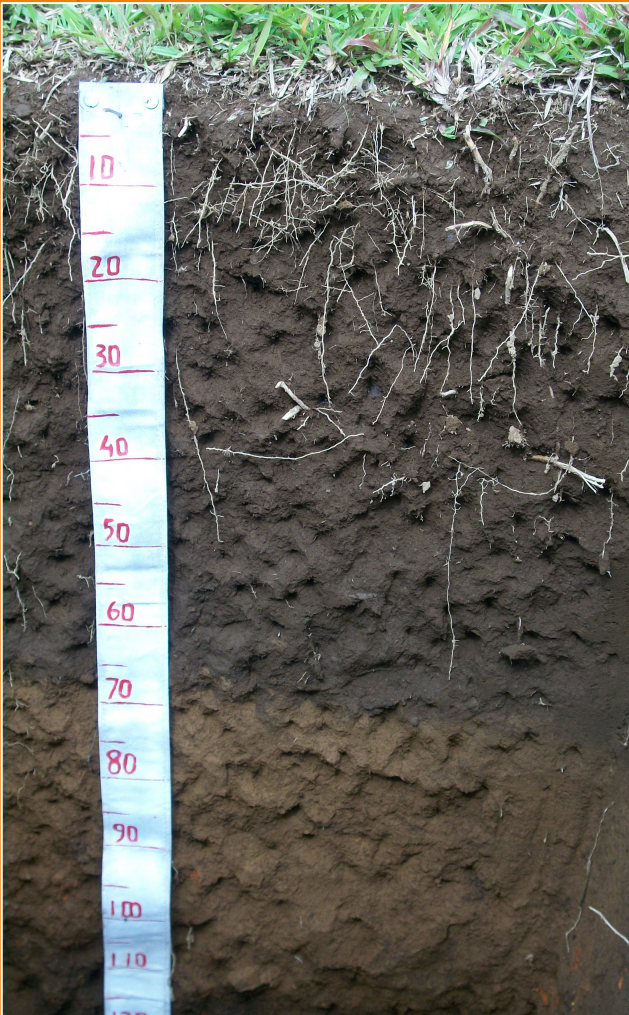


TANAH ANDOSOL DI INDONESIA

Karakteristik, Potensi, Kendala, dan Pengelolaannya untuk Pertanian

Sukarman dan Ai Dariah



SCIENCE . INNOVATION . NETWORKS



BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN

2014



TANAH ANDOSOL DI INDONESIA:

Karakteristik, Potensi, Kendala,
dan Pengelolaannya untuk Pertanian

Disusun oleh:

Sukarman

Ai Dariah

Penyunting:

Markus Anda

Hikmatullah

Yoyo Sulaeman

Redaksi Pelaksana:

Widhya Adhy

Kartika Ratnawati

Widias Utari H.Z.

Emo Tarma

Wahid Noegroho

Diterbitkan tahun 2014 oleh :

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

Kementerian Pertanian

Jl. Tentara Pelajar No. 12, Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor 16114

Telp (0251) 8323012, Fax (0251) 8311256

e-mail : bbsdlp@litbang.pertanian.go.id website : bbsdlp.litbang.pertanian.go.id

Sumber dana: DIPA BBSDLP TA 2014

ISBN 978-602-8977-84-5

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan Syukur Alhamdulillah buku mengenai Tanah Andosol di Indonesia dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Dengan selesainya buku ini diharapkan akan memberikan informasi dan wawasan yang lebih mendalam tentang pentingnya tanah Andosol di Indonesia.

Akhir-akhir ini kejadian gunung meletus di Indonesia semakin sering terjadi. Hal tersebut menyadarkan kita semua bahwa Indonesia berada pada daerah yang dikelilingi oleh gunung berapi aktif dan merupakan bagian dari Cincin Api Pasific (*Pasific Ring of Fire*). Kejadian gunung meletus sering dianggap sebagai suatu musibah tetapi sebenarnya juga bisa dianggap sebagai anugerah. Tanah yang dibentuk karena aktivitas gunung berapi merupakan tanah subur dengan ciri-ciri dan karakteristik yang khas dan unik.

Buku ini merupakan rangkuman dari berbagai hasil survei, penelitian, pengkajian yang dilakukan oleh para peneliti, dosen, mahasiswa tentang tanah Andosol yang berkembang dari abu vulkanik gunung berapi di Indonesia dan referensi lain yang berkaitan hal tersebut. Buku ini disusun dalam tujuh bab utama. Bab 1 berisi tentang hubungan antara pertanian dan tanah Andosol, Bab 2 memaparkan hubungan antara gunung berapi dan tanah Andosol, Bab 3 menceritakan tentang geografi tanah Andosol di Indonesia, Bab 4 menjelaskan tentang karakteristik tanah Andosol, Bab 5 membahas tentang genesis dan klasifikasi tanah Andosol, Bab 6 memberikan informasi tentang potensi dan kendala pemanfaatan tanah Andosol, dan Bab 7 memberikan berbagai informasi dan saran tentang pengelolaan tanah Andosol untuk pertanian.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada yang terhormat Bapak Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian yang telah memberikan kesempatan untuk penerbitan buku ini. Kepada Kepala Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian atas bimbingan dan dorongannya sehingga buku ini dapat diterbitkan. Kepada para Ketua Kelompok Peneliti di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian diucapkan terima kasih atas dorongan dan bimbingannya. Kepada semua rekan-rekan peneliti, teknisi litkayasa, dan pustakawan kami mengucapkan terima kasih atas semua bantuan dan kerjasamanya. Ucapan yang sama juga disampaikan kepada para narasumber yang telah menyempatkan diri menelaah dan memberi sumbang saran dalam perbaikan buku ini.

Akhir kata penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif untuk penyempurnaan buku. Semoga buku ini dapat menambah khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi tentang tanah-tanah yang berkembang dari bahan gunung berapi.

Bogor, Oktober 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
1. PERTANIAN DAN TANAH ANDOSOL	1
1.1. Penduduk dan Pertanian di Tanah Andosol	1
1.1. Pengertian dan Definisi Andosol	3
2. GUNUNG BERAPI DAN TANAH ANDOSOL	5
2.1. Keadaan Geologi di Asia Pasifik	5
2.2. Penyebaran Gunung Berapi dan Tanah Andosol	6
2.3. Gunung Berapi dan Pertanian	9
2.4. Bahan-bahan yang Dikeluarkan pada Erupsi Gunung Berapi	10
2.5. Erupsi Gunung Berapi dan Dampaknya terhadap Sektor Pertanian	16
2.6. Nilai Positif Erupsi Gunung Berapi	19
3. GEOGRAFI TANAH ANDOSOL DI INDONESIA	30
3.1. Sebaran Tanah Andosol	30
3.2. Ketinggian Tempat dan Bentuk Wilayah	31
3.3. Fisiografi dan Bahan Induk	35
3.4. Iklim dan Hidrologi	37
3.5. Vegetasi dan Penggunaan Lahan.....	38
4. KARAKTERISTIK TANAH ANDOSOL	42
4.1. Karakteristik Morfologi Tanah Andosol	42
4.2. Karakteristik Mineralogi Tanah Andosol	48
4.3. Karakteristik Kimia Tanah Andosol	66
4.4. Karakteristik Fisika Tanah Andosol	69
4.5. Karakteristik Biologi Tanah Andosol	71
5. GENESIS DAN KLASIFIKASI TANAH ANDOSOL	73
5.1. Genesis Tanah Andosol	73
5.2. Sifat Penciri Andik dan Epipedon pada Tanah Andosol	77
5.3. Klasifikasi Tanah Andosol	82

	Halaman
6. POTENSI DAN KENDALA PEMANFAATAN TANAH ANDOSOL	88
6.1. Potensi Tanah Andosol untuk Pertanian	88
6.2. Kendala Pemanfaatan Tanah Andosol	94
6.3. Kesesuaian Lahan	99
7. PENGELOLAAN TANAH ANDOSOL UNTUK PERTANIAN	103
7.1. Konsep Pengelolaan Tanah	103
7.2. Pengelolaan Tanah Andosol untuk Pengembangan Pertanian	104
8. PENUTUP	116
DAFTAR PUSTAKA	118
INDEKS PENGARANG	133
INDEKS SUBYEK	137

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
1	Hasil analisis mineral primer material hasil erupsi Gunung Talang, Gunung Sinabung, dan Gunung Merapi	20
2	Beberapa jenis mineral primer yang dijumpai dari bahan abu vulkanik di Indonesia, rumus kimia, dan unsur utama penyusunnya	26
3	Komposisi oksida unsur makro pada abu/pasir vulkanik beberapa gunung di Indonesia	27
4	Klasifikasi abu vulkanik berdasarkan kandungan silika total (Shoji <i>et al.</i> 1993)	28
5	Beberapa jenis tanah utama di Indonesia yang berkembang dari bahan vulkanik	31
6	Ketinggian tempat dan bentuk wilayah tanah Andosol yang pernah diteliti di berbagai lokasi	33
7	Luas tanah Andosol pada berbagai bentuk wilayah setiap pulau di Indonesia ..	34
8	Beberapa sifat bahan induk tanah Andosol Indonesia	36
9	Rata-rata curah hujan (CH) tahunan dan rata-rata suhu udara tahunan pada beberapa lokasi dijumpainya tanah Andosol	37
10	Kisaran warna, C-organik, dan berat isi horison A dan Bw tanah Andosol di Indonesia	44
11	Bahan induk, susunan mineral primer, dan mineral liat dari tanah Andosol Indonesia	50
12	Kandungan gelas vulkanik, kuarsa, dan opak pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia	52
13	Kandungan mineral dari kelompok feldspar pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia	53
14	Kandungan mineral dari kelompok olivin, piroksen, amphibol, dan mika pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia	55
15	Kisaran kandungan aluminium, besi, dan silika yang diekstrak dengan amonium oksalat	67
16	Tanah-tanah Andosol yang dijumpai dan diklasifikasikan berdasarkan BBSDLP (2014) dan <i>Soil Taksonomy</i> (2014)	86
17	Erosi pada lahan sayuran pada tanah Andosol tanpa teknik konservasi tanah ...	95
18	Jumlah C-organik, unsur N, P, dan K yang terangkut bersama tanah yang tererosi pada lahan pertanaman sayuran dataran tinggi	96
19	Nilai unsur hara N, P, dan K tanah Andosol dari beberapa tempat di Indonesia	97

Tabel		Halaman
20	Daftar komoditas hortikultura dan perkebunan yang sesuai untuk tanah Andosol dataran tinggi	101
21	Sifat kimia tanah Andosol kedalaman 0 sampai 20 cm	104
22	Sifat fisik tanah Andosol kedalaman sekitar 0-20 cm	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
1	Panorama kebun teh di Puncak, Bogor	2
2	Kebun sayur di Balai Penelitian Tanaman Sayuran, Lembang, Bandung	2
3	Profil Andosol dataran rendah areal pertanaman tebu PG Sei Semayang, Sumatera Utara (foto: Kartiwa Juanda)	4
4	Kondisi geologi dan pertemuan tektonik lempeng yang mempengaruhi kondisi gunung berapi di Indonesia (sumber: www: http://www.crytalinks.com/rof.html)	8
5	Deretan gunung berapi aktif di Indonesia (sumber: www:http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Indonesia/Maps/map_indonesia_volcanoes.html)	6
6	Salah satu gunung berapi di Indonesia (sumber: www: http://foto-wisata.com/wp-content/uploads/2013/12/Gunung Bromo)	9
7	Tutupan abu (5-10 cm) di lereng Timur Gunung Sinabung	11
8	Tutupan abu vulkanik Gunung Merapi hasil letusan tahun 2010 pada berbagai ketebalan (a) ketebalan 29 cm, (b) ketebalan 13 cm, (c) ketebalan 3 cm, (d) tertimbun di atas daun salak (sumber: Anda dan Sarwani 2012)	12
9	Awan panas Gunung Merapi tahun 2009 (sumber: https://rovicky.wordpress.com/2009/12/)	13
10	Endapan awan panas Gunung Sinabung di Desa Bakerah, Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto: Wahyu Wahdini, Februari 2014)	13
11	Lahar dingin Gunung Merapi di Kali Gendol (foto: Sukarman, Maret 2012) ..	15
12	Lahar hujan dari Gunung Kelud (sumber: Antara Foto, Februari 2014)	15
13	Erupsi Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (sumber: Kemtan, Januari 2014)	17
14	Tanaman hortikultura yang rusak berat tertutup abu vulkanik Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto: Wahyu Wahdini, Februari 2014)	18
15	Tanaman kopi yang rusak berat tertutup abu vulkanik Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto: Wahyu Wahdini, Februari 2014)	18
16	Butiran tephra Gunung Talang yang sebagian permukaannya tertutup oleh mineral non kristalin di bawah mikroskop elektron (sumber: Fiantis <i>et al.</i> 2011)	23
17	<i>Close up</i> butir-butir tephra Gunung Talang yang sudah melapuk di bawah mikroskop elektron (SEM) (sumber: Fiantis <i>et al.</i> 2011)	24
18	Sebaran jenis tanah di Indonesia	30

Gambar	Halaman
19	<i>Landscape</i> lereng vulkan daerah Sembalun, Lombok Timur, NTB tempat tanah Andosol dijumpai 31
20	Jenis tembakau Deli ini sebagian di budidayakan pada tanah Andosol dataran rendah di Kabupaten Deli Serdang (sumber foto: tembakaucerutu.blogspot.com) 39
21	Perkebunan teh pada tanah Andosol di Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat (kiri, foto: Haryono 2011) dan tanaman kopi di Kecamatan Sumber Jaya, Lampung Barat (kanan) 39
22	Kebun sayuran (tomat) di Kaki Gunung Sinabung Kabupaten Karo, Sumatera Utara (kiri), dan kebun sayuran di Sembalun Kaki Gunung Rinjani, Lombok Timur, NTB (kanan) 40
23	Kebun sayuran pada tanah Andosol di Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulut (kiri) dan kebun sayuran pada tanah Andosol di Lembang, Bandung Jawa Barat (kanan) 40
24	Sawah pada tanah Andosol di Sembalun, NTB (kiri) dan di sekitar Danau Tondano, Minahasa, Sulawesi Utara (kanan) 40
25	Taman Nasional Gunung Rinjani di Lombok Timur, NTB, tanahnya sebagian berupa tanah Andosol 41
26	Beberapa <i>scheme</i> profil tanah Andosol yang ada di Indonesia 43
27	Frekuensi distribusi sebaran kandungan C-organik tanah Andosol di Indonesia 46
28	(a) Foto Alofan dengan alat SEM (contoh dari Ue-mura) 10.000 x, (b) Foto alofan dengan alat SEM (contoh dari Choyo) 10,050 x (sumber: Eswaran, 1971) 58
29	Difraktogram yang menunjukkan adanya mineral amorf, contoh tanah dari dataran tinggi Toba (sumber: Prasetyo <i>et al.</i> 2009) 59
30	Termogram DTA yang menunjukkan adanya mineral amorf, contoh tanah Andosol dari Jawa Barat (sumber: Arifin dan Hardjowigeno 1997) 59
31	Foto imogolit dengan SEM (sampel dari Kodonbaru): (a) 187,5 x; (b) 862,5 x (sumber: Eswaran, 1971) 60
32	Foto imogolit dengan SEM (sampel dari Kodonbaru): (c) 862,5 x, (d) x 1.875 x (sumber: Eswaran 1971) 61
33	Gambar mikroskop elektron dari Silika opaline laminar. Acuan garis adalah 2,0 mikron. a = membulat, b= ellips, c = belah ketupat, dan d = gelas vulkanik (sumber: Dahlgren <i>et al.</i> 1993) 62
34	(a) Perubahan feldspars menjadi haloisit, contoh dari Perancis, 10.000 x, (b) Morfologi ofendellite dari Utah 38.000 x (sumber: Eswaran 1971) 63
35	Struktur kaolinit terdiri atas lembar-lembar silika tetrahedral dan aluminium oktahedral (Tan 1982) 65

Gambar	Halaman
36 Hubungan antara retensi fosfat dan $Al_0 + \frac{1}{2} Fe_0$ dari tanah Andosol di Indonesia	67
37 Frekuensi jumlah pengamatan pada setiap kisaran pH lapisan atas beberapa tanah Andosol di Indonesia	68
38 Hubungan antara kandungan C-organik dengan KTK tanah pada horizon A dan B tanah Andosol di Indonesia	69
39 Hubungan antara kandungan C-organik dan berat isi pada tanah Andosol	70
40 Daerah yang diarsir pada gambar di atas menggambarkan kriteria 3c, 3d, dan 3e (Soil Survey Staff 2014)	78
41 Profil Andosol Melanik dari Cipanas Cianjur, Jawa Barat dan Andosol Umbrik dari Cisarua, Bogor	85
42 Profil Andosol Okrik dari Lombok Timur, NTB dan Andosol Vitrik dari Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara	85
43 Diagram kesesuaian lahan beberapa komoditas pertanian dan kehutanan berdasarkan ketinggian tempat	91
44 Kebun jagung dan sayuran di tanah Andosol Lembang (kiri), tanaman teh di tanah Andosol Pangalengan, Bandung (kanan) (foto: Haryono 2011)	92
45 Cover buku 300 Teknologi Inovatif Badan Litbang Pertanian	94
46 Hubungan antara kandungan C-organik dengan kandungan N-total pada tanah Andosol dari berbagai tempat di Indonesia (sumber data: Database BBSDLP)	98
47 Dinamika nitrogen (dalam bentuk nitrat) pada tanah Andosol Wonosobo berdasarkan musim menurut kedalaman pada perlakuan FP (kiri) dan IP (kanan) (Sipahutar <i>et al.</i> 2013)	99
48 Beberapa tanaman hortikultura ditanam pada tanah Andosol di dataran tinggi	106
49 Berbagai merk pestisida umumnya digunakan pada lahan usahatani sayuran .	108
50 Kondisi bedengan searah lereng pada pertanaman tanaman sayur dataran tinggi	109
51 Tingkat erosi pada tanaman sayur dengan bedengan searah lereng (sumber: Suganda <i>et al.</i> 1997; Kosman <i>et al.</i> 1998; Erfandi <i>et al.</i> 2002; Soleh dan Arifin <i>dalam</i> Dariah dan Husen, 2006; Suganda dan Nurida, 2013) dibandingkan dengan erosi yang masih bisa ditoleransi (<i>tolerable soil loss/ TSL</i>).....	109
52 Kondisi teras miring keluar pada pertanaman sayuran di dataran tinggi	110
53 Teknik konservasi tanah yang tergolong baik pada lahan usahatani berbasis sayuran di dataran tinggi Kopeng, Jawa Tengah	111
54 Tanaman jagung dan padi ditanam pada tanah Andosol	111

Gambar		Halaman
55	Tanaman tahunan yang banyak ditanam pada tanah Andosol (kopi arabika, teh, kayu manis)	113
56	Erosi pada lahan hutan dan kopi dengan berbagai umur kopi pada tanah di Desa Bodong (sifat fisik tanah buruk) dan Laksana serta Tepus (sifat fisik baik), Kecamatan Sumberjaya, Lampung Barat (sumber data: Widiyanto 2002, Dariah 2004)	115

1. PERTANIAN DAN TANAH ANDOSOL

1.1 Penduduk dan Pertanian di Tanah Andosol

Indonesia dikenal sebagai negara agraris karena sebagian besar penduduknya bermata pencaharian di bidang pertanian. Letak Indonesia yang berada di daerah tropis membuat Indonesia memiliki dua musim utama, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Sebagian besar wilayah Indonesia mempunyai musim hujan yang lebih lama dibandingkan dengan musim kemarau, sehingga waktu untuk bertani dapat dilakukan dalam periode waktu yang cukup lama. Kondisi tanah pertanian yang subur karena dilewati banyak gunung berapi, membuat pertanian Indonesia menjadi salah satu pilihan pekerjaan utama.

Jika kita mengunjungi tempat wisata di daerah pegunungan dengan udara sejuk dan panorama yang indah, akan tampak hamparan tanam-tanaman subur menghijau seperti tanaman teh atau tanaman sayur-sayuran dan tanaman hortikultura lainnya. Suburnya tanaman di daerah pegunungan tidak terlepas dari kondisi iklim dan tanah yang cocok untuk tanam-tanaman tersebut. Udara sejuk dengan tanah subur yang berasal dari erupsi gunung berapi sangat mendukung tanaman yang tumbuh di atasnya dan dapat berkembang dengan baik. Tanah di daerah pegunungan vulkanik dicirikan oleh warna tanah hitam atau gelap karena tingginya kandungan bahan organik, gembur, ringan dan licin jika dipirid dengan jari tangan. Tanah dengan sifat-sifat demikian disebut tanah Andosol. Gambar 1 dan 2 memperlihatkan kondisi panorama perkebunan teh di Puncak, Bogor dan kebun sayuran di Lembang, Bandung yang tanahnya tergolong Andosol.

Berdasarkan Sensus Pertanian Indonesia tahun 2013 (Badan Pusat Statistik 2013), penduduk Indonesia yang bermata pencaharian sebagai petani berjumlah 31,705 juta jiwa atau 13,34% dari jumlah penduduk Indonesia. Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa penduduk Indonesia yang bermata pencaharian sebagai petani cukup banyak meskipun lahan garapan yang dikuasanya relatif sempit, yaitu rata-rata hanya 8.580 m² atau kurang dari satu hektar. Lahan pertanian yang banyak diusahakan oleh petani adalah tanah-tanah subur yang terletak di dekat gunung berapi, komoditas unggulan yang dibudidayakan adalah sayuran dan tanaman buah-buahan dataran tinggi. Menurut Mohr (1938), bahwa lereng Gunung Merapi dan Merbabu di Jawa Tengah merupakan salah satu lereng gunung api yang sejak lama banyak dihuni penduduk dengan mata pencaharian bertani. Tanah-tanah demikian sudah sejak zaman penjajahan Belanda banyak diusahakan untuk perkebunan besar terutama perkebunan teh.



Gambar 1. Panorama kebun teh di Puncak, Bogor



Gambar 2. Kebun sayur di Balai Penelitian Tanaman Sayuran, Lembang, Bandung

1.2 Pengertian dan Definisi Andosol

Istilah Andosol berasal dari bahasa Jepang yang berarti tanah hitam (An = hitam; do = tanah). Di Jepang tanah hitam yang berkembang dari abu vulkanik diberi nama *Kurobokudo* atau *black fluffy soils* (Wada 1988). "Ando soils" pertama kali diperkenalkan pada tahun 1947 dalam pemetaan tanah tinjau (*reconnaissance*) di Jepang oleh ahli-ahli tanah dari Amerika (Simonson 1979 dalam Shoji *et al.* 1993). Shoji *et al.* (1993) selanjutnya menyatakan bahwa tanah-tanah yang mempunyai sifat-sifat demikian di tiap negara mempunyai nama berbedabeda. Di Jepang diberi nama *Kurobokudo*, *Volcanogenous loams*, *Prairie-like brown forest soils*, *Volcanogenous soils*, *Volcanogenous black soils*, *Humic Allophane soils*. Di Selandia Baru, tanah Andosol diberi nama *Yellow brown loams and Yellow-brown pumice soils*, di Chile dikenal dengan nama *Trumao soils dan Humic Allophane soils*, di Kanada disebut *Acid brown forest soils*, *Acid brown wooded soils*, di Zaire dikenal dengan nama *Sols bruns tropicaux sur materiaux volcaniques*, di Perancis dan Indonesia dikenal dengan nama *Andosols*, dan di USA dikenal dengan nama *Andisols*.

Pada awalnya di Indonesia, Andosol merupakan istilah yang dikenal terbatas dikalangan ahli ilmu tanah, pemerhati ilmu tanah atau yang berkecimpung dalam ilmu pertanian. Mereka mengenal istilah tersebut dari bangku kuliah atau pelajaran sekolah sebagai nama Jenis tanah yang berwarna hitam, ringan, gembur, terasa licin jika dipirid dan berada di daerah gunung berapi. Nama Andosol diperkenalkan kepada masyarakat ilmiah di Indonesia oleh Soeprattohardjo dengan mengenalkan sistem klasifikasi tanah Dudal dan Soeprattohardjo (1957, 1961). Nama tanah Andosol juga dikenal dalam Sistem Klasifikasi Tanah Pusat Penelitian Tanah (1983) dan sistem Klasifikasi FAO/UNESCO (1974, 1988).

Definisi Andosol dalam Sistem Klasifikasi Dudal dan Soeprattohardjo (1957, 1961) adalah tanah berwarna hitam atau coklat tua, struktur remah, kadar bahan organik tinggi, licin (*smearly*) jika dipirid. Tanah bagian bawah berwarna coklat sampai coklat kekuningan, tekstur sedang, porous, pemadatan lemah, akumulasi liat sering ditemukan di lapisan bawah. Andosol hanya dijumpai pada bahan vulkanik yang tidak padu, pada ketinggian 750 sampai 3.000 m di atas permukaan laut (m dpl). Andosol dijumpai pada daerah beriklim tropika basah dengan curah hujan antara 2.500-7.000 mm tahun⁻¹.

Pusat Penelitian Tanah (1983) dan Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (2014) mendefinisikan tanah Andosol sebagai tanah yang mempunyai horison A molik, atau A umbrik dan mungkin terdapat di atas horison B kambik; atau horison A okhrik dan horison B kambik; tidak mempunyai horison diagnostik lain (kecuali jika tertimbun oleh 50 cm atau lebih bahan baru); pada kedalaman sampai 35 cm atau lebih mempunyai satu atau kedua-duanya dari: (a) *bulk density* (pada kandungan air 1/3 bar) dari fraksi tanah halus (kurang dari 2 mm) kurang dari 0,85 g cm⁻³ dan kompleks pertukaran didominasi oleh bahan amorf, (b) 60% atau lebih adalah abu vulkanik vitrik, abu atau bahan piroklastik vitrik yang lain dalam fraksi debu, pasir dan kerikil. Definisi Andosol tersebut di atas mengadopsi definisi Andosol dari FAO/UNESCO (1974, 1988).

Dalam sistem klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff 2014), tanah yang dikenal dengan Andosol tersebut di atas setara dengan Ordo *Andisols*, yaitu tanah yang mempunyai sifat andik. Sebelumnya, Dames (1955) menyebutkan tanah yang mempunyai sifat demikian sebagai *Humic Mountain Soils*. Sedangkan Mitsuchi (1991 dalam Ismangun dan Soekardi 1993) mencirikan tanah Andosol sebagai tanah yang mempunyai epipedon *black humic*.



Gambar 3. Profil Andosol dataran rendah areal pertanian tebu PG Sei Semayang, Sumatera Utara (foto: Katiwa Juanda)

Pengertian dan definisi Andosol yang dikemukakan oleh Pusat Penelitian Tanah (1983) dan Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (2014) seperti tersebut di atas, didasarkan kepada sifat-sifat morfologi tanah yang dapat diukur dan dikuantifikasi (morfometrik). Sedangkan pengertian dan definisi dalam Sistem Klasifikasi Dudal dan Soepraptohardjo (1957, 1961) hanya menyertakan sifat-sifat morfologi tanah yang dapat diukur di lapangan, dengan mensyaratkan jenis bahan induk, ketinggian tempat dan iklim. Definisi dan pengertian yang menyebutkan bahwa Andosol hanya dijumpai di dataran tinggi dan iklim basah perlu direvisi dengan hasil temuan sekarang. Andosol yang sebelumnya dinyatakan hanya dijumpai di dataran tinggi, ternyata belakangan ini dijumpai juga di dataran rendah. Para peneliti Indonesia menemukan bahwa Andosol tidak hanya terdapat pada iklim tropika basah, tetapi terdapat juga di daerah tropika beriklim kering seperti di Pulau Flores, Nusa Tenggara Timur (Sukarman dan Subardja 1997, Hikmatullah dan Nugroho 2010).

2. GUNUNG BERAPI DAN TANAH ANDOSOL

2.1 Keadaan Geologi di Asia Pasifik

Kepulauan Indonesia adalah salah satu wilayah yang memiliki kondisi geologi menarik. Gugusan kepulauannya dibentuk oleh tumbukan lempeng-lempeng tektonik besar. Tumbukan Lempeng Eurasia dan Lempeng India-Australia mempengaruhi Indonesia bagian barat, sedangkan di Indonesia bagian timur, merupakan bagian dari busur Cincin Api Pasifik (*Pasific Ring of Fire*). Pada busur Cincin Api Pasifik dua lempeng tektonik ini ditumbuk lagi oleh Lempeng Samudera Pasifik dari arah timur. Kondisi ini tentunya berimplikasi banyak terhadap kondisi geologi terutama menyangkut penyebaran, lokasi dan karakteristik gunung berapi di Indonesia. Kondisi geologi dan pertemuan lempeng benua di Indonesia dan sekitar Pasifik disajikan dalam Gambar 4.

Fenomena Cincin Api Pasifik memperlihatkan betapa besarnya energi yang bekerja dan mempengaruhi alam di sekitarnya, termasuk terjadinya gunung berapi yang berakibat terhadap pembentukan tanahnya. Busur Cincin Api Pasifik dimulai dari Selandia Baru, Oceania, Indonesia, Philipina, Jepang, Kamysatka, dan Kepulauan Aleut. Kemudian menurun ke Washington, Oregon California, Mexico, Guatemala, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panama, kemudian ke Columbia, Ekuador, Peru dan Chile (Arnold 1988).



Gambar 4. Kondisi geologi dan pertemuan tektonik lempeng yang mempengaruhi kondisi gunung berapi di Indonesia (sumber: [www: http://www.crystalinks.com/rof.html](http://www.crystalinks.com/rof.html))

2.2 Penyebaran Gunung Berapi dan Tanah Andosol

Gunung berapi di Indonesia sebagian besar terbentuk akibat adanya zona subduksi antara lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia. Beberapa gunung berapi terkenal karena letusannya yang dahsyat diantaranya adalah Krakatau, yang letusannya berdampak secara global pada tahun 1883, letusan super vulkan Danau Toba yang diperkirakan terjadi 74.000 tahun lalu yang menyebabkan terjadinya musim dingin vulkan selama enam tahun (Oppenheimer 2002) dan Gunung Tambora dengan letusan paling hebat yang pernah tercatat dalam sejarah pada tahun 1815 (Stothers 1984).

Gunung berapi di Indonesia merupakan bagian dari Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*). Indonesia memiliki 127 gunung berapi aktif dengan kurang lebih 5 juta penduduk yang berdiam di sekitarnya. Sejak 26 Desember 2004, setelah terjadi gempa besar dan tsunami di Aceh dan sekitarnya, banyak pola letusan gunung berapi berubah, misalnya Gunung Sinabung di Provinsi Sumatera Utara, yang tercatat tidak pernah meletus sejak tahun 1.600-an, tetapi tiba-tiba aktif kembali pada tahun 2010 dan meletus pada 2013. Sebaran dan daftar gunung berapi di Indonesia banyak dikemukakan dan dibahas oleh dua vulkanolog yakni Tom Simkin dan Lee Siebert berdasarkan katalog gunung berapi aktif dari Asosiasi Internasional Vulkanologi dan Kimia Interior Bumi (Simkin and Siebert 1994). Gambaran mengenai sebaran gunung berapi aktif di Indonesia disajikan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Deretan gunung berapi aktif di Indonesia (sumber: [www:http://volcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Indonesia/Maps/map_indonesia_volcanoes.html](http://volcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Indonesia/Maps/map_indonesia_volcanoes.html))

Geografi gunung berapi di Sumatera didominasi oleh jajaran pegunungan bernama Bukit Barisan. Jajaran pegunungan ini membentang sepanjang hampir 1.700 km dari Utara ke Selatan Pulau Sumatera, dan terbentuk oleh pergerakan lempeng tektonik Australia. Puncak gunung tertinggi di jajaran pegunungan Bukit Barisan adalah Gunung Kerinci, dengan

ketinggian 3.800 m dpl. Gunung berapi aktif lainnya adalah Gunung Sinabung di Sumatera Utara, Gunung Talang dan Gunung Marapi di Sumatera Barat. Gunung berapi purba yang pernah tercatat ada di Pulau Sumatera adalah Super Volcan Toba (Oppenheimer 2002).

Gunung Krakatau merupakan bagian dari deretan gunung berapi yang terletak di Selat Sunda. Gunung ini pernah meletus hebat pada tahun 1883, memusnahkan dua pertiga pulau dan menyisakan kaldera besar di bawah laut. Kerucut baru terbentuk dari bawah permukaan laut di tengah-tengah kaldera yang disebut Anak Krakatau (Whittaker and Bush 1993). Pulau Krakatau lainnya yang terbentuk akibat letusan 1883 adalah Sertung, Panjang, dan Rakata. Bahan-bahan piroklastik yang dilemparkan pada saat Gunung Krakatau meletus banyak menutup wilayah Banten dan Lampung, sehingga berpengaruh terhadap sifat-sifat tanah di daerah tersebut.

Pulau Jawa merupakan pulau yang mempunyai jumlah gunung berapi cukup banyak. Terdapat 45 gunung berapi aktif, tidak termasuk 20 kawah dan kerucut kecil di kompleks vulkanik Dieng dan kerucut muda di kompleks kaldera Tengger. Gunung Merapi, Semeru, dan Kelud adalah tiga gunung berapi yang paling aktif di Pulau Jawa. Gunung Semeru terus mengeluarkan letusan sejak tahun 1967. Gunung Merapi tercatat 82 kali meletus dalam periode tahun 1006-2011 (Haryono dan Noor 2012). Gunung Kelud terakhir kali meletus pada tanggal 13 Pebruari 2014 (Wasono 2014). Karena intensitas tutupan gunung berapi di pulau Jawa cukup rapat, menyebabkan sebagian besar pulau Jawa banyak tertutup oleh material gunung berapi yang sangat berpengaruh positif terhadap sifat tanah. Oleh karena itu, tanah-tanah di Pulau Jawa umumnya lebih subur.

Gunung berapi di Kepulauan Sunda Kecil (Pulau Bali, Lombok, Sumbawa, Flores, Sumba, dan Timor) terbentuk karena kerak samudera dan pergerakan landas benua. Gunung-gunung tersebut terkonsentrasi di Pulau Bali, Lombok, Sumbawa, dan Flores. Di Pulau Bali gunung berapi yang terkenal adalah Gunung Agung dan di Pulau Lombok adalah Gunung Rinjani. Beberapa gunung berapi membentuk sebuah pulau sepenuhnya, misalnya Pulau Sangeang Api di sebelah timur laut Pulau Sumbawa yang meletus pada tanggal 30 Mei 2014. Gunung Tambora di Pulau Sumbawa meletus pada 5 April 1815, dan dianggap sebagai letusan terhebat dalam catatan sejarah (Stothers 1984). Gunung lainnya yang terdapat di Pulau Flores diantaranya adalah Gunung Kelimutu dan Gunung Egon.

Laut Banda di sebelah selatan Kepulauan Maluku terdiri atas sekelompok pulau-pulau kecil. Tiga lempeng tektonik bawah laut; Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia, telah bertemu di sana sejak zaman Mesozoikum. Gunung berapi di Laut Banda umumnya berupa pulau-pulau, tetapi ada juga beberapa gunung berapi bawah laut. Gunung berapi yang ada di laut Banda antara lain Gunung Banda Api, Gunung Nila dan Gunung Teon ([http://id.wikipedia.org/wiki/ Daftar_gunung_berapi_di_Indonesia](http://id.wikipedia.org/wiki/Daftar_gunung_berapi_di_Indonesia)).

Sebaran gunung berapi di Sulawesi hanya terdapat di Sulawesi Utara hingga Kepulauan Sangihe. Sementara bagian tengah terdiri atas kawasan pegunungan tinggi, namun sebagian besar bukan gunung berapi. Gunung berapi yang terdapat di Pulau Sulawesi diantaranya

adalah: Gunung Lokon, Gunung Soputan, Gunung Mahawu, Gunung Karangetan, dan Gunung Lompobatang.

Pulau Halmahera di Provinsi Maluku Utara terbentuk oleh pergerakan tiga lempeng tektonik yang menghasilkan dua pegunungan yang saling berpotongan. Sebuah busur vulkanik membentang dari utara ke selatan di Halmahera bagian barat, beberapa di antaranya adalah pulau-pulau vulkanik, misalnya Gunung Gamalama dan Gunung Tidore. Gunung berapi lainnya yang terdapat di Halmahera antara lain Gunung Gamkonora dan Gunung Ibu.

Indonesia dikenal sebagai negara yang mempunyai gunung berapi aktif terbanyak (30%) di dunia. Menurut Arnold (1988) tercatat ada lebih 1.300 gunung berapi di dunia, sekitar setengahnya memiliki letusan bersejarah yang berpengaruh terhadap sumberdaya alam sekitarnya serta perilaku masyarakat di sekelilingnya. Salah satu hal yang dicatat dari letusan gunung berapi adalah jenis batuan yang dikeluarkan selama terjadinya erupsi. Jenis batuan beku yang dikeluarkan oleh gunung berapi akan sangat menentukan jenis dan karakteristik tanah yang terbentuk.

Erupsi gunung berapi, mengeluarkan bahan vulkanik (bom, lahar, lava, pasir, debu dan abu) yang kemudian terakumulasi di bagian puncak, lereng, bagian kaki dan daerah sekitarnya. Pada tahap awal bahan-bahan yang relatif baru tersebut membentuk tanah yang disebut sebagai Regosol (Entisols). Dengan bertambahnya waktu, bahan abu vulkanik kemudian berkembang menjadi tanah-tanah yang terdeteksi mengandung mineral non kristalin (*short-range-order*), berwarna gelap, mengandung karbon organik tinggi, gembur, berat isi rendah, terasa licin (*smearly*) bila dipirid, memiliki permukaan mineral liat yang luas, dan mengandung banyak gelas vulkanik. Tanah-tanah yang berkembang dari hasil erupsi gunung berapi ini, memperlihatkan ciri khas dan unik yang tidak dimiliki oleh tanah-tanah lain yang berkembang dari bahan bukan vulkanik. Tanah-tanah seperti tersebut di atas, dalam klasifikasi Dudal dan Soepraptohardjo (1961) dikenal dengan nama tanah Andosol atau dalam sistem klasifikasi Taksonomi Tanah (*Soil Survey Staff* 2014) dikenal sebagai Ordo *Andisols* dan dalam sistem klasifikasi FAO/UNESCO (1974, 1988) dikenal dengan nama Andosol.

Untuk memahami penyebaran tanah Andosol di Indonesia perlu diketahui penyebaran tanahnya dan dikaitkan dengan faktor-faktor pembentuk tanahnya. Teori klasik dari Jenny (1941) menyatakan ada lima faktor pembentuk tanah yaitu: bahan induk, iklim, topografi, vegetasi dan waktu. Tanah Andosol merupakan tanah yang berkembang dari bahan vulkanik, oleh karena itu penyebaran tanah Andosol secara geografis tidak terlepas dari penyebaran gunung berapi.

Kawasan gunung berapi di Indonesia yang mempunyai tanah Andosol umumnya berpenduduk padat, karena kesuburan dan keindahan panoramanya. Daerah ini merupakan sentra-sentra produksi pertanian terutama tanaman hortikultura dan tanaman perkebunan dataran tinggi. Sejak zaman dahulu, daerah ini merupakan daerah pertanian yang subur sehingga selalu dipadati oleh penduduk, walaupun tidak lepas dari ancaman bencana letusan. Dalam rekaman sejarah gunung berapi di dunia, tercatat sepuluh letusan besar menelan korban

lebih dari 211.000 jiwa, dua di antaranya terjadi di Indonesia, yaitu Gunung Tambora tahun 1815 (lebih dari 80.000 jiwa), dan Gunung Krakatau tahun 1883 (36.000 jiwa) (Pratomo 2006).



Gambar 6. Salah satu gunung berapi di Indonesia (sumber: [www:http://foto-wisata.com/wp-content/uploads/2013/12/ Gunung Bromo](http://foto-wisata.com/wp-content/uploads/2013/12/Gunung%20Bromo))

Gunung berapi lainnya yang letusannya cukup fenomenal adalah Gunung Merapi di Jawa Tengah, Gunung Galunggung di Jawa Barat, Gunung Lokon, Gunung Soputan di Sulawesi Utara, dan yang terakhir pada tahun 2014 adalah Gunung Sinabung di Sumatera Utara, Gunung Kelud di Jawa Timur serta Gunung Sangeang di Nusa Tenggara Barat.

2.3 Gunung Berapi dan Pertanian

Tanah abu vulkanik atau tanah Andosol adalah salah satu tanah yang subur dan paling produktif dibandingkan dengan tanah-tanah lain. Oleh karena itu kawasan ini memiliki daya tampung manusia yang sangat tinggi. Sudah lama diketahui bahwa tanah subur di Indonesia adalah tanah yang berada di lingkungan gunung berapi. Mohr (1938) menunjukkan bahwa berdasarkan hasil Sensus Penduduk Tahun 1930, tanah yang paling subur dan penduduknya padat di Indonesia adalah tanah abu vulkanik muda. Dia juga menggambarkan tanah dan kepadatan penduduk di daerah sekitar Gunung Merapi di Jawa Tengah sebagai kasus yang luar biasa. Daerah dengan endapan abu vulkanik termuda memiliki kepadatan penduduk melebihi 400 jiwa km⁻², sementara daerah tanpa endapan abu vulkanik menunjukkan hanya 245 jiwa km⁻². Untuk daerah di sekitar lereng Gunung Merapi memiliki kepadatan penduduk dari 800 sampai lebih dari 1.000 jiwa km⁻². Dia mencatat bahwa bahan induk tanah di daerah

ini tergolong sangat subur dan memiliki komposisi batuan basaltik dengan kandungan kalsium, magnesium, besi, fosfor yang sangat tinggi. Selain itu, menarik untuk dicatat bahwa sisa-sisa peradaban awal terkenal orang Jawa seperti ibukota lama Yogyakarta, Candi Prambanan, dan Candi Borobudur terletak di sekitar gunung berapi aktif, yaitu Gunung Merapi dan Gunung Merbabu.

Gunung berapi seringkali mengeluarkan abu vulkanik secara berulang-ulang seperti yang ditunjukkan oleh beberapa strata lapisan abu di daerah sekitar gunung berapi ini. Pada tanah-tanah yang berkembang dari bahan abu vulkanik tersebut banyak dimanfaatkan untuk pertanian tanaman hortikultura terutama sayur-sayuran dan tanaman perkebunan seperti teh. Sentra-sentra produksi tanaman hortikultura dan perkebunan di Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Pulau Bali, Pulau Lombok dan Pulau Flores, Provinsi Sulawesi Utara dan Provinsi Maluku Utara umumnya terletak pada tanah-tanah yang berkembang dari bahan abu vulkanik muda.

Selain tingginya kesuburan tanah, faktor lain yang menarik penduduk untuk menghuni daerah gunung api ini adalah udara yang sejuk dan bersih. Daerah ini umumnya berada pada ketinggian lebih dari 700 m dpl, sehingga tanaman yang dibudidayakan juga adalah tanaman khas dataran tinggi.

2.4 Bahan-bahan yang Dikeluarkan pada Erupsi Gunung Berapi

Bahan-bahan yang dikeluarkan pada saat erupsi gunung berapi dapat dipilah menjadi empat kelompok, yaitu: (1) aliran lava, (2) gas dan uap, (3) piroklastik, dan (4) lahar. Di permukaan bumi, keempat jenis batuan tersebut seiring dengan perkembangan waktu akan membentuk tanah tertentu yang mempunyai karakteristik morfologi, kimia-fisik dan biologi spesifik. Menurut Shoji *et al.* (1993) di daerah tropika yang banyak hujan, tanah Andosol sebagian besar terbentuk dari bahan-bahan piroklastik berupa abu vulkanik dan lahar. Berkaitan dengan hal tersebut maka pembahasan selanjutnya mengenai bahan erupsi yang membentuk tanah Andosol akan difokuskan kepada bahan piroklastik atau abu vulkanik, endapan awan panas dan lahar.

Bahan Piroklastik

Piroklastik berasal dari kata *pyro* berarti pijar, dan *klastika* yang berarti bentuk fragmen. Piroklastik terdiri atas fragmen-fragmen pijar berukuran halus (debu) hingga berukuran bongkah-bongkah besar yang disebarkan pada saat terjadi letusan. Piroklastik dapat diangkat oleh udara, yang kasar kemudian dijatuhkan di sekitar tubuh gunung berapi, sedangkan yang halus akan dibawa angin ke tempat yang lebih jauh bahkan dapat berada di udara hingga mencapai beberapa hari. Gunung berapi Krakatau yang berada di Selat Sunda pada saat meletus tahun 1883, telah mengeluarkan awan piroklastik setinggi 80 km ke udara, menghalangi sinar matahari sehingga menimbulkan kegelapan sampai tiga hari berturut-turut.

Menurut Shoji *et al.* (1993), penyebaran pola bahan piroklastik yang dilempar ke udara pada saat gunung meletus sangat tergantung pada arah angin, kekerasan letusan gunung berapi, dan jenis abu vulkanik. Pada lintang menengah dan tinggi, kekuatan angin barat akan

sangat kuat, maka bahan yang terlempar ke udara akan tertiuip angin ke arah timur yang membentuk elips yang sangat memanjang. Sebaliknya, pada daerah-daerah yang mempunyai tiupan angin relatif tenang, maka ketika letusan terjadi, bahan piroklastik cenderung jatuh di sekitar gunung berapi tersebut dan arah penyebaran bahan berdebu bersifat kurang teratur.

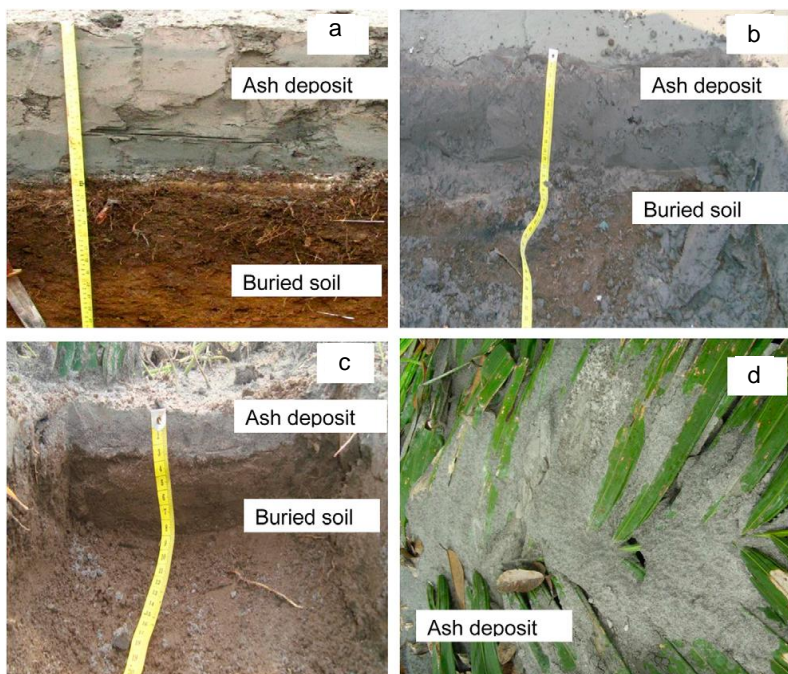
Piroklastik dikelompokkan berdasarkan (1) susunannya secara umum, (2) cara terjadinya, (3) ukuran fragmen, (4) keadaan pada saat disebarkan dan jatuh ke permukaan bumi, dan (5) berdasarkan tingkat konsolidasinya. Namun pengelompokkan piroklastik yang paling banyak digunakan dan paling penting adalah yang didasarkan kepada ukuran, bentuk fragmen, dan tingkat konsolidasinya.

Abu Vulkanik

Abu vulkanik adalah fragmen yang berukuran kurang dari 2 mm hingga ukuran debu dan apabila memadat dan membatu dinamakan tufa. Tufa dapat juga mengandung beberapa fragmen berukuran besar (lapili atau breksi), maka kita juga mempunyai istilah-istilah tufa lapili dan tufa breksi. Di lapangan kedua istilah ini dapat diamati sebagai lapili atau breksi sebagai fragmen, dan tufa sebagai semennya. Abu vulkanik dapat menutup lahan di sekitar gunung meletus pada berbagai ketebalan. Gambar 7 memperlihatkan tutupan abu vulkanik Gunung Sinabung yang menutupi lahan pertanian dengan ketebalan 5-10 cm, sedangkan Gambar 8 memperlihatkan tutupan abu vulkanik Gunung Merapi letusan tahun 2010 pada berbagai ketebalan.



Gambar 7. Tutupan abu (5-10 cm) di lereng Timur Gunung Sinabung



Gambar 8. Tutupan abu vulkanik Gunung Merapi hasil letusan tahun 2010 pada berbagai ketebalan (a) ketebalan 29 cm, (b) ketebalan 13 cm, (c) ketebalan 3 cm, (d) tertimbun di atas daun salak (sumber: Anda dan Sarwani 2012)

Awan Panas

Salah satu material yang dikeluarkan pada saat erupsi gunung berapi adalah awan panas (Gambar 9). Istilah awan panas dipakai untuk menyebut aliran suspensi dari batu, kerikil, abu, pasir dalam suatu masa gas vulkanik panas yang keluar dari gunung berapi dan mengalir turun mengikuti lerengnya dengan kecepatan bisa lebih dari 100 km jam⁻¹ sejauh puluhan km. Aliran turbulen tersebut dari jauh tampak seperti awan bergulung-gulung menuruni lereng gunung berapi (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungapian 2012). Gambar 9 memperlihatkan luncuran awan panas Gunung Merapi ketika meletus.

Endapan awan panas atau lebih sering disebut sebagai endapan piroklastik merupakan endapan hasil erupsi gunung berapi. Material endapan awan panas ini memiliki ciri khusus karena dibentuk secara genesa yang unik. Materialnya terdiri atas material guguran akibat runtuhnya kubah lava di kepundan. Material ini bercampur dengan material lain yang ikut terbawa selama transportasinya. Hasil penelitian Tim Badan Litbang Pertanian (2014), ketebalan endapan awan panas hasil erupsi Gunung Sinabung Sumatera Utara bervariasi antara 1-3 m (Gambar 10).



Gambar 9. Awan panas Gunung Merapi tahun 2009 (sumber:<https://rovicky.wordpress.com/2009/12/>)



Gambar 10. Endapan awan panas Gunung Sinabung di Desa Bakerah, Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto:Wahyu Wahdini, Februari 2014)

Lahar

Lahar adalah istilah di Indonesia yang digunakan terhadap produk gunung berapi yang diangkut oleh air hujan atau berasal dari danau kepundan. Istilah ini sudah menjadi istilah internasional yang sebelumnya dikenal sebagai *mudflow* atau *fragmental flow*. Lahar bergerak mengalir dikendalikan oleh gaya berat dan topografi. Di Indonesia, terutama bagi orang awam, istilah lahar dan lava seringkali dikaburkan. Apa yang mereka sebut lahar, sebenarnya adalah lava yang keluar dari kepundan.

