

AGROGEOLOGI

PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI PUPUK DAN AMELIORAN

Joko Priyono



Penerbit
PUSTAKA BANGSA

Jalan Swakarsa VI No 28 Mataram, NTB

Anggota IKAPI No.003/NTB/Anggota Luar Biasa/17

.....

AGROGEOLOGI
PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI
PUPUK DAN AMELIORAN

.....

AGROGEOLOGI
PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI
PUPUK DAN AMELIORAN

JOKO PRIYONO



*Pustaka Bangsa
(Anggota IKAPI)*

Judul : Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran
Penulis : Joko Priyono
Editor : Sarkawi, SH., MH.
Layout : Albadawi
Design Sampul : Usman Ali
Cetak : Tim CV. Pustaka Bangsa
Jumlah Halaman : 228 + xviii hlm.
Dimensi Buku : 15 cm x 23 cm

Penerbit:

Pustaka Bangsa (Anggota IKAPI)
e-mail: pustakabangsa05@gmail.com
website: www.pustakabangsa.com

Alamat:

- I. Jln. Swakarsa VII Nomor 28 Gerisak, Mataram-NTB
Telp. (0370) 629946 / Mobile Phone; +6281999271122
- II. Jalan Udayana Mataram-NTB
(Jln. Gili Gde No.12, Komplek Pertokoan Nusantara)
Telp. (0370) 7508536 / Mobile Phone; +6285338884131

Cetakan Pertama: Agustus 2021

ISBN: 978-623-6592-24-3

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan dengan cara apapun, tanpa izin penulis dan penerbit.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah robilallamin - segala puji bagi Allah SWT penguasa seluruh alam semesta, saya bersyukur dapat menyelesaikan penulisan sebuah buku **Agrogeologi: Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran**. Tiada sesuatu pekerjaan yang dapat saya selesaikan kecuali atas izin-Nya pula.

Agrogeologi merupakan bidang ilmu yang relatif baru dibandingkan dengan cabang ilmu lainnya di bidang pertanian. Di Indonesia, agrogeologi diajarkan kepada mahasiswa terutama di Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian sejak tahun 2000-an. Dalam bidang Agrogeologi dibicarakan lebih banyak aspek praktis atau terapan dari ilmu geologi, yaitu pemanfaatan bahan geologi berupa mineral dan batuan sebagai *input* usaha tani berupa pupuk dan pembenah tanah (*soil ameliorant*).

Bahan geologi – mineral dan batuan merupakan sumber daya alam yang sangat melimpah di permukaan bumi. Batuan vulkanik di Indonesia relatif segar (*fresh*) karena sering terbaru oleh letusan gunung api yang masih aktif dan bahan erupsi itu tersebar di hampir semua kepulauan di Indonesia. Dari aspek

pedologis, kesuburan alami tanah pertanian di seluruh dunia yang sebagian besar adalah tanah mineral sangat dipengaruhi oleh jenis dan sifat batuan induk tanahnya. Dari aspek praktis usaha tani, batuan sangat potensial untuk dimanfaatkan secara langsung sebagai pupuk karena mengandung berbagai jenis unsur hara esensial. Selain itu, batuan juga dapat dimanfaatkan sebagai pembenah (amelioran) tanah untuk mengatasi masalah sifat tanah yang kurang optimal sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara esensial bagi tanaman. Masalah tersebut dapat disebabkan oleh sifat genetis (bahan induk) maupun karena salah pengelolaan tanahnya. Agrogeologi dikembangkan untuk berperan penting dalam mengatasi masalah pertanian tersebut.

Sebagai salah satu cabang ilmu di bidang pertanian yang relatif baru berkembang, kajian dan publikasi yang berkaitan dengan agrogeologi masih sangat terbatas, terutama di Indonesia. Para peneliti maupun mahasiswa yang sedang melakukan penelitian skripsi/tesis cukup kesulitan mendapatkan referensi yang memadai tentang agrogeologi, terutama yang ditulis dalam bahasa Indonesia. Hal tersebut yang mendorong saya berinisiatif untuk menulis buku *Agrogeologi* ini berdasarkan bahan referensi terkait secara umum, sebagian dari pengalaman lapang, dan hasil penelitian yang pernah kami lakukan.

Buku ini terdiri atas delapan bab utama, mencakup aspek teoritis dan praktis (teknologi terapan).

Secara garis besar, buku ini membicarakan tentang unsur hara esensial dan permasalahannya, jenis bahan geologi (mineral dan batuan) beserta karakteristiknya, pemikiran/konsep tentang pemanfaatan bahan geologi dalam bidang pertanian, pengembangan teknologi terapan dalam pemanfaatan mineral dan batuan secara langsung sebagai pupuk multi nutrisi dan amelioran untuk beragam jenis tanah yang bermasalah keharaan, ditutup dengan diskusi mengenai peran penting agrogeologi dalam pengembangan pertanian berkelanjutan.

Karena penerapan agrogeologi berkaitan dengan suatu sistem yang sangat kompleks, yaitu bidang pertanian, penulis menyadari bahwa masih banyak aspek terkait yang belum tercakup dalam buku ini. Hal tersebut semata-mata karena kekurangan dari penulis yang masih harus terus belajar dan mengikuti perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang sangat dinamis. Oleh karena itu, kritik dan saran membangun dari semua pihak sangat kami harapkan dan hargai.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada kolega, khususnya di Jurusan Ilmu Tanah Faperta Universitas Mataram yang telah memberikan dorongan untuk penulisan buku ini. Demikian pula kepada pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, diucapkan terima kasih atas *support*-nya kepada penulis untuk menyelesaikan buku ini.

Akhir kata, semoga sekelumit upaya penulis untuk *sharing* pengalaman dan ilmu pengetahuan ini bermanfaat bagi pembaca, memberikan inspirasi inovatif kepada para peneliti lain, mahasiswa, ataupun masyarakat umum pemerhati bidang petani. Amiiinn.

Mataram, Agustus 2021

Penulis



Joko Priyono

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN SAMPUL-----	i
KATA PENGANTAR -----	v
DAFTAR ISI -----	ix
DAFTAR TABEL -----	xiii
DAFTAR GAMBAR -----	xv
BAB I. PENDAHULUAN -----	1
A. Menenal Agrogeologi-----	1
B. Perkembangan Agrogeologi -----	10
C. Penerapan Agrogeologi-----	18
BAB II. UNSUR HARA TANAMAN -----	23
A. Jenis Unsur Hara -----	23
1. Unsur Hara Esensial-----	24
2. Unsur Hara Fungsional-----	41
B. Permasalahan Unsur Hara-----	43
BAB III. BAHAN GEOLOGIS - MINERAL DAN BATUAN -----	49
A. Sumber Bahan Geologis-----	49
B. Pengertian Mineral dan Batuan -----	51
1. Jenis dan Sifat Mineral -----	52
2. Jenis dan Sifat Batuan -----	72

