (Eds.). Proc. of Phosphorus Cycles Terrestrial And Aquatic Ecosystems Workshop. SCOPE and UNEP, Maracay, Venezuela.*
- Sollins, P., G.P. Robertson, and G. Uehara. 1988. Nutrient mobility in variable- and permanent-charge soils. *Biogeochem.* 6: 181-199.
- Souza, T.C., E.M. de Castro, P.J. Pereira, S.N. Parentoni, and P.C. Magelhaes. 2009. Morpho-anatomical characterization of root in recurrent selection

- cycles for food tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant Soil Environ.* 55:504-510.
- Spark, D.L. 2003. *Environmental soil chemistry*. 2nd Edition. Academic Press. An Imprint of Elsevier Science. San Diego. California. USA.
- Sposito, G. 2008. *The chemistry of soils*. 2nd Edition. Oxford University Press, Inc. New York. USA.
- Stevens, G and D. Dunn. 2004. Fly ash as a liming material for Cotton. *J. Environ. Qual.* 33:343-348.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus chemistry : Genesis, composition, reaction*. John Wiley & Sons Inc. New York. USA.
- Subekti, N.A., Syafruddin, R. Efendi, S. Sunarti. 2009. *Morfologi tanaman dan fase pertumbuhan jagung*. Balai Penelitian Tanaman Serealia. Maros.
- Sukla, K.P., S. Sharma, N.K. Singh, V. Singh, K. Tiwari, and S. Singh. 2011. Nature and role of root exudates: Efficacy in bioremediation. *Afr. J. Biotechnol.* 10: 9717-9724.
- Sulaeman, Suparto, dan Eviati. 2005. *Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk*. Balai Penelitian Tanah, Balitbangtan, Departemen Pertanian.
- Sutoro, Y. Soeleman, dan Iskandar. 1988. *Budidaya tanaman jagung*. Balitbangtan, Departemen Pertanian.
- Syers, J.K., Johnston, A.E. and Curtin, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Rome.
- Tan, K.H. 1998. *Principles of soil chemistry*. 3rd Edition. Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc., New York. USA.
- Tan, K.H. 2003. *Humic Matter in the soil and the environment: Principles and Controversies*. Marcel Dekker, Inc. New York. USA.
- Tan, K.H. 2008. *Soils in the humid tropics and monsoon region of Indonesia*. CRC Press. Taylor and Francis Group. Boca Raton, New York. USA.
- Tarkalson, D., C.A. Shapiro, and J.L. Petersen. 2010. Use of fly ash as a liming material of corn and soybean production on an acidic sandy soil. Online. *Crop management*.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson and J.D. Beaton. 1985. *Soil fertility and fertilizers*. 4th Edition. The Macmillan Co., New York. USA.
- Uehara, G and G.P. Gillman. 1981. *The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays*. Westview Press. Colorado. USA.
- Van Ranst, E., J. Shamshuddin, G. Baert, and P.K. Dzwowa. 1998. Charge characteristics in relation to free Iron and organic matter of soils from Bambouto Mountains, Western Cameroon. *European J. Soil Sci.* 49: 243-252.

- Venkatesh, R.M. and T. Eevera. 2008. Mass reduction and recovery of nutrients through vermicomposting of fly ash. *App. Ecol. and Environ. Res.* 6: 77-84.
- von Uexkull, H.R. 1986. Efficient fertilizer use in acid upland soils of the humid tropics. *Fertilizer and Plant Nutrient Bulletin* 10. FAO. Rome. pp. 59.
- Wardani, S.P.R. 2008. Pemanfaatan limbah batubara (fly ash) untuk stabilisasi tanah maupun keperluan teknik sipil lainnya dalam mengurangi pencemaran lingkungan. Pidato Pengukuhan sebagai Guru Besar Tetap pada Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Wright, R.J., E.E. Codling, and S.F. Wright. 1998. Root growth and trace element uptake in acid soils treated with coal combustion by-products. *Chemosphere* 36: 1463-1474.
- Yang, S., Z. Zhang, L. Cong, X. Wang, and S. Shi. 2013. Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil. *J. Soil Sci. and Plant Nutr.* 13: 526-533.
- Yunusa, I.A.M., D. Eamus, D.L. DeSilva, B.R. Murray, M.D. Burchett, G.C. Skilbeck, and C. Heidrich. 2006. Fly-ash: An exploitable resource for management of Australian agricultural soil. *Fuel.* 85: 2337-2344.
- Zhang, H and J.L. Kovar. 2009. Fractionation of soil phosphorus. p. 50-60. *In*: Kovar, J.L., and G.M. Pierzynski (Eds.). *Methods for phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters.* 2nd Edition. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408. Virginia Tech University. USA.

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Data dan hasil analisis keragaman Titik muatan nol (TMN), pH H<sub>2</sub>O, pH KCl dan ΔpH pada setiap komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan waktu inkubasi

1. pH H<sub>2</sub>O

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
ATB – KA (% ATB)	Waktu Inkubasi (Hari)	1	2	3	
0	15	8,28	8,22	8,24	8,25
	30	8,09	8,05	8,07	8,07
	45	8,02	7,90	7,96	7,96
	60	7,88	7,86	7,87	7,87
25	15	8,37	8,34	8,31	8,34
	30	8,20	8,02	8,11	8,11
	45	7,80	7,81	7,81	7,81
	60	7,74	7,72	7,73	7,73
50	15	8,24	8,27	8,34	8,28
	30	8,05	8,10	8,13	8,09
	45	7,78	7,76	7,77	7,77
	60	7,71	7,67	7,69	7,69
75	15	8,32	8,4	8,3	8,34
	30	8,26	8,18	8,22	8,22
	45	7,87	7,98	7,93	7,93
	60	7,81	7,86	7,84	7,84
100	15	9,01	9,04	9,01	9,02
	30	8,9	9,02	9,10	9,01
	45	8,71	8,90	8,81	8,81
	60	8,80	8,84	8,82	8,82

Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					5%	1%
Kombinasi Perl.	19	10,068	0,530	227,14**	1,85	2,39
Campuran	4	7,788	1,947	834,57**	2,61	3,83
Waktu Inkubasi	3	2,048	0,683	292,64**	2,84	4,31
Interaksi	12	0,232	0,019	8,29**	2,00	2,66
Galat	40	0,093	0,002			
Total	59	10,162				

KK = 0,58%

\*\* = berpengaruh sangat nyata

## Lampiran 1 (lanjutan)

## 2. Titik muatan nol (TMN)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
ATB – KA (% ATB)	Waktu Inkubasi (Hari)	1	2	3	
0	15	7,65	7,05	7,71	7,47
	30	7,03	7,00	7,09	7,04
	45	6,74	6,58	6,82	6,71
	60	6,71	6,92	7,04	6,89
25	15	7,55	7,55	7,10	7,40
	30	6,94	6,48	6,95	6,79
	45	6,39	6,60	6,75	6,58
	60	6,35	6,59	6,70	6,55
50	15	7,55	7,49	6,96	7,33
	30	6,67	6,61	6,72	6,67
	45	5,85	5,72	5,95	5,84
	60	5,75	5,82	5,70	5,76
75	15	7,75	7,99	7,95	7,90
	30	6,75	6,75	6,80	6,77
	45	6,65	6,61	6,72	6,66
	60	6,59	6,98	6,65	6,74
100	15	8,65	8,75	8,70	8,70
	30	8,64	8,45	9,01	8,70
	45	8,65	8,78	8,60	8,68
	60	8,52	8,54	8,45	8,50

## Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					5%	1%
Kombinasi AP	19	45,708	2,406	72,14**	1,85	2,39
Campuran	4	35,147	8,787	263,51**	2,61	3,83
Waktu Inkubasi	3	7,559	2,520	75,57**	2,84	4,31
Interaksi	12	3,002	0,250	7,50**	2,00	2,66
Galat	40	1,334	0,033			
Total	59	47,042				

KK = 2,49%

\*\* = berpengaruh sangat nyata

## Lampiran 1 (lanjutan)

3.  $\Delta$ pH (pH H<sub>2</sub>O – TMN)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
ATB – KA (% ATB)	Waktu Inkubasi (Hari)	1	2	3	
0	15	0,63	1,17	0,53	0,78
	30	1,06	1,05	0,98	1,03
	45	1,28	1,32	1,14	1,25
	60	1,17	0,94	0,83	0,98
25	15	0,82	0,79	1,21	0,94
	30	1,26	1,54	1,16	1,32
	45	1,41	1,21	1,055	1,23
	60	1,39	1,13	1,03	1,18
50	15	0,69	0,78	1,38	0,95
	30	1,38	1,49	1,405	1,43
	45	1,93	2,04	1,82	1,93
	60	1,96	1,85	1,99	1,93
75	15	0,57	0,41	0,35	0,44
	30	1,51	1,43	1,42	1,45
	45	1,22	1,37	1,205	1,27
	60	1,22	0,88	1,185	1,10
100	15	0,36	0,29	0,31	0,32
	30	0,26	0,57	0,09	0,31
	45	0,06	0,12	0,205	0,13
	60	0,28	0,3	0,37	0,32

## Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					5%	1%
Kombinasi AP	19	14,947	0,787	25,89**	1,85	2,39
Campuran	4	10,563	2,641	86,92**	2,61	3,83
Waktu Inkubasi	3	2,174	0,725	23,85**	2,84	4,31
Interaksi	12	2,209	0,184	6,06**	2,00	2,66
Galat	40	1,215	0,0304			
Total	59	16,162				

KK = 18,35%

\*\* = berpengaruh sangat nyata

## Lampiran 1 (lanjutan)

## 5. C-organik, KTK, jerapan P dan P-tersedia

Kombinasi Perlakuan		Peubah			
ATB – KA (% ATB)	Waktu Inkubasi (Hari)	C-organik (g kg <sup>-1</sup> )	KTK (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	Jerapan P (mg kg <sup>-1</sup> )	P-tersedia (mg kg <sup>-1</sup> )
0	15	92,20	35,25	646,5	98,40
	30	120,50	38,75	645,0	124,05
	45	99,30	45,68	628,2	133,95
	60	85,00	39,15	594,9	134,10
25	15	78,00	28,73	624,0	88,65
	30	76,20	32,20	614,0	97,80
	45	69,10	39,15	577,6	105,45
	60	69,10	30,45	572,3	118,35
50	15	48,20	23,50	603,7	77,70
	30	47,50	23,50	594,8	83,70
	45	44,70	26,10	570,6	88,35
	60	42,50	21,75	569,7	94,80
75	15	27,70	18,00	617,1	44,40
	30	29,80	19,15	612,1	49,65
	45	26,20	19,28	602,8	51,55
	60	25,90	17,40	606,7	68,55
100	15	1,40	12,75	627,2	6,00
	30	1,10	13,05	627,7	14,45
	45	1,40	14,70	615,3	14,25
	60	1,20	15,23	611,0	17,40



Lampiran 2. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati pada perlakuan komposisi campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (% ATB) dan waktu inkubasi (hari)

### 1. Hasil analisis regresi

Peubah	Komposisi ATB-KA (% ATB)				Waktu Inkubasi (hari)			
	a	bx	bx <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	a	bx	bx <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
TMN	7,17	- 0,04	0,0005	0,72	8,61	- 0,07	0,0001	0,17
pH	8,10	- 0,01	0,0002	0,71	8,70	- 0,02	0,0001	0,20
ΔpH	0,93	0,026	-0,0003	0,65	0,09	0,05	-0,001	0,14
C-organik	97,68	-0,97	-	0,96	54,64	-0,14	-	0,01
KTK	37,24	-0,23	-	0,71	23,91	0,05	-	0,01
P-tersedia	129,20	-1,07	-	0,91	56,67	0,05	-	0,05
Jerapan P	626,20	-1,41	0,01	0,43	637,60	-0,79	-	0,35

### 2. Hasil analisis korelasi

Peubah	pH H <sub>2</sub> O	TMN	ΔpH	C-organik	KTK	Jerapan P
TMN	0,95**	-				
ΔpH	-0,85**	-0,97**	-			
C-organik	-0,58**	-0,51*	0,41*	-		
KTK	-0,59**	-0,50*	0,39*	0,94**	-	
Jerapan P	0,57**	0,61**	-0,59**	0,14 <sup>tn</sup>	0,07 <sup>tn</sup>	-
P-tersedia	-0,80**	-0,73**	0,62**	0,92**	0,92**	-0,21 <sup>tn</sup>

Keterangan:  $r_{(0,05;18)} = 0,44$ ;  $r_{(0,01;18)} = 0,56$

tn / \* / \*\* = mempunyai hubungan yang tidak erat / erat / sangat erat

Lampiran 3. Data dan hasil analisis keragaman berupa karakteristik kimia tanah Ultisol yang ditanami jagung dengan perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P

1. pH H<sub>2</sub>O (1:1)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
0	0	4,25	4,26	4,32	4,28
	87	4,37	4,40	4,13	4,30
	174	4,58	4,25	4,20	4,34
	261	4,19	3,98	4,59	4,25
	348	4,08	4,18	4,42	4,23
15	0	5,10	5,04	5,21	5,12
	87	5,21	5,10	4,99	5,10
	174	5,16	5,30	5,15	5,20
	261	5,08	5,30	5,30	5,23
	348	5,32	5,27	5,27	5,29
30	0	6,05	6,10	6,04	6,06
	87	6,34	6,27	6,37	6,33
	174	6,25	6,04	6,21	6,17
	261	6,21	6,63	6,29	6,38
	348	6,24	6,21	6,43	6,29
45	0	7,05	7,00	6,90	6,98
	87	7,15	7,13	7,01	7,10
	174	7,08	7,10	6,85	7,01
	261	7,05	6,93	6,85	6,94
	348	7,02	6,80	6,87	6,90
60	0	7,26	7,45	6,87	7,19
	87	7,19	7,16	6,96	7,10
	174	7,12	7,18	7,45	7,25
	261	7,25	7,17	7,26	7,23
	348	7,36	6,98	7,28	7,21

Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	24	91,60579	3,816908	174,67**	1,74	2,18
Perl ABT	4	91,20697	22,80174	1043,46**	2,56	3,72
Perl Pupuk P	4	0,055899	0,013975	0,6395 <sup>m</sup>	2,56	3,72
Interaksi	16	0,691293	0,043206	1,98*	1,85	2,38

Galat	50	1,0926	0,021852
Total	74	92,69839	

KK = 3,47%    tn / \* / \*\* = berpengaruh tidak nyata / nyata / sangat nyata

## Lampiran 3 (lanjutan)

## 2. pH KCl (1:1)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
A0 (0)	P0 (0)	4,02	4,06	4,00	4,03
	P1 (87)	3,99	4,02	3,97	3,99
	P2 (174)	4,09	4,05	3,92	4,02
	P3 (261)	3,85	3,82	4,11	3,93
	P4 (348)	3,88	3,82	3,96	3,89
A1 (15)	P0 (0)	4,69	4,74	4,85	4,76
	P1 (87)	4,78	4,74	4,65	4,72
	P2 (174)	4,78	4,91	4,71	4,80
	P3 (261)	4,57	4,76	4,80	4,71
	P4 (348)	4,64	4,71	4,82	4,72
A2 (30)	P0 (0)	5,66	5,57	5,58	5,60
	P1 (87)	5,73	5,69	5,68	5,70
	P2 (174)	5,60	5,17	5,64	5,47
	P3 (261)	5,64	5,81	5,62	5,69
	P4 (348)	5,61	5,58	5,62	5,60
A3 (45)	P0 (0)	6,41	6,39	6,30	6,37
	P1 (87)	6,41	6,60	6,28	6,43
	P2 (174)	6,31	6,35	6,22	6,29
	P3 (261)	6,27	6,19	6,30	6,25
	P4 (348)	6,26	6,27	6,14	6,22
A4 (60)	P0 (0)	6,66	6,64	6,64	6,65
	P1 (87)	6,75	6,70	6,07	6,51
	P2 (174)	6,53	6,60	6,81	6,65
	P3 (261)	6,65	6,62	6,83	6,70
	P4 (348)	6,52	6,42	6,71	6,55

## Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	24	72,40610	3,016921	184,50**	1,74	2,18
Perl ABT	4	72,08141	18,02035	1102,03**	2,56	3,72
Perl Pupuk P	4	0,062899	0,015725	0,96 <sup>tn</sup>	2,56	3,72
Interaksi	16	0,261795	0,016362	1,00 <sup>tn</sup>	1,85	2,38

Galat	50	0,8176	0,016352
Total	74	73,223699	

KK = 2,35%    tn / \*\* = berpengaruh tidak nyata / sangat nyata

## Lampiran 3 (lanjutan)

## 3. Titik Muatan Nol (TMN)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
0	0	3,71	4,15	4,15	4,00
	87	3,85	4,05	4,00	3,97
	174	3,78	3,81	3,90	3,83
	261	3,99	3,83	3,65	3,82
	348	3,98	3,75	3,70	3,81
15	0	4,70	4,59	4,82	4,70
	87	4,55	4,65	4,68	4,63
	174	4,65	4,72	4,68	4,68
	261	4,70	4,45	4,79	4,65
	348	4,62	4,45	4,75	4,61
30	0	5,42	5,91	5,38	5,57
	87	5,49	5,45	5,30	5,41
	174	4,95	4,82	4,80	4,86
	261	5,51	4,70	5,25	5,15
	348	5,17	4,75	5,19	5,04
45	0	6,46	6,35	6,17	6,33
	87	6,12	5,85	6,10	6,02
	174	5,80	6,15	6,02	5,99
	261	5,83	5,83	5,90	5,85
	348	5,79	5,57	5,79	5,72
60	0	6,40	6,65	6,42	6,49
	87	6,20	6,35	5,80	6,12
	174	6,01	6,42	5,85	6,09
	261	6,15	6,30	5,71	6,05
	348	6,13	5,95	5,67	5,92

## Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	24	54,8320	2,2847	59,05**	1,74	2,18
Perl ABT	4	52,5569	13,1392	339,60**	2,56	3,72

Perl Pupuk P	4	1,4854	0,3713	9,60**	2,56	3,72
Interaksi	16	0,7897	0,0494	1,88*	1,85	2,38
Galat	50	1,9345	0,0387			
Total	74	56,7666				

KK = 3,80% \* / \*\* = berpengaruh nyata / sangat nyata

### Lampiran 3 (lanjutan)

#### 4. $\Delta$ pH (pH H<sub>2</sub>O – TMN)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
0	0	0,54	0,11	0,17	0,27
	87	0,52	0,35	0,13	0,33
	174	0,80	0,44	0,30	0,51
	261	0,20	0,15	0,94	0,43
	348	0,10	0,43	0,72	0,42
15	0	0,40	0,45	0,39	0,41
	87	0,66	0,45	0,31	0,47
	174	0,51	0,58	0,47	0,52
	261	0,38	0,85	0,51	0,58
	348	0,70	0,82	0,52	0,68
30	0	0,63	0,19	0,66	0,49
	87	0,85	0,82	1,07	0,91
	174	1,30	1,22	1,32	1,28
	261	0,70	1,93	1,04	1,22
	348	1,07	1,46	1,24	1,26
45	0	0,59	0,65	0,73	0,66
	87	1,03	1,28	0,91	1,07
	174	1,28	0,95	0,83	1,02
	261	1,22	1,10	0,95	1,09
	348	1,23	1,23	1,08	1,18
60	0	0,86	0,80	0,45	0,70
	87	0,99	0,81	1,16	0,99
	174	1,11	0,76	1,60	1,16
	261	1,10	0,87	1,55	1,17
	348	1,23	1,03	1,61	1,29

#### Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01

Kombinasi AP	24	8,71801	0,36325	5,39**	1,74	2,18
Perl ABT	4	6,01587	1,50397	22,31**	2,56	3,72
Perl Pupuk P	4	2,00477	0,50119	7,44**	2,56	3,72
Interaksi	16	2,10737	0,13171	1,95*	1,85	2,38
Galat	50	3,36987	0,06740			
Total	74	12,08787				

KK = 23,24%    \* / \*\* = berpengaruh nyata / sangat nyata

### Lampiran 3 (lanjutan)

#### 5. P-tersedia

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
0	0	4,50	7,70	4,50	5,57
	87	5,25	15,00	19,30	13,18
	174	21,00	24,45	18,90	21,45
	261	21,60	23,70	26,85	24,05
	348	57,45	55,35	40,95	51,25
15	0	30,45	36,90	35,25	34,20
	87	56,85	35,70	52,80	48,45
	174	44,10	36,60	39,15	39,95
	261	47,25	73,05	70,50	63,60
	348	89,10	85,80	78,60	84,50
30	0	65,25	66,45	52,80	61,50
	87	73,80	76,60	86,25	78,88
	174	75,00	76,35	68,40	73,25
	261	89,25	91,65	96,90	92,60
	348	99,00	79,80	88,80	89,20
45	0	72,45	92,85	86,10	83,80
	87	86,70	85,20	84,30	85,40
	174	79,50	93,45	101,25	91,40
	261	129,45	111,60	91,65	110,90
	348	85,50	88,35	75,45	83,10
60	0	80,10	89,70	52,50	74,10
	87	79,65	86,25	73,50	79,80
	174	61,20	69,80	50,10	60,37
	261	57,45	76,05	78,60	70,70
	348	81,30	76,50	81,90	79,90

Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	24	54865,56	2286,07	27,93**	1,74	2,18
Perl ABT	4	42042,52	10510,63	128,39**	2,56	3,72
Perl Pupuk P	4	6840,56	1710,14	20,89**	2,56	3,72
Interaksi	16	5982,48	373,91	4,57**	1,85	2,38
Galat	50	4093,14	81,86			
Total	74	58958,70				

KK = 14,13%    \*\* = berpengaruh nyata / sangat nyata

## Lampiran 3 (lanjutan)

## 6. C-organik, KTK, dan Jerapan P

Kombinasi Perlakuan		Peubah		
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	C-organik (g kg <sup>-1</sup> )	KTK (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	Jerapan P (mg kg <sup>-1</sup> )
0	0	1,63	17,68	145,60
	87	2,07	19,01	147,68
	174	2,30	19,13	147,55
	261	2,17	19,79	137,67
	348	2,30	20,52	139,55
15	0	2,87	19,91	137,21
	87	3,20	20,64	136,82
	174	2,73	20,55	130,82
	261	3,23	21,36	136,30
	348	2,90	20,87	134,42
30	0	3,13	19,95	136,17
	87	3,17	21,07	138,58
	174	2,93	21,52	128,63
	261	3,47	21,97	130,58
	348	3,33	22,46	133,77
45	0	3,67	20,20	133,44
	87	3,23	21,32	140,46
	174	3,10	21,85	136,30
	261	3,50	22,68	122,72
	348	4,40	23,03	130,52
60	0	3,77	20,97	138,64
	87	4,40	22,42	133,51
	174	4,13	22,64	127,72
	261	4,10	23,03	134,68
	348	3,97	22,98	134,35

## Lampiran 3 (lanjutan)

## 7. Al-dd, Fe-dd, Al-P, Fe-P, dan P-organik

Kombinasi Perlakuan		Al-dd ( $\text{cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1}$ )	Fe-dd	Al-P	Fe-P	P-Org
Dosis ATB – KA ( $\text{ton ha}^{-1}$ )	Dosis P ( $\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ ha}^{-1}$ )		..... $\text{mg kg}^{-1}$ .....			
0	0	1,20	1,01	1,72	5,10	18,80
	87	0,24	0,81	3,60	9,13	19,23
	174	0,24	0,91	3,20	21,68	20,56
	261	0,28	0,88	1,80	32,73	20,32
	348	0,36	0,80	3,60	38,25	21,49
15	0	0,10	0,77	3,20	33,15	20,56
	87	ttd	ttd	2,80	42,93	21,28
	174	ttd	ttd	3,60	47,18	21,98
	261	ttd	ttd	6,80	37,83	21,92
	348	ttd	ttd	3,20	51,43	30,32
30	0	ttd	ttd	4,40	54,40	22,52
	87	ttd	ttd	4,00	56,95	21,28
	174	ttd	ttd	2,00	51,43	21,44
	261	ttd	ttd	2,40	51,00	21,80
	348	ttd	ttd	5,20	87,13	22,56
45	0	ttd	ttd	3,20	56,95	21,16
	87	ttd	ttd	4,40	62,49	21,70
	174	ttd	ttd	2,00	64,40	21,60
	261	ttd	ttd	6,80	61,63	22,28
	348	ttd	ttd	5,60	60,35	21,80
60	0	ttd	ttd	3,60	74,38	22,34
	87	ttd	ttd	6,00	62,90	28,96



174	ttd	ttd	5,20	51,00	29,40
261	ttd	ttd	6,80	65,45	29,28
348	ttd	ttd	7,60	61,63	27,20

Lampiran 4. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati dengan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dan dosis pupuk P pada percobaan yang ditanami jagung

1. Hasil analisis regresi korelasi antara perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam (ATB-KA) dan dosis pupuk P dengan berbagai peubah yang diamati

Peubah	Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )				Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )			
	a	b	R <sup>2</sup>	r	a	b	R <sup>2</sup>	r
TMN	4,01	0,04x	0,93	0,96**	5,36	0,001x	0,02	0,14 <sup>tn</sup>
pH H <sub>2</sub> O	4,45	0,05x	0,95	0,97**	5,95	0,0002x	0,0003	0,02 <sup>tn</sup>
pH KCl	4,08	0,05x	0,97	0,98**	5,49	-0,0002x	0,0007	-0,03 <sup>tn</sup>
ΔpH	0,44	0,01x	0,56	0,75**	0,60	0,001x	0,20	0,45*
C-Organik	2,28	0,03x	0,81	0,90**	3,025	0,001x	0,026	0,16 <sup>tn</sup>
KTK	19,60	0,05x	0,60	0,77**	18,64	0,01x	0,12	0,35 <sup>tn</sup>
P-tersedia	36,74	0,91x	0,51	0,71**	51,50	0,07x	0,11	0,33 <sup>tn</sup>
Jerapan P	140,16	-0,15x	0,30	-0,55**	138,63	0,02x	0,13	-0,36 <sup>tn</sup>
P-Organik	20,23	0,09x	0,33	0,57**	21,30	0,01x	0,12	0,41*
Fe-P	29,25	0,68x	0,60	0,77**	43,10	0,01x	0,06	0,24 <sup>tn</sup>
Al-P	2,79	0,04x	0,31	0,56**	3,23	0,005x	0,14	0,37 <sup>tn</sup>
Al-dd	0,27	-0,01x	0,29	-0,54**	0,17	-0,0004x	0,04	-0,20 <sup>nt</sup>
Fe-dd	0,59	-0,01x	0,53	-0,73**	0,28	-0,0004x	0,02	-0,14 <sup>tn</sup>

Keterangan : r<sub>(0,05;23)</sub> = 0,40; r<sub>(0,01;23)</sub> = 0,51; tn / \* / \*\* = berhubungan tidak erat / erat / sangat erat

2. Hasil analisis korelasi

Peubah	TMN	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	ΔpH	C-Org	KTK	P-tersda	Jerpn P	P-org	Fe-P	Al-P
--------	-----	---------------------	--------	-----	-------	-----	----------	---------	-------	------	------

H <sub>2</sub> O	0,97**										
KCl	0,98**	0,99**									
ΔpH	0,64**	0,80**	0,77**								
C-Organik	0,85**	0,88**	0,88**	0,71**							
KTK	0,66**	0,79**	0,76**	0,88**	0,85**						
P-tersedia	0,73**	0,81**	0,77**	0,77**	0,72**	0,80**					
Jerpan P	-0,51*	-0,59**	-0,56**	-0,63**	-0,63**	-0,73**	-0,80**				
P-orgnik	0,28 <sup>tn</sup>	0,30 <sup>tn</sup>	0,31 <sup>tn</sup>	0,28 <sup>tn</sup>	0,44*	0,49*	0,19 <sup>tn</sup>	-0,21 <sup>tn</sup>			
Fe-P	0,72**	0,79**	0,80**	0,76**	0,79**	0,80**	0,57**	-0,58**	0,48*		
Al-P	-0,07 <sup>tn</sup>	0,08 <sup>tn</sup>	0,03 <sup>tn</sup>	0,43*	0,27 <sup>tn</sup>	0,47*	0,38 <sup>tn</sup>	-0,36 <sup>tn</sup>	0,19 <sup>tn</sup>	0,09 <sup>tn</sup>	
Al-dd	-0,55**	-0,59**	-0,51*	-0,52**	-0,67**	-0,68**	0,55**	-0,66**	-0,40 <sup>tn</sup>	-0,49*	-0,46*
Fe-dd	-0,76**	-0,79**	-0,53**	-0,67**	-0,77**	-0,75**	0,68**	-0,83**	-0,36 <sup>tn</sup>	-0,59**	-0,35 <sup>tn</sup>
Serapan P	0,42*	0,57**	0,53**	0,77**	0,62**	0,87**	0,69**	0,67**	0,39 <sup>tn</sup>	0,66**	0,71**

Keterangan :  $r_{(0,05;23)} = 0,40$ ;  $r_{(0,01;23)} = 0,51$ ; tn / \* / \*\* = berhubungan tidak erat / erat / sangat erat

Lampiran 5. Data dan hasil analisis keragaman berupa karakteristik kimia tanah Ultisol yang tidak ditanami jagung dengan perlakuan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P

#### 1. Titik muatan nol (TMN), pH H<sub>2</sub>O, pH KCl, dan ΔpH (pH H<sub>2</sub>O – TMN)

Kombinasi Perlakuan		Peubah		
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	pH H <sub>2</sub> O	TMN	ΔpH
A0 (0)	P0 (0)	4,13	3,90	0,23
	P1 (87)	4,10	3,85	0,25
	P2 (174)	3,99	3,72	0,27
	P3 (261)	3,98	3,72	0,26
	P4 (348)	3,99	3,74	0,25
A1 (15)	P0 (0)	4,57	4,21	0,36
	P1 (87)	4,73	4,42	0,31
	P2 (174)	4,79	4,35	0,44
	P3 (261)	4,73	4,45	0,28
	P4 (348)	4,84	4,30	0,54
A2 (30)	P0 (0)	5,88	5,50	0,38
	P1 (87)	5,65	5,27	0,38
	P2 (174)	5,76	5,15	0,61
	P3 (261)	5,65	4,95	0,7
	P4 (348)	5,70	4,93	0,77
A3 (45)	P0 (0)	6,44	6,15	0,29
	P1 (87)	6,48	6,12	0,36
	P2 (174)	6,42	5,61	0,81
	P3 (261)	6,51	5,68	0,83
	P4 (348)	6,50	5,60	0,9
A4 (60)	P0 (0)	7,40	6,75	0,65
	P1 (87)	7,05	6,39	0,66

P2 (174)	6,87	6,20	0,67
P3 (261)	6,97	6,07	0,9
P4 (348)	6,88	6,03	0,85

## Lampiran 5 (lanjutan)

## 2. C-organik, KTK, Jerapan P, dan P-tersedia

Kombinasi Perlakuan		Peubah			
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	C-organik (g kg <sup>-1</sup> )	KTK (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	Jerapan P (mg kg <sup>-1</sup> )	P-tersedia (mg kg <sup>-1</sup> )
A0 (0)	P0 (0)	1,10	17,40	153,46	3,75
	P1 (87)	1,00	18,45	122,91	14,40
	P2 (174)	1,00	19,58	141,57	24,75
	P3 (261)	0,80	18,45	143,52	29,55
	P4 (348)	0,40	19,58	143,58	48,60
A1 (15)	P0 (0)	1,40	19,58	142,48	26,40
	P1 (87)	1,70	21,75	140,14	38,85
	P2 (174)	1,40	21,75	138,38	64,80
	P3 (261)	1,20	20,66	117,71	72,45
	P4 (348)	1,40	21,75	139,29	79,80
A2 (30)	P0 (0)	2,40	17,40	125,58	54,00
	P1 (87)	2,20	18,45	137,67	70,50
	P2 (174)	2,30	19,58	117,45	79,80
	P3 (261)	1,80	19,58	110,17	89,25
	P4 (348)	1,60	20,66	115,11	94,95
A3 (45)	P0 (0)	2,60	19,58	119,92	72,45
	P1 (87)	3,00	20,66	116,54	83,40
	P2 (174)	2,50	19,80	111,86	94,20
	P3 (261)	2,50	21,75	116,54	105,30
	P4 (348)	2,70	20,66	100,55	107,40
A4 (60)	P0 (0)	2,80	20,75	106,99	96,60
	P1 (87)	3,50	21,75	111,28	91,50

P2 (174)	2,40	19,85	124,60	98,25
P3 (261)	2,90	21,75	111,34	106,50
P4 (348)	3,30	21,66	100,88	97,95

## Lampiran 5 (lanjutan)

## 3. Al-dd, Fe-dd, Al-P, Fe-P, dan P-organik

Kombinasi Perlakuan		Al-dd ( $\text{cmol}_{(+)}$ $\text{kg}^{-1}$ )	Fe-dd	Al-P	Fe-P	P-Org
Dosis ATB – KA ( $\text{ton ha}^{-1}$ )	Dosis P ( $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ )		..... $\text{mg kg}^{-1}$ .....			
0	0	1,40	1,10	0,80	17,23	20,12
	87	0,52	0,88	1,40	18,50	21,56
	174	0,56	0,98	2,00	23,60	20,23
	261	0,60	0,98	3,60	22,80	21,16
	348	0,56	0,88	3,40	38,45	21,28
15	0	0,12	0,68	1,20	20,90	20,56
	87	0,12	0,59	4,00	23,80	21,92
	174	0,12	0,68	4,80	29,33	21,44
	261	0,08	0,49	4,20	22,10	21,68
	348	0,06	0,29	4,80	38,13	21,60
30	0	ttd	ttd	1,80	34,43	20,84
	87	ttd	ttd	3,00	38,68	21,76
	174	ttd	ttd	3,60	45,30	20,80
	261	ttd	ttd	4,60	47,60	21,44
	348	ttd	ttd	3,80	40,38	22,44
45	0	ttd	ttd	2,80	37,40	20,60
	87	ttd	ttd	2,20	37,83	21,40
	174	ttd	ttd	3,60	40,38	21,44

	261	ttd	ttd	4,80	46,75	21,28
	348	ttd	ttd	7,20	50,15	22,28
60	0	ttd	ttd	2,60	37,85	22,02
	87	ttd	ttd	4,60	56,50	21,92
	174	ttd	ttd	4,00	55,05	22,40
	261	ttd	ttd	7,20	66,05	22,58
	348	ttd	ttd	5,60	76,93	22,40

Lampiran 6. Hasil analisis regresi korelasi berbagai peubah yang diamati dengan dosis campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan dosis pupuk P pada percobaan tanpa tanaman jagung

### 1. Analisis Regresi

Peubah	Dosis ATB-KA (ton ha <sup>-1</sup> )				Dosis Pupuk P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )			
	a	bx	R <sup>2</sup>	r	a	bx	R <sup>2</sup>	r
TMN	3,78	0,04	0,95	0,98**	5,28	-0,001	0,02	-0,15 <sup>tn</sup>
pH H <sub>2</sub> O	4,054	0,05	0,98	0,99**	5,65	-0,0003	0,001	-0,03 <sup>tn</sup>
pH KCl	3,834	0,05	0,98	0,99**	5,42	-0,0004	0,002	-0,05 <sup>tn</sup>
ΔpH	0,27	0,01	0,57	0,75**	0,37	0,001	0,22	0,46*
C-Organik	0,9	0,04	0,88	0,94**	2,16	-0,001	0,02	-0,14 <sup>tn</sup>
KTK	19,251	0,03	0,21	0,45*	19,30	0,01	0,18	0,43*
P-tersedia	33,018	1,23	0,72	0,85**	51,60	0,11	0,18	0,42*
Jerapan P	140,878	-0,55	0,62	-0,79**	129,47	-0,03	0,06	-0,24 <sup>tn</sup>
P-Organik	20,94	0,02	0,33	0,56**	21,03	0,003	0,22	0,47*
Fe-P	21,77	0,56	0,66	0,81**	28,55	0,06	0,20	0,45*
Al-P	2,58	0,04	0,23	0,48**	2,05	0,01	0,50	0,71**
Al-dd	0,477	-0,01	0,47	-0,68**	0,24	-0,0004	0,02	-0,16 <sup>tn</sup>
Fe-dd	0,797	-0,02	0,77	-0,88**	0,35	-0,0003	0,01	-0,09 <sup>tn</sup>

Keterangan : r<sub>(0,05;23)</sub> = 0,40; r<sub>(0,01;23)</sub> = 0,51; tn / \* / \*\* = berhubungan tidak erat / erat / sangat erat

### 2. Hasil analisis korelasi

Peubah	TMN	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	ΔpH	C-Org	KTK	P-tersda	Jerapan P	P-org	Fe-P	Al-P
H <sub>2</sub> O	0,97**										
KCl	0,98**	0,98**									
ΔpH	0,63**	0,75**	0,74**								
C-Organik	0,95**	0,94**	0,95**	0,65**							
KTK	0,35 <sup>tn</sup>	0,41*	0,41*	0,53**	0,41*						
P-tersdia	0,79**	0,85**	0,85**	0,85**	0,73**	0,60**					
Jerpan P	-0,76**	-0,80**	-0,80**	-0,75**	-0,75**	-0,40*	-0,68**				
P-orgnik	-0,05 <sup>tn</sup>	-0,05 <sup>tn</sup>	-0,06 <sup>tn</sup>	-0,05 <sup>tn</sup>	0,41*	0,04 <sup>tn</sup>	0,12 <sup>tn</sup>	-0,07 <sup>tn</sup>			
Fe-P	0,76**	0,80**	0,80**	0,72**	0,70**	0,51*	0,87**	-0,71**	0,22 <sup>tn</sup>		
Al-P	0,48*	0,51*	0,51*	0,49*	0,49*	0,53**	0,57**	-0,56**	0,12 <sup>tn</sup>	0,44*	
Al-dd	-0,66**	-0,68**	-0,68**	-0,57**	-0,64**	-0,54**	-0,78**	0,65**	-0,33 <sup>tn</sup>	-0,81**	-0,44*
Fe-dd	-0,88 <sup>tn</sup>	-0,90**	-0,90**	-0,72**	-0,84**	-0,34 <sup>tn</sup>	-0,88**	0,78**	-0,20 <sup>tn</sup>	-0,87**	-0,44*

Keterangan :  $r_{(0,05;23)} = 0,40$ ;  $r_{(0,01;23)} = 0,51$ ; tn / \* / \*\* = berhubungan tidak erat / erat / sangat erat

