

Karakteristik Tanah Sawah dari Endapan Lakustrin di Sulawesi

Characteristics of Paddy Soils from Lacustrine Deposit in Sulawesi

Hikmatullah* dan Suparto

Peneliti Badan Litbang Pertanian di Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Jl. Tentara Pelajar No. 12, Bogor 16114

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 28 Januari 2014

Disetujui: 17 Maret 2014

Kata kunci:

Cadangan mineral
Endapan lakustrin
Tanah sawah
Sifat kimia
Sulawesi

Keywords:

Mineral reserve
Lacustrine deposit
Paddy soils
Chemical properties
Sulawesi

Abstrak. Dataran lakustrin di Sulawesi umumnya digunakan untuk lahan sawah, akan tetapi penelitian karakteristik mineral dan sifat-sifat fisik-kimianya masih sedikit dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari komposisi mineralogi dan sifat-sifat kimia tanah sawah dari endapan lakustrin yang berasal dari beberapa sumber bahan induk. Sebanyak delapan profil tanah sawah dari endapan lakustrin dari daerah-daerah Tondano, Kotamobagu dan Dumoga (Sulawesi Utara), Limboto dan Paguyaman (Gorontalo), Napudan Bariri (Sulawesi Tengah), dan Sengkang (Sulawesi Selatan) telah diteliti sifat-sifat morfologinya di lapangan dan sebanyak 36 contoh tanah telah dianalisis komposisi mineral fraksi pasir dan liat, serta sifat-sifat fisik-kimianya di laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi mineral dan sifat-sifat fisik kimia tanah sawah tersebut cukup bervariasi yang dipengaruhi oleh sumber bahan induknya. Tanah sawah Tondano seluruh lapisannya dipengaruhi bahan vulkan intermedier, yang mengandung gelas vulkan tinggi (54-80%), asosiasi mineral plagioklas-piroksen dan haloisit hidrat-alofan. Tekstur lempung berdebu, kandungan C organik dan KTK tanah tinggi (31-39 cmol_c kg⁻¹), dan bereaksi masam (pH 4,5-4,9). Tanah sawah Kotamobagu dan Dumoga juga dipengaruhi bahan vulkan intermedier, dengan sedikit gelas vulkan (2-5%), asosiasi plagioklas-amfibol-piroksen dan semektit-kaolinit. Meskipun mengandung semektit, KTK tanahnya rendah-sedang (11-23 cmol_c kg⁻¹). Berbeda dengan tanah sawah di atas, tanah sawah Limboto, Paguyaman dan Sengkang dipengaruhi oleh rombakan bahan vulkan masam, sedimen dan metamorfik, yang didominasi oleh mineral kuarsa, asosiasi feldspar-plagioklas-amfibol, dan mineral liat semektit. Dominasi mineral semektit menyebabkan kandungan basa-basa dan KTK tanah tinggi (25-55 cmol_c kg⁻¹) dan bereaksi agak masam-alkalis (pH 5,7-8,0). Tanah sawah Napu dan Bariri didominasi oleh mineral kuarsa dan feldspar, serta asosiasi kaolinit-vermikulit, yang diduga berasal dari rombakan batuan granit-biotit dan sedimen. Hal ini ditandai dengan kandungan K₂O total (eks. HCl 25%) sangat tinggi (187-752 mg 100g⁻¹) sebagai hasil dari pelapukan biotit dan feldspar. Tekstur lempung berpasir, kandungan basa-basa dan KTK tanah rendah (2-10 cmol_c kg⁻¹) dan breaksi masam (pH 5,2-5,6). Pengaruh bahan induk, terutama bahan vulkan telah memberikan dampak positif terhadap sifat-sifat tanah sawah terutama cadangan sumber hara tanah yang cukup tinggi, sehingga kesuburan tanah sawah dapat terpelihara dalam jangka panjang.

Abstract. Lacustrine plain in Sulawesi is generally used for paddy fields. However, study on their mineralogical and chemical properties is limited. The aim of the study was to characterize the mineralogical composition and chemical properties of paddy soils derived from lacustrine deposits with different sources of parent materials. Eight paddy soil profiles developed from lacustrine deposits in Tondano, Kotamobagu and Dumoga (North Sulawesi), Limboto and Paguyaman (Gorontalo), Napu and Bariri (Central Sulawesi), and Sengkang (South Sulawesi) have been studied their morphological characteristics in the field and 36 soil samples were collected and analysed for mineralogical composition and physico-chemical properties in the laboratory. Results showed that mineral composition and chemical properties of the paddy soils were varied, depending on the source of parent materials. All layers of paddy soil from Tondano were influenced by intermediary volcanic materials containing high volcanic glass (54-80%), association of plagioclase-pyroxene and hydrated halloysite-allophane. Soil texture was silt loam, high organic C and soil CEC (31-39 cmol_c kg⁻¹), and acid reaction (pH 4.5-4.9). Paddy soils from Kotamobagu and Dumoga were also influenced by intermediary volcanic material with little differences in mineralogical compositions, contained few volcanic glass (2-5%), association of plagioclase-amphibole-pyroxene and smectite-kaolinite. Although smectite was present, the soil CEC was low to moderate (11-23 cmol_c kg⁻¹). Paddy soils from Limboto, Paguyaman and Sengkang differed from those aforementioned soils. In the former, soils were influenced by weathered acid volcanic materials,

* Corresponding author: hkmt_2006@yahoo.co.id

sedimentary and metamorphic rocks, where mineralogical compositions were dominated by quartz, association of feldspar-plagioclase, and smectite clay mineral. The dominance of smectite promoted high content of base cations, high soil CEC (25-55 cmol_c kg⁻¹) and slightly acid to alkaline reaction (pH 5.7-8.0). Paddy soils from Napu and Bariri were dominated by quartz and feldspar, and association of vermiculite-kaolinite, which probably derived from weathered biotite-granite and sedimentary rocks. These were indicated by very high K₂O (HCl 25% extraction) (187-752 mg 100g⁻¹) deriving from the weathering of biotite and feldspar. Soil texture was sandy loam, low base cations and CEC (2-10 cmol_c kg⁻¹), and acid reaction (pH 5.2-5.6). The influence of parent materials, especially volcanic materials have given a positive impact in providing high nutrient reserve for paddy soils to maintain a long term of soil fertility.

Pendahuluan

Tanah sawah adalah tanah yang digunakan untuk bertanam padi sawah, baik terus-menerus sepanjang tahun maupun bergiliran dengan tanaman palawija (Hardjowigeno *et al.* 2004). Tanah-tanah sawah dapat terbentuk dari berbagai bahan induk yang mempunyai sifat-sifat yang berbeda baik sifat fisik-kimia maupun susunan mineral, tergantung sumber bahan induknya. Bahan induk tanah sawah dapat berasal dari endapan aluvium (fluvial), koluvium, lakustrin, fluvio-marine, atau dari bahan induk aslinya seperti batuan vulkanik, batuan sedimen, dan batuan metamorfik.

Di wilayah Sulawesi, sebagian tanah sawah terbentuk dari endapan lakustrin, seperti yang dijumpai di sekitar daerah Tondano, Dumoga, Kotamobagu, Limboto, Paguyaman, Sengkang, Napu, Bariri, dan daerah lainnya. Tanah sawah dari endapan lakustrin di daerah tersebut bisa berupa sawah irigasi atau sawah tadah hujan. Menurut Shalby (1990) endapan lakustrin terbentuk dari hasil aktivitas pembentukan danau, yang dapat disebabkan oleh aktivitas vulkanik, proses tektonik, *landslide*, atau proses marine. Endapan lakustrin merupakan daerah cekungan dengan permukaan air tanah dangkal atau tergenang, yang kemudian terisi oleh bahan-bahan endapan dari daerah di atasnya, seperti: di sekitar Danau Tondano, Danau Limboto dan Danau Tempe, atau berupa endapan lakustrin yang sudah menjadi dataran, seperti dataran Kotamobagu, Dumoga, Paguyaman, dan Napu. Endapan lakustrin merupakan salah satu bahan induk tanah yang cukup potensial, karena merupakan hasil akumulasi bahan-bahan yang kaya akan hara tanah, sehingga tanahnya subur.

Tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi merupakan bagian dari daerah sentra produksi padi di masing-masing wilayah provinsi atau kabupaten. Tanah sawah mempunyai sifat unik yang berbeda dengan tanah pada lahan kering, seperti drainasenya yang jelek akibat penggenangan atau fluktuasi air tanah. Proses reduksi dan oksidasi merupakan proses-proses utama pada tanah sawah yang dapat mengakibatkan perubahan sifat-sifat kimia,

fisika, biologi dan mineral tanah sawah. Perubahan tersebut antara lain hancurnya suatu jenis mineral tanah oleh proses ferolisis, terjadinya iluviasi atau eluviasi partikel tanah dan perubahan sifat fisika dan biologi tanah sawah akibat proses pelumpuran dan perubahan drainase tanah (Hardjowigeno *et al.* 2004; Prasetyo *et al.* 2007).

Kandungan mineral pada tanah sawah berperan sangat penting, karena selain sebagai sumber unsur hara, juga menentukan sifat muatan tanahnya. Mineral mempunyai muatan yang bersifat positif atau negatif. Tanah sawah yang didominasi oleh mineral bermuatan negatif, seperti semektit, akan lebih reaktif dibandingkan dengan tanah sawah yang didominasi oleh mineral bermuatan positif, seperti oksida besi. Pelapukan mineral dalam tanah akan menghasilkan unsur hara makro seperti Ca, Mg, K, dan Na yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman (Prasetyo *et al.* 2007). Jenis unsur hara tanah yang dilepaskan dari hasil pelapukan mineral bisa beberapa macam, tergantung pada jenis mineralnya, seperti grup mineral feldspar (ortoklas dan sanidin) banyak melepaskan hara K, grup piroksen dan amfibol banyak melepaskan hara Mg, Fe dan Ca, grup mika (biotit, muskovit) menghasilkan hara K, Fe dan Mg, dan grup plagioklas banyak menghasilkan unsur hara Ca, K, dan Na (Mohr *et al.* 1972).

Data komposisi mineral, baik fraksi pasir maupun liat dapat dijadikan indikator sumber asal dan sifat dari bahan induk, sifat muatan tanah, besarnya cadangan mineral mudah lapuk sebagai sumber hara dalam tanah, tingkat pelapukan atau perkembangan tanah, dan ada tidaknya penambahan bahan baru yang diendapkan di lapisan atas (Chendy dan Prasetyo, 2001). Semakin tinggi cadangan mineral mudah lapuk, secara alami tanah tersebut semakin subur, karena tanah mempunyai cadangan sumber hara yang tinggi yang tersedia untuk jangka panjang melalui proses pelapukan.

Secara umum penelitian tanah-tanah sawah di Indonesia sudah cukup banyak dilakukan dari aspek karakteristik, produktivitas dan pengelolaan lahan, akan tetapi penelitian karakteristik tanah-tanah sawah khususnya dari endapan lakustrin masih sedikit dilakukan.

Penelitian karakteristik tanah sawah telah dipelopori antara lain oleh Koenigs (1950) dan Tan (1968) yang meneliti sifat-sifat morfologi dan kimia tanah sawah. Penelitian karakterisasi tanah-tanah sawah dari bahan endapan yang terpengaruh bahan vulkan telah dilakukan di Jawa Timur (Prasetyo *et al.* 1996), Jawa Tengah (Rayes 2000; Prasetyo *et al.* 2007) dan Lampung (Prasetyo dan Kasno 2001). Karakterisasi tanah sawah dari endapan aluvio-koluvium berasal dari rombakan batuan skis telah dilakukan di Kabupaten Donggala Sulawesi Tengah (Hikmatullah 2008), dari endapan fluviatil dan lakustrin di Gorontalo (Hikmatullah dan Prasetyo 2002), dari endapan fluviatil, lakustrin dan vulkan andesit di sentra produksi padi Solok, Sumatera Barat (Suryani *et al.* 2008), dari endapan fluvio-marim dan fluviatil di Krawang-Bekasi Jawa Barat (Suryani dan Prasetyo 2000) dan dari endapan aluvium berasal dari batuan sedimen masam di Sangata Kalimantan Timur (Prasetyo dan Hikmatullah 2001). Selanjutnya, Prasetyo dan Setyorini (2008) telah mengulas karakteristik mineralogi dan sifat kimia tanah sawah dari bahan endapan aluvium dari sumber bahan induk yang berbeda. Hasil-hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa sifat-sifat tanah sawah baik sifat morfologi, kimia, maupun susunan mineralnya sangat dipengaruhi oleh sumber bahan induk tanahnya dan kondisi lingkungan setempat. Oleh sebab itu, pengetahuan dan pemahaman tentang bahan induk tanah dan komposisi mineral sangat penting, karena mineral dapat memberikan kontribusi terhadap kebutuhan hara tanah dan kesuburan tanah.

Tanah-tanah dari bahan endapan lakustrin termasuk kedalam landform Depresi Aluvial, yang terbentuk dari hasil pengendapan bahan-bahan yang dibawa oleh aktivitas aliran sungai, gravitasi atau kombinasi keduanya yang diendapkan pada lingkungan danau (Desaunettes 1977; Marsoedi *et al.* 1997). Menurut peta geologi skala 1:250.000 lembar-lembar Manado (Effendi dan Bawono 1997), Kotamobagu (Apani dan Bachri 1997), Tilamuta (Bachri *et al.* 1993), dan Pangkajene (Sukanto 1982),

bahan endapan lakustrin (Qpl) di wilayah tersebut berumur Holosen yang lebih tua dari endapan permukaan (Qa). Endapan lakustrin di wilayah tersebut bersumber dari hasil rombakan batuan induk dari daerah sekitarnya termasuk batuan vulkan, sedimen, dan metamorfik yang diendapkan dalam lingkungan danau.

Tujuan penelitian adalah untuk mempelajari: (a) hubungan komposisi mineral dan sifat-sifatnya dengan asal bahan induk, (b) mineral yang paling berpengaruh terhadap kandungan hara atau tingkat kesuburan tanah dan pemupukannya, dan (c) jenis dan jumlah mineral liat yang berpengaruh terhadap pengelolaan tanahnya.

Bahan dan Metode

Dataran lakustrin diidentifikasi berdasarkan hasil interpretasi citra satelit (Landsat ETM-7 komposit warna band 543), peta geologi dan hasil pengamatan lapangan. Sebanyak delapan profil tanah sawah dari endapan lakustrin telah dideskripsi sifat-sifat morfologinya di lapangan dan sebanyak 36 contoh tanah dari profil tanah sawah tersebut telah dipilih berdasarkan hasil pemetaan tanah tinjau di Sulawesi Utara, Gorontalo, Sulawesi Tengah dan Sulawesi Selatan (BBSDLP 2010; 2011a; 2011b). Deskripsi sifat-sifat morfologi profil tanah mengikuti cara dalam Guideline for soil profile description (FAO 1990). Lokasi koordinat profil tanah sawah yang diteliti disajikan pada Tabel 1.

Analisis sifat-sifat fisik-kimia dan susunan mineral tanah sawah dilakukan di laboratorium Balai Penelitian Tanah. Metode analisis contoh tanah dan penilaian hasil analisis sifat-sifat kimia mengikuti Petunjuk Teknis Analisa Kimia Tanah, Air, Tanaman, dan Pupuk (Eviati dan Suparto 2009).

Penetapan tekstur 3 fraksi (pasir, debu, liat) menggunakan metode Pipet, pH (H_2O dan KCl, rasio 1: 2.5), kandungan C organik dengan metode Walkley dan Black, N total dengan metode Kjeldahl, kandungan P_2O_5

Tabel 1. Lokasi profil tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi

Table 1. Location of paddy soil profiles from lacustrine deposit in Sulawesi

Profil	Koordinat geografis (lintang bujur)	Elevasi	Lokasi	Penggunaan lahan	Klasifikasi tanah (Soil Survey Staff 2010)
		m dpl			
P1	01°16'30"U-124°50'15"T	700	Tondano	Sawah irigasi	Aquandic Humaquepts
P2	00°33'15"U-124°16'15"T	250	Kotamobagu	Sawah irigasi	Typic Endoaquepts
P3	00°32'10"U-124°02'15"T	200	Dumoga	Sawah irigasi	Typic Endoaquepts
P4	00°32'30"U-122°58'15"T	75	Limboto	Sawah td hujan	Ustic Endoaquepts
P5	00°33'45"U-122°32'30"T	100	Paguyaman	Sawah td hujan	Ustic Endoaquepts
P6	04°15'00"S-120°00'15"T	50	Sengkang	Sawah td hujan	Typic Endoaquepts
P7	01°26'30"S-120°19'45"T	1000	Napu	Sawah irigasi	Fluvaquentic Endoaquepts
P8	01°36'30"S-120°19'30"T	1000	Bariri	Sawah irigasi	Typic Endoaquepts

dan K_2O total (ekstraksi HCl 25%), dan P_2O_5 tersedia (ekstraksi Olsen atau Bray 1). Retensi P ditetapkan menurut metode Blackmore *et al.* (1981). Kandungan basa-basa dapat ditukar (Ca, Mg, K, dan Na) dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah ditetapkan dalam larutan amonium asetat pH 7,0, dan kandungan Al dapat-tukar dengan ekstrak 1N KCl. Analisis mineral pasir fraksi total menggunakan mikroskop polarisasi dengan metode line counting, sedangkan analisis fraksi liat menggunakan difraktometer sinar-X (XRD) dengan metode penjujukan Mg^{2+} (Van Reeuwijk 1993) untuk lapisan atas (lapisan olah). Data hasil analisis mineral pasir dikelompokkan menurut kesamaan jenis mineral untuk menentukan sumber dan sifat bahan induk serta jumlah cadangan mineral mudah lapuk sebagai sumber hara dalam tanah. Jenis dan persentase mineral mudah lapuk mengikuti cara yang dikemukakan oleh Buurman (1990). Data hasil analisis mineral liat digunakan untuk mengetahui jenis dan jumlah relatif mineral liat dan pengaruhnya terhadap sifat-sifat kimia tanah dan pengelolaannya.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik mineral pasir

Komposisi mineral pasir total dari tanah-tanah sawah yang diteliti cukup bervariasi, baik jenis maupun jumlahnya, yang mencerminkan asal dan sifat bahan induk dan dapat dikelompokkan menjadi: (a) endapan dari bahan vulkan, (b) endapan campuran dari batuan sedimen, vulkan dan metamorfik, dan (c) endapan campuran dari batuan sedimen dan granit-biotit. Hasil analisis mineral fraksi pasir total disajikan pada Tabel 2.

Endapan dari bahan vulkan

Profil P1, P2, dan P3 berkembang dari endapan berasal dari bahan vulkan muda (abu dan tuf). Tanah sawah Tondano (profil P1), komposisi mineral pasirnya didominasi oleh gelas vulkanik dan mineral mudah lapuk (weatherable minerals) dari grup plagioklas (labradorit, andesin, bitownit), grup piroksen (augit, hiperstin), dan amfibol (hornblende). Komposisi mineral tersebut mencirikan endapan berasal dari bahan vulkan bersifat intermedier. Persentase mineral mudah lapuk, seperti gelas vulkanik, plagioklas, piroksen, dan amfibol sangat tinggi (58-80%), yang mencerminkan cadangan mineral mudah lapuk pada tanah sawah tersebut sangat tinggi. Mineral mudah lapuk dapat memperkaya unsur hara tanah, sehingga kesuburan tanah akan terjaga dalam jangka panjang. Menurut Prasetyo *et al.* (2004) gelas vulkan disamping mengandung komposisi kimia seperti Ca, Mg, P, dan K, juga dapat mengandung banyak SiO_2 seperti

pada batupung. Pelapukan gelas vulkan dapat menghasilkan mineral amorf (alofan) yang ditandai oleh konsistensi tanah gembur dan terasa licin (*smearly*) bila dipirid. Grup mineral plagioklas merupakan sumber unsur Ca, K, dan Na, sedangkan grup piroksen dan amfibol juga sebagai sumber Ca, Mg, Fe. Itulah sebabnya kandungan kation Ca-tukar umumnya paling dominan pada tanah-tanah sawah tersebut.

Seperti halnya tanah sawah Todano, tanah sawah Kotamobagu (profil P2) juga banyak dipengaruhi oleh bahan vulkan. Hal ini dicerminkan oleh tingginya kandungan mineral mudah lapuk, yang terdiri atas mineral plagioklas (labradorit) dan amfibol (hornblende hijau dan coklat), sedikit piroksen dan gelas vulkan. Kandungan cadangan mineral mudah lapuk pada tanah ini termasuk sangat tinggi (80-86%). Bahan mineral mudah lapuk tersebut diduga berasal dari bahan erupsi Gunung Ambang yang bersifat intermedier, yang berada di sebelah timur Kotamobagu.

Tanah sawah Dumoga (profil P3) mempunyai komposisi mineral yang terdiri atas gelas vulkan, mineral plagioklas, feldspar, amfibol, dan piroksen dalam jumlah yang lebih sedikit dari tanah sawah Kotamobagu, karena mungkin sudah lebih banyak melapuk. Hal ini ditunjukkan oleh persentase kandungan mineral mudah lapuknya lebih sedikit (18-25%) dibandingkan dengan tanah sawah Tondano dan Kotamobagu.

Endapan dari batuan sedimen, vulkan, dan metamorfik

Berbeda dengan tanah sawah di atas, pada tanah sawah Paguyaman (profil P5), komposisi mineral pasirnya didominasi oleh kuarsa (52-56%) yang merupakan mineral sukar lapuk, dan fragmen batuan (23-29%). Fragmen batuan merupakan kumpulan mineral yang tidak dapat diidentifikasi jenisnya. Indikasi banyaknya kuarsa menunjukkan bahan mineral mudah lapuknya sudah banyak tercuci. Meskipun demikian, tanah sawah tersebut masih mengandung mineral mudah lapuk yang jumlahnya sedikit (15-20%), terutama dari grup feldspar (ortoklas, sanidin) dan plagioklas (albit, oligoklas, andesin) serta sangat sedikit amfibol. Adanya sedikit mineral epidot berasal dari rombakan batuan metamorfik. Asosiasi mineral tersebut menunjukkan endapan berasal dari pencampuran bahan vulkan masam sampai intermedier, granodiorit dan metamorfik. Hal ini sesuai dengan informasi geologi yang menyatakan bahwa lembah Paguyaman merupakan bekas danau yang endapannya berasal dari rombakan bahan-bahan berasal dari daerah perbukitan di sekitarnya, yang terdiri dari batuan vulkan tua dan intrusi granodiorit (Bachri *et al.* 1993).

Tanah sawah Limboto (profil P4) mempunyai komposisi mineral serupa dengan tanah sawah

Tabel 2. Komposisi mineral fraksi pasir tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi

Table 2. Mineralogical composition of sand fraction of paddy soils from lacustrine deposit in Sulawesi

Keda-laman cm	Kuarsa							Plagioklas					Feldspar		Ampibol		Piroksen				Cad. min.	
	Op	Kk	Kj	Li	Lp	Fb	Gv	Al	Ol	An	Lb	Bt	Or	Sa	Hh	Hc	Au	Hi	En	Gr		Ep
..... %																						
Profil P1: Tondano																						
0-25	7	-	1	2	5	13	41	-	-	1	19	-	-	-	1	-	3	7	-	-	-	72
25-45	8	-	1	2	5	16	55	-	-	-	9	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	68
45-70	9	-	1	-	5	11	52	-	-	1	12	-	-	-	-	-	4	5	-	-	-	54
70-120	6	-	-	1	2	11	68	-	-	-	6	2	-	-	-	-	1	3	-	-	-	80
Profil P2: Kotamobagu																						
0-30	4	-	5	1	1	3	4	-	-	-	45	-	-	-	5	27	2	3	-	-	-	86
30-60	11	-	5	-	3	1	4	-	-	-	35	-	-	-	10	26	1	4	-	-	-	80
Profil P3: Dumoga																						
0-25	6	14	8	-	7	47	2	-	-	2	6	-	-	1	4	-	-	1	-	-	2	18
25-55	6	13	9	-	9	38	5	-	-	1	5	-	-	1	8	1	2	1	-	-	1	25
Profil P4: Limboto																						
0-20	1	67	4	-	1	6	-	2	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	1	-	4	21
20-39	1	66	4	-	1	6	-	2	2	-	-	-	14	1	-	-	-	-	1	-	2	22
39-58	-	55	3	-	1	12	-	1	1	1	-	-	22	1	-	-	-	-	-	-	3	29
58-86	1	65	4	-	2	7	-	1	-	1	-	-	14	1	-	-	-	-	1	-	3	21
Profil P5: Paguyaman																						
0-20	-	45	8	-	2	25	-	4	1	1	-	-	7	4	1	-	-	-	-	-	2	20
20-45	1	45	11	-	3	23	-	5	-	-	-	-	5	3	1	1	-	-	-	-	2	17
45-80	-	46	7	-	3	29	-	4	1	1	-	-	7	2	-	-	-	-	-	-	-	15
80-110	3	45	7	-	2	23	-	4	2	1	-	-	9	2	1	-	-	-	-	-	1	20
Profil P6: Sengkang																						
0-18	3	26	16	1	3	20	-	3	-	-	1	-	9	14	1	-	-	-	-	-	-	28
18-41	3	16	18	-	2	32	-	2	-	-	1	-	4	18	2	-	-	-	-	-	2	29
41-65	3	19	21	-	2	29	1	1	-	-	1	-	8	14	1	-	-	-	-	-	-	26
65-110	1	24	16	-	2	28	-	2	-	-	1	-	7	18	-	-	-	-	-	-	1	29
Profil P7: Napu																						
0-35	1	18	48	-	-	2	-	-	1	-	-	-	9	21	-	-	-	-	-	-	-	31
35-60	1	17	41	-	-	2	-	-	1	1	1	-	23	13	-	-	-	-	-	-	-	39
60-80	-	15	46	-	1	4	-	-	1	1	-	-	19	13	-	-	-	-	-	-	-	34
Profil P8: Bariri																						
0-19	-	26	38	-	sp	sp	-	-	-	-	-	-	20	12	2	-	1	-	-	-	-	35
19-33	1	30	31	-	1	sp	-	-	-	-	-	-	24	8	1	-	-	-	-	1	1	35
33-48	1	25	32	-	2	2	-	-	-	-	-	-	23	11	1	-	1	-	-	1	-	37

Keterangan:

Op = opak; Kk = kuarsa keruh; Kj = kuarsa jernih; Li = limonit; Lp = lapukan mineral; Fb = fragmen batuan; Gv = gelas vulkanik; Al = albit; Ol = oligoklas; An = andesin; Lb = labradorit; Bt = bitownit; Or = ortoklas; Sa = sanidin; Hh = hornblende hijau; Hc = hornblende coklat; Au = augit; Hi = hiperstin; Gr = gamet; Ep = epidot; En = enstatit; Cad min. = jumlah cadangan mineral mudah lapuk.

Paguyaman. Bedanya tanah sawah Limboto mengandung kuarsa lebih banyak (58-70%) dengan kandungan mineral mudah lapuknya sedikit lebih tinggi (21-29%) dibandingkan dengan tanah sawah Paguyaman. Kandungan mineral tersebut terdiri dari grup feldspar, terutama ortoklas, sedikit plagioklas dan piroksen, serta epidot, yang juga mencerminkan endapan berasal dari pencampuran bahan vulkan masam sampai intermedier dan batuan metamorfik. Pada awalnya diduga tanah sawah daerah ini dipengaruhi oleh endapan dari sedimen batugamping, yang banyak mengandung kalsit dan dolomit, termasuk juga kuarsa sebagai mineral ikutannya. Akibat proses pelapukan, dimana kalsit dan dolomit mudah larut dan habis melapuk, maka yang tersisa adalah mineral kuarsa yang menjadi dominan. Menurut informasi geologi, dataran lakustrin Danau Limboto berasal dari bahan rombakan batugamping (Apandi dan Bachri 1997),

yang kemudian dipengaruhi oleh bahan rombakan batuan vulkan dan metamorfik dari bagian hulu sungai.

Tanah sawah Sengkang (profil P6) pada dataran lakustrin Danau Tempe, mempunyai komposisi mineral pasir serupa dengan tanah sawah Paguyaman. Komposisi mineral pasirnya didominasi oleh kuarsa (34-42%) dan fragmen batuan (20-32%). Sedangkan komposisi mineral mudah lapuknya didominasi oleh mineral feldspar (sanidin, ortoklas), dan sangat sedikit plagioklas, amfibol, serta epidot, dengan persentase 26-29%. Tingginya kandungan mineral sanidin mencirikan sumber bahan induk yang bersifat masam. Hal ini diperkuat dengan informasi geologi yang menyatakan bahwa daerah ini banyak dipengaruhi oleh bahan rombakan dari batuan sedimen masam, napal, batugamping, dan tuf vulkan (Sukanto 1982).

Endapan dari batuan sedimen dan granit-biotit

Pada tanah sawah di daerah dataran tinggi lembah Napu dan Bariri (profil P7 dan P8) komposisi mineral pasirnya didominasi oleh mineral resisten kuarsa (57-66%). Meskipun demikian, tanah ini masih mengandung cukup banyak mineral mudah lapuk (31-39%), yang komposisinya didominasi oleh feldspar (ortoklas, sanidin), dan sangat sedikit amfibol, piroksen, garnet dan epidot. Komposisi tersebut menunjukkan endapan lakustrin di daerah ini didominasi oleh bahan induk bersifat masam. Diduga bahan induk bersumber dari rombakan batuan intrusi granit, batupasir dan metamorfik pada wilayah perbukitan di sekitar lembah tersebut. Menurut Simandjuntak *et al.* (1997) batuan granit di daerah tersebut merupakan granit-biotit dan granit biotit-hornblende. Biotit termasuk mineral grup mika, yang menjadi sumber hara K, disamping ortoklas, sanidin, dan microcline dari grup feldspar. Oleh sebab itu, tanah-tanah sawah di daerah ini mengandung K₂O total (HCl 25%) sangat tinggi, yang berasal dari hasil pelapukan biotit, dan menjadi cadangan hara K dalam jangka panjang. Biotit termasuk mineral sangat mudah lapuk dan cepat habis, sehingga sudah tidak terdeteksi dalam komposisi mineral.

Karakteristik mineral liat

Endapan dari bahan vulkan

Hasil analisis difraktogram sinar-X (XRD) tanah-tanah sawah lapisan atas disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 1. Komposisi mineral liat pada tanah sawah Tondano (profil P1) di lapisan atas didominasi oleh mineral non kristalin yang terdiri dari haloisit-hidrat (*peak* 10.26 A° dan 4.45 A°) dan sedikit alofan. Sedangkan di lapisan bawah, selain mengandung haloisit-hidrat (*peak* 10.20 dan 4.40 A°) dalam jumlah sedang, juga didominasi oleh mineral alofan yang ditunjukkan oleh bentuk difraktogram yang menggelembung. Mineral alofan merupakan mineral liat

pertama hasil pelapukan dari gelas vulkan, sedangkan haloisit-hidrat merupakan hasil pelapukan lebih lanjut dari alofan. Mineral alofan mampu memfiksasi fosfat dalam jumlah banyak, sehingga berpotensi mengurangi ketersediaan P untuk tanaman.

Pada tanah sawah Kotamobagu (profil P2) di lapisan atas sudah terbentuk mineral kristalin semektit yang ditunjukkan oleh *peak* 15,98A°, kemudian terdeteksi pula mineral kaolinit dengan *peak* 7,26A° dan 3,56A°, yang sama banyaknya dengan semektit, dan sedikit mineral illit (*peak* 10,01A°). Pada tanah sawah Dumoga (profil P3) lapisan atasnya didominasi oleh mineral liat semektit dalam jumlah banyak dan sedikit kaolinit. Mineral semektit, kaolinit dan illit kemungkinan besar merupakan bawaan yang diendapkan dari daerah atas/hulu, karena pada tanah sawah yang berdrainase jelek dan bereaksi masam, semektit dan kaolinit tidak terbentuk. Smektit terbentuk pada kondisi lingkungan berdrainase tanah jelek, pH netral hingga alkalis, dan adanya akumulasi basa-basa seperti Ca²⁺ dan Mg²⁺ dan silika (De Coninck 1974; Van Wambeke 1992), sedangkan kaolinit dapat terbentuk pada kondisi lingkungan berdrainase baik dan pH tanah masam.

Endapan dari batuan sedimen, vulkan, dan metamorfik

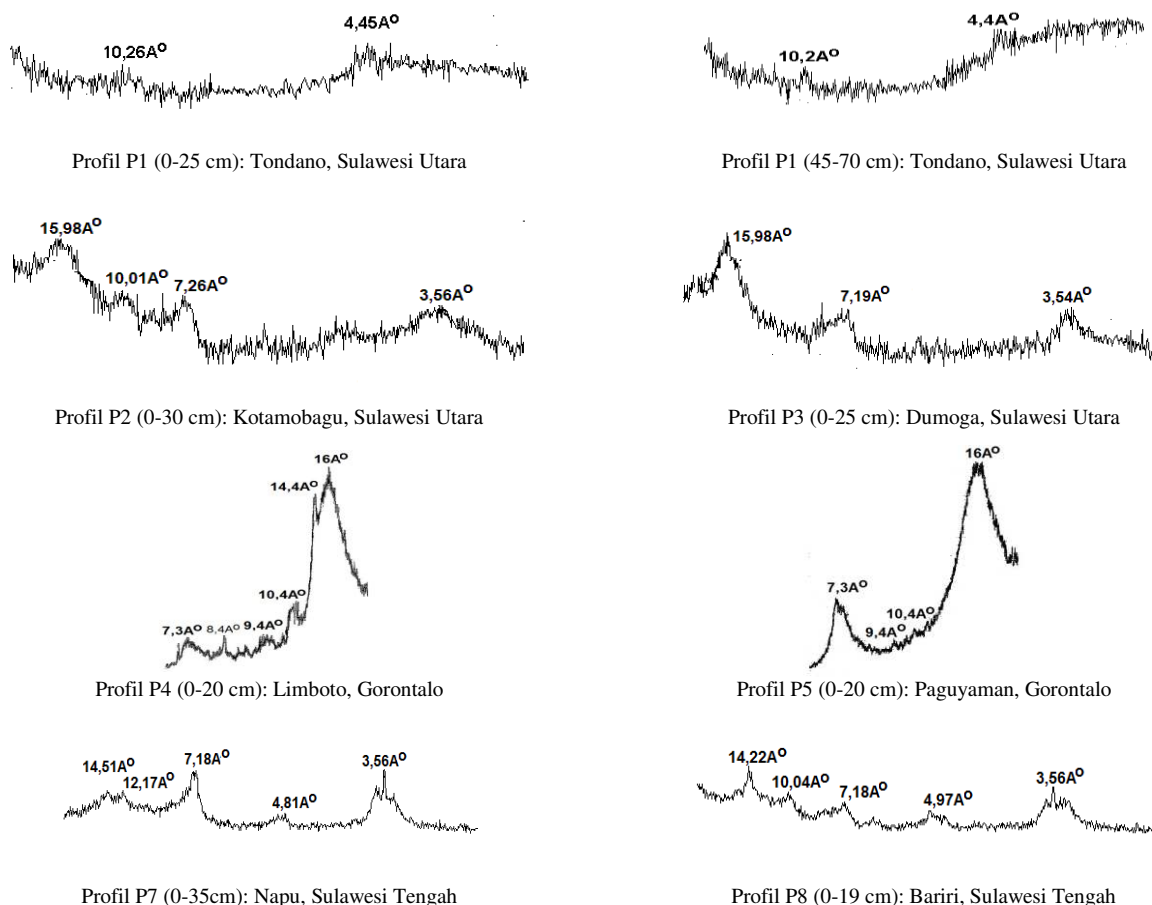
Pada tanah sawah Limboto dan Paguyaman (profil P4 dan P5) lapisan atas didominasi oleh mineral semektit yang ditunjukkan oleh *peak* 16A°, sedikit kaolinit-disorder dengan *peak* 7,3A° dan sangat sedikit illit (*peak* 10,4A°). Semektit merupakan mineral liat tipe 2:1 yang mempunyai sifat khas yang mempengaruhi sifat fisik-kimia tanah sawah tersebut. Sifat yang penting adalah mempunyai muatan negatif yang reaktif terhadap lingkungannya, KTK cukup tinggi, dan sifat mengembang bila basah dan mengerut bila kering. Mineral semektit dapat juga terbentuk melalui proses pelarutan mineral plagioklas dari pelapukan batuan vulkan andesit atau augit (Glassman 1982) atau hasil pelapukan hornblende (Rice *et al.* 1985). Dominasi mineral semektit pada tanah sawah

Tabel 3. Komposisi mineral liat lapisan atas tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi

Table 3. Mineralogical composition of clay fraction in the topsoils of paddy fields from lacustrine deposit in Sulawesi

Profil/lokasi	Kedalaman	Haloisit-hidrat	Kaolinit-disorder	Kaolinit	Semektit	Illit	Vermikulit	Gibsit	Amorf
	cm								
P1: Tondano	0-25	++++							+
	45-70	++							+++
P2: Kotamobagu	0-30			++	++	+			
P3: Dumoga	0-25			+	+++				
P4: Limboto	0-20		+		++++	(+)			
P5: Paguyaman	0-20			+	++++				
P7: Napu	0-30			++		+	+++		
P8: Bariri	0-19			+++			++	(+)	

Keterangan: ++++ = sangat banyak; +++ = banyak; ++ = sedang; + = sedikit; (+) = sangat sedikit.



Gambar 1. Difraktogram sinar-X (XRD) mineral liat tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi
 Figure 1. X-ray diffractogram (XRD) of clay mineral of paddy soils from lacustrine deposits in Sulawesi

menyebabkan tanah sawah tersebut akan memberi respon yang lebih baik pada waktu pemupukan, karena KTK dari semektit yang tinggi akan meningkatkan nilai KTK tanah. Selain itu, keberadaan semektit juga akan lebih meningkatkan kemampuan tanah dalam menangkap kation-kation yang berasal dari pupuk seperti K^+ atau NH_4^+ , hara makro seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} dan hara mikro seperti Cu^{2+} dan Zn^{2+} (Borchardt 1989). Tanah-tanah sawah yang didominasi mineral smektit mencirikan terjadinya akumulasi basa-basa dan pH tanah netral sampai basis dengan drainase jelek dan mempunyai muatan negatif (KTK) tinggi.

Selain semektit terdeteksi pula kaolinit dan illit. Kaolinit dapat terbentuk dari hasil pelapukan semektit pada kondisi pH masam, atau merupakan hasil pengendapan dari daerah hulu pada kondisi pH netral-agak alkalis. Dalam kasus ini, diduga kaolinit tersebut merupakan hasil pengendapan dari daerah hulu, karena tanah sawah di wilayah tersebut mempunyai drainase jelek dan pH netral-agak alkalis, artinya kaolinit tidak terbentuk pada kondisi tersebut. Kaolinit yang terdeteksi pada profil

P4 mempunyai bentuk puncak tidak lancip melainkan agak melebar, sehingga digolongkan sebagai kaolinit-disorder yang kristalisasinya tidak sempurna (Brindely and Brown 1980). Kaolinit-disorder mempunyai puncak yang mirip dengan haloisit. Tetapi, haloisit umumnya hanya dijumpai pada tanah dari bahan induk vulkan dan hampir tidak dijumpai dari bahan sedimen.

Endapan dari batuan sedimen dan granit-biotit

Pada tanah sawah Napu lapisan atasnya mempunyai susunan mineral liat campuran antara vermikulit (dominan), kaolinit (sedang), dan illit (sedikit). Sedangkan pada tanah sawah Bariri, kaolinit lebih dominan daripada vermikulit. Pada kondisi tersebut, tanah sawah bereaksi masam dan mineral pasirnya didominasi oleh kuarsa, maka adanya kaolinit disini diduga hasil pelapukan dari vermikulit. Vermikulit merupakan hasil pelapukan dari illit yang berasal bawaan dari daerah hulu dan diendapkan pada tanah sawah, sedangkan mineral illit merupakan hasil pelapukan dari mika/biotit. Seperti halnya semektit,

keberadaan mineral vermikulit dapat memberikan kontribusi nyata pada peningkatan KTK tanah, akan tetapi pada kenyataannya tidak demikian pada tanah sawah Napu dan Bariri, dimana KTK tanahnya rendah. Hal ini diduga karena kondisi mineral tersebut sudah melapuk pada kondisi pH tanah yang masam (Prasetyo dan Setyorini 2008) dan kemungkinan karena kandungan liat dan C organik yang rendah.

Sifat-sifat morfologi tanah

Endapan dari bahan vulkan

Sifat-sifat morfologi tanah sawah disajikan pada Tabel 4. Tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di daerah penelitian umumnya berwarna kelabu tua sampai hitam (10YR2/1-N5/1) di lapisan atas, dan kelabu muda sampai kelabu kehijauan (2.5Y5/1-N5/1) di lapisan bawah tanpa atau dengan warna karatan. Warna kelabu tersebut mencerminkan tanah mempunyai sifat hidromorfik atau zone jenuh air dengan rejim kelembaban akuik atau berdrainase jelek. Pada tanah sawah Tondano, warna tanah hitam sampai coklat sangat tua baik di lapisan atas maupun lapisan bawah, karena pengaruh kandungan bahan organik sangat tinggi. Kedalaman tanah umumnya dalam (>100 cm) dan di dalam penampang tanah tidak ditemukan bahan kasar seperti kerikil. Ketebalan lapisan atas (olah) bervariasi antara 20 sampai 35 cm. Konsistensi dalam keadaan basah tidak lekat dan tidak plastis, tetapi terasa licin jika dipirid yang diduga pengaruh bahan amorf (alofan). Tanah sawah Kotamobagu dan Dumoga mempunyai konsistensi lekat sampai sangat lekat dan plastis dalam keadaan basah.

Tekstur tanah-tanah sawah bervariasi dari kelas sedang sampai halus (Tabel 4). Pada tanah sawah Tondano, tekstur lempung berdebu dengan kandungan debu tinggi (53-61%). Kandungan debu tinggi diduga berasal dari tuf Tondano yang banyak mengandung gelas vulkan. Pada tanah sawah Kotamobagu, tekstur tanah agak halus sampai halus (lempung berliat-liat), dan tanah sawah Dumoga bertekstur halus (liat berdebu) pada semua lapisan.

Endapan dari batuan sedimen, vulkan dan metamorfik

Berbeda dengan tanah-tanah sawah di atas, pada tanah sawah Limboto, Paguyaman dan Sengkang (profil P4, P5 dan P6) di dalam penampangnya dicirikan oleh struktur baji dengan bidang kilir (*slickenside*) pada kedalaman 20-100 cm. Sifat ini berhubungan dengan dominasi mineral liat tipe 2:1 (semektit), tingginya kandungan kation Ca^{2+} dan kapasitas tukar kation tanahnya. Tanah sawah Limboto dan Paguyaman bertekstur liat pada seluruh

lapisan dengan kandungan liat tinggi (48-72%), sedangkan tanah sawah Sengkang bertekstur lempung liat berpasir di lapisan atas dan liat berpasir sampai liat di lapisan bawah. Konsistensi tanah-tanah sawah tersebut umumnya sangat lekat dan sangat plastis dalam keadaan basah, sehingga kondisi ini dapat mempengaruhi pada waktu pengolahan tanah.

Endapan dari batuan sedimen dan granit-biotit

Pada tanah sawah daerah Napu dan Bariri (profil P7 dan P8), tekstur lempung berpasir yang termasuk sedang pada seluruh lapisan dengan kandungan pasir cukup tinggi (55-71%). Konsistensi agak lekat dan tidak plastis dalam kondisi basah. Tingginya kandungan pasir diduga berasal dari hasil rombakan batuan granit-biotit dan batuan sedimen yang banyak mengandung kuarsa, mineral biotit dan feldspar. Mineral biotit (grup mika) merupakan sumber hara K, yang dicerminkan oleh kandungan K_2O total sangat tinggi.

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, tanah-tanah sawah tersebut tidak ditemukan adanya lapisan tapak bajak yang jelas/padat di bawah lapisan olah, terutama pada tanah berpasir maupun tanah bertekstur halus dengan tipe mineral 2:1. Pada tanah sawah Napu dan Bariri yang teksturnya berpasir, lapisan tapak bajak sulit terbentuk karena daya kohesi butir pasir rendah, sehingga sulit merekat. Demikian pula, pada tanah sawah yang didominasi oleh mineral tipe 2:1, seperti semektit, sulit terbentuk lapisan tapak bajak, karena sifat mengembang dan mengkerut (proses pedoturbasi) yang dapat merusak lapisan tapak bajak yang mulai terbentuk. Dengan demikian, tekstur tanah sawah yang terlalu kasar atau terlalu halus, atau adanya sifat tanah yang mengembang dan mengkerut menjadi faktor penghalang pembentukan lapisan tapak bajak (Hardjowigeno *et al.* 2004).

Sifat-sifat Kimia Tanah

Endapan dari bahan vulkan

Data hasil analisis sifat-sifat kimia tanah sawah disajikan pada Tabel 4 dan 5. Pada tanah sawah Tondano dan Dumoga bereaksi masam (pH 4,1-5,2), sedangkan tanah sawah Kotamobagu bereaksi agak masam (pH 5,2-5,9) pada seluruh penampang. Kemasaman ini diduga sebagai pengaruh asam-asam organik dan kondisi iklim basah. Kandungan C organik umumnya rendah (<2%) yang menurun secara teratur dengan kedalaman tanah. Hal ini sejalan dengan penelitian Kasno *et al.* (2003) yang menyatakan bahwa sebagian besar tanah-tanah sawah di Indonesia umumnya mempunyai kandungan C organik rendah (<2,0%). Kecuali pada tanah sawah Tondano

Tabel 4. Tekstur, pH, bahan organik, kandungan P dan K-total tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi

Table 4. Texture, pH, organic matter, total P and K of paddy soils from lacustrine deposits in Sulawesi

Profil/ lokasi	Hori- son	Keda- laman	Warna matrik	Tekstur			Kelas*	pH		Bahan organik		HCl 25%		P ₂ O ₅		Ret. P	Al-oksalat
				Pasir	Debu	Liat		H ₂ O	KCl	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Olsen	Bray1		
		cm	 % %		mg100g ⁻¹ ppm %		
P1: Tondano																	
	Ap	0-25	10YR2/1	17	61	22	SiL	4,7	4,1	7,73	0,35	33	4	-	2,3	23	0,26
	AB	25-45	7.5YR2/1	15	59	26	SiL	4,9	4,2	8,81	0,50	22	2	-	1,3	21	0,27
	Bg1	45-70	7.5YR2.5/3	16	60	24	SiL	4,9	4,2	7,70	0,44	20	1	-	2,6	13	0,22
	2Bg	70-120	7.5YR3/3	11	53	36	SiCL	4,5	4,2	8,69	0,62	31	3	-	3,4	7	0,19
P2: Kotamobagu																	
	Ap	0-30	N 0/0	21	38	41	C	5,2	4,3	2,21	0,22	23	13	36	-	10	-
	Bg1	30-60	N 1/0	26	37	37	CL	5,6	4,6	1,79	0,14	18	9	31	-	5	-
	Bg2	60-80	N 1/0	25	39	36	CL	5,9	4,8	0,53	0,05	16	19	28	-	-	-
	2Bg3	80-120	N 1/0	27	29	44	C	5,7	4,6	0,28	0,02	18	23	15	-	-	-
P3: Dumoga																	
	Ap	0-25	N 5/1	9	44	47	SiC	4,1	3,3	1,85	0,19	91	4	149	-	17	-
	Bg1	25-55	N 5/0	9	47	44	SiC	5,0	4,2	1,20	0,13	87	2	62	-	7	-
	Bg2	55-90	N 5/0	8	48	44	SiC	5,2	4,2	0,38	0,04	23	7	30	-	5	-
	Bg3	90-120	N 5/0	9	43	48	SiC	5,2	4,0	0,29	0,03	14	5	19	-	4	-
P4: Limboto																	
	Ap	0-20	2.5Y3/1	6	28	66	C	6,9	6,0	1,57	0,18	61	66	57	-	33	-
	Bgs1	20-39	10YR4/1	8	38	54	C	7,1	6,1	1,04	0,11	57	67	55	-	26	-
	Bgs2	39-58	10YR5/1	6	45	49	C	7,2	6,0	0,43	0,06	74	58	75	-	-	-
	Bg1	58-86	10YR6/1	1	33	66	C	7,2	6,1	0,36	0,05	83	64	71	-	-	-
	Bg2	86-130	10YR6/1	7	45	48	C	7,2	6,0	0,39	0,05	65	58	25	-	-	-
P5: Paguyaman																	
	Ap	0-20	10YR4/2	7	37	56	C	7,5	6,5	0,92	0,07	38	30	75	-	-	-
	Bgs1	20-45	2.5Y5/2	9	32	59	C	7,7	6,9	0,43	0,04	20	29	53	-	-	-
	Bgs2	45-80	2.5Y5/2-6/4	7	29	64	C	7,9	6,8	0,34	0,03	-	-	-	-	-	-
	Bg1	80-110	5Y5/1	1	28	71	C	7,9	6,9	0,19	0,02	-	-	-	-	-	-
	Bg2	110-150	5BG5/1	1	27	72	C	8,0	7,0	0,17	0,01	-	-	-	-	-	-
P6: Sengkang																	
	Ap	0-18	10YR3/2	54	20	26	SCL	5,7	4,9	1,35	0,09	24	98	8	-	-	-
	Bss1	18-41	10YR2/2	46	16	38	SC	5,9	5,1	0,96	0,10	21	120	6	-	-	-
	Bss2	41-65	2.5Y4/3	38	16	46	C	6,4	5,6	0,36	0,08	18	106	1	-	-	-
	Bss3	65-110	2.5Y5/3	46	12	42	C	6,7	5,9	0,72	0,07	12	83	12	-	-	-
	BCg	110-150	2.5Y5/6	42	12	46	C	6,7	5,9	0,58	0,06	16	82	67	-	-	-
P7: Napu																	
	Ap	0-35	25Y 5.0/1	59	25	16	SL	5,2	4,2	2,59	0,21	15	199	-	9	8	-
	Bg1	35-60	N 6/0	69	17	14	SL	5,4	4,3	1,01	0,07	19	187	-	21	2	-
	Bg2	60-80	N 6/0	71	21	8	SL	5,4	3,9	0,45	0,04	44	452	-	41	1	-
	Bg3	80-120	N 6/0	64	32	4	SL	6,0	4,3	0,20	0,02	101	752	-	33	0	-
P8: Bariri																	
	Ap	0-19	10Y 4/1	61	21	18	SL	5,6	4,9	1,77	0,15	59	221	-	5	0	-
	Bg1	19-33	5GY 3/1	55	28	17	SL	5,3	4,2	1,33	0,11	76	506	-	5	4	-
	Bg2	33-48	5GY 4/1	59	23	18	SL	5,6	4,3	0,58	0,05	46	370	-	5	1	-
	Bg3	48-78	5GY 5/1	71	18	11	SL	5,6	4,3	0,36	0,03	75	422	-	6	0	-
	Bg4	78-120	5GY 5/1	58	23	19	SL	5,6	4,2	0,25	0,02	69	507	-	6	0	-

* Kelas tekstur/*texture class*: C = liat/clay, SiC = liat berdebu/*silty clay*, SC = liat berpasir/*sandy clay*, CL = lempung berliat/*clay loam*, SCL = lempung liat berpasir/*sandy clay loam*, SiCL = lempung liat berdebu/*silty clay loam*, SiL = lempung berdebu/*silt loam*, SL = lempung berpasir/*sandy loam*.

kandungan C organik termasuk sangat tinggi (7,70-8,81%) pada semua lapisan, yang diduga berasal dari hasil akumulasi sisa-sisa vegetasi yang telah mati. Kandungan C organik yang tinggi tersebut dapat membentuk senyawa kompleks dengan mineral liat alofan yang dapat memantapkan bahan organik terhadap dekomposisi biotik, sehingga dipertahankannya kandungan C organik yang tinggi (Wada dan Aomine 1973).

Kandungan P₂O₅ total (ekstraksi HCl 25%) bervariasi dan mencerminkan ada tidaknya sumber P dalam tanah

untuk pertumbuhan tanaman. Kandungan P₂O₅ total di lapisan atas tergolong rendah sampai tinggi (16-91 mg 100g⁻¹), sedangkan P tersedia tergolong sedang sampai tinggi (28-149 ppm). Kandungan K₂O total umumnya rendah sampai sangat rendah (1-23 mg 100g⁻¹). Retensi P ketiga tanah sawah tersebut termasuk rendah (<25%), meskipun dari hasil analisa mineral liat tanah sawah Tondano mengandung banyak mineral alofan. Data pada Tabel 4 menunjukkan rendahnya retensi P tanah sawah Tondano yang diikuti oleh rendahnya kandungan Al

Tabel 5. Kation tukar, KTK, dan kejenuhan basa tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi

Table 5. Exchangeable cations, CEC, and base saturation of paddy soils from lacustrine deposit in Sulawesi

Profil/lokasi	Horison	Kedalaman cm	Nilai tukar kation (dalam NH ₄ -Acetat 1N, pH7)							KTK-tanah	KTK-liat	Kej.basa %	KCl 1N Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹
			Ca	Mg	K	Na	Jumlah	cmol _c kg ⁻¹					
P1: Tondano													
	Ap	0-25	14,83	2,89	0,03	1,45	19,20	39	177	50	0,05		
	AB	25-45	12,22	2,73	0,02	1,11	16,08	31	119	51	0,13		
	Bg1	45-70	13,45	3,06	0,01	1,19	17,71	36	150	49	0,09		
	2Bg2	70-120	13,93	2,92	0,03	1,17	18,05	32	89	56	0,12		
P2: Kotamobagu													
	A	0-30	12,42	3,93	0,20	0,67	17,22	15	37	100	0,00		
	Bg1	30-60	13,28	4,35	0,17	0,82	18,62	15	41	100	0,00		
	Bg2	60-80	9,94	4,29	0,27	0,51	15,01	11	31	100	0,00		
	2Bg3	80-120	12,07	5,74	0,36	0,63	18,80	15	34	100	0,00		
P3: Dumoga													
	Ap	0-25	15,16	4,82	0,11	0,34	20,43	23	49	87	0,48		
	Bg1	25-55	16,83	5,79	0,08	0,43	23,13	17	39	100	0,00		
	Bg2	55-90	11,67	4,84	0,17	0,41	17,09	15	34	100	0,00		
	Bg3	90-120	14,82	7,14	0,12	0,60	22,68	20	42	100	0,00		
P4: Limboto													
	Ap	0-20	46,24	11,06	0,32	1,07	58,69	52	79	100	0,00		
	Bgs1	20-39	43,95	10,63	0,40	1,16	56,14	51	94	100	0,00		
	Bgs2	39-58	37,72	9,71	0,32	1,11	48,86	45	92	100	0,00		
	Bg1	58-86	44,95	12,20	0,32	1,00	58,47	55	83	100	0,00		
	Bg2	86-130	35,86	9,07	0,25	0,86	46,04	46	96	100	0,00		
P5: Paguyaman													
	Ap	0-20	25,31	12,64	0,54	0,77	39,26	26	46	100	0,00		
	Bgs1	20-45	22,21	14,64	0,50	1,03	38,38	29	49	100	0,00		
	Bgs2	45-80	20,85	17,65	0,39	1,31	40,20	30	47	100	0,00		
	Bg1	80-110	20,31	20,76	0,31	1,51	42,89	30	42	100	0,00		
	Bg2	110-150	20,51	21,49	0,39	1,64	44,03	34	47	100	0,00		
P6: Sengkang													
	Ap	0-18	17,04	7,34	0,21	0,11	24,70	25	96	100	-		
	Bss1	18-41	19,13	8,54	0,27	0,16	28,10	31	82	92	-		
	Bss2	41-65	25,65	10,57	0,26	0,27	36,75	44	96	84	-		
	Bss3	65-110	21,27	9,06	0,22	0,25	30,80	23	55	100	-		
	BCg	110-150	22,43	9,32	0,32	0,09	32,16	34	74	94	-		
P7: Napu													
	Ag	0-35	4,52	1,33	0,06	0,22	6,13	6	38	100	-		
	Bg1	35-60	2,27	0,94	0,03	0,19	3,43	3	21	100	-		
	Bg2	60-80	2,27	1,49	0,06	0,21	4,03	3	38	100	-		
	Bg3	80-120	3,59	2,75	0,08	0,21	6,63	2	50	100	-		
P8: Bariri													
	A	0-19	9,52	2,18	0,23	0,12	12,05	10	56	100	-		
	Bg1	19-33	7,26	2,10	0,29	0,12	9,77	10	59	99	-		
	Bg2	33-48	9,64	3,70	0,17	0,24	13,75	5	28	100	-		
	Bg3	48-78	5,56	2,36	0,11	0,19	8,22	5	45	100	-		
	BCg	78-120	9,78	5,83	0,23	0,31	16,15	5	26	100	-		

(ekstraksi asam oksalat). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Prasetyo dan Kasno (2001) yang menyatakan bahwa retensi P pada tanah sawah mempunyai korelasi positif dengan Al yang berasal dari mineral alofan.

Kandungan kation basa-basa dapat ditukar Ca, Mg, dan Na umumnya tinggi, kecuali K rendah sampai sangat

rendah. Kapasitas tukar kation (KTK) tanah rendah pada tanah sawah Kotamobagu dan Dumoga (11-23 cmol_c kg⁻¹), sedangkan pada tanah sawah Tondano tinggi (31-39 cmol_c kg⁻¹), yang lebih dipengaruhi oleh kandungan bahan organik. KTK liat pada ketiga tanah sawah termasuk tinggi sampai sangat tinggi (31-177 cmol_c kg⁻¹) pada semua

lapisan. Kejenuhan basa tinggi (>50%) pada semua tanah sawah pada semua lapisan. Kandungan Al^{3+} termasuk rendah, sehingga kejenuhan Al juga rendah (<20%). Berdasarkan sifat-sifat fisik-kimia, tanah sawah di tiga lokasi tersebut mempunyai potensi kesuburan sedang. Faktor penghambat hara K dan C organik rendah, kecuali untuk sawah Tondano mempunyai C organik tinggi. Meskipun demikian, tanah-tanah tersebut mempunyai sumber cadangan mineral mudah lapuk cukup tinggi, sehingga dalam jangka panjang sebagian kebutuhan hara dapat disuplai dari mineral tersebut.

Endapan dari batuan sedimen, volkan dan metamorfik

Pada tanah sawah Paguyaman, Limboto dan Sengkang, reaksi tanah termasuk agak masam sampai agak alkalis (pH 5,7-8,0). Reaksi tanah tersebut berhubungan dengan sifat dari bahan endapan pembentuk tanahnya dan kondisi iklim yang relatif kering. Tanah-tanah sawah tersebut berkembang dari bahan endapan yang mengandung kapur (Ca^{2+}) tinggi pada kondisi rejim kelembaban tanah ustik, sehingga pH tanah netral-basis. Delta pH (selisih pH-KCl dan pH- H_2O) semuanya adalah negatif yang menandakan koloid tanah bermuatan negatif, yang mampu melakukan pertukaran kation. Kandungan C organik dan N organik umumnya rendah yang menurun dengan kedalaman tanah.

Kandungan P_2O_5 total tergolong sedang sampai tinggi (24-61 $mg/100g^{-1}$) dan kandungan P tersedia juga tinggi (57-75 ppm), kecuali pada tanah sawah Sengkang tergolong rendah (6-8 ppm). Kandungan P yang relatif tinggi diduga karena pengaruh residu pemupukan atau dari bahan induk tanahnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tanah sawah tersebut tidak ada masalah dengan hara P. Kandungan K_2O total termasuk tinggi (>20 $mg/100g^{-1}$) pada ketiga tanah sawah tersebut. Sumber hara K pada tanah sawah dapat berasal dari mineral feldspar (ortoklas, sanidin), mika (muskovit, biotit), bahan organik, dan air irigasi. Pada tanah sawah tersebut, kandungan mineral mudah lapuk sebagai sumber hara K, yaitu ortoklas dan sanidin masih cukup tinggi, sehingga kebutuhan hara K akan dapat tercukupi.

Susunan kation dapat ditukar umumnya didominasi oleh Ca^{2+} yang tergolong tinggi sampai sangat tinggi (17,04-46,24 $cmol_c kg^{-1}$), disusul oleh Mg^{2+} (7,34-21,49 $cmol_c kg^{-1}$), Na^+ (0,11-1,64 $cmol_c kg^{-1}$), dan K^+ (0,21-0,54 $cmol_c kg^{-1}$). Dominasi kation dapat ditukar Ca^{2+} selalu terjadi pada tanah-tanah yang berkembang dari batuan yang bersifat karbonatan, seperti batugamping dan napal, dan dari bahan volkan andesit dan basalt (Prasetyo *et al.* 2007). Namun tingginya Ca^{2+} dapat menyebabkan pengikatan P menjadi senyawa Ca-P sehingga kurang tersedia bagi tanaman.

Kapasitas tukar kation tanah dan KTK liat pada ketiga tanah sawah tersebut tergolong tinggi sampai sangat tinggi pada semua lapisan. Hal ini sangat berkaitan dengan pengaruh kandungan mineral liat pada fraksi liat yang didominasi oleh mineral liat tipe 2:1 (smektit). Mineral ini bermuatan negatif yang menyebabkan sangat reaktif dalam lingkungannya. Kejenuhan basa pada ketiga tanah sawah tersebut termasuk sangat tinggi (84-100%) pada semua lapisan, sedangkan kandungan kation Al tidak terdeteksi. Ditinjau dari aspek sifat fisik-kimia dan susunan mineral, tanah-tanah sawah tersebut mempunyai potensi kesuburan cukup tinggi. Kekurangan hara yang menonjol adalah hara P, sehingga diperlukan pemupukan P.

Endapan dari batuan sedimen dan granit-biotit

Tanah-tanah sawah lembah Napu dan Bariri bereaksi masam sampai agak masam (pH 5,2-5,6), yang berkaitan erat dengan sifat bahan induknya dan kondisi iklim basah. Tanah-tanah sawah tersebut berkembang dari bahan endapan yang bersumber dari batuan sedimen bersifat masam dan intrusi granit, yang banyak mengandung kuarsa dan kandungan basa-basa rendah pada kondisi curah hujan cukup tinggi, sehingga pH tanah masam.

Kandungan C organik dan N organik tanah-tanah sawah tersebut tergolong rendah baik di lapisan atas maupun lapisan bawah dan menurun secara teratur dengan kedalaman tanah. Kandungan P_2O_5 total (ekstraksi HCl 25%) cukup bervariasi dari rendah sampai tinggi (15-76 $mg/100g^{-1}$). Pada tanah sawah Bariri, kandungan P_2O_5 termasuk tinggi (>40 $mg/100g^{-1}$) pada semua lapisan. Sedangkan pada tanah sawah Napu, kandungan P_2O_5 lapisan atas tergolong rendah (<20 $mg/100g^{-1}$) dan lapisan bawahnya termasuk tinggi (>40 $mg/100g^{-1}$). Kemungkinan perbedaan tersebut dipengaruhi oleh perbedaan sifat bahan yang diendapkan. Kandungan P tersedia (Bray 1) bervariasi dari rendah sampai tinggi (9-41 ppm) pada sawah Napu dan rendah (5-6 ppm) pada sawah Bariri. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tanah sawah ini terdapat masalah P rendah. Retensi P kedua tanah sawah tersebut termasuk sangat rendah (<8%). Rendahnya retensi P diharapkan fiksasi P juga rendah, sehingga pemberian pupuk P akan menjadi lebih efisien.

Kandungan K_2O total (ekstraksi HCl 25%) termasuk sangat tinggi (187-752 $mg/100g^{-1}$) pada tanah sawah Napu dan Bariri di semua lapisan. Hal ini diduga berkaitan erat dengan sumber bahan induknya yang banyak mengandung sumber hara K. Data komposisi mineral menunjukkan dominasi mineral feldspar (ortoklas dan sanidin) sebagai sumber hara K. Tingginya kandungan K_2O total tersebut dijumpai pula pada tanah-tanah dari bahan endapan di daerah dataran Lambunu, Sulawesi Tengah (Nursyamsi *et al.* 1994), daerah lembah Palu (Hikmatullah *et al.* 2005),

dataran aluvio-koluvial di Kabupaten Donggala (Hikmatullah dan Al-Jabri 2007), dan dataran Sausu Kabupaten Parigi Moutong (Hikmatullah dan Suparto 2006), yang bersumber dari lapukan batuan skis-mika dan granit-biotit. Mineral biotit bersifat sangat mudah lapuk, sehingga tidak terdeteksi dalam susunan mineral pasir pada tanah sawah tersebut.

Susunan kation dapat ditukar didominasi oleh Ca^{2+} yang termasuk rendah sampai sedang ($2,27-9,78 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), kemudian Mg^{2+} sedang sampai tinggi ($1,33-5,83 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), Na^+ rendah ($0,12-0,31 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) dan K^+ rendah ($0,06-0,29 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Rendahnya kation-kation tersebut karena sumber bahan induknya yang miskin hara.

Kandungan K dapat ditukar yang dianggap sebagai K tersedia umumnya rendah sampai sangat rendah ($<0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) pada tanah-tanah sawah di atas. Kondisi ini tampaknya bertolak belakang dengan kandungan K_2O total yang tinggi. Hal ini diduga sebagian K difiksasi oleh mineral liat, atau K masih dalam bentuk mineral primer yang belum terlapuk, sehingga kurang tersedia dalam tanah. Tetapi dengan penggenangan tanah sawah, ketersediaan K dan unsur-unsur lainnya meningkat dan juga dapat mempercepat pelepasan K yang terfiksasi (Adiningsih dan Sudjadi 1983).

KTK tanah sawah di kedua lokasi tersebut tergolong rendah sampai sangat rendah ($3-10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) sedangkan KTK liatnya termasuk tinggi ($21-59 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Besar kecilnya nilai KTK dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah kandungan bahan organik, kandungan fraksi liat, dan jenis mineral liat. Tanah-tanah sawah tersebut mempunyai kandungan bahan organik rendah, tekstur tanah agak kasar (lempung berpasir) dan jenis mineral liatnya tipe 1:1 (kaolinit). Kaolinit mempunyai KTK rendah berkisar antara $3-15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Kejenuhan basa tanah-tanah sawah umumnya tinggi di semua lapisan, karena jumlah basa-basa dan KTK tanahnya seimbang. Berdasarkan sifat-sifat fisik-kimia dan susunan mineral, tanah-tanah sawah di daerah ini mempunyai potensi kesuburan sedang. Faktor pembatas kesuburan adalah kekurangan hara P, bahan organik dan KTK tanah rendah. Oleh sebab itu, penambahan pupuk dan bahan organik sangat dibutuhkan untuk memperbaiki produktivitas tanah sawah tersebut.

Implikasi untuk pertanian

Tanah-tanah sawah pada dataran lakustrin di Sulawesi sangat dipengaruhi oleh sumber bahan induknya yang berasal dari rombakan bahan vulkan, sedimen, metamorfik, dan granit-biotit, yang telah memberikan kontribusi positif terhadap sifat-sifat fisik-kimia dan susunan mineral. Komposisi mineral pasir memberikan cadangan mineral mudah lapuk cukup tinggi sebagai

sumber unsur hara tanah, terutama Ca, Mg, Fe, Na, dan K, sehingga dalam jangka panjang kesuburan tanah akan dapat terpelihara melalui suplai unsur hara dari mineral mudah lapuk tersebut. Endapan dari bahan vulkan pada tanah sawah Tondano dan Kotamobagu memberikan cadangan mineral mudah lapuk paling tinggi, sehingga tanah lebih subur. Bahan induk endapan berasal dari granit-biotit dan feldspar yang kaya cadangan sumber hara K pada tanah sawah Napu dan Bariri dapat mengurangi penggunaan pupuk K.

Perbedaan jenis dan jumlah mineral liat juga berdampak terhadap perlakuan pengelolaan lahan sawah. Pengelolaan tanah sawah yang didominasi mineral semektit dan vermikulit (sawah Paguyaman, Limboto, Sengkang) akan berbeda dengan tanah sawah yang didominasi kaolinit atau haloisit/alofan. Tanah sawah yang didominasi mineral semektit mempunyai muatan negatif bersifat reaktif/responsif terhadap pemupukan, tetapi pada musim kering tanah akan retak-retak, keras dan sulit diolah, sedangkan pada musim hujan tanah akan mengembang dan sangat lengket. Oleh sebab itu, pengolahan tanahnya perlu dilakukan pada kondisi lembab. Sedangkan pada tanah yang didominasi kaolinit atau haloisit, pengolahan sawah dapat dilakukan pada berbagai kondisi, karena mineral tersebut tergolong stabil.

Data komposisi jenis dan asosiasi mineral primer dan mineral sekunder (mineral liat) berperan penting dalam mempengaruhi pengelolaan tanah sawah. Mineral primer dapat digunakan sebagai indikator cadangan sumber hara tanah dan menduga sumber dan sifat bahan induk tanahnya. Sedangkan mineral sekunder dapat mempengaruhi sifat-sifat fisika dan kimia tanah sawah. Oleh sebab itu, penelitian tanah sawah kedepan perlu memperhatikan komposisi mineral mudah lapuk dan jenis mineral liat dalam tanah..

Kesimpulan dan Saran

1. Tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi mempunyai komposisi mineral dan sifat-sifat fisik-kimia yang cukup bervariasi yang dipengaruhi oleh sifat asal sumber bahan induknya. Sumber bahan induk yang berbeda berasal dari rombakan bahan vulkan, sedimen, metamorfik, dan granit-biotit, yang dapat dideteksi dari komposisi mineral pasirnya dan pengaruhnya tercermin dari kandungan hara dalam tanah.
2. Tanah-tanah sawah dari endapan lakustrin di Sulawesi mempunyai kandungan mineral mudah lapuk masih cukup tinggi sebagai cadangan sumber hara tanah. Kondisi tersebut sangat menguntungkan, karena dapat memelihara tingkat kesuburan tanah dengan

memperkaya unsur hara tanah dalam jangka panjang dan juga menjadi sumber muatan negatif yang dapat meningkatkan KTK tanah. Tanah sawah daerah Tondano dan Kotamobagu yang dipengaruhi bahan vulkan mempunyai cadangan sumber hara paling tinggi dibandingkan dengan tanah sawah lainnya, sehingga tanah lebih subur. Tanah sawah Napu dan Bariri mempunyai cadangan sumber hara K tinggi yang dapat menekan penggunaan pupuk K.

3. Perbedaan kandungan dan jumlah jenis mineral liat pada tanah sawah berimplikasi terhadap perbedaan perlakuan pengelolannya. Tanah sawah yang didominasi oleh jenis mineral liat tipe 2:1 (semektit) memerlukan pengolahan tanah pada kondisi lembab untuk menghindari kondisi keras (kering) atau terlalu lengket (basah), sedangkan tanah yang didominasi oleh mineral liat tipe 1:1 (kaolinit) dan haloisit/alofan pengolahan tanah sawah dapat dilakukan pada semua kondisi tersebut.
4. Penelitian tanah-tanah sawah ke depan disarankan perlu memperhatikan data komposisi mineral primer dan mineral sekunder yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam mendukung pengelolaan tanah sawah.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Litbang Pertanian atas pendanaan penelitian ini pada Tahun Anggaran 2010 dan 2011. Kepada para teknisi surveyor dan Laboratorium Kimia dan Mineralogi BBSDLP diucapkan terima kasih atas bantuan selama penelitian lapangan dan analisa contoh tanah di laboratorium.

Daftar Pustaka

Adiningsih, S. dan M. Sudjadi. 1983. Pengaruh penggenangan dan pemupukan terhadap tanah Podsolik Lampung Tengah. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 2:1-8.

Apandi, T. dan S. Bachri. 1997. Peta geologi lembar Kotamobagu, Sulawesi, skala 1:250.000. Puslitbang Geologi, Bandung.

Bachri, S., Sukido, dan N. Ratman. 1993. Peta geologi lembar Tilamuta, Sulawesi, skala 1:250.000. Puslitbang Geologi, Bandung.

BBSDLP (Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian). 2010. Pemetaan potensi sumberdaya lahan tingkat tinjau skala 1:250.000 seluas 1,5 juta ha di Sulawesi Bagian Utara. Dok. No. 11/LA/BBSDLP/2010. Badan Litbang Pertanian, Bogor. 92 hal (*unpublished*).

BBSDLP (Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian). 2011a. Pemetaan potensi sumberdaya lahan tingkat tinjau skala 1:250.000 seluas 2,5 juta ha di Gorontalo dan

Sulawesi Tengah. Dok. No. 22/LA/BBSDLP/2011. Badan Litbang Pertanian, Bogor. 104 hal (*unpublished*).

BBSDLP (Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian). 2011b. Evaluasi potensi dan aktualisasi lahan untuk mendukung ketahanan pangan danantisipasi perubahan iklim di Provinsi Maluku, Maluku Utara, Sulteng, Sultra, Sulsel dan Sulbar. Dok. No. 39/LA/BBSDLP/2011. Badan Litbang Pertanian, Bogor. 265 hal (*unpublished*).

Blackmore, L.C., P.L. Searle, and B.K. Daly. 1981. *Methods for Chemicals Analysis of Soils*. N.Z. Soil Bureau, Scientific Report 80, Lower Hutt, New Zealand. 103p.

Borchardt, G.A. 1989. Montmorillonite and other smectite minerals. Pp 293-330. *In* JB Dixon and SB Weed (Eds.). *Minerals in Soil Environments*. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin.

Brindley, G.W. and G. Brown. 1980. *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*. Mineralogical Society, London. 495p.

Burras, L.E., N.E. Smeck, and J.M. Bigham. 1996. Origin and properties of smectites in loess-derived soils of Western Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1961-1968.

Buurman, P. 1990. Chemical, physical, and mineralogical characteristics for the soil data base. Part 2. Soil Data Base Management. Technical Report No.7, Version 2.1. Land Resource Evaluation and Planning Project. Center for Soil and Agroclimate Research. Bogor.

Chendy, Tf dan B.H. Prasetyo. 2001. Peranan data mineral tanah dalam menunjang interpretasi sumber daya tanah. *J. Tanah dan Air* 2 (1):47-56.

De Coninck, F. 1974. *Physico-chemical aspects of pedogenesis*. State University of Ghent, Belgium.

Desaunettes, J.R. 1977. *Catalogue of landforms for Indonesia*. FAO-Soil Research Institute, Bogor. AGL/TF/INS/44. Working Paper No.13.

Effendi, A.C. dan S.S. Bawono. 1997. Peta geologi lembar Manado Sulawesi, skala 1:250.000. Puslitbang Geologi, Bandung.

Eviati dan Suparto. 2009. *Petunjuk teknis analisa kimia tanah, tanaman, air dan pupuk*. Edisi-2. Balai Penelitian Tanah, Badan Litbang Pertanian. Bogor. 136 hlm.

FAO. 1990. *Guideline for Soil Profile Description*. Third edition. FAO/UN, Rome, Italy.

Glassman, J.R. 1982. Alteration of andesit in wet, unstable soil of Oregon's Western Cascades. *Clays and Clay Min.* 30:253-263.

Hardjowigeno, S., H. Subagyo, dan M.L. Rayes. 2004. Morfologi dan klasifikasi tanah sawah. Hlm 1-28. *Dalam* F. Agus (Eds.) *Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolannya*. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Bogor.

Hikmatullah, B.H. Prasetyo, dan H. Marwan. 2002. Vertisols dari daerah Gorontalo: sifat-sifat fisik-kimia dan komposisi mineralnya. *J. Tanah dan Air* 3:21-32.

Hikmatullah, H. Subagyo, A. Mulyani, dan A. Kartono. 2005. Keragaman sifat-sifat tanah di dataran lembah Palu Sulawesi, dan potensinya untuk pengembangan pertanian. Hlm 91-109. *Dalam* Subagyo *et al.* (Eds.). *Pros. Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumberdaya Tanah dan Iklim*. Buku I. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

- Hikmatullah dan Suparto. 2006. Identifikasi sifat-sifat tanah dari endapan fluviatil di Kecamatan Sausu, Kabupaten Parigi Moutong, Sulawesi Tengah. Hlm 53-66. *Dalam Subardja et al. (Eds.)*. Pros. Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian. Buku II. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Hikmatullah and M. Al-Jabri. 2007. Soil properties of the alluvial plain and its potential use for agriculture in Donggala region, Central Sulawesi. Indonesia J. of Agric. Sci. 8 (2):67-74.
- Hikmatullah. 2008. Karakteristik tanah sawah dan pengelolaannya di Kabupaten Donggala Sulawesi Tengah. J. Wacana Pertanian 7(2):87-94.
- Kasno, A., D. Setyorini, dan Nurjaya. 2001. Status C organik tanah-tanah sawah di Indonesia. Kongres Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI) Padang 21-24 Juli 2003.
- Koenigs, F.F.R. 1950. A sawah profile near Bogor Java. Contr. General Agric. Res. Sta. Bogor No. 15.
- Marsoedi, DS., Widagdo, J. Dai, N. Suharta, Darul, S.W.P., S. Hardjowigeno, J. Hof, dan E. R. Jordans. 1997. Pedoman klasifikasi landform. Laporan Teknis no. 5. Versi 3. LREP II Project, Center for Soil and Agroclimate Research, Bogor.
- Mohr, E.G.J., F.A. Van Baren, and J. Van Schuylenborgh. 1972. Tropical Soils. Third edition. W. Van Hoeve Publ. Ltd. The Hague, The Netherlands.
- Nursyamsi, D., M. Soekardi, dan N. Suharta. 1994. Kesuburan tanah di daerah Lambunu Kabupaten Donggala Sulawesi Tengah. Hlm 127-141. *Dalam Suharta et al. (Eds.)*. Risalah Hasil Penelitian Potensi Sumberdaya Lahan untuk Pengembangan Sawah Irigasi di Kalimantan dan Sulawesi. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Prasetyo, B. H., M. Soekardi, dan H. Subagjo, 1996. Tanah-tanah sawah intensifikasi di Jawa: susunan mineral, sifat-sifat kimia, dan klasifikasinya. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk 14:12-24.
- Prasetyo, B.H. dan A. Kasno. 2001. Sifat morfologi, komposisi mineral, dan fisik-kimia tanah sawah irigasi di Propinsi Lampung. J. Tanah Tropika 12:155-168.
- Prasetyo, B.H. dan Hikmatullah. 2001. Potensi dan kendala pengembangan tanaman pangan lahan basah di Kabupaten Kutai Timur. J. Tanah dan Air 2:97-109.
- Prasetyo, B.H., J.S. Adiningsih, K. Subagyo, dan R.D.M. Simanungkalit. 2004. Mineralogi, kimia, fisika dan biologi tanah sawah. Hlm 29-82. *Dalam F. Agus et al. (Eds.)* Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Prasetyo, B.H., H. Suganda, dan A. Kasno. 2007. Pengaruh bahan vulkan pada sifat tanah sawah. J. Tanah dan Iklim 25:45-58.
- Prasetyo, B. H. dan D. Setyorini. 2008. Karakteristik tanah sawah dari endapan aluvial dan pengelolaannya. J. Sumberdaya Lahan 2 (1):1-14.
- Rayes, M.L. 2000. Karakteristik, genesis dan klasifikasi tanah sawah berasal dari bahan vulkan Merapi. Disertasi Program Pasca Sarjana IPB, Bogor (*unpublished*).
- Rice, T.J., S.W. Buol, and S.B. Weed. 1985. Soil saprolite profiles derived from mafic rock in the North California Piedmont I: Chemical, morphological, and mineralogical characteristics and transformation. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:171-178.
- Selby, M.J. 1990. Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology. Clarendon Press. Oxford. 607p.
- Setyorini, D., L. R. Widowati, dan S. Rochayati. 2004. Teknologi pengelolaan hara lahan sawah intensifikasi. Hlm 137-167. *Dalam F. Agus et al. (Eds.)* Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sukanto Rab. 1982. Peta geologi lembar Pangkajene, Sulawesi Bagian Barat, skala 1:250.000. Direktorat Geologi Bandung.
- Suryani, E. dan B.H. Prasetyo. 2000. Karakteristik sawah irigasi di daerah Kerawang dan Bekasi. Hlm 35-46. *Dalam Irsal Las et al. (Eds.)*. Pros. Seminar Nasional Sumber Daya Lahan. Buku II. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Suryani, E., R.E. Subandiono, dan D. Subardja. 2008. Karakteristik tanah sawah sentra produksi Barih Solok Kabupaten Solok, Sumatera Barat. Hlm 117-131. *Dalam Markus Anda et al. (Eds.)* Pros. Seminar Nasional dan Dialog Sumberdaya Lahan Pertanian. Buku I. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Tan, K. H. 1968. The genesis and characteristics of paddy soils in Indonesia. Soil Sci. and Plant Nutr. 14(3):117-121.
- Van Reeuwijk, L.P. 1993. Procedure for soil analysis. 4th edition. Wageningen, The Netherlands.
- Van Wambeke, A. 1992. Soil of the Tropics. Properties and Appraisal. McGraw-Hill. Inc. New York.
- Wada, K. and S. Aomine. 1973. Soil development on volcanic materials during the quarternary. Soil Sci. 166(3):170-177.