

Pengaruh Pupuk Gambut terhadap Pelindian dan Serapan Logam Berat oleh Tanaman Jagung pada Tanah Gambut

Effects of "Peat Fertilizer" on Heavy Metal Leaching and Uptake by Maize on Peat Soil

I Gusti Made Subiksa*, Joko Purnomo, I Wayan Suastika

Balai Penelitian Tanah, Jalan Tentara Pelajar No. 12, Cimanggu, Bogor 16124, Jawa Barat, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 19 Maret 2019
Disetujui: 27 Februari 2020
Dipublikasi online: 19 Maret 2020

Kata kunci:

Pugam
Ameliorasi
Logam berat
Licit
Serapan

Keywords:

Pugam
Amelioration
Heavy metals
Leachate
Uptake

Direview oleh:

Wahida Annisa Yusuf,
Muhammad Noor, Maswar

Abstrak. Penelitian pelindian dan serapan logam berat oleh tanaman jagung yang dipupuk dengan pupuk gambut (Pugam) dilakukan dalam bentuk percobaan pot di rumah kaca. Penelitian bertujuan untuk menguji laju pelindian dan serapan logam berat oleh tanaman jagung yang dipupuk dengan Pugam pada tanah gambut. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok dengan lima perlakuan yaitu kontrol, NPK konvensional, dan dosis Pugam 15 g pot⁻¹, 30 g pot⁻¹, dan 45 g pot⁻¹ atau setara dengan 500 kg, 1000 kg, dan 1500 kg ha⁻¹. Jumlah logam berat yang terlindi dapat dideteksi dari konsentrasi logam pada air licit (*leachate*) yang diambil secara reguler dari dasar pot, sedangkan serapan logam berat diukur melalui analisis tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Pugam mengandung sejumlah logam berat yaitu Cr, Pb, dan Cd dalam konsentrasi yang rendah, yaitu berturut-turut 96; 17,3; dan 1,6 mg kg⁻¹. Sebagian dari logam berat tersebut terdeteksi pada air licit dari tanah gambut yang diberi perlakuan Pugam, namun konsentrasinya di bawah nilai ambang batas konsentrasi logam berat untuk tanaman pertanian seperti yang tercantum pada lampiran PP. 82/2001 tentang kualitas air. Logam berat Cr dan Cu cukup banyak terdeteksi pada pupuk Pugam, yaitu masing-masing 96 mg kg⁻¹ dan 1546 mg kg⁻¹, tetapi tidak terdeteksi pada air licit, karena kedua logam berat ini memiliki afinitas yang tinggi untuk berikatan dengan ligan organik. Logam berat Pb, As, Se, dan Zn mengalami pelindian yang terdeteksi melalui air licit, tetapi konsentrasinya berada di bawah nilai ambang batas kualitas air (PP No. 82/2001) dan tidak berkorelasi dengan perlakuan pupuk Pugam. Bobot masa akar dan biomas pada perlakuan Pugam 500 kg ha⁻¹ meningkat masing-masing 58 kali dan 45 kali lipat dibandingkan dengan perlakuan NPK karena Pugam bila larut melepaskan kation polivalen yang mampu menetralkan asam fenolat yang beracun bagi tanaman. Perlakuan Pugam tidak meningkatkan konsentrasi dan serapan logam berat oleh tanaman jagung. Kisaran konsentrasi logam berat adalah (mg kg⁻¹) 1,95-2,79 Pb; 0,2-0,3 As; 1,45 -2,83 Cr; 0,05 Co, sedangkan Cd, Hg, dan Ni tidak terdeteksi. Semua kisaran konsentrasi logam berat tersebut jauh di bawah nilai ambang batas konsentrasi yang membahayakan.

Abstract. Research on heavy metal leaching and uptake by maize fertilized with "peat fertilizer" (Pugam) on peat soil was carried out in a greenhouse. The objectives of this research were to evaluate heavy metal leaching and uptake by maize due to Pugam fertilization. The study used a randomized block design with five treatments namely control, conventional NPK, and three rates of Pugam, i.e. 15, 30, and 45 g pot⁻¹ or equivalent to 500, 1000, and 1500 kg ha⁻¹. The leached heavy metals were detected from the concentrations in the leachate taken regularly from the bottom of the pots, while the uptake of metals by plant were measured by plant sample analysis. The results showed that Pugam contained a number of heavy metals namely Cr, Pb, and Cd in low concentrations, namely 96, 17.3, and 1.6 mg kg⁻¹, respectively. Some of the heavy metals were detected in the leachate of peat soil treated with Pugam, but the concentrations were below the threshold values of heavy metal concentrations for crops as listed in the attachment of the government regulation (PP. 82/2001) concerning water quality. Cr and Cu were detected in quite high concentrations in Pugam namely 96 and 1546 mg kg⁻¹ respectively, but they were not detected in the leachate because both metals tend to make a strong bound with organic ligand. Heavy metals namely Pb, As, Se, and Zn underwent leaching, but the concentration in leachate was below the threshold value and did not correspond to Pugam treatment. Roots and shoots biomass under 500 kg ha⁻¹ Pugam increased 58 and 45 folds compared to NPK treatment because Pugam released polyvalent cations that neutralized phenolic acids which otherwise are toxic to plants. The Pugam treatment did not increase the concentration and uptake of heavy metals by maize. The range of heavy metal concentrations were (mg kg⁻¹) 1.95-2.79 Pb, 0.2-0.3 As, 1.45-2.83 Cr, 0.05 Co, whereas Cd, Hg, and Ni were not detected. All ranges of heavy metal concentrations were much lower than the hazardous concentration threshold values.

* Corresponding author: igm_subiksa@yahoo.co.id

Pendahuluan

Lahan gambut di Indonesia luasnya mencapai 14,93 juta ha yang tersebar di Sumatera, Kalimantan dan Papua (Ritung *et al.* 2018). Lahan ini berpotensi untuk pengembangan pertanian, baik tanaman pangan maupun perkebunan, namun pemanfaatannya menghadapi banyak kendala yang berkaitan dengan sifat fisik dan kimia tanahnya. Kendala utama yang dihadapi adalah reaksi tanah yang sangat masam karena akumulasi asam-asam organik, khususnya asam-asam fenolat yang beracun bagi tanaman (Tsutsuki dan Kondo 1995; Stevenson 1994; Sabiham 1997; Agus dan Subiksa 2008). Hartley dan Whitehead (1984) menyatakan bahwa asam fenolat dengan konsentrasi 250 μM menurunkan sangat nyata serapan kalium dan fosfor pada gandum. Tsutsuki (1984) menyatakan konsentrasi asam fenolat 0,6-3,0 mM dapat menghambat pertumbuhan akar tanaman padi sampai 50%. Tadano *et al.* (1992) menyatakan bahwa konsentrasi asam p-hidroksibenzoat $>0,1$ mM dapat menurunkan pertumbuhan tanaman jagung. Asam fenolat dihasilkan dari pelapukan bahan organik yang kaya lignin (Andriese 1974; Noor 2014). Selain asam organik, terhambatnya pertumbuhan tanaman juga disebabkan karena kejenuhan basa sangat rendah (Dohong 1999; Sitorus *et al.* 1999; Masganti 2003), status hara makro dan mikro sangat rendah (Noor 2014). Kendala fisik yang menghambat pertumbuhan tanaman adalah BD gambut yang rendah (Agus dan Subiksa, 2008; Dariah *et al.* 2012), karena kadar air terlalu tinggi (Elon *et al.* 2011; Anshari 2010) serta laju subsiden yang tinggi (Maswar dan Agus 2014).

Untuk meningkatkan produktivitas lahan gambut dapat dilakukan dengan upaya pengelolaan air, ameliorasi dan pemupukan (Maftu'ah *et al.* 2014; Supriyo dan Maftu'ah. 2009). Pengalaman empiris, menunjukkan bahwa pupuk kandang serta bahan amelioran yang kaya dengan kation polivalen menjadi amelioran yang sangat efektif untuk meningkatkan produktivitas lahan dan stabilitas gambut (Mario dan Sabiham 2002; Sabiham dan Maswar 2014). Salah satu pembenah tanah dan pupuk mengandung kation polivalen yang terbukti efektif adalah Pugam (Subiksa *et al.* 2012). Pugam diformulasi dari terak baja yang mengandung logam berat. Bersasarkan PP. 101/2014 terak baja digolongkan dalam limbah B3 katagori 2 (KLHK 2015). Terak baja juga memiliki kandungan unsur hara tanaman, sehingga di Jepang bahan ini telah diakui sebagai pupuk silikat komersial sejak tahun 1955 (Feng Ma and Takahashi 2002).

Logam berat adalah unsur-unsur yang berbahaya bagi

kesehatan manusia, ternak maupun ikan. Oleh karenanya, pupuk yang diduga mengandung logam berat harus dilakukan pengujian terhadap dampak lingkungan. Dari aspek toksikologi, logam berat dapat digolongkan menjadi logam berat esensial (Zn, Cu, Fe, Co, Mn) yang dibutuhkan oleh organisme dalam jumlah tertentu, tetapi kalau berlebihan bersifat racun. Golongan kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun seperti Hg, Cd, Pb, Cr, As (Dody 2015; Darwis 2012; Wikipedia 2019). Sebagai contoh Racman (2015) menyatakan bahwa kadmium merupakan salah satu jenis logam berat yang berbahaya bagi tubuh manusia karena elemen ini berisiko tinggi terhadap pembuluh darah. Kadmium berpengaruh dalam jangka panjang dan dapat terakumulasi pada tubuh, khususnya hati dan ginjal.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji laju pelindian (*leachability*) logam-logam berat dan serapan logam berat oleh tanaman pada tanah gambut yang dipupuk dengan Pugam. Bila ada logam berat yang tercuci, maka diindikasikan sebagai potensi pencemaran lingkungan.

Bahan dan Metode

Penelitian dilakukan di Rumah Kaca Balai Penelitian Tanah Bogor pada bulan Juni-September 2013. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok dengan lima perlakuan dan empat ulangan (Tabel 1). Perlakuan kontrol adalah perlakuan tanpa penambahan pupuk sama sekali. Perlakuan NPK adalah perlakuan dengan pemupukan urea, SP-36 dan KCl dengan dosis masing-masing 9 g pot⁻¹; 6 g pot⁻¹; dan 4,5 g pot⁻¹. Perlakuan Pugam adalah pemupukan dengan pupuk khusus lahan gambut sebagai pupuk pengganti fosfat dengan dosis 15,15 g pot⁻¹; 30,30 g pot⁻¹; dan 45,45 g pot⁻¹ atau setara dengan 500 kg, 1000 kg, dan 1500 kg Pugam ha⁻¹. Penelitian menggunakan tanah gambut yang diambil dari Desa Sepucuk, Kabupaten OKI, Propinsi Sumatera Selatan dengan karakteristik kimia seperti disajikan pada Tabel 2. Pupuk Pugam dan SP-36 diaplikasikan sekaligus sehari sebelum tanam dan diaduk merata sampai kedalaman 10 cm. Pupuk KCl dan 50% pupuk urea diaplikasikan satu minggu setelah tanam (MST) dan 50% pupuk urea diaplikasikan 21 hari setelah tanam dengan cara ditugal pada tiga titik setiap pot. Tanaman indikator adalah jagung hibrida P-27 yang ditanam tiga biji per pot yang berisi 20 kg gambut. Tanaman jagung yang tumbuh seluruhnya dipelihara sampai panen biomas. Penyiraman menggunakan air demineralisasi atau air hujan setiap dua hari sekali dengan volume 600 ml. Volume air tersebut setara dengan rata-

rata curah hujan selama dua hari dihitung dari rata-rata curah hujan tahunan 1.600 mm di lokasi pengambilan contoh gambut.

Tabel 1. Perlakuan dan dosis pemupukan

Table 1. Treatments and fertilization rate

No	Perlakuan	Dosis perlakuan/pupuk (g pot ⁻¹)			
		Pugam	Urea	SP-36	KCl
1	Kontrol ^{*)}	-	-	-	-
2	NPK	-	7,6	10,7	4,55
3	Pugam 500	15,15	7,6	-	4,55
4	Pugam-1000 ^{**)}	30,30	7,6	-	4,55
5	Pugam-1500	45,45	7,6	-	4,55

Keterangan: *) Perlakuan kontrol tidak diberikan pupuk sama sekali;

***) Pugam 1000 = perlakuan pupuk Pugam setara dengan 1000 kg ha⁻¹

Tabel 2. Hasil analisis tanah gambut Sepucuk, Kabupaten OKI, Sumatera Selatan

Table 2. Analysis result of soil from Sepucuk, OKI Regency, South Sumatera

No	Parameter	Nilai	No	Parameter	Nilai
1	pH:H ₂ O	3,7	5	Nilai Tukar Kation	
	KCl	3,1		Ca (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	3,60
2	Bahan Organik:			Mg (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1,65
	C (%)	27		K (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,85
	N (%)	0,19		Na (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,70
	C/N	142		Jumlah (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	6,80
3	Ekstrak HCl 25%:		6	KTK (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	138
	P ₂ O ₅ (mg 100 g ⁻¹)	12	7	KB * (%)	5
	K ₂ O (mg 100 g ⁻¹)	9	8	Ekstrak DTPA:	
4	Asam Organik:			Fe (mg kg ⁻¹)	365,4
	Humat (%)	11,20		Mn (mg kg ⁻¹)	14,6
	Fulvat (%)	4,65		Cu (mg kg ⁻¹)	2,4
				Zn (mg kg ⁻¹)	4,5

Pengambilan contoh air licit (*leachate*) yang terakumulasi di dasar pot dilakukan tiga kali setiap dua minggu sekali yaitu pada 14 hari setelah perlakuan (HSP), 28 HSP dan 42 HSP. Total volume air yang diambil diukur untuk masing-masing pot untuk dijadikan dasar perhitungan jumlah unsur yang tercuci. Contoh air licit disaring dan dianalisis di laboratorium untuk mengetahui konsentrasi logam berat yang hilang melalui pelindian (*leaching*). Logam berat yang dianalisis meliputi Pb, Cd, Co, Ni, Cr, Mo, Ag, As, Sn, Se, Hg, Cu, dan Zn menggunakan AAS metode nyala. Tanaman jagung dipanen setelah berumur tujuh MST dan biomasnya

dianalisis untuk mengetahui serapan logam berat Pb, Cd, Co, Ni, Cr, Mo, Ag, As, Sn, Se, Hg, Cu, dan Zn oleh tanaman jagung menggunakan metode pengabuan basah nitrat perchlorat dan pengukuran dengan AAS metode nyala.

Pengamatan dilakukan terhadap pertumbuhan tinggi tanaman dua minggu sekali sebanyak empat kali sampai tanaman berumur 49 hari. Panen biomas dilakukan setelah tanaman berumur 49 hari dan dilakukan pengukuran terhadap berat kering masa akar, berat biomas basah dan berat biomas kering.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Pugam

Pugam diformulasi dari bahan baku PS-grit, produk olahan terak baja yang sudah dihaluskan dengan berbagai ukuran butir, serta bahan lainnya seperti fosfat alam dan dolomit. PS-grit yang digunakan berukuran minimal 60 mesh, sedangkan bahan lainnya berukuran minimal 80 mesh. Karakteristik PS-grit dan pupuk Pugam ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Pugam adalah pupuk sumber hara makro primer P, hara makro sekunder Ca dan Mg serta unsur mikro Cu dan Zn. Selain sebagai pupuk, Pugam juga merupakan sumber kation polivalen Fe dan Al yang berfungsi untuk menetralkan asam-asam organik fenolat yang berbahaya untuk pertumbuhan akar tanaman.

Tabel 3. Kandungan hara dan logam sumber kation polivalen pada Pugam

Table 3. Nutrients and metal contents as source of polyvalent cations of Pugam

Parameter	Unit	Nilai
pH		8,72
Kadar air (%)	%	3,35
P ₂ O ₅	%	13,16
K ₂ O	%	0,04
CaO	%	27,20
MgO	%	9,65
Fe	%	8,87
Al	%	5,31
Mn	mg kg ⁻¹	2663
Cu	mg kg ⁻¹	1546
Zn	mg kg ⁻¹	1114

Di antara 13 jenis logam berat yang dianalisa dari contoh Pugam, kandungan Cu dan Zn paling tinggi. Kedua

unsur ini dalam PP. 101/2014 digolongkan sebagai logam berat, tetapi sangat dibutuhkan tanaman sehingga digolongkan sebagai unsur hara mikro esensial, karena diperlukan dalam jumlah relatif kecil. Tingginya kandungan kedua unsur hara ini, selain berasal dari bahan baku utama, Cu dan Zn juga ditambahkan dalam proses formulasi pupuk. Selain Cu dan Zn, jenis logam berat yang kandungannya cukup signifikan adalah Cr dan Pb yaitu masing-masing sebesar 96 mg kg⁻¹ dan 17,3 mg kg⁻¹. Keberadaan logam berat ini ditengarai berasal dari bahan baku besi scrap yang tercampur dengan peralatan rumah tangga yang tidak murni besi. Penelitian LAPI-ITB juga menunjukkan bahwa Cr merupakan logam berat yang paling banyak dikandung oleh terak baja dari PT Krakatau Steel (LAPI-ITB 2011). Keberadaan logam berat ini belum dikategorikan membahayakan lingkungan karena masih berada dibawah ambang batas toleransi sesuai PP. 104/2014 dan sebagian besar logam tersebut berbentuk oksida dan tidak larut. Logam berat lainnya umumnya sangat rendah atau tidak terdeteksi sehingga secara umum dapat dikatakan Pupuk Pugam tergolong aman untuk digunakan untuk pertanian.

Tabel 4. Kandungan logam berat PS-grit dan pupuk Pugam

Table 4. Heavy metals content of PS-grit and Pugam fertilizer

No.	Jenis Logam berat	Unit	PS-grit	Pugam
1	Timbal (Pb)	mg kg ⁻¹	50,8	17,3
2	Cadmium (Cd)	mg kg ⁻¹	4,5	1,6
3	Arsen (As)	mg kg ⁻¹	Td	Td
4	Air raksa (Hg)	mg kg ⁻¹	Td	Td
5	Chromium (Cr)	mg kg ⁻¹	394	96
6	Cobalt (Co)	mg kg ⁻¹	1,4	Td
7	Nickel (Ni)	mg kg ⁻¹	Td	Td
8	Perak (Ag)	mg kg ⁻¹	Td	Td
9	Timah (Sn)	mg kg ⁻¹	Td	Td
10	Molybdenum (Mo)	mg kg ⁻¹	Td	Td
11	Selenium (Se)	mg kg ⁻¹	Td	Td
12	Tembaga (Cu)	mg kg ⁻¹	35,2	1546
13	Seng (Zn)	mg kg ⁻¹	272,8	1114

Keterangan: Td = tidak terdeteksi

Pelindian Logam Berat

Unsur logam berat yang terlindi dari tanah gambut yang diberi pupuk Pugam diamati dari air licit (*leachate*) yang diambil dari dasar pot. Karena gambut memiliki sifat daya hantar *hidrolik* yang tinggi maka kelebihan air saat hujan akan mengalir secara vertikal maupun horizontal.

Hal ini dibuktikan oleh Sosiawan *et al.* (2014) variasi temporal muka air tanah di lahan gambut mengikuti pergerakan muka air di saluran tersier. Air yang melewati kolom gambut tersebut akan membawa kation/anion terlarut termasuk logam berat. Tanah gambut yang memiliki gugus karboksil dan fenol memiliki kemampuan berikatan dengan logam berat dengan afinitas (konstanta stabilitas) yang berbeda menurut deret liotropik. Schnitzer (1986) konstanta stabilitas dipengaruhi oleh pH tanah gambut. Pada pH 3,7 deret liotropik konstanta stabilitas ikatan logam berat dan ligan organik adalah Hg>Fe>Pb>Cu>Cr>Cd=Zn=Ni=Co.

Logam berat umumnya memiliki afinitas yang tinggi terhadap senyawa organik dan cenderung membentuk ikatan koordinasi yang kuat, akan tetapi bila konsentrasinya tinggi juga bisa larut dan terbawa air. Di antara 13 jenis logam berat yang dianalisis, hanya tiga jenis logam berat yang terdeteksi ada dalam air licit yaitu Pb, As, dan Zn (Tabel 3). Berdasarkan PP. No. 82/2001 konsentrasi 3 logam berat tersebut masih di bawah nilai ambang batas (NAB) konsentrasi logam berat pada air yang diperuntukkan pertanian. Jenis logam berat lainnya tidak terdeteksi, walaupun dalam pupuk Pugam logam tersebut ada dalam jumlah yang cukup tinggi seperti Cr dan Cu. Hal ini disebabkan karena Cu dan Cr memiliki afinitas yang tinggi untuk berikatan dengan ligan organik. Hal yang sama juga dikemukakan oleh Saragih (1996) dan Dohong (1999) yang menyatakan bahwa keberadaan asam-asam karboksilat dan fenolat dalam gambut berfungsi sebagai pengikat logam, dimana urutan kekuatan ikatannya adalah Cu>Pb>Zn>Ni>Co>Mn. Sementara itu Sabiham dan Maswar (2014) menyatakan bahwa kation logam polivalen berinteraksi dengan gugus fungsional gambut, kekuatan ikatannya sesuai dengan deret Fe>Al>Cu>Ca>Zn>Mn. Pupuk makro dan mikro juga penting untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman, selain berfungsi juga sebagai amelioran. Ameliorasi dan pemupukan bersifat sinergis karena ameliorasi meningkatkan efektivitas pemupukan (Subiksa 2014).

Stabilitas gambut terkait dengan proses kompleksasi asam-asam organik sehingga lebih tahan terhadap degradasi sehingga emisi karbon berkurang (Subiksa 2013). Kompleksasi asam-asam organik fenolat oleh kation polivalen mengurangi sifat meracuni asam-asam tersebut sehingga perkembangan akar tanaman tidak terganggu (Rachim 1995).

Konsentrasi logam berat yang ada pada air licit tidak berkorelasi dengan perlakuan pupuk Pugam, baik pada dosis rendah maupun tinggi. Secara umum konsentrasi cemaran logam berat pada air licit dapat dikategorikan

Tabel 5. Rata-rata konsentrasi logam berat pada licit dari tiga kali pengambilan sampel

Table 5. The average heavy metal concentrations of leachate from three consecutive samplings

Perlakuan	Pb	Cd	As	Hg	Cr	Ag	Cu	Zn	Se
mg L ⁻¹								
Kontrol	0,47	td	0,04	td	td	td	td	0,01	0,127
NPK	0,38	td	0,03	td	td	td	td	0,01	0,123
Pugam 500	0,40	td	0,01	td	td	td	td	0,02	0,107
Pugam 1000	0,38	td	0,02	td	td	td	td	0,02	0,133
Pugam 1500	0,39	td	0,01	td	td	td	td	0,04	0,160
Nilai Ambang Batas*	1,00	0,01	1,00	0,05	1,00	-	0,2	2,0	

Keterangan *) Nilai Ambang Batas kualitas air kelas IV yang layak untuk pertanian sesuai PP 82/2001
td = tidak terdeteksi

Tabel 6. Rata-rata volume kumulatif air licit dari 3 pengambilan contoh sampai 42 hari setelah perlakuan (HSP)

Table 6. The average cumulative leachate volume taken from 3 consecutive samplings up to 42 days after treatment

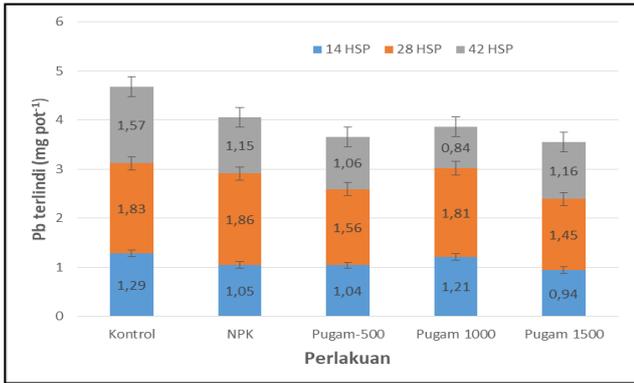
No	Perlakuan	Rataan volume air licit (ml pot ⁻¹)			
		14 hari	28 hari	42 hari	Jumlah
1	Kontrol	2,624	3,841	3,729	10,194
2	NPK	2,694	4,132	3,714	10,540
3	Pugam 500	2,480	3,535	3,111	9,126
4	Pugam 1000	2,638	3,603	3,248	9,489
5	Pugam 1500	2,420	3,628	3,129	9,177

aman bagi lingkungan karena konsentrasinya lebih rendah dari nilai ambang batas yang ditetapkan pada PP 82/2001. Palar (1994) menyatakan bahwa konsentrasi lethal (mematikan) logam berat untuk ikan adalah: Pb 188 mg L⁻¹; Cd 22-55 mg L⁻¹; Cu 2,5-3,5 mg L⁻¹; Zn 60 mg L⁻¹; dan Ni 350 mg L⁻¹. Dengan demikian, pemberian Pugam pada tanah gambut tidak berpotensi menyebabkan pencemaran logam berat pada air tanah di lahan gambut maupun lingkungan perairan umum, karena logam-logam tersebut terikat kuat oleh ligan organik.

Di antara empat logam berat yang terdeteksi ada dalam air licit, ternyata konsentrasi Pb paling tinggi yaitu 0,38-0,47 mg kg⁻¹. Konsentrasi Pb paling besar terdapat pada perlakuan kontrol yaitu 0,47 mg kg⁻¹. Dari sekitar 10 liter air licit per pot selama 42 hari, maka total kumulatif logam berat Pb yang terlindi adalah 4,7 mg pot⁻¹ (Gambar 1). Sedangkan perlakuan Pugam dengan dosis setara 500 – 1500 kg ha⁻¹ pada tanah gambut konsentrasi logam berat Pb justru lebih kecil dan total Pb yang terlindi <4 mg pot⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian pupuk Pugam tidak berkontribusi dalam pelindian logam berat Pb, tetapi sebaliknya membantu mengurangi kelarutannya karena Pugam memberi efek amelioratif dan meningkatkan pH.

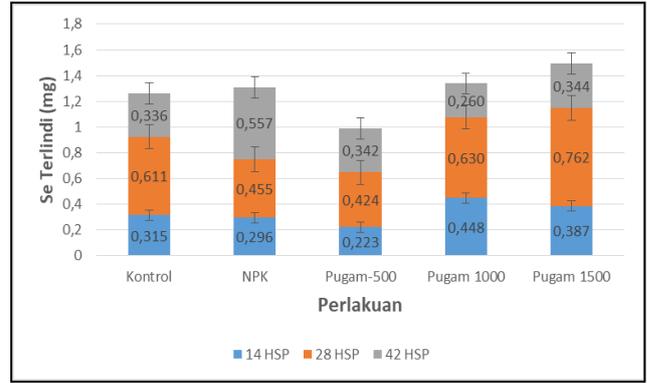
Hal yang sama juga untuk logam berat As, dimana pada perlakuan kontrol konsentrasi As dalam air licit lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan Pugam. Kelarutan As juga berkaitan dengan pH tanah, dimana kelarutan As akan meningkat bila pH tanah makin rendah. Gambar 2 menunjukkan bahwa jumlah kumulatif logam berat As yang terlindi pada perlakuan kontrol sekitar 0,4 mg pot⁻¹, NPK sekitar 0,3 mg pot⁻¹, sementara itu dengan pupuk Pugam 1500, total As yang terlindi <0,1 mg pot⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan Pugam pada tanah gambut tidak berkontribusi pada kelarutan logam berat As.

Logam berat Se dan Zn dalam jumlah kecil diperlukan oleh tanaman untuk pertumbuhan yang optimal. Namun bila berlebihan, bisa berdampak buruk pada tanaman dan lingkungannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Se tidak terdeteksi keberadaannya pada Pugam, namun hasil analisis air licit terdeteksi adanya Se yang terlindi. Hal ini menjadi indikasi bahwa Se yang terlindi adalah asli dari tanah. Pelindian Se terjadi pada semua perlakuan, namun jumlahnya tidak ada perbedaan yang nyata. Gambar 3 menunjukkan bahwa jumlah kumulatif Se yang tercuci pada perlakuan kontrol sekitar 1,26 mg pot⁻¹, sedangkan pada perlakuan Pugam 1500 jumlah Se terlindi sekitar 1,49 mg pot⁻¹.



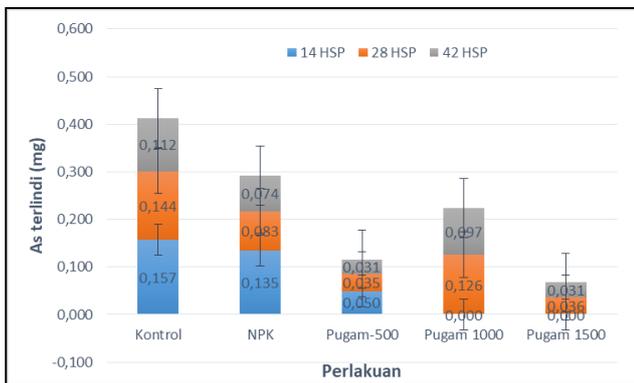
Gambar 1. Jumlah kumulatif Pb yang hilang terlindi pada berbagai perlakuan pupuk pada tanah gambut dalam rentang waktu 42 hari pelindian

Figure 1. Total cumulative leached Pb within 42 days periods under different fertilization treatments



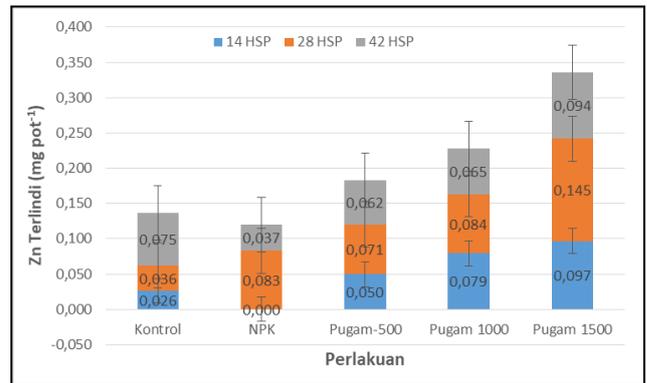
Gambar 3. Jumlah kumulatif Se yang hilang terlindi pada berbagai perlakuan pemupukan pada tanah gambut dalam rentang waktu 42 pelindian

Figure 3. Total cumulative Se loss through leaching within 42 days period after treatment application



Gambar 2. Jumlah kumulatif As yang hilang terlindi pada berbagai perlakuan pemberian pupuk pada tanah gambut dalam rentang waktu 42 hari setelah perlakuan

Figure 2. Total cumulative As loss through leaching within 42 days periods under different fertilization treatments



Gambar 4. Jumlah kumulatif Zn yang hilang terlindi pada berbagai perlakuan pemupukan pada tanah gambut dalam rentang waktu 42 hari pelindian

Figure 4. Total cumulative of Zn loss through leaching within 42 days period after treatment application

Logam berat Zn terdeteksi mengalami pelindian pada semua perlakuan, baik kontrol, NPK maupun Pugam. Perlakuan NPK mengalami pelindian paling rendah yaitu sekitar 0,12 mg pot⁻¹, berbeda nyata dengan perlakuan Pugam 1500 mengalami pelindian Zn paling tinggi yaitu 0,40 mg pot⁻¹ (Gambar 4). Hal ini disebabkan karena Pugam mengandung Zn cukup tinggi yaitu sekitar 1.114 mg kg⁻¹. Hara Zn adalah unsur hara esensial bagi tanaman. Oleh karenanya Zn ditambahkan ke dalam Pugam dalam proses formulasi pupuk agar mutu pupuk Pugam menjadi lebih baik.

Menurut PP. 101/2014 unsur Tembaga (Cu) tergolong unsur logam berat, namun juga tergolong unsur hara mikro esensial untuk pertumbuhan tanaman. Unsur hara ini sering dikaitkan dengan fertilitas polen sehingga penting dalam proses penyerbukan. Pugam mengandung Cu cukup tinggi yaitu 1.546 mg kg⁻¹ karena sengaja ditambahkan dalam proses formulasi untuk meningkatkan mutu pupuk. Dari tiga kali analisis air licit menunjukkan bahwa Cu tidak terdeteksi mengalami pelindian. Hal ini menunjukkan bahwa Cu memiliki afinitas yang kuat dengan ligan organik, sehingga semua Cu terjerap oleh bahan organik. Hal ini sesuai dengan Dohong (1999) yang menyatakan bahwa Cu memiliki afinitas tertinggi dengan asam-asam organik karboksilat dan fenolat dibandingkan

logam lainnya, dimana urutan pengikatannya adalah $Cu > Pb > Zn > Ni > Co > Mn$.

Logam berat cromium (Cr) juga menunjukkan tidak mengalami pelindian karena tidak terdeteksi dalam analisis air licit. Hasil analisis pupuk Pugam, kandungan Cr cukup tinggi yang berasal dari bahan baku terak baja. Hal ini menunjukkan bahwa Cr juga memiliki afinitas yang tinggi terhadap ligan organik dan membentuk ikatan yang kuat dengan asam-asam organik. Dengan demikian kandungan Cr pada Pugam tidak akan mencemari lingkungan perairan. Sebaliknya jerapan chromium (Cr) oleh asam-asam organik aromatik akan membantu proses netralisasi asam-asam organik beracun.

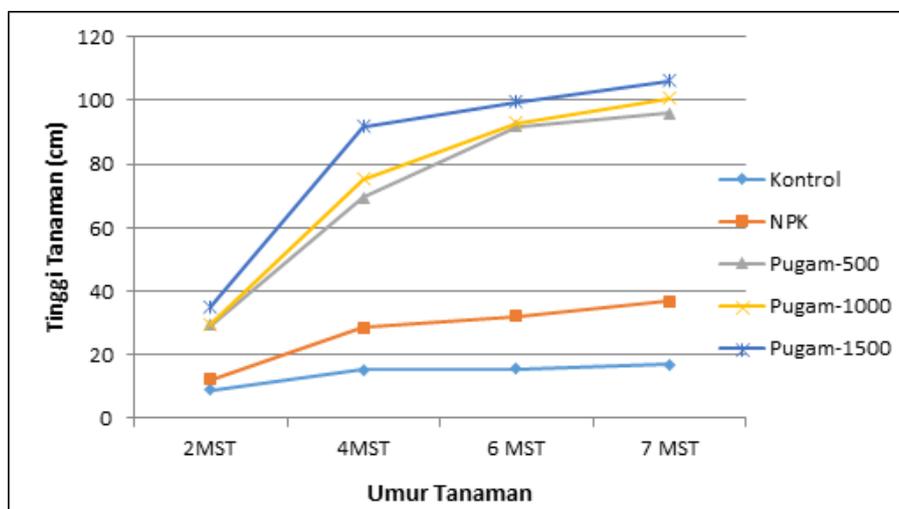
Pertumbuhan Tanaman

Pertumbuhan tanaman jagung yang ditanam pada tanah gambut secara alami pada umumnya kurang baik, karena sistem perakaran tanaman tidak berkembang dengan baik.

Penyebabnya adalah asam-asam organik fenolat yang beracun dan menghambat pertumbuhan akar. Perlakuan kontrol dan NPK pertumbuhan tinggi tanaman sangat terhambat dan kerdil Gambar 5. Warna daun terlihat menguning dan pucat yang menandakan pembentukan klorofil sangat terhambat. Penambahan pupuk Pugam berdampak positif pada pertumbuhan tinggi tanaman dan warna daun. Pemupukan dengan Pugam berpengaruh sangat nyata terhadap tinggi tanaman jagung dibandingkan dengan perlakuan Kontrol maupun NPK konvensional. Tanaman jagung pada perlakuan Kontrol tidak mau berkembang dan 75% mengalami kematian setelah umur 2 minggu. Hal ini disebabkan karena kondisi kemasaman tanah gambut sangat tinggi dan kemungkinan akar tidak berkembang, karena kandungan asam organik beracun. Tanaman jagung pada perlakuan NPK konvensional juga mengalami hambatan dalam pertumbuhannya dan 25% mengalami kematian. Setelah diteliti, ternyata akar tanaman mengalami pembusukan sehingga tidak mampu



Gambar 5. Tampilan tanaman pada berbagai perlakuan
 Figure 5. Crop performance under different treatments



Gambar 6. Rata-rata tinggi tanaman jagung selama dua sampai tujuh minggu setelah tanam (MST)
 Figure 6. The average maize plant height two to seven weeks after seeding (MST)

menyerap air dan hara. Gejala paling umum terlihat daun tanaman berwarna kuning pucat, karena pembentukan klorofil daun terhambat.

Pertumbuhan tanaman jagung pada perlakuan Pugam jauh lebih baik dibandingkan perlakuan kontrol dan NPK. Pugam memperbaiki media perakaran tanaman jagung sehingga pertumbuhan tanaman menjadi lebih cepat dibandingkan perlakuan lainnya. Hasil yang hampir sama juga dikemukakan oleh Purnomo dan Subiksa (2012). Pengaruh langsung pemberian Pugam adalah mengurangi kelarutan asam-asam organik beracun sehingga perkembangan akar tanaman tidak mengalami hambatan. Hal ini terlihat dari masa akar tanaman jagung yang diberi perlakuan Pugam jauh lebih tinggi dibandingkan bila hanya diberi pupuk NPK konvensional. Di antara perlakuan Pugam, perlakuan dosis 1500 kg ha⁻¹ menghasilkan masa akar paling tinggi dibandingkan dengan dosis yang lebih rendah.

Seiring dengan membaiknya perkembangan akar tanaman, pertumbuhan tanaman di atas tanah juga mengalami perkembangan yang jauh lebih baik bila dibandingkan hanya dengan perlakuan NPK. Bobot biomasa tanaman meningkat sangat signifikan dengan perlakuan Pugam (Tabel 7). Biomas segar maupun kering pada perlakuan Kontrol maupun NPK konvensional sangat rendah karena tanaman tidak berkembang. Pemberian Pugam, tidak hanya memperbaiki kondisi perakaran tanaman melalui proses penetralan asam-asam organik beracun, tetapi juga mensuplai hara makro dan mikro serta

meningkatkan efisiensi pemupukan. Dengan berkembangnya akar, maka serapan unsur hara dan air akan lebih efektif. Tanaman juga terlihat lebih sehat karena pembentukan klorofil menjadi lebih baik yang ditandai dengan warna daun lebih hijau. Unsur hara yang diperlukan untuk pembentukan klorofil seperti N, Mg, dan Fe serapannya diperkirakan lebih tinggi.

Serapan Logam Berat

Hasil analisis di laboratorium menunjukkan bahwa di antara 13 jenis logam berat yang dianalisis, terdapat 6 jenis logam berat terserap oleh tanaman yaitu Pb, As, Cr, Co, Cu dan Zn Tabel 8. Konsentrasi logam berat Pb dan Cr terserap paling tinggi, tetapi tidak perbedaan antara perlakuan NPK dengan perlakuan Pugam. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan Pugam tidak meningkatkan konsentrasi logam berat pada tanaman jagung. Konsentrasi logam berat As dan Co pada tanaman jagung tergolong rendah dan tidak bersesuaian dengan perlakuan Pugam. Artinya bahwa perlakuan Pugam bukan merupakan penyebab adanya serapan logam berat tersebut. Logam berat Cu dan Zn yang merupakan unsur hara esensial serapannya juga tidak terlalu besar yaitu 1-3 mg kg⁻¹ untuk Cu dan 1 – 4 mg kg⁻¹ untuk konsentrasi Zn. Alloway (1990) menyatakan bahwa nilai ambang batas konsentrasi beberapa logam berat dalam tanaman adalah: Pb = 50 mg kg⁻¹, Cd = 5 – 30 mg kg⁻¹, Co = 15 – 30 mg kg⁻¹, Cr = 5 – 30 mg kg⁻¹, Ni = 5 – 30 mg kg⁻¹, Cu = 20 – 100 mg kg⁻¹ dan Zn = 100 – 400 mg kg⁻¹.

Tabel 7. Rata-rata tinggi tanaman, berat kering akar, berat brangkasan segar dan berat brangkasan kering

Table 7. The average plant height, dry root weight, fresh shoot weight and dry shoot weight

No.	Perlakuan	Tinggi Tanaman cm	Berat Masa akar g tanaman ⁻¹	Berat Brangkasan segar g tanaman ⁻¹	Berat Brangkasan kering g tanaman ⁻¹
1	Kontrol	16,85 c	0,03 c	0,21 c	0,04 c
2	NPK	36,96 b	0,44 c	6,24 c	0,71 c
3	Pugam 500	96,07 a	25,93 b	174,66 b	32,18 b
4	Pugam 1000	100,58 a	28,96 b	175,24 b	33,84 b
5	Pugam 1500	106,09 a	47,38 a	218,15 a	45,71 a

Tabel 8. Konsentrasi logam berat Pb, Cd, As, Hg, Cr, Co dan Ni pada biomas tanaman jagung

Table 8. Heavy metals Pb, Cd, As, Hg, Cr, Co and Ni concentrations in maize shoots

Perlakuan	Konsentrasi logam berat pada tanaman mg kg ⁻¹						
	Pb	Cd	As	Hg	Cr	Co	Ni
Kontrol*	-	-	-	-	-	-	-
NPK	2,79	td	0,3	td	2,83	0,05	Td
Pugam 500	2,57	td	0,2	td	2,1	0,05	td
Pugam 1000	1,96	td	0,2	td	2,15	0,00	td
Pugam 1500	1,95	td	0,3	td	1,45	0,04	td
NAB**	50	5-30	-	2-5	5-30	15-30	5-30

Keterangan: Kontrol* = tidak ada contoh tanaman karena tidak tumbuh

NAB** = nilai ambang batas kritis konsentrasi logam berat pada tanaman menurut Alloway (1995)

Tabel 9. Konsentrasi logam berat Ag, Sn, Mo, Se, Cu dan Zn pada biomas tanaman jagung dengan berbagai perlakuan

Table 9. Concentrations of heavy metals Ag, Sn, Mo, Se, Cu dan Zn in maize shoots under different treatments

Perlakuan	Konsentrasi logam berat pada tanaman					
	Ag	Sn	Mo	Se	Cu	Zn
mg kg ⁻¹					
Kontrol*	-	-	-	-	-	-
NPK	td	td	td	td	2	1,5
Pugam-500	td	td	td	td	1	1
Pugam 1000	td	td	td	td	2	4
Pugam 1500	td	td	td	td	3	3
NAB**)	-	-	-	-	20-100	100-400

Keterangan *) masa tanaman pada perlakuan kontrol tidak cukup untuk dilakukan analisis kimia di laboratorium.

NAB** = nilai ambang batas kritis konsentrasi logam berat pada tanaman menurut Alloway (1995)

td = tidak terdeteksi

Kesimpulan

Pugam mengandung logam berat chromium (Cr), seng (Zn), timbal (Pb), dan tembaga (Cu), dengan konsentrasi yang tergolong rendah, sehingga tidak membahayakan pertumbuhan tanaman. Pada saat diaplikasikan pada tanah gambut, sebagian dari logam berat tersebut terlindi dan terdeteksi pada air licit, namun konsentrasinya masih di bawah nilai ambang batas (NAB) konsentrasi logam berat yang diizinkan menurut PP. 82/2001 tentang kualitas air. Logam berat Cr dan Cu cukup banyak terdeteksi pada pupuk Pugam yaitu 96 mg Cr kg⁻¹ dan 1546 mg Cu kg⁻¹, tetapi tidak terdeteksi pada air licit. Logam berat Pb, As, Se dan Zn mengalami pelindian yang termonitor konsentrasi logam air licit, tetapi konsentrasinya masih di bawah NAB yang ditetapkan pada PP 82/2001. Penambahan Pugam pada tanah gambut tidak berkorelasi positif dengan konsentrasi logam berat yang terdeteksi pada air licit.

Perlakuan pupuk Pugam meningkatkan pertumbuhan tanaman jagung ditandai dengan bobot masa akar dan biomas meningkat sangat nyata. Perlakuan Pugam 500 kg ha⁻¹ menghasilkan bobot masa akar dan biomas masing-masing 25,93 g tanaman⁻¹, dan 32,18 g tanaman⁻¹, atau meningkat masing-masing 58 kali dan 45 kali lipat dibandingkan perlakuan NPK. Pupuk Pugam saat larut melepaskan kation polivalen yang mampu menetralkan asam fenolat yang beracun bagi tanaman, sehingga pertumbuhan tanaman jagung menjadi lebih baik.

Perlakuan Pugam tidak meningkatkan konsentrasi dan serapan logam berat oleh tanaman jagung. Kisaran konsentrasi logam berat adalah 1,95-2,79 mg Pb kg⁻¹; 0,2-0,3 mg As kg⁻¹; 1,45-2,83 mg Cr kg⁻¹; 0,05 mg Co kg⁻¹; sedangkan Cd, Hg, dan Ni tidak terdeteksi. Semua kisaran

konsentrasi logam tersebut jauh di bawah nilai ambang batas konsentrasi logam berat yang membahayakan kesehatan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Balai Penelitian Tanah yang telah membiayai penelitian ini. Terima kasih juga kepada Tim evaluator dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang telah memberikan masukan berharga. Terima kasih juga diucapkan kepada semua peneliti dan teknisi yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Agus F, Subiksa IGM. 2008. Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Balai Penelitian Tanah dan Word Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor.
- Alloway BJ. 1995. Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional, London, UK. 2nd Edition.
- Andriess JP. 1974. Tropical Peats in South East Asia. Dept. of Agric. Res. Of the Royal Trop. Inst. Comm. 63. Amsterdam 63 p.
- Dariah A, Susanti E, Mulyani A, Agus F. 2012. Faktor penduga karbon tersimpan di lahan gambut. Hal. 213-223. Dalam: Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan gambut Berkelanjutan.BBSDLP.Badan Litbang Pertanian.Bogor, 4 Mei 2012.
- Darwis, R. 2012. Limbah logam berat. <http://rahmiatkins.blogspot.com/2012/10/limbah-logam-berat.html>.

- Dohong S. 1999. Peningkatan produktivitas tanah gambut yang disawahkan dengan pemberian bahan amelioran tanah mineral berkadar besi tinggi. Disertasi Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Elon SV, Boelter DH, Palvanen J, Nichols DS, Malterer T, Gafni A. 2011. *Physical Properties of Organic Soils*. Taylor and Francis Group, LLC.
- Feng Ma J. and Takahashi E. 2002. *Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan*. Elsevier.
- Hartley RD, Whitehead DC. 1984. Phenolic acid in soil and their influence of plant growth and soil microbial processes. In D. Vaughan and Malcolm (Eds). *Soil Organic Matter and Biological Activity* pp: 109-149. Martinus Nijhoff/Dr. W.Junk Publisher. Lancaster.
- KLHK, 2015. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah dan B3, Kementerian LHK.
- LAPI-ITB. 2011. Laporan Akhir Kajian Pemanfaatan Slag Sebagai Agregat Campuran Aspal dan Road Base: Kelayakan Teknis dan Dampak Lingkungan. PT. LAPI Institut Teknologi Bandung, 2011.
- Maftu'ah E, Indrayati L, Mukhlis. 2014. The improvement of idle peatland productivity for paddy through organic amelioration. In Husen *et al.* (Eds) *Proceeding International Workshop on Sustainable Management of Lowland for Rice Production*. Banjarmasin 27-28 September 2012.
- Mario MD, Sabiham S. 2002. Penggunaan tanah mineral yang diperkaya oleh bahan berkadar Fe tinggi sebagai amelioran dalam meningkatkan produksi dan stabilitas gambut. *Jurnal Agroteksos*. 2(1):35-45.
- Masganti. 2003. Kajian Upaya Meningkatkan Daya Penyediaan Fosfat dalam Gambut Oligotrofik. Disertasi. Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta. 350 hal.
- Maswar, Agus F. 2014. Cadangan karbon dan laju subsiden pada beberapa jenis penggunaan lahan dan lokasi lahan gambut tropika Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan Gambut Terdegradasi untuk Emisi GRK dan Peningkatan Nilai Ekonomi*.
- Noor M, Masganti, Agus F. 2014. Pembentukan dan karakteristik gambut tropika Indonesia. Dalam Agus *et al.* (Eds). *Lahan Gambut Indonesia: Pembentukan, Karakteristik, dan Potensi Mendukung Ketahanan Pangan*. IAARD Press.
- Purnomo J, Subiksa IGM. 2012. Pengaruh Pugam terhadap pertumbuhan dan produksi jagung serta emisi GRK pada tanah Gambut. *Pros. Sem. Nas. Kemandirian Pangan*.
- Ritung *et al.* 2018. *Sumber Daya Lahan Pertanian Indonesia*. Dalam Husen *et al.* (Eds). IAARD Press.
- Rachim A. 1995. Penggunaan kation-kation polivalen dalam kaitannya dengan ketersediaan fosfat untuk meningkatkan produksi jagung pada tanah gambut. Disertasi. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Sabiham S, Maswar. 2014. Strategi pengelolaan lahan gambut terdegradasi untuk pertanian berkelanjutan: Landasan Ilmiah. Dalam Agus *et al.* (Eds). *Lahan Gambut Indonesia: Pembentukan, Karakteristik, dan Potensi Mendukung Ketahanan Pangan*. IAARD Press.
- Sabiham S. 1997. Use of Selected Cations for Controlling Toxic phenolic acids in peat. *J.II. Pert.* 7(1):1-7.
- Sitorus SRP, Sriharyati, Selari M, Subagyo H. 1999. Pola penyebaran tanah gambut dan sifat-sifat tanah antara beberapa sungai utama pada areal pengembangan lahan gambut satu juta hektar Provinsi Kalimantan Tengah. *Agrista*. 4(1):50-63.
- Sosiawan H, Kartiwa B, Nugroho WT, Syahbuddin H. 2014. Variasi temporal dan spasial tinggi muka air tanah gambut di lokasi demplot ICCTF Jabiren Kalimantan Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan Gambut Terdegradasi untuk Mitigasi Emisi GRK dan Nilai Ekonomi*.
- Stevenson FJ. 1994. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, and Reactions*. John Wiley and Sons. Inc. New York. 443 p.
- Subiksa IGM. 2014. Pugam, a specific fertilizer for peatland to reduce carbon emission and improve soil productivity. In Husen *et al.* (Eds) *Proceeding International Workshop on Sustainable Management of Lowland for Rice Production*. Banjarmasin 27-28 September 2012.
- Subiksa IGM. 2013. Peran pugam dalam penanggulangan kendala fisik lahan dan mitigasi gas rumah kaca dalam system usahatani lahan gambut. Hal. 333-344 Dalam *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- Subiksa IGM, Hartatik W, Agus F. 2012. Pengelolaan lahan gambut secara berkelanjutan. Hlm.73-88. Dalam Nurida *et al.* (Eds.). *Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan*. Balai Penelitian Tanah, BBSDP, Badan Litbang Pertanian.
- Supriyo A. dan Maftu'ah E. 2009. Teknologi rehabilitasi lahan gambut terlantar untuk budidaya padi. *Jurnal Tanah dan Lingkungan IX* (1).
- Tadano TK, Yonebayashi, Saito S. 1992. Effect of phenolic acids on the growth and occurrence of sterility in crop plant. In K. Kyuma *et al.* (Eds) pp: 358-369. *Coastal Lowland Ecosystem in Southern Thailand and Malaysia*. Showado Printing Co. Kyoto.

- Tsutsuki K. 1984. Volatile product and low molecular-weight products of the anaerobic decomposition of organic matter. Int. Rice Res Institute, Soil Organic Matter pp: 329-343.
- Tsutsuki K, Kondo R. 1995. Lignin-derived phenolic compounds in different type of peat profile in Hokkaido Japan. Soil Sci. And Plant Nutrition. 41(3):515-527.
- Dody. 2015. Bahaya Pencemaran Air oleh Logam Berat. Pengelolaan Air Bersih, PT. Enerba Teknologi. <https://pengolahanair-bersih.blogspot.com/2015/09/bahaya-pencemaran-air-oleh-logam-berat.html>.
- Racman T. 2015. Pencemaran logam berat: Arsen dan Kadmium. Program Studi Oceanografi, Fakultas Teknologi dan Ilmu Kebumihan Institut Teknologi Bandung. https://www.academia.edu/16990174/PENCEMARAN_LOGAM_BERAT_ARSEN_DAN_KADMIUM.
- Wikipedia, 2019. Logam Berat. https://id.wikipedia.org/wiki/Logam_berat#Logam_berat_nutrisi_esensial.