Lampiran 7. Data dan hasil analisis keragaman serapan P tanaman jagung akibat pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
A0 (0)	P0 (0)	27,46	34,44	23,57	28,49
	P1 (87)	78,33	144,39	126,30	116,34
	P2 (174)	168,04	279,74	174,56	207,45
	P3 (261)	309,65	294,22	370,37	324,75
	P4 (348)	360,76	412,93	635,74	469,81
A1 (15)	P0 (0)	206,14	202,77	201,66	203,52
	P1 (87)	313,38	241,18	348,27	300,94
	P2 (174)	397,78	472,05	444,33	438,05
	P3 (261)	335,14	326,37	376,88	346,13
	P4 (348)	503,21	583,72	719,73	602,22
A2 (30)	P0 (0)	187,21	179,91	198,15	188,42
	P1 (87)	402,44	393,11	385,73	393,76
	P2 (174)	503,29	446,42	493,90	481,20
	P3 (261)	543,12	746,38	484,53	591,34
	P4 (348)	385,59	412,70	371,35	389,88
A3 (45)	P0 (0)	255,27	217,10	205,95	226,11
	P1 (87)	447,17	445,40	484,75	459,11
	P2 (174)	476,43	559,71	652,57	562,90
	P3 (261)	482,09	594,38	563,33	546,60
	P4 (348)	651,28	665,69	767,20	694,72
A4 (60)	P0 (0)	274,56	232,68	244,23	250,49

P1 (87)	483,34	409,07	488,16	460,19
P2 (174)	571,57	482,40	669,81	574,59
P3 (261)	617,05	533,18	720,73	623,65
P4 (348)	513,88	605,54	695,97	605,13

#### Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	24	2294266,60	95594,441	21,69**	1,74	2,18
Perl ABT	4	746475,79	186618,95	42,33**	2,56	3,72
Perl Pupuk P	4	1274948,70	318737,17	72,30**	2,56	3,72
Interaksi	16	272842,10	17052,632	3,87**	1,85	2,38
Galat	50	220414,49	4408,2898			
Total	74	2514681,10				

KK = 16,46%    \*\* = berpengaruh sangat nyata

#### Lampiran 8. Data dan hasil analisis keragaman efisiensi P tanaman jagung akibat pemberian campuran abu terbang batubara-kotoran ayam dan pupuk P

##### 1. Efisiensi Serapan P Tanaman Jagung (%)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
A0 (0)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	11,69	25,28	23,62	20,20
	P2 (174)	16,16	28,20	17,36	20,57
	P3 (261)	21,62	19,91	26,57	22,70
	P4 (348)	19,15	21,75	35,18	25,36
A1 (15)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	24,65	8,83	33,70	22,40
	P2 (174)	22,03	30,95	27,89	26,96
	P3 (261)	9,89	9,47	13,43	10,93
	P4 (348)	17,07	21,89	29,77	22,91
A2 (30)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	49,48	49,01	43,12	47,20
	P2 (174)	36,33	30,63	33,99	33,65
	P3 (261)	27,27	43,41	21,94	30,88
	P4 (348)	11,40	13,38	9,95	11,58
A3 (45)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	44,12	52,48	64,09	53,56
	P2 (174)	25,42	39,38	51,34	38,71

A4 (60)	P3 (261)	17,38	28,91	27,39	24,56
	P4 (348)	22,76	25,78	32,26	26,93
	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	48,00	40,55	56,08	48,21
	P2 (174)	34,14	28,70	48,92	37,25
	P3 (261)	26,24	23,03	36,51	28,59
	P4 (348)	13,75	21,43	25,96	20,38

#### Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	19	7512,132	395,375	6,89**	1,85	2,39
Perl ABT	4	2227,818	556,955	9,71**	2,61	3,83
Perl Pupuk P	3	2690,467	896,822	15,63**	2,84	4,31
Interaksi	12	2593,846	216,154	3,77**	2,00	2,66
Galat	40	2294,826	57,3706			
Total	59	9806,9577				

\*\* = berpengaruh sangat nyata

#### Lampiran 8 (lanjutan)

#### 2. Efisiensi Agronomis P (mg berat kering tanaman/mg pupuk P)

Kombinasi Perlakuan		Ulangan			Rerata
Dosis ATB – KA (ton ha <sup>-1</sup> )	Dosis P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> )	1	2	3	
A0 (0)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	1,52	3,61	46,80	51,93
	P2 (174)	17,09	32,09	33,89	83,07
	P3 (261)	49,00	15,05	53,75	117,79
	P4 (348)	45,48	19,60	45,20	110,28
A1 (15)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	46,57	10,92	59,63	117,13
	P2 (174)	52,85	53,67	61,51	168,02
	P3 (261)	15,73	27,51	29,16	72,40
	P4 (348)	22,03	33,48	30,44	85,95
A2 (30)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	77,84	118,53	101,82	298,18
	P2 (174)	50,32	45,01	56,49	151,83
	P3 (261)	17,63	43,56	25,99	87,18
	P4 (348)	5,96	6,82	3,81	16,59
A3 (45)	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	78,99	110,62	70,14	259,75
	P2 (174)	25,17	32,06	62,53	119,76



A4 (60)	P3 (261)	19,47	24,22	25,71	69,40
	P4 (348)	11,49	8,84	24,69	45,03
	P0 (0)	-	-	-	-
	P1 (87)	78,00	35,63	97,66	211,29
	P2 (174)	33,41	13,61	49,18	96,21
	P3 (261)	20,25	4,16	34,63	59,04
	P4 (348)	8,48	12,77	17,45	38,70

Hasil analisis keragaman (Uji F)

SK	db	JK	KT	F-hitung	F-tabel	
					0,05	0,01
Kombinasi AP	19	34106,192	1795,063	6,79**	1,85	2,39
Perl ABT	4	1857,0865	464,272	1,76 <sup>tn</sup>	2,61	3,83
Perl Pupuk P	3	15976,366	5325,455	20,15**	2,84	4,31
Interaksi	12	16272,74	1356,062	5,13**	2,00	2,66
Galat	40	10573,717	264,343			
Total	59	44679,909				

tn / \*\* = berpengaruh tidak nyata / sangat nyata