Tidak semua gunung berapi di Indonesia menghasilkan aliran lahar. Lahar umumnya kita jumpai di wilayah sekitar gunung berapi yang secara periodik memperlihatkan kegiatannya dan mengeluarkan bahan piroklastik. Gunung Merapi di Jawa Tengah atau Gunung Semeru di Jawa Timur, adalah gunung berapi yang sering diberitakan terjadinya aliran lahar. Namun demikian endapan-endapan lahar yang mempunyai ciri-ciri khas, masih dapat dikenali di gunung-gunung berapi yang sudah tidak memperlihatkan kegiatannya. Bahkan endapan lahar juga terlihat pada produk gunung berapi Tersier. Berdasarkan cara terjadinya dikenal dua jenis lahar, yaitu: (1) lahar dingin dan (2) lahar panas.

Lahar Dingin

Material gunung berapi yang belum terkonsolidasi dan terkumpul di bagian puncak serta lereng, pada saat atau beberapa saat setelah erupsi kemudian terjadi hujan, maka bahan-bahan piroklastik tersebut akan diangkut dan bergerak kebawah sebagai aliran pekat dengan densitas tinggi. Bahan-bahan piroklastik mulai dari bongkah, bom vulkanik, lapili dan debu akan bergerak ke bawah melalui lembah-lembah pada lereng gunung berapi. Karena densitasnya yang besar serta geraknya dikendalikan oleh tarikan gaya berat dan topografi, maka aliran lahar mampu mengangkut bongkah-bongkah ukuran besar hingga jarak yang sangat jauh (Noor 2012). Aliran material ini yang disebut sebagai lahar dingin.

Endapan lahar dingin dicirikan oleh tercampurnya ukuran bahan secara tidak teratur, meskipun masih nampak adanya kecenderungan bahwa fragmen yang besar-besar dan berat akan terkumpul di bagian bawah dari endapan. Setelah perjalanannya agak jauh dari sumbernya, lahar ini akan berangsur menjadi sungai dan mengendapkan bebannya sebagaimana sungai biasa.

Istilah lain yang sekarang sering digunakan adalah lahar hujan. Menurut Surono (2014) lahar hujan terjadi setelah gunung tidak meletus yang disebabkan oleh air hujan yang bercampur material erupsi/letusan (batu, abu, kerikil hingga batu besar) bergerak mengikuti alur lembah dan atau sungai yang berhulu di puncak gunung berapi. Sedangkan lahar dingin terjadi sesaat setelah gunung meletus yang membawa material masih panas kemudian terkena hujan dan mengalir ke bawah (gunung) dan alirannya menjadi dingin.



Gambar 11. Lahar dingin Gunung Merapi di Kali Gendol



Gambar 12. Lahar hujan dari Gunung Kelud (sumber: Antara Foto, Februari 2014)

Lahar Panas

Beberapa gunung berapi, dasar kepundannya bersifat kedap air menyebabkan sejumlah air hujan akan terkumpul sehingga terbentuk sebuah danau. Di Indonesia gunung-gunung berapi yang mempunyai danau di atasnya antara lain Gunung Kelud di Jawa Timur, Gunung Galunggung di Jawa Barat dan Gunung Agung di Bali. Bahan liat (*clay*) yang menyebabkan

dasar kepundan kedap air itu berasal dari perubahan batuan yang membentuk dinding kepundan oleh gas-gas yang keluar dari saluran magma. Bahan yang halus ini akan diangkut oleh hujan yang turun dan diendapkan pada dasar kepundan.

Berdasarkan catatan pakar gunung berapi di Indonesia, Gunung Galunggung di Jawa-Barat, pada tahun 1822 meletus dan memuntahkan seluruh danau beserta isinya yang sudah tercampur bahan-bahan dari magma. Akibat dari letusan tersebut, terjadi aliran lahar panas dan mampu menempuh jarak 60 km. Gunung Kelud di Jawa Timur yang mempunyai danau pada kepundannya, pada letusan yang terjadi pada tahun 1919 telah menimbulkan terjadinya aliran lahar panas yang merusak 130 km² lahan pertanian dan menelan hampir 5.000 korban jiwa. Karena gunung berapi ini memperlihatkan kegiatannya secara teratur, maka untuk menghindari terjadinya malapetaka seperti yang berlangsung pada tahun 1919, pemerintah Hindia Belanda waktu itu membangun terowongan-terowongan, untuk mengurangi volume air yang terkumpul dalam kepundan sehingga apabila terjadi letusan, tidak akan terlalu banyak mengeluarkan lahar panas.

2.5 Erupsi Gunung Berapi dan Dampaknya Terhadap Sektor Pertanian

Erupsi gunung berapi merupakan proses keluarnya magma dari perut bumi ke permukaan bumi. Sedangkan magma merupakan campuran batu-batuan dan logam dalam keadaan yang cair, liat, serta sangat panas yang ada dalam perut bumi. Gunung berapi terbentuk akibat adanya proses intrusi dan ekstrusi di dalam lapisan kulit bumi.

Abu vulkanik adalah bahan material vulkanik jatuhan yang disebarkan ke udara saat terjadi suatu letusan dan dapat jatuh pada jarak mencapai ratusan bahkan ribuan kilometer dari kawah karena pengaruh hembusan angin. Dalam jangka pendek, abu vulkanik memiliki dampak yang buruk bagi lingkungan hidup. Gambar 13 memperlihatkan abu vulkanik yang menyebar terbawa tiupan angin pada saat Gunung Sinabung meletus yang terjadi pada bulan Januari 2014.

Letusan atau erupsi gunung berapi di Indonesia selain merusak pemukiman, lahan dan tanaman pertanian, infrastruktur serta lingkungan juga banyak menelan korban manusia yang tidak sedikit. Beberapa bencana letusan gunung berapi terkenal di Indonesia telah menelan banyak korban. Sejumlah gunung berapi di Indonesia pernah mencatatkan sejarah kelam dalam hal jumlah korban jiwa akibat letusannya mulai dari beberapa jiwa sampai puluhan ribu jiwa. Beberapa gunung yang pernah meletus sangat dahsyat dan menimbulkan korban diantaranya adalah: Gunung Tambora di NTB, Gunung Krakatau di Selat Sunda, Gunung Kelud di Jawa Timur, Gunung Galunggung di Jawa Barat, Gunung Agung di Bali, Gunung Soputan di Sulawesi Utara, dan Gunung Sinabung di Sumatera Utara serta gunung pra Sejarah Gunung Toba di Sumatera Utara.



Gambar 13. Erupsi Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (sumber: Kemtan, Januari 2014)

Setelah kejadian erupsi Gunung Sinabung dan Gunung Kelud, Kementerian Pertanian telah melakukan perhitungan tentang kerugian yang diakibatkan oleh bencana tersebut. Dalam konferensi pers yang disampaikan oleh Menteri Pertanian pada tanggal 4 Maret 2014 menyebutkan bahwa kerugian akibat erupsi Gunung Sinabung untuk sektor pertanian diperkirakan berkisar antara Rp 1,3 triliun sampai Rp 1,5 triliun. Sedangkan kerugian akibat erupsi Gunung Kelud diperkirakan Rp 377,540 miliar. Luas lahan pertanian yang rusak terkena abu vulkanik di wilayah bencana Gunung Sinabung mencapai 50.921 ha tersebar di 14 kecamatan, dengan rincian tanaman pangan seluas 26.666 ha, hortikultura 18.853 ha dan perkebunan 5.402 ha. Dari total luas lahan yang terkena abu vulkanik, luasan yang puso sebanyak 12.399 ha dengan perincian tanaman pangan 2.255 ha, hortikultura 6.864 ha dan perkebunan 3.280 ha (Biro Humas Kementerian Pertanian 2014).

Sementara itu, erupsi Gunung Kelud, di Propinsi Jawa Timur menyebabkan kerusakan lahan pertanian yang terdiri atas padi 871 ha, jagung 790 ha, cabai merah 538 ha, cabai rawit 1.220 ha, tomat 155 ha, bawang merah 47 ha dan nanas 1.200 ha. Komoditas pertanian yang mengalami kerusakan ringan sampai sangat berat adalah tanaman pangan (padi dan jagung), sayuran (cabai, tomat, kacang panjang), tanaman perkebunan (kopi, kakao dan tebu) dan tanaman buah-buahan (jeruk, apel, durian, dan mangga). Untuk ternak sapi perah di Kabupaten Malang dan Kediri, terjadi kesulitan mendapatkan pakan ternak, karena tertutupnya rumput pakan oleh material erupsi. Sebagian ternak lainnya dijual oleh pemiliknya akibat kesulitan mendapatkan pakan ternak.



Gambar 14. Tanaman hortikultura yang rusak berat tertutup abu vulkanik Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto: Wahyu Wahdini, Februari 2014)



Gambar 15. Tanaman kopi yang rusak berat tertutup abu vulkanik Gunung Sinabung di Kabupaten Karo, Sumatera Utara (foto: Wahyu Wahdini, Februari 2014)

Letusan Gunung Merapi di Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta pada tahun 2010 ditaksir menyebabkan petani menderita kerugian ditaksir lebih kurang Rp 20,8 miliar, kerusakan hutan Rp 5,5 triliun, kerugian PLN Rp 55,8 miliar, koperasi Rp 32,1 miliar, UKM

khusus Jawa Tengah Rp 479,32 miliar dan Kabupaten Sleman Rp 3,385 triliun (Saptono 2011 dalam Haryono dan Noor 2012).

Dalam jangka panjang, abu vulkanik memiliki manfaat untuk kehidupan manusia khususnya di bidang pertanian. Dari kandungan abu terdapat berbagai unsur hara tanaman yang esensial yang dapat menyebabkan lahan menjadi subur kembali karena dapat suplay hara esensial yang baru. Namun demikian, penduduk di daerah ini harus selalu diberi penyuluhan dan pengetahuan tentang bahaya letusan gunung berapi. Fakta sudah membuktikan bahwa banyak korban berjatuhan ketika penduduk setempat lalai dalam mengantisipasi bencana akibat erupsi gunung berapi.

2.6 Nilai Positif Erupsi Gunung Berapi

Pada saat terjadinya erupsi gunung berapi, dari kawah keluar bahan-bahan vulkanik berupa gas, cairan dan padatan. Salah satu bahan padat yang dikeluarkan adalah pasir dan abu vulkanik segar, yang menyebabkan tertutupnya tanah sekitar gunung tersebut. Menurut Fiantis (2006) adanya debu dan pasir vulkanik segar yang melapisi permukaan tanah mengakibatkan tanah mengalami proses peremajaan. Abu vulkanik yang menutupi lapisan atas tanah lambat laun akan melapuk menandai dimulainya lagi proses pembentukan (genesis) tanah yang baru. Abu vulkanik yang terdeposisi di atas permukaan tanah akan mengalami pelapukan kimiawi dengan bantuan air dan asam-asam organik yang terdapat di dalam tanah. Keadaan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi dari abu vulkanik tersebut dan terhadap tanah yang terdapat di lapisan bawahnya.

Abu vulkanik pada awalnya bersifat mengganggu tanaman dan lahan yang ditutupinya. Namun ternyata dalam abu vulkanik terkandung berbagai unsur hara esensial yang dibutuhkan oleh tanaman seperti Ca, Mg, K, Na, P, S, Fe, dan Mn (Anda *et al.* 2012). Abu tersebut kemudian akan melapuk dan mengeluarkan hara-hara esensial yang ada di dalamnya, sehingga menjadi tersedia untuk tanaman. Dengan demikian abu vulkanik merupakan penyedia cadangan hara esensial bagi tanaman.

Kandungan Mineral Primer Bahan Piroklastik

Mineral primer adalah mineral yang langsung terbentuk dari pengkristalan senyawa-senyawa dalam magma akibat penurunan suhu. Mineral primer sering pula disebut mineral pasir. Contoh mineral primer antara lain adalah: kuarsa, hornblende, augit, apatit, biotit, dan kalsit. Sedangkan mineral sekunder adalah mineral hasil pembentukan baru atau hasil pelapukan mineral primer yang terjadi selama proses pembentukan tanah, serta mempunyai komposisi dan struktur yang berbeda dengan mineral yang terlapuk. Contoh mineral sekunder adalah haloisit, kaolinit dan smektit (Prasetyo *et al.* 2004; Pramuji dan Bastaman 2009).

Berdasarkan kemudahan dalam melapuk, mineral primer dapat dibedakan atas mineral mudah lapuk (*weatherable mineral*) dan mineral tahan lapuk (*resistant mineral*). Mineral mudah lapuk adalah jenis mineral yang dapat melapuk dan melepaskan unsur-unsur

penyusunnya ke dalam tanah pada waktu proses pembentukan tanah. Mineral tahan lapuk adalah mineral yang sulit melapuk seiring dengan proses pembentukan tanah (Shaw *et al.*, 1973). Kelompok mineral mudah lapuk diantaranya adalah mineral-mineral feldspar, ferromagnesia seperti olivin, piroksen, amphibol, dan gelas vulkanik, sedangkan yang tergolong mineral resisten antara lain opak, kongresi besi, zirkon, dan kuarsa (Prasetyo *et al.*, 2004).

Penelitian yang mempelajari kandungan mineral primer dari abu vulkanik segar dari beberapa gunung berapi di Indonesia telah dilakukan masing-masing terhadap abu vulkanik Gunung Talang erupsi tahun 2005, Gunung Merapi erupsi tahun 2006 dan 2010, dan erupsi Gunung Sinabung tahun 2013, seperti disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis mineral primer material hasil erupsi Gunung Talang, Gunung Sinabung, dan Gunung Merapi

Jenis mineral	G. Talang ¹⁾	G. Sinabung ²⁾	G. Merapi ³⁾	G. Merapi ⁴⁾
 %			
Kuarsa	Sp	Sp	-	-
Opak	3	4	1	5
Limonit	-	Sp	-	<1
Lapukan mineral	2	2		<1
Fragmen batuan	21	30	8	4
Gelas vulkanik	25	23	60	49
Hornblende	Sp	-	Sp	<1
Hiperstein	11	14	3	2
Augit	3	11	2	13
Apatit	Sp	-	Sp	-
Labradorit	35	8	34	26
Bitownit	-	3	Sp	<1
Epidot	-	Sp		-
Andesin	-	-	4	<1
Turmalin	-	1	-	1
Zeolit	-	-	Sp	1

Keterangan : 1) sumber: Fiantis *et al.* (2011), erupsi tahun 2005; 2) sumber: Sukarman *et al.* (2014), rata-rata dari tiga contoh, erupsi tahun 2013; 3) sumber: Fiantis *et al.* (2009), erupsi tahun 2006; 4) sumber: Anda dan Sarwani (2012), rata-rata dari 18 contoh, erupsi tahun 2010; Sp = sangat sedikit

Penelitian yang mempelajari kandungan mineral primer dari Gunung Talang erupsi tahun 2005 telah dilakukan oleh Fiantis *et al.* (2011). Hasilnya menunjukkan bahwa dalam abu vulkanik Gunung Talang yang dipelajari di bawah mikroskop polarisasi terdapat bentuk mineral non kristalin dan kristalin. Kandungan mineral non kristalin (gelas vulkanik) adalah 25%, sedangkan mineral kristalinnya adalah sedikit kuarsa <1%, labradorit 35%, dan fragmen batuan 21% yang kesemuanya tergolong kedalam mineral fraksi ringan. Mineral lainnya berupa mineral fraksi berat terdiri atas hipersten 11%, augit 3%, sedikit hornblende <1%,

sedikit apatit <1% dan mineral opak 3%. Adanya mineral-mineral tersebut menegaskan bahwa material vulkanik dari Gunung Talang termasuk komposisi andesit basaltik. Meskipun dalam jumlah sedikit kehadiran mineral apatit sangat penting, karena mineral apatit merupakan sumber hara fosfat (P) yang merupakan unsur hara makro yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah banyak.

Penelitian yang mempelajari komposisi mineral abu vulkanik Gunung Merapi erupsi pada tahun 2006 juga telah dilakukan oleh Fiantis *et al.* (2009). Dari beberapa contoh bahan endapan yang diambil, bahan piroklastik dari Gunung Merapi secara kualitatif serupa seperti yang disajikan dalam Tabel 1. Komposisi mineralogi dari bahan piroklastik terdiri atas mineral non kristalin, dan mineral kristalin. Mineral non kristalin adalah gelas vulkanik sebanyak 60%.

Mineral kristalin yang dijumpai sebagai mineral fraksi ringan adalah kelompok feldspar (labradorit, andesin, bitownit, dan anortit) dan fragmen batuan, sedangkan mineral fraksi berat diidentifikasi berasal dari endapan awan panas terdiri atas kelompok piroksen yaitu hipersten dan augit, kelompok amphibol yaitu hornblende, dan sangat sedikit mineral kalam lainnya. Mineral apatit dijumpai dalam jumlah sedikit (<1%) dan dianggap sebagai konstituen aksesoris, tetapi kehadirannya sangat penting karena merupakan sumber hara fosfat (P) tersedia. Nanzyo dan Yamasaki (1998 *dalam* Fiantis *et al.* 2009) membagi kelompok mineral apatit dalam apatit, dahillite, francolite dan chloro apatit. Apatit dianggap sebagai mineral mudah lapuk. Dalam abu vulkanik tidak dijumpai adanya mineral silika, baik sebagai kristobalit maupun kuarsa. Kehadiran mineral yang disebutkan di atas menegaskan bahwa material vulkanik tersebut mempunyai komposisi andesit basaltik. Kandungan plagioklas dan labradorit yang lebih banyak daripada anortit, bitownit, dan andesin, menunjukkan bahwa kandungan Ca dan Na lebih banyak dari K.

Temuan di atas adalah sesuai dengan laporan dari Dahlgren *et al.* (1993) bahwa 70 sampai 95% dari mineral utama dalam tanah vulkanik adalah mineral fraksi ringan, sedangkan mineral berat hanya terdiri atas sejumlah kecil. Hammer *et al.* (2000 *dalam* Fiantis 2009) melaporkan bahwa piroklastik dari runtuh kubah Gunung Merapi pada letusan November 1994, terdiri atas gelas vulkanik, mineral mafik, piroksen dan feldspars plagioklas sedangkan feldspars alkali jumlahnya lebih sedikit. Sementara itu Van Ranst *et al.* (2008 *dalam* Fiantis 2009) melaporkan bahwa bahan piroklastik dari Kompleks Pegunungan Dieng di Jawa Tengah terdiri atas sejumlah besar kelompok feldspar (plagioklas), piroksen, fragmen batuan, olivin, dan gelas vulkanik.

Kandungan mineral primer dari bahan piroklastik erupsi Gunung Merapi tahun 2010 telah diteliti dan dipelajari oleh Anda dan Sarwani (2012) yang mendapatkan rata-rata kandungan mineral primernya didominasi oleh gelas vulkanik 49%, labradorit 26%, dan sedikit bitownit, hiperstein, hornblende, dan opak. Kecuali opak, mineral-mineral tersebut merupakan mineral yang mudah lapuk yang akan segera melepaskan berbagai unsur hara tanaman (Ca, Mg, K, Na, P, S, Fe, dan Mn) ke dalam tanah sebagai unsur hara esensial.

Penelitian mengenai kandungan mineral primer dari abu vulkanik Gunung Sinabung yang meletus akhir tahun 2013 dan awal tahun 2014, telah dilakukan oleh Sukarman *et al.* (2014). Hasilnya menunjukkan bahwa abu vulkanik tersebut mempunyai cadangan mineral mudah lapuk yang cukup tinggi yang terdiri atas: gelas vulkanik 23%, augit 11%, hiperstein 14%, labradorit 8%, bitownit 3%, dan turmalin 1%. Mineral mudah lapuk lainnya yang dijumpai dalam jumlah sedikit adalah epidot. Bahan-bahan piroklastik tersebut di atas merupakan cadangan unsur hara yang cukup tinggi, yang jika melapuk akan menjadi sumber unsur hara esensial terutama Ca, Mg, K, Na, P, S, Fe, Mn, dan B.

Salah satu hal yang menarik dari susunan mineral primer dari Gunung Sinabung ini adalah kehadiran mineral turmalin meskipun hanya 1%. Kehadiran mineral ini menjadi sangat penting karena menjadi sumber unsur hara mikro Boron (B) yang diserap oleh tanaman dalam bentuk B_2O_3 . Fungsi unsur hara boron bagi tanaman adalah sebagai transportasi karbohidrat dalam tubuh tanaman, yang dapat meningkatkan mutu tanaman perkebunan, sayuran dan buah-buahan. Boron juga berperan dalam perbanyakan sel terutama dalam titik tumbuh pucuk, juga dalam pembentukan tepung sari, bunga dan akar. Menurut Letidjawa (2008), B berperan penting dalam metabolisme karbohidrat dan diserap relatif sedikit oleh tanaman dalam bentuk $H_2BO_3^-$, HBO_3^- , dan BO_3^{-3} . Boron berhubungan erat dengan metabolisme Kalium (K) dan Kalsium (Ca), dapat memperbanyak cabang-cabang nodul untuk memberikan banyak bakteri, dan mencegah bakteri parasit.

Sampai saat ini, pengaruh tutupan abu vulkanik Gunung Tambora yang meletus pada tahun 1885 terhadap pengkayaan tanah yang ditutupinya masih cukup nyata. Di dataran Soriotu, Kabupaten Dompu yang berjarak lebih kurang 30 km dari Gunung Tambora tutupan abu vulkanik Tambora masih terlihat nyata menutupi tanah aslinya dengan ketebalan antara 16 sampai 32 cm. Setelah hampir dua ratus tahun terdapat perbedaan dalam susunan gelas vulkaniknya. Gelas vulkanik yang tersisa bervariasi dari 4 sampai 7% dengan susunan mineralnya didominasi oleh mineral ferromagnesium (horblende, augit, andesin dan olivin), feldspar (ortoklas dan sanidin), fragmen batuan dan biotit (Sukarman *et al.* 1993). Susunan mineral yang demikian merupakan cadangan hara yang sangat kaya dan potensial terutama untuk unsur hara Ca, Mg, K, Na, dan P.

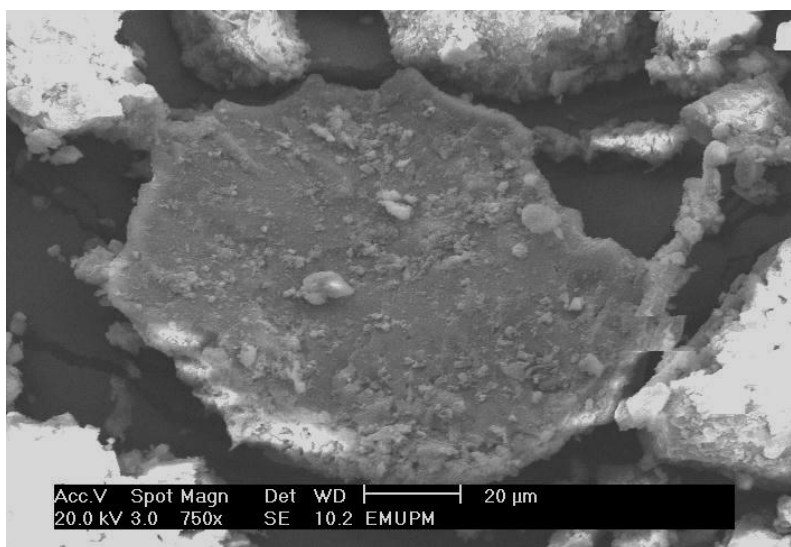
Salah satu mineral primer yang mempunyai sifat unik dan sangat mempengaruhi sifat-sifat tanah Andosol yang dibentuknya adalah gelas vulkanik. Berikut diuraikan mengenai karakteristik mineral primer dari abu vulkanik segar hasil erupsi gunung berapi di Indonesia.

Gelas Vulkanik

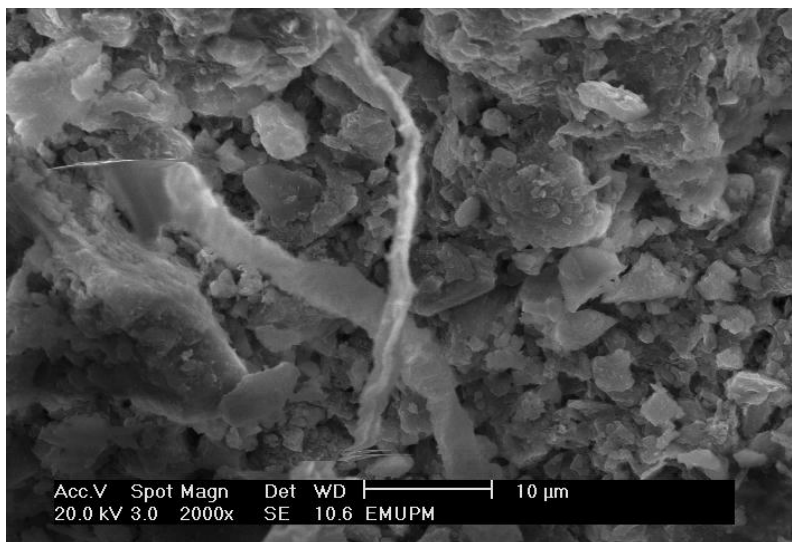
Gelas vulkanik adalah bahan berbentuk amorf (non kristalin) yang berasal dari sisa-sisa magma yang telah mengalami kristalisasi tidak sempurna. Komposisi kimia dari gelas vulkanik berbeda-beda, tergantung dari senyawa-senyawa kimia yang tertinggal setelah pembentukan mineral kristalin. Di suatu tempat, gelas vulkanik mungkin hampir seluruhnya didominasi SiO_2 , tetapi di tempat lain mungkin mengandung unsur-unsur kimia lainnya seperti P, Ca, Mg, dan K.

Fiantis *et al.* (2011) telah mempelajari dan membandingkan antara kandungan gelas vulkanik dari abu vulkanik Gunung Talang yang tidak tercuci atau segar dengan yang sudah melapuk. Hasilnya mendapatkan bahwa terjadi perubahan kandungan gelas vulkanik dari abu yang tidak tercuci sekitar 25% dengan yang sudah melapuk sekitar 44%. Jenis gelas vulkanik sebagian besar dibagi ke dalam gelas vulkanik berwarna dan tidak berwarna. Gelas vulkanik tidak berwarna ditemukan dalam abu vulkanik yang bersifat rhyolitik, dasitik, dan jenis andesitik, sedangkan gelas vulkanik berwarna ditemukan dalam andesit basaltik dan jenis batuan basaltik (Dahlgren *et al.* 1993). Gambar 16 dan 17 menunjukkan butiran tephra dan tephra yang melapuk hasil erupsi Gunung Talang.

Hasil penelitian Sukarman *et al.* (2014) terhadap abu vulkanik Gunung Sinabung mendapatkan bahwa gelas vulkanik merupakan salah satu unsur mineral fraksi pasir yang kedua tertinggi setelah fragmen batuan yaitu sebesar 23% (Tabel 1). Hal ini sejalan dengan pernyataan Shoji *et al.* (1993) bahwa gelas vulkanik banyak dikandung dalam abu vulkanik yang dihasilkan pada saat letusan gunung berapi.



Gambar 16. Butiran tephra Gunung Talang yang sebagian permukaannya tertutup oleh mineral non kristalin di bawah mikroskop elektron (sumber: Fiantis *et al.* 2011)



Gambar 17. Close up butir-butir tephra Gunung Talang yang sudah melapuk di bawah mikroskop elektron (SEM) (sumber: Fiantis et al. 2011)

Penelitian mengenai kandungan gelas vulkanik dilakukan juga pada abu vulkanik Gunung Merapi erupsi tahun 2010 telah dilakukan oleh Anda dan Sarwani (2012). Dalam penelitian ini, gelas vulkanik terlihat berwarna abu-abu kekuningan, seperti yang terlihat di bawah mikroskop polarisasi. Dahlgren *et al.* (1993), menyatakan bahwa gelas vulkanik berwarna adalah mineral yang dominan dalam abu vulkanik basalt dan andesit basaltik. Komposisi abu vulkanik dalam penelitian ini adalah andesit basaltik (56% SiO₂). Urutan tingkat kerentanan mineral utama dalam abu vulkanik terhadap pelapukan kimia adalah gelas vulkanik berwarna > gelas tidak berwarna = olivine > plagioklas > augit > hipersten > hornblende > mineral ferromagnesium (Shoji *et al.* 1993).

Gelas vulkanik merupakan unsur yang sangat penting dalam proses pembentukan tanah dan menentukan sifat-sifat kimia, fisik dan biologi tanahnya. Gelas vulkanik adalah bahan amorf yang relatif mudah melapuk dan melepaskan unsur-unsur yang dibutuhkan oleh tanaman. Gelas vulkanik yang melapuk tidak membentuk mineral liat kristalin, tetapi membentuk alofan, imogolite, opalin silika, ferihidrit, dan kompleks Al/Fe humus (Dahlgren *et al.* 1993). Hasil pelapukan gelas vulkanik umumnya halus, berbentuk vesikular dan tidak memadat. Keadaan ini sangat berkontribusi terhadap kapasitas memegang air tersedia dan luas permukaan yang tinggi sehingga menyebabkan pelepasan cepat dari nutrisi oleh pelapukan (Shoji *et al.* 1993).

Kelompok Feldspar

Kelompok mineral feldspar merupakan mineral primer mudah lapuk yang banyak mengandung unsur Na⁺, Ca⁺, K⁺, dan kadang-kadang Ba²⁺ dalam jumlah yang banyak (Huang 1989). Selain itu dalam mineral feldspars juga terkandung *trace element* (unsur mikro) seperti

Sr, Rb, Cs, Cu, dan Pb (Ribbe 1975). Walaupun kandungan unsur mikro pada feldspar lebih rendah bila dibanding mineral olivin, piroksen dan amphibol, namun mineral feldspar lebih banyak jumlah dan penyebarannya, sehingga kelompok ini merupakan sumber unsur mikro yang sangat penting (Huang 1989).

Kelompok feldspar yang dijumpai dari bahan abu vulkanik segar yang pernah diteliti akhir-akhir ini diantaranya adalah labradorit, andesin dan bitownit. Hasil penelitian Sukarman *et al.* (2014) mendapatkan bahwa abu vulkanik dari Gunung Sinabung yang meletus pada akhir tahun 2013 dan awal tahun 2014 mempunyai kandungan labradorit dan bitownit masing-masing sebesar 8% dan 3% (Tabel 1). Sementara itu Anda dan Sarwani (2012) mendapatkan kandungan labradorit 26% dan sedikit bitownit dari abu segar hasil erupsi Gunung Merapi tahun 2010, sedangkan hasil erupsi Gunung Merapi tahun 2005 untuk kelompok feldspars mengandung labradorit 34%, sedikit bitownit (< 1%), dan andesin sebanyak 4% (Fiantis *et al.* 2009). Selanjutnya Fiantis *et al.* (2011) mendapatkan bahwa abu vulkanik segar dari Gunung Talang yang meletus tahun 2005 untuk kelompok mineral feldspar mengandung labradorit sebanyak 35%.

Kelompok Olivin, Piroksen, dan Amphibol

Kelompok olivin, piroksen (augit, hiperstein) dan amphibol (hornblende), yang disebut juga sebagai mineral ferromagnesium, merupakan kelompok mineral sumber Ca, Mg, dan Fe dalam tanah. Menurut Mohr *et al.* (1972), sumber Ca dalam tanah diantaranya adalah augit (16 sampai 26% CaO) dan hiperstein (19 sampai 25% CaO), dan sumber Mg adalah augit (13 sampai 21% MgO) dan hornblende (2 sampai 25% MgO). Olivin terutama dijumpai pada batuan yang bersifat basa, sedangkan piroksen dan amphibol lebih banyak berasal dari batuan yang bersifat intermedier. Di antara ketiga grup tersebut, olivin merupakan grup mineral yang paling mudah melapuk.

Dari abu vulkanik segar yang pernah diteliti mendapatkan bahwa tidak dijumpai adanya kelompok mineral olivin baik mineral foresterit maupun fayalit. Kelompok piroksen yang dijumpai dari bahan vulkanik segar adalah augit dan hiperstein. Kelompok mineral ini terdapat di semua abu vulkanik yang diteliti (Gunung Talang, Gunung Sinabung, dan Gunung Merapi) hanya berbeda dalam persentasenya yaitu bervariasi dari 2 sampai 13% untuk mineral augit dan bervariasi dari 2 sampai 14% untuk mineral hiperstein (Tabel 1).

Untuk kelompok mineral amphibol, mineral hornblende merupakan mineral yang berada di ketiga abu vulkanik tersebut, meskipun jumlah hanya sedikit (<1%). Sedangkan pada abu vulkanik Gunung Sinabung tidak dijumpai adanya jenis mineral ini (Tabel 1).

Tabel 2. Beberapa jenis mineral primer yang dijumpai dari bahan abu vulkanik di Indonesia, rumus kimia, dan unsur utama penyusunnya

Mineral	Rumus kimia yang ideal*	Unsur utama
Kelompok Olivin		
Foresterit	Mg_2SiO_4	Mg
Fayalit	Fe_2SiO_4	Fe
Kelompok Piroksen		
Augit	$Ca(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$	Mg, Fe, Ca
Enstatit	$MgSiO_3$	Mg, Fe
Hiperstein	$(Mg, Fe)_2(Si_2O_6)$	Mg, Fe
Kelompok Amphibol		
Hornblende	$(Ca,Na)_4-3(Mg,Fe,Al)_5Si_6(SiAl)_2O_{22}(OH)_2$	
Kelompok Mika		
Muskovit	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	K
Biotit	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	K, Mg
Kelompok Feldspars		
K Feldspar	$KAlSi_3O_8$	K
Plagioklas	$NaAlSi_3O_8$	Na
Orthoklas	$(Na, K)AlSi_3O_8$	K, Na
Albit	$0,82NaAlSi_3O_8 0,38CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
Andesin	$CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
Anortit	$0,23NaAlSi_3O_8 0,77CaAl_2Si_2O_8$	Ca, Na
Labradorit	$(Ca, Na)(Al, Si)_4O_8$	Ca, Na
Bitownit	$CaNa(Al, Si)AlSi_2O_8$	Ca, Na
Kelompok Olivin		
Olivin	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Mg, Fe
Turmalin	$Na(Mg, Fe)_3Al_6BO_3Si_6O_{18}$	Mg, Na, Fe, B
Kelompok Epidot		
Epidot	$Ca_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$	Ca, Fe
Kelompok SiO_2		
Gelas vulkanik	SiO_2	

* Sumber : Allen and Fanning (1983)

Kelompok Mineral Opak

Mineral opak adalah mineral primer dari jenis magnetit dan ilmenit yang berwarna kelam metalik. Mineral ini tergolong pada kelompok mineral resisten, sehingga sering mendominasi komposisi mineral primer dalam tanah yang sudah berkembang. Sedangkan mineral opak bersama kuarsa sedikit dijumpai pada abu vulkanik atau tanah-tanah muda yang berkembang dari abu vukanik. Hal ini dibuktikan dengan hasil penelitian Sukarman *et al.*

(2014) bahwa abu vulkanik hasil erupsi Gunung Sinabung mempunyai kandungan opak yang sangat rendah, yaitu sebanyak 4%. Hasil serupa ditunjukkan juga oleh hasil penelitian Anda dan Sarwani (2012) yang menganalisis mineral primer abu segar dari erupsi Gunung Merapi letusan akhir tahun 2010. Mineral opak dijumpai dalam jumlah sangat sedikit. Sementara dari Gunung Talang erupsi tahun 2005 jumlah mineral opak tercatat sebanyak 3% (Tabel 1).

Kuarsa

Sama halnya dengan mineral opak, kuarsa merupakan jenis mineral primer yang paling sedikit pada bahan vulkanik segar. Mineral kuarsa banyak dijumpai di tanah berkembang karena mineral ini mempunyai stabilitas yang tinggi terhadap pelapukan. Sumber dari mineral kuarsa adalah batuan beku atau vulkan yang bersifat masam, seperti granit, riolit, pegmatit, dasit dan sebagainya. Dari tiga lokasi erupsi gunung di Indonesia menunjukkan bahwa mineral kuarsa tidak dijumpai pada erupsi Gunung Merapi tahun 2005 maupun tahun 2010, sedangkan dari Gunung Talang dan Sinabung dijumpai dalam jumlah yang sangat sedikit (Tabel 1).

Kandungan Kimia Bahan Piroklastik

Untuk mengetahui komposisi kimia total berbagai unsur makro dan unsur mikro dalam abu segar letusan gunung berapi biasanya menggunakan sinar X flour (*X-ray fluorescence, XRF*). Data yang disajikan umumnya dalam bentuk oksida, baik unsur makro maupun unsur mikro. Tabel 3 menyajikan beberapa hasil analisis komposisi oksida unsur makro dari abu segar yang berasal dari Gunung Merapi, Gunung Kelud, dan Gunung Slamet di Pulau Jawa, Gunung Talang dan Gunung Sinabung di Pulau Sumatera, Gunung Lokon di Sulawesi Utara, Gunung Ibu di Maluku Utara dan Gunung Agung di Pulau Bali.

Tabel 3. Komposisi oksida unsur makro pada abu/pasir vulkanik beberapa gunung di Indonesia

Lokasi	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
G. Merapi ¹⁾	56,39	0,65	19,34	7,15	0,16	7,32	1,44	3,92	2,10	0,39	0,21
G. Talang ²⁾	57,61	0,67	16,16	5,39	0,08	4,79	1,88	2,51	1,84	0,18	-
G. Sinabung ³⁾	58,10	0,71	18,30	7,09	0,16	8,05	2,92	2,95	1,70	0,12	-
G. Kelud ⁴⁾	55,19	0,58	18,20	7,51	0,17	8,86	3,85	2,42	0,57	0,08	-
G. Slamet ⁵⁾	51,84	1,12	19,12	3,32	0,20	7,98	4,66	2,73	0,87	0,07	-
G. Lokon ⁵⁾	57,09	0,70	16,61	2,57	0,14	8,66	3,69	2,36	0,91	0,14	-
G. Ibu ⁵⁾	67,53	0,65	14,47	5,00	0,14	3,13	1,04	4,20	3,31	0,21	-
G. Agung ⁵⁾	55,00	0,93	19,85	5,28	0,13	7,27	2,90	1,50	0,25	0,05	-

Sumber: 1) Anda *et al.* (2012); 2) Fiantis *et al.* (2011); 3) Nakada and Yoshimoto (2014); 4) Tim Faperta UGM (2014); 5) http://pvmbg.bgl.esdm.go.id/index.php/kegiatan-pvmbg/download-center/cat_view/87-data-dasar-gunungapi-indonesia

Abu vulkanik di atas dapat diklasifikasikan berdasarkan kriteria yang dikemukakan oleh Shoji *et al.* (1993) atas dasar kandungan silika total (SiO₂) seperti yang disajikan dalam Tabel 4. Berdasarkan kriteria tersebut maka abu vulkanik yang berasal dari enam gunung yang

ada di Indonesia tergolong andesit basaltik karena mempunyai kandungan SiO₂ antara 58-53,5%. Sedangkan untuk abu vulkanik yang berasal dari Gunung Ibu di Halmahera Maluku Utara tergolong kedalam dasit karena mempunyai kandungan SiO₂ antara 62 sampai 70% dan untuk contoh dari Gunung Slamet tergolong basalt karena mempunyai kandungan SiO₂ antara 45 sampai 53,5%.

Tabel 4. Klasifikasi abu vulkanik berdasarkan kandungan silika total (Shoji et al. 1993)

Tipe batuan	Batuan	Total SiO ₂ (%)
		%
Felsic (masam)	Riolit	100 - 70
	Dasit	70 - 62
Intermediate (menengah)	Andesit	62 - 58
	Andesit basaltik	58 - 53,5
Mafic (basis)	Basal	53,5 - 45

Tabel 3 memperlihatkan berbagai unsur makro pada contoh abu vulkanik yang didominasi oleh SiO₂ (51,84 sampai 67,53%) dan diikuti oleh Al₂O₃ (14,47 sampai 19,85%), kemudian urutan ketiga diikuti oleh CaO (3,13 sampai 8,86%) atau Fe₂O₃ (2,57 sampai 7,51%). Untuk abu vulkanik yang bersifat dasitik (Gunung Ibu) kandungan MgO adalah 1,04%, diikuti oleh kandungan MgO dari abu vulkanik yang bersifat andesit basaltik yaitu bervariasi dari 1,44-3,85%, kemudian abu vulkanik yang bersifat basaltik (Gunung Slamet) mempunyai kandungan MgO yang paling tinggi (4,66%). Kandungan Na₂O dari abu yang berasal dari bahan yang bersifat dasitik mempunyai kandungan Na₂O yang paling tinggi (4,20%), hal yang serupa terjadi juga untuk kandungan K₂O ternyata bahan yang bersifat dasitik mempunyai kandungan Na₂O yang paling tinggi (3,31%). Kandungan P₂O₅ yang dikandung dari abu vulkanik bervariasi dari 0,05 sampai 0,39%.

Terdapat hal yang menarik dari abu vulkanik yang berasal dari Gunung Merapi mempunyai kandungan P₂O₅ lebih tinggi dari yang lainnya (0,39%). Hal ini dapat dimengerti karena dalam abu vulkanik Gunung Merapi mempunyai kandungan mineral primer Apatit yang mempunyai kandungan P₂O₅ tinggi. Dari uraian di atas terlihat bahwa bahan abu vulkanik baik yang bersifat dasitik, andesit basaltik dan basaltik mempunyai cadangan unsur makro yang terdiri atas Ca, Mg, K, Na, P, dan S. Yang menjadi pembeda untuk bahan yang bersifat dasitik, andesit-basaltik dan basaltik adalah dalam urutan besarnya kandungan unsur Ca, Mg, K, dan Na.

Menurut Anda *et al.* (2012), banyaknya unsur makro yang disumbangkan sebagai unsur hara baru yang ditambahkan kedalam tanah dapat dihitung berdasarkan total kandungan tiap unsur dikalikan dengan volume dan berat isi jenis 1,4 g cm⁻³. Dari hasil perhitungan tersebut untuk abu vulkanik dari gunung Merapi, setiap 1 cm tutupan abu tahun 2010 akan memberikan kontribusi berturut-turut untuk Ca, Mg, K, dan Na baru masing-masing 7,32;

1,21; 2,44; dan 4,85 t ha⁻¹. Kontribusi unsur P dan S masing-masing 0,24 dan 0,12 t ha⁻¹. Kontribusi tersebut cukup banyak, terutama jika tutupan lebih dari 1 cm, maka untuk tutupan abu 5 cm, kontribusi untuk masing-masing unsur bisa lima kali lipat.

Kandungan unsur mikro dari abu vulkanik ini juga cukup potensial sebagai penyumbang unsur mikro bagi tanaman. Unsur mikro Zn, Cu, Co, dan Cl merupakan unsur hara mikro yang dijumpai dari abu vulkanik Gunung Merapi. Ada hal yang perlu dicatat bahwa abu vulkanik Gunung Merapi mengandung logam berat (Ni, Cd, Hg, dan Ag) dalam jumlah yang masih aman dan tidak membahayakan kesehatan manusia, hewan maupun tanaman (Anda *et al.* 2012). Hal yang serupa juga dijumpai dalam abu vulkanik Gunung Sinabung, jumlah logam berat (Pb, Cd, As, Ag, dan Ni) masih dalam jumlah yang tidak membahayakan untuk kesehatan manusia, ternak, dan tanaman (Sukarman *et al.* 2014).

3. GEOGRAFI TANAH ANDOSOL DI INDONESIA

3.1 Sebaran Tanah Andosol

Berdasarkan Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia (Puslittanak, 2000), tanah Andosol di Indonesia menyebar di Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Lombok, Flores, Maluku Utara dan Sulawesi Utara (Gambar 18) dan Tabel 5. Tanah tersebut penyebarannya membentang mulai dari ujung utara Pulau Sumatera, yaitu dari mulai Provinsi Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Jambi bagian Barat, Bengkulu, Sumatera Selatan dan Lampung. Penyebarannya di Pulau Sumatera umumnya terletak di dataran tinggi sebelah barat, hanya sebagian kecil yang terdapat di dataran rendah Sumatera Utara bagian timur (Kabupaten Deli Serdang) seperti yang dilaporkan oleh Sukarman dan Tafakresnanto (1992).

Di Pulau Jawa, tanah Andosol hampir merata terdapat di daerah pegunungan mulai dari Jawa Barat (Gunung Salak) sampai ke ujung timur di Jawa Timur (Pegunungan Ijen). Salah satu contoh *landscape* dataran tinggi Gunung Rinjani sebelah timur di Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat yang tanahnya berupa tanah Andosol dapat dilihat dalam Gambar 19. Sementara di Pulau Bali tanah Andosol dijumpai di Gunung Agung, dan di Pulau Lombok terdapat di Gunung Rinjani. Di Pulau Flores, penyebaran tanah Andosol cukup luas mulai dari Kabupaten Manggarai, Kabupaten Ngada, Kabupaten Ende, Kabupaten Sikka dan Kabupaten Flores Timur. Tanah Andosol lainnya yang mempunyai penyebaran luas dijumpai di Sulawesi Utara, yaitu di sekitar Tomohon dan Kabupaten Minahasa. Di Sulawesi Selatan tanah Andosol dijumpai pada lereng Gunung Lompobatang. Sampai saat ini belum pernah ada peneliti yang melaporkan adanya tanah Andosol di Maluku, Papua, dan Papua Barat.



Sumber : Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000)

Gambar 18. Sebaran jenis tanah di Indonesia

Tabel 5. Beberapa jenis tanah utama di Indonesia yang berkembang dari bahan vulkanik

Pulau/kepulauan	Inceptisols	Entisols	Andisols/Andosol	Alfisols
 x 1.000 ha			
Sumatera	17.561	4.175	2.594	53
Jawa dan Bali	5.439	1.732	1.833	1.093
Nusa Tenggara	3.037	1.092	245	768
Kalimantan	14.903	3.698	237	0
Sulawesi	9.186	857	164	2.003
Maluku/Maluku Utara	4.005	462	321	970
Papua	15.485	5.603	0	266
Jumlah	70.520 (37,5%)	18.006 (9,6%)	5.395 (2,9%)	5.153 (2,7%)

Sumber: Subagjo *et al.* (2004)



Gambar 19. Landscape lereng vulkan daerah Sembalun, Lombok Timur, NTB tempat tanah Andosol dijumpai

3.2 Ketinggian Tempat dan Bentuk Wilayah

Salah satu pernyataan dalam sistem klasifikasi Dudal dan Soeprtohardjo (1957, 1961) adalah bahwa tanah Andosol umumnya dijumpai dataran tinggi, yaitu pada ketinggian 750 sampai 3.000 m dpl. Namun demikian hasil penelitian terakhir terhadap geografi tanah-tanah Andosol di Indonesia menunjukkan bahwa tanah-tanah tersebut tidak hanya dijumpai di dataran tinggi, namun dijumpai juga di dataran rendah. Tanah Andosol dijumpai di Pulau Sumatera mulai dari dataran rendah sampai dataran tinggi, yaitu mulai ketinggian 20 m sampai lebih dari 1.800 m dpl. Tanah Andosol dataran rendah terdapat di Kaki Gunung Ophir dan Gunung Talamau Sumatera Barat (Tan 1998, Fiantis and Van Ranst 1997), di Kaki Gunung Sibayak di daerah Perkebunan Tembakau Deli dan Perkebunan Tebu Sei Semayang Sumatera Utara (Tan 1998, Sukarman dan Tafakresnanto 1992).

Sementara itu tanah Andosol Dataran Tinggi di Pulau Sumatera terdapat di Gunung Seulawah Aceh, Dataran tinggi Toba, Dataran Tinggi Tanah Karo, Gunung Marapi Sumatera Barat, Gunung Kerinci Jambi, Gunung Dempo Sumatera Selatan, Gedong Surian Lampung Utara (Suparto *et al.* 1989, Dai dan Hikmatullah 1993, Hikmatullah *et al.* 1994, Fiantis and Van Ranst 1997, Prasetyo *et al.* 2009) (Tabel 5).

Di Pulau Jawa tanah Andosol menyebar mulai dari dataran menengah sampai di dataran tinggi yaitu mulai dari 455 m dpl. Tanah Andosol dataran menengah terdapat di perbukitan karst Gunung Kidul (Sudihardjo *et al.* 1995), sedangkan tanah Andosol yang berada pada dataran tinggi menyebar mulai dari Gunung Salak di Jawa Barat sampai pegunungan Ijen di Jawa Timur. Beberapa penelitian tentang tanah Andosol pada berbagai ketinggian yang pernah dilakukan di Pulau Jawa disajikan dalam Tabel 5.

Di Bali dan Nusa Tenggara, Andosol dijumpai hanya pada dataran menengah sampai dataran tinggi (mulai ketinggian 550 m) menyebar mulai dari Gunung Agung di Pulau Bali, Gunung Rinjani di Pulau Lombok, dan di sepanjang Pulau Flores mulai dari Kabupaten Manggarai sampai di Kabupaten Flores Timur (Tabel 6).

Di Sulawesi Utara, tanah Andosol yang pernah dijumpai dan diteliti mulai dataran menengah (ketinggian 750 m) sampai di dataran tinggi (Tabel 6). Tanah Andosol di Sulawesi Utara menyebar di dalam rangkaian gunung berapi seperti di Gunung Lokon, Gunung Soputan, Gunung Lengkoan, Gunung Mahawu, dan Gunung Klabat. Sebagian besar tanah Andosol di Sulawesi Utara menyebar di daerah Tondano, Kabupaten Minahasa (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat 1998). Menurut Suhardjo dan Hikmatullah (2001), tanah Andosol di daerah Tondano meliputi areal seluas 36.166 ha.

Di Maluku Utara, tanah Andosol dijumpai di Halmahera Barat dengan puncak gunungnya adalah Gunung Ibu, Gunung Gamkonora, Gunung Gamalama, dan Gunung Sahu. Pada daerah tersebut tanah Andosol yang pernah diteliti terletak pada dataran medium dan dataran rendah, yaitu antara ketinggian 120 sampai dengan 360 m dpl.

Bentuk wilayah atau topografi merupakan salah satu faktor pembentuk tanah yang sangat mempengaruhi proses pembentukan tanah dan pengelolaannya. Dilihat dari sisi bentuk wilayahnya tanah Andosol menyebar pada daerah berombak, bergelombang, berbukit, dan bergunung. Namun demikian, sebagian besar dari tanah tersebut terletak pada daerah berbukit sampai bergunung.

Suparto *et al.* (1989) dalam penelitian di Provinsi Aceh melaporkan bahwa tanah Andosol yang dijumpai di daerah Gunung Seulawah Agam, Kabupaten Aceh Besar terletak pada daerah yang mempunyai bentuk wilayah bergunung dengan lereng 40 sampai 80%. Sementara itu Sukarman dan Tafakresnanto (1992) melaporkan tanah Andosol yang dijumpai di Kabupaten Deli Serdang, Provinsi Sumatera Utara terletak pada daerah dengan bentuk wilayah berombak (lereng 3 sampai 8%). Sebagian besar tanah ini merupakan wilayah Perkebunan Tebu Sei Semayang yang sekarang ditanami tebu dan dirotasi dengan Tembakau Deli.

Tabel 6. Ketinggian tempat dan bentuk wilayah tanah Andosol yang pernah diteliti di berbagai provinsi

Provinsi	Lokasi	Ketinggian (m dpl)	Bentuk wilayah lereng (%)
Aceh	G. Seulawah ¹⁾	750 - 1.800	Bergunung (40-80%)
Sumatera Utara	Dataran Tinggi Toba ²⁾	1.304 - 1.417	Bergelombang (8-15%)
	PG Sei Semayang ³⁾	20 - 125	Berombak-bergelombang (5-15%)
Sumatera Barat	G. Marapi ⁴⁾	800 - 1.150	Bergelombang (9-14%)
	G. Talamau ⁴⁾	175 - 400	Berombak (6-9%)
Sumatera Selatan	G. Dempo, Pagaram ⁵⁾	700 - 1.500	Bergelombang-bergunung (5-25%)
Lampung	Gedongsurian, Lampung Utara ⁶⁾	830 - 1.600	Bergelombang (9%)
Jawa Barat	G. Burangrang ⁷⁾	1.035 - 1.052	Bergelombang-Berbukit (12-13%)
DI Yogyakarta	Gunung Kidul ⁸⁾	455 - 550	Berbukit (> 45%)
Jawa Timur	G. Semeru, Malang ⁹⁾	1.050	Berbukit (> 30%)
Nusa Tenggara Barat	G. Rinjani, Lombok ¹⁰⁾	550 - 1.200	Berombak-Berbukit, (5-30%)
Nusa Tenggara Timur	G. Mandasawu, Ruteng, Flores ¹¹⁾	1.500	Bergunung (75%)
	G. Wawolika, Bajawa, Flores ¹¹⁾	1.300	Berbukit (32%)
	G. Ambolumbo, Boawae, Flores ¹¹⁾	1.100	Berbukit (30%)
	G. Kelimutu, Ende, Flores ¹¹⁾	1.400	Berbukit (42%)
Sulawesi Utara	G. Egon, Sikka, Flores ¹¹⁾	750	Berbukit (42%)
	G. Lokon ¹²⁾	880	Bergelombang (8%)
	G. Sopotan ¹²⁾	860	Datar (2%)
Maluku Utara	G. Lengkoan ¹²⁾	750	Bergelombang (8%)
	G. Ibu, G. Sahu ¹³⁾	120 - 700	Bergelombang bergunung (15-45%)

Sumber: 1) Suparto *et al.* (1989), 2) Prasetyo *et al.* (2009), 3) Sukarman dan Tafakresnanto (1992), 4) Fiantis dan Van Ranst (1997), 5) Hikmatullah *et al.* (1994), 6) Dai dan Hikmatullah (1993), 7) Yatno dan Zauyah (2003), 8) Sudihardjo *et al.* (1997), 9) Prasetyo (2005), 10) Tim BBSDLP (2013), 11) Hikmatullah *et al.* (1999), 12) Hikmatullah (2008), 13) Hikmatullah (2009)

Tanah Andosol di Gunung Burangrang Jawa Barat yang diteliti oleh Yatno dan Zauyah (2003) mempunyai bentuk wilayah bergelombang sampai berbukit (lereng 12 sampai 30%). Sementara itu tanah Andosol yang dijumpai di kaki Gunung Pangrango, Jawa Barat mempunyai bentuk wilayah berombak sampai bergunung dengan lereng antara 5 sampai 75% (Sukarman 2004). Djaenudin dan Sudjadi (1988) mendapatkan tanah Andosol di Cikajang dan Cikole Jawa Barat berada pada lereng antara 25 sampai 45%.

Di Gunung Kidul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, tanah Andosol yang dijumpai di dataran menengah mempunyai bentuk wilayah berbukit dengan lereng > 45%. Daerah ini merupakan Daerah Karst yang tertutupi oleh abu vulkanik muda yang diduga berasal dari abu vulkanik Gunung Merapi (Sudihardjo *et al.* 1997).

Salah satu daerah penyebaran tanah Andosol di Pulau Lombok adalah di seputar Gunung Rinjani yang meliputi Kabupaten Lombok Barat sampai Lombok Timur. Di Kabupaten Lombok Barat tanah Andosol terdapat di daerah Gondang-Selengan. Di daerah ini tanah Andosol menyebar pada daerah dengan bentuk wilayah berombak (lereng 5 sampai 8%), daerah bergelombang (lereng 8 sampai 15%) dan berbukit (lereng 15 sampai 30%) (Tim Pusat Penelitian Tanah 1989). Sementara itu di Kabupaten Lombok Timur tanah Andosol menyebar di sekitar Sembalun yang menyebar pada daerah berombak sampai bergunung (Tim Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian 2013).

Pulau Flores adalah satu-satunya pulau di Provinsi Nusa Tenggara Timur yang mempunyai tanah Andosol. Penyebarannya terletak pada daerah dengan bentuk wilayah bergelombang sampai bergunung dengan lereng bervariasi dari 30 sampai 75% (Hikmatullah *et al.* 1999).

Di Provinsi Sulawesi Utara tanah Andosol dijumpai pada daerah dengan bentuk wilayah datar sampai bergunung, tetapi sebagian besar berada pada daerah yang bergelombang (Tabel 5). Tanah Andosol yang menempati daerah datar, sebagian besar menempati wilayah dataran Tondano di Kabupaten Minahasa. Di Maluku Utara, tanah Andosol dijumpai pada deretan pegunungan di Kabupaten Halmahera Barat dan Halmahera Utara, yang mempunyai bentuk wilayah bergelombang sampai bergunung dengan lereng 15 sampai 45% (Hikmatullah 2009).

Secara garis besar menurut Puslittanak (2000) tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia terletak pada daerah dengan bentuk wilayah datar-berombak sampai bergunung (Tabel 7). Dari tabel tersebut terlihat bahwa tanah Andosol di Indonesia sebagian besar (61,99%) menempati daerah dengan bentuk wilayah bergunung, urutan kedua di daerah berbukit (16,38%) dan yang paling sedikit menempati daerah datar sampai berombak (8,69%). Dari uraian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa salah satu penghambat penggunaan tanah Andosol untuk pertanian adalah masalah kelerengan yang curam. Oleh karena itu, penerapan teknologi konservasi tanah dan air mutlak diperlukan.

Tabel 7. Luas tanah Andosol pada berbagai bentuk wilayah setiap pulau di Indonesia

Pulau/kepulauan	Datar sampai berombak	Bergelombang	Berbukit	Bergunung	Jumlah
 ha				
Sumatera	407.083	197.798	319.646	1.670.472	2.595.000
Jawa dan Bali	730	473.908	262.031	1.096.331	1.833.000
Nusa Tenggara	19.053	7.580	81.332	137.036	245.000
Kalimantan	24.953	5.716	35.647	170.684	237.000
Sulawesi	5.662	5.468	16.355	136.515	164.000
Maluku	11.191	7.310	168.924	133.575	321.000
Papua	0	0	0	0	0
Jumlah	468.672 (8,69%)	697.780 (12,93%)	883.936 (16,38%)	3.344.612 (61,99%)	5.395.000 (100,00%)

Sumber: Puslittanak (2000) diolah

3.3 Fisiografi dan Bahan Induk

Berdasarkan Puslittanak (2000), secara garis besar tanah Andosol di Indonesia menempati empat fisiografi utama, yaitu: (1) dataran vulkanik, (2) perbukitan vulkanik, (3) pegunungan vulkanik, dan (4) kerucut vulkanik. Tabel 7 memperlihatkan tanah Andosol pada berbagai fisiografi di Indonesia. Tanah Andosol ternyata sebagian besar terdapat pada fisiografi kerucut vulkanik (51,45%), yang kedua pada dataran vulkanik (21,62%), dan yang paling sedikit pada perbukitan vulkanik (16,38%).

Bahan induk atau Litologi adalah bahan anorganik atau organik yang merupakan bahan penyusun tanah (Balai Penelitian Tanah 2004). Bahan induk yang membentuk tanah Andosol adalah bahan vulkanik hasil erupsi gunung berapi yang disebut *tephra*. Karena *tephra* merupakan bahan dari magma yang mengalami pendinginan yang cepat, sehingga mineral utama yang dominan adalah gelas vulkanik. Menurut Shoji *et al.* (1975) *tephra* sebagai bahan induk tanah Andosol, berdasarkan tingkat kemasamannya yang dicirikan oleh kandungan SiO₂ dibagi menjadi lima jenis, yaitu: (1) riolit (70 sampai 100% SiO₂), (2) dasit (62 sampai 70% SiO₂), (3) andesit (58 sampai 62% SiO₂), (4) andesit basaltik (53,5 sampai 58% SiO₂), dan (5) basalt (45 sampai 53,5% SiO₂).

Menurut Prasetyo (2005) bahan induk yang membentuk tanah Andosol di Indonesia umumnya berupa bahan vulkanik bersifat andesitik, dasitik dan basaltik. Bahan-bahan tersebut umumnya berupa bahan lepas seperti lahar, abu vulkanik dan tuff baik yang bersifat masam, intermedier maupun basa. Sedangkan data dalam Tabel 8 menunjukkan bahwa jenis bahan induk yang membentuk tanah di Indonesia bersifat riolitik, andesitik, andesit basaltik dan basaltik. Berdasarkan kedua pernyataan dan fakta tersebut dapat dikemukakan bahwa bahan induk yang membentuk tanah Andosol di Indonesia adalah bahan vulkanik yang bersifat riolitik, dasitik, andesit, andesit basaltik dan basaltik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kelima sifat bahan induk seperti yang diklasifikasikan oleh Shoji *et al.* (1975) semuanya terdapat di Indonesia.

Bahan vulkanik yang bersifat masam yaitu bahan vulkanik riolitik umumnya terdapat di Pulau Sumatera, diantaranya di dataran tinggi Toba, Sumatera Utara seperti yang diteliti oleh Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011). Bahan vulkanik yang agak masam (bahan vulkanik andesitik-dasitik) di Pulau Sumatera dijumpai di Gunung Seulawah, Agam, Provinsi Aceh (Suparto *et al.* 1989).

Bahan vulkanik andesitik pembentuk tanah Andosol yang paling banyak penyebarannya di Indonesia, dijumpai mulai dari Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Bali, memanjang sampai ke Kabupaten Flores Timur. Sementara bahan induk bersifat andesitik-basaltik dijumpai di Jawa Barat dan Sulawesi Utara. Tanah Andosol yang dijumpai di Perkebunan Teh Sedep di Bandung Selatan dan di Gunung Sopotan, Sulawesi Utara sebagian besar tergolong vulkanik basaltik.

Tanah Andosol di Indonesia berkembang dari bahan induk vulkanik berumur Kuartar, belum ada penelitian yang menemukan tanah Andosol berkembang dari batuan vulkanik berumur Tersier atau lebih tua. Tanah Andosol termuda yang pernah diteliti di Indonesia

adalah berumur Holosen sampai berumur Pleistosen. Di Pulau Sumatera beberapa contoh tanah Andosol yang pernah diteliti adalah tanah Andosol di dataran tinggi Toba, Sumatera Utara dan di Gunung Dempo, Sumatera Selatan. Tanah Andosol dari dataran tinggi Toba mempunyai bahan induk berumur Kuarter yang tersusun dari bahan tuf dan terbentuk sebagai hasil erupsi dari vulkanik Toba. Sementara di bahan induk yang membentuk tanah di sekitar Gunung Dempo berumur Kuarter, bahan induknya berupa tuf dan abu vulkanik. Sementara tanah Andosol di Ciater, Kabupaten Bandung berkembang dari bahan induk vulkanik berumur Holosen, sedangkan tanah Andosol dari Perkebunan Sedep Pangalengan Bandung berumur Pleistosen.

Tabel 8. Beberapa sifat bahan induk tanah Andosol Indonesia

No.	Lokasi	Bahan induk
1.	Dataran Tinggi Toba, Kabupaten Toba Samosir, Sumut ¹⁾	Vulkan riolitik
2.	Gedongsurian, Kabupaten Lampung Utara ²⁾	Vulkan riolitik
3.	G. Dempo, Pagaralam, Sumsel ³⁾	Vulkan andesitik
4.	G. Tangkuban Perahu, Perkebunan Ciater, Kabupaten Bandung, Jabar ⁴⁾	Vulkan andesitik
5.	Gunung Kidul, DI Yogyakarta ⁵⁾	Vulkan andesitik
6.	G. Lawu, Ngawi Madiun, Jatim ⁶⁾	Vulkan andesitik
7.	G. Kimangbuleng, Kabupaten Sikka, Flores, NTT ⁷⁾	Vulkan andesitik
8.	G. Egon, Kabupaten Sikka, Flores NTT ⁸⁾	Vulkan andesitik
9.	G. Mandasawu, Kabupaten Manggarai Flores, NTT ⁸⁾	Vulkan andesitik
10.	G. Wawolika dan G. Ambulumbo Kabupaten Ngada, Flores, NTT ⁸⁾	Vulkan andesitik
11.	G. Kelimutu, Kabupaten Ende, Flores, NTT ⁹⁾	Vulkan andesitik
12.	G. Sahu, G. Sasu, G. Gamkonora dan G. Ibu, Kabupaten Halmahera Barat, Maluku Utara ¹⁰⁾	Vulkan andesitik
13.	G. Seulawah, Agam, Aceh ¹¹⁾	Vulkan andesitik-dasitik
14.	G. Salak, Bogor, Jabar ¹²⁾	Vulkan andesitik-basaltik
15.	G. Manglayang, Bandung, Jabar ¹³⁾	Vulkan andesitik-basaltik
16.	G. Lokon dan G. Lengkoan, Kabupaten Minahasa Utara, Sulut ¹⁴⁾	Vulkan andesitik-basaltik
17.	Perkebunan Sedep, Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jabar ¹⁴⁾	Vulkan basaltik
18.	G. Sopotan, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulut ¹⁴⁾	Vulkan basaltik

Sumber: 1) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011); 2) Dai dan Hikmatullah (1993); 3) Hikmatullah *et al.* (1994); 4) Arifin dan Hardjowigeno (1997); 5) Sudihardjo *et al.* (1997); 6) Subagjo and Buurman (1980); 7) Sukarman *et al.* (1999); 8) Hikmatullah *et al.* (1999); 9) Hikmatullah *et al.* (2003); 10) Hikmatullah (2009); 11) Suparto *et al.* (1989); 12) Hardjosoesastro *et al.* (1983); 13) Subagjo *et al.* (1997); 14) Hikmatullah (2008)

Di Pulau Flores, bahan induk yang membentuk tanah Andosol adalah bahan induk berumur Kuarter. Menurut Koesoemadinata *et al.* (1981), Suwarna *et al.* (1990), serta Ratman dan Yasin (1978), Pulau Flores, Nusa Tenggara Timur terbentuk dari formasi gunung api

muda (Qvh) dan gunung api tua (QTV) yang dicirikan oleh munculnya kerucut vulkanik. Gunung api di Flores bagian timur menurut bentuknya lebih muda daripada di Flores Barat.

3.4 Iklim dan Hidrologi

Iklim merupakan faktor yang amat penting dalam proses pembentukan tanah. Suhu dan curah hujan sangat berpengaruh terhadap intensitas reaksi kimia dan fisika di dalam tanah. Setiap kenaikan suhu 10°C maka kecepatan reaksi menjadi dua kali lipat. Reaksi-reaksi oleh mikroorganisme juga sangat dipengaruhi oleh suhu tanah. Penyebaran tanah Andosol secara geografis di Indonesia tidak dibatasi oleh perbedaan iklim, meskipun Dudal dan Soepraptohardjo (1957, 1961) menyatakan bahwa tanah Andosol dijumpai pada daerah beriklim tropika basah dengan curah hujan 2.500 sampai 7.000 mm tahun⁻¹ dengan suhu yang sejuk (suhu rata-rata < 22°C).

Hasil penelitian terakhir menunjukkan bahwa tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia ternyata tidak hanya berkembang di daerah beriklim basah dengan curah hujan seperti tersebut di atas, tetapi dijumpai di daerah dengan curah hujan rata-rata tahunan yang lebih rendah, yaitu kurang dari 2.000 mm tahun⁻¹ dengan rejim kelembaban tergolong ustik, seperti di Pulau Flores Nusa Tenggara Timur (Tabel 9). Demikian halnya dengan suhu udara, ternyata tanah Andosol juga terdapat di daerah dengan suhu yang relatif panas (isohipertermik) seperti halnya di dataran rendah Sumatera Utara dan di Pulau Flores, Provinsi Nusa Tenggara Timur.

Tabel 9. Rata-rata curah hujan (CH) tahunan dan rata-rata suhu udara tahunan pada beberapa lokasi dijumpainya tanah Andosol

No.	Lokasi	Rata-rata CH tahunan	Rata-rata suhu udara tahunan	Rejim kelembaban	Rejim suhu
		mm	°C		
1.	G. Seulawah, Aceh ¹⁾	1.958	19,4	Udik	Isotermik
2.	PG Sei Semayang, Sumut ²⁾	2.159	26,4	Udik	Isohipertermik
3.	Dataran Tinggi Toba, Sumut ³⁾	2.177	< 22	Udik	Isotermik
4.	Dataran Tinggi Kerinci ⁴⁾	1.789	22,9	Udik	Isohipertermik
5.	G. Dempo, Sumsel ⁵⁾	3.413	20,0	Udik	Isotermik
6.	G. Salak, Jabar ⁶⁾	4.202	19,5	Udik	Isotermik
7.	G. Burangrang, Jabar ⁷⁾	2.920	21,5	Udik	Isotermik
8.	G. Mandasawu, Ruteng, NTT ⁸⁾	3.070	19,9	Udik	Isotermik
9.	G. Wawiloka, Bajawa, NTT ⁸⁾	1.872	< 22	Udik	Isotermik
10.	G. Ambolumbo Boawae, NTT ⁸⁾	1.492	> 22	Udik	Isohipertermik
11.	G. Kelimutu, Ende NTT ⁹⁾	1.508	> 22	Udik	Isohipertermik
12.	G. Kimangbuleng, Sikka, NTT ¹⁰⁾	1.353	19,1	Udik	Isotermik
13.	Tomohon, Sulut ¹¹⁾	1.702	20,8	Udik	Isotermik

No.	Lokasi	Rata-rata CH tahunan	Rata-rata suhu udara tahunan	Rejim kelembaban	Rejim suhu
14.	Langowan, Sulut ¹¹⁾	1.616	22,3	Udik	Isohipertermik
15.	Tondano, Sulut ¹¹⁾	1.715	< 22	Udik	Isotermik
16.	Jailolo, Halmahera Barat, Maluku Utara ¹²⁾	2.674	> 22	Udik	Isohipertermik

Sumber: 1) Suparto *et al.* (1989), 2) Sukarman *et al.* (1999), 3) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011), 4) Henny *et al.* (2011), 5) Hikmatullah *et al.* (1994), 6) Hardjosoestastro *et al.* (1983), 7) Yatno dan Zaayah (2003), 8) Hikmatullah *et al.* (1999), 9) Hikmatullah *et al.* (2003), 10) Sukarman *et al.* (1999), 11) Hikmatullah (2008), 14) Hikmatullah (2009)

3.5 Vegetasi dan Penggunaan Lahan

Tanah Andosol merupakan tanah subur yang berada pada berbagai kondisi iklim, ketinggian dan pada berbagai bentuk wilayah. Tanah Andosol yang terletak pada kawasan budidaya pertanian sebagian besar sudah digunakan untuk: (1) tanaman perkebunan terutama teh, kopi, dan tebu/tembakau, (2) tanaman pangan lahan kering terutama padi gogo dan jagung, (3) tanaman hortikultura antara lain kentang, kol, tomat, cabai, tanaman hortikultura tahunan antara lain jeruk, alpokat, apel, (4) Tanaman pangan lahan basah (sawah) Sedangkan tanah Andosol pada kawasan hutan sebagian besar merupakan hutan produksi terbatas, hutan lindung, taman nasional, hutan suaka alam dan hutan yang dapat dikonversi.

Perkebunan teh, merupakan perkebunan yang paling luas berada pada tanah Andosol, baik di Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Bali dan Nusa Tenggara. Perkebunan lainnya yang banyak diusahakan pada tanah Andosol dataran tinggi adalah Kopi Arabika. Di Sumatera Utara, terdapat tanah Andosol dataran rendah yang penggunaan lahannya berupa perkebunan tebu yang dirotasikan dengan tembakau. Perkebunan tebu di sekitar kota Medan dan Kota Binjai di Sumatera Utara yang memasok Pabrik Gula Sei Semayang, sebagian ditanam pada tanah Andosol. Salah satu tembakau bahan baku cerutu berkualitas tinggi yang dikenal dengan Tembakau Deli, sebagian juga dibudidayakan pada tanah Andosol (Gambar 20).

Tanaman hortikultura sayuran dataran tinggi, sebagian besar dibudidayakan pada tanah Andosol. Hampir semua sentra produksi sayuran di Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Bali, Lombok, Flores, dan Sulawesi Utara berada pada tanah Andosol. Gambar berikut adalah tanaman sayuran di berbagai tempat di Indonesia.



Gambar 20. Jenis tembakau Deli ini sebagian dibudidayakan pada tanah Andosol dataran rendah di Kabupaten Deli Serdang (sumber foto: tembakaucerutu.blogspot.com)



Gambar 21. Perkebunan teh pada tanah Andosol di Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat (kiri, foto: Haryono 2011) dan tanaman kopi di Kecamatan Sumber Jaya, Lampung Barat (kanan)



Gambar 22. Kebun sayuran (tomat) di Kaki Gunung Sinabung Kabupaten Karo, Sumatera Utara (kiri), dan kebun sayuran di Sembalun Kaki Gunung Rinjani, Lombok Timur, NTB (kanan)



Gambar 23. Kebun sayuran pada tanah Andosol di Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulut (kiri) dan kebun sayuran pada tanah Andosol di Lembang, Bandung Jawa Barat (kanan)



Gambar 24. Sawah pada tanah Andosol di Sembalun, NTB (kiri) dan di sekitar Danau Tondano, Minahasa, Sulawesi Utara (kanan)



Gambar 25. Taman Nasional Gunung Rinjani di Lombok Timur, NTB, tanahnya sebagian berupa tanah Andosol

4. KARAKTERISTIK TANAH ANDOSOL

4.1 Karakteristik Morfologi Tanah Andosol

Morfologi tanah antara lain adalah: susunan horison, warna tanah, tekstur tanah, konsistensi tanah, dan struktur tanah. Dari sifat-sifat morfologi tersebut dapat diketahui karakter dari tanahnya.

Susunan Horison

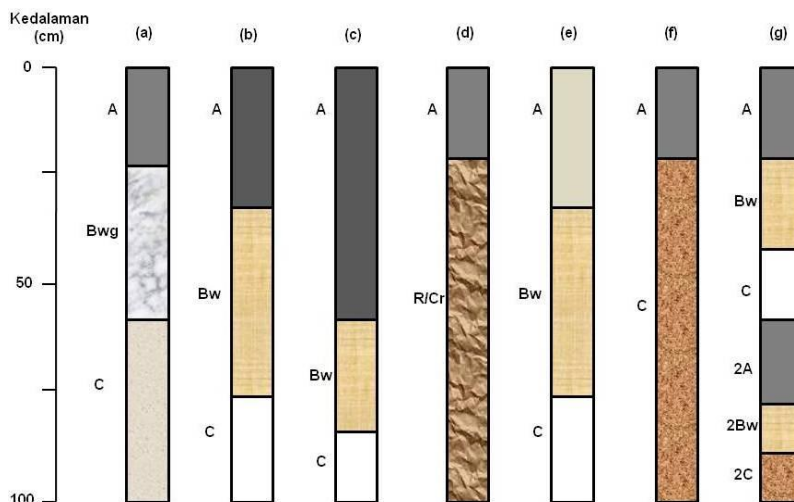
Dalam klasifikasi tanah Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian atau BBSDLP (2014), Andosol adalah tanah-tanah yang mempunyai sifat andik, umumnya sudah mulai menunjukkan perkembangan profil ditandai dengan susunan horison A-Bw-C, sebagian bersusunan horison AC. Horison permukaan atau epipedon yang mungkin dijumpai adalah melanik, molik, okhrik, fulvik, umbrik atau histik. Selain itu tanah Andosol bisa mempunyai susunan horison A okhrik dan horison B kambik serta tidak mempunyai horison penciri lain, kecuali jika tertimbun 50 cm atau lebih bahan baru.

Epipedon melanik dan fulvik merupakan horison permukaan yang mempunyai kandungan C-organik tinggi. Kandungan C-organik harus lebih dari 6% pada lapisan 30 cm teratas, dengan value dan kroma 2 atau kurang untuk melanik dan lebih dari 2 untuk fulvik (Devnita 2012). Epipedon melanik harus mempunyai warna hitam yang dicirikan oleh indeks melanik 1,70 atau lebih kecil. Warna gelap (warna value dan kroma 2 atau kurang) disebabkan bahan organik dengan dominasi asam humat tipe A yang menunjukkan tingkat tertinggi humifikasi (Shoji *et al.* 1993). Epipedon fulvik harus memenuhi semua persyaratan untuk epipedon melanik kecuali persyaratan warna dan indeks melanik. Epipedon fulvik didominasi oleh asam fulvat, dan asam humat tipe-P, yang mempunyai warna lebih terang daripada asam humik tipe A. Asam humik tipe P mempunyai derajat humifikasi lebih rendah dari pada asam humik tipe A, sehingga tanah yang didominasi asam humik tipe P mempunyai warna lebih lebih terang dibandingkan dengan tanah yang didominasi oleh asam humik tipe A.

Meskipun secara umum tanah Andosol di Indonesia mempunyai susunan horison A-Bw-C, tetapi mungkin bisa memiliki memiliki horison AC atau horison tertimbun. Sebagai contoh, tanah Andosol muda terbentuk dari abu vulkanik tebal, batu apung atau *scoria* (*cinder*) menunjukkan profil AC, seperti yang terlihat dalam Gambar 26. Tanah Andosol juga banyak yang mempunyai horison timbunan (A-Bw-C-2A-2Bw-2C) yang diakibatkan oleh kejadian erupsi gunung berapi yang berulang-ulang. Sebagai contoh tanah Andosol dari Gunung Kimangbuleng, Flores merupakan salah satu tanah Andosol tertimbun atau *multisequum* (Sukarman *et al.* 1999). Dalam klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff 2014), sifat *multisequum* ini dijadikan sebagai salah satu pembeda kategori subgrup (sifat Thaptic), contohnya adalah *Thaptic Hapludands*.

Tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia ada yang mempunyai horison molik atau melanik yang tebal (lebih dari 50 cm). Dalam klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff

2014) sifat ini dikenal dengan sifat *Pachic* dan digunakan untuk pembeda pada kategori subgrup, contohnya adalah *Pachic Melanudands*. Sedangkan dalam klasifikasi BBSDLP (2014), sifat tersebut tidak dijadikan sebagai pembeda pada kategori Macam tanah. Sebagai contoh Andosol Melanik yang mempunyai epipedon melanik tipis (ketebalan < 50 cm) maupun tebal (ketebalan ≥ 50 cm) tidak dipisahkan pada kategori Macam tanah.



Gambar 26. Beberapa scheme profil tanah Andosol yang ada di Indonesia
Keterangan: (a) Andosol Gleitik, (b) Andosol Melanik, (c) Andosol Melanik yang tebal (tebal = *Pachic*), (d) Andosol Litik, (e) Andosol Okhrik, (f) Andosol Vitrik, dan (g) Andosol Okhrik tertimbun (*thaptic*)

Warna Tanah

Sifat tanah yang mudah dikenal dari tanah Andosol adalah warna tanah. Warna tanah yang lazim diukur dengan cara mencocokkan dengan standar warna dalam buku *Munsell Soil Color Chart*. Buku ini memuat warna-warna standar yang digunakan dalam menetapkan warna tanah. Buku ini digunakan sebagai pedoman untuk menetapkan warna tanah (matriks) atau warna campuran dan semua gejala karatan atau bercak yang terdapat dalam penampang tanah. Warna tanah dinyatakan dalam Hue, Value dan Chroma. Misalnya 10 YR 3/1, artinya warna tersebut mempunyai hue 10 YR, value 3, dan chroma 1, di dalam munsell warna 10 YR 3/1 adalah warna hitam.

Bahan organik tanah mempengaruhi berbagai sifat kimia dan fisik serta meningkatkan aktivitas biologi tanah dan produktivitas. Warna gelap humus horison permukaan (hitam atau coklat tua) dengan struktur remah, konsistensi gembur, kadar bahan organik tinggi, licin (*smearly*) adalah salah satu sifat yang paling penting dan menentukan konsep tanah Andosol dalam Sistem Klasifikasi Tanah Dudal dan Soepraptohardjo (1957 dan 1961). Salah satu penciri dari tanah Andosol adalah terdapatnya akumulasi humus-alofan yang dinyatakan

dalam bentuk epipedon melanik, horison A molik atau horison A umbrik. Hal serupa dinyatakan oleh Kanno (1961) bahwa pembentukan humus-alofan kompleks adalah proses utama yang bertanggung jawab untuk akumulasi karbon organik pada tanah Kurobokudo di Jepang.

Warna tanah Andosol ditentukan oleh jenis tephra, jenis dan jumlah bahan organik tanah serta komposisi produk pelapukan. Tabel 10 menyajikan beberapa sifat morfologi tanah Andosol dari berbagai tempat di Indonesia. Warna tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia bervariasi dari hitam (10 YR 2/1) sampai coklat gelap kemerahan (10YR 3/4). Warna yang paling terang dijumpai pada tanah Andosol dari Pulau Flores, Nusa Tenggara Timur. Pulau Flores merupakan daerah yang mempunyai curah hujan yang lebih rendah daripada di tempat lain di Indonesia dengan suhu yang lebih panas. Hal ini sejalan dengan pernyataan Leamy *et al.* (1980) bahwa di daerah tropis warna tanah Andisol/Andosol makin kurang gelap karena suhu udara yang lebih panas.

Tabel 10. Kisaran warna, C-organik, dan berat isi horison A dan Bw tanah Andosol di Indonesia

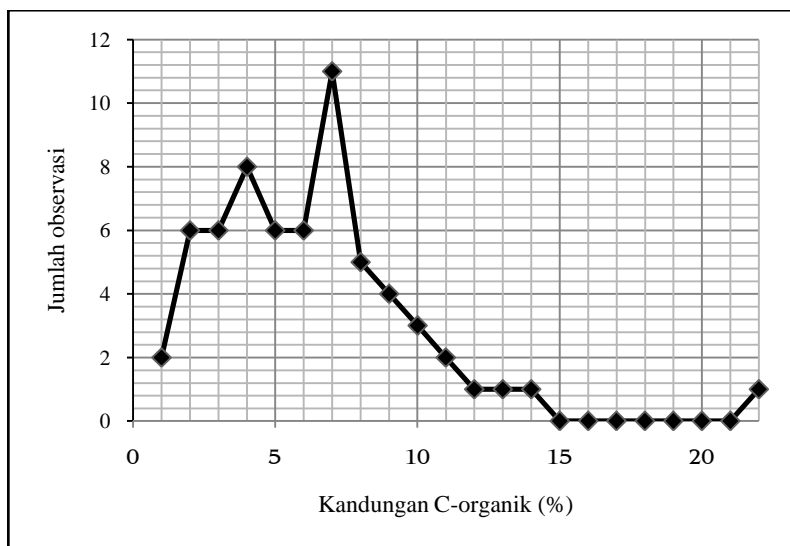
No.	Warna	C-organik %	Berat isi g cm ⁻³	Sumber
1.	10YR 3/2 (coklat sangat gelap)	5,20 - 7,60	0,43 - 0,65	Hardjoesastro (1983)
2.	7,5YR 3/2- (coklat gelap)	3,13 - 10,81	0,43 - 0,84	Djaenudin <i>et al.</i> (1988)
3.	10YR 2/2-3/3 (coklat sangat gelap-coklat gelap)	11,19 - 22,46	0,48 - 0,72	Suparto <i>et al.</i> , (1989)
4.	10YR 2/1-3/2) (hitam-coklat sangat gelap)	2,70 - 2,84	0,61 - 0,66	Sukarman dan Tafakresnanto (1992)
5.	10YR 2/0-3/3 (hitam-coklat sangat gelap)	3,63 - 8,53	0,37 - 0,87	Hikmatullah <i>et al.</i> (1994)
6.	10 YR 2/1 (hitam)	3,16 - 7,43	0,77 - 0,81	Sukarman dan Subardja (1997)
7.	10 YR 2/1 (hitam-coklat gelap kemerahan)	2,87 - 3,34	0,80 - 0,89	Subagjo <i>et al.</i> (1997)
8.	10YR 2/1-3/4 (hitam-coklat gelap kemerahan)	2,67 - 9,24	0,43 - 0,80	Hikmatullah <i>et al.</i> (1999)
9.	10YR 2/2-3/2 (coklat sangat gelap)	1,24 - 5,57	0,78 - 0,90	Hikmatullah <i>et al.</i> (2008)
10.	Tidak ada data	2,27 - 10,04	0,58 - 0,89	Fiantis <i>et al.</i> (2000)
11.	10YR 2/1-3/4 (hitam-coklat gelap kekuningan)	7,30 - 19,31	0,47 - 0,80	Yatno dan Suharta (2011)
12.	10YR 3/3 (coklat sangat tua)	7,34 - 10,14	0,62 - 0,74	Devnita (2012)

Dari Tabel 10 juga terlihat bahwa warna hitam tidak semata-mata ditunjukkan oleh kandungan C-organik yang tinggi. C-organik yang relatif rendah (1,75%) ternyata tanahnya berwarna hitam (10YR 2/1). Sedangkan tanah yang mengandung C-organik tertinggi (22,46%) warna tanahnya malahan tidak hitam tetapi coklat sangat gelap (10YR 2/2), hal ini disebabkan karena perbedaan tipe asam humat yang dikandungnya. Tanah yang banyak mengandung asam humat tipe A akan lebih hitam dibandingkan dengan tanah yang mengandung asam humat tipe B atau tipe P.

Tanah Andosol dicirikan oleh adanya akumulasi bahan organik di permukaan yang berwarna hitam. Proses utama terjadinya akumulasi tersebut adalah pembentukan kompleks humus-alofan. Sementara warna hitam disebabkan oleh kandungan asam humat yang ada di dalam tanah tersebut. Semakin tinggi asam humat biasanya tanah akan semakin hitam. Selain itu tipe asam humat yang dikandung dalam tanah tersebut juga menentukan derajat warna kehitaman tanah tersebut. Berdasarkan derajat humifikasinya, asam humat dibagi menjadi tipe A, tipe B, tipe P, dan tipe RP yang digunakan untuk mengelompokkan warna-warna tanah Kuroboku (tanah Andosol) di Jepang. Tanah yang mengandung asam humat tipe A akan berwarna lebih hitam dibandingkan dengan tanah yang mengandung asam humat tipe B, tipe P, dan tipe RP (Arai *et al.* 1988). Di Indonesia tanah Andosol yang mempunyai lapisan hitam atau gelap setebal 30 atau lebih disebut sebagai Andosol Melanik.

Humus yang berwarna sangat gelap (hitam) disebabkan karena dominannya asam humat tipe A. Banyak tanah Andosol mengandung C-organik lebih besar dari 18%, namun tidak semua horison tanah Andosol yang kaya akan humus berwarna sangat gelap (nilai dan kroma 2 atau kurang, lembab). Andosol Humik atau Andosol Molik juga mengandung humus yang tinggi, tetapi warnanya hanya coklat gelap (tidak hitam). Hal ini disebabkan karena humus yang dikandungnya berupa asam fulvat dan asam humat tipe P yang mempunyai derajat humifikasi yang rendah (Nanzyo *et al.* 1993). Faktor vegetasi juga merupakan salah satu penentu terbentuknya asam fulvic. Hasil penelitian Devnita (2012) di Gunung Tangkuban Perahu dan Gunung Tilu di Jawa Barat mendapatkan bahwa salah satu faktor penentu terbentuknya asam yang tinggi adalah karena pengaruh vegetasi yaitu hutan pinus.

Kandungan C-organik tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia bervariasi dari 1,24% sampai 22,46% (Tabel 10). Kandungan C-organik paling rendah dijumpai pada tanah Andosol dari Gunung Sopotan, Sulawesi Utara (Hikmatullah 2008), sedangkan yang tertinggi dijumpai pada tanah Andosol dari Gunung Seulawah, Aceh (Suparto *et al.* 1989). Gambar 27 memperlihatkan bahwa kandungan C-organik pada horison A yang paling banyak distribusinya dari Andosol di Indonesia adalah pada kisaran 2 sampai 8%. Berdasarkan data tersebut di atas ternyata kandungan C-organik dari tanah Andosol di Indonesia saat ini mempunyai kisaran kandungan C-organik yang lebih lebar dibandingkan dengan kisaran kandungan C-organik tanah Andosol seperti yang dikemukakan oleh Tan dan Schuylenborgh (1961) yaitu berkisar dari 6 sampai 15%.



Gambar 27. Frekuensi distribusi sebaran kandungan C-organik tanah Andosol di Indonesia

Dari data yang berbeda dalam dua kurun waktu (1961 sampai 2008) menunjukkan dua pengertian: (1) Kandungan C-organik tanah Andosol di Indonesia yang sebenarnya mempunyai kisaran yang lebar, dan (2) Terdapat penurunan kandungan C-organik tanah Andosol, akibat penggunaannya untuk perkebunan atau tanaman hortikultura.

Berat isi tanah Andosol di Indonesia sangat bervariasi, yaitu berkisar dari 0,37 sampai 0,90 g cm⁻³ (Tabel 10). Rendahnya berat isi tanah Andosol ini tidak terlepas dari pengaruh kandungan mineral amorf yang dominan. Dalam tanah Andosol yang didominasi oleh mineral amorf, jumlah pori mikro cukup banyak terutama pori intra dan inter partikel dari alofan. Tanah Andosol yang mempunyai berat isi paling tinggi adalah tanah Andosol dari Gunung Soputan, Sulawesi Utara. Tingginya berat isi tanah tersebut karena kandungan pasirnya yang cukup tinggi yaitu mencapai 84% dan kandungan C-organik yang hanya 1,24% (Hikmatullah 2008).

Tekstur Tanah

Tanah Andosol mempunyai tekstur yang sangat bervariasi dari lempung berpasir sampai liat berpasir, hal ini tergantung dari jenis dan ukuran partikel tephra yang dikeluarkan saat terjadinya erupsi dan tingkat pelapukan. Sering terjadi adanya perbedaan tekstur antara hasil pengamatan di lapangan dan hasil analisis di laboratorium. Hal ini terjadi karena bahan tanah yang berasal dari tanah non kristalin seringkali tidak mengalami dispersi secara sempurna menjadi butiran tanah primer (liat, debu atau pasir) pada saat analisis tanah. Oleh karena itu tekstur tanah atau ukuran besar butir tidak digunakan sebagai kriteria dalam

klasifikasi tanah pada kategori famili. Sebagai penggantinya digunakan kombinasi ukuran partikel dan mineralogi yang disebut sebagai kelas besar butir pengganti.

Kelas besar butir pengganti yang digunakan terdiri atas 24 kelas yaitu: Berbatuapung, Bersinder, Fragmental, Berbatuapung-berabu, Skeletal-berabu, Berabu, Berbatuapung-medial, Skeletal-medial, Medial, Berbatuapung-hidrous, Skeletal-hidrous, Hidrous, Sekeletal-berpasir, Skeletal-berlempung, Skeletal-berliat, Berpasir, Berlempung, Berlempung-kasar, Berlempung-halus, Berdebu-kasar, Berdebu-halus, Berliat, Halus, Sangat-halus.

Konsistensi Tanah

Seperti diketahui bahwa tanah Andosol mengandung banyak bahan dalam bentuk non kristalin yang mempengaruhi konsistensi dan secara nyata memberikan pengaruh pada pengembangan sifat fisik tanah yang sangat baik dan untuk pertumbuhan akar tanaman.

Konsistensi tanah Andosol secara nyata dipengaruhi oleh kadar air. Konsistensi basah, ditentukan pada kondisi kadar air lebih tinggi dari kapasitas lapang yang ditandai dengan lekat dan plastis. Tanah Andosol yang mempunyai kandungan humus tinggi biasanya kurang lekat dan kurang plastis. Sebaliknya, tanah Andosol dengan kandungan C rendah organik disertai dengan peningkatan kandungan liat, konsistensinya tergolong lekat dan plastis.

Konsistensi lembab, diukur pada saat kadar air antara kering (titik layu permanen) dan kapasitas lapangan. Kondisi ini sangat penting terutama untuk horison lapisan atas tanah Andosol. Konsistensi lembab biasanya sangat gembur sampai remah, yang mencerminkan perkembangan agregat sangat berpori, struktur berbutir atau subangular.

Sifat yang khas dari tanah Andosol adalah adanya sifat *smearly*, yaitu terasa licin jika tanah dipirid dalam keadaan lembab. Sifat tersebut mencerminkan sifat thixotropic dari bahan tanah berbentuk non kristalin. Dalam menentukan Andosol Okrik, sifat *smearly* merupakan sifat wajib ada pada klasifikasi tanah BBSDLP (2014).

Struktur Tanah

Tanah Andosol memiliki struktur tanah yang mencerminkan tingginya bahan tanah berbentuk mineral non kristalin dan tingginya bahan organik tanah. Kedua bahan tersebut sangat berperan dalam menentukan rendahnya berat isi (*bulk density*). Horison permukaan dari tanah Andosol umumnya mempunyai struktur berbutir (*granular*) dan struktur gumpal (*blocky*) atau kadang-kadang membulat (*subangular*). Ukuran dan kelas struktur tanah Andosol cukup bervariasi, hal tersebut mencerminkan pengaruh dari jenis material tanah, budidaya, dan iklim (pengeringan dan pembasahan). Budidaya pertanian pada tanah Andosol cenderung menyebabkan terjadinya perubahan struktur dari struktur butir (*granular*) menjadi struktur agak membulat (*subangular*) bahkan menjadi gumpal agak bersudut (*subangular blocky*).

Horison bawah permukaan (horison Bw) dari tanah Andosol biasanya memiliki struktur gumpal agak bersudut (*subangular blocky*) yang lebih besar dalam ukuran dan lemah dalam perkembangan atau kekuatan dibandingkan dengan struktur yang sama ditemukan di horison permukaan. Horison bawah permukaan tanah Andosol muda terbentuk dari tephra kasar sering belum berstruktur dan berupa berbutir tunggal. Pengembangan struktur tanah Andosol berkaitan erat dengan sifat fisik yang unik dari tanah Andosol seperti retensi air tinggi, porositas total yang besar, dan drainase yang baik yang menguntungkan bagi pertumbuhan akar tanaman.

Sifat morfologi tanah sering menjadi penentu nama pada kategori Macam tanah. Sifat hidromorfik yaitu sifat yang dapat ditentukan berdasarkan pengamatan sifat morfologi tanah dari warna dan reaksi positif terhadap pereaksi *alpha-alpha dipyridil*, merupakan penentu untuk penamaan Macam Tanah Andosol Gleistik. Adanya horison melanik yang dapat diketahui dari sifat morfologi yaitu warna dan ketebalan dapat dijadikan penentu nama Andosol Melanik atau Andosol Umbrik. Adanya sentuh litik atau paralitik pada kedalaman kurang dari 50 cm, merupakan penentu untuk Andosol Litik. Sedangkan adanya sifat vitrik dapat ditentukan berdasarkan sifat morfologi dari ukuran besar butir pengganti. Sifat vitrik dijadikan sifat untuk penamaan Andosol Vitrik.

4.2 Karakteristik Mineralogi Tanah Andosol

Mineral merupakan unsur utama penyusun tanah dan berperan penting dalam menentukan sifat kimia dan fisika tanah. Mineral merupakan salah satu indikator penting mengenai pelapukan yang telah terjadi, sehingga keberadaan ataupun absennya suatu jenis mineral di dalam tanah dapat dijadikan suatu petunjuk bagaimana proses pembentukan tanah terjadi. Mineral di dalam tanah dapat dibedakan atas mineral primer yang disebut juga mineral fraksi pasir dan mineral sekunder atau mineral fraksi liat (Prasetyo *et al.* 2004).

Mineral Primer

Susunan mineral primer dalam tanah, sangat tergantung pada bahan induknya. Untuk tanah Andosol bahan induk yang menyusunnya adalah material gunung berapi yang dimuntahkan ketika terjadi erupsi. Mineral primer dijumpai di tanah Andosol dalam bentuk fraksi pasir dan sebagian fraksi debu. Mineral primer tersebut dalam tanah sebagai hasil dari pelapukan fisik dari bahan-bahan piroklastik yang dikeluarkan saat erupsi gunungapi. Hasil pelapukan fisik tersebut yang berupa mineral fraksi pasir maupun debu ini masih mempunyai sifat fisik dan kimia yang sama dengan bahan awalnya.

Komposisi mineral primer mempunyai arti yang penting dari segi pengelolaan tanah. Tanah dengan kandungan mineral mudah lapuk yang tinggi akan mempunyai cadangan sumber hara yang tinggi pula, sebaliknya dominasi mineral resisten pada tanah menunjukkan miskinnya cadangan sumber hara dalam tanah tersebut.

Komposisi dan asosiasi dari beberapa jenis mineral primer dapat digunakan sebagai indikator cadangan sumber hara dalam tanah. Menurut Fiantis *et al.* (2005) mineral fraksi pasir dari tanah Andosol di Indonesia adalah kuarsa, plagloklas, hornblende, augit, hiperstein, olivin dan gelas vulkanik. Sedangkan mineral liatnya didominasi oleh mineral liat non kristalin yang terdiri atas: allophan, imogolit, dan atau ferihidrit disamping halloisit, gibsit, dan kristobalit.

Bahan induk tanah Andosol yang dijumpai di Indonesia dapat dikelompokkan menjadi: bahan vulkanik liparitik, andesitik, andesit-basaltik dan basaltik. Berdasarkan data bahan induk dan kandungan mineral primer tanah Andosol di Indonesia seperti yang disajikan dalam Tabel 11, maka susunan mineral primer untuk setiap bahan induk adalah sebagai berikut:

1. Kelompok bahan vulkanik liparitik: kuarsa, sanidin, biotit dan sedikit gelas vulkanik.
2. Kelompok bahan induk andesitik: hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik, andesin, labradorit.
3. Kelompok bahan induk andesitik-basaltik: hiperstein, augit, amfibol, plagioklas intermedier, gelas vulkanik, andesin, labradorit.
4. Kelompok bahan induk basaltik: hiperstein, augit, amfibol, plagioklas, gelas vulkanik, olivin.

Tanah yang berkembang dari bahan tuf liparit didominasi oleh asosiasi mineral kuarsa, sanidin dan biotit dengan sedikit gelas vulkanik. Komposisi mineral primer ini mengindikasikan dua hal yaitu: pertama asosiasi kuarsa sanidin menunjukkan bahwa bahan induk tanah bersifat masam, kedua tingginya sanidin dan biotit menunjukkan bahwa bahan induk tanah mempunyai sumber K yang tinggi (Prasetyo *et al.* 2009).

Tanah yang berkembang dari bahan andesitik sebagian besar didominasi oleh dua kelompok asosiasi mineral yaitu: asosiasi hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik, andesin, labradorit dan asosiasi gelas vulkanik, augit, labradorit, dan hiperstein. Komposisi mineral primer ini mengindikasikan beberapa hal yaitu: pertama asosiasi tersebut menunjukkan bahwa bahan induk tanah bersifat intermedier atau menengah, kedua tingginya kelompok mineral piroksen (hiperstein dan augit) serta amfibol menunjukkan bahwa mineral tersebut merupakan mineral feromagnesium, yaitu salah satu kelompok mineral mudah lapuk yang banyak mengandung Fe, Mg, dan Ca, ketiga bahwa asosiasi mineral primer yang masih didominasi oleh gelas vulkanik menunjukkan bahwa tanah tersebut masih relatif muda dan belum terlapuk lanjut.

Tanah yang berkembang dari bahan andesitik-basaltik sebagian besar didominasi oleh asosiasi mineral hiperstein, augit, amfibol, plagioklas intermedier, gelas vulkanik, andesin, labradorit. Perbedaan dengan bahan induk bersifat andesit adalah mineral augit (kelompok piroksen) lebih banyak daripada mineral amfibol. Komposisi mineral primer ini mengindikasikan dua hal yaitu: pertama asosiasi tersebut menunjukkan bahwa bahan induk tanah bersifat intermedier atau menengah, kedua tingginya kelompok mineral piroksen (hiperstein dan augit) serta amfibol menunjukkan bahwa mineral tersebut merupakan mineral feromagnesium, yaitu salah satu kelompok mineral mudah lapuk yang mengandung Fe, Ca, dan Mg. Dalam kasus ini kandungan Ca dari bahan induk andesit-basaltik lebih banyak daripada bahan induk andesitik.

Tabel 11. Bahan induk, susunan mineral primer, dan mineral liat dari tanah Andosol Indonesia

No.	Bahan induk	Mineral primer (dominan)	Mineral liat
1.	Vulkanik liparitik (Dataran Tinggi Toba, Sumatera Utara) ¹⁾	Kuarsa, sanidin, biotit, dan sedikit gelas vulkanik	Alofan, haloisit hidrat, gibsit
2.	Vulkanik andesitik (G. Lawu, Ngawi, Madiun) ²⁾	Hiperstein, augit, amfibol, plagioklas intermedier, gelas vulkanik	Haloisit, gibsit
3.	Vulkanik andesitik (Gunung Kidul) ³⁾	Augit, hiperstein, amfibol, andesin, gelas vulkanik	Alofan, imogolit, haloisit, gibsit
4.	Vulkanik andesitik (G. Kimangbuleng, Kab. Sikka, Flores) ⁴⁾	Hiperstein, amfibol, augit andesin, gelas vulkanik	Alofan, haloisit, kaolinit disorder
5.	Vulkanik andesitik (G. Egon, Kab. Sikka, Flores) ⁵⁾	Hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik	Alofan, haloisit, kaolinit disorder
6.	Vulkanik andesitik (G. Mandasawu, Kab. Manggarai, Flores) ⁵⁾	Hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik	Alofan, haloisit, kaolinit disorder
7.	Vulkanik andesitik (G. Wawolika dan G. Ambolumbo, Kab Ngada, Flores) ⁵⁾	Hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik	Alofan, haloisit, kaolinit disorder
8.	Vulkanik andesitik (G. Kelimutu, Kab. Ende, Flores) ⁶⁾	Hiperstein, amfibol, augit, plagioklas intermedier, gelas vulkanik	Alofan, haloisit, kaolinit disorder
9.	Vulkanik muda Andesit (Perkebunan Ciater/Profil CTR A2, Kab. Bandung) ⁷⁾	Gelas vulkanik, augit, labradorit, hiperstein, dan amfibol	Alofan, kaolinit
10.	Vulkanik andesitik (Peg. di Halmahera Barat, Maluku Utara) ⁸⁾	Gelas vulkanik, labradorit, andesin, bitownit, augit, dan hiperstein	-
11.	Vulkanik lebih tua Andesit (Perkebunan Ciater, Kab. Bandung) ⁷⁾	Amfibol, augit, andesin, hiperstein, dan gelas vulkanik	Alofan, gibsit
12.	Vulkanik andesit-basaltik (G. Salak, Bogor) ⁹⁾	Amfibol, augit, andesin, hiperstein, dan gelas vulkanik	Alofan, gibsit
13.	Vulkanik andesit-basaltik (G. Manglayang, Bandung) ¹⁰⁾	Hiperstein, augit, amfibol, andesin, gelas vulkanik	Mineral susunan rantai pendek, haloisit
14.	Vulkanik andesitik-basaltik (G. Lokon, G. Lengkoan, Sulut) ¹¹⁾	Gelas vulkanik, andesin, augit, hiperstein, labradorit	Alofan, haloisit disorder
15.	Vulkanik Basaltik (Perkebunan Sedep/Profil SDP-A3, Kab. Bandung) ⁷⁾	Plagioklas, augit, hiperstein, olivin, amfibol	Alofan, kaolinit
16.	Vulkanik Basaltik (G. Sopotan, Sulut) ¹¹⁾	Gelas vulkanik, labradorit, olivin, augit, hiperstein	Alofan, haloisit disorder

Sumber: 1) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011), 2) Subagjo and Buurman (1980), 3) Sudihardjo *et al.* (1997), 4) Sukarman *et al.* (1999), 5) Hikmatullah *et al.* (1999), 6) Hikmatullah *et al.* (2003), 7) Arifin dan Hardjowigeno (1997), 8) Hikmatullah (2009), 9) Hardjoesastro *et al.* (1983), 10) Subagjo *et al.* (1997), 11) Hikmatullah (2008)

Tanah yang berkembang dari bahan basaltik sebagian besar didominasi oleh asosiasi mineral hiperstein, augit, amfibol, plagioklas, gelas vulkanik, olivin. Perbedaan dengan bahan induk lainnya adalah hadirnya mineral olivin. Kehadiran mineral ini menambah banyaknya jenis mineral dalam kelompok mineral feromagnesium, yaitu salah satu kelompok mineral mudah lapuk yang banyak mengandung Fe, Mg, dan Ca. Dengan demikian tanah-tanah yang berkembang dari bahan bersifat basaltik akan mempunyai cadangan mineral lebih banyak sehingga mempunyai tingkat kesuburan lebih tinggi.

Dari uraian tentang mineral primer yang terkandung dalam tanah Andosol seperti tersebut di atas menunjukkan bahwa: tanah Andosol yang ada di Indonesia berkembang dari bahan vulkanik bersifat liparitik, andesitik, andesit-basaltik, dan basaltik. Susunan mineralnya tergolong kedalam mineral mudah lapuk baik yang tergolong mineral feromagnesium maupun feldspar. Kedua jenis mineral ini mempunyai cadangan mineral tinggi yang sangat dibutuhkan oleh tanaman pertanian. Tinggi dan rendahnya kandungan gelas vulkanik dalam tanah Andosol mengindikasikan tentang tingkat pelapukan yang terjadi. Gelas vulkanik yang masih tinggi mengindikasikan bahwa tanah tersebut masih sangat muda dan belum banyak terlapuk.

Salah satu mineral primer yang mempunyai sifat unik dan sangat mempengaruhi sifat-sifat tanah Andosol adalah gelas vulkanik. Berikut diuraikan karakteristik gelas vulkanik dari fraksi pasir tanah Andosol di Indonesia.

Gelas Vulkanik

Gelas vulkanik adalah bahan berbentuk amorf (non kristalin) yang berasal dari sisa-sisa magma yang telah mengalami kristalisasi tidak sempurna. Kandungan gelas vulkanik dalam tanah Andosol mencerminkan tingkat pelapukan dari tanah tersebut selain mencerminkan tingkat cadangan mineral yang dikandung dalam tanah tersebut. Tabel 12 menyajikan kandungan gelas vulkanik pada tanah Andosol dari beberapa tempat di Indonesia.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa kandungan gelas vulkanik yang tersisa di dalam tanah sangat bervariasi yaitu berkisar dari 2-45%. Kandungan gelas vulkanik pada bahan piroklastik segar yang berasal dari empat gunung api yang mengalami erupsi dari tahun 2005 sampai 2014 seperti yang dibahas dalam Bab 2, berkisar dari 23 sampai 60%. Hal tersebut menunjukkan bahwa kandungan gelas vulkanik dalam tanah sangat tergantung dari kandungan gelas vulkanik awal serta tingkat pelapukan. Semakin tanah mengalami pelapukan lanjut, maka gelas vulkanik yang ada juga semakin sedikit karena sudah terlapuk menjadi mineral kristalin atau menjadi mineral liat sekunder. Tanah di dataran tinggi Toba dan Gunung Kimangbuleng di Pulau Flores merupakan daerah vulkanik yang sudah tua terlihat dari jumlah gelas vulkanik yang lebih sedikit, sedangkan daerah vulkanik di Gunung Soputan, Gunung Lokon merupakan gunung yang masih sangat aktif dan sampai saat ini masih mengalami erupsi, terlihat dari jumlah gelas vulkanik yang cukup besar (Tabel 12).

Tabel 12. Kandungan gelas vulkanik, kuarsa, dan opak pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia

No.	Lokasi	Gelas vulkanik	Kuarsa	Opak
1.	Lam Teuba, Aceh ¹⁾	1 - 2	3 - 7	8 - 16
2.	Dataran tinggi Toba Sumut ²⁾	1 - 9	17 - 50	1 - 11
3.	Gedongsurian, Lampung ³⁾	31 - 82	6 - 38	1 - 3
4.	G. Lawu, Ngawi, Madiun ³⁾	4 - 10	6 - 16	1
5.	Gunung Kidul ⁴⁾	1 - 3	4 - 20	5 - 8
6.	Ciater 1, Kab. Bandung ⁵⁾	22 - 28	1 - 2	1
7.	Ciater 2, Kab. Bandung ⁵⁾	1 - 4	45 - 48	1 - 4
8.	G. Salak, Bogor ⁶⁾	2 - 10	-	1 - 7
9.	G. Kimangbuleng	2 - 5	1 - 4	3 - 10
10.	Kab Sikka, Flores ⁷⁾	5 - 5	1	4 - 11
11.	G. Mandasawu, Kab. Manggarai, Flores ⁸⁾	7 - 22	1 - 2	1 - 25
12.	G. Wawolika dan Kab Ngada, Flores ⁸⁾	11 - 15	-	1 - 5
13.	G. Kelimutu, Kab. Ende, Flores ⁹⁾	25 - 28	-	1 - 3
14.	G. Lokon, Sulut ¹⁰⁾	27 - 39	-	10 - 12
15.	G. Lengkoan, Sulut ¹⁰⁾	31 - 42	1 - 4	5 - 28
16.	G. Sopotan, Sulut ¹⁰⁾	21 - 28	0 - 1	7 - 20
17.	Halmahera Barat, Malut ¹¹⁾	32 - 45	1 - 8	8 - 17

Sumber: 1) Suparto *et al.* (1989), 2) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011), 3) Subagio and Buurman (1980), 4) Sudihardjo *et al.* (1997), 5) Arifin dan Hardjowigeno (1997), 6) Hardjoesastro *et al.* (1983), 7) Sukarman *et al.* (1999), 8) Hikmatullah *et al.* (1999), 9) Hikmatullah *et al.* (2003), 10) Hikmatullah (2008), 11) Hikmatullah (2009)

Kelompok Feldspar

Kelompok mineral feldspar merupakan mineral primer mudah lapuk yang banyak mengandung unsur Na⁺, Ca⁺, dan K⁺ dan kadang-kadang Ba²⁺ dalam jumlah yang banyak. Selain itu karena penyebarannya luas dan banyak, maka kelompok ini merupakan sumber unsur mikro yang sangat penting (Huang 1989). Tabel 13 memperlihatkan kandungan mineral dari kelompok feldspar yang terkandung dari mineral primer tanah Andosol di beberapa tempat di Indonesia.

Dari hasil penelitian terhadap kandungan mineral primer yang ada dalam tanah Andosol di Indonesia diperoleh hasil bahwa dari kelompok feldspar, mineral yang dijumpai terdiri atas: andesin, labradorit, bitownit, anortit, albit, oligoklas dan plagioklas intermedier. Mineral andesin merupakan mineral yang paling banyak dijumpai di dalam kelompok ini, disusul labradorit, plagioklas, albit, oligoklas, anortit dan bitownit. Mineral-mineral tersebut merupakan mineral yang banyak mengandung unsur hara kalsium (Ca) dan natrium (Na).

Tabel 13. Kandungan mineral dari kelompok feldspar pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia

No.	Lokasi	Ad	Lb	Bt	An	Pg	Al	Ol	Sa
..... %									
1.	Lam Teuba, Aceh ¹⁾	-	-	-	-	25-53	-	-	-
2.	Dataran tinggi Toba, Sumut ²⁾	1-3	1-3	-	-	-	-	-	2-24
3.	Lampung Barat (Sekinjau) ³⁾	-	-	-	-	-	1-12	1-28	-
4.	G. Lawu, Ngawi, Madiun ⁴⁾	-	-	-	-	8-26	-	-	-
5.	Gunung Kidul ⁵⁾	2-41	1	-	-	-	-	-	-
6.	Ciater, Kab. Bandung ⁶⁾	7-9	-	-	-	-	-	-	-
7.	Ciater Kab. Bandung, Andesitik lebih tua ⁶⁾	2-19	-	-	-	-	-	-	-
8.	Perkebunan Teh Sedep, Kab. Bandung ⁶⁾	3-4	10-19	-	-	-	-	-	-
9.	G. Salak, Bogor ⁷⁾	-	-	-	-	11-29	-	-	-
10.	G. Kimangbuleng, Kab Sikka, Flores ⁸⁾	37-46	-	-	-	-	-	-	-
11.	G. Egon Kab. Sikka, Flores ⁹⁾	24-35	-	-	-	-	-	-	-
12.	G. Mandasawu, Kab. Manggarai, Flores ⁹⁾	6-24	-	-	-	-	-	-	-
13.	G. Wawolika dan Kab Ngada, Flores ⁹⁾	25-37	-	-	-	-	-	-	-
14.	G. Kelimutu, Kab. Ende, Flores ¹⁰⁾	24-49	-	-	-	-	-	-	-
15.	G. Lokon, Sulut ¹¹⁾	6-9	2-3	-	1	-	-	-	-
16.	G. Lengkoan, Sulut ¹¹⁾	6-8	4-6	-	1	-	-	-	-
17.	G. Sopotan, Sulut ¹¹⁾	3-4	19-46	-	2	-	-	-	-
18.	Halmahera Barat, Maluku Utara ¹²⁾	2-6	12-27	1-2	-	-	-	-	-

Keterangan: Ad = Andesin, Lb = Labradorit, Bt = Bitownit, An = Anortit, Pg = Plagioklas, al = Albit, ol = Oligoklas, sn = Sanidin

Sumber : 1) Suparto *et al.* (1989); 2) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011); 3) Dai dan Hikmatullah (1993); 4) Subagjo and Buurman (1980); 5) Sudihardjo *et al.* (1997); 6) Arifin dan Hardjowigeno (1997); 7) Hardjosoesastro *et al.* (1983); 8) Sukarman *et al.* (1999); 9) Hikmatullah *et al.* (1999); 10) Hikmatullah *et al.* (2003); 11) Hikmatullah (2008); 12) Hikmatullah (2009)

Dari Pulau Sumatera kelompok mineral feldspar yang paling banyak dijumpai dari tanah yang berkembang abu vulkanik di Lampung Barat adalah albit (1 sampai 12%) dan oligoklas (1 sampai 28%). Sedangkan dari Provinsi Aceh yaitu dari Kaldera Lam Teuba, dari kelompok feldspar yang paling banyak kandungannya adalah plagioklas intermedier yaitu bervariasi dari 25 sampai 30% (Dai dan Hikmatullah 1993). Kandungan mineral kelompok feldspar yang paling sedikit adalah dari tanah Andosol dataran tinggi Toba yaitu berupa andesin dan labradorit masing-masing 1 sampai 3%. Bahan induk tanah Andosol ini adalah tufa liparit bersifat masam yang mineral primernya banyak didominasi oleh kuarsa (Yatno dan Suharta 2011, Prasetyo *et al.* 2009).

Dari Pulau Jawa, tanah Andosol dari Gunung Lawu Ngawi Jawa Timur mengandung plagioklas cukup tinggi yaitu antara 36 sampai 59% (Subagjo and Buurman 1980). Demikian halnya tanah Andosol dari Gunung Salak di Jawa Barat mengandung plagioklas antara 11

sampai 29%. Tanah-tanah bersifat andik dari Gunung Burangrang, Jawa Barat mengandung labradorit bervariasi dari 1 sampai 10% dan andesin bervariasi dari 1 sampai 2% (Yatno dan Zauyah 2003). Tanah Andosol dari Ciater mengandung mineral andesin antara 2 sampai 19%, sedangkan dari Perkebunan Teh Sedep di Kabupaten Bandung mengandung mineral andesin sebanyak 3 sampai 4% dan labradorit 10 sampai 19% (Arifin dan Hardjowigeno 1997).

Beberapa hasil penelitian tentang kandungan mineral primer pada tanah Andosol di pulau-pulau lainnya mendapatkan bahwa dari kelompok feldspar, mineral andesin banyak terdapat pada tanah-tanah Andosol dari Pulau Flores Nusa Tenggara Timur. Sukarman *et al.*, (1999) mendapatkan kandungan andesin dari Gunung Kimangbuleng Kabupaten Sikka bervariasi antara 37 sampai 46%. Sementara dari Gunung Egon, Gunung Mandasawu, Gunung Wowolika dan Gunung Kelimutu kandungan andesinnya bervariasi 6 sampai 37% (Hikmatullah *et al.* 1999). Sementara itu kandungan andesin pada tanah Andosol dari Tondano (Gunung Lokon, Gunung Lengkoan, dan Gunung Soputan), Sulawesi Utara menunjukkan persentase yang lebih rendah yaitu bervariasi dari 3 sampai 9% (Hikmatullah 2008). Kelompok mineral feldspar yang paling banyak dijumpai dari bahan vulkanik di Halmahera Barat adalah labradorit 12 sampai 27%, andesin 2 sampai 6% dan bitownit 1 sampai 2% (Hikmatullah 2009).

Dengan masih banyak dijumpainya mineral-mineral tersebut menunjukkan bahwa tanah Andosol merupakan tanah yang masih banyak mempunyai cadangan unsur hara esensial untuk tanaman. Dari kelompok feldspar hara esensial yang terkandung di dalamnya terutama adalah unsur Ca dan Na.

Kelompok Olivin, Piroksen, Amphibol, dan Mika

Kelompok olivin, piroksen (augit, hipersten) dan amphibol (hornblende), merupakan kelompok mineral yang merupakan sumber Ca, Mg, dan Fe dalam tanah. Dari Tabel 14 dapat dikemukakan bahwa mineral augit merupakan mineral yang paling banyak dijumpai disusul oleh hiperstein, hornblende, olivin. Hal ini menunjukkan bahwa tanah Andosol di Indonesia mempunyai cadangan mineral yang masih tinggi sebagai penyedia unsur Ca, Mg, dan Fe. Sementara itu dari kelompok mika, dijumpai adanya muskovit dan biotit pada tanah Andosol dari Lampung Barat, sedangkan dari dataran tinggi Toba hanya mengandung biotit saja. Dalam kelompok mika, mineral muskovit banyak mengandung unsur hara kalium (K) dan dalam biotit banyak mengandung unsur hara kalium (K) dan magnesium (Mg). Dari kelompok mineral ini, unsur-unsur hara yang dikandungnya akan sangat memperkaya kesuburan tanah Andosol. Adanya kandungan mineral kalium dan magnesium dalam mineral primer tersebut menandakan bahwa tanah Andosol di Indonesia secara potensial maupun aktual mempunyai kesuburan yang tinggi.

Tabel 14. Kandungan mineral dari kelompok olivin, piroksen, amphibol, dan mika pada horison A dan Bw dari beberapa tanah Andosol yang ada di Indonesia

No.	Lokasi	Ol	Au	Hi	Ho	Ms	Bi
	 %					
1.	Lam Teuba, Aceh ¹⁾	-	3-5	3-8	26-36	-	-
2.	Dataran tinggi Toba, Sumut ²⁾	-	-	1-2	-	-	3-59
3.	Lampung Barat (Sekinjau) ³⁾	-	-	-	-	7-12	1-5
4.	G. Lawu, Ngawi, Madiun ⁴⁾	-	6-11	5-10	4-12	-	-
5.	Gunung Kidul ⁵⁾	-	8-11	8-13	4-11	-	-
6.	Ciater, Kab. Bandung ⁶⁾	-	14-18	1-8	-	-	-
7.	Ciater Kab. Bandung, Andesitik lebih tua ⁶⁾	-	12-13	2-3	-	-	-
8.	Perkebunan Teh Sedep, Kab. Bandung ⁶⁾	1	3-11	11-30	-	-	-
9.	G. Salak, Bogor ⁷⁾	1	2-15	8-24	-	-	-
10.	G. Kimangbuleng, Kab Sikka, Flores ⁸⁾	-	5-17	13-23	3-16	-	-
11.	G. Egon Kab. Sikka, Flores ⁹⁾	-	4-11	10-19	8-17	-	-
12.	G. Mandasawu, Kab. Manggarai, Flores ⁹⁾	-	3-10	18-47	6-22	-	-
13.	G. Wawolika dan Kab Ngada, Flores ⁹⁾	-	5-10	19-27	1-4	-	-
14.	G. Kelimutu, Kab. Ende, Flores ¹⁰⁾	-	5-6	6-12	-	-	-
15.	G. Lokon, Sulut ¹¹⁾	1	3-4	2-3	-	-	-
16.	G. Lengkoan, Sulut ¹¹⁾	1-2	2-6	2-6	1-2	-	-
17.	G. Sopotan, Sulut ¹¹⁾	10-20	4-5	2-4	-	-	-
18.	Halmahera Barat, Maluku Utara ¹²⁾	-	3-7	2-13	-	-	-

Keterangan: Ol = Olivin, Au = Augit, Hi = Hiperstein, Ho = Horblende, Ms = Muskovit, bi = Biotit

Sumber : 1) Suparto *et al.* (1989), 2) Prasetyo *et al.* (2009) serta Yatno dan Suharta (2011), 3) Dai dan Hikmatullah (1993), 4) Subagjo and Buurman (1980), 5) Sudihardjo *et al.* (1997), 6) Arifin dan Hardjowigeno (1997), 7) Hardjoesastro *et al.* (1983), 8) Sukarman, *et al.* (1999), 9) Hikmatullah *et al.* (1999), 10) Hikmatullah *et al.* (2003), 11) Hikmatullah (2008), 12) Hikmatullah (2009)

Kelompok Mineral Opak dan Kuarsa

Mineral opak tergolong pada kelompok mineral resisten, sehingga sedikit dijumpai pada tanah-tanah muda yang berkembang dari abu vulkanik. Sama halnya dengan mineral opak, kuarsa merupakan jenis mineral primer yang paling sedikit pada bahan vulkanik segar. Mineral kuarsa banyak dijumpai di tanah berkembang karena mineral ini mempunyai stabilitas yang tinggi terhadap pelapukan. Sumber dari mineral kuarsa adalah batuan beku atau vulkanik yang bersifat masam, seperti granit, riolit, dasit, dan sebagainya.

Tabel 12 memperlihatkan bahwa kandungan mineral opak dan kuarsa pada tanah Andosol sangat bervariasi, tergantung dari jenis bahan induknya serta tingkat pelapukannya. Tanah Andosol yang berkembang dari tufa liparit masam seperti halnya tanah Andosol dari Aceh, Gedongsurian Lampung dan Ciater Kabupaten Bandung merupakan tanah Andosol yang mempunyai bahan induk bersifat masam, sehingga kandungan kuarsanya dalam tanah

lebih tinggi. Sedangkan pada tanah Andosol lainnya, kandungan mineral opak dan kuarsa ini kandungannya relatif rendah.

Mineral Sekunder

Mineral sekunder atau mineral liat adalah mineral berukuran halus ($< 2 \mu$), terbentuk pada waktu proses pembentukan tanah, merupakan hasil pelapukan kimiawi dari mineral primer ataupun hasil pembentukan baru dalam proses pembentukan tanah sehingga mempunyai susunan kimia dan struktur yang berbeda dengan mineral yang dilapuk. Jenis mineral liat yang terbentuk dalam proses pembentukan tanah umumnya tergantung pada jenis dan konsentrasi dari susunan kation, Si, pH, dan kecepatan pencucian basa-basa dari hasil pelapukan (Buol *et al.* 1980 dalam Prasetyo *et al.* 2004).

Dalam pembahasan mengenai mineral sekunder yang berkembang dari bahan piroklastik terdapat beberapa istilah yang perlu mendapat penjelasan terlebih dahulu yaitu: mineral amorf atau non kristalin dan mineral susunan rantai pendek (*short range order*). Mineral non kristalin atau amorf adalah mineral yang mempunyai bentuk yang tidak teratur dan tidak dibatasi oleh bidang-bidang datar. Dengan pemeriksaan sinar-x, tidak menghasilkan puncak difraksi sinar-X sehingga tidak memperlihatkan bentuk yang jelas. Mineral yang bersifat amorf seperti halnya gelas vulkanik, ikatan kimia dan komponen-komponen atom seringkali hanya pengulangan unit-unitnya. Dari sisi ukuran, bahan amorf tidak terbatas dijumpai hanya berupa partikel berukuran liat, tetapi bisa juga dapat dijumpai pada ukuran pasir dan debu.

Dalam difraksi sinar-X dan difraksi elektron dari alofan, terdapat pengulangan unit struktural di salah satu dari tiga dimensi mineralnya. Oleh karena kondisi tersebut, maka untuk menggambarkan alofan lebih tepat jika disebut sebagai bentuk non kristalin daripada disebut sebagai *short-range-order* (Dahlgren *et al.* 1993). Namun, beberapa definisi sebelumnya alofan digambarkan sebagai sebagai *short range order*. Karena istilah susunan rantai pendek telah digunakan untuk menggambarkan bahan dengan berbagai kristalinitas, maka istilah non kristalin digunakan untuk menggambarkan bahan-bahan seperti alofan dan ferihidrit yang menunjukkan ada pengulangan unit struktural. Untuk selanjutnya, dalam pembahasan materi fraksi koloid tanah abu vulkanik hanya akan menggunakan dua istilah, kristalin dan non kristalin.

Dalam proses pembentukan tanah Andosol, gelas vulkanik yang berasal dari bahan piroklastik umumnya akan membentuk mineral non kristalin. Dahlgren *et al.* (1993) telah membahas pembagian jenis mineral sekunder yang berasal dari abu vulkanik. Mineral sekunder yang terbentuk adalah: alofan, imogolit, opaline silika, haloisit, oksida besi non kristalin, lapisan 2:1 dan 2:1:1 mineral silikat, kompleks aluminium humus, dan kaolinit. Sementara tanah Andosol di Indonesia yang berkembang dari bahan piroklastik mengandung mineral sekunder berupa: alofan, imogolit, haloisit, haloisit disorder, kaolinit disorder, gibsit dan ferihidrit. Alofan, imogolit dan haloisit lebih banyak dijumpai pada tanah Andosol di Indonesia (Tabel 11). Mineral liat lainnya adalah kaolinit disorder terdapat pada tanah Andosol yang berasal dari daerah beriklim kering di Pulau Flores Nusa Tenggara Timur dan

haloisit disorder sementara ini hanya dijumpai dari tanah Andosol di Sulawesi Utara. Kaolinit disorder adalah kaolinit yang mempunyai kristal tidak sempurna (Sukarman *et al.* 1999).

Fiantis *et al.* (1998) telah meneliti karakteristik mineral fraksi debu dan liat dari empat profil tanah abu vulkan menurut toposekuen di Gunung Marapi dan Talamau di Sumatera Barat. Secara umum dari empat tanah tersebut, untuk fraksi debu umumnya terdiri atas gibsit, kristobalit dan feldspar. Dari fraksi liat umumnya terdiri atas kristobalit, feldspar dan halloisit. Gibsit juga dijumpai pada fraksi liat dari Gunung Talamau, sedangkan Opal-A dijumpai dari fraksi liat Gunung Marapi.

Alofan

Alofan adalah nama kelompok mineral liat non kristalin alumino hidrous silikat dengan komposisi kimia yang sangat beragam. Alofan terdiri atas bidang berongga, partikel tidak teratur bulat dengan diameter luar berkisar dari 35 sampai 50 Å dan ketebalan dinding 0,7 sampai 10 Å (Dahlgren *et al.* 1993).

Berdasarkan hasil penelitian luas permukaan spesifik alofan dengan perlakuan nitrogen pada 77 K adalah $581 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Hall *et al.* 1985; Vandickelen *et al.* 1980 dalam Dahlgren *et al.* 1993) dan antara $700\text{-}1.100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ dengan metode adsorpsi *etilena glicol eter monoethyl* (Egashira dan Aomine 1974 dalam Dahlgren *et al.* 1993). Alofan tidak memiliki komposisi kimia tertentu dan menampilkan berbagai konsentrasi Al dan Si yaitu perbandingan atom Al:Si = 1:1 sampai 2:1. Alofan dengan perbandingan atom Al:Si kurang dari 1:1 dan lebih besar dari 2:1 mungkin saja ada di alam, tetapi belum diisolasi dan dikarakterisasi. Alofan dengan perbandingan Al:Si = 2:1 biasanya dikenal dengan nama alofan kaya Al, sedangkan alofan dengan perbandingan Al:Si = 1:1 dikenal dengan nama alofan kaya Si.

Alofan kaya Al (Al:Si = 2:1) adalah jenis alofan yang paling banyak dijumpai di dalam tanah (Parfitt dan Kimble, 1989). Alofan kaya Si (Al:Si = 1:1) tidak umum ditemukan pada tanah Andosol terutama yang berada pada rejim kelembaban udik. Karena alofan kaya Si jumlahnya sedikit, sehingga jenis alofan ini kurang dipahami dan kurang mendapat perhatian. Mineral alofan dalam tanah Andosol dihasilkan dari dari pelapukan abu vulkanik, terutama gelas vulkanik pada kondisi yang lembab. Drainase yang baik dalam tanah Andosol dapat mengakibatkan terjadinya proses pencucian silika (*desilification*) pada alofan sehingga membentuk imogolit. Bila proses proses pencucian tersebut terus berlanjut maka akan terbentuk mineral-mineral haloisit, kaolinit, dan gibsit (Prasetyo 2005).

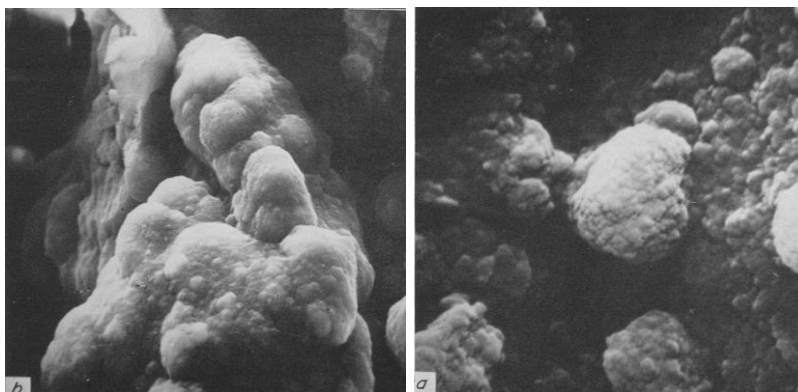
Untuk menduga dan mendeteksi kandungan mineral alofan dalam tanah Andosol dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain:

1. Menggunakan rumus: % alofan = % Si_o x 7,1 (Parfitt and Henmi 1982); Si_o adalah kandungan Si yang diekstrak dengan amonium oksalat.
2. Dengan alat SEM (*scanning electron microscope*).
3. Dengan alat DTA (*differential thermal analysis*).
4. Dengan alat XRD (*X-ray diffractometer*).

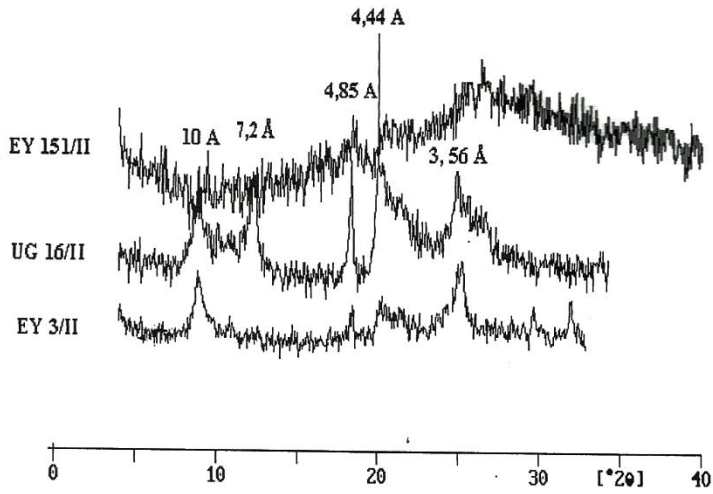
Berdasarkan *database* BBSDLP, dapat dikemukakan bahwa rata-rata kandungan alofan (dihitung berdasarkan % $Si_0 \times 7,1$) dari tanah Andosol di Indonesia sampai akhir tahun 2013 berkisar dari 1-34%, dengan rata-rata 11%. Kandungan alofan untuk tanah Andosol di Indonesia ternyata lebih rendah dibandingkan dengan rata kandungan alofan untuk tanah yang berasal dari abu vulkanik di seluruh dunia. Menurut Parfitt dan Kimble (1989) umumnya kandungan alofan dalam tanah dari bahan abu vulkanik sekitar 15%. Hal ini dapat dimengerti karena dengan curah hujan dan temperatur yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya pencucian silika dari alofan sehingga membentuk imogolit.

Gambar 28 memperlihatkan morfologi alofan yang difoto menggunakan alat *scanning electron microscope* (SEM) pada berbagai perbesaran. Bentuk khas alofan ditunjukkan pada gambar 28a, 28b, alofan berbentuk agregat halus dengan diameter yang bervariasi, dan menunjukkan pola tidak teratur. Di bawah perbesaran rendah (sekitar 1.000 x), permukaan agregat halus terlihat berbentuk gel. Di bawah mikroskop cermin (pembesaran 40 x), matriks material tanah berwarna kecoklatan. Pada perbesaran sekitar 10.000 x ketidakteraturan permukaan dapat diamati. Di bawah perbesaran yang lebih tinggi (50.000 x), masing-masing agregat yang lebih besar terdiri atas bulatan agregat yang lebih kecil. Beberapa sampel menunjukkan bahwa gelas vulkanik yang ada relatif mudah untuk diamati di bawah mikroskop dengan struktur tajam, dan morfologinya menyerupai kristal feldspar (Eswaran 1971).

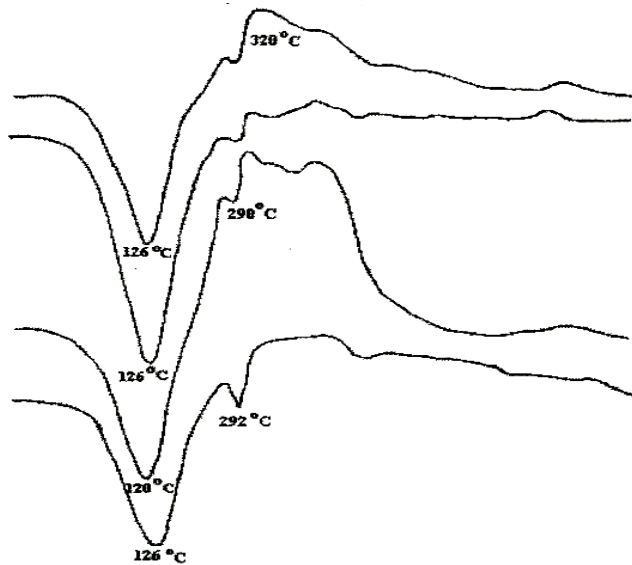
Identifikasi alofan dengan alat *X-ray diffractometer* (XRD) dapat diketahui dengan adanya bentuk difraktogram yang cembung dan melebar (Gambar 29), sedangkan dengan alat *differential thermal analysis* (DTA), mineral alofan dicirikan oleh puncak endodermik tajam sekitar suhu 126°C (Gambar 30).



Gambar 28. (a) Foto alofan dengan alat SEM (contoh dari *Ue-mura*) 10.000 x, (b) Foto alofan dengan alat SEM (contoh dari *Choyo*) 10,050 x (sumber: Eswaran 1971)



Gambar 29. Difraktogram yang menunjukkan adanya mineral amorf, contoh tanah dari dataran tinggi Toba (sumber: Prasetyo et al. 2009)

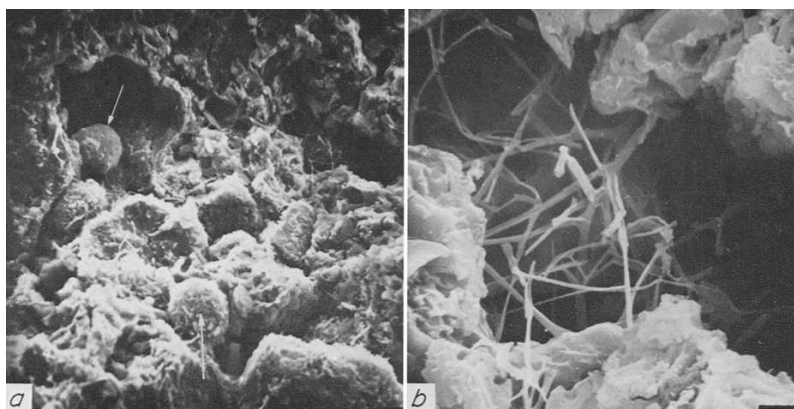


Gambar 30. Termogram DTA yang menunjukkan adanya mineral amorf, contoh tanah Andosol dari Jawa Barat (sumber: Arifin dan Hardjowigeno 1997)

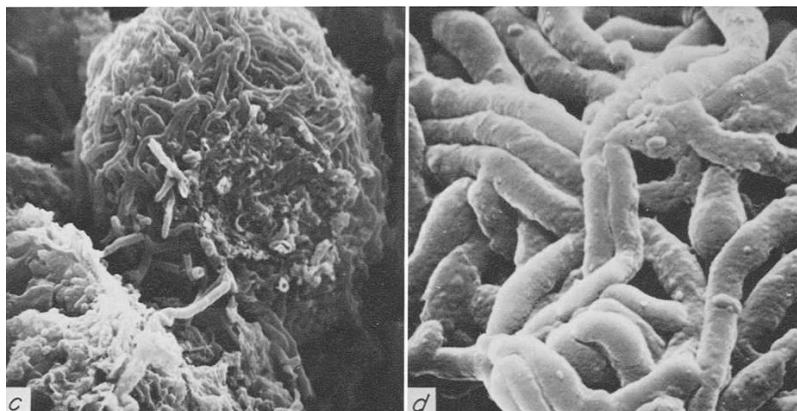
Imogolit

Imogolit adalah mineral amorf yang menunjukkan sifat serupa dengan alofan, tetapi bersifat parakristalin, karena berbentuk silinder halus berdiameter 18,3 sampai 20,2 Å. Imogolit pertama kali dikemukakan oleh Yoshinaga dan Aomine (1962) pada tanah dari abu vulkanik, yang dikenal sebagai "*imogo*". Imogolit memiliki struktur seperti silikat, serta mempunyai reaktivitas terhadap fosfat yang lebih rendah dibandingkan dengan alofan (Tan, 1998). Hubungan antara alofan dan imogolit serta mineral-mineral liat lainnya dapat diilustrasikan dengan deretan hancuran iklim sebagai berikut: Gelas vulkanik → Hidrat Al dan Si amorf → Alofan → Imogolit → Halosit → Kaolinit → Gibbsit (Tan 1998). Foto 31 dan 32 memperlihatkan imogolit yang diambil gambarnya menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) pada berbagai perbesaran hasil penelitian Eswaran (1971).

Menurut Yoshinaga (1970 dalam Dahlgren *et al.* 1993), rumus empiris terbaik untuk alami imogolit adalah $1.1 \text{ SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.3\text{-}2.8 \text{ H}_2\text{O}(+)$, sedangkan struktur yang diusulkan dalam bentuk formula $(\text{OH})_3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiOH} [\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(+)]$. Komposisi kimia dari struktur formula yang diusulkan sangat erat hubungannya dengan rumus yang diperoleh dengan analisis kimia berdasarkan sampel alami. Hasil pengukuran luas permukaan mineral imogolit cukup bervariasi tergantung dari metode dan perlakuan yang digunakan. Hasil penelitian Wada dan Henmi (1972 dalam Dahlgren *et al.* 1993) mendapatkan luas permukaan imogolit dengan perlakuan adsorpsi uap air adalah sekitar $700 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Sementara Egashira dan Aomine (1974 dalam Dahlgren *et al.* 1993) dengan perlakuan eter etilena glicol monoethyl (EGME) mendapatkan nilai antara 900 sampai $1.100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.



Gambar 31. Foto imogolit dengan SEM (sampel dari Kodonbaru): (a) 187,5 x; (b) 862,5 x (sumber: Eswaran 1971)



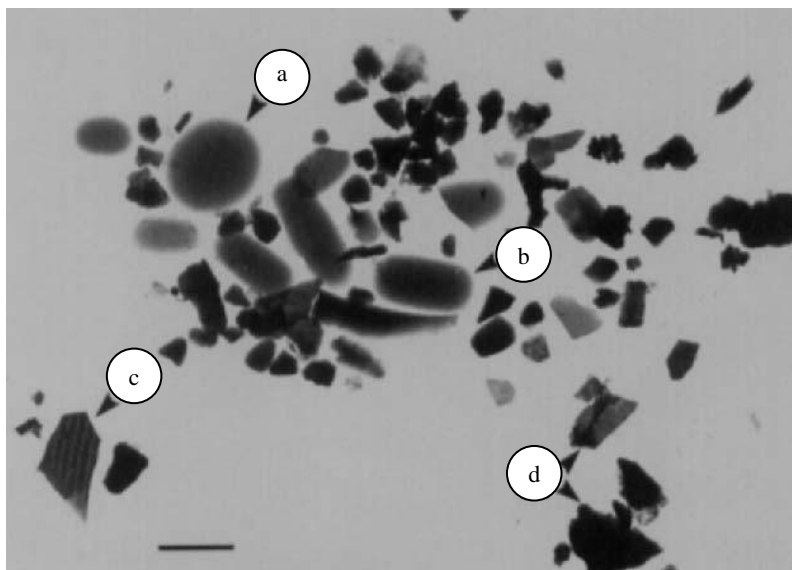
Gambar 32. Foto imogolit dengan SEM (sampel dari Kodonbaru): (c) 862,5 x, (d) 1.875 x (sumber: Eswaran 1971)

Dari hasil penelitian tentang mineral sekunder tanah Andosol di Indonesia mendapatkan bahwa mineral sekunder imogolit termasuk yang lebih sedikit dijumpai dibandingkan dengan alofan maupun haloisit. Dari 16 tempat yang diteliti pada tanah Andosol diketahui bahwa hanya dari dua tempat (12,5%) yaitu dari Gunung Kidul dan Gunung Salak yang mengandung mineral liat imogolit (Prasetyo *et al.* 2005).

Silika Opaline

Dua jenis silika opaline yang umum di tanah muda abu vulkanik adalah silika opaline pedogenik (biasa disebut Silika opalin laminar) dan Silika opaline biogenik. Jenis silika opaline dapat dengan mudah dibedakan sesuai dengan sifat morfologinya. Silika opaline laminar berukuran liat muncul sebagai bagian dari horison permukaan tanah abu vulkanik muda (Shoji and Masui 1969, 1971). Silika opaline hanya terjadi dalam fraksi ukuran 0,2-5 mikron dan yang paling banyak di kisaran 0,4 sampai 2 mikron. Secara morfologis, silika ini berbentuk partikel sangat tipis membulat, berbentuk elips, persegi panjang, belah ketupat (Gambar 33). Dari empat bentuk, jenis lingkaran dan elips adalah bentuk yang paling dominan. Tipe elips adalah bentuk yang paling umum dalam fraksi halus sedangkan tipe melingkar adalah bentuk yang paling dominan dalam fraksi kasar. Setiap partikel berukuran halus, memperlihatkan permukaan yang tidak rata dan tampaknya sangat berpori. Hal tersebut menunjukkan bahwa partikel tersebut sebenarnya terdiri atas bola silika yang sangat halus.

Silika opaline ditemukan lebih banyak pada tanah yang lebih muda (< 4.000 tahun) dibandingkan dengan tanah yang lebih tua. Atau lebih banyak pada horison A yang kaya humus daripada horison B dan C. Oleh karena itu, silika opaline adalah produk dari tahap awal pelapukan abu vulkanik, dan pembentukannya dimulai dari horison permukaan dimana aktivitas Al ditekan oleh pembentukan kompleks Al-humus.



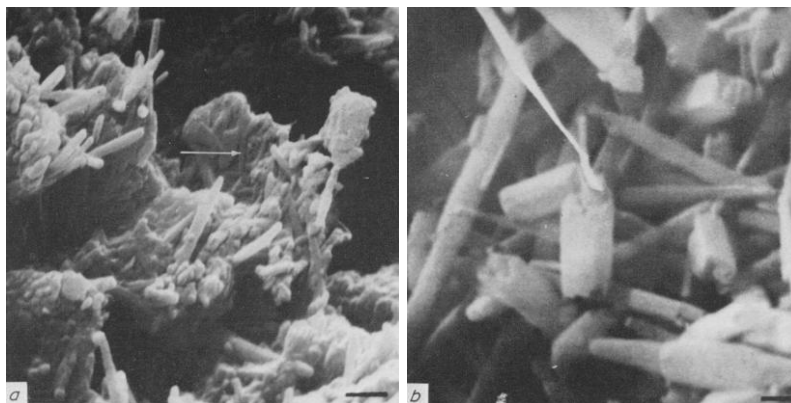
Gambar 33. Gambar mikroskop elektron dari Silika opaline laminar. Acuan garis adalah 2,0 mikron. a = membulat, b = ellips, c = belah ketupat, dan d = gelas vulkanik (sumber: Dahlgren et al. 1993)

Haloisit

Mineral haloisit mempunyai komposisi umum $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Molekul-molekul air terikat bersama-sama menurut pola heksagonal, molekul air ini selanjutnya terikat dengan lapisan-lapisan kristal melalui ikatan H. Oleh karena terdapatnya air di antara lapisan maka haloisit memiliki jarak antara lapisan (nilai d) = 10,1 Å. Jika haloisit dipanaskan, maka nilai d turun menjadi 7,2 Å. Mineral haloisit yang airnya telah keluar disebut metahaloisit. Haloisit dilaporkan cepat berubah menjadi metahaloisit jika suhu menjadi 50°C. Haloisit umumnya berbentuk pipa (tubular) jika dilihat melalui mikroskop elektron. Proses pembentukan dan kemantapan haloisit di dalam tanah dipengaruhi oleh kelembaban tanah. Kondisi tanah lembab diperlukan untuk perkembangan mineral itu.

Haloisit adalah konstituen umum tanah di lingkungan vulkanik yang berbentuk mineral liat kaya Si (Parfitt and Wilson 1985). Haloisit adalah mineral alumino silikat tipe 1:1, yang ditandai dengan keragaman morfologi. Haloisit pada tanah Andosol umumnya mempunyai morfologi tubular dan bulat. Haloisit kebanyakan terhidrasi oleh dua molekul air pada interlayer dalam kisi mineral, namun demikian rentan terhadap dehidrasi bila kondisi iklim menunjukkan adanya defisit kelembaban pada setiap musim (Takahashi *et al.* 1993). Haloisit mempunyai susunan struktur lapisan mineral yang tidak sempurna, sehingga sering mengalami berbagai gangguan yang menyebabkan rusaknya struktur mineral tersebut. Wada dan Kakuto (1985) menggambarkan bentuk ketidaksempurnaan kristal dari haloisit disebut sebagai embrio haloisit.

Hasil penelitian mineral sekunder pada tanah Andosol di Indonesia mempergunakan metode XRD menunjukkan bahwa dari 16 tempat yang diteliti mineral sekundernya, ternyata 12 tempat diantaranya (75%) mengandung mineral sekunder haloisit, disamping mineral sekunder lainnya seperti alofan, imogolit, kaolinit, dan gipsit.



Gambar 34. (a) Perubahan feldspars menjadi haloisit, contoh dari Perancis, 10.000 x, (b) Morfologi ofendellite dari Utah, 38.000 x (sumber: Eswaran 1971)

Besi Oksida Non Kristalin

Besi di dalam tanah yang berasal dari bahan-bahan vulkanik sebagian besar dalam bentuk oksihidroksida non kristalin dan sebagian sebagai kompleks Fe-humus. Bentuk oksihidroksida non kristalin yang dominan dalam tanah adalah ferihidrit. Mineral ini mempunyai rumus kimia $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Ferihidrit adalah hidroksida besi yang sedang atau telah melapuk dari kumpulan gelas vulkanik. Ferihidrit memiliki permukaan kimia yang hampir sama dengan alofan. Konsentrasi ferihidrit dapat diduga dari konsentrasi Fe yang diekstrak dengan amonium oksalat (Fe_o), dikalikan 1,7 (Shoji *et al.* 1993).

Pada tingkat awal abu vulkanik akan melapuk dan mengalami penghancuran iklim membentuk mineral silika opalin. Pembentukan silika opalin diduga melalui konsentrasi dan presipitasi silika yang tersedia dari gelas vulkanik. Silika opalin ditemukan pada tanah-tanah muda daripada di tanah yang telah lanjut, serta pada horizon A yang kaya humus dari pada horizon B dan C.

Ferihidrit merupakan bahan yang sangat reaktif karena adanya permukaan gugus fungsi OH dan tingginya luas permukaan spesifik (berkisar 220 sampai $560 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$). Ferihidrit adalah bahan yang secara termodinamika termasuk metastabil. Dengan perkembangan waktu ferihidrit dapat melapuk menjadi Fe-oksida stabil, seperti goetit dan hematit. Dalam keadaan iklim tropis yang lembab ferihidrit dapat berubah menjadi mineral goetit, sedangkan di bawah iklim kering dan panas akan berubah menjadi hematit. Struktur mineral ferihidrit menyerupai struktur hematit, kecuali pada beberapa posisi yang kosong Fe dan beberapa kelompok O dan

OH digantikan oleh molekul air. Ferihidrit muncul sebagai partikel berbentuk bola individu berukuran antara 20 sampai 50 Å. Partikel-partikel ini jika terkumpul akan menjadi agregat berdiameter dengan ukuran 1.000 sampai 3.000 Å.

Kompleks Aluminium-Humus

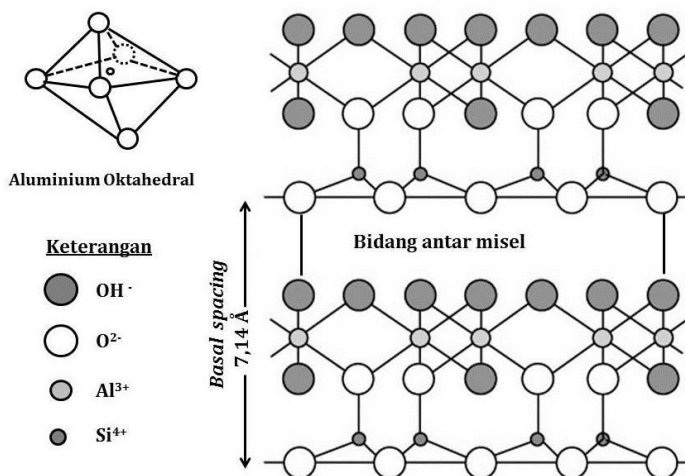
Kompleks aluminium-humus adalah bentuk dominan dari Al aktif dalam horison humus dari tanah Andosol. Pembentukan kompleks Al-humus membuat humus sangat tahan terhadap serangan mikroba dan dekomposisi. Akibatnya, waktu tinggal rata-rata karbon organik di tanah Andosol jauh lebih lama dibandingkan dengan waktu tinggal pada tanah Mollisols dan horison Bh Spodosols (Inoue and Higashi 1988). Proses stabilisasi bahan organik memainkan peran utama dalam pembentukan epipedon fulvik dan melanik di tanah Andosol. Humus terus terakumulasi sebagai hasil pelapukan yang terikat dengan Al untuk membentuk kompleks Al-humus yang tahan terhadap dekomposisi.

Interaksi antara asam humat dan Al digambarkan sebagai pertukaran ion pada permukaan adsorpsi, khelatisasi, peptisasi dan reaksi koagulasi. Kompleks logam-humus diyakini dapat membentuk interaksi antara logam dengan kelompok fungsional karboksilat. Asam humat dan asam fulvat dari tanah memiliki kandungan rata-rata karboksilat masing-masing 3,6 dan 8,2 mol kg⁻¹. Kemampuan kompleks asam humat biasanya dievaluasi dengan mengukur rasio: (Al_p + Fe_p)/C, biasanya rasio berkisar antara 0,1 sampai 0,2 untuk sebagian tanah Andosol (Inoue dan Higashi, 1988). Perhitungan teoritis berdasarkan analisis gugus fungsional asam humat menunjukkan bahwa rasio maksimum 0,12 diperkirakan berdasarkan kompleksasi dari monomer hidroksi-Al dengan humus. Rasio lebih besar dari 0,12 menunjukkan adanya polimer Al terkait dengan humus atau non spesifik dari pirofosfat untuk mengekstraksi Al-humus kompleks.

Kaolinit

Mineral kaolinit adalah termasuk mineral liat filosilikat dengan tipe 1:1. Kristalnya terdiri atas lapisan aluminium oktahedral tersusun di atas lembar silika tetraeder seperti yang terlihat dalam Gambar 35. Mineral kaolinit mempunyai komposisi kimia umum Al₂O₃:SiO₂:H₂O = 1:1:2 atau 2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O per satuan sel. *Basal spacing* (jarak lapisan) dari mineral kaolinit adalah 7,14 Å (Gambar 35).

Lain halnya dengan mineral alofan atau imogolit, kaolinit mempunyai permukaan aktif yang terbatas. Hal inilah yang menyebabkan daya adsorpsinya rendah. Luas permukaan spesifik kaolinit kira-kira 7 sampai 30 m²g⁻¹. Ada tidaknya kaolinit dalam suatu tanah dapat diidentifikasi dengan difraksi sinar-x dengan menetapkan nilai d (jarak antara bidang atom di dalam kristal). Nilai d untuk kaolinit (d001) adalah 7,14 Å. Mineral ini tidak dapat mengembang pada saat basah atau mengkerut pada saat kering.



Gambar 35. Struktur kaolinit terdiri atas lembar-lembar silika tetrahedral dan aluminium oktahedral (Tan 1982)

Kaolinit merupakan konstituen penting dari tanah vulkanik dan berhubungan dengan tanah asam dan berlapukan lanjut. Beberapa bukti menunjukkan bahwa telah terjadi transformasi dari haloisit menjadi kaolinit pada horison permukaan tanah. Gibsit juga sering dilaporkan dalam tanah yang berasal dari bahan piroklastik gunung berapi (Yoshinaga 1986). Gibsit diduga terbentuk oleh desilikasi bahan amorf dan oleh karenanya sering dikaitkan dengan tanah pada tahap lanjut dari proses pelapukan (Wada 1989).

Mineral kaolinit yang dijumpai pada tanah Andosol sebagai mineral sekunder utama tidaklah terlalu banyak. Dari 16 lokasi tanah Andosol yang diteliti ternyata hanya enam lokasi (37,5%) yang tanahnya mempunyai kandungan mineral sekunder kaolinit. Namun demikian kaolinit yang dijumpai mempunyai kristal yang tidak sempurna atau disebut kaolinit disorder. Menurut Prasetyo (2005) adanya kaolinit disorder di Indonesia baru dijumpai pada tanah tanah Andosol dari Pulau Flores Nusa Tenggara Timur. Selanjutnya dikatakan bahwa penyebab terbentuknya kaolinit disorder adalah karena di daerah tersebut mempunyai iklim yang relatif kering (ustik) dengan suhu yang relatif tinggi dibandingkan dengan tempat lain di Indonesia.

Mineral sekunder gibsit sering dijumpai pada beberapa tanah Andosol di Indonesia antara lain tanah Andosol dari dataran tinggi Toba Sumatera Utara, Gunung Lawu Jawa Timur, Ciater Bandung, Gunung Salak Bogor. Mineral gibsit biasanya dijumpai pada tanah Andosol yang sudah lebih berkembang. Alofan yang dijumpainya juga relatif lebih sedikit. Rendahnya alofan ini disebabkan karena tanah Andosol sudah mulai berkembang melalui proses desilikasi sehingga kandungan alofan mulai berkurang karena sudah membentuk mineral kristalin haloisit hidrat.

4.3 Karakteristik Kimia Tanah Andosol

Tanah Andosol menampilkan berbagai karakteristik kimia yang mencerminkan pengaruh dari bahan induk dan tingkat pelapukannya. Dari sifat kimia, bahan organik tanah, aluminium, besi dan silika aktif adalah unsur-unsur yang paling menonjol mengatur reaksi kimia pada tanah Andosol. Bentuk-bentuk utama Al dan Fe aktif adalah alofan, imogolit, kompleks Al-humus, dan ferihidrit. Alofan adalah mineral liat yang paling reaktif karena mempunyai area permukaan spesifik yang sangat luas dan banyak terdapat gugus fungsional yang aktif. Karena bentuk dan ukurannya alofan mempunyai porositas yang sangat tinggi. Alofan mempunyai muatan variabel yang tinggi, bersifat amfoter dan dapat memfiksasi fosfat dalam jumlah yang tinggi, kapasitas tukar kation sebesar 20 sampai 50 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dan kapasitas tukar anion sebesar 5-30 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ sehingga dapat memfiksasi fosfat dalam jumlah banyak (Tan 1998).

Imogolit dianggap penting dalam Andisol karena menunjukkan sifat serupa dengan alofan, tetapi bersifat parakristalin, karena berbentuk silinder halus berdiameter 18,3 sampai 20,2 Å. Imogolit memiliki struktur seperti silikat, serta mempunyai reaktivitas terhadap fosfat yang lebih rendah dibandingkan dengan alofan (Tan 1998). Mineral non kristalin yang menjadi ciri khas tanah Andosol adalah ferihidrit. Ferihidrit adalah hidroksida besi yang sedang atau telah melapuk dari kumpulan gelas vulkanik dalam bahan induk vulkanik. Ferihidrit memiliki permukaan kimia yang hampir sama dengan alofan. Dengan demikian imogolit dan ferihidrit merupakan mineral yang cukup berperan dalam menentukan sifat kimia tanah Andosol.

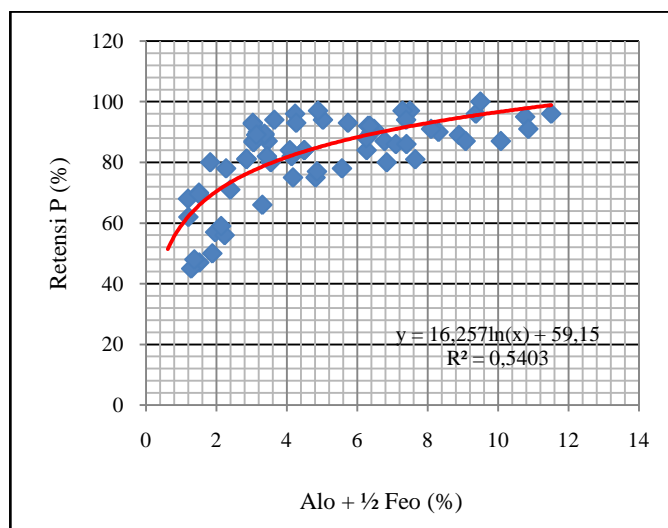
Kandungan aluminium, besi dan silika aktif pada bahan alofan, imogolit dan Al-humus dapat diketahui dengan ekstraksi amonium oksalat. Hasil ekstraksi untuk aluminium, besi dan silikat disimbolkan sebagai Al_o , Fe_o , dan Si_o . Sedangkan kandungan aluminium, besi dan silika aktif pada Al-humus dapat diketahui dengan ekstraksi amonium pirofosfat yang disimbolkan sebagai Al_p , Fe_p , dan Si_p . Dengan demikian ($\text{Al}_o\text{-Al}_p$) mencerminkan Al dalam alofan dan imogolit.

Tanah Andosol di Indonesia mempunyai kandungan Al_o paling tinggi dibandingkan dengan kandungan Fe_o dan Si_o . Dilihat dari sifat bahan induknya, tanah Andosol yang berkembang dari bahan induk masam (liparit) mempunyai kandungan Al_o paling tinggi, sedangkan tanah yang berkembang dari bahan induk basa (basalt) mempunyai nilai Al_o paling rendah (Tabel 15). Hal tersebut menyebabkan mengapa tanah Andosol mempunyai retensi yang tinggi terhadap fosfat dan tanah Andosol yang berasal dari bahan induk liparit mempunyai retensi P yang paling tinggi.

Secara umum, jumlah serapan fosfat oleh tanah Andosol ditentukan oleh kandungan dan bentuk Al dan Fe aktif. Hubungan tersebut sering dinyatakan dalam bentuk regresi antara retensi fosfat dengan kandungan Al_o ditambah $\frac{1}{2} \text{Fe}_o$ seperti yang disajikan dalam Gambar 36. Dari gambar tersebut dapat diinterpretasikan bahwa semakin tinggi kandungan Al dan Fe aktif dalam tanah, maka fosfat yang terjerap juga semakin tinggi. Al dan Fe aktif yang terdiri atas mineral liat non kristalin seperti alofan dan ferihidrit serta mineral liat imogolit P terjerap kuat pada struktur mineral ini dan terikat pada gugus fungsional OH atau H yang bermuatan positif (Shoji *et al.* 1993).

Tabel 15. Kisaran kandungan aluminium, besi, dan silika yang diekstrak dengan amonium oksalat

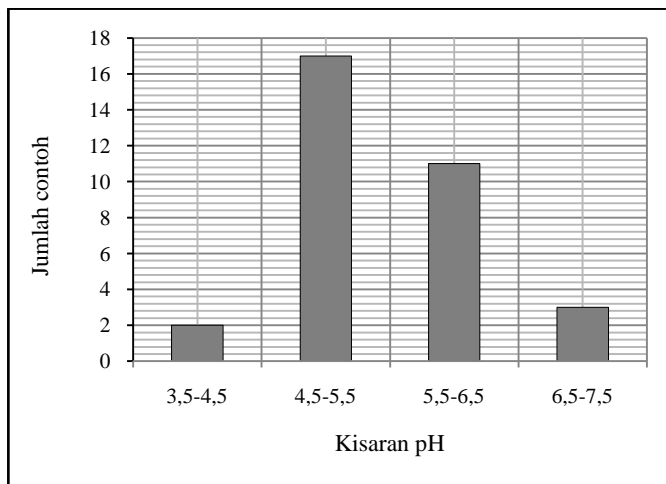
Al _o	Fe _o	Si _o	% Al _o + 0,5% Fe _o	Sifat bahan induk	Sumber
..... %					
3,73	0,78	-	4,26	Andesitik	Sudihardjo <i>et al.</i> (1997)
4,32	1,20	2,81	5,27	Andesitik	Hikmatullah <i>et al.</i> (1994)
2,00	0,65	17,46	29,50	Andesitik	Hikmatullah <i>et al.</i> (1999)
2,06	1,34		3,12	Andesitik	Sukarman dan Subardja (1997)
4,15	1,34	2,38	4,83	Andesitik	Fiantis dan van Ranst(1997)
2,04	1,68	1,12	2,88	Andesitik basaltik	Fiantis <i>et al.</i> (2000)
2,27	2,23	1,72	2,97	Andesitik-basaltik	Yatno dan Zaayah (2003)
1,97	1,09	0,96	2,45	Basaltik	Hikmatullah <i>et al.</i> (2008)
4,58	3,40	0,47	6,42	Liparitik	Prasetyo <i>et al.</i> (2009)
6,46	3,00	1,89	7,41	Liparitik	Yatno dan Suharta (2011)
2,23	1,07	2,64	2,77	Andesitik basaltik	Ridwandi <i>et al.</i> (2003)



Gambar 36. Hubungan antara retensi fosfat dan Al_o + 1/2 Fe_o dari tanah Andosol di Indonesia

Tanah Andosol di Indonesia memiliki kisaran pH yang cukup lebar yaitu antara 3,4 sampai 6,7 dengan rata-rata 5,4. Namun kisaran pH antara 4,5 sampai 5,5 merupakan kisaran pH yang paling banyak sedangkan yang kedua terbanyak adalah pada kisaran pH antara 5,5 sampai 6,5 (Gambar 37). Banyaknya contoh pada kisaran pH 4,5 sampai 5,5 dan 5,5 sampai 6,5 menunjukkan bahwa tanah Andosol di Indonesia didominasi oleh mineral-mineral liat amorf. Tanah Andosol ini berasal dari daerah yang mempunyai curah hujan tinggi dengan bahan induk yang bersifat andesitik, atau andesitik- basaltik. Sedangkan tanah yang sangat masam (pH < 4,5) menandakan bahwa terdapat tanah Andosol di Indonesia yang didominasi

oleh kompleks logam-humus dengan kejenuhan basa rendah dan kandungan aluminium yang tinggi. Tanah Andosol yang bersifat masam berasal dari daerah bercurah hujan tinggi dan mempunyai bahan induk bersifat liparitik, yaitu dari dataran tinggi Toba di Sumatera Utara. Tanah Andosol yang mempunyai pH lebih dari 6,5 berasal dari daerah beriklim kering yaitu dari Nusa Tenggara Timur dan dari daerah yang mempunyai bahan induk basaltik.



Gambar 37. Frekuensi jumlah pengamatan pada setiap kisaran pH lapisan atas beberapa tanah Andosol di Indonesia

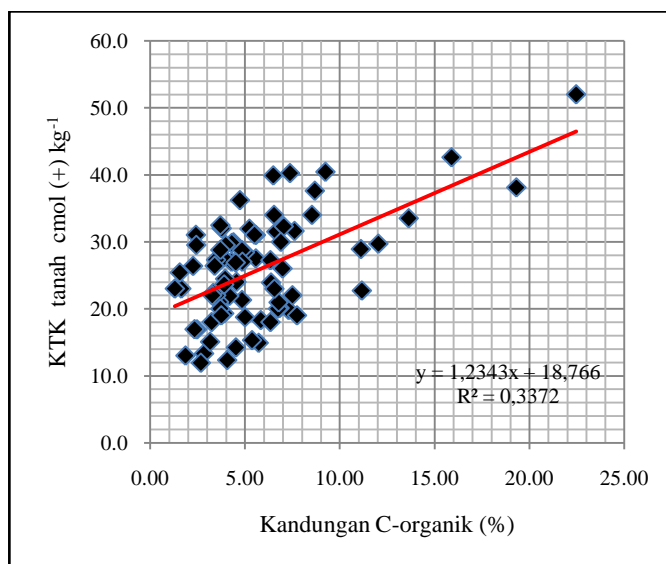
Selisih antara pH KCl dan pH H₂O atau disebut juga Δ pH. Nilai Δ pH merupakan gambaran suatu tanah bermuatan variabel. Suatu tanah bermuatan variabel jika memiliki nilai Δ pH antara -0,5 s/d 0,0. Prasetyo *et al.* (2009) mendapatkan bahwa sebagian besar tanah tanah Andosol yang berada di sekitar dataran tinggi Toba Sumatera Utara umumnya mempunyai Δ pH negatif, walaupun pada beberapa horison tanah nilainya nol atau mendekati nol. Kemasaman tanah dengan nilai Δ pH yang mendekati nol diharapkan memiliki aluminium yang dapat dipertukarkan dalam jumlah yang sedikit.

Tanah Andosol memiliki muatan yang tergantung pH, tanah akan bermuatan positif jika kondisi pH asam dan akan bermuatan negatif jika pH yang lebih tinggi. Kondisi ini disebut dengan kondisi tanah yang bermuatan variabel. Kondisi pH yang demikian merupakan kondisi titik antara muatan positif dan negatif permukaan koloid bernilai nol yang sering disebut sebagai titik muatan pada kondisi nol atau *zero point of charge* (ZPC). Dikatakan bermuatan negatif jika pH tanah > ZPC dan bermuatan positif jika pH < ZPC. Tanah Andosol diharapkan bermuatan positif atau nol. Namun, muatan positif berpengaruh terhadap sifat kimia tanah. Pada saat pH rendah, tanah memiliki kapasitas yang rendah untuk mengikat kation dan tanah yang demikian dianggap tidak subur.

Gugus OH pada tanah Andosol sangat mempengaruhi muatan variabel. Gugus OH berasal dari aluminol, ferol dan silanol dari liat amorf. Kecuali Silanol, fraksi liat tanah

Andosol bersifat amfoter. Pada keadaan pH tanah tinggi, Al-OH melepaskan H^+ dan permukaan aluminol bermuatan negatif, pada keadaan sebaliknya yaitu pada pH tanah rendah aluminol akan menerima tambahan H^+ hingga muatan positif, begitu juga dengan ferrol. Untuk silanol akan melepaskan H^+ saja, tetapi tidak akan menerima tambahan proton di atas pH 2, dengan demikian silanol tidak bersifat amfotermik pada pH 3-10 (Tan 1998). Nilai ZPC dipengaruhi oleh kandungan bahan organik. Pada umumnya nilai ZPC tanah Andosol menurun sejalan dengan meningkatnya C-organik tanah.

Kapasitas tukar kation (KTK) dari tanah Andosol di Indonesia bervariasi dari 6,5-52,0 $cmol(+) kg^{-1}$ atau bervariasi dari sangat rendah sampai sangat tinggi dengan nilai rata-rata 23,8 $cmol(+) kg^{-1}$. Kapasitas tukar kation tanah Andosol di Indonesia berkorelasi positif dengan kandungan C-organik tanah. Gambar 38 menggambarkan hubungan antara kandungan C-organik dengan KTK tanah horison A dan B tanah Andosol dari seluruh Indonesia. Hubungan tersebut menggambarkan semakin tinggi kandungan C-organik akan diikuti dengan tingginya KTK tanah.



Gambar 38. Hubungan antara kandungan C-organik dengan KTK tanah pada horison A dan B tanah Andosol di Indonesia

4.4 Karakteristik Fisika Tanah Andosol

Tanah Andosol memiliki sifat-sifat fisika yang khas dan berkaitan erat dengan tingginya kandungan alofan. Alofan merupakan salah satu bahan bentuk non kristalin terpenting yang berkontribusi pada berat isi (*bulk density*) yang rendah dari tanah Andosol

kandungan bahan organik (Gambar 39). Tan (1984) mengemukakan bahwa sifat fisika penting lainnya dari Andisol adalah struktur tanahnya. Struktur tanahnya terdiri atas makrostruktur dan mikrostruktur. Makrostruktur dijumpai pada horizon A yang dicirikan oleh struktur granular yang khas, yang terbentuk oleh proses yang disebut *mountain granulation*. Struktur ini berlainan dengan struktur granular tanah-tanah lainnya karena satuan-satuan strukturnya sangat resisten terhadap daya rusak air hujan. Kerena ketahanannya ini dan terasa seperti pasir pada musim kering, maka unit-unit struktur tersebut disebut *pseudo-sand* (pasir semu).

4.5 Karakteristik Biologi Tanah Andosol

Di dalam tanah hidup berbagai jenis organisme yang dapat dibedakan menjadi jenis hewan dan tumbuhan, baik yang berukuran mikro maupun yang berukuran makro. Organisme yang hidup di dalam tanah ini ada yang bermanfaat, ada yang mengganggu, dan ada pula yang tidak bermanfaat tetapi juga tidak mengganggu (Hardjowigeno 1995).

Tanah yang mengandung banyak unsur hara dan air yang dibutuhkan tumbuhan atau tanaman dalam proses pertumbuhannya. Tanah Andosol memiliki struktur yang berongga. Struktur berongga inilah yang akhirnya menjadi tempat bagi akar untuk tumbuh dengan sangat ideal. Rongga pada tanah memberikan ruang pada akar untuk bernapas dan berkembang. Pelapukan tanah Andosol dibantu oleh organisme-organisme yang secara perlahan dapat menghancurkan dan melapukkan batuan.

Di dalam tanah Andosol, terdapat populasi makrofauna maupun mikrofauna, diantaranya cacing tanah dan mikroorganisme tanah (*protozoa* dan *nematoda*). Cacing tanah ini berperan dalam menyuburkan dan menggemburkan tanah. Cacing tanah melakukan pencampuran tanah dan memperbaiki tata udara tanah sehingga infiltrasi air menjadi lebih baik, dan lebih mudah ditembus oleh akar. Dalam suatu ekosistem tanah, berbagai mikroba hidup, bertahan hidup, dan berkompetisi dalam memperoleh ruang, oksigen, air, hara dan kebutuhan hidup lainnya, baik secara simbiotik maupun non simbiotik sehingga menimbulkan berbagai bentuk interaksi antar mikrobia ini.

Sifat biologi tanah terutama populasi mikroorganisme merupakan parameter penting guna menduga produktivitas suatu lahan karena mikroorganisme tanah merupakan pemecah primer, sehingga perlu untuk mengetahui perbedaan sifat biologi tanah yang didekati dengan pengukuran respirasi tanah, populasi total bakteri, dan populasi total jamur. Secara umum sifat biologi tanah berbeda untuk setiap Jenis tanah atau berbeda untuk setiap tipe penggunaan lahan.

Penelitian mengenai biologi tanah pada Jenis tanah Andosol relatif jarang. Salah satu hasil penelitian pernah dilaksanakan oleh Saridevi *et al.* (2013). Hasil penelitiannya mendapatkan bahwa tanah Andosol memiliki total populasi bakteri dan jamur tertinggi pada tipe penggunaan lahan kebun campuran, yaitu $6,26 \times 10^8$ spk g⁻¹ tanah dan $17,10 \times 10^5$ spk g⁻¹ tanah dibandingkan dengan tipe penggunaan lahan lainnya, hal ini disebabkan karena

tanah Andosol dengan tipe penggunaan lahan kebun campuran mempunyai C-organik tertinggi, yaitu 4,61% dan N-total tertinggi, yaitu 0,31% dibandingkan dengan tipe penggunaan lahan lainnya. Hal ini didukung dengan adanya pengaruh sangat nyata pada uji korelasi antara total populasi bakteri dengan C-organik dan berpengaruh sangat nyata pula pada uji korelasi total populasi jamur dengan C-organik.

C-organik tertinggi terdapat pada tipe penggunaan lahan kebun campuran (2,17%) hal ini disebabkan karena pada tipe penggunaan lahan ini mempunyai jenis tanaman yang beragam, pengelolaan tanahnya tidak intensif dan dipupuk dengan pupuk kandang. Sedangkan kandungan C-organik pada lahan alang-alang sebesar 2,10%, tegalan sebesar 1,92%. Dari ketiga kondisi tersebut nampaknya tipe penggunaan lahan kebun campuran merupakan tipe penggunaan lahan yang baik untuk mempertahankan kandungan C-organik tetap tinggi dan aktivitas biologi tanahnyapun tertinggi pada tipe penggunaan lahan ini,

5. GENESIS DAN KLASIFIKASI TANAH ANDOSOL

5.1 Genesis Tanah Andosol

Penelitian mengenai genesis tanah Andosol banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti dari Jepang, karena jenis tanah ini bermula dikenal di Jepang sebagai Ando Soil. Oleh karena itu dalam buku ini, referensi-referensi yang berkaitan dengan genesis tanah Andosol banyak berasal dari hasil-hasil penelitian di Jepang. Referensi utama dalam naskah ini adalah buku *Volcanic Ash Soils, Genesis, Properties and Utilization* (Shoji *et al.* 1993a).

Tanah Andosol adalah tanah yang berkembang dari bahan vulkanik seperti abu vulkanik, batu apung, sinder, lava, dan/atau bahan vulkanoklastik yang fraksi koloidnya didominasi oleh mineral non kristalin seperti alofan, imogolit, ferihidrit, atau kompleks Al-humus. Abu vulkanik atau tephra umumnya berupa bahan tidak kukuh atau bahan lepas yang mengandung gelas vulkanik dalam jumlah banyak. Oleh karena itu, tephra yang mengalami pelapukan dengan cepat menghasilkan bahan bentuk non kristalin (Shoji *et al.* 1993b).

Proses pembentukan yang utama pada tanah Andosol adalah proses pelapukan dan transformasi (perubahan bentuk), sedangkan proses pemindahan bahan (translokasi) dan penimbunan bahan-bahan tersebut di dalam solum sangat sedikit. Menurut Hardjowigeno (1985) akumulasi bahan organik dan terjadinya kompleks bahan organik dengan Al merupakan sifat khas pada beberapa tanah Andosol. Secara keseluruhan proses pembentukan tanah Andosol dikenal dengan nama Andosolisasi.

Pembentukan sebuah horizon oleh proses andosolisasi ditandai dengan adanya akumulasi bahan organik, stabilisasi bahan organik oleh Al dan Fe aktif, pencucian oleh asam karbonat (*allophanic*) dan asam organik (*non allophanic*), serta pembentukan silika opaline laminar. Akumulasi bahan organik pada horison permukaan (horison A) tanah dimulai dengan proses literring, kemudian poses humifikasi dan melanisasi. Literring adalah akumulasi bahan organik kasar dan humus, humifikasi adalah proses perubahan bahan organik kasar menjadi humus, sedangkan melanisasi adalah pembentukan warna gelap karena pencampuran dengan bahan organik seperti pembentukan epipedon melanik, molik dan umbrik (Hardjowigeno, 1985). Pada horison permukaan tanah Andosol, aluminium yang dilepaskan dari abu vulkanik dapat ditahan oleh humus yang mengandung banyak bahan organik membentuk alofan humus atau kompleks aluminium humus (khelat). Menurut Wada (1977) pada iklim basah pelapukan abu vulkanik berlangsung cepat. Alofan yang mengandung oksida Al dan Fe terbentuk dan terakumulasi di horizon A atau horizon permukaan. Karena pelapukan dan perkembangan tanah berlangsung terus, maka banyak silika yang ditambahkan pada alofan membentuk haloisit ataupun mineral kristalin lainnya.

Pembentukan horizon B berlangsung terutama oleh pencucian asam karbonat tanpa translokasi Al, Fe yang nyata, dan karbon organik terlarut. Oleh karena itu, pembentukan bahan berbentuk non kristalin seperti alofan, imogolit, silika opalin laminar, ferihidrit, dan kompleks Al/Fe humus adalah ciri karakteristik dari proses andosolisasi. Alofan yang

mengandung oksida Al dan Fe akan terbentuk pada horizon B jika pengikatan Al oleh senyawa humat kurang dominan pada horizon permukaan (Wada 1977). Al yang dilepas dari abu vulkanik dapat ditahan oleh humus pada horizon permukaan, yang mempunyai bahan organik tinggi. Pada Andisol ketersediaan bahan humat merupakan pembatas laju pembentukan kompleks. Dengan berkurangnya aktivitas Al, maka humus dapat membentuk SiO_2 opalin dan menghambat pembentukan mineral aluminium silikat amorf seperti alofan (Wada and Higashi 1976).

Para pakar ilmu tanah yang banyak mempelajari tanah tropika terutama tanah dari Indonesia adalah E.J. Mohr dan Van Baren mulai tahun 1944. Pada tahun 1954, mereka menerbitkan buku lengkap mengenai tanah tropika yang berjudul *Tropical Soils. A Critical Study of Soil Genesis as Related to Climate, Rock and Vegetation* (Mohr and van Baren 1954). Pada tahun 1972 Mohr beserta teman-teman lainnya memperbaharui buku tersebut dan banyak membahas mengenai genesis tanah-tanah tropika. Mohr *et al.* (1972), mengemukakan tentang proses pembentukan tanah Andosol. Proses tersebut meliputi proses pelapukan dan pembentukan tanah yang berkaitan erat dengan pelapukan gelas vulkanik. Proses pelapukan abu vulkanik atau tephra diawali dengan terucunya senyawa-senyawa terlarut, seperti H_4SiO_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , oleh air hujan, kemudian dipercepat oleh pencucian asam karbonat. Seskuioksida terakumulasi secara residual, sedangkan aluminium dan asam silikat membentuk mineral sekunder.

Tanah Andosol dapat terbentuk dari tephra oleh proses andosolisasi dalam waktu yang relatif singkat di bawah berbagai iklim. Namun, tidak semua tanah Andosol berasal dari tephra dan tidak semua tephra berkembang menjadi tanah Andosol. Di Indonesia tanah Andosol sebagian besar berkembang dari bahan tephra. Namun tidak semua tephra yang dijumpai saat ini menjadi tanah Andosol. Di daerah Gunung Kidul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta tanah Andosol dijumpai pada *landform* Karst atau pegunungan kapur, namun demikian tanah Andosol yang terbentuk ternyata berasal dari abu vulkanik hasil erupsi Gunung Merapi (Sudihardjo *et al.* 1997). Demikian juga halnya dengan tephra ada juga yang tidak membentuk tanah Andosol, tetapi membentuk tanah Kambisol (*Inceptisols*). Yatno dan Zaayah (2003) dan Prasetyo *et al.* 2005) mendapatkan bahwa sebagian bahan tephra yang berasal dari Gunung Burangrang dan di dataran tinggi Toba ternyata membentuk tanah *Inceptisols*. Tanah-tanah tersebut mempunyai kandungan mineral alofan, gelas vulkanik sedikit tetapi mempunyai kandungan kaolinit dan gipsit cukup banyak.

Komposisi asosiasi mineral abu vulkanik dan kondisi pencucian menentukan tipe mineral sekunder yang terbentuk. Tanah-tanah yang berkembang dari abu vulkanik mempunyai nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang kecil. Pada tanah yang mengandung alofan cukup tinggi pada fraksi liat, nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ adalah antara satu sampai dua. Dengan meningkatnya umur, alofan mengalami transformasi menjadi kaolinit dan nisbahnya meningkat menjadi dua. Sedangkan apabila drainase buruk dan bahan induknya mengandung mineral-mineral feromagnesium yang nyata, maka dapat terbentuk mineral sekunder smektit dan nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menjadi tiga atau lebih.

Kondisi pencucian cukup menentukan pembentukan mineral sekunder dari tanah Andosol. Hasil penelitian Sukarman dan Subardja (1997); Hikmatullah *et al.* (2003) mendapatkan bahwa tanah Andosol yang sudah berkembang pada kondisi drainase baik, rejim kelembaban tanahnya kering (*ustic*) dan temperatur tinggi yang dijumpai di Pulau Flores Nusa Tenggara Timur mempunyai mineral sekunder kaolinit disorder. Menurut Prasetyo (2005) terbentuknya kaolinit disorder (kaolinit yang kristalnya kurang sempurna) disebabkan karena pengaruh rejim kelembaban ustik dan temperatur yang tinggi.

Menurut Munir (1996), tanah Andosol di Indonesia khususnya di Pulau Jawa berada pada daerah berlereng dengan ketinggian 700 m sampai 1.300 m atau 1.500 m dpl, dengan kondisi iklim agak dingin dan lebih basah daripada di dataran rendah. Pada tempat yang tinggi, keadaan iklim kurang cocok untuk terjadinya kristalisasi mineral. Dengan demikian, pada tanah Andosol banyak dijumpai alofan dan bahan-bahan amorf. Namun hasil inventarisasi para peneliti paling akhir Indonesia mendapatkan bahwa tanah Andosol banyak juga yang dijumpai pada daerah-daerah dengan ketinggian kurang dari 700 cm, yaitu dataran rendah dan dataran menengah (Sukarman dan Tafakresnanto 1992; Fiantis and Van Ranst 1997; Sudihardjo *et al.* 1995; Tan 1998; Hikmatullah 2009).

Pelapukan mineral alumino silikat primer telah berlanjut hanya sampai pada pembentukan mineral non kristalin seperti alofan, imogolit, dan ferihidrit. Tingkat pelapukan seperti ini sering dikatakan sebagai tingkat peralihan antara tanah vulkanik yang belum dilapuk dengan tanah vulkanik yang lebih melapuk. Walaupun demikian, pada keadaan lingkungan tertentu mineral-mineral non kristalin cukup stabil sehingga tidak cepat atau lambat sekali berubah menjadi mineral lain.

Pembentukan bahan Andisol terutama ditentukan oleh sifat bahan induknya dan berjalan sangat cepat akibat tingginya luas permukaan abu vulkanik bahan induknya (Fitz Patrick 1980). Di daerah humid, pelapukan abu vulkanik berlangsung cepat, alofan yang merupakan produk kopresipitasi Al oksida dan Fe oksida, terbentuk di horison B, atau dalam horison A tertimbun dimana senyawa Al-humus sedikit dijumpai dibandingkan horison permukaan (Wada dan Higashi 1976; Wada 1997). Ketika proses pelapukan dan perkembangan berlangsung, silika bebas ditambahkan kepada alofan, membentuk haloisit, atau mungkin mineral liat kristalin lainnya (Wada 1997). Atau apabila lingkungan mendukung kehilangan Si, maka dapat terbentuk gipsit dari mineral silikat. Imogolit adalah suatu mineral parakristalin, mengandung sedikit SiO₂ dibandingkan alofan. Wada dan Harward (1974) menduga bahwa imogolit merupakan fase peralihan dalam desilikasi alofan menjadi/membentuk gipsit pada lingkungan pencucian yang kuat.

Wada dan Aomine (1973) mengemukakan bahwa Andisol dapat mencapai kematangan dalam waktu 5.000 tahun, sedangkan Yamada (1997 *dalam* Tan 1984) melaporkan bahwa tanah ini dapat berkembang antara 500 sampai 1.500 tahun, tergantung faktor-faktor pembentuk tanahnya seperti tipe abu vulkanik. Fitz Patrick (1980) mengemukakan bahwa proses utama pembentukan Andisol adalah *hidrolisis* dan *humifikasi*. Hidrolisis akan melapuk abu vulkanik menjadi palagonit yaitu berupa suatu senyawa aluminium-silikat yang mengandung Ca, Mg, dan K. Senyawa ini kemudian akan berubah dengan cepat menjadi

alofan. Hidrolisis merupakan proses penghancuran kisi-kisi kristal oleh kation hidrogen, yang menyebabkan hancurnya struktur kristal. Hidrolisis ini akan membebaskan basa-basa dan terbentuknya asam silikat, silikat, dan aluminium bebas. Di alam, asam silikat ini berumur pendek dan selalu terdekomposisi. Silika dan aluminium hasil dekomposisi (pelapukan secara kimia) akan bersintesis dengan oksigen dan hidroksil membentuk mineral sekunder, seperti alofan amorf dan haloisit kristalin (Buol, Hole, and Mc Cracken 1980). Humifikasi merupakan proses perubahan bahan organik kasar menjadi humus. Alofan yang merupakan produk utama pelapukan abu vulkanik bergabung dengan humus membentuk bahan yang berwarna gelap dan tahan terhadap pelapukan.

Duchaufour (1982) mengemukakan bahwa bahan organik memegang peranan utama dalam pedogenesis tanah Andosol, yaitu menentukan proses pelapukan melalui proses *acidolysis* ataupun *complexolysis*. *Acidolysis* adalah pelapukan yang menyebabkan terkumpulnya asam-asam organik mudah larut yang berasal dari bahan organik kasar. Sedangkan *complexolysis* adalah pembentukan senyawa kompleks antara senyawa-senyawa organik terlarut (asam oksalat, asam sitrat, dan senyawa-senyawa fenol) dengan besi dan aluminium. Dalam proses ini, tidak hanya ion H^+ yang terlibat, tetapi juga kemampuan senyawa-senyawa organik tersebut membentuk kompleks sehingga menjadi aktif terhadap mineral-mineral primer dan mineral liat. Senyawa ini dapat mengekstrak dan memobilisir atom Al dan Fe dari struktur lembar kristalin melalui pembentukan kompleks. Senyawa kompleks tersebut tidak mudah bergerak akibat polikondensasi dengan bahan organik atau mineral amorf.

Tuf vulkanik terdiri atas fragmen-fragmen batuan, butir-butir mineral tunggal dan gelas vulkanik. Gelas vulkanik merupakan bahan terpenting dari ketiga komponen tersebut (Pettijohn 1957 in Mohr, Van Baren, and Van Schuylenborgh 1972). Selanjutnya Mohr *et al.* (1972), mengemukakan bahwa proses pelapukan dan pembentukan tanah Andisol berkaitan erat dengan pelapukan gelas vulkanik. Proses pelapukan abu vulkanik dimulai dengan tercucinya senyawa-senyawa terlarut, seperti H_4SiO_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , dan sebagainya oleh air hujan. Asam karbonat mempercepat dekomposisi abu vulkanik. Seskuioksida terakumulasi secara residual, sedangkan aluminium dan asam silikat membentuk mineral sekunder.

Mohr dan Van Baren (1960) membagi pelapukan atau transformasi bahan induk tanah menjadi lima kelompok, yaitu: (1) *initial stage*, (2) *juvenil stage*, (3) *viril stage*, (4) *senile stage*, dan (5) *final stage*. *Initial stage* adalah tahap dimana bahan induk masih belum terlapuk. *Juvenil stage* adalah tahap yang ditandai adanya tahap awal pelapukan, tetapi masih dominan bahan induk yang belum terlapuk. *Virile stage* ditandai dengan dominasi mineral mudah lapuk, kandungan liat mulai didapatkan dan juga kadang-kadang didapatkan komponen yang kurang mudah dilapuk. *Senile stage* ditandai dengan dekomposisi yang mendekati final stage dan hanya mineral resisten yang masih bertahan. *Final stage* ditandai oleh perkembangan tanah yang lengkap.

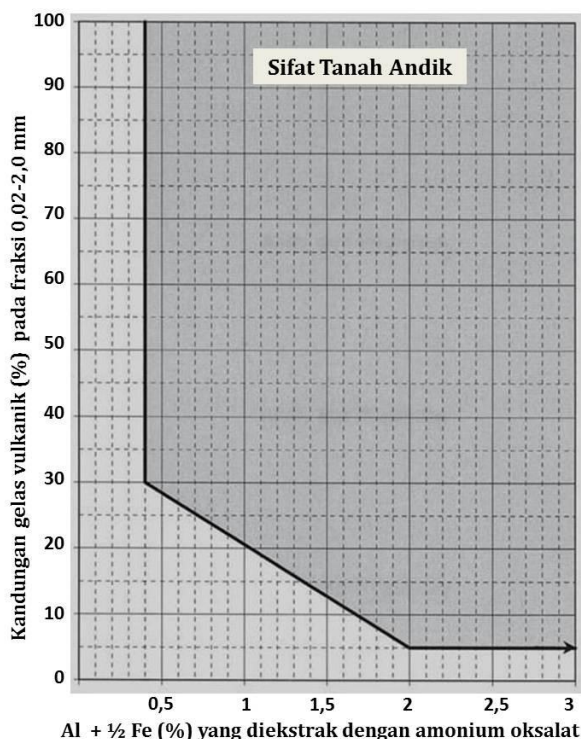
Sedangkan Tavarnier dan Eswaran (1972) mengemukakan urutan tingkat pelapukan sebagai berikut: (1) *etic stage*, (2) *cambic stage*, (3) *argilic stage*, dan (4) *oxic stage*. Tahap

etnic merupakan tahap awal yang ditandai oleh fragmen batuan, fraksi koloid antara mineral amorf dan kristalin. Pada bahan induk basalt, haloisit dapat membentuk lebih dari 75% dari mineral liat kristalin. Bahan vulkanik yang mempunyai potensial pelapukan yang tinggi seperti gelas vulkanik masih mendominasi fraksi koloid alumino-silikat amorf. Pada tahap kambik dengan bahan induk vulkanik, alofan masih merupakan mineral utama pada fraksi koloid, meskipun menunjukkan tingkat desilikasi haloisit, imogolit dan kadang-kadang dijumpai gipsit dalam jumlah yang sangat kecil. Alofan seperti juga montmorilonit akan tetap bertahan bila dalam keadaan lembab terus-menerus. Tahap argilik ditunjukkan oleh dominansi fraksi liat kristal kaolinit. Kesetimbangan sudah dijumpai antara bentuk-bentuk liat dengan proses alterasi yang berlangsung. Kandungan besi bebas mulai tinggi dan mengkristal sebagai goetit, sisanya dalam bentuk amorf. Silika sebagian dicuci dan sebagian lagi mengkristal sebagai kuarsa. Pelapukan tahap oksik meliputi tahap haplik yang ditandai adanya mineral-mineral alumino-silikat dalam jumlah yang kecil, biasanya terjadi penurunan kandungan mineral liat alumino-silikat tipe 2:1 dan tahap akrik yang ditandai oleh dominansi liat hidroksida yang mempunyai muatan netto positif dan pH-KCl lebih besar dari pH-H₂O, besi bebas mencapai maksimum dan mengkristal sebagai goetit.

5.2 Sifat Penciri Andik dan Epipedon pada Tanah Andosol

Sifat tanah Andik umumnya terbentuk karena pelapukan tephra atau bahan induk lain yang mengandung gelas vulkanik dalam jumlah banyak. Tanah yang berada di iklim dingin, lembab dan memiliki karbon organik berlimpah, dapat terbentuk sifat tanah andik tanpa perlu adanya gelas vulkanik. Dalam taksonomi tanah, sekelompok gelas dan mineral-yang dilapisi gelas kaya silika disebut gelas vulkanik. Mineral ini relatif mudah larut dan mengalami transformasi cukup cepat pada keadaan tanah lembab. Sifat tanah Andic merupakan tahap transisi, dimana pelapukan dan transformasi alumino-silikat primer (seperti gelas vulkanik) telah berjalan hanya sampai titik pembentukan bahan mineral non kristalin, seperti alofan, imogolit, dan ferihidrit, atau kompleks logam-humus. Konsep sifat-sifat tanah andik adalah sifat tanah dengan material cukup lapuk, kaya bahan mineral non kristalin atau *short range order* atau kompleks metalhumus, atau keduanya, dengan atau tanpa gelas vulkanik (diperlukan dua karakteristik) dan tanah dengan pelapukan lemah, sedikit mengandung mineral non kristalin dengan gelas vulkanik (diperlukan tiga karakteristik).

Jumlah relatif alofan, imogolit, ferihidrit, atau kompleks logam-humus dalam fraksi koloid yang disimpulkan dari kandungan aluminium (Al), besi (Fe), dan silika (Si) yang diekstraksi dengan amonium oksalat dan dari retensi fosfat. Para pakar ilmu tanah dapat menggunakan adanya rasa licin jika dipirid (*smeariness*) atau nilai pH yang diekstrak dengan 1N natrium fluorida (NaF) sebagai indikator sifat tanah andik. Kandungan gelas vulkanik adalah persen gelas vulkanik (berdasarkan jumlah butir) dalam fraksi debu kasar sampai pasir (0,02 sampai 2,0 mm). Kebanyakan bahan tanah dengan sifat-sifat tanah andik terdiri atas bahan tanah mineral dan beberapa bahan organik tanah dengan kandungan C-organik kurang dari 25%.



Gambar 40. Daerah yang diarsir pada gambar di atas menggambarkan kriteria 3c, 3d, dan 3e (Soil Survey Staff 2014)

Karakteristik yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan kriteria dalam Soil Survey Staff (2014), bahan tanah dengan sifat-sifat tanah andik harus memiliki fraksi tanah halus yang memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Mengandung karbon organik (berdasarkan berat) kurang dari 25% dan satu atau kedua hal berikut:
2. Semua dari yang berikut:
 - a. Berat isi, diukur pada 33 kPa retensi air, dari 0.90 g cm^{-3} atau kurang; dan
 - b. Retensi fosfat 85% atau lebih; dan
 - c. Kandungan Al + 1/2 Fe (ekstraks amonium oksalat) sebesar 2,0% atau lebih; dan
3. Semua dari yang berikut:
 - a. 30% atau lebih dari fraksi tanah halus adalah 0,02 sampai 2.0 mm; dan
 - b. Retensi fosfat 25% atau lebih; dan
 - c. Kandungan Al + 1/2 Fe (ekstrak amonium oksalat) sebesar 0,4% atau lebih; dan
 - d. Kandungan gelas vulkanik 5% atau lebih; dan

- e. Kandungan $[(Al + \frac{1}{2} Fe)\% \times (15,625)] + [\text{persen kandungan gelas vulkanik}] = 36,25$ atau lebih.
4. Daerah yang diarsir pada Gambar 40 menggambarkan kriteria 3c, 3d, dan 3e.

Definisi Beberapa Epipedon pada Tanah Andosol

Dalam sistem klasifikasi Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP) (2014), beberapa epipedon digunakan sebagai persyaratan untuk klasifikasi pada tingkat Macam Tanah. Berikut disampaikan pengertian dan kriteria tentang epiedon melanik, epipedon umbrik dan epipedon molik, berdasarkan kriteria dalam Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2014).

Epipedon Melanik

Epipedon melanik memiliki kedua sifat berikut:

1. Batas atas pada, atau di dalam 30 cm dari permukaan tanah mineral atau batas atas dari lapisan organik dengan sifat tanah andik, mana yang lebih dangkal; dan
2. Di dalam lapisan-lapisan dengan ketebalan kumulatif 30 cm atau lebih, yang berada di dalam ketebalan total 40 cm, semua sifat berikut:
 - a. Sifat tanah andik pada seluruh ketebalan tersebut; dan
 - b. Value warna, lembab, dan kroma 2 atau kurang serta indeks melanik sebesar dari 1,70 atau kurang pada seluruh ketebalan tersebut; dan
 - c. Kandungan karbon organik 6% atau lebih, sebagai rata-rata tertimbang dan kandungan karbon organik 4% atau lebih di semua lapisan.

Epipedon Molik

Epipedon molik tersusun dari bahan tanah mineral dan, setelah tanah dicampur sedalam 18 cm dari tanah mineral atau seluruh tanah mineral jika kedalaman ke kontak densik, litik, atau paralithic, horison petrokalsik, atau duripan kurang dari 18 cm, memiliki sifat sebagai berikut:

1. Apabila kering, salah satu atau kedua sifat berikut:
 - a. Unit-unit struktur tanah dengan diameter 30 cm atau kurang atau struktur sekunder dengan diameter 30 cm atau kurang; atau
 - b. Kelas resistensi pecah termasuk cukup keras atau lembut; dan
2. Struktur batuan, termasuk stratifikasi halus (ketebalan 5 mm atau kurang), pada semua bagian penyusunnya kurang dari setengah dari volume; dan
3. Memenuhi salah satu sifat berikut:

- a. Semua sifat-sifat berikut:
 - b. Value warna, lembab 3 atau kurang dan value warna kering 5 atau kurang; dan
 - c. Warna dengan kroma, lembab, 3 atau kurang; atau
 - d. Fraksi tanah halusnya memiliki kandungan kalsium karbonat setara dengan 15 sampai 40% dan warna-warna dengan value dan khroma lembab 3 atau kurang; atau
 - e. Fraksi tanah halusnya memiliki kalsium karbonat setara dengan 40% atau lebih dan value warna, lembab, 5 atau kurang; dan
4. Kejenuhan basa (dengan NH_4OAc) sebesar 50% atau lebih; dan
5. Kandungan karbon organik karbon dari:
- a. Sebesar 2,5% atau lebih, apabila epipedon memiliki value warna, lembab, 4 atau 5; atau
 - b. Sebesar 0,6% lebih tinggi kandungannya dibanding dalam horison C (apabila terjadi), apabila epipedon molik memiliki value warna lebih rendah dari 1 unit warna Munsell atau khroma 2 unit lebih rendah (baik lembab maupun kering) dibandingkan value warna dan khroma dari horizon C; atau
 - c. Sebesar 0,6% atau lebih dan epipedon tidak memenuhi persyaratan untuk butir 5-a atau 5-b; dan
6. Sesudah dicampur aduk bagian atas tanah mineral setebal 18 cm, atau seluruh lapisan tanah mineral apabila kedalamannya sampai kontak densik, litik atau paralitik, horison petrokalsik, atau duripan adalah kurang dari 18 cm, kedalaman minimum epipedon adalah sebagai berikut:
- a. Setebal 10 cm, atau seluruh kedalaman tanah tidak tersementasi, apabila epipedon bertekstur pasir sangat halus berlempung atau lebih halus dan langsung berada di atas kontak densik, litik atau paralitik, horison petrokalsik, atau duripan yang berada di dalam 18 cm dari permukaan tanah mineral; atau
 - b. Setebal 25 cm atau lebih, apabila keseluruhan epipedon bertekstur pasir halus berlempung atau yang lebih kasar; atau apabila tidak terdapat horison diagnostik yang terletak di bawahnya dan kandungan karbon organik dari bahan yang terletak di bawahnya berkurang secara tidak teratur dengan bertambahnya kedalaman; atau
 - c. Setebal 25 cm atau lebih, apabila semua sifat berikut ini terdapat pada kedalaman 75 cm atau lebih di bawah permukaan tanah mineral:
 - a. Batas atas sebarang bahan kapur pedogenik yang berupa serabut-serabut (*filamen*), selaput lunak, atau nodul lunak; dan
 - b. Batas bawah sebarang horison argilik, kambik, natrik, oksik atau spodik; dan
 - c. Batas sebarang horison petrokalsik, duripan, atau fragipan; atau
 - a. Setebal 18 cm, apabila sebagian epipedon bertekstur pasir sangat halus berlempung, atau yang lebih halus, dan sepertiga atau lebih ketebalan total di antara batas atas epipedon dan kedalaman horison-horison terdangkal dari atau

kenampakan yang disebutkan dalam butir 6c kurang dari 75 cm di bawah permukaan tanah mineral; atau

- b. Setebal 18 cm atau lebih, apabila tidak satupun dari kondisi-kondisi yang disebutkan atau terjadi; dan

7. Kandungan fosfat:

- a. Larut dalam 1% asam sitrat, kurang dari 1.500 mg kg⁻¹; atau
- b. Di bawah epipedon, kandungan menurun tidak teratur dengan peningkatan kedalaman; atau
- c. Berada dalam bentuk nodul, berada dalam epipedon; dan

8. Beberapa bagian dari epipedon tergolong lembab, selama 90 hari atau lebih (kumulatif) pada tahun-tahun normal, ketika suhu pada kedalaman 50 cm adalah 5°C atau lebih tinggi, apabila tanah tidak diairi; dan

9. Nilai n kurang dari 0,7.

Epipedon Umbrik

Epipedon umbrik terdiri atas bahan tanah mineral dan, setelah 18 cm teratas dari tanah mineral atau dari tanah seluruh tanah mineral jika kedalaman ke kontak densik, litik, atau paralithik, horison petrokalsik, atau duripan adalah kurang dari 18 cm, memiliki sifat sebagai berikut:

1. Apabila kering, salah satu atau kedua:
 - a. Unit-unit struktur dengan diameter 30 cm atau kurang atau struktur sekunder dengan diameter 30 cm atau kurang; atau
 - b. Kelas resistensi pecah tergolong cukup keras atau lunak; dan
2. Struktur batuan, meliputi stratifikasi tipis (tebal 5 mm atau kurang), dalam kurang dari sepertiga dari volume di semua bagian; dan
3. Kedua hal berikut:
 - a. Warna dengan value 3 atau kurang, jika lembab, dan 5 atau kurang, jika kering; dan
 - b. Warna dengan khroma 3 atau kurang, jika lembab; dan
4. Kejenuhan basa (dengan NH₄OAc) kurang dari 50% pada beberapa atau semua bagian; dan
5. Kandungan karbon organik adalah:
 - a. 0,6% (absolut) atau lebih tinggi dari kandungannya dalam dari horison C (jika ini terjadi) apabila epipedon umbrik memiliki value warna kurang dari 1 unit Munsell lebih rendah atau khroma kurang dari 2 unit lebih rendah (keduanya berlaku baik lembab maupun kering) daripada horizon C; atau
 - b. 0,6% atau lebih dan epipedon tidak memenuhi kualifikasi di 5-a di atas; dan

6. Ketebalan minimum dari epipedon adalah sebagai berikut:
 - a. 25 cm jika:
 - a. Kelas tekstur epipedon adalah liat pasir halus atau lebih kasar; atau
 - b. Belum ada horison diagnostik yang terletak di bawahnya dan kandungan organik karbon dari bahan-bahan di bawahnya tidak menurun teratur dengan meningkatnya kedalaman; atau
 - c. Jika ada, adalah 75 cm atau lebih di bawah permukaan tanah mineral:
 - a. Batas atas dari dangkal dari setiap karbonat sekunder diidentifikasi atau horison yg mengandung kapur, horison petrokalsik, duripan, atau fragipan; dan/atau
 - b. Batas bawah dari terdalam dari argilik, kambik, natrik, oksik, atau horison spodik; atau
 - b. 10 cm jika epipedon memiliki kelas tekstur lebih halus dari pasir halus berlempung (bila campuran) yang langsung di atas kontak densik, litik, atau paralithic, horison petrokalsik, atau duripan; atau
 - c. 18 sampai 25 cm dan ketebalan sepertiga atau lebih dari total ketebalan antara permukaan tanah mineral dan: (1) Batas atas dari yang terdangkal dari setiap karbonat sekunder yang diidentifikasi atau horison yg mengandung kapur, horison petrokalsik, duripan, atau fragipan; dan/atau (2) Batas bawah dari yang terdalam dari horison argilik, kambik, natrik, oksik, atau spodik; atau
 - d. 18 cm jika tidak ada kondisi di atas yang berlaku; dan
7. Fosfat:
 - a. Larut dalam 1% asam sitrat, kurang dari 1.500 mg kg⁻¹ asam sitrat; atau
 - b. Kandungan menurun tidak teratur dengan peningkatan kedalaman di bawah epipedon tersebut; atau
 - c. Berada dalam bentuk nodul di dalam epipedon tersebut; dan
8. Beberapa bagian dari epipedon lembab selama 90 hari atau lebih (kumulatif) pada tahun-tahun normal selama saat-saat ketika suhu tanah pada kedalaman 50 cm adalah 5°C atau lebih tinggi, jika tanah tidak diirigasi; dan
9. Nilai n kurang dari 0,7; dan
10. Epipedon umbrik tidak memiliki artefak, jejak sekop, dan permukaan menonjol yang merupakan ciri khas dari epipedon plaggen.

5.3 Klasifikasi Tanah Andosol

Klasifikasi tanah yang dibahas dalam tulisan ini adalah klasifikasi tanah Andosol berdasarkan sistem klasifikasi yang dikembangkan oleh Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian (2014) yang berbasis awal kepada Sistem Klasifikasi Tanah dari Dudal dan

Soepraptohardjo (1957, 1961). Selain itu dibahas juga mengenai tanah-tanah dari Ordo Andosol sampai Sub group yang pernah dijumpai di Indonesia, berdasarkan sistem klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff 2014).

Sistem Klasifikasi Tanah BBSDLP

Sistem klasifikasi tanah yang digunakan dalam penamaan tanah Andosol mengacu kepada sistem klasifikasi tanah yang dikembangkan di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (2014) sebagai penyempurnaan dari klasifikasi Pusat Penelitian Tanah (1983) dan sistem Dudal dan Soepraptohardjo (1957, 1961). Sistem klasifikasi tanah tersebut didasarkan pada morfogenesis, bersifat terbuka dan dapat menampung semua jenis tanah di Indonesia. Struktur klasifikasi tanah terbagi dalam dua tingkat/kategori, yaitu Jenis Tanah dan Macam Tanah. Pembagian Jenis Tanah didasarkan pada susunan horison utama penciri, proses pembentukan (genesis) dan sifat penciri lainnya. Pada tingkat Macam Tanah digunakan sifat tanah atau horison penciri lainnya. Tata nama pada tingkat Jenis Tanah lebih dominan menggunakan nama Jenis Tanah yang lama dengan beberapa penambahan baru. Sedangkan pada tingkat Macam Tanah sepenuhnya menggunakan nama/istilah yang berasal dari Unit Tanah FAO/UNESCO (1979) dan atau Sistem Taksonomi Tanah USDA (Soil Survey Staff 2010). Perbaikan/penyempurnaan sistem dapat dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan kebutuhan pengguna dan perkembangan iptek tanah sesuai dengan kondisi sumberdaya tanah di Indonesia. Klasifikasi tanah dilakukan mengikuti Kunci Penetapan Jenis dan Macam Tanah.

Kunci Penetapan Tanah Andosol

Dalam sistem klasifikasi tanah BBSDLP (2014) nama Andosol merupakan nama tanah untuk kategori Jenis tanah. Tanah Andosol dalam klasifikasi tersebut tergolong kepada tanah yang sudah mengalami perkembangan dengan susunan horison A-Bw-C. Konsep dari tanah Andosol adalah tanah yang berkembang dari bahan induk deposit piroklastik (*volcanic ejecta*) berupa abu, pumice, cinder dan lava. Material vitric atau gelas vulkanik, didominasi oleh mineral amorf atau non kristalin, dengan berat isi $0,90 \text{ g cm}^{-3}$. Mineral sekunder allophane dan imogolit merupakan mineral hasil lapukan dari gelas vulkanik.

Definisi tanah Andosol dalam klasifikasi tersebut adalah tanah yang mempunyai horison A molik atau umbrik atau melanik dan dapat dijumpai di atas horison B kambik, atau horison A okrik dan horison B kambik, tidak mempunyai horison penciri lain (kecuali jika tertimbun 50 cm atau lebih bahan baru), pada kedalaman sampai 35 cm atau lebih mempunyai salah satu atau kedua-duanya dari: (a) kerapatan lindak (pada kapasitas lapang) dari fraksi tanah halus ($< 2 \text{ mm}$) kurang dari $0,90 \text{ g cm}^{-3}$ dan kompleks pertukaran didominasi oleh bahan amorf, (b) 60% atau lebih adalah abu vulkanik *vitric*, *cinders*, atau bahan *pyroclastic* yang lain dalam fraksi debu, pasir, dan kerikil.

Kunci Penetapan Macam Tanah

Tanah Andosol yang memperlihatkan ciri-ciri hidromorfik mulai di dalam penampang pada kedalaman antara 50-100 cm dari permukaan.

Andosol Gleik (Tg)

Tanah Andosol lain yang mempunyai lapisan hitam atau gelap setebal 30 cm atau lebih karena kadar bahan organik tinggi (> 15% bahan organik) dalam penampang antara 25-100 cm dari permukaan.

Andosol Melanik (Tn)

Tanah Andosol lain yang mempunyai horison A molik.

Andosol Molik (Tm)

Tanah Andosol lain yang mempunyai horison A umbrik.

Andosol Umbrik (Tu)

Tanah Andosol lain yang mempunyai konsistensi *meary* dan atau bertekstur lempung berdebu atau lebih halus secara rata-rata untuk semua horison di dalam penampang 100 cm dari permukaan.

Andosol Okrik (To)

Tanah Andosol lain yang mempunyai sentuh litik atau sentuh paralitik pada kedalaman antara 20 sampai 50 cm.

Andosol Litik (Tl)

Tanah Andosol lainnya.

Andosol Vitrik (Tv)

Beberapa contoh gambar tanah Andosol yang ada di Indonesia disajikan dalam Gambar berikut.



Gambar 41. Profil Andosol Melanik dari Cipanas Cianjur, Jawa Barat dan Andosol Umbrik dari Cisarua, Bogor



Gambar 42. Profil Andosol Okrik dari Lombok Timur, NTB dan Andosol Vitrik dari Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara

Tanah Andosol dalam Klasifikasi Taksonomi Tanah

Tanah Andosol dalam klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff 2014) setara dengan Ordo *Andisols*. Dalam sistem klasifikasi Taksonomi Tanah, penetapan klasifikasi pada tingkat ordo diurutkan berdasarkan urutan yang telah ditetapkan. Semua ciri pembeda yang dimiliki tanah harus dipadankan dengan kriteria masing-masing ordo yang telah ditentukan dalam kunci klasifikasi sampai ketemu kriteria yang cocok dengan sifat-sifat tanah yang diklasifikasikan. Dalam sistem klasifikasi Taksonomi Tanah urutan identikasi untuk Ordo Andosol adalah berada pada urutan ke empat (Rachim dan Arifin 2011).

Dalam sistem klasifikasi Taksonomi Tanah (2014), ordo *Andisols* terbagi menjadi delapan sub-ordo, yang dapat dibedakan atas dasar rejim kelembaban tanah, kapasitas menyimpan air, atau kandungan bahan organik. Berikut adalah kedelapan sub ordo yang dimaksud.

1. *Aquands*: *Andisols* yang mempunyai epipedon histik, atau mempunyai kondisi akuik yang dicirikan dengan konsentrasi redoks 2% atau lebih atau mempunyai warna matriks 2 atau kurang atau memberikan reaksi positif terhadap pereaksi alpha-alpha dipiridil.
2. *Gelands*: *Andisols* lain yang mempunyai rejim temperatur tanah gelik.
3. *Cryands*: *Andisols* lain yang mempunyai rejim temperatur tanah kriik.
4. *Torrands*: *Andisols* lain yang mempunyai rejim kelembabab tanah aridik.
5. *Xerands*: *Andisols* lain yang mempunyai rejim kelembaban tanah xerik.
6. *Vitrands*: *Andisosl* lain yang mempunyai kapasitas memegang air yang rendah. *Vitrands* hanya terbatas pada rejim kelembaban tanah udik dan ustik.
7. *Ustands*: *Andisols* lain yang mempunyai rejim kelembaban tanah ustik.
8. *Udands*: *Andisols* lain yang mempunyai kelembaban tanah udik.

Tabel 16. Tanah-tanah Andosol yang dijumpai dan diklasifikasikan berdasarkan BBSDLP (2014) dan Soil Taksonomy (2014)

Klasifikasi BBSDLP 2014	Taksonomi Tanah (2014)
Andosol Gleik	Typic Endoaquands, Aquic Hapludands, Oxyaquic Hapludands, Aquic Melanudands
Andosol Molik	Humic Haplustands
Andosol Humik	Humic Haplustands
Andosol Melanik	Melanudands, Humic Haplustands
Andosol Okhrik	Typic Hapludands
Andosol Litik	Lithic Hapludands, Lithic Haplustands, Lithic Udivitrands
Andosol Vitrik	Vitrands, Vitric Haludands, Vitric Haplustands

Dari Tabel 16 terlihat bahwa jika disetarakan untuk setiap kategori, ternyata tidak ada konsistensi untuk masing-masing kategori. Perbedaan macam tanah dapat menyebabkan perbedaan pada tingkat sub ordo, great group maupun subgrup. Hal ini dapat dimaklumi karena terdapat perbedaan kriteria nama tanah untuk setiap kategori. Misalnya sifat vitric, untuk klasifikasi BBSDLP (2014) hanya digunakan pada tingkat macam, sedangkan pada klasifikasi Taksonomi Tanah (Soil Survey Staff 2014) digunakan pada kategori sub ordo maupun sub group.

6. POTENSI DAN KENDALA PEMANFAATAN TANAH ANDOSOL

Tanah Andosol, yaitu tanah yang berkembang dari bahan-bahan gunung berapi dan terletak di seputar gunung berapi dikenal sebagai tanah yang paling subur dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. Berada pada ketinggian antara 700 sampai 2.500 m dpl, selain udaranya sejuk juga sangat memungkinkan tumbuhnya komoditas pertanian yang bernilai ekonomis tinggi. Tidaklah mengherankan jika pada wilayah ini, banyak orang yang menggantungkan hidupnya di bidang pertanian, karena bertani di daerah tanah yang subur dengan jenis komoditas yang kompetitif sangatlah menguntungkan. Karena itu pada daerah ini tingkat kepadatan penduduknya biasanya sangat tinggi.

Tanah Andosol merupakan tanah yang sebagian besar penyebarannya berada pada dataran tinggi dan hanya sedikit di dataran menengah dan dataran rendah. Berkaitan dengan hal tersebut maka tanah Andosol secara spesifik sangat sesuai untuk tanaman tipe C3. Tanaman tipe C3 adalah tanaman yang mempunyai titik kompensasi suhu udara yang rendah, sehingga cocok sebagai tanaman dataran tinggi, diantaranya adalah tanaman sayuran. Selain tanaman sayuran, tanaman tahunan yang sesuai di dataran tinggi diantaranya adalah teh, kopi arabika, kina, apel, jeruk, dan kayu manis serta tanaman kehutanan seperti *Eucalyptus urophylla*, *Casuarina* sp. (Suwandi 2009).

6.1 Potensi Tanah Andosol untuk Pertanian

Luasan dan Bentuk Wilayah

Indonesia merupakan negara yang kaya akan gunung berapi. Oleh karena itu bahan induk tanahnya sebagian besar berkembang dari bahan vulkanik muda maupun vulkanik tua. Dari bahan vulkanik dapat membentuk berbagai jenis tanah antara lain *Inceptisols*, *Entisols*, *Andisols*/Andosol dan *Alfisols*. Luas tanah Andosol di Indonesia adalah 5.395.000 ha atau 2,9% dari luas daratan Indonesia (Subagjo *et al.* 2004). Dari sisi luasan tanah ini menempati urutan ke tiga dari tanah-tanah yang berkembang dari bahan vulkanik.

Penyebarannya secara wilayah, tanah Andosol sering berasosiasi dengan tanah lainnya seperti *Inceptisols* dan *Entisols*. Oleh karena itu pembahasan mengenai potensi tanah Andosol tidak terlepas dari potensi tanah *Inceptisols* dan *Entisols* yang secara bersamaan berada pada daerah tersebut. Penyebaran tanah Andosol tidak merata berada di seluruh pulau di Indonesia. Di Pulau Sumatera daerah yang tidak terdapat tanah Andosol adalah Provinsi Riau, Kepulauan Riau, dan Bangka Belitung. Di Pulau Jawa daerah yang tidak mempunyai tanah Andosol adalah DKI Jakarta dan di Pulau Kalimantan adalah Kalimantan Selatan.

Daratan Indonesia mempunyai luas 188,2 juta ha, dipilah menjadi kawasan hutan seluas 133,7 juta ha dan kawasan budidaya (pertanian) seluas 54,5 juta (Departemen Kehutanan 2008). Berdasarkan status lahannya tanah Andosol bisa berada pada kawasan hutan maupun pada kawasan budidaya pertanian. Berdasarkan data dari Subagjo *et al.* (2004), bahwa tanah Andosol paling luas terdapat di Pulau Sumatera disusul oleh Pulau Jawa. Sementara tanah

Andosol yang paling luas terdapat pada lahan yang mempunyai bentuk wilayah bergunung (lereng > 30%) seluas 3.344.612 ha atau 61,99% dan wilayah berbukit (lereng 15 sampai 30%) seluas 883.936 ha atau 16,38% (Puslittanak 2000). Sebagian besar tanah Andosol pada daerah dengan bentuk wilayah bergunung berada pada kawasan hutan.

Berdasarkan karakteristik biofisik terutama lereng, setidaknya terdapat 2,050 juta ha (38%) tanah Andosol yang potensial untuk pertanian, yaitu pada lahan dengan bentuk wilayah datar sampai berbukit. Lahan potensial tersebut secara teknis-agronomis mampu mendukung pertumbuhan tanaman semusim maupun tanaman tahunan secara optimal. Jika lahan tersebut dikelola dengan baik maka tidak akan mengganggu kelestarian sumberdaya dan lingkungan. Namun demikian lahan potensial tersebut di atas belum mempertimbangkan aspek sosial dan hukum, seperti kepemilikan dan peruntukan, namun sudah mempertimbangkan penetapan kawasan konservasi dan hutan lindung. Oleh sebab itu, lahan potensial yang dimaksud bisa berada pada kawasan budidaya atau lahan kering yang sudah diusahakan, atau berada pada kawasan hutan produksi atau hutan konversi.

Agar lahan-lahan tersebut dapat dijadikan lahan budidaya dan berkesinambungan maka penggunaannya harus didasarkan kepada kemampuan atau kesesuaian lahannya. Dalam menentukan arahan untuk pengembangan suatu komoditas harus didasarkan kepada hasil evaluasi lahan yang didasarkan kepada daya dukung iklim, tanah dan sifat lingkungan fisik lainnya. Prioritas pengembangan pertanian diarahkan kepada lahan yang tergolong berpotensi tinggi, agar komoditas pertanian yang diusahakan mampu berproduksi optimal dengan kualitas prima, sehingga akan mempunyai daya saing harga dan pemasaran.

Berdasarkan bentuk wilayahnya, tanah Andosol yang dapat digunakan untuk pertanian tanaman semusim (tanaman pangan dan sayuran) adalah tanah Andosol yang berada pada lahan dengan bentuk wilayah datar sampai berombak dan bergelombang, dengan lereng kurang dari 15% seluas 1.166.452 ha atau 21,62%. Sedangkan untuk lahan yang mempunyai lereng lebih dari 15 sampai 45%, budidaya pertanian yang sesuai adalah tanaman perkebunan seperti teh, kopi, kina, dan kayu manis.

Suhu Udara dan Iklim

Seperti telah dibahas dalam bab sebelumnya bahwa tanah Andosol sebagian besar menempati ketinggian tempat di atas 700 meter dari permukaan laut dan beriklim basah. Kondisi suhu udara yang sejuk berkisar antara 16-22°C sangat memungkinkan untuk pertumbuhan dan perkembangan komoditas pertanian dataran tinggi. Kondisi suhu yang demikian sangat diperlukan dan merupakan persyaratan utama bagi komoditas pertanian dataran tinggi.

Di Indonesia yang berada di sekitar garis khatulistiwa, ketinggian tempat sangat menentukan suhu udara, semakin tinggi suatu tempat maka suhu udaranya akan semakin rendah dan sebaliknya. Secara umum setiap kenaikan 100 m, maka suhu udara akan turun 0,6 °C. Oleh karena itu perbedaan tinggi rendahnya suhu udara rata-rata tahunan lebih banyak

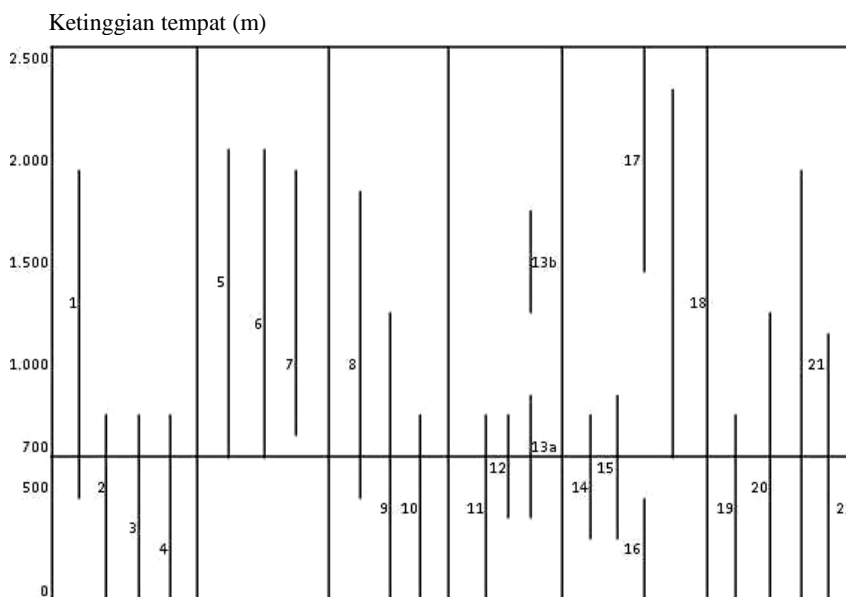
ditentukan oleh tinggi rendahnya ketinggian di atas permukaan laut, dan bukan karena perbedaan lintang seperti halnya di daerah sub tropika.

Suhu dan ketinggian tempat sangat menentukan kesesuaian lahannya untuk berbagai komoditas pertanian maupun tanaman kehutanan. Sebagai contoh, aroma teh yang dihasilkan sangat ditentukan oleh ketinggian (elevasi) tempat dimana tanaman teh tersebut ditanam. Menurut Effendi *et al.* (2012) aroma teh yang dihasilkan pada elevasi tinggi lebih baik daripada elevasi rendah. Oleh karena itu tanaman teh yang ada di Indonesia umumnya ditanam pada elevasi antara 400 sampai 2.000 m dpl.

Carson (1989 dalam Kurnia *et al.* 2004) telah menyusun kesesuaian lahan beberapa komoditas pertanian dan kehutanan berdasarkan ketinggian tempat, seperti yang disajikan dalam Gambar 43. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa tanaman-tanaman yang hanya sesuai pada dataran tinggi yang mempunyai ketinggian lebih dari 700 m dpl adalah: kentang, bawang daun, kubis, kopi arabika, kasuarina, dan *Acasia decurens*. Sedangkan tanaman yang dapat ditanam mulai dari dataran menengah sampai dataran tinggi antara lain adalah: jagung, apel, teh, cengkeh, kopi robusta, *Casia siamena*, rumput gajah. Dataran tinggi yang berhawa sejuk tersebut dengan panorama yang indah mempunyai peluang untuk dikembangkan menjadi daerah agrowisata, sehingga terbuka peluang pasar bagi berbagai komoditas hortikultura yang bernilai tinggi.

Pertanian dataran tinggi yang banyak diusahakan oleh masyarakat tani di Indonesia adalah tanaman pangan dan hortikultura sayuran, sedangkan tanaman perkebunan sebagian besar dilakukan oleh perusahaan-perusahaan perkebunan. Sayuran merupakan komoditas penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Komoditas ini memiliki keragaman yang luas dan berperan sebagai sumber karbohidrat, protein nabati, vitamin dan mineral yang bernilai ekonomi tinggi. Pertanian hortikultura sayuran tersebut mempunyai prospek yang sangat baik karena permintaan pasar cukup tinggi dengan pertumbuhan produksi berkisar dari 7,7 sampai 24,2% (Suwandi 2009). Menurut catatan FAO (2000 dalam Suwandi 2009) konsumsi sayuran masyarakat Indonesia adalah 44 kg kapita⁻¹ tahun⁻¹.

Salah satu unsur iklim yang cukup menentukan budidaya pertanian lahan kering adalah curah hujan. Curah hujan rata-rata tahunan, curah hujan rata bulanan dan sebaran curah hujan selama setahun sangat menentukan jenis tanaman yang dapat dibudidayakan. Besarnya rata-rata curah hujan tahunan serta distribusi hujan yang merata sepanjang tahun sangat menjamin ketersediaan air selama pertumbuhannya baik untuk tanaman semusim maupun untuk tanaman tahunan. Lamanya kejadian bulan-bulan basah pada setiap tahunnya juga dapat menentukan berapa kali tanaman dapat ditanam dalam setahun. Curah hujan rata-rata tahunan pada dataran tinggi iklim basah di Indonesia umumnya lebih dari 2.000 mm, bulan kering (<60 mm bulan⁻¹) terjadi kurang dari 2 bulan dan kelembaban relatif pada siang hari > 70% dan pada malam hari > 90%.



Gambar 43. Diagram kesesuaian lahan beberapa komoditas pertanian dan kehutanan berdasarkan ketinggian tempat

Keterangan: 1. Jagung, 2. Padi, 3. Ubi Kayu, 4. Kedelai, 5. Kentang, 6. Bawang daun, 7. Kubis, 8. Apel, 9. Alpokat, 10. Mangga, 11. Kelapa, 12. Cengkeh, 13a. Kopi robusta, 13b. Kopi arabika, 14. Mahagoni, 15. *Casia siamea*, 16. Jati, 17. Kasuarina, 18. *Acasia decurens*, 19. *Glirisidia*, 20. Kaliandra, 21. Rumpun gajah, 22. *Erithrina* sp.

Sumber: Carson (1980 dalam Kurnia *et al.* (2004)

Sayuran dataran tinggi di Indonesia diintroduksi dari tanaman sayuran dari daerah sub tropika (*temperate*) dan beradaptasi cukup baik pada ketinggian lebih dari 700 m. Selain suhu, faktor lain yang harus dipenuhi untuk sayuran dataran tinggi adalah panjang hari dan intensitas cahaya. Panjang hari dan intensitas cahaya di dataran tinggi cukup sesuai untuk tanaman sayuran. Panjang hari di Indonesia umumnya hampir sama sepanjang tahun. Antara dataran tinggi dan dataran rendah terdapat perbedaan intensitas cahaya antara 1 sampai 3% tergantung dari musim hujan dan musim kemarau.

Tanaman perkebunan yang banyak diusahakan pada tanah Andosol adalah tanaman teh (*Camellia sinensis*). Menurut Effendi *et al.* (2012) tanaman teh sangat baik tumbuh pada jenis tanah Andosol dan tanah Latosol. Kedua jenis tanah tersebut umumnya terletak pada lereng-lereng pegunungan berapi, mempunyai kesuburan tinggi, mengandung bahan organik tinggi, tidak berpadas dan pH 4,5 sampai 6,0.



Gambar 44. Kebun jagung dan sayuran di tanah Andosol Lembang (kiri), tanaman teh di tanah Andosol Pangalengan, Bandung (kanan) (foto: Haryono 2011)

Nilai Ekonomi

Praktek pertanian di tanah Andosol yang menghasilkan tanaman sayur-sayuran, bunga-bunga dan tanaman perkebunan dapat memberikan keuntungan langsung kepada petani selain menghasilkan berbagai jasa yang dibutuhkan masyarakat seperti obyek wisata agro, penyedia lapangan kerja, penggalang ketahanan pangan dan penyedia berbagai fungsi lingkungan seperti pengendali erosi, longsor, penghasil oksigen, dan pengatur tata air DAS.

Tanaman hortikultura sayuran merupakan tanaman yang secara terus-menerus dibudidayakan di lahan kering dataran tinggi yang ditempati tanah Andosol. Selama periode tahun 1969 sampai tahun 2006 *trend* produktivitas tanaman hortikultura sayuran tidak menunjukkan adanya pelambatan. Namun demikian dalam per sepuluh tahunan pertumbuhan produksi, areal panen dan hasil tanaman sayuran per satuan luas sangat berfluktuatif. Pada periode tahun 1999 sampai 2006 hanya tomat dan wortel yang menunjukkan pertumbuhan produksi yang positif. Pertumbuhan areal panen yang positif hanya ditunjukkan oleh kubis, wortel dan tomat, artinya bahwa perluasan areal ternyata semakin sulit untuk dilaksanakan. Pertumbuhan produktivitas yang positif hanya ditunjukkan oleh lima komoditas antara lain bawang merah, dan kentang (Adiyoga 2009).

Tanah Andosol di dataran tinggi merupakan tanah yang banyak diusahakan untuk tanaman hortikultura karena nilai ekonomis yang lebih tinggi dari pada tanaman pangan lainnya. Sebagai contoh bahwa bertani tanaman kentang di Kecamatan Cangkringan (DIY) jauh lebih menguntungkan dibandingkan dengan tanaman padi. Pada luasan tanah sekitar 1.000 m² jika ditanami tanaman kentang dapat diperoleh keuntungan sekitar Rp 3.500.000,- per musim, tetapi jika ditanami padi dan semua komponen dihitung ternyata tidak memperoleh keuntungan, malahan merugi Rp 120.000,-. Berdasarkan analisis usahatani kentang dengan menanam seluas 1.000 m² diperoleh net B/C = 1,2 artinya layak untuk dilakukan (Hanafi dan Sutardi 2013).

Salah satu sentra produksi tanaman sayuran di Pulau Lombok adalah di Sembalun, Kabupaten Lombok Timur. Komoditas sayuran yang umum diusahakan oleh petani di daerah

ini adalah wortel, kentang, buncis, kubis, bawang daun dan kembang kol. Pola tanam yang diterapkan petani adalah monokultur dan untuk satu kali proses produksi atau satu musim tanam dibutuhkan waktu sekitar empat bulan. Pendapatan tertinggi dari enam jenis usahatani sayuran dataran tinggi di Sembalun dengan rata-rata luas garapan 0,27 ha adalah usahatani kentang (Rp 31,54 juta ha⁻¹) disusul oleh usahatani kubis (Rp 19,76 juta ha⁻¹) dan usahatani bawang daun (Rp 17,74 juta ha⁻¹). Dari semua aktivitas usahatani tersebut, usahatani buncis memberikan pendapatan terkecil, yaitu Rp 9,98 juta ha⁻¹ (Wathoni 2000).

Salah satu sentra produksi kentang di Provinsi Jambi adalah Kecamatan Kayu Aro, Kabupaten Kerinci. Usahatani tanaman kentang di Kabupaten Kerinci telah memberikan kontribusi yang sangat nyata terhadap peningkatan Pendapatan Domestik Regional Bruto (PDRB) daerah Kerinci. Petani kentang di daerah ini benar-benar telah memaksimalkan keuntungan dalam jangka pendek dan respon terhadap perubahan harga secara efisien (Edison dan Mukhlis 2012).

Dalam usahatani tanaman hortikultura, teknologi petani saat ini sudah memberikan keuntungan lebih banyak dibandingkan dengan tanaman pangan. Sebenarnya banyak teknologi budidaya tanaman hortikultura yang dapat diterapkan untuk meningkatkan produktivitas tanaman, sehingga masih memberikan peluang untuk ditingkatkan produktivitasnya. Sebagai contoh adalah Balai Penelitian Tanaman Sayuran (Balitsa) di Lembang, Kabupaten Bandung Barat, telah mengembangkan teknologi budidaya tanaman kentang yang disebut Budidaya Balitsa. Teknologi ini selain diarahkan untuk peningkatan produktivitas tetapi juga diarahkan untuk menjaga kelestarian lingkungan melalui pemanfaatan bahan-bahan alami lokal (untuk mengurangi penggunaan pupuk anorganik dan pestisida sintesis). Berdasarkan hasil penelitian di Lembang, Bandung Barat, Teknologi Budidaya Tanaman Kentang Balitsa mampu memberikan keuntungan tambahan sebesar Rp 1.044.763 ha⁻¹ musim⁻¹ dibandingkan dengan teknologi petani (Sembiring dan Rosliani 2011)

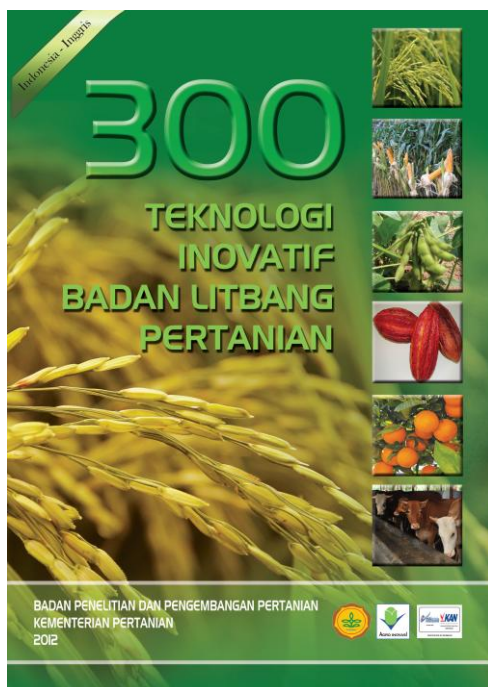
Ketersediaan Teknologi

Salah satu faktor yang menentukan keberhasilan pengembangan tanaman sayuran dataran tinggi adalah ketersediaan bibit/benih unggul dan teknologi budidaya sayuran introduksi. Sejak tahun 1980an penyediaan bibit/benih berbagai tanaman sayuran dataran tinggi tidak menjadi masalah yang krusial. Penerapan teknologi budidaya sayuran introduksi atau sayuran dataran tinggi, seperti kentang, kubis dan tomat sangat berkembang dan mencapai adopsi tertinggi pada tahun 1990an (Suwandi 2009). Sementara itu lembaga penelitian di lingkup Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian telah menghasilkan berbagai varietas unggul tanaman sayuran dataran tinggi yang sangat potensial dan prospektif untuk pengembangan pertanian sayuran dataran tinggi. Balai Penelitian Tanaman Sayuran Lembang antara lain pernah melepas tiga varietas kacang buncis dan dua varietas kentang (Balitsa 2006). Sementara teknologi budidaya pertanian sayuran dataran tinggi juga banyak dihasilkan oleh balai penelitian lingkup Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian

(BBSDLP 2007). Sementara dari perguruan tinggi salah satunya adalah Panduan Budidaya Tanaman Sayuran yang diterbitkan oleh Institut Pertanian Bogor (Susila 2006).

Untuk tanaman perkebunan, kesediaan teknologi tanaman teh dan kina sudah banyak dihasilkan oleh Pusat Penelitian Teh dan Kina (PPTK) Gabung, sementara untuk tanaman kopi banyak dihasilkan oleh Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia (PPKK) Jember. Teknologi tersebut meliputi teknik penyiapan lahan, penanaman, pemeliharaan tanaman, pemangkasan, pemupukan, pemberantasan hama dan penyakit, pemetikan atau panen, dan pasca panen.

Ketersediaan teknologi untuk meningkatkan tanaman hortikultura Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian telah mempublikasi 300 teknologi inovatif termasuk di dalamnya adalah berbagai varietas baru tanaman sayuran dataran tinggi yang sangat baik dibudidayakan pada tanah Andosol (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian 2012).



Gambar 45. Cover buku 300 Teknologi Inovatif Badan Litbang Pertanian

6.2 Kendala Pemanfaatan Tanah Andosol

Topografi/Bentuk Wilayah

Tanah Andosol merupakan tanah subur yang baik digunakan untuk lahan pertanian, tetapi tanah Andosol umumnya terletak pada lereng-lereng gunung berapi, dengan topografi

dominan berbukit sampai bergunung. Sistem usahatani pada daerah ini cukup beragam yaitu mulai dari usaha tanaman pangan sederhana yang diusahakan oleh rakyat sampai usaha perkebunan yang relatif maju. Menurut Kurnia *et al.* (2000) pengelolaan komoditas perkebunan di lahan ini pada umumnya dilaksanakan secara profesional, modal besar dan berorientasi pasar. Lereng curam bukan merupakan masalah yang serius, karena pengelolaannya telah memperhatikan azas kelestarian lingkungan. Berbeda dengan perkebunan rakyat, karena keterbatasan modal dan pengetahuan teknologi budidaya, pengelolaan lahannya dapat menimbulkan masalah kerusakan lahan dan lingkungan sekitarnya.

Aktivitas budidaya sayuran di tanah Andosol pada lereng miring dilakukan secara intensif tetapi masih jauh dari azas konservasi tanah dan air. Kondisi tanah dengan topografi yang demikian sangat rawan terhadap kerusakan lahan dan lingkungan sekitarnya. Tanaman sayuran adalah tanaman yang mempunyai daya jangkau akarnya sangat dangkal, sehingga daya memegang tanah agar tidak tererosi dan longsor juga sangat rendah. Aktivitas budidaya yang sangat intensif juga menyebabkan terjadi erosi yang cukup tinggi. Tabel 17 menyajikan erosi yang terjadi pada tanah Andosol yang ditanami sayuran tanpa tindakan konservasi tanah dan air.

Pada lahan budidaya sayuran di dataran tinggi, sebagian besar petani belum menerapkan teknik-teknik konservasi tanah dan air yang benar (Kurnia *et al.* 2000). Penyebabnya antara lain adalah karena teknik konservasi dirasakan sulit dalam pengerjaannya dan membutuhkan waktu yang lama serta memerlukan tenaga kerja yang besar. Dengan tidak diterapkannya tindakan konservasi tanah dan air, maka tanah Andosol di dataran tinggi sangat rentan terhadap erosi dan longsor.

Tabel 17. Erosi pada lahan sayuran pada tanah Andosol tanpa teknik konservasi tanah

Lokasi	Macam tanah	Lereng %	Pola tanam	Erosi t ha ⁻¹ th ⁻¹
Pacet Cianjur ¹⁾	Andosol Humik	9-22	Buncis-kubis	252
Pangalengan ²⁾	Andosol Haplik	30	Kentang-kubis	218
Lembang ³⁾	Andosol Haplik	15-25	Selada-tomat	70
Jeneberang, Sulsel ⁴⁾	Andosol	15-25	Bawang daun	80
Sukaraja, Sukabumi ⁵⁾	Andosol	15-25	Tomat-cabe-kubis	159

Sumber: 1) Suganda *et al.* (1997), 2) Sinukaban *et al.* (1994), 3) Supriyadi *et al.* (2013), 4) Saida *et al.* (2011), 5) Wibowo dan Ruwaida (2014)

Dari Tabel 17 tersebut terlihat bahwa tanah Andosol yang dibudidayakan untuk tanaman sayuran tanpa tindakan konservasi tanah dan air melebihi (2,3-8,4 x) batas yang dapat ditoleransikan (*tolerable soil loss*). Menurut Hardjowigeno (1987) erosi yang dapat ditoleransikan adalah sebesar 2,5 mm tahun⁻¹ atau setara dengan 30 t ha⁻¹ tahun⁻¹. Kondisi ini memperbesar konsentrasi sedimen dalam aliran permukaan yang selanjutnya dapat masuk ke

dalam badan air seperti sungai, waduk, saluran irigasi yang menyebabkan terjadinya sedimentasi yang besar.

Selain meningkatnya konsentrasi sedimen dalam aliran permukaan, juga terbawa berbagai unsur yang diperlukan oleh tanaman ke luar lahan pertanian. Unsur-unsur yang hilang tersebut antara lain C-organik, nitrogen, fosfat, kalium, dan yang lainnya. Dari data dalam Tabel 18 terlihat bahwa jumlah C-organik, nitrogen total, fosfat tersedia, dan kalium tersedia yang terbawa erosi cukup besar.

Tabel 18. Jumlah C-organik, unsur N, P, dan K yang terangkut bersama tanah yang tererosi pada lahan pertanaman sayuran dataran tinggi

Lokasi	C-organik	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
 kg ha ⁻¹ tahun ⁻¹			
Pacet Cianjur ¹⁾	-	241	80	18
Pangalengan, Bandung ²⁾	3,120	333	-	-
Kerinci, Jambi ³⁾	2.232	626	2,8	10,4

Sumber: 1) Suganda *et al.* (1997), 2) Sinukaban (1990), 3) Henny *et al.* (2011)

Akibat dari tidak dilakukannya usahatani tanaman sayuran dataran tinggi yang tidak berazaskan kelestarian lingkungan, menyebabkan penurunan kualitas lahan dataran tinggi. Ada empat hal yang mencerminkan penurunan kualitas lahan tersebut, yaitu: (1) usahatani tidak semakin menguntungkan, (2) menurunnya produktivitas lahan, (3) seringnya terjadi ledakan serangan hama dan penyakit, (4) hilangnya kemampuan masyarakat untuk membangun modal sosial sehingga mereka tidak mampu mengendalikan kerusakan lingkungan (Saida *et al.* 2011).

Ketersediaan Hara Fosfat dan Nitrogen

Unsur Fosfat

Unsur fosfat (P) adalah unsur esensial kedua setelah N yang berperan penting dalam fotosintesis dan perkembangan akar. Ketersediaan fosfat dalam tanah jarang yang melebihi 0,01% dari total P. Sebagian besar bentuk fosfat terikat oleh koloid tanah sehingga tidak tersedia bagi tanaman (Ginting *et al.* 2012). Pada tanah Andosol unsur fosfat sebagian besar terikat oleh mineral liat non kristalin alofan, imogolit, dan ferihidrit. Alofan mampu meretensi P hingga 97,8%, dan keberadaan Al dan Fe dalam bentuk amorf juga mempunyai kemampuan dalam mengikat P.

Dalam Tabel 19 diperoleh gambaran bahwa tanah-tanah Andosol dari Pulau Jawa dan Sumatera umumnya mempunyai kandungan P total dan P tersedia yang sangat tinggi, namun yang tergolong sangat tinggi adalah tanah Andosol yang berasal dari Pulau Jawa. Hal ini dapat dimengerti karena bahan vulkanik yang menjadi bahan induk tanah Andosol tersebut

mempunyai kandungan mineral primer apatit (kalsium fosfat) yang cukup tinggi. Hal tersebut pernah diungkapkan oleh Shoji *et al.* (1993) bahwa gunung berapi di Pulau Jawa seperti Gunung Merbabu dan Merapi mempunyai kandungan mineral apatit yang tinggi.

Meskipun tanah Andosol mempunyai kemampuan besar dalam mengikat P, tetapi karena P-total yang ada dalam tanah cukup tinggi, maka kandungan P-tersedia dalam tanah tersebut masih dapat memenuhi kebutuhan untuk pertumbuhan tanaman. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Ajidirman (2010) di Gunung Kerinci mendapatkan bahwa meskipun retensi fosfat tanah Andosol tinggi, tetapi karena kandungan fosfat total juga tinggi sehingga fosfat yang tersedia masih cukup untuk memenuhi kebutuhan tanaman.

Unsur Nitrogen

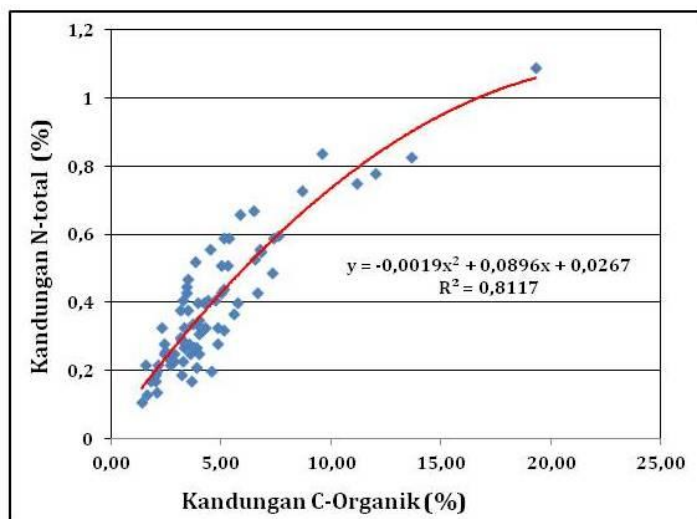
Nitrogen merupakan unsur hara utama yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah besar selama masa pertumbuhannya. Jumlah nitrogen dalam sebagian besar jenis tanah termasuk dalam tanah abu vulkanik sering menjadi unsur hara tanaman yang terbatas. Penggunaan pupuk N dalam dosis tinggi dapat meningkatkan hasil tanaman pertanian, tetapi penyerapan N yang bersumber dari pupuk urea atau amonium sulfat oleh tanaman pada tanah abu vulkanik tidaklah terlalu tinggi. Akibatnya, kandungan N dalam tanah menjadi berlebihan terutama di daerah pertanian intensif. Dengan demikian, aplikasi pupuk N adalah dianggap sebagai sumber pencemaran lingkungan.

Tabel 19. Nilai unsur hara N, P, dan K tanah Andosol dari beberapa tempat di Indonesia

Nilai	N total	P potensial	P tersedia	K potensial	K tersedia
	%	mg 100g ⁻¹	ppm	mg 100g ⁻¹	ppm
Kisaran	0,11-0,76	50-450	32-313	11-630	0,16-3,52
Rata-rata	0,33	214	152	142	0,70
Harkat	S	ST	ST	ST	T

Diolah dari: Haryati *et al.* (2013a, 2013b), Sutriadi (2013), Kasno *et al.* (2013), Sipahutar *et al.* (2013), Suyitno dan Fahmi (2013), Purnomo *et al.* (2013), Sukarman *et al.* (1992, 1999, 2005, 2014), Hikmatullah *et al.* (2009), Suganda *et al.* (1997)

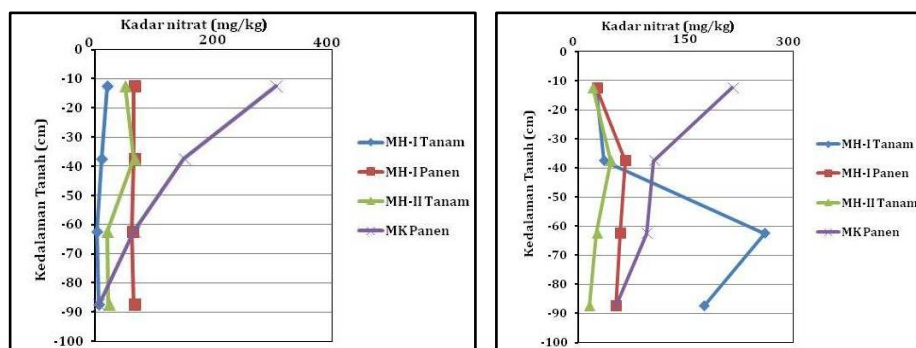
Unsur nitrogen dalam tanah Andosol merupakan unsur hara esensial yang kandungannya lebih tinggi dibandingkan dengan tanah lainnya. Dari data kandungan nitrogen total yang dianalisis dari tanah Andosol di beberapa tempat di Pulau Jawa dan Sumatera menunjukkan bahwa kandungan nitrogen rata-rata tergolong sedang (0,33%) dengan kisaran antara 0,11 sampai 0,76% (Tabel 19). Hubungan antara kandungan C-organik dengan kandungan N total dari tanah Andosol yang berasal dari berbagai tempat di Indonesia disajikan dalam Gambar 46.



Gambar 46. Hubungan antara kandungan C-organik dengan kandungan N-total pada tanah Andosol dari berbagai tempat di Indonesia (sumber data: Database BBSDLP)

Dari Gambar 46 terlihat bahwa kandungan N total dalam tanah Andosol sangat ditentukan oleh kandungan C-organik tanah. Koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,81 menunjukkan bahwa kandungan N total tanah ditentukan 81% oleh kandungan C-organik, 19% lainnya adalah faktor lain. Artinya bahwa peran kandungan C-organik cukup menentukan kandungan N-total dalam tanah.

Pada lahan kering, unsur nitrogen dalam tanah diserap oleh tanaman dalam bentuk ion nitrat (NO_3^-), dan sangat sedikit dalam bentuk amonium (NH_4^+). Oleh karena itu keberadaan nitrat dalam zone perakaran menjadi sangat penting. Keberadaan nitrat dalam tanah dapat dipantau dari hasil analisis tanaman dan hasil panen. Dinamika nitrat dalam tanah Andosol yang ditanami sayuran di Wonosobo, Jawa Tengah dapat dilihat dalam Gambar 47. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa terdapat pergerakan nitrat dari lapisan atas ke lapisan yang lebih dalam pada musim hujan (MH), baik pada perlakuan *Farmer Practiced* (FP) maupun *Intensive Practiced* (IP). Kandungan nitrat yang tinggi ada di lapisan 50-75 cm sebesar $256,90 \text{ mg kg}^{-1}$ pada perlakuan IP. Pada musim hujan terjadi kebalikannya, nitrat cenderung dominan di lapisan atas.



Gambar 47. Dinamika nitrogen (dalam bentuk nitrat) pada tanah Andosol Wonosobo berdasarkan musim menurut kedalaman pada perlakuan FP (kiri) dan IP (kanan) (Sipahutar et al. 2013)

Pola penyebaran seperti yang disajikan dalam Gambar 47 mengisyaratkan bahwa hara nitrogen merupakan hara yang sangat mobil yang mudah tercuci oleh aliran air pada saat musim hujan atau terkumpul di permukaan lalu menguap pada waktu musim kemarau. Pergerakan nitrat ke lapisan tanah yang lebih dalam sangat menyulitkan akar untuk menyerapnya, apalagi jika tanaman yang dibudidayakan mempunyai akar dangkal seperti halnya tanaman sayuran. Bila nitrat tersebut memasuki zona perairan akan membahayakan pengguna air domestik, karena kadar nitrat dalam air yang dianjurkan oleh WHO untuk kesehatan adalah kurang dari $100 \text{ mg liter}^{-1}$ atau tidak melebihi batas toleransi sebesar 50 mg liter^{-1} .

Secara temporal, kandungan nitrogen yang diberikan ke dalam tanah semakin lama akan semakin menurun. Terdapat penurunan kadar N-total dari mulai tanam sampai panen di tiap musim tanam, hal ini akibat adanya proses perombakan bahan organik tanah dan adanya serapan hara N oleh tanaman di sepanjang masa pertumbuhan tanaman, semakin dalam lapisan tanah maka kadar bahan organik juga semakin rendah yang biasanya diikuti pula dengan penurunan kadar N total tanah (Sipahutar 2013).

Tanah Andosol pada awalnya merupakan tanah yang paling produktif, terutama jika tanaman yang dibudidayakan adalah tanaman *indigenous* yang hanya memerlukan input rendah. Namun demikian untuk tanaman sayuran introduksi, ternyata kandungan hara esensial dalam tanah Andosol tidak cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman sayuran secara optimal. Oleh karena itu tanaman sayuran introduksi di dataran tinggi meskipun ditanam pada tanah Andosol, tetap memerlukan pemupukan tambahan yang cukup dan berimbang untuk berproduksi secara optimal.

6.3 Kesesuaian Lahan

Pengembangan komoditas pada tanah Andosol harus didasarkan kepada kesesuaian lahannya. Kesesuaian lahan adalah kecocokan sebidang lahan untuk penggunaan tertentu

(Ritung *et al.* 2011). Sebagai contoh lahan sangat sesuai untuk tanaman sayuran, lahan cukup sesuai untuk pertanian tanaman tahunan atau pertanian tanaman pangan. Secara spesifik, kesesuaian lahan adalah kesesuaian sifat-sifat fisik lingkungan, yaitu iklim, tanah, topografi, hidrologi dan atau drainase untuk usaha tani atau komoditas tertentu yang produktif.

Penilaian kesesuaian lahan dapat dipilah menjadi kesesuaian lahan aktual dan kesesuaian potensial. Kesesuaian lahan aktual adalah kesesuaian lahan yang dihasilkan oleh penilaian berdasarkan kondisi lahan saat ini, tanpa masukan perbaikan. Kesesuaian lahan potensial adalah kesesuaian yang dihasilkan pada kondisi lahan telah diberikan masukan perbaikan, antara lain pemupukan, pengairan, dan terasering.

Kriteria Utama Kesesuaian Tanah Andosol

Kriteria kesesuaian lahan untuk tanah Andosol tidak berbeda jauh dengan tanah mineral lainnya. Beberapa sifat lingkungan dan sifat tanah Andosol yang sekaligus menjadi kriteria dalam penilaian, diantaranya adalah temperatur, ketinggian tempat, ketersediaan air, media perakaran, retensi hara, hara tersedia, dan bahaya erosi.

Temperatur yang digunakan adalah temperatur rata-rata tahunan dalam °C. Data temperatur di dataran tinggi sering tidak tersedia. Data temperatur udara pada suatu ketinggian dapat diduga dengan menggunakan rumus Braak (1928 *dalam* Ritung *et al.* 2011) yaitu:

$$26,3 - (0,01 \times \text{elevasi dalam meter} \times 0,6^{\circ}\text{C})$$

Ketersediaan air merupakan jumlah air yang tersedia selama masa pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air berupa curah hujan rata-rata tahunan atau curah hujan pada masa pertumbuhan yang dinyatakan dalam milimeter (mm). Data curah hujan ditetapkan berdasarkan data hasil pengamatan jangka panjang. Data dapat diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atau dari instansi lain yang mengumpulkan data curah hujan.

Media perakaran merupakan keadaan di sekitar daerah berkembangnya perakaran, berupa kelas drainase tanah, tekstur tanah, bahan kasar dan kedalaman efektif. Drainase tanah menunjukkan kecepatan meresapnya air dari tanah atau keadaan yang menunjukkan lama atau seringnya jenuh air. Pengertian drainase meliputi drainase permukaan, drainase penampang dan permeabilitas. Tekstur tanah adalah perbandingan antara fraksi pasir, debu dan liat dalam masa tanah. Tekstur tanah terbagi menjadi 12 kelas, kelas yang paling halus adalah liat (*clay*) dan kelas yang paling kasar adalah pasir (*sand*). Bahan kasar atau fragmen batuan merupakan pecahan batuan yang tidak terikat dan berukuran dengan diameter 2 mm atau lebih besar. Fragmen batuan termasuk semua ukuran yang mempunyai dimensi horisontal lebih kecil dari ukuran suatu pedon. Kedalaman efektif adalah kedalaman dimana perakaran tanaman masih bisa masuk kedalam tanah. Kedalaman tersebut biasanya dibatasi oleh suatu lapisan penghambat misalnya batu keras, padas atau lapisan lain yang menghambat pertumbuhan akar tanaman.

Retensi hara meliputi kapasitas tukar kation (KTK) tanah, kejenuhan basa (KB), rekasi tanah (pH tanah), dan kandungan C-organik. Ketersediaan hara dinilai ketersediaannya adalah

N, P, dan K. Ketiga unsur tersebut merupakan hara makro dan paling banyak diambil oleh tanaman.

Salah satu faktor penghambat penggunaan lahan yang paling dominan pada tanah Andosol adalah bahaya erosi, karena tanah ini umumnya mempunyai lereng lebih dari 15%. Tingkat bahaya erosi dapat diprediksi berdasarkan keadaan lapangan, yaitu dengan memperhatikan adanya erosi lembar, erosi alur, dan erosi parit.

Berdasarkan persyaratan tumbuh tanaman yang dicocokkan dengan keadaan fisik lingkungan tanah Andosol di dataran tinggi, yaitu faktor iklim, tanah, topografi, keadaan drainase, maka komoditas pertanian yang dapat dikembangkan pada tingkat kesesuaian lahan secara umum atau Ordo Sesuai (S) disajikan dalam Tabel 20.

Tabel 20. Daftar komoditas hortikultura dan perkebunan yang sesuai untuk tanah Andosol dataran tinggi

Kelompok komoditas	Jenis komoditas	Kelas kesesuaian lahan
Kelompok tanaman hortikultura	1. Kentang	S1-S3
	2. Wortel	S1-S3
	3. Lobak	S1-S3
	4. Bawang putih	S1-S3
	5. Paprika	S1-S3
	6. Kubis	S1-S3
	7. Petsai	S1-S3
	8. Sawi	S1-S3
	9. Bayam	S1-S3
	10. Buncis	S1-S3
	11. Kacang panjang	S1-S3
	12. Kacang kapri	S1-S3
	13. Brokoli	S1-S3
	14. Asparagus	S1-S3
	15. Biet	S1-S3
	16. Apel	S1-S3
	17. Strawberry	S1-S3
	18. Alpukat	S2-S3
	19. Cabai merah	S2-S3
	20. Jeruk	S2-S3
	21. Markisa	S2-S3
	22. Pare	S2-S3
	23. Terung	S2-S3
	24. Tomat	S2-S3
Kelompok tanaman perkebunan	1. Kopi arabika	S1-S3
	2. Teh	S1-S3
	3. Kina	S1-S3

Keterangan: Dinilai berdasarkan kriteria dalam Ritung *et al.* (2011)

Dari data terlihat bahwa kelompok tanaman hortikultura (sayuran dan buah-buahan) merupakan kelompok yang jumlah komoditasnya paling banyak sesuai (S) pada tanah Andosol dataran tinggi dengan kelas kesesuaian lahan bervariasi dari Sangat sesuai (S1) sampai Sesuai marginal (S3). Untuk tanaman tahunan/perkebunan, komoditas teh, kopi arabika dan kina merupakan komoditas yang sesuai (S) dengan kelas S1 (Sangat sesuai) sampai sesuai marginal (S3).

7. PENGELOLAAN TANAH ANDOSOL UNTUK PERTANIAN

7.1 Konsep Pengelolaan Tanah

Pengelolaan lahan pertanian adalah segala tindakan atau perlakuan yang diberikan pada suatu lahan untuk menjaga dan meningkatkan produktivitas lahan tersebut, dengan tidak mengabaikan kelestariannya (Djaenudin *et al.* 2006). Oleh karena itu aspek keberlanjutan merupakan prinsip utama dalam pengelolaan lahan pertanian. Pengelolaan lahan berkelanjutan menggabungkan teknologi, kebijakan, dan kegiatan, dengan tujuan untuk memadukan prinsip-prinsip sosial ekonomi dengan masalah lingkungan. Pengelolaan lahan berkelanjutan dapat mempertahankan atau meningkatkan produksi/jasa, mengurangi tingkat risiko dalam berproduksi, melindungi potensi sumberdaya alam dan mengurangi degradasi tanah dan air, secara ekonomi menguntungkan dan secara sosial diterima (IBSRAM *dalam* Bechstedt 1997). FAO (1995) menyatakan bahwa sistem pertanian berkelanjutan merupakan dasar pengelolaan dan konservasi sumberdaya alam, orientasi dari perubahan teknologi dan kelembagaan dilakukan dengan cara sedemikian rupa dengan tujuan untuk menjamin pencapaian dan keberlanjutan pemenuhan kebutuhan umat manusia saat ini dan di masa yang akan datang.

Penerapan sistem usahatani konservasi dan pengelolaan lahan yang bersifat tepat guna dan tepat sasaran, merupakan cara yang dapat ditempuh untuk dapat memberikan keuntungan ekonomi dan melindungi lingkungan secara simultan (Departemen Pertanian 2006). Untuk mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan, pemerintah telah mengeluarkan beberapa peraturan perundang-undangan. Peraturan yang khusus berhubungan dengan sistem usahatani di dataran tinggi (dimana tanah Andosol banyak ditemukan), pemerintah telah mengeluarkan Peraturan Menteri Pertanian Nomor 47/Permentan/OT.140/10/2006 tentang Pedoman Umum Budidaya pertanian Pada Lahan Pegunungan, disusul dengan Permentan Nomor 48 tahun 2009 tentang budidaya sayuran yang baik dan benar. Khusus untuk melindungi lahan pertanian subur dan produktif (tanah Andosol juga masuk dalam kategori ini), pemerintah telah mengeluarkan Undang-undang Nomor 41 tahun 2009, tentang perlindungan lahan pertanian pangan berkelanjutan, diikuti dengan peraturan turunannya, yaitu Peraturan Pemerintah Nomor 12 tahun 2012 tentang Insentif Perlindungan Lahan Pertanian Berkelanjutan.

Pada era perubahan iklim, aspek lingkungan dalam pengelolaan sumberdaya lahan lebih mendapat penekanan, sehingga sistem pengelolaan sumberdaya lahan selain harus bersifat berkelanjutan dan ramah lingkungan. Kementerian Lingkungan Hidup (Deddy *dalam* Irawan 2013) merumuskan kriteria atau cakupan ramah lingkungan sebagai berikut: (1) efisien dalam penggunaan input, (2) optimalisasi pemanfaatan limbah atau *zero waste*, (3) berperan aktif dalam mencegah emisi gas rumah kaca, (4) memperhatikan kearifan lokal, dan (5) mencegah kerusakan keanekaragaman hayati. Dalam penilaian kesesuaian lahan, bukan hanya potensi produktivitas lahan dan tanaman yang dipertimbangkan, beberapa parameter yang dapat mendukung terwujudnya sistem pertanian yang bersifat berkelanjutan dan ramah lingkungan juga turut menentukan tingkat kesesuaian lahan untuk pengembangan suatu komoditas (Sukarman dan Suryani, 2013). Namun demikian dalam prakteknya Suwanda (2013) menyatakan bahwa penerapan konsep pertanian ramah lingkungan harus

mengintegrasikan dan memberikan porsi yang sama terhadap minimal tiga aspek, yaitu aspek ekonomi, sosial dan budaya.

7.2 Pengelolaan Tanah Andosol untuk Pengembangan Pertanian

Dari segi kesuburan tanah, tanah Andosol sangat potensial untuk pengembangan pertanian. Kualitas tanah yang baik diantaranya dicirikan oleh kandungan bahan organik tanah yang rata-rata tergolong tinggi. Tan dan Schuylenborgh *dalam* Prasetyo (2005) menyatakan bahwa kandungan C-organik tanah Andosol di Indonesia berkisar anatar 6 sampai 15%. Namun demikian beberapa hasil penelitian menemukan kandungan C-organik tanah Andosol yang kurang dari 2% (Djaenudin *et al.* 1989; Sukarman dan Subardja 1997; Hikmatullah *et al.* 1999). Tanah-tanah Andosol dengan kandungan bahan organik rendah kemungkinan telah mengalami proses degradasi. Hasil analisis sifat kimia tanah Andosol kedalaman 0 sampai 20 cm yang disajikan pada Tabel 21, menunjukkan kesuburan tanah (berdasarkan sifat kimia tanah) Andosol yang telah dikelola intensif rata-rata masih tergolong sedang. Namun indikasi penurunan kesuburan sudah nampak, diantaranya ditunjukkan adanya tanah Andosol dengan kandungan C-organik rendah, seperti yang ditunjukkan tanah Andosol di Banyuroto, Magelang. Namun demikian, jika tipikal kandungan C organik tanah Andosol Indonesia adalah 6 sampai 15%, maka contoh tanah-tanah Andosol yang telah dikelola secara intensif seperti yang tercantum pada Tabel 21 rata-rata telah mengalami proses degradasi lahan.

Tabel 21. Sifat kimia tanah Andosol kedalaman 0 sampai 20 cm

Parameter	Buntu, Wonosobo ¹⁾		Kopeng, Semarang ²⁾		Banyuroto, Magelang ³⁾		Ranca Bali, Bandung ⁴⁾		Talun Berasap, Kerinci ⁵⁾	
	Nilai	Hk*	Nilai	Hk*	Nilai	Hk*	Nilai	Hk*	Nilai	Hk*
pH H ₂ O	5,7	AM	6,0	AM	6,0	AM	6,07	AM	5,14	M
pH KCl	5,2	T	2,58	S	5,6	R	5,47	S	4,83	ST
C-organik (%)	3,98	S	0,24	S	2,0	S	2,44	S	5,12	T
N total (%)	0,31	S	11	S	0,17	S	0,28	R	0,69	R
C/N	13	ST	-	-	12	ST	8	ST	8	ST
P ₂ O ₅ (HCl 25%) (mg 100g ⁻¹)	346	R	-	-	190	R	357	S	1502	R
K ₂ O (HCl 25%) (mg 100g ⁻¹)	13	T	301	ST	11	ST	25	-	102	S
P ₂ O ₅ tersedia (ppm)	177	S	6,98	S	120	S	-	T	9,49	SR
Ca-dd (cmol(+) kg ⁻¹)	6,59	R	2,56	T	7,67	R	18,45	T	0,17	T
Mg-dd (cmol(+) kg ⁻¹)	0,79	R	0,24	R	0,88	R	3,14	ST	6,57	S
K-dd (cmol(+) kg ⁻¹)	0,17	R	-	-	0,18	R	1,57	S	0,53	SR
Na-dd (cmol(+) kg ⁻¹)	0,11	T	24,10	S	0,14	R	0,40	-	0,00	S
KTK (cmol(+) kg ⁻¹)	29,30	T	-	-	8,13	-	-	-	21,90	-
Retensi P (%)	76,6	R	41	S	-	ST	-	ST	-	S
Kejenuhan basa (%)	26				>100		93,33		33,15	

Sumber: 1) Sipahutar *et al.* (2013), 2) Kasno *et al.* (2013), 3) Haryati *et al.* (2012), 4) Sujitno (2012), 5) Haryati *et al.* (2013b)

Keterangan: * HK = Harkat; AM = Agak masam; M = Masam; T = tinggi, ST = Sangat tinggi, S = Sedang, R = Rendah, SR = Sangat rendah

Sifat fisik tanah Andosol juga ideal untuk dapat mendukung pertumbuhan tanaman (Tabel 22). Persen ruang pori total tanah Andosol rata-rata tergolong tinggi, dengan proporsi pori drainase cepat yang juga tergolong tinggi, sehingga permeabilitas tanah juga menjadi tinggi dan kondisi aerasi tanah menjadi baik. Sifat fisik tanah yang baik selain ditentukan oleh kandungan bahan organik, juga didukung oleh dominannya kandungan mineral alofan. Namun demikian, pada tanah Andosol yang telah dikelola intensif sifat fisik tanah juga terancam mengalami degradasi, hasil penelitian Endriani dan Zurhalena (2008) di Gunung Kerinci, Jambi menunjukkan terjadinya degradasi sifat fisik tanah Andosol yang telah dikelola secara intensif untuk lahan pertanian, hal ini diindikasikan oleh lebih buruknya sifat fisik tanah Andosol pada lahan pertanian (kebun campuran, kayu manis, dan kopi) dibandingkan dengan lahan hutan.

Tabel 22. Sifat fisik tanah Andosol kedalaman sekitar 0-20 cm

Parameter	Banyuroto, Magelang ¹⁾		Talun Berasap, Kerinci ²⁾		Batu Lawang, Pacet, Cianjur ³⁾		Pekasiran, Dieng, Banjarnegara ⁴⁾	
	Nilai	Harkat	Nilai	Harkat	Nilai	Harkat	Nilai	Harkat
Tekstur (%)		Lempung		Lempung		Lempung		Lempung
Pasir	9	berpasir	47		23	berliat	48	
Debu	85		44		48		45	
Liat	6		9		29		7	
BD (g cm ⁻¹)	0,93	Rendah	0,64	Rendah	0,80	Rendah	0,72	Rendah
Ruang pori total (% vol.)	63,55	Tinggi	68,70	Tinggi	62,1	Tinggi	79	Tinggi
Kadar air (% vol)								
pF 1	54,90	-	-	-	-	-	-	-
pF 2	37,90	-	-	-	-	-	-	-
pF 2,54	30,09	-	-	-	32,3	-	-	-
pF 4,20	7,93	-	-	-	22,2	-	-	-
Pori drainase (% vol.)								
Cepat	25,65	Tinggi	19,88	Tinggi	26,1	tinggi	27,7	Tinggi
Lambat	7,81	Rendah	5,76	Rendah	-	-	4,7	Sedang
Pori air tersedia (% vol)	22,16	Sedang	24,15	S. tinggi	10,1	Sedang	22,2	Sedang
Permeabilitas (cm jam ⁻¹)	17,91	Cepat	5,22	Sedang	17,43	Cepat	22,5	Cepat

Sumber: 1) Haryati *et al.* (2012), 2) Haryati *et al.* (2013a), 3) Suganda *et al.* 1997, 4) Juarsah *et al.* (2002)

Pembahasan tentang sistem usahatani pada tanah Andosol, seringkali sulit dipisahkan dengan sistem usahatani di wilayah dataran tinggi. Namun demikian, pengembangan lahan pertanian utamanya untuk tanaman semusim di dataran tinggi sering mengundang kritik, karena banyak yang belum bersifat ramah lingkungan. Misalnya pencegahan erosi dan longsor yang kurang memadai (Hilman 2013, Dariah *et al.* 2012, Rachman dan Dariah 2009, Kurnia *et al.* 2004, Departemen Pertanian 2006). Padahal wilayah dataran tinggi umumnya merupakan bagian hulu DAS (daerah aliran sungai) yang mempunyai banyak fungsi lingkungan di antaranya sebagai daerah penyangga dan pengatur tata air DAS. Oleh karena itu, pengembangan usahatani khususnya untuk tanaman semusim seperti sayuran di dataran tinggi (termasuk pada tanah Andosol) merupakan bentuk penggunaan lahan yang dinilai berisiko,

bukan hanya dari aspek penurunan kualitas lahan, namun juga kualitas lingkungan pada skala yang lebih luas, yaitu dari hulu sampai hilir, bahkan tidak menutup kemungkinan bisa berkontribusi terhadap penurunan kualitas lingkungan pada tingkat global, misalnya akibat peningkatan laju dekomposisi bahan organik, pemanfaatan pupuk secara berlebihan, dan lain sebagainya.

Pengelolaan Tanah Andosol untuk Tanaman Hortikultura

Tanaman hortikultura khususnya sayuran dataran tinggi seperti tomat, kubis, petsai, wortel, buncis, dan kentang tumbuh baik pada ketinggian > 700 m dpl (Suganda *et al.* 1994; Hilman 2013). Tanaman hortikultur lainnya yang banyak ditanam di dataran tinggi adalah tanaman bunga dan buah-buahan (Gambar 48).

Beberapa provinsi yang memiliki tanah Andosol relatif luas, seperti Sumatera Utara, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur (Puslittanah *dalam* Hidayat dan Mulyani 2005), merupakan provinsi yang memiliki sentra produksi tanaman hortikultura (BPS 2012). Daerah Pangalengan, Cisarua, Puncak, Lembang, Samarang Garut merupakan sentra produksi sayur di Jawa Barat; Dataran Tinggi Dieng, Kopeng, Wonosobo, Temanggung, merupakan sentra produksi sayur di Jawa Tengah, sedangkan Daerah Batu dan Dataran Tinggi Ijen merupakan contoh sentra produksi sayuran di Jawa Timur. Sentra produksi sayur di Sumatera Utara di antaranya terdapat di dataran tinggi Toba dan Brastagi, sedangkan sentra produksi sayuran di Provinsi Jambi terdapat di dataran Tinggi Kerinci.



Gambar 48. Beberapa tanaman hortikultura ditanam pada tanah Andosol di dataran tinggi

Meskipun tanah Andosol merupakan tanah yang relatif subur, namun banyak petani sayuran biasa menggunakan pupuk dalam dosis berlebih (Dariah *et al.* 2012, Hilman 2013), Kasno *et al.* (2013) menyatakan bahwa petani menggunakan pupuk masih didasarkan pada

visual fisik tanaman dan belum memperhitungkan aspek keuntungan. Beberapa hasil penelitian menunjukkan penggunaan pupuk urea pada tanaman sayuran bisa mencapai 500 kg ha⁻¹, pupuk SP-36 sekitar 500 sampai 750 kg ha⁻¹, dan penggunaan KCl sampai 500 kg ha⁻¹. Dalam bentuk pupuk majemuk yaitu NPK (15-15-15) dosis pupuk yang digunakan bisa mencapai 1,5 sampai 2,0 t ha⁻¹ (Kasno *et al.* 2013; Suwandi 1982, 1988; Suwandi dan Asandhi 1995; Hidayat *et al.* 1990). Takaran pupuk tersebut jauh di atas dosis yang direkomendasikan (Saidi 2004, Suwandi 1988). Hasil penelitian Widowati *et al.* (2013) pada sentra produksi sayur di daerah Kopeng, Jawa Tengah (2013) menunjukkan keseimbangan hara P dan K yang sangat positif, artinya telah terjadi *over supply* hara P dan K. Namun demikian ditemukan pula kesimbangan hara P dan K yang bersifat negatif, artinya input hara yang lebih rendah dibanding kebutuhan tanaman.

Penggunaan pupuk dalam jumlah yang berlebih, selain menyebabkan terjadinya pemborosan input pertanian, juga bisa menjadi sumber pencemaran (*non point source pollution*). Bahan pencemar tersebut di antaranya terbawa bersama aliran permukaan dan erosi. Hasil penelitian Suganda *et al.* (1997) menunjukkan jumlah hara yang terangkut melalui erosi dari tanah Andosol selama musim tanam buncis-kubis dengan bedengan searah lereng adalah sebesar 241 kg N, 80 kg P₂O₅, dan 18 kg K₂O.

Ketidak seimbangan aplikasi pupuk pada sentra-sentra produksi sayur juga disebabkan oleh pemberian yang berlebih untuk unsur tertentu, sedangkan unsur lainnya diberikan dalam jumlah terbatas atau tidak diberikan sama sekali. Sehingga sering terjadi gejala kekurangan hara tertentu seperti Ca dan Mg atau unsur mikro lainnya pada beberapa jenis sayuran (Suwandi 1988). Hasil penelitian Saidi (2004) pada beberapa sentra produksi sayur di Sumatera Barat juga menunjukkan kandungan Ca tanah yang tergolong rendah.

Penggunaan pupuk yang berlebih juga bisa menyebabkan terjadinya kontaminasi tanah oleh logam berat. Misalnya penggunaan pupuk P yang berlebih bisa menyebabkan terjadinya kontaminasi tanah oleh logam berat, di antaranya Cadmium (Cd) (Alloway 1995, Chien *et al.* 2003, Hindersah *et al.* 2009). Hasil penelitian Sudirdja dan Hindersah (2007) pada tanah Andosol di sentra produksi sayuran daerah Lembang menunjukkan terjadinya peningkatan kadar Cd dalam tanah, yaitu menjadi 1 mg kg⁻¹ atau 10 kali lebih besar dibanding kandungan Cd tanah Andosol yang masih dipertahankan dalam kondisi alaminya. Selain bersumber dari pupuk, kontaminasi tanah oleh logam berat bisa juga terjadi akibat penggunaan pestisida pada usahatani sayuran yang cenderung terus meningkat. Berbagai merk pestisida digunakan pada lahan sayuran (Gambar 49). Hasil Penelitian Poniman *et al.* (2013) pada sentra produksi sayur di dataran tinggi Dieng menunjukkan peningkatan penggunaan dan volume untuk per sekali semprot pestisida dari 400 sampai 600 liter ha⁻¹ menjadi 1.000 sampai 2.000 liter ha⁻¹.



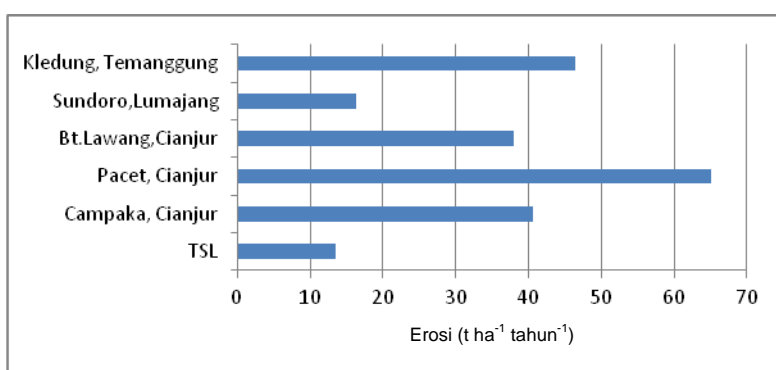
Gambar 49. Berbagai merk pestisida umumnya digunakan pada lahan usahatani sayuran

Pupuk organik umumnya juga diberikan dalam dosis tinggi, yaitu berkisar antara 20 sampai 70 t ha⁻¹ (Widowati *et al.* 2013, Kasno *et al.* 2013, Suwandi dan Asandhi 1995). Penggunaan bahan organik dalam dosis tinggi seharusnya bisa mengurangi penggunaan pupuk anorganik, sehingga penggunaan pupuk menjadi lebih efisien. Aplikasi bahan organik dalam dosis relatif tinggi pada tanah Andosol juga bermanfaat dalam meningkatkan ketersediaan unsur fosfat (P) bagi tanaman. Senyawa organik mempunyai kemampuan untuk menutup muatan positif dan meningkatkan muatan negatif dalam tanah. Disosiasi asam organik dalam bentuk anion organik berkompetisi dengan anion fosfat dalam memblokir Fe dan Al dari alofan (van Wambeke 1992, Tisdale *et al.* 1990). Hasil penelitian Hue (1991) menunjukkan bahwa kenaikan C-organik dari 7,14 menjadi 9,20% pada tanah Andosol bisa menurunkan kebutuhan P, sehingga untuk mencapai konsentrasi P sebesar 0,2 ml l⁻¹, jumlah P yang dibutuhkan menurun 1.100 mg kg⁻¹ menjadi 800 mg kg⁻¹.

Usahatani sayuran pada tanah Andosol dataran tinggi juga banyak yang belum mengikuti kaidah-kaidah konservasi tanah, misalnya sebagian besar petani membuat bedengan searah lereng (Gambar 50), tanpa adanya tindakan konservasi yang memadai. Pembuatan bedengan searah lereng bisa memicu terjadinya erosi, karena tidak ada penahan aliran permukaan. Hasil pengukuran erosi pada tanah Andosol yang digunakan untuk usahatani sayuran dengan bedengan searah lereng berkisar antara 16 sampai 65 t ha⁻¹. Hasil prediksi tingkat bahaya erosi pada lahan usahatani sayuran di Temanggung menunjukkan kisaran angka yang hampir sama yaitu antara 32 sampai 61 t ha⁻¹ atau rata-rata sekitar 46,5 t ha⁻¹ (Gambar 51). Padahal ambang batas erosi yang diperbolehkan (*tolerable soil loss*) untuk tanah yang memiliki permeabilitas tinggi dan solum dalam (seperti tanah Andosol) adalah sekitar 13,5 t ha⁻¹ tahun (Thomson *dalam* Arsyad 2000).



Gambar 50. Kondisi bedengan searah lereng pada pertanaman tanaman sayur dataran tinggi



Gambar 51. Tingkat erosi pada tanaman sayur dengan bedengan searah lereng (sumber: Suganda et al. 1997, Kosman et al. 1998, Erfandi et al. 2002, Soleh dan Arifin dalam Dariah dan Husen 2006, Suganda dan Nurida 2013) dibandingkan dengan erosi yang masih bisa ditoleransi (tolerable soil loss/TSL)

Pada beberapa areal pertanaman sayuran, beberapa petani telah melakukan penterasan, namun demikian sebagian besar teras dibuat miring keluar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 52, sehingga efektivitasnya dalam mencegah erosi belum maksimal. Namun demikian tingkat erosi yang terjadi sudah jauh berkurang dibanding tanpa tindakan konservasi. Hasil pengukuran yang dilakukan Haryati dan Kurnia (2001) di Pekasiran Banjarnegara menunjukkan tingkat erosi pada lahan sayuran dengan aplikasi teras miring keluar berkisar 7,3 sampai 10,5 t ha⁻¹. Pembuatan bedengan searah lereng dan pembuatan teras yang miring keluar pada lahan sayuran dimaksudkan untuk menjamin drainase bisa berjalan dengan baik. Hal ini dilakukan karena sebagian besar tanaman sayuran sangat rentan terhadap penyakit jika kondisi drainase tanah buruk.



Gambar 52. Kondisi teras miring keluar pada pertanaman sayuran di dataran tinggi

Beberapa lembaga termasuk Badan Litbang Pertanian telah mengembangkan berbagai teknologi pengelolaan lahan sayur dataran tinggi yang bersifat ramah lingkungan. Sistem pemupukan berimbang pada lahan sayuran bisa mengurangi penggunaan pupuk anorganik secara berlebihan. Sehingga selain bisa menekan risiko pencemaran logam berat, juga bisa menekan emisi gas rumah kaca yang bersumber dari penggunaan pupuk anorganik. Salah satu sumber emisi dari lahan pertanian adalah dari penggunaan pupuk N (Setyanto *et al.* 2013). Menurut IPCC (2006) dari pupuk N yang diberikan, sekitar 1% akan teremisi menjadi N_2O . Kekhawatiran petani bahwa pengurangan penggunaan pupuk bisa mengurangi produksi dan menyebabkan kerugian ternyata tidak terbukti. Misalnya hasil penelitian Kasno *et al.* (2013) di dataran tinggi Kopeng dan Buntu, Jawa tengah menunjukkan bahwa pemupukan berimbang dapat meningkatkan produksi dan pendapatan petani sayuran pada tanah Andosol dataran tinggi. Hasil penelitian Sipahutar (2013) di lokasi yang sama juga menunjukkan bahwa meskipun menghasilkan tingkat produksi yang tinggi, namun penggunaan pupuk oleh petani pada lahan sayuran bersifat tidak efisien.

Teknologi konservasi spesifik lahan sayuran juga telah dikembangkan dengan tetap mempertimbangkan budaya petani, misalnya kebiasaan petani membuat bedengan searah lereng, namun harus disertai dengan pembuatan guludan searah kontur sehingga erosi tetap terkendali. Beberapa hasil penelitian menunjukkan cara ini cukup efektif mengurangi besarnya erosi (Kurnia *et al.* 2004, Erfandi *et al.* 2002). Jika disertai dengan pembuatan dan pemeliharaan saluran drainase, pembuatan bedengan searah kontur tidak berkorelasi dengan tingginya serangan penyakit pada tanaman sayuran. Hasil penelitian Haryati *et al.* (2013a) di dataran tinggi Kerinci menunjukkan bahwa penanaman tanaman sayuran searah kontur justru dapat mengendalikan serangan layu fusarium pada tanaman kentang, oleh karena itu perlu dilakukan sosialisasi kepada petani bahwa dengan drainase yang terpelihara baik, penanaman searah kontur tidak menyebabkan meningkatnya serangan penyakit.

Praktek konservasi pada lahan sayuran yang sudah cukup baik telah dipraktekkan petani sayuran di daerah Kopeng (Gambar 53), keyakinan bahwa pembuatan teras bisa meningkatkan serangan penyakit ternyata tidak benar, petani di daerah ini menyatakan bahwa pembuatan teras memberikan pengaruh positif terhadap produktivias tanaman sayuran (Dariah dan Husen 2006). Pengalaman petani di daerah ini ini penting untuk disosialisasikan kepada petani sayuran di daerah lain. Selain penterasan teknologi konservasi secara vegetatif juga bisa diaplikasikan pada usahatani sayuran.



Gambar 53. Teknik konservasi tanah yang tergolong baik pada lahan usahatani berbasis sayuran di dataran tinggi Kopeng, Jawa Tengah

Pengelolaan Tanah Andosol untuk Tanaman Pangan

Tanaman semusim lainnya yang diusahakan pada tanah Andosol adalah tanaman pangan lahan kering, seperti jagung, ketela pohon, kacang tanah. Di beberapa tempat tanah Andosol juga diusahakan untuk padi sawah (Gambar 54), namun luasannya relatif kecil. Ritung (2012) menyatakan bahwa tanah sawah yang terdapat pada tanah Andosol adalah sekitar 405.629 ha atau 5% dari luas total lahan sawah Indonesia.



Gambar 54. Tanaman jagung dan padi ditanam pada tanah Andosol

Tanah Andosol yang diusahakan untuk tanaman pangan umumnya merupakan tanah Andosol dataran rendah, karena tanaman pangan tidak mensyaratkan kondisi iklim seperti sayuran, bahkan sebaliknya tanaman pangan seperti jagung berproduksi tinggi pada ketinggian tempat < 800 m dpl. Selain itu, pada dataran tinggi penggunaan tanah Andosol kalah bersaing dengan tanaman hortikultura.

Permasalahan yang dihadapi pada areal tanaman pangan pada tanah Andosol relatif sama dengan yang dihadapi pada areal sayuran, di antaranya masalah retensi P yang tergolong tinggi. Namun demikian, penggunaan pupuk pada tanah Andosol yang ditanami tanaman pangan tidak setinggi tanaman sayuran. Hal ini diantaranya disebabkan oleh kemampuan petani tanaman pangan untuk membeli pupuk relatif rendah, selain kondisi kesuburan tanah yang sudah tergolong baik untuk pertumbuhan dan produktivitas tanaman pangan. Hasil

penelitian Zulaiha *et al.* (2012) pada tanah Andosol di Bengkulu, dengan ketinggian tempat sekitar 700 m dpl menunjukkan bahwa dengan input yang relatif rendah, jagung varietas Hibrida masih mampu menghasilkan rata-rata pipilan kering $8,4 \text{ t ha}^{-1}$. Tingkat produksi yang dicapai jauh di atas rata-rata produksi nasional yang masih $< 5 \text{ t ha}^{-1}$ (BPS 2012). Penggunaan bahan organik pada tanaman pangan di tanah Andosol juga tidak setinggi di lahan sayuran. Penggunaan pembenah tanah anorganik seperti kapur dapat menanggulangi faktor pembatas kemasaman tanah dan kahat unsur Ca yang banyak ditemukan pada tanah Andosol. Hasil penelitian pada tanah Andosol di Sumatera Barat menunjukkan bahwa penggunaan kapur 2 t ha^{-1} ditambah bahan organik berupa *Tithonia* sp. 10 t ha^{-1} (setara dengan 2 t ha^{-1} berat kering) atau pupuk kandang 10 t ha^{-1} (setara dengan 5 t ha^{-1} berat kering), mampu menghemat penggunaan pupuk N dan K sebanyak 50% dari dosis rekomendasi, dengan tingkat produksi yang tergolong tinggi yakni berkisar antara 9 sampai 11 t ha^{-1} (Veldria 2010). Meski masih mampu berproduksi dengan baik, penggunaan pupuk pada tanah Andosol yang tidak berimbang dalam jangka panjang bisa menyebabkan terjadinya pengurasan hara. Seperti yang ditemukan Widowati *et al.* (2013), yaitu terjadinya gejala keseimbangan negatif pada tanah Andosol di Kopeng, akibat penggunaan pupuk yang lebih rendah dibanding rata-rata kebutuhan tanaman.

Gejala degradasi kualitas tanah Andosol yang digunakan untuk usahatani lahan kering (ladang) ditunjukkan hasil penelitian Prasetya *et al.* (2012), beberapa parameter sifat fisik tanah Andosol (berat isi, penetrasi tanah, agregasi dan konduktivitas hidrolis) yang digunakan untuk lahan pertanian (ladang) lebih rendah dibanding tanah Andosol yang masih ditutupi hutan primer maupun semak belukar. Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa penurunan kualitas fisik tanah pada tanah Andosol yang digunakan untuk lahan tegalan sangat berhubungan dengan menurunnya kadar C-organik tanah. Oleh karena itu pengelolaan pertanian pada tanah Andosol harus senantiasa disertai dengan tindakan konservasi yang memadai, serta tetap memperhatikan pemeliharaan kesuburan tanah dan pengelolaan bahan organik tanah.

Seperti yang umum terjadi pada areal tanaman pangan di lahan kering, penerapan teknik konservasi pada areal tanaman pangan pada tanah Andosol juga seringkali kurang memadai, meskipun alasan serangan hama penyakit tidak menjadi alasan keengganan petani untuk menerapkan teknik konservasi pada lahan tanaman pangan. Aplikasi teknik konservasi seringkali dianggap terlalu mahal untuk tingkat kemampuan petani lahan kering berbasis tanaman pangan. Manfaat yang tidak bisa dirasakan secara langsung juga merupakan salah satu penghambat adopsi teknik konservasi pada areal tanaman pangan. Aplikasi teknik konservasi vegetatif merupakan teknik konservasi yang relatif murah. Penanaman tanaman pakan sebagai komponen utama teknik konservasi, bisa mempunyai nilai tambah jika ada integrasi ternak dalam sistem usahatani, yang mana petani bisa memanfaatkan hasil pangkasan tanaman konservasi sebagai sumber pakan ternak.

Pengelolaan Tanah Andosol untuk Tanaman Tahunan

Tanaman tahunan yang banyak diusahakan pada tanah Andosol umumnya adalah tanaman yang berkembang dan berproduksi baik di wilayah dataran tinggi, misalnya tanaman teh, kopi (khususnya kopi arabika), kina, kayu manis dan lainnya (Gambar 55). Perkebunan teh umumnya terdapat di provinsi-provinsi dengan penyebaran tanah Andosol relatif luas. Misalnya di Jawa Barat (Pangalengan, Bopunjur). Tanaman ini mensyaratkan tanah yang subur dan banyak mengandung bahan organik, tidak terdapat cadas, dengan derajat kemasaman tanah 4,5 - 5,6. Sifat tanah seperti ini merupakan sifat tipikal tanah Andosol. Tanaman teh bisa tumbuh pada elevasi < 800 - > 1.200 m dpl. Namun demikian aroma teh yang dihasilkan dataran tinggi lebih baik dibanding dataran rendah. Pada dataran rendah, tanaman teh juga memerlukan naungan, untuk mengkondisikan lingkungan yang lebih sesuai (Effendi *et al.* 2012).



Gambar 55. Tanaman tahunan yang banyak ditanam pada tanah Andosol (kopi arabika, teh, kayu manis)

Selain tanaman teh, tanaman kopi arabika juga banyak ditanam pada tanah Andosol, karena tanaman ini tumbuh dan berproduksi baik di dataran tinggi. Oleh karena itu usahatani tanaman kopi arabika sering disebut sebagai budidaya gunung. Ketinggian tempat juga berkorelasi dengan variable iklim. Serangan penyakit merupakan kendala jika tanaman ini ditanam di dataran rendah. Tanaman ini juga membutuhkan kondisi tanah yang subur (Sari *et al.* 2013a, Sugiyanto *et al.* 2005), tanah Andosol merupakan tanah yang memenuhi kriteria ini.

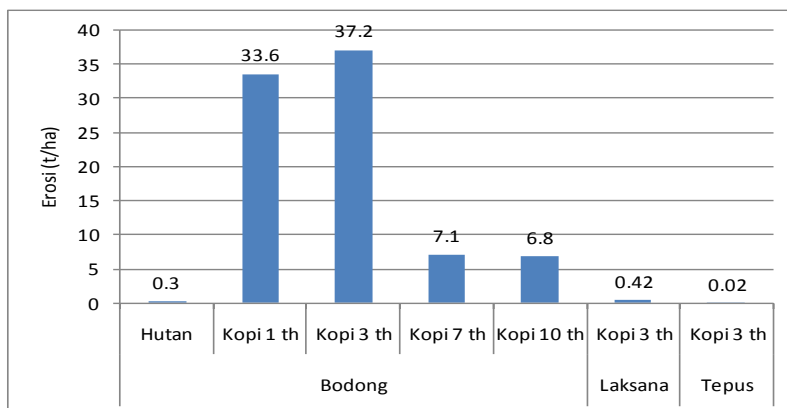
Dataran Tinggi Gayo di Aceh dan Dataran Tinggi Ijen di Jawa Timur merupakan contoh sentra kopi arabika pada tanah Andosol.

Tanaman teh lebih dominan diusahakan perkebunan besar, sedangkan tanaman kopi arabika sebagian diusahakan sebagai perkebunan rakyat. Pada perkebunan besar, umumnya prinsip GAP (*good agricultural practices*) telah diterapkan dengan baik, tidak demikian halnya dengan perkebunan rakyat. Sehingga dikhawatirkan terjadi penurunan kualitas tanah. Hasil analisis tanah di perkebunan rakyat kopi Arabika di kawasan pegunungan Ijen-Raung menunjukkan C-organik, N total, dan ratio C/N cenderung tinggi; KTK sedang sampai tinggi, namun demikian seperti pada tanah Andosol pada umumnya P tersedia cenderung rendah; kation-kation basa Ca, Mg, dan K juga cenderung rendah; serta pH cenderung agak masam. Semakin tinggi tempat dari permukaan laut maka C-organik, N total, C/N, dan pH cenderung semakin tinggi, namun P tersedia, kejenuhan basa dan kation basa Ca, Mg, K semakin rendah (Sari *et al.* 2013a).

Risiko erosi pada usahatani tanaman tahunan relatif lebih rendah dibanding tanaman semusim. Namun terdapat masa kritis yang perlu diwaspadai, yaitu saat awal pertanaman dan tanaman masih relatif muda, karena penutupan tanaman tahunan belum cukup untuk mengamankan permukaan tanah, pada periode ini aplikasi teknik konservasi mutlak diperlukan. Beberapa teknik konservasi seperti rorak, *strip cropping*, gulud searah kontur, teras kebun, dan/atau tanaman penutup merupakan teknik konservasi yang direkomendasikan untuk tanaman kopi dan tanaman tahunan lainnya (Dariah 2004, Pujiyanto 2001).

Tingkat erosi diharapkan akan menurun dengan bertambahnya umur tanaman tahunan. Pada pertanaman kopi tingkat erosi akan menurun dengan bertambahnya umur tanaman (Pujiyanto 2001). Kondisi tanah sangat menentukan tingkat erosi yang terjadi, hasil penelitian Dariah (2004) dan Dariah *et al.* (2005) menunjukkan pada tanah dengan sifat fisik baik, erosi pada tanaman kopi umur sekitar tiga tahun sudah jauh di bawah ambang batas erosi yang diperbolehkan, tidak demikian halnya jika sifat fisik tanah relatif buruk, erosi jauh di ambang batas *tolerable soil loss* (Gambar 56).

Jika dikelola dengan baik, sistem usahatani berbasis tanaman tahunan dapat membentuk sistem *agroforestry*. Mekanisme konservasi tanah yang dapat disumbangkan tanaman tahunan adalah peranannya dalam mengintersepsi air hujan dan mengurangi dampak negatif dari tenaga kinetik air hujan. Beberapa tanaman tahunan seperti kopi dan teh juga memerlukan tanaman naungan, sehingga dapat membentuk struktur tajuk tanaman secara bertingkat atau multistrata, sehingga efek penutupan lahan hampir menyerupai hutan yang sangat efektif dalam melindungi permukaan tanah. Hasil penelitian Sari *et al.* (2013b) menunjukkan bahwa tanaman penaung juga berkontribusi dalam pemeliharaan kesuburan tanah. Untuk mengoptimalkan perlindungan lahan dari ancaman erosi, penutupan permukaan tanah bisa dioptimalkan dengan menanam tanaman penutup tanah, lebih disarankan untuk memilih tanaman penutup dari jenis legum, sehingga bisa berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah. Penyiangian tanaman juga harus dibatasi, jika tanaman tahunan memerlukan kondisi permukaan tanah yang bersih, sebaiknya penyiangian dilakukan secara parsial, misalnya dalam bentuk *ring weeding* atau *strip weeding*.



Gambar 56. Erosi pada lahan hutan dan kopi dengan berbagai umur kopi pada tanah di Desa Bodong (sifat fisik tanah buruk) dan Laksana serta Tepus (sifat fisik tanah baik), Kecamatan Sumberjaya, Lampung Barat (sumber data: Widiyanto 2002, Dariah 2004)

8. PENUTUP

Kawasan Gunung berapi di Indonesia yang mempunyai tanah Andosol umumnya merupakan daerah pertanian yang subur, dengan kepadatan penduduk relatif tinggi, meskipun daerah tersebut bersifat rawan bencana letusan gunung. Andosol merupakan tanah muda yang terbentuk dari bahan vulkanik, dicirikan oleh dua sifat khusus yaitu warna hitam akibat tingginya kandungan bahan organik dan sifat andik yang disebabkan kandungan mineral amorf. Tanah Andosol mengandung unsur hara yang cukup tinggi, berasal dari abu letusan gunung, disamping dari unsur yang dikandung bahan organik. Kesuburan tanah Andosol secara fisik juga didukung oleh kemampuannya yang tinggi dalam memegang/mengikat air, disamping porositas dan drainase yang menguntungkan untuk perkembangan tanaman. Sebagian besar penyebaran tanah Andosol berada pada dataran tinggi dan sedikit di dataran menengah dan rendah, sehingga secara spesifik sangat sesuai untuk tanaman C3.

Luas tanah Andosol di Indonesia sekitar 5,4 juta ha (2,9% dari luas daratan Indonesia), menyebar di Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Lombok, Flores, Maluku Utara dan Sulawesi Utara. Berdasarkan karakteristik biofisik terutama lereng, sekitar 2,05 juta ha tanah Andosol potensial untuk pertanian. Tanah Andosol yang dapat digunakan untuk pertanian tanaman semusim sekitar 1,17 juta ha, berada pada lahan dengan bentuk wilayah datar sampai berombak dan bergelombang, dengan lereng <15%. Sedangkan pada lereng 15-45%, sesuai untuk budidaya tanaman perkebunan seperti teh, kopi, kina, kayu manis. Namun demikian, lahan potensial tersebut belum mempertimbangkan aspek sosial dan hukum, seperti kepemilikan dan peruntukan, sedangkan penetapan kawasan konservasi dan hutan lindung sudah dipertimbangkan.

Retensi P dan potensi erosi yang tinggi seringkali menjadi faktor pembatas utama pengembangan tanah Andosol untuk pertanian. Terdapat indikasi terjadinya degradasi tanah Andosol yang telah dikelola secara intensif. Pengembangan komoditas hortikultura khususnya sayuran juga sering dinilai tidak bersifat ramah lingkungan. Penggunaan input produksi yang berlebih, baik pupuk maupun obat-obatan selain menyebabkan terjadinya in-efisiensi penggunaan input pertanian, juga menyebabkan terjadinya peningkatan nonpoint source pollution. Aplikasi teknik konservasi yang mutlak diperlukan untuk pengembangan pertanian (utamanya tanaman semusim) di lahan berlereng seringkali tidak memadai. Beberapa hasil penelitian menunjukkan aplikasi teknik konservasi dan pemupukan secara berimbang tidak terbukti bisa menurunkan produksi sayuran, seperti yang dikhawatirkan banyak petani sayuran. Tanaman pangan merupakan tanaman semusim lainnya yang dikembangkan pada tanah Andosol, utamanya tanah Andosol yang terdapat di dataran rendah. Pengembangan tanaman pangan pada tanah Andosol utamanya di dataran tinggi seringkali kalah bersaing dengan tanaman hortikultura atau perkebunan.

Tanaman tahunan yang banyak ditanam pada tanah Andosol (terutama di dataran tinggi) adalah teh, kopi arabika, kina, kayu manis, dan buah-buahan. Risiko erosi dari usahatani berbasis tanaman tahunan relatif lebih rendah, namun ada masa kritis yang perlu mendapat perhatian khusus dari segi penanganan bahaya erosi, yaitu di awal pertanaman karena tanaman tahunan belum mampu melindungi tanah secara optimal. Beberapa hasil

penelitian menunjukkan tingkat erosi menurun dengan bertambahnya umur tanaman tahunan. Jika dikelola dengan baik sistem usahatani berbasis tanaman tahunan akan membentuk sistem agroforestri, sehingga pemeliharaan kualitas lahan lebih terjamin.

Pemerintah telah mengeluarkan peraturan perundang-undangan untuk melindungi tanah-tanah subur seperti tanah Andosol, baik dari degradasi kualitas yaitu akibat penurunan kondisi biofisik, maupun degradasi secara kuantitatif akibat terjadinya alih fungsi lahan. Namun demikian sosialisasi sistem penggunaan lahan yang bersifat ramah lingkungan dan pencegahan alih fungsi lahan pertanian (khususnya pada tanah subur seperti tanah Andosol) perlu terus dilakukan, penerapan peraturan perundang-undangan juga perlu terus dikawal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiyoga, W. 2009. Analisis trend hasil per satuan luas tanaman sayuran tahun 1969-2006 di Indonesia. *Jurnal Hortikultura* 19(4):486-499.
- Ajidirman. 2010. Kajian kandungan mineral alofan dan fenomena fiksasi fosfor pada Andisols. *Jurnal Hidrolitan* 1(2):15-20.
- Allen, B.L. and D.S. Fanning. 1983. Composition and soil genesis. Pp 141-192. *In* L.P. Wilding *et al.* (Eds.). *Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concept and Interactions*. Elsevier Sci. Publ. Co. Amsterdam.
- Alloway, B.J. 1995. The origin of heavy metals in soil. *In* Alloway, B.J. (Eds.). *Heavy Metal in Soils*. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Anda, M. and M. Sarwani. 2012. Mineralogical, chemical composition and dissolution of fresh ash eruption: new potential source of nutrient *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:733-747.
- _____, A. Kasno, dan M. Sarwani. 2012. Sifat dan khasiat material letusan Gunung Merapi untuk perbaikan tanah pertanian. Hlm 87-96. *Dalam* Kajian Cepat Dampak Erupsi Gunung Merapi 2010 Terhadap Sumberdaya Lahan dan Inovasi Rehabilitasinya. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Arai, S., Otsuka, H.T. Jonna, and Y. Oba. 1988. Humus Characteristic of Andisols. Pp. 74-79. *In* Kinloch, D.I., S. Shoji, F.H. Beinrorth, and H. Eswaran (Eds.). *Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop*. Japan 20 July to 1 August 1987. Publ. by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington D.C. USA.
- Arifin, M. dan S. Hardjowigeno. 1997. Pedogenesis Andisols berbahan induk abu vulkan andesit dan basalt pada beberapa zone agroklimat di daerah perkebunan teh Jawa Barat. Hlm 17-32. *Dalam* Subagyo *et al.* (Eds.) *Prosiding Kongres Nasional VI HITI*, Buku II, Jakarta.
- Arnold, R.W. 1988. The worldwide distribution of Andisols and the need for an Andisol order in Soil Taxonomy. Pp. 5-12. *In* Kinloch, D.I., S. Shoji, F.H. Beinrorth, and H. Eswaran (Eds.). *Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop*. Japan 20 July to 1 August 1987. Publ. by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington D.C. USA.
- Arsyad. S. 2000. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Hlm 290.
- Badan Pusat Statistik (BPS). 2012. *Statistik Indonesia*. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- _____. 2013. *Statistik Pertanian Indonesia 2013*. <http://www.bps.go.id/>. Diakses tanggal 29 Juli 2014.
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP). 2007. *Teknologi Pengelolaan Sumberdaya Lahan Pertanian Mendukung Prima Tani*. Pandum. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- _____. 2014. *Klasifikasi Tanah Nasional*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.

- Balai Penelitian Tanah. 2004. Petunjuk Teknis Pengamatan Tanah. Balai Penelitian Tanah, Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. Hlm 177.
- Balai Penelitian Tanaman Sayuran (Balitsa). 2006. Ketersediaan Inovasi Teknologi Sayuran Mendukung Prima Tani. Balai Penelitian Tanaman Sayuran Lembang (Monograph).
- Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungpian. 2012. Kamus Gunungapi. <http://merapi.bgl.esdm.go.id/publikasi.php?Page-pustaka&subpage-kamus-gunung-api>. Diakses tanggal 18 Juli 2014.
- Bechstedt, H.D. 1997. Training manual on participatory research for sustainable land management. Ibsram/Asialand Network. The Management of Sloping Land for Sustainable in Indonesia.
- Biro Humas Kementan. 2014. Bahan press release. Penanganan Bencana Erupsi Gunung Sinabung dan Gunung Kelud. Kementerian Pertanian Republik Indonesia. 4 Maret 2014.
- Buol, S.W., F.D. Hole, and R.J. McCracken. 1989. Soil Genesis and Classification. Ames: Iowa State University Press. P 446.
- Chien, S.H., G. Carmona, L.L. Prochnow, and E.R. Austin. 2003. Cadmium availability from granulated and bulk-blended phosphate-potassium fertilizers. *J. Environ. Qual.* 32: 1191-1914.
- Dahlgren, R., S. Shoji, and M. Nanzyo. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. Pp 101-143 *In* S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren (Eds.). *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilizations. Development in Soil Science 21.* Elsevier, Amsterdam.
- Dai, J. dan Hikmatullah. 1993. Landscape lantai kaldera Gedongsurian dan Lam Teuba serta beberapa sifat tanahnya. Hlm 69-82. *Dalam* Suhardjo *et al.* (Eds.). *Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Potensi Sumberdaya Lahan.* Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Dames, T.G.W. 1955. The Soils of East Central Java. *Contr. Gen. Agri. Res. Sta. Bogor*, No.141.
- Dariah, A. 2004. Tingkat Erosi dan Kualitas Tanah pada Lahan Usahatani Berbasis Kopi di Sumberjaya, Lampung Barat. Disertasi. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- _____, F. Agus, dan Maswar. 2005. Kualitas tanah pada lahan usahatani berbasis tanaman kopi: Studi Kasus di Sumber Jaya, Lampung Barat. *Jurnal Tanah dan Iklim* (23):48-57.
- _____ dan E. Husen. 2007. Optimalisasi multifungsi pertanian pada usahatani berbasis tanaman sayuran. Hlm 263-278. *Dalam* Prosiding Seminar Multifungsi dan Revitalisasi Pertanian. Badan Litbang Pertanian. MAFF Japan, ASEAN Sekretariat. Jakarta, 2006.
- _____, S. Rochayati, dan W. Hartatik. 2012. Sistem pengelolaan lahan sayuran ramah lingkungan dan berkelanjutan. Hlm 499-510. *Dalam* Ananto *et al.* (Eds.). *Kemandirian Pangan Indonesia dalam Perspektif Kebijakan MP3EI.*
- Departemen Pertanian. 2006. Peraturan Menteri Pertanian No. 47/Permentan/OT.140/10/2006. Tentang Pedoman Umum Budidaya Pertanian pada Lahan Pegunungan. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.

- Devnita, R. 2012. Melanic and fulvic andisols in volcanic soils derived from some volcanoes in West Java. *Indonesia Journal of Geology* 7(4):227-240.
- Djaenudin, D. and M. Sudjadi. 1988. Andisols in Indonesia: A case study in two land-catena of Cikajang and Cikole areas, West Java. Pp 463-476. *In* Kinloch, D.I., S. Shoji, F.H. Beinrorth, and H. Eswaran (*Eds.*). Proceedings of The Ninth International Soil Classification Workshop. Japan 20 July to 1 August 1987. Publ. by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington D.C. USA.
- _____. H. Marwan, H. Subagyo, A. Mulyani, dan N. Suharta. 2006. Kriteria Kesesuaian Lahan untuk Komoditas Pertanian. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian, Bogor.
- _____, B.P. Gunawan, dan M. Soekardi. 1989. Sekuen tanah berkembang dari bahan vulkan di daerah Cikajang, Garut, Jawa Barat. Hlm. 65-78. *Dalam* Risalah Hasil Penelitian Tanah, Pusat Penelitian Tanah. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- Duchaufour, P. 1982. Andosols. Pp 196-210. *In* T.R. Paton (translated), *Pedology: Pedogenesis and Classification*. George Allen and Unwin, London, Boston, and Sydney.
- Dudal, R. and M. Soeprahardjo. 1957. Soil Classification in Indonesia. *Contr. Gen. Agric. Res Sta. Bogor*.
- _____. 1961. Some consideration on the genetic relationship between Latosols and Andosols in Java (Indonesia). *Trans of 7th Int. Cong. of Soil Sci IV*. Madison, Wisconsin, USA.
- Effendi, D. S., M. Syakir, M. Yusron, dan R.S. Hartati. 2012. Budidaya dan Pasca Panen Teh. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan, Kementerian Pertanian. Hlm 60.
- Edison dan Mukhlis. 2012. Analisis respon penawaran petani kentang di Kecamatan Kayu Aro, Kabupaten Kerinci. *Jurnal Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian* 15(1):1-9.
- Endriani dan Zurhalena. 2008. Kajian beberapa sifat fisik Andisol pada beberapa penggunaan lahan dan beberapa kelerengan di Kecamatan Gunung Kerinci. Hlm V.74-V.85. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi. Universitas Lampung. 17-18 November 2008.
- Erfandi, D., U. Kurnia, dan O. Sopandi. 2002. Pengendalian erosi dan perubahan sifat fisik tanah pada lahan sayuran berlereng. Hlm. 277-286. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumber Daya Lahan dan Pupuk: Buku II. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor, Cisarua-Bogor, 30-31 Oktober 2001.
- Eswaran, H. 1971. Morphology of allophane, imogolite and halloysite. *Clay Mineral* 1972 (9):281-285.
- FAO/UNESCO. 1974. Soil Map of The Worlds. Volume I, Legend. FAO/UNESCO, Rome.
- _____. 1979. Soil Map of the Worlds. United Nation Educational Scientific and Cultural Organization. Place de fontenoy, Vol IX. Southeast Asia, Paris.
- _____. 1988. Soil Map of The Worlds. Revised Legend. FAO-UNESCO, Rome.

- FAO (Food and Agriculture Organization). 1995. The Den Bosch Declaration and Agenda for Action on Sustainable Agricultural Research. Report of the Conference. FAO, Rome, Italy.
- Fiantis, D. and E. Van Ranst. 1997. Properties on volcanic ash soils from the Marapi and Talamau volcanoes in West Sumatera. Pp 1-5. *In Subagyo et al. (Eds.) Prosiding Kongres Nasional VI HITI, Buku II, Jakarta 12-15 Desember 1995.*
- _____, E. Van Ranst, and J. Shamshuddin. 1998. Mineralogy and charge properties of volcanic ash soils from West Sumatra, Indonesia. *Malaysia Journal of Soil Science* 2:45-57.
- _____, E. Van Ranst, J. Shamshuddin, S. Zauyah, and I. Fauziah. 2000. Mineralogy and sand surface morphology of selected Andisols from West Sumatra, Indonesia. *Malaysia Journal of Soil Science* 4:9-24.
- _____, N. Hakim, and E. Van Ranst. 2005. Properties and utilization of Andisols in Indonesia. *JIFS* 2:29-37.
- _____. 2006. Laju Pelapukan Kimia Debu Vulkanis G. Talang dan Pengaruhnya Terhadap Pembentukan Mineral Liat Non Kristalin. Artikel Penelitian. Kerjasama Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi dengan Universitas Andalas, Padang.
- _____, M. Nelson, E. Van Ranst, J. Shamshuddin, and N.P. Qafoku. 2009. Chemical weathering of new pyroclastic deposits from Mt. Merapi (Java), Indonesia *J. Mt. Sci.* 6:240-254.
- _____, M. Nelson, J. Shamshuddin, T.B. Goh, and E. Van Ranst. 2011. Changes in the chemical and mineralogical properties of Mt. Talang volcanic ash in West Sumatra during the initial weathering phase. *Soil Science and Plant Analysis* 42:569-585.
- FitzPatrick, E. A. 1980. *Soils: Their Formation, Classification and Distribution.* Longman London. P 353.
- Ginting, R.C.B., R. Saraswati, dan E. Husen. 2012. Mikroorganisme pelarut fosfat. Hlm 141-158. *Dalam Simanungkalit et al. (Eds.). Pupuk Organik dan Pupuk Hayati.* Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Hardjosesastro, R., H. Suyanto, dan A.M. Satari. 1983. Andosol dari daerah Sukamantri Kabupaten Bogor. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 2:18-29.
- Hardjowigeno, S. 1985. *Genesis dan Klasifikasi Tanah.* Fakultas Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor. Hlm 284.
- _____. 1995. *Ilmu Tanah.* Revisi Cetakan ke 4. Akademika Presindo, Jakarta. Hlm 233.
- Haryati, U., D. Erfandi, dan Y. Sulaeman. 2013a. Teknik konservasi, hubungannya dengan sifat fisik tanah serta serangan hama penyakit pada tanaman kentang di dataran tinggi Kerinci. Hlm. 305-318. *Dalam Sulaeman et al. (Eds.) Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan.* Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian. Bogor, 29 Mei 2013.
- _____, T. Budiarti, dan A.D. Makalew. 2013b. Konservasi lansekap pertanian lahan kering berbasis sayuran mendukung pengembangan agrowisata di Dataran Tinggi Merbabu. Hlm. 60-87. *Dalam Widowati et al. (Eds.) Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi.* Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.

- _____ dan Undang Kurnia 2001. Pengaruh teknik konservasi tanah terhadap erosi dan hasil kentang (*Solanum tuberosum*) pada lahan budidaya sayuran di dataran tinggi Dieng. Hlm 439-460. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Reorientasi Pendayagunaan Sumberdaya Tanah, Iklim, dan Pupuk. Buku II. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 31 Oktober-2 November 2000.
- Haryono dan M. Noor. 2012. Kajian cepat dampak erupsi Gunung Merapi 2010: Berkah bencana bagi sumberdaya pertanian. Hlm 1-12 *Dalam* Kajian Cepat Dampak Erupsi Gunung Merapi 2010 Terhadap Sumberdaya Lahan dan Inovasi Rehabilitasinya. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Henny, H., K. Murti Laksono, N. Sinukaban, dan S.D. Tarigan. 2011. Erosi dan kehilangan hara pada pertanaman kentang dengan beberapa sistem guludan pada Andisol di hulu DAS Merao, Kabupaten Kerinci, Jambi. *J. Solum* 8(2):43-52.
- Hidayat, A. dan A. Mulyani. 2005. Lahan kering untuk pertanian. Hlm 7-38. *Dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Hidayat, A., Y. Hilman, N. Nurtika, and Suwandi. 1990. Result of lowland vegetable research. *In* Proceedings of the National Vegetable Workshop. Lembang.
- Hikmatullah, H.H. Djohar, dan A. Hidayat. 1994. Identifikasi sifat andik pada tanah berbahan induk abu vulkan muda Gunung Dempo di Provinsi Sumatera Selatan. Hlm 117-126 *Dalam* Djohar *et al.* (Eds.) Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____, H. Subagjo, Sukarman, dan B.H. Prasetyo. 1999. Karakteristik Andisol berkembang dari abu vulkanik di Pulau Flores, Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Tanah dan Iklim* 17:14-25.
- _____, H. Subagjo, and B.H. Prasetyo. 2003. Soil properties of the eastern toposequence of Mount Kelimutu, Flores Island, East Nusa Tenggara and Their Potential for Agricultural Use. *Indonesia Journal of Agricultural Science* 4(1):1-11.
- _____. 2008. Andisol dari daerah Tondano, Sulawesi Utara: sifat-sifat dan klasifikasi. *Jurnal Tanah Tropika* 13(1):77-85.
- _____. 2009. Karakteristik tanah-tanah vulkan muda dan kesesuaian lahannya untuk pertanian di Halmahera Barat. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan* 9(1):20-29. Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- _____ and K. Nugroho. 2010. Tropical volcanic soils from Flores Island, Indonesia. *J. Trop Soils* 15(1):83-93.
- Hilman, Y. 2013. Teknologi Inovatif Budidaya Sayuran Lahan Kering Berbasis Pengelolaan Hara Terpadu Menuju Terwujudnya Ekonomi Biru (Pertanian Ramah Lingkungan). Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Budidaya Tanaman, Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian, Bogor, Desember 2013.
- Hindersah, R., A.P. Hidayat, dan M. Arifin. 2009. Pengaruh inokulasi *Azotobacter* terhadap produksi dan kandungan kadmium tajuk selada yang ditanam di Andisol terkontaminasi kadmium. *J. Agrikultura* 20(3):171-175.
- <http://www.crystalinks.com/rof.html>. Diakses 10 Mei 2014.
- <http://foto-wisata.com/wp-content/uploads/2013/12/Gunung-Bromo>. Diakses tanggal 10 Mei 2014.

- http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Indonesia/Maps/map_indonesia_volcanoes.html.
Diakses 12 Mei 2014.
- http://id.wikipedia.org/wiki/Daftar_gunung_berapi_di_Indonesia. Diakses 19 Juli 2014.
- <http://rovicky.wordpress.com/2009/12/>
- Huang, P.M. 1989. Felspars, olivine, pyroxenes, and amphiboles. Pp 945-105 *In* J.B. Dixon and S.B. Weed (Eds.). *Minerals in Soil Environments*. Soil. Sci. of Amer., Madison, Wisconsin, USA.
- Hue, N.V. Effect organic acid/anions on P sorption and phyto availability in soils with different mineralogies. *Soil Sci* 152:463-471.
- Inoue, K. and T. Higashi. 1988. Al-and Fe-humus complexes in Andisols. Pp 81-96. *In* D.I. Kinloch, S. Shoji, F.H. Beinroth, and H. Eswaran (Eds.), *Proc. of the 9th Int. Soil Classification Workshop*, Japan. 20 July to 1 August, 1987. Publ. by Jap. Committee for 9th Int. Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington, D.C., USA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the national greenhouse gas inventories programme. *In* Eggleston *et al.* (Eds.). *IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme*, Published by Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
- Irawan. 2013. Pertanian ramah lingkungan: Indikator dan cara pengukuran aspek sosial ekonomi. Hlm 659-674. *Dalam* Sulaeman *et al.* (Eds.) *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor, 29 Mei 2013.
- Ismangun dan M. Soekardi. 1993. Pencirian sifat andik pada Andosol di sekitar Malang, Jawa Timur. Hlm 49-64. *Dalam* Suhardjo *et al.* (Eds.). *Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Potensi Sumberdaya Lahan*. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology*. MacGraw-Hill Book Co. Inc. New York and London.
- Juarsah, I., U. Haryati, dan U. Kurnia. 2002. Pengaruh bedengan dan tanaman penguat teras terhadap erosi dan produktivitas tanah pada lahan sayuran. Hlm 277-286. *Dalam* *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumber Daya Lahan dan Pupuk: Buku II*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor, Cisarua-Bogor, 30-31 Oktober 2001.
- Kanno, I. 1961. Genesis and classification of main genetic soil types in Japan, I. Introduction and Humic Allophane Soils. *Bull. Kyushu Agr. Expt. Stn.* 7:1-185 (in English abstract).
- Kasno, A., A.S. Ibrahim, dan A. Rachman, 2013. Pengelolaan hara tanah dan peningkatan pendapatan petani dalam pola tanam sayuran dataran tinggi di Kopeng dan Buntu. Hlm 193-200. *Dalam* Widowati *et al.* (Eds.). *Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian.

- Koesoemadinata, S., Y. Noya, dan D. Kadarisman. 1981. Peta Geologi Lembar Ruteng, Nusa Tenggara Timur, Skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Kosman, E.A, H. Suganda, H. Kusnadi, S. Sukmana, dan D. Santoso. 1998. Pengaruh teknologi konservasi tanah terhadap hara terangkut tanaman sayuran di lahan berlereng pada tanah Andisol. Hlm 23-32. *Dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Fisika dan Konservasi Tanah dan Air serta Agroklimat dan Hidrologi. Cisarua, Bogor, 4-6 Maret 1997. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- Kurnia, U., H. Suganda, D. Erfandi, dan H. Kusnadi. 2004. Teknologi konservasi tanah pada budidaya sayuran dataran tinggi. Hlm 133-150. *Dalam* Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Pertanian Berlereng. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____, Y. Sulaeman, dan A. Muti. 2004. Potensi dan pengelolaan lahan kering dataran tinggi. Hlm 227-245. *Dalam* Adimihardja *et al.* (Eds.). Sumberdaya Lahan Indonesia dan Pengelolaannya. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian, Bogor.
- Leamy, M.L., G.D. Smith, F. Colmet-Daage, and M. Otowa. 1980. The morphological characteristics of Andisols. Pp 17-34. *In* K.G. Theng (Eds.), Soils with Variable Charge. New Zealand SOC. Soil Sci., Lower Hutt, New Zealand.
- Letidjawa, A.E.M. 2008. Kinetika Transformasi Boron pada Andosol Sukamantri, Grumusol Cihea dan Latosol Darmaga. Departemen Ilmu-tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Mohr, E.C.J. 1938. The relation between soil and population density in the Netherlands Indies. *Comptes Rendus du Congres International de Geographic*, Amsterdam. Tome Deuxiem, Section IIIc. Pp. 478-493.
- _____ and F.A. van Baren. 1954. Tropical Soils. A critical study of soil genesis as related to climate, rock and vegetation. The Hague.
- _____ and J. Van Schuylenborgh. 1972. Tropical Soils. A Comprehensive Study of Their Genesis. Mouton-Ichtiar Baru-Van Hoeve. The Hague Paris-Djakarta.
- Munir. M.S. 1996. Tanah-Tanah Utama Indonesia. Karakteristik; Klasifikasi dan Pemanfatannya. PT Dunia Pustaka Jaya. Jakarta.
- Nanzyo, M., R. Dahlgren, and S. Shoji. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. Pp 145-187. *In* S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren (Eds.). Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilizations. Development in Soil Science 21. Elsevier, Amsterdam.
- Nakada, S. and M. Yoshimoto. 2014. Eruptive activity of Sinabung volcano in 2013 and 2014. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo.
- Noor, D. 2012. Pengantar Geologi. Program Studi Teknik Geologi. Fakultas Teknik, Universitas Pakuan Bogor. Hlm 324.
- Parfitt, R.L. and J. M. Kimble. 1989. Conditions for formation of allophane in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:971-977.

- _____ and T. Henmi. 1982. Comparison of an oxalate extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28:183-190.
- _____ and A.D. Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. Pp. 1-8. *In* E.F. Caldas and D.H. Yaalon (Eds.), *Volcanic Soils, Weathering and Landscape Relationships of Soils on Tephra and Basalt*, Catena Supplement 7. Catena Verlag, West Germany.
- Poniman, Indratin, dan M.T. Sutriadi. 2013. Residu pestisida di lahan sayuran dataran tinggi Dieng. Hlm 328-336. *Dalam* Widowati *et al.* (Eds.) *Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Pramuji dan M. Bastaman. 2009. Teknik analisis mineral tanah untuk menduga cadangan sumber hara. *Buletin Teknik Pertanian* 14(2):80-82. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Prasetya, B., S. Priyono, dan Y. Widjiawati. 2012. Vegetasi pohon hutan memperbaiki kualitas tanah Andisol Ngabab. *Indonesian Green Technology Journal* 1(1):1-6.
- 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*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Departemen Pertanian.
- _____. 2005. Andisol: karakteristik dan pengelolaannya untuk pertanian di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 1(1):1-9. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- _____, N. Suharta, dan E. Yatno. 2009. Karakteristik tanah-tanah andik dari bahan piroklastis masam di dataran tinggi Toba. *Jurnal Tanah dan Iklim* (29):1-14. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor.
- Pratomo, I. 2006. Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah. *Jurnal Geologi Indonesia* 1(4):209-227.
- Pujianto, A. Wibawa, dan Winaryo. 2001. Pengaruh teras dan tanaman penguat teras terhadap erosi dan produktivitas kopi arabika. *Pelita Perkebunan* 17:18-29.
- Purnomo, J. 2013. Pemupukan berimbang terhadap tanaman cabai pada tanah Typic Hapludands di Cikembang Sukabumi. Hlm 218-228. *Dalam* Widowati *et al.* (Eds.). *Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Pusat Penelitian Tanah. 1983. Jenis dan Macam Tanah di Indonesia untuk Keperluan Survai dan Pemetaan Tanah Daerah Transmigrasi. Lampiran *Terms of Reference* Type A. Survai Kapabilitas Tanah. No. 59a/1983. Pusat Penelitian Tanah, Badan Litbang Pertanian. Hlm 25.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (Puslittanak). 1998. Pemetaan Sumberdaya Tanah Tingkat Semi Detail Daerah Tondano, Sulawesi Utara untuk Mendukung Penyediaan Air Bersih dan Pembangkit Tenaga Listrik. LREPP II Part C. Dok. 01/1998 (*unpublished*).

- _____. 2000. Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia, skala 1:1.000.000. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian, Bogor.
- Oppenheimer, C. 2002. Limited global change due to the largest known Quaternary eruption, Toba \approx 74 kyr BP?. *Quaternary Science Reviews* 21 (14–15):1593–1609.
- Rachim, D.A. dan M. Arifin. 2011. Dasar-dasar Klasifikasi Taksonomi Tanah. Pustaka Reka Cipta. Bandung. Hlm 402.
- Rachman, A. dan A. Dariah. 2009. Pengelolaan tanah terpadu lahan sayuran di pegunungan. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Pekan Kentang 2008. Lembang 20-21 Agustus 2008. ACIAR. Balitsa. Puslitbang Hortikultura, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- Ratman, N. dan A. Yasin. 1978. Peta Geologi Lembar Komodo, Nusa Tenggara Timur, Skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Ribbe, P.H. 1975. Feldspar mineralogy. *Rev. Mineral. Vol 2. Min. Soc. Am. Washington DC.*
- Ridwandi, Mukhlis, dan M. Sembiring. 2013. Morfologi dan klasifikasi tanah lereng utara Gunung Sinabung Kabupaten Karo Sumatera Utara. *Jurnal Online Agroekoteknologi* 2(1):324-332.
- Ritung, S., K. Nugroho, A. Mulyani, dan E. Suryani. 2011. Petunjuk Teknis Evaluasi Lahan untuk Komoditas Pertanian (Edisi Revisi). Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Bogor. Hlm 168.
- _____. 2012. Karakteristik dan sebaran sawah di Indonesia. Hlm 83-98. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pemupukan dan Pemulihan Lahan terdegradasi. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor, 29-30 Juli 2012.
- Saida, S. Sabiham, Widiatmaka, dan S.H. Suchahyo. 2011. Analisis keberlanjutan usahatani hortikultura sayuran pada lahan berlereng di hulu DAS Jeneberang, Sulawesi Selatan. *Jurnal Matematika, Sains dan Teknologi* 12(2):101-112.
- Saidi. 2004. Kajian potensi kesuburan tanah pada sentra pertanaman hortikultura di Sumatera Barat. *Stigma* 12(2):134-139.
- Sari, N.P., T.I. Santoso, dan S. Mawardi. 2013a. Sebaran tingkat kesuburan tanah pada perkebunan rakyat kopi arabika di Dataran Tinggi Ijen-Raung menurut ketinggian tempat dan tanaman penayang. *Pelita Perkebunan* 29(2):93–107.
- _____. 2013b. Peranan penayang di perkebunan kopi arabika rakyat dalam menunjang kesuburan tanah: studi kasus di kawasan Ijen-Raung. Hlm 235-242. *Dalam* Suleman *et al.* (Eds.) Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan. Bogor, 29 Mei 2013. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Saridevi, G.A.A.R., I.W.D. Atmaja, dan I.M. Mega. 2013. Perbedaan sifat biologi tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan di tanah Andisol, Inceptisol, dan Vertisol. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika* 2(4):214-223.
- Sembiring, A. dan R. Rosliani. 2011. Analisis anggaran parsial rakitan komponen teknologi pengelolaan tanaman kentang secara terpadu di dataran tinggi. *Jurnal Hortikultura* 21(4):385-392.
- Setyanto, P., M. Ariani, Wihardjaka, Anggri, dan A. Pramono. 2013. Emisi dari pemupukan. Hlm 70-75. *Dalam* Panduan Teknis Penghitungan Emisi dan Serapan Gas Rumah Kaca

- Sektor Berbasis Lahan pada Skenario *Business as Usual* (BAU) dan Aksi Adaptasi. Bappenas Republik Indonesia.
- Shaw, B.H., A.G. Morris, and M.L. Jackson. 1973. Amphibole and pyroxene in soil. Pp 121-128. *In* Jackson (Eds.). Soil Mineral Weathering. University of Wisconsin, Madison, WI.
- Shoji, S. and J. Masui. 1969. Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido. *Soil Sci. Plant Nutr.* 15:191-201.
- _____. 1971. Opaline silica of recent volcanic ash soils in Japan. *J. Soil Sci.* 22:101-112.
- _____, K. Kobayashi, I. Yamada, and J. Masui. 1975. Chemical and mineralogical studies on volcanic ashes 1. Chemical composition of volcanic ashes and their classification. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21:311-318.
- _____, R. Dahlgren, and M. Nanzyo. 1993. Terminology, concepts and geographic distribution of volcanic ash soils. Pp 7-35 *In* S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren (Eds.). Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilizations. Development in Soil Science 21. Elsevier, Amsterdam.
- _____, R. Dahlgren, and M. Nanzyo. 1993. Genesis of Volcanic Ash Soils. Pp 37-71 *In* S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren (Eds.). Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilizations. Development in Soil Science 21. Elsevier, Amsterdam.
- _____, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilizations. Development in Soil Science 21. Elsevier, Amsterdam. 288 p.
- Simkin, T. and L. Siebert 1994. Volcanoes of the World: A Regional Directory, Gazetteer, and Chronology of Volcanism During the Last 10,000 Years (ed. 2nd). Geoscience Press. ISBN 0-945005-12-1.
- Sinukaban, N., H. Pawitan, S. Arsyad, I. L. Armstrong and M.G. Nethary. 1994. Effect of soil conservation practice and slope lengths on runoff, soil loss and yield of vegetables in West Java. *Australian J. of Soil and Water Conservation* 7(3):25-29.
- Sipahutar, I., L.R. Widowati, dan F. Agus. 2013. Dinamika hara N, P, dan K pada pola tanam sayuran di Dataran Tinggi Dieng. Hlm. 201-210. *Dalam* Widowati *et al.*, (Eds) Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. Eleventh Edition, 2010. Natural Resources Conservation Service-United States Department of Agricultural, Washington DC.
- _____. 2014. Keys to Soil Taxonomy. Twelfth Edition, 2014. Natural Resources Conservation Service-United States Department of Agricultural, Washington DC.362 p.
- Subagjo, H. and P. Buurman. 1980. Soil catenas on the west and north-east slopes of the Lawu volcano in East Java. Pp 49-70. *In* P. Buurman (Eds). Red Soils In Indonesia Center for Agricultural Publishing and Documentation Wageningen.
- _____, B. H. Prasetyo and A.M. Sudihardjo. 1997. Pedogenesis of soils developed from andesitic volcanic materials at medium altituded in Mount Manglayang. Bandung Area. West Java. *AGRIVITA*, 20 (4): 204-219.

- _____, N. Suharta dan A. B. Siswanto. 2004. Tanah-tanah pertanian di Indonesia. Hal 21-65. *Dalam* Adimihardja *et al.*, (Eds). Sumberdaya Lahan Indonesia dan Pengelolaannya. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian, Bogor.
- Sudihardjo, A. M., N. Tedjoyuwono dan D. Mulyadi. 1997. Andisolisasi tanah-tanah di wilayah karst Gunung Kidul. *Dalam* Subagyo, *et al.*, (Eds) Hlm 41-58 Prosiding Kongres Nasional VI HITI, Buku II, Jakarta 12-15 Desember 1995.
- Sudirdja, R. dan R. Hindersah. 2007. Konsentrasi kadmium di lahan pertanian tanaman sayuran di Lembang, Bandung. *J. Peng. Wil.* 3:6-10.
- Suganda, H., dan N. L. Nurida. 2013. Prediksi dan tingkat bahaya erosi pada lahan usaha tani pegunungan di Kabupaten Temanggung Jawa Tengah. Hlm 229-239. *Dalam* Widowati *et a l.* (Eds) Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- _____, M. S. Djunaedi, D. Santoso, dan S. Sukmana. 1997. Pengaruh cara pengendalian erosi terhadap aliran permukaan, tanah tererosi, dan produksi sayuran pada Andisols. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 15:38-50.
- _____, A. Abujamin, A. Dariah, dan S. Sukmana 1994. Pengkajian teknik konservasi tanah dalam usaha tani tanaman sayuran pada Andisols Batulawang, Pacet. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk*, 12:47-57.
- Sugiyanto, Sugiyono dan A. Wibawa. 2005. Status hara tanah di perkebunan kopi dan kakao di Jawa Timur (Periode 2000-2005). *Warta Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia*, 21:120-124.
- Suhardjo, H. dan Hikmatullah. 2001. Tanah, landform dan potensinya untuk pertanian di daerah sekitar Danau Tondano, Sulawesi Utara. *Jurnal Tanah Tropika*. Vol 13:11-21.
- Sujitno, E. 2013. Peningkatan produksi tanaman tomat melalui penerapan pupuk majemuk lengkap Agra Agro di lahan dataran tinggi. Hlm. 308-314 *Dalam* Widowati *et al.*, (Eds) Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- _____ dan T. Fahmi, 2013. Kajian beberapa jenis pupuk organik dalam budidaya tanaman bawang daun pada lahan dataran tinggi di kabupaten Bandung. Hlm 128-134 *Dalam* Widowati *et al.*, (Eds). Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Suparto, Hikmatullah, Wahyunto dan A. Hidayat. 1989. Sifat dan klasifikasi tanah berkembang dari volkan andesitik-dasitik daerah Gunung Seulawah Agam, Kabupaten Aceh Besar. Hlm: 79-93. *Dalam* Kurnia, U. (Eds). *Risalah Hasil Penelitian Tanah*, Pusat Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Supriyadi, H., N. Sutrisna dan S.R.P. Sitorus. 2013. Model usahatani sayuran dataran tinggi berbasis konservasi di daerah sub DAS Cikapundung. Hlm 240-254. *Dalam* Widowati *et al.* (Eds). Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian.

- Sukarman dan C. Tafakresnanto. 1992. Klasifikasi Tanah. Dalam Sumberdaya Lahan/Tanah di Indonesia. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____, H. H. Djohar dan P. Sudewo. 1993. Masalah klasifikasi tanah merah dari bahan tuf andesitik di daerah beriklim kering, studi kasus Rhodustalf dari Kabupaten Dompur, Propinsi Nusa Tenggara Barat. *Pembr. Pen. Tanah dan Pupuk* No 11/1993: 47-53. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____ dan D. Subardja. 1997. Identifikasi dan karakterisasi tanah bersifat andik di Kabupaten Sikka, Flores Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 15:1-10. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____, D. Djaenudin dan H. Suhardjo. 1999. Karakteristik tanah berbahan induk batuan andesit yang tertutup abu vulkan dan tufa batu apung di Gunung Kimangbuleng, Flores, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Tanah dan Iklim* (17):14-26. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____. 2004. Identifikasi Unsur-unsur Satuan Peta Tanah Semi Detail Menggunakan Citra Landsat-7 ETM dan Model Elevasi Digital di Daerah Bogor. Disertasi Doktor. Fakultas Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Hlm 246 .
- _____ dan E. Suryani. 2013. Evaluasi lahan salah satu upaya menuju pertanian ramah lingkungan. Hlm. 735-746. *Dalam Sulaeman et al.*, (Eds) *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor, 29 Mei 2013.
- _____, Suparto dan W. Wahdini. 2014. Sebaran dan karakteristik abu vulkanik hasil erupsi Gunung Sinabung di Sumatera Utara. *Jurnal Tanah dan Iklim*, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (Dalam proses).
- Surono. 2014. Lahar Dingin atau Lahar Hujan? Ini Bedanya. <http://nefosnews.com/post/lingkungan/lahar-dingin-atau-lahar-hujan-ini-bedanya>. Diakses tanggal 21 Juli 2014.
- Susila, A. D. 2006. Panduan Budidaya Tanaman Sayuran. Bagian Produksi Tanaman, Departemen Agronomi dan Hortikultura, Institut Pertanian Bogor. 131 Halaman.
- Stothers, R. B. 1984. The Great Tambora Eruption in 1815 and Its Aftermath. *Science* 224 (4654):1191-1198.
- Sutriadi, M. T. 2013. Pengaruh pemupukan nitrogen di atas dosis rekomendasi terhadap produksi tanaman sayuran dan pendapatan petani di dataran tinggi Dieng, Kab. Wonosobo. Hlm 261-272. *Dalam Sulaeman et al.*, (Eds). *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Suwanda, M. H. 2013. Ekses lingkungan dan pendekatan multidimensional scaling dalam perspektif pertanian ramah lingkungan. Hlm. 659-674. *Dalam Sulaeman et al.*, (Eds) *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor, 29 Mei 2013.
- Suwandi. 1982. Effects of dolomite application on tomato, potato and bean grown in highland areas of Lembang. *Bull. Penel. Hort.* 9 (4):7-16.
- _____. 1988. Effect of mulching and planting distance of Talaud variety of Chinese cabbage. *Bull. Penel. Hort.* 16 (2):26-33.

- _____ dan A. Asandhi. 1995. Pola usahatani berbasis sayuran berwawasan lingkungan untuk meningkatkan pendapatan petani. Hlm 13-28. *Dalam* Prosiding Seminar Ilmiah Nasional Komoditas Sayuran.
- _____. 2009. Menakar Kebutuhan Hara Tanaman dalam Pengembangan Inovasi Budidaya Sayuran Berkelanjutan. Pidato Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Budidaya Tanaman. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. 53 Halaman.
- Suwarna, N., S. Santosa dan S. Koesoemadinata. 1990. Peta Geologi Lembar Ende Nusa Tenggara Timur, Skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- Takahashi, T., R. Dahlgren, and P. van Susteren. 1993. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic materials in the xeric moisture regime of northern California. *Geoderma* 59:131-150.
- Tan, K. H. and J. Van Schuylenborgh. 1961. On the classification and genesis of soils developed over acid volcanic material under humid tropical condition. *Neth. J. Agric. Sci.* 9:41-54.
- _____. 1984. *Andosols*. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 418 p.
- _____. 1992. *Principle of Soil Chemistry* 2nd edition. Marcell Dekker. New York. 352 p.
- _____. 1998. *Andosol*. Program Studi Ilmu Tanah. Program Pasca Sarjana, Universitas Sumatera Utara, Medan 75 hal.
- Tavarnier, R. and H. Eswaran. 1972. Basic concepts of weathering and soil genesis in humid tropics. *Second Asean Conf.* 1:383-392.
- Tempo, Jum'at, 30 Mei 2014. Gunung Sangeang Api Meletus, Tak Ada Korban Jiwa. <http://www.tempo.co/read/news/2014/05/30/058581298/Gunung-Sangeang-Api-Meletus-Tak-Ada-Korban-Jiwa>. Dikases 18 Juli 2014.
- Tim Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 2014. Laporan Hasil Kajian Dan Pengembangan Pertanian Berbasis Inovasi Di Wilayah Bencana Erupsi Gunung Sinabung, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Tim Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian (Tim BBSDLP). 2013. Laporan Survey Inventarisasi dan Identifikasi Lahan skala 1:50.000 di Lombok Timur. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Tim Pusat Penelitian Tanah. 1989. Identifikasi dan karakterisasi fisik lingkungan beriklim kering, Daerah Gondang Selengan, Kabupaten Lombok Barat, Propinsi Nusa Tenggara Barat, tingkat semi detail (skala 1 : 50.000). Pusat Penelitian Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Tim Faperta UGM. 2014. Dampak Erupsi Gunung Kelud Terhadap Lahan Pertanian. http://faperta.ugm.ac.id/2014/site/fokus/20140225_fokus_dampak_erupsi.php. Diakses tanggal 19 Juli 2014.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson, and J. D. Beaton. 1990. *Soil Fertility and Fertilizers*. Mc. Millan Publissing Company, New York.
- van Wambeke, A. 1992. *Soil of The Tropic. Properties and Appraisal*. McGraw-Hill Inc. 342p.

- Veldria. 2011. Peranan kapur, *Tithonia diversifolia* dan Pupuk Kandang Sapi untuk Mengurangi Pemakaian Pupuk Buatan dalam Budidaya Jagung (*Zea mays*) pada Tanah Andisol. Fakultas Pertanian, Universitas Andalas. Padang.
- Wada, K. dan S. Aomine. 1973. Soil development on volcanic materials during the Quaternary, *Soil Sci.* 116,170-177.
- _____. and M. E. Harward. 1974. Amorphous clay constituents of soils. *Adv. Agron.*, 26:211-260.
- _____. and T. Higashi. 1976. The categories of aluminum-and iron-humus complexes in Ando soils determined by selective dissolution. *J. Soil Sci.*, 27:357-368.
- _____. 1977. Allophane and Imogolite. In: Dixon. J. B. *Mineral In Soil Enviroment*. SSSA Medison. Wisconsin. USA. Pp: 603-638.
- _____. and Y. Kakuto. 1985. Embryonic halloysites in Ecuadorian soils derived from volcanic ash. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1309-1318.
- _____. 1988. Concepts of "Kurobokudo" and "Eutrandepts". In Kinloch, D.I., S. Shoji, F.H. Beinrorth, and H. Eswaran. Pp.167-177 in (Eds). *Proceedings of The Ninth International Soil Classification Workshop. Japan 20 July to 1 August 1987*. Publ. by Japanese Commitee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington D.C., USA.
- _____. 1989. Allophane and Imogolite. In: Dixon, J. B. and S. B. Weed. *Minerals in Soil Environments*. SSSA. Madison. Pp 1051-1087.
- Wasono, H. T. 2014. Tempo, Rabu, 26 Februari 2014. Letusan 2014 Paling Besar dalam Sejarah Kelud, <http://www.tempo.co/read/news/2014/02/26/058557676/Letusan-2014-Paling-Besar-dalam-Sejarah-Kelud>. Diakses tanggal 18 Juli 2014.
- Wathoni, N. 2009. Optimalisasi usahatani sayuran dataran tinggi Sembalun, Lombok Timur. *Agroteksos Vol. 19 No. 3, Desember 2009*:139-146.
- Wibowo, S. dan I. P. Ruwaida. 2014. Penerapan Teknik Konservasi Tanah pada Lahan Usahatani Sayuran Dataran Tinggi di Sukabumi Jawa Barat. Sekolah Tinggi Penyuluhan Pertanian Bogor, Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Widianto, H. Noveras, D. Suprayogo, P. Purnomosidhi, dan M. Van Noordwijk. 2002. Konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian: "Apakah fungsi hidrologi hutan dapat digantikan agroforestry berbasis kopi?". Seminar HITI Nusa Tenggara Barat. Mataram, 27-28 Mei 2002.
- Widowati, L.R., A. Kasno, J. Purnomo, dan S. D. Neve. 2013. Pengelolaan hara P dan K pada pertanaman sayuran Dataran Tinggi Kopeng. Hlm. 337-346. *Dalam Widowati et al.* (Eds) *Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Produktivitas Sayuran Dataran Tinggi*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Whittaker, R. J. and M. B. Bush. 1993. Anak Krakatau and old Krakatau: a reply. *GeoJournal* 29 (4):417-420.
- Yatno, E. and S. Zauyah. 2003. Mineralogical, physical and chemical properties of soil on andesitic volcanic tuff around Mt, Burangrang, West Java. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 21:42-55 Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

- _____. and S. Zaayah. 2005. Characteristic of volcanic ash soils from Suthern part of Mt, Tangkuban Perahu, West Java. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 23:23-37. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- _____. and N. Suharta. 2011. Andisols derived from acid liparite tuff: their properties and their management strategi for agricultural development. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 33:49-64. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor.
- Yoshinaga, N., 1986. Mineralogical characteristics. II. Clay minerals. In: K. Wada (Eds), *Ando Soils in Japan*, Kyushu University Press, Fukuoka, Japan, Pp. 41-56.
- _____. and S. Aomine. 1962. Allophane in some Ando soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 8:6-13
- Zulaiha, S., Suprpto, dan D. Apriyanto. 2012. Investasi beberapa hama penting terhadap jagung hibrida pengembangan dari jagung lokal Bengkulu pada kondisi input rendah di dataran tinggi Andisols. *Naturalis Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 1(1):15-28.

INDEKS PENGARANG

- Adiyoga, W., 92
Ajidirman, 97
Allen, B.L., 26
Alloway, B.J., 107
Anda, M., 12,19,20, 21, 24,25, 27, 29
Aomine, S., 57,60,75
Arai, S., 45
Arifin, M., 36, 50, 52, 53, 54, 55, 59, 86, 109
Arnold, R.W., 5, 8
Arsyad, S.,108
Asandhi, A., 107, 108
Badan Pusat Statistik (BPS), 1,106, 112
Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP), 3, 4, 33, 34, 42, 43, 47, 58, 79, 83, 86, 87, 94, 98, 112
Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungpian, 12
Balai Penelitian Tanah, 35
Balai Penelitian Tanaman Sayuran, 2, 93
Bastaman, M., 19
Bechstedt, H.D., 103
Kemtan, 17
Buol, S.W., 56, 76
Bush, M.B., 7
Buurman, P., 36, 50, 52, 53, 55
Chien, S.H., 107
Dahlgren, R., 21, 23, 24, 56, 57, 60, 62
Dai, J., 32, 33, 36, 53, 55
Dames, T.G.W., 4
Dariah, A., 105, 106, 109, 110, 114, 115
Departemen Pertanian, 103, 105
Devnita, R., 42, 44, 45
Djaenudin, D., 33, 44, 103, 104

Duchaufour, P., 76
Dudal, R., 3, 4, 8, 31, 37, 43, 82, 83
Edison, 93
Effendi, D.S., 90, 91, 113
Endriani, 105
Erfandi, D., 109, 110
Eswaran, H., 58, 60, 61 63, 76
Fahmi, T., 97
Fanning, D.S., 26
FAO/UNESCO, 3, 8, 83
FAO, 90, 103
Fiantis, D., 19, 20, 21, 23, 24, 25, 27, 31, 32, 33, 44, 49, 57, 67, 75
FitzPatrick, E.A., 75
Hardjowigeno, S., 36,50, 52, 53, 54, 55, 59, 71, 73, 95
Harward, M.E., 75
Haryati, U., 97, 104, 105, 109, 110
Haryono, 7, 9, 39, 92
Henmi, T., 57, 60
Henny, H., 38, 96
Hidayat, A., 106, 107
Higashi, T., 64, 74, 75
Hikmatullah, 4, 32, 33, 34, 36, 38, 45, 46, 50, 52, 53, 54, 55, 67, 75, 97, 104
Hilman, Y., 105, 106
Hindersah, R., 107
Huang, P.M., 24, 25, 52
Husen, E., 109, 110
IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), 110
Inoue, 64
Irawan, 103
Ismangun, 4
Jenny, H., 8
Juarsah, I., 105

- Kanno, I., 44
Kasno, A., 97, 104, 106, 107, 108, 110
Kimble, J.M., 57, 58
Koesoemadinata, S., 36
Kosman, E., 109
Kurnia, U., 90, 91, 95, 105, 109, 110
Leamy, M.L., 44
Masui, J., 61
Mohr, E.C J., 1, 9, 25, 74, 76
Munir. M.S., 75
Mukhlis, 93
Mulyani, A., 106
Nanzyo, M., 21, 45, 70
Noor, D., 14
Noor, M., 7, 19
Nugroho, K., 4
Nurida, N.L., 109
Oppenheimer, C., 6, 7
Parfitt, R.L., 57, 58, 62
Poniman, 107
Pramuji, 19
Prasetya, B. S., 112
Prasetyo, B.H., 19, 20, 32, 33, 35, 36, 38, 48, 49, 50, 52, 53, 56, 57, 59, 61, 65, 67, 68, 74, 75, 104
Pratomo, I., 9
Purnomo, J., 97
Pusat Penelitian Tanah (Puslittanah), 3, 4
Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (Puslittanak), 30, 32
Rachim, D.A., 86
Rachman, A., 105
Ratman, N., 36
Ribbe, P.H., 25
Ridwandi, 67

Ritung, S., 100, 101, 111
Rosliani, R., 93
Ruwaida, I.P., 95
Saida, 95, 96
Saidi, 107
Sari, N.P., 113, 114
Saridevi, G.A.A.R., 71
Sarwani, M., 12, 20, 21, 24, 25, 27
Schuylenborgh, J.V., 45, 76, 104
Sembiring, A., 93
Shaw, B.H., 20
Shoji, S., 3, 10, 23, 24, 27, 28, 35, 42, 61, 63, 66, 73, 97
Setyanto, P., 110
Simkin, T., 6
Siebert, 6
Sinukaban, N., 95, 96
Sipahutar, I.A., 97, 99, 104, 110
Soekardi, M., 4
Soepraptohardjo, M., 3, 4, 8, 31, 37, 43, 83
Soil Survey Staff, 4, 8, 42, 70, 78, 79, 83, 86, 87
Subagyo, H., 123
Subagjo, H., 31, 36, 44, 50, 52, 53, 55, 88
Sudihardjo, A.M., 32, 33, 36, 50, 52, 53, 55, 67, 74, 75
Sudirdja, R., 107
Sudjadi, M., 33
Suganda, H., 95, 96, 97, 105, 106, 107
Sugiyanto, 113
Suhardjo, H., 32
Suharta, N., 35, 36, 38, 44, 50, 52, 53, 55, 67
Sujitno, E., 104
Sukarman, 4, 20, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 38, 42, 44, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 67, 75, 97, 103, 104
Subardja, D., 4, 44, 67, 75, 104

Suparto, 32, 33, 35, 36, 38, 44, 45, 52, 53, 55
Supriyadi, H., 95
Surono, 14
Suryani, E., 103
Susila, A.D., 94
Sutriadi, M.T., 97
Suwanda, M.H., 103
Suwandi, 88, 90, 93, 107, 108
Suwarna, N., 36
Stothers, R.B., 6, 7
Tafakresnanto, C., 30, 31, 32, 33, 44, 75
Takahashi, T., 62
Tan, K.H., 31, 45, 60, 65, 66, 69, 71, 75
Tavarnier, R., 76
Tim Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 12
Tim Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, 34
Tim Pusat Penelitian Tanah, 34
Tim Faperta UGM, 27
Tisdale, S.L., 108
van Baren, F.A., 74, 76
Van Ranst, E., 21, 31, 32, 33, 67, 75
van Wambeke, A., 108
Veldria, 112
Wada, K., 3, 60, 62, 65, 73, 74, 75
Kakuto, Y., 62
Wasono, H.T., 7
Wathoni, N., 93
Whittaker, R.J., 7
Wibowo, S., 95
Widowati, L.R., 107, 108, 112
Wilson, A.D., 62
Yamada, I., 75

Yasin, A., 36

Yatno, E., 33, 35, 36, 38, 44, 50, 52, 53, 54, 55, 67, 74

Yoshimoto, M., 27

Yoshinaga, N., 60, 65

Zauyah, S., 33, 38, 54, 67, 74

Zulaiha, S., 112

Zurhalena, 105

INDEKS SUBYEK

A

abu vulkanik, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 35, 36, 42, 53, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 73, 74, 75, 76, 83, 97

acidolysis, 76

akuik, 86

albit, 26, 52, 53

alfisols, 31, 88

alofan, 24, 43, 45, 46, 50, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 96, 105, 108

alterasi, 77

amorf, 3, 22, 24, 46, 51, 56, 59, 60, 65, 67, 68, 70, 74, 75, 76, 77, 83, 96, 116

amphibol, 20, 21, 25, 26, 49, 54, 55

andesin, 20, 21, 22, 25, 26, 49, 50, 52, 53, 54

andesitik, 23, 35, 36, 49, 50, 51, 53, 55, 67

andesitik-basaltik, 35, 36, 49, 50, 67

andesitik-dasitik, 35, 36

andik, 4, 42, 54, 70, 77, 78, 79, 116

Andisols, 3, 4, 8, 31, 86, 88

ando soils, 3

andosolisasi, 73, 74

Andosol dataran rendah, 4, 31, 38, 39, 111

Andosol dataran tinggi, 32, 38, 53, 101, 102, 108, 110

Andosol Gleik, 43, 48

Andosol Melanik, 43, 45, 48, 84, 85, 86

Andosol Molik, 45, 84, 86

Andosol Umbrik, 48, 84, 85,

Andosol Okhrik, 43, 86

Andosol Litik, 43, 48, 84, 86

Andosol Vitrik, 43, 48, 84, 85, 86

anortit, 21, 26, 52, 53

apatit, 19, 20, 21, 28, 97

argilic stage, 76

asam fulvat, 42, 45, 64

asam humat, 42, 45, 64

augit, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 49, 50, 51, 54, 55

B

bahan induk, 4, 8, 9, 35, 36, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 66, 67, 68, 74, 75, 76, 77, 83, 88, 96

basal spacing, 64

batu apung, 42, 73

bedengan, 107, 108, 109, 110

bentuk wilayah, 31, 32, 33, 34, 38, 88, 89, 94, 116

biologi tanah, 24, 43, 71, 72

biotit, 19, 22, 26, 49, 50, 54, 55

bitownit, 20, 21, 25, 26, 50, 52, 53, 54

black fluffy soils, 3

C

cambic stage, 76

Cinder, 42, 83

complexolysis, 76

D

Dasit, 23, 27, 28, 35, 36, 55

dasitik, 23, 28, 35, 36

degradasi, 103, 104, 105, 112, 116, 117

dekomposisi, 64, 76, 106

drainase, 48, 57, 74, 100, 101, 105, 109, 110, 116

duripan, 79, 80, 81, 82

E

Entisols, 8, 31, 88

epipedon, 4, 42, 43, 44, 64, 73, 77, 79, 80, 81, 82, 86

erosi, 92, 95, 96, 100, 101, 105, 107, 108, 109, 110, 114, 115, 116

erupsi, 1, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 35, 36, 42, 46, 48, 51, 74

ethnic stage, 76

F

FAO/UNESCO, 3, 8, 83

Pacific Ring of Fire, 5, 6

Ferihidrit, 24, 49, 56, 63, 64, 66, 73, 75, 77, 96

feldspar, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 63

final stage, 76

Flores, 4, 7, 10, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 44, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 65, 75, 116

G

gibsit, 49, 50, 56, 57, 63, 65, 74, 75, 77,

goetit, 63, 77

Gunung :

Agung, 7, 15, 16, 27, 30, 32

Gamalama, 8, 32

Kelimutu, 7, 33, 36, 37, 50, 52, 53, 54, 55

Kelud, 7, 9, 15, 16, 17, 27

Kimangbuleng, 36, 37, 42, 50, 51, 52, 53, 54, 55

Kerinci, 6, 32, 37, 93, 96, 97, 104, 105, 106, 110

Krakatau, 6, 7, 9, 10, 16

Lokon, 8, 9, 27, 32, 33, 36, 50, 51, 52, 53, 54, 55

Marapi, 7, 32, 33, 57

Merapi, 1, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 33, 74, 97

Rinjani, 7, 30, 32, 33, 34, 40, 41

Salak, 12, 30, 32, 36, 37, 50, 52, 53, 55, 61, 65

Semeru, 7, 14, 33

Sinabung, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 25, 27, 29, 40

Soputan, 8, 9, 16, 32, 33, 35, 36, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 54, 55

Talamau, 31, 33, 57

Tambora, 6, 7, 9, 16, 22

H

haloisit, 19, 50, 56, 57, 61, 62, 63, 65, 73, 75, 76, 77

hidrolisis, 75, 76

Humic Allophane soils, 3

humifikasi, 42, 45, 73, 75

I

Imogolit, 24, 49, 50, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 73, 75, 77, 83, 96

Inceptisols, 31, 74, 88

initial stage, 76

irreversible, 70

J

juvenil stage, 76

K

kaolinit, 19, 50, 56, 57, 60, 63, 64, 65, 74, 75, 77

kaolinit disorder, 50, 56, 57, 65, 75

kesesuaian lahan, 89, 90, 91, 99, 100, 101, 102, 103

Kurobokudo, 3, 44

kompleks Al- humus, 61, 64, 66

L

Lahar, 8, 10, 14, 15, 16, 35

Lava, 8, 10, 12, 14, 73, 83

Lempeng Eurasia, 5, 6

Lempeng Indo-Australia, 6

literring, 73

longsor, 92, 95, 105

M

melanik, 42, 43, 44, 45, 48, 64, 73, 79, 83, 84, 85, 86

melanisasi, 73

mineral non kristalin, 8, 20, 21, 23, 47, 56, 66, 73, 75, 77

mineral primer, 19, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 76, 97

mineral sekunder, 19, 48, 56, 61, 63, 65, 74, 75, 76, 83

morfometrik, 4

O

oxic stage, 76

okhrik, 3, 42, 43, 86

P

parakristalin, 60, 66, 75,

piroklastik, 3, 7, 10, 11, 12, 14, 19, 21, 22, 27, 48, 51, 56, 65, 83

penciri andik, 77

Pengelolaan lahan, 95, 103, 110

Prairie-like brown forest soils, 3

Pumice, 3, 83

pseudo sand, 71

R

retensi fosfat (P), 66, 67, 77, 78, 97

rorak, 114

ruang pori total, 105

S

senile stage, 76

short range order, 8, 56, 77

silika opaline laminar 61, 62, 73

smeary, 3, 8, 43, 47, 70, 84

Sols bruns tropicaux sur materiaux volcaniques, 3

Sumatera Utara, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 40, 50, 65, 68, 106

T

tektonik lempeng, 5

tephra, 23, 24, 35, 44, 46, 48, 73, 74, 77

tolerable soil loss, 95, 108, 109, 114

translokasi, 73

Trumao soils, 3

U

umbrik, 42, 44, 48, 73, 79, 81, 82, 83, 84, 85

ustic, 75

udic,

V

viril stage, 76

Vitric/Vitrik, 3, 43, 48, 84, 85, 86, 87

Volcanogenous loams, 3

Volcanogenous soils, 3

Volcanogenous black soils, 3

Y

Yellow brown loams, 3

Yellow-brown pumice soils, 3

Z

zero point of charge (ZPC), 68