	C. Stabilitas Mineral dan Batuan-----	79
	D. Sifat Kimia Batuan -----	84
BAB IV.	PELARUTAN UNSUR HARA DARI BATUAN -----	89
	A. Pengertian Pelarutan-----	89
	B. Prinsip Reaksi Pelarutan -----	91
	1. Mekanisme Pelarutan Unsur Hara -----	95
	2. Kinetika Pelarutan Unsur Hara --	98
	3. Faktor yang Mempengaruhi Laju Pelarutan Hara-----	101
	C. Pelarutan Batuan dalam Tanah-----	106
BAB V.	BATUAN INDUK TANAH MINERAL -----	111
	A. Bahan Induk Tanah-----	111
	B. Dari Batuan Menjadi Tanah -----	115
	C. Sifat Batuan Induk dan Tanah -----	118
	D. Peremajaan Tanah -----	123
BAB VI.	PUPUK DAN AMELIORAN-----	127
	A. Pengertian Pupuk dan Amelioran ----	127
	B. Jenis dan Sifat Pupuk -----	130
	1. Pupuk Sintetis vs Alami -----	132
	2. Pupuk Organik vs Anorganik ----	133
	C. Amelioran-----	135
	1. Ameliorasi Tanah Masam-----	136
	2. Ameliorasi Tanah Garaman -----	142
	3. Ameliorasi Tanah Tercemar -----	148
BAB VII.	PUPUK BERBASIS BATUAN SILIKAT ----	153
	A. Pupuk Batuan Silikat (PBS)-----	154
	B. Perkembangan Teknologi PBS-----	156

1. PBS Bubuk -----	158
2. PBS Partikel Nano -----	161
3. PBS Cair -----	163
C. Multi Fungsi PBS-----	165
BAB VIII. AGROGEOLOGI & PERTANIAN	
BERKELANJUTAN -----	171
A. Konsep Pertanian Berkelanjutan-----	172
1. Menguntungkan -----	174
2. Dapat memenuhi kebutuhan primer masyarakat -----	176
3. Ramah lingkungan -----	176
4. Mandiri dalam penyediaan input usaha tani-----	176
5. Adaptif terhadap perubahan iklim -----	177
B. Model Usaha Tani Berkelanjutan ----	180
1. Usaha Tani Organik-----	181
2. Usaha Tani Sehat-----	197
C. Peran Agrogeologi-----	208
DAFTAR PUSTAKA-----	211

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Jenis, bentuk, proporsi, serta sumber dan fungsi utama unsur hara esensial bagi tanaman.....	26
Tabel 2.	Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman.....	41
Tabel 3.	Unsur kimia yang umumnya ditemukan pada mineral dan batuan di kerak bumi*.....	51
Tabel 4.	Sub klas, struktur dasar, dan contoh mineral silikat*.....	55
Tabel 5.	Ringkasan karakteristik utama mineral liat *.....	61
Tabel 6.	Nilai <i>d-spacing</i> mineral liat tipe 2:1 (Priyono, 1991)	64
Tabel 7.	Mineral non-silikat yang telah dimanfaatkan atau mempunyai kaitan dengan permasalahan di bidang pertanian (Allen dan Hajek, 1989).....	67
Tabel 8.	Contoh batuan beku, ciri dan sifat utamanya*	76
Tabel 9.	Contoh batuan endapan (<i>sedimentary rocks</i>)*.....	78
Tabel 10.	Contoh batuan malihan (<i>metamorphic rocks</i>)*	79

Tabel 11.	Urutan stabilitas mineral terhadap pelapukan (Allen & Hajek, 1989).....	80
Tabel 12.	Komposisi kimia pada beberapa jenis batuan	85
Tabel 13.	Ringkasan mekanisme reaksi pelarutan (pelapukan kimiawi) batuan induk secara alami (Ross, 1989).....	96
Tabel 14.	Persamaan pelarutan bubuk batuan yang digiling dengan <i>ball mill</i> dalam waktu dan kondisi penggilingan dalam larutan 0,01M asam asetat + oksalat (Priyono, 2005a).....	99
Tabel 15.	Bahan induk tanah mineral.....	112
Tabel 16.	Hubungan antara jenis bahan induk dengan kemungkinan sifat dan ciri tanah yang terbentuk	120
Tabel 17.	Beberapa jenis pupuk sintetis yang sering digunakan dalam usaha tani modern	133
Tabel 18.	Karakteristik pupuk sintetis dan pupuk alami	133
Tabel 19.	Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan untuk pengapuran (Rehm et al., 2002)	138
Tabel 20.	Karakteristik tanah garaman.....	143
Tabel 21.	Kuantitas relatif bahan amenden yang diperlukan sebagai penetral tanah garaman	147

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Skema siklus nitrogen	30
Gambar 2.	Diagram hubungan antara pH dengan log ($H_2PO_4^-$) pada sistem (a) Al-P dan $Al(OH)_3$, (b) Fe-P dan $Fe(OH)_2$, dan (c) Ca-P dan $CaCO_3$ (Priyono, 2005b)	34
Gambar 3.	Skema struktur kerak bumi	53
Gambar 4.	Struktur dasar tetrahedral silikat	53
Gambar 5.	Struktur dasar oktahedral aluminium.....	59
Gambar 6.	Contoh pola difraksi sinar x (XRD patterns) mineral liat tipe 1:1. Pada gambar (A) terdapat mineral vermikulit dan kaolinit, sedangkan pada gambar (B) terdapat vermikulit, kaolinit, dan mika dalam suatu sampel yang dianalisis (Priyono, 1991)	63
Gambar 7.	Contoh pola difraksi sinar X (XRD patterns) mineral liat tipe 2:1. Pada gambar kiri hanya terdapat mineral montmorillonit, sedangkan pada gambar kanan terdapat mineral montmorillonit dan vermikulit (Priyono, 1991)	64

Gambar 8.	Model struktur mineral zeolit, memperlihatkan ruang mikro pada rangkaian unit dasar tetrahedral berbentuk cincin, dikelilingi oleh atom aluminium, silikat, dan oksigen (https://commons.wikimedia.org/wiki/Category: Zeolite).....	65
Gambar 9.	Skema pengelompokan jenis batuan beku dan faktor yang mempengaruhinya (http://jersey.uoregon.edu)	73
Gambar 10.	Hubungan antara waktu pelarutan (t, jam) dengan proporsi unsur hara terlarut (%) dari bubuk batuan basalt yang digiling dengan ball mill dalam kondisi basah (—) dan kering (---) selama 10, 60, dan 120 menit (Priyono, 2005a)	100
Gambar 11.	Pola XRD mineral K-feldspar yang digiling dengan ball mill selama 10, 60, dan 120 menit (sebelah kiri) dan pola laju pelarutannya dalam asam asetat + asam oksalat 0,1 N (sebelah kanan) (Priyono, 2005a).....	105
Gambar 12.	Ilustrasi tahapan proses pembentukan tanah mineral, dari bongkahan batuan tak terpindahkan menjadi tanah	115
Gambar 13.	Contoh beberapa profil tanah mineral yang terbentuk dari bahan induk pindahan. Bahan pindahan dapat berupa batuan kasar ataupun halus yang terbawa air pada proses erosi kemudian dien-	

	dapkan menjadi bahan induk tanah yang baru	117
Gambar 14.	Pengaruh ukuran partikel bahan kapur terhadap perubahan pH tanah (digambar ulang dari Rehm et al., 2002)	140
Gambar 15.	Pengaruh intensitas (waktu) penggilingan (dengan ball mill) terhadap pH bubuk batuan silikat (dolerite dan K-feldspar) (Priyono, 2005a).....	141
Gambar 16.	Negara dengan kontribusi lahan pertanian organik > 10 % terhadap total lahan pertanian (data dari FiBL & IFOAM, 2020)	186

BAB I

PENDAHULUAN

A. Mengenal Agrogeologi

Agrogeologi adalah suatu bidang ilmu yang mempelajari tentang pemanfaatan bahan geologis (mineral dan batuan) sebagai *input* usaha tani. Chesworth (1993) menjelaskan bahwa pemanfaatan bahan geologis tersebut dimaksudkan untuk memberikan nilai tambah atau keuntungan dalam usaha tani, baik keuntungan yang berkaitan dengan aspek sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Dalam bukunya yang berjudul '*Rocks for Crops*', van Strateen (2002) menjelaskan bahwa konsep agrogeologi adalah suatu pendekatan antar disiplin ilmu yang bertujuan untuk mempelajari bahan geologis, yaitu mineral dan batuan, kaitannya dengan kontribusi dari pemanfaatan bahan tersebut dalam pengelolaan agroekosistem atau ekosistem pertanian. Berdasarkan penjelasan itu, konsep agrogeologi menggabungkan pendekatan disiplin ilmu geologi dan pertanian, bertujuan untuk dapat menerapkan strategi pengelolaan lahan pertanian yang berkelanjutan, khususnya dalam pengelolaan unsur hara

tanaman dan kualitas tanah atau lahan pertanian secara integratif.

Dua aspek penting yang berkaitan dengan fungsi mineral dan batuan dalam bidang pertanian adalah (1) aspek pedologis - mineral dan batuan sebagai bahan induk tanah mineral, sebagai faktor genetis yang menentukan ciri dan sifat tanah yang terbentuk serta produktivitasnya, dan (2) aspek manajemen usaha tani dimana bahan geologis tersebut digunakan sebagai bahan baku atau langsung diaplikasikan sebagai pupuk atau amelioran. Suatu fakta penting bahwa batuan adalah bahan alami yang melimpah di permukaan bumi yang dapat dimanfaatkan untuk mempertahankan atau meningkatkan produktivitas lahan, memperbaiki kuantitas dan kualitas hasil pertanian, serta memulihkan kondisi lingkungan (ekologis) yang terdegradasi.

Perlu ditekankan bahwa pendekatan agrogeologis merupakan salah satu upaya untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam yang melimpah dalam praktek usaha tani. Banyak konsep serta teknologi aplikatif pertanian yang telah lebih dulu dikembangkan dan diterapkan serta telah mempunyai andil besar dalam mendorong penerapan teknologi pengelolaan lahan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Misalnya, pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*), olah tanah konservasi (OTK), penggunaan kompos (pupuk organik), dan pemanfaatan berbagai jasad renik (pupuk hayati). Penerapan konsep agrogeologis

dapat diintegrasikan dengan berbagai teknologi tersebut dalam rangka menciptakan usaha tani yang sangat peduli pada keseimbangan ekologis sehingga usaha tani itu produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Pemikiran tentang pemanfaatan mineral dan batuan sebagai sumber unsur hara tanaman (pupuk) dan pembenah (amelioran) tanah didasarkan pada teori pembentukan dan perkembangan tanah (pedologi). Beragam jenis tanah mineral, yaitu jenis tanah yang penyebarannya paling luas (setelah tanah organik), terbentuk dari beragam jenis mineral dan batuan. Sebagian besar unsur hara esensial yang diserap oleh tanaman yang tumbuh pada tanah mineral tersebut berasal dari bahan induk tanah berupa batuan. Batuan tersebut mengalami proses pelapukan yang kompleks dan lama (ratusan – jutaan tahun) untuk berubah menjadi tanah. Pada fase perkembangan awal hingga menengah/sedang, kandungan unsur hara pada tanah tersebut sangat ditentukan oleh komposisi unsur kimia dari batuan induknya. Tetapi pada fase perkembangannya lebih lanjut, faktor pembentuk tanah lainnya, yaitu kondisi iklim, pengelolaan, topografi, hidrologi, dan waktu dapat lebih menentukan sifat tanah mineral tersebut daripada bahan induknya. Intensitas pengaruh dari masing-masing faktor tersebut tergantung pada kondisi setempat dimana tanah itu terbentuk dan berkembang.

Pada kondisi alami, pasokan unsur hara dari hasil pelapukan batuan induk, ditambah unsur hara dari atmosfer yang terlarutkan oleh air hujan, umumnya sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan unsur hara optimum bagi tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut. Hal itu dapat dilihat pada berbagai jenis tanaman yang dapat tumbuh subur di hutan primer, meskipun tanaman itu tidak pernah dipupuk. Kebutuhan optimal akan unsur hara esensial bagi tanaman di hutan primer tersebut tercukupi dari tanah tempat tumbuhnya, ditambah unsur hara dari atmosfer (karbon, nitrogen, sulfur, dan air). Pada sistem pertanian tradisional yang dulu diterapkan oleh nenek-moyang kita selama berabad-abad, tanaman yang diusahakan tidak pernah dipasok dengan pupuk sintetis karena pupuk tersebut memang belum tersedia. *Input* yang digunakan hanya serasah (biomas tanaman), kotoran ternak, dan abu dapur; atau secara umum merupakan daur ulang unsur hara yang juga berasal dari tanah dan atmosfer setempat. Jadi, Sang Penguasa Alam ini telah mengatur dengan indah dan lengkap. Kebutuhan unsur hara untuk tanaman itu sebagian besar dicukupi oleh tanah dimana tanaman itu tumbuh, ditambah unsur hara dari udara (atmosfir), air hujan atau dari badan air (sungai, danau).

Sejak tahun 70-an hingga sekarang, sistem pertanian di seluruh dunia telah mengalami banyak perubahan. Meningkatnya populasi penduduk menuntut ketersediaan pangan yang makin tinggi. Tuntutan itu telah mendorong terjadinya eksploitasi sumber daya

lahan (terutama tanah), peningkatan intensitas tanam, pengembangan varietas tanaman baru berpotensi produksi tinggi, dan sarana - prasarana pendukung usaha tani lainnya, terutama pupuk, pestisida, herbisida, dan sarana irigasi. Tuntutan peningkatan produksi bahan pangan untuk masyarakat tersebut telah berdampak pada praktek bertani yang eksploitatif dan kurang mempertimbangkan aspek keseimbangan ekologis dan kapasitas daya dukung lahan. Dampak lebih jauh penerapan usaha tani intensif tersebut adalah munculnya berbagai persoalan pada usaha tani itu sendiri, antara lain yang berkaitan dengan unsur hara tanaman, yaitu terjadinya kekahatan, keracunan, dan ketidak-imbangannya komposisi unsur hara esensial di dalam larutan tanah pertanian, atau gabungan dari ketiganya.

Munculnya persoalan unsur hara dalam tanah yang tersedia bagi tanaman dapat disebabkan oleh faktor genetik (sifat bahan induk tanah yang miskin hara) maupun karena salah kelola. Meskipun hingga sekarang pemenuhan kebutuhan pangan yang harus ditempuh melalui kegiatan usaha tani tetap mendesak, seyogyanya kegiatan usaha tani modern tetap memperhatikan aspek ekologis. Memang anjuran itu tidak mudah diwujudkan di tingkat hamparan. Secara konseptual, kita dapat mengadopsi pelajaran dari praktek cerdas yang pernah diterapkan oleh nenek moyang, yaitu sistem usaha tani berbasis bahan dan mengikuti proses alami. Konsep tersebut harus

dikemas dalam bentuk teknologi terapan sesuai dengan perkembangan IPTEK di era modern.

Sejarah tentang eksploitasi sumber daya lahan untuk memenuhi kebutuhan pangan manusia dimulai pada akhir Perang Dunia II, dikenal dengan istilah revolusi hijau (*green revolution*). Konsep pengembangan bidang pertanian tersebut ditandai dengan meningkatnya penggunaan bahan agrokimia, yaitu berbagai jenis pestisida, herbisida, dan pupuk sintetis; perakitan varietas tanaman yang mempunyai potensi hasil yang tinggi dan berumur pendek (genjah), ditunjang dengan pengembangan sarana irigasi yang progresif. Hal tersebut memungkinkan dilakukannya penanaman yang lebih intensif dibanding sebelumnya. Misalnya, penanaman padi dari satu kali menjadi dua atau tiga kali tanam per tahun. Areal tanam juga diperluas dengan membuka kawasan hutan untuk pertanian. Tetapi disisi lain, meningkatnya kegiatan pembangunan industri, perumahan, dan infrastruktur pada beberapa dekade terakhir juga telah menyebabkan terjadinya alih fungsi lahan pertanian yang produktif menjadi lahan non-pertanian. Situasi tersebut telah mendorong munculnya kebijakan pemerintah (Kementerian Pertanian) untuk mengoptimalkan pemanfaatan lahan marginal sebagai lahan usaha tani tanaman pangan maupun perkebunan.

Tidak dapat dipungkiri bahwa revolusi dalam bidang pertanian tersebut telah berhasil meningkatkan persediaan pangan di banyak negara agraris

secara signifikan. Tetapi, selain berdampak positif terhadap peningkatan kuantitas persediaan bahan pangan, penerapan konsep usaha tani itu ternyata juga menimbulkan banyak masalah lingkungan hidup yang serius. Di Indonesia misalnya, penerapan teknologi usaha tani ala revolusi hijau telah berhasil meningkatkan produksi pangan nasional pada tahun 1980-an hingga 1990-an. Pada saat itu, bangsa Indonesia mampu mencapai swasembada beras, bahkan mengekspor beras ke negara tetangga. Tetapi setelah periode keemasan itu, produktivitas lahan pertanian di banyak daerah sentra produksi pangan di Indonesia mencapai titik jenuh, produksi bahan pangan (beras) nasional mengalami stagnan, bahkan kemudian produktivitasnya cenderung menurun. Di lain pihak, jumlah penduduk terus meningkat, meskipun laju peningkatannya dapat ditekan melalui penerapan program keluarga berencana. Aspek lain yang kurang mendapat perhatian adalah kualitas produk pertanian (bahan pangan) yang kurang sehat karena kandungan nutrisinya yang tidak berimbang dan mengandung residu bahan beracun (bahan aktif pestisida sintetis). Penggunaan bahan agrokimia - pupuk dan pestisida sintetis yang berlebihan kemungkinan telah menjadi salah satu kontributor munculnya berbagai jenis penyakit pada masyarakat umum saat ini.

Banyak faktor yang menyebabkan terjadinya kemerosotan produksi bahan pangan di Indonesia. Satu hal yang pasti bahwa sumber daya lahan pertanian yang ada sudah terlalu lelah, karena dieksploitasi

terus-menerus tanpa pasokan energi berupa multi nutrisi yang memadai. Pemanfaatan lahan untuk usaha tani telah melampaui kapasitas daya dukung lahan sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi tanaman. Hal itu tidak hanya terjadi di Indonesia, tetapi juga dialami oleh banyak negara lain di dunia. Sebagian besar lahan pertanian yang ada telah dieksploitasi secara berlebihan; dan sebagian lahan yang lain menjadi rusak karena kesalahan dalam pengelolaan sehingga terjadi penurunan kualitas (degradasi) lahan secara drastis, akhirnya produktivitasnya cenderung terus menurun.

Untuk mengatasi masalah degradasi lahan tersebut, selain upaya penormalan kondisi lahan (remediasi) atau peremajaan lahan (*land rejuvination*), perlu pula dilakukan reorientasi target usaha tani. Reorientasi yang dimaksud antara lain berkaitan dengan target pencapaian produksi 'maksimum' menjadi 'optimum' serta perlunya memperhatikan kualitas produk pertanian (khususnya bahan pangan) bagi kesehatan konsumen (masyarakat luas). Usaha tani yang terfokus pada pencapaian produksi maksimum telah terbukti cenderung mengarah pada eksploitasi sumber daya lahan, penggunaan *input* sintetis (agrokimia) yang berlebihan, dan kurang memperhatikan dampak negatifnya terhadap aspek keseimbangan ekologis sehingga usaha tani tersebut tidak berkelanjutan. Sebaliknya, target produksi optimum diarahkan pada pencapaian keuntungan maksimum. Keuntungan tersebut bukan hanya pada aspek finansial (*income*) bagi

aktor usaha tani, tetapi juga keuntungan bagi konsumen pangan dan ekologis. Keuntungan bagi konsumen adalah mendapatkan produk bahan pangan yang sehat, mengandung nutrisi yang berimbang sesuai dengan sifat genetik tanaman, dan kuantitas yang cukup. Konsep tingkat produksi optimum lebih mempertimbangkan pemanfaatan sumber daya alam sesuai dengan kemampuan daya dukungnya untuk jangka panjang. Sumber daya lahan yang nantinya akan diwariskan kepada generasi penerus harus dimanfaatkan secara bijaksana, produktif, tetapi tidak berlebihan yang dapat menimbulkan kerusakan.

Seperti telah dijelaskan di depan bahwa peningkatan produksi pertanian yang terjadi pada era '*revolusi hijau*' adalah hasil dari pengembangan dan pemanfaatan keunggulan sifat genetik dari berbagai jenis tanaman, didukung dengan penggunaan bahan agrokimia, serta peningkatan sarana irigasi. Perlu dicatat bahwa berbagai masukan (*input*) eksternal untuk menghasilkan bahan pangan yang tinggi tersebut, khususnya berupa bahan agrokimia sintetis, sangat tergantung pada sumber energi yang tidak dapat terbarukan (*non-renewabled energies*); atau sebagian harus diimport. Bagi sebagian besar negara berkembang, termasuk Indonesia, harus menyisihkan anggaran pembangunan untuk mengimpor bahan masukan (*input*) usaha tani tersebut. Penerapan sistem usaha tani yang sarat dengan penggunaan bahan agrokimia sintetis itu sering sangat membebani APBN untuk mensubsidi petani melalui kebijakan subsidi

harga sarana produksi, khususnya pupuk, pestisida, dan benih. Sebenarnya tidak ada salahnya penggunaan APBN untuk kepentingan masyarakat luas, asal kebijakan itu berjalan efektif.

Aspek penting lain yang perlu mendapat perhatian bahwa penggunaan bahan agrokimia ala '*green revolution*' tersebut dalam jangka panjang ternyata kurang ramah lingkungan dan tidak berkelanjutan. Selain itu, hanya sebagian kecil keuntungan dari penggunaan bahan agrokimia sintetis tersebut yang dapat dinikmati oleh petani kecil dan miskin (Sanyu & Azuba, 1996) yang merupakan bagian terbesar dari populasi di banyak negara berkembang, termasuk petani di Indonesia. Berkaitan dengan masalah tersebut, reorientasi usaha tani yang mengoptimalkan pemanfaatan *input* usaha tani dari sumber daya lokal harus digalakan. Sumber daya lokal tersebut antara lain adalah bahan geologis (mineral dan batuan) yang dibahas dalam buku ini.

B. Perkembangan Agrogeologi

Pemanfaatan mineral atau batuan sebagai pupuk dan pembenah tanah sebenarnya bukan ide yang baru muncul. Berdasarkan referensi yang ada, pemikiran tentang penggunaan batuan sebagai pupuk dan pembenah tanah telah diperkenalkan oleh Missoux sekitar 1853/54 (Hensel, 1884) melalui tulisannya yang berjudul '*Bread from Stone*'. Pada saat itu, pemikiran tersebut kurang mendapatkan tanggapan dari para pakar, praktisi, ataupun pengambil kebijakan

pembangunan sektor pertanian, sehingga pemikiran itu hilang dari pembicaraan selama sekitar dua abad.

Seperti telah disinggung di atas bahwa penggunaan mineral atau batuan sebagai pupuk dan amelioran didasarkan pada konsep pedologi. Tanah mineral yang mendominasi lahan pertanian berfungsi sebagai media tumbuh dan pemasok sebagian besar unsur hara esensial untuk berbagai jenis tanaman, terbentuk dari beragam jenis batuan. Bahan induk tanah itu menyediakan berbagai unsur hara esensial bagi tanaman (kecuali N). Tentu saja unsur hara dari bahan induk tanah itu hanya dapat diserap oleh tanaman setelah terlapuk melalui proses yang kompleks dan lama (ratusan bahkan ribuan tahun). Berdasarkan kandungan berbagai unsur hara esensial pada batuan tersebut, maka muncul ide bahwa batuan itu kemungkinan dapat digunakan sebagai pupuk majemuk (*multi nutrient fertilizer*). Pemanfaatan batuan dapat secara langsung (dalam bentuk bubuk batuan) maupun sebagai bahan baku pupuk lain dimana unsur hara pada batuan itu masih perlu diproses lebih lanjut untuk mengekstrak unsur haranya. Masalah utama dari pemanfaatan batuan untuk pupuk secara langsung (dalam bentuk bubuk atau partikel berukuran mikro – nano meter) adalah lambatnya proses pelarutan unsur hara dari struktur mineral penyusun batuan itu ke larutan tanah. Hambatan itu menjadi tantangan utama bagi pakar agrogeologi untuk berinovasi mencari alternatif solusi teknis yang tepat.

Sejak dua dekade terakhir telah banyak dilakukan kegiatan riset yang bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan batuan sebagai pupuk dan pembenah tanah. Target dari upaya tersebut adalah dihasilkan produk pupuk batuan yang efektif digunakan oleh petani pada tingkat hamparan usaha tani (*on farm*) secara luas. Secara teoritis, proses pelarutan unsur hara dari partikel batuan itu dapat dipercepat sedemikian rupa sehingga kebutuhan unsur hara tanaman dapat terpenuhi dari aplikasi pupuk batuan tersebut. Laju pelepasan unsur hara dari pupuk batuan yang diaplikasikan itu harus dapat mengimbangi laju serapan unsur hara oleh tanaman dalam usaha tani yang intensif, sehingga usaha tani itu produktif dan berkelanjutan.

Kembali ke sejarah perkembangan agrogeologi. Konsep '*Bread from Stone*' ditindak-lanjuti melalui kegiatan riset oleh Hensel (1880, 1884), kemudian diikuti oleh peneliti lainnya, misalnya Keller (1948) dan Keller et al. (1963). Penelitian mereka saat itu lebih terfokus pada aspek konseptual/dasar. Seorang ahli geologi, de Vilier (1961), mungkin dapat dianggap sebagai orang pertama yang menerapkan konsep '*Bread from Stone*' di tingkat hamparan usaha tani. Ia melaporkan hasil penelitiannya bahwa aplikasi ± 180 t/ha partikel halus batuan silikat ($< 200 \mu\text{m}$) dari limbah industri pemecah batuan (*quarry by product*) dapat meningkatkan produksi tebu dan rendemen gula selama beberapa tahun. Tentu saja dosis pempukan tersebut ekstrim tinggi, sehingga kurang dapat

diterima oleh masyarakat petani. Namun hasil penelitian itu telah menunjukkan manfaat langsung dari batuan terhadap produktivitas dan kualitas hasil tanaman. Sekitar dua dekade kemudian, kegiatan riset yang berkaitan dengan upaya penggunaan batuan untuk pertanian sangat kurang. Beberapa peneliti, misalnya Huang & Keller (1970) dan Huang & Kiang (1972) mempublikasikan hasil riset dasar tentang alur dan mekanisme pelarutan unsur hara dari mineral dalam beberapa jenis larutan organik maupun anorganik murni. Peneliti tersebut berharap bahwa dengan diketahuinya alur, mekanisme, dan faktor yang dominan yang mempengaruhinya, pelarutan unsur hara dari partikel batuan ke larutan tanah dapat disiasati untuk dipercepat.

Sejak tahun 1980-an, kemungkinan penggunaan batuan sebagai pupuk majemuk (*multi nutrient fertilizer*) mendapat perhatian lebih serius dan luas dari para pakar pertanian. Munculnya gairah baru itu didorong oleh meningkatnya kesadaran banyak pihak tentang pentingnya untuk memperhatikan aspek ekologis dalam praktek usaha tani. Penggunaan bahan alami, antara lain mineral dan batuan, menjadi salah satu pilihan penting. Penggunaan pupuk sintetis ber-hara makro (N, P/dan K) dan pestisida sintetis yang cenderung berlebihan, terbukti telah menimbulkan banyak dampak negatif. Dampak negatif itu bukan saja terhadap kondisi sosial - ekonomi petani kecil, tetapi juga terhadap lingkungan geofisik, kimia, dan biologi yang luas.

Berkaitan dengan meningkatnya perhatian tersebut di atas, banyak peneliti dari berbagai negara yang merekomendasikan penggunaan pupuk majemuk yang unsur haranya lambat tersedia (*slow release fertilizers*) dari batuan. Misalnya, Fyfe dkk (1983, 1987, 1989, 2000), Chesworth beserta timnya (1982, 1983, 1985, 1987), van Strateen & Pride (1993), dan van Strateen (2002). Peneliti lain dari *British Geological Survey* (Appleton, 1990, 1994; dan Mathers, 1994); peneliti dari Brazil, antara lain Leonardos et al. (1987, 2000), dari Eropa (Barak et al., 1983, 2000; Bakken et al., 1997, 2000; Weerasuriya et al., 1993); dan dari Australia (Coroneos et al., 1996; Hinsinger et al., 1993, 1996; Bolland & Backer, 2000; Harley & Gilkes, 2000; Coventry et al., 2001). Sejak tahun 1991, Campe telah mempromosikan melalui majalah *online* 'Remineralize the Earth'. Majalah itu terutama mengupas tentang pentingnya penggunaan bubuk batuan untuk peremajaan dan penyehatan lahan pertanian dan hutan. Melalui majalah tersebut, banyak bukti yang ditunjukkan oleh para peneliti dari berbagai penjuru dunia tentang pengaruh positif dari penggunaan bubuk batuan terhadap kuantitas dan kualitas produk pertanian (bahan pangan) dan lingkungan biofisik – penimbunan karbon di dalam tanah.

Besarnya perhatian para peneliti tersebut di atas terdorong oleh meningkatnya kesadaran dan perhatian banyak pihak terhadap kenyataan tentang dampak negatif penggunaan bahan agrokimia (pupuk dan pestisida sintetis) terhadap lingkungan. Kondisi itu

juga telah mendorong upaya menemukan solusi yang tepat untuk mengatasi masalah terjadinya penurunan kuantitas dan kualitas produk pertanian sebagai akibat terjadinya degradasi lahan.

Antusiasme peneliti dari manca negara juga mendorong dilakukannya penelitian tentang kemungkinan pemanfaatan batuan sebagai pupuk dan amelioran di Indonesia, meskipun agak lambat. Pemanfaatan batuan kapur (kalsit dan dolomit), gipsum, dan batuan fosfat telah banyak dilakukan, tetapi riset tentang pemanfaatan batuan silikat atau volkanik hingga sekarang masih sangat terbatas. Padahal, batuan silikat atau volkanik di Indonesia umumnya kaya akan kandungan unsur hara makro (Ca, Mg, K, dan S) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, dan B) (Priyono & Arifin, 2009), sehingga sangat potensial untuk digunakan sebagai bahan baku pupuk majemuk yang efektif dan efisien.

Berdasarkan referensi yang tersedia, upaya pemanfaatan batuan silikat/volkanik di Indonesia telah dimulai (Priyono et al., 2006a) dengan dilakukannya identifikasi sifat mineralogi dan kimiawi batuan volkanik dari beberapa gunung api di Indonesia, yaitu dari Gunung Galunggung, Kelud, Rinjani, dan Tambora. Kemudian dilanjutkan dengan mengevaluasi kemungkinan pemanfaatan batuan itu sebagai pupuk majemuk (*multinutrient fertilizer*) dan pembenah tanah melalui percobaan di rumah kaca dan lapang. Harapannya, pupuk batuan silikat tersebut efektif untuk diaplikasikan secara langsung di tingkat hamparan (*on*

farm) dalam upaya mengatasi beragam masalah tanah yang mengalami penurunan kesuburan, tercemar, terdegradasi, ataupun secara genetis tanahnya kurang subur. Tujuan khusus dari riset tersebut (Priyono et al., 2006a, dilanjutkan oleh Priyono et al., 2007, 2008; Priyono, 2008) adalah untuk mengetahui teknologi yang tepat untuk mempercepat proses pelarutan unsur hara dari bubuk batuan ke larutan tanah, sehingga dapat meningkatkan efektivitas agronomis bubuk batuan itu untuk diaplikasikan pada beberapa jenis tanaman pangan.

Prijatna et al. (2007) dan Priyono et al. (2007) telah mengidentifikasi variabel sifat tanah yang berpengaruh signifikan terhadap laju pelarutan unsur hara dari bubuk batuan ke larutan tanah. Dari hasil penelitian itu diketahui bahwa kadar asam organik atau bahan organik tanah adalah variabel tanah mineral yang dominan dalam mengendalikan laju pelepasan unsur hara dari bubuk batuan berukuran mikro – nano meter yang diaplikasikan pada tanah itu. Makin tinggi kadar asam atau bahan organik tanah, makin tinggi laju pelarutan unsur hara dari bubuk batuan tersebut ke larutan tanah. Berdasarkan hasil kajian itu dan pengujian di lapang (Priyono et al., 2010), direkomendasikan bahwa penggunaan bubuk batuan silikat sebagai pupuk sebaiknya dikombinasikan dengan pupuk organik (kompos limbah peternakan).

Batuan vulkanik juga terbukti efektif digunakan sebagai pembenah (amelioran) tanah. Misalnya, untuk

menekan pengaruh negatif dari kadar garam tanah yang tinggi terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman jagung (Sumarlin, 2008) dan meningkatkan pH tanah masam atau sebagai bahan pengapuran yang efektif (Sofyan, 2008). Pemanfaatan bubuk batuan basaltik yang dikombinasikan dengan kompos kotoran ternak juga terbukti efektif sebagai pembenah tanah terdegradasi akibat kegiatan penambangan batu apung (bahan induk) di Lombok Utara (Priyono et al., 2010). Dari rangkaian penelitian tersebut di atas diperoleh informasi penting tentang potensi yang sangat besar dari batuan vulkanik di Indonesia untuk digunakan sebagai pupuk multi nutrisi dan amelioran.

Kemungkinan timbulnya dampak negatif dari aplikasi pupuk batuan dalam bentuk bubuk *nano particles* pada areal yang luas juga telah diantisipasi. Kemungkinan dampak negatif tersebut antara lain adalah terjadinya polusi udara oleh partikel halus dari bubuk batuan yang dapat membahayakan kesehatan petani (Priyono, 2005). Untuk menghindari timbulnya masalah itu, telah dikaji pula teknik formulasi pupuk batuan silikat dari bentuk bubuk menjadi granular (Yulianti, 2009; Rahmi, 2009) atau cair (Oklima, 2008). Pupuk batuan silikat dikembangkan lebih jauh menjadi pupuk cair berpestisida nabati (Priyono & Sutriyono, 2010; Priyono & Muthahanas, 2011). Pupuk batuan silikat dalam bentuk bubuk dan cair juga telah diuji-cobakan penggunaannya sebagai bahan pelapis benih tanaman pangan, yaitu pada benih jagung (Zukron, 2012) dan kacang tanah (Sahnun, 2012),

padi (Priyono & Sudharmawan, 2020). Meskipun penyempurnaan komposisi bahan pelapis benih tersebut masih perlu dilakukan, setidaknya hasil riset itu dapat menginspirasi para peneliti untuk melihat lebih jauh multi fungsi bubuk batuan silikat. Perkembangan terbaru, pupuk batuan silikat telah berhasil diproses menjadi pupuk cair dalam skala industri (Priyono, 2017) dan mulai dimanfaatkan oleh petani, terutama di NTB.

Berdasarkan uraian di atas, pemanfaatan batuan silikat untuk pupuk dan pembenah tanah yang ramah lingkungan dalam sistem usaha tani di Indonesia sangat prospektif. Tetapi, masih banyak jenis batuan silikat atau batuan vulkanik di Indonesia yang belum dikaji pemanfaatannya sebagai pupuk atau pembenah tanah. Hal itu merupakan kesempatan, sekaligus tantangan bagi peneliti dan pemerhati bidang pertanian untuk dapat mengambil bagian dalam mewujudkan pertanian ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal. Upaya tersebut selaras dengan kebijakan pembangunan bidang pertanian yang sedang digalakan Pemerintah Indonesia.

C. Penerapan Agrogeologi

Agrogeologi merupakan salah cabang ilmu yang relatif baru dibanding cabang ilmu lain yang diajarkan kepada mahasiswa di Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, misalnya kesuburan tanah atau pupuk dan pemupukan. Agrogeologi lebih menekankan pada

aspek kegunaan praktis dari cabang ilmu geologi dalam bidang pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Agrogeologi diajarkan kepada mahasiswa S-1 Jurusan Ilmu Tanah di Indonesia sekitar 2000-an. Karena relatif baru, kajian pengembangan dalam bidang agrogeologi dan penerapan teknologinya relatif masih terbatas dan belum populer di kalangan masyarakat.

Bidang pertanian tampaknya akan terus dituntut untuk menghasilkan bahan pangan lebih banyak karena populasi penduduk yang cenderung terus meningkat. Tuntutan itu akan dapat terpenuhi melalui penerapan usaha tani intensif yang produktifif, tetapi harus ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penerapan konsep agrogeologi, yaitu pemanfaatan mineral dan batuan sebagai pupuk dan amelioran dalam praktek usaha tani, secara luas perlu terus digalakan. Hal itu tidak harus dianggap untuk menghapuskan penggunaan bahan agrokimia (pupuk) sintetis, tetapi untuk memadukan kedua jenis pupuk tersebut dalam kegiatan usaha tani yang lebih ramah lingkungan. Penerapan agrogeologi dalam praktek usaha tani tersebut sangat memperhatikan aspek ekologis, tanpa harus melupakan target capaian produksi optimal.

Seperti telah dijelaskan bahwa banyak peneliti yang merekomendasikan penggunaan batuan silikat sebagai pupuk pelepas unsur hara lambat (*slow-release fertilizer*), karena banyak keunggulan dari penggunaan pupuk batuan tersebut. Berkaitan

dengan promosi dan ajakan terhadap penerapan konsep agrogeologi, beberapa istilah atau *jargon* khusus telah sering digunakan secara luas. Misalnya, Campe (1991) menggunakan istilah pengkayaan lahan dengan mineral (*remineralized the earth*), Coventry et al. (2001) dengan istilahnya peremajaan lahan (*land rejuvenation*), para pemerhati lingkungan (*environmentalists*) menggunakan istilah 'kembali ke alam' (*back to nature*), dan banyak istilah senada lainnya. Semuanya itu merupakan ajakan dan upaya penyadaran akan perlu dan pentingnya bagi berbagai pihak untuk memperhatikan kondisi lahan pertanian saat ini yang kualitasnya makin menurun. Respon terhadap ajakan itu antara lain munculnya upaya pengembangan dan menerapkan konsep agrogeologi dalam praktek usaha tani secara luas.

Fakta yang ada hingga saat ini, penggunaan pupuk berbasis batuan belum banyak diterapkan secara luas dalam praktek usaha tani. Selain karena pupuk batuan belum banyak dikenal oleh masyarakat luas, bahkan sebagian dari masyarakat menganggapnya sebagai barang aneh, juga karena adanya beberapa kendala teknis penerapannya di tingkat hamparan (*on farm*). Kendala teknis tersebut misalnya berkaitan dengan kadar dan laju pelarutan unsur hara dari pupuk batuan yang rendah, sehingga penggunaannya memerlukan dosis yang sangat tinggi (puluhan ton per hektar). Hal itu dinilai oleh kebanyakan petani kecil tidak ekonomis dan tidak mungkin dapat diterapkan. Selain itu, tidak semua jenis tanah cukup responsip

terhadap aplikasi pupuk batuan itu dalam waktu singkat. Misalnya, aplikasi bubuk batuan basaltik dalam jangka waktu satu tahun, terbukti hanya efektif pada tanah yang sangat miskin hara, tanah masam, atau gabungan keduanya (Priyono, 2005a). Sebenarnya, penggunaan bubuk batuan dosis tinggi tersebut dapat mempertahankan produktivitas lahan tetap tinggi dalam waktu cukup lama (2 – 5 tahun), seperti ditunjukkan oleh de Vilier (1961) dan banyak peneliti lainnya (dicitir pada paragraf sebelumnya). Artinya, keuntungan dan efektivitas penggunaan pupuk batuan harus dievaluasi untuk jangka panjang.

Khusus di Indonesia, kemungkinan penggunaan batuan sebagai pupuk majemuk (*multi nutrient fertilizer*) yang murah dan ramah lingkungan belum banyak diketahui, apalagi diterapkan. Masih banyak hal yang harus dikaji lebih jauh agar sumber daya geologi (batuan) yang melimpah di Indonesia dapat dimanfaatkan secara optimal dalam pelaksanaan pembangunan bidang pertanian, sebagai sumber hara tanaman dan bahan pembenah tanah. Beberapa hasil pengembangan agrogeologi, baik aspek teoritis ataupun teknologi aplikasinya dalam praktek usaha tani, serta prospeknya ke depan dijelaskan dalam beberapa bab terpisah dalam buku ini.

BAB II

UNSUR HARA TANAMAN

Konsep dan aplikasi teknologi agrogeologi sangat erat kaitannya dengan manajemen unsur hara tanaman, baik dengan penyediaan sumber unsur hara (pupuk), pengendalian dinamika unsur hara di zona perakaran tanaman (rizosfir), maupun remediasi sifat tanah bermasalah yang secara tidak langsung berpengaruh pada perbaikan status keharaan pada tanah yang diremediasi. Agar diperoleh pemahaman yang komprehensif tentang peran agrogeologi tersebut di atas, serta untuk penyamaan persepsi, dalam Bab 2 ini dibahas secara garis besar mengenai beberapa aspek penting tentang unsur hara itu sendiri serta permasalahan terkait.

A. Jenis Unsur Hara

Unsur hara adalah kelompok unsur kimia khusus yang dibutuhkan oleh dan berfungsi esensial pada proses fisiologi pertumbuhan dan produksi tanaman. Bersama dengan faktor lingkungan, unsur hara sangat menentukan kuantitas dan kualitas hasil tanaman. Jika kondisi faktor lingkungannya optimal, tanaman akan tumbuh dan memproduksi maksimal jika

terpenuhi kebutuhan unsur haranya dalam jumlah yang cukup dan proporsi antar unsur hara yang berimbang. Karena perannya yang sangat krusial itu, ketersediaan unsur hara bagi tanaman dalam tanah (media tumbuh tanaman) sering menjadi faktor pembatas dalam praktek usaha tani yang harus diatasi.

Permasalahan unsur hara umumnya muncul karena tidak semua tanah pada lahan pertanian yang diusahakan dapat berfungsi optimal sebagai pemasok unsur hara yang cukup dan proporsional. Ada tanah pertanian yang kandungan satu atau lebih jenis unsur haranya memang rendah sehingga diperlukan tindakan pemupukan; atau kandungannya berlebihan sehingga bersifat toksik bagi tanaman dan memerlukan tindakan remediasi; atau kombinasi dari kedua kondisi tersebut sehingga diperlukan tindakan pemupukan sekaligus remediasi secara integratif.

Berkaitan dengan jenis, fungsi, dan proporsi optimalnya yang dibutuhkan oleh tanaman, unsur hara tanaman dapat dipilah menjadi dua kelompok besar, yaitu unsur hara esensial dan unsur hara fungsional. Kedua kelompok tersebut dibahas lebih rinci pada sub bab berikut.

1. Unsur Hara Esensial

Pada pertengahan abad 19, ilmuwan dari Jerman (von Liebig) menjelaskan bahwa sejumlah unsur hara

adalah mutlak dibutuhkan oleh tanaman, dan disebut unsur hara esensial. Artinya, jika suatu unsur hara esensial tidak tersedia optimal bagi tanaman, baik karena kuantitasnya yang kurang ataupun kelebihan, maka pertumbuhan tanaman itu akan terganggu, dan tingkat ketersediaan unsur hara yang tidak optimal itu akan menjadi faktor pembatas pertumbuhan maupun hasil tanaman.

Hingga sekarang telah teridentifikasi sebanyak 16 jenis unsur hara esensial seperti ditampilkan pada Tabel 1. Selain itu, pada beberapa dekade terakhir telah terbukti bahwa unsur silikat (Si) berfungsi sangat penting bagi pertumbuhan dan produksi tanaman. Tetapi, hingga sekarang unsur Si belum diakui sebagai unsur hara esensial, meskipun telah teridentifikasi fungsinya yang sangat penting dalam proses fisiologi pertumbuhan dan produksi tanaman. Unsur silikat (Si) diklasifikasikan sebagai unsur fungsional.

Unsur hara esensial dapat dipilah menjadi dua kelompok, yaitu unsur hara mineral dan unsur hara non-mineral. Unsur hara mineral adalah semua unsur hara pada Tabel 1 (kecuali C, H, dan O), sebagian besar (kecuali N) bersumber dari mineral/batuan atau bahan geologi. Unsur hara non-mineral meliputi unsur C, H, dan O bersumber dari udara dan air, dan menduduki 60 – 70 % jaringan tanaman.

Tabel 1. Jenis, bentuk, proporsi, serta sumber dan fungsi utama unsur hara esensial bagi tanaman

No	Jenis dan Simbul Unsur Hara	Bentuk Unsur yang Diserap Tanaman	Proporsi Serapan Hara (%) *	Sumber dan Fungsi Utama dalam Tanaman
1.	Karbon (C)		100	Air dan atmosfer: komponen utama jaringan tanaman
2.	Hidrogen (H)			
3.	Oksigen (O)			
4.	Nitrogen (N)	NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻		Udara dan bahan organik: protein, asam amino
5.	Fosfat (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ⁻²	16	Mineral/batuan, bahan organik: asam nukleat: ATP:
6.	Kalium (K)	K ⁺	25	Mineral/batuan: katalis, transfortasi ion
7.	Sulfur (S)	SO ₄ ⁻²	12,5	Mineral/batuan: asam amino
8.	Kalsium (Ca)	Ca ⁺²	8	Mineral/batuan: komponen dinding sel
9.	Magnesium (Mg)	Mg ⁺²	3	Mineral/batuan: bagian dari klorofil
10.	Besi (Fe)	Fe ^{+2/+3}	0,2	Mienral/batuan: sintesa klorofil
11.	Mangan (Mn)	Mn ^{+2/+5}	0,2	Mineral/batuan: aktivator enzim
9.	Magnesium (Mg)	Mg ⁺²	3	Mineral/batuan: bagian dari klorofil
10.	Besi (Fe)	Fe ^{+2/+3}	0,2	Mienral/batuan: sintesa klorofil
11.	Mangan (Mn)	Mn ^{+2/+5}	0,2	Mineral/batuan: activator enzim
12.	Seng (Zn)	Zn ⁺²	0,03	Mineral/ba tuan: activator enzim
13.	Tembaga (Cu)	Cu ⁺²	0,01	Mineral/batuan: komponen enzim
14.	Boron (B)	BO ⁻³	0,2	Mineral/batuan: komponen dinding sel
15.	Molibdenum (Mo)	Mo ⁻²	0,001	Mineral/ba tuan: fiksasi N
16.	Klor (Cl)	Cl ⁻	0,3	Mineral/ba tuan: reaksi fotosintesis

*Dirangkum dari Bennett (1993)

Dalam konteks pemenuhan kebutuhan unsur hara bagi tanaman yang optimal, masalah kekurangan atau kelebihan unsur hara sering terjadi pada unsur hara mineral. Oleh karena itu unsur hara tersebut lebih banyak mendapat perhatian pelaku usaha tani dibandingkan unsur hara lainnya.

Unsur hara mineral dapat dibagi lebih rinci berdasarkan bandingan relatif kuantitasnya yang dibutuhkan oleh tanaman, yaitu (1) unsur hara primer (N, P, dan K), (2) unsur hara sekunder (S, Ca, dan Mg), dan (3) unsur hara mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, dan Cl). Unsur hara primer dan sekunder sering digabungkan menjadi satu kelompok sebagai unsur hara makro. Welch (1995) memasukan unsur kobal (Co) dan natrium (Na) sebagai unsur hara esensial beberapa jenis tanaman tertentu dan dimasukkan ke dalam kelompok unsur hara mikro.

a. Unsur Hara Mineral Primer

Unsur hara primer (N, P, dan K) mempunyai peran sangat penting kaitannya dengan pertumbuhan dan hasil tanaman. Kebutuhan tanaman akan ketiga unsur tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan unsur hara esensial lainnya. Ketidak-mampuan suatu tanah untuk memasok salah satu atau ketiga unsur hara tersebut dalam jumlah yang cukup dan berimbang akan sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan serta kuantitas maupun kualitas hasil tanaman yang diusahakan pada tanah tersebut.

Pada usaha tani modern, peningkatan intensitas tanam dan penggunaan varietas tanaman yang berpotensi produksi tinggi sering menyebabkan terjadinya kekahatan ketiga unsur tersebut. Oleh karena itu, pupuk yang mengandung unsur N, P, dan K merupakan jenis pupuk yang paling banyak digunakan dalam usaha tani saat ini.

Nitrogen (N).

Unsur N diserap oleh tanaman dalam bentuk NH_4^+ dan NO_3^- . Diantara unsur hara mineral seperti tertera pada Tabel 1, nitrogen adalah yang paling banyak dibutuhkan tanaman. Tetapi, dosis aplikasi pupuk N yang optimum untuk berbagai jenis tanaman sangat beragam. Tanaman serealia, misalnya padi dan jagung, membutuhkan pupuk N relatif lebih tinggi dibandingkan untuk tanaman kacang (legum). Tanaman legum dapat memasok sendiri sebagian besar - seluruh kebutuhan unsur hara N melalui kerjasama yang saling menguntungkan (simbiosis mutualisme) antara akar tanaman legum itu dengan bakteri penambat N (*Rizobium sp*) di dalam tanah.

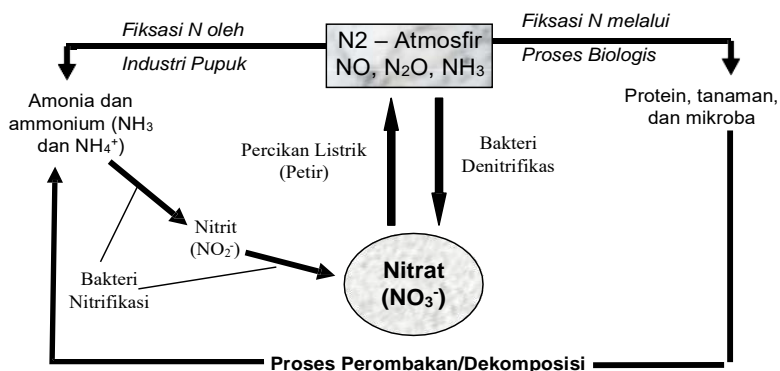
Dalam proses fisiologis pada jaringan tanaman, unsur N berfungsi terutama sebagai komponen asam amino dan protein; keduanya merupakan bagian utama pada setiap sel jaringan tanaman. Tanaman membutuhkan unsur N untuk pembentukan seluruh organnya, terutama pada fase pertumbuhan (vegetatif). Oleh sebab itu, apabila suatu tanaman kekurangan N, maka tanaman itu akan sangat terhambat

pertumbuhan vegetatifnya dan berakibat hasil tanaman yang sangat rendah, bahkan dapat mati atau gagal panen.

Ciri tanaman yang kekurangan N umumnya adalah daunnya berwarna kekuningan pucat dan pertumbuhannya sangat terhambat atau kerdil. Sebaliknya, jika kelebihan N, tanaman itu akan tumbuh terlalu subur (*succulent*), sehingga mudah rebah dan peka terhadap serangan hama dan penyakit. Kedua kondisi ekstrim itu menyebabkan rendahnya kuantitas atau/dan kualitas hasil tanaman.

Sumber unsur N tersebar luas di kerak bumi (litosfir), udara (atmosfir), air (hidrosfir), dan organisme (biosfir). Stevenson (1972) memperkirakan kandungan N yang terbesar adalah di litosfir ($16.360 \times 10^{13} \text{ m}^3$) dalam berbagai bentuk, karena masa litosfir yang sangat besar; sedangkan sumber N terbesar kedua adalah atmosfir ($386 \times 10^{13} \text{ m}^3$). Atmosfir mengandung sekitar 78 % N dalam bentuk gas (terutama N_2), sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tanaman. Agar dapat diserap oleh tanaman, gas N itu perlu diubah menjadi amonium (NH_4^+) atau nitrat (NO_3^-). Untuk memahami proses transformasi unsur N, disajikan skema siklus N pada Gambar 1.

Komponen utama dari siklus nitrogen dimulai dari gas N di atmosfir. Selain proses fiksasi N oleh industri pupuk melalui reaksi anorganik, ada 4 proses biologis yang terlibat dalam siklus N, yaitu (1) fiksasi



Gambar 1. Skema siklus nitrogen

nitrogen oleh bakteri Rizobium, (2) perombakan bahan organik oleh beragam jenis organisme tanah, (3) nitrifikasi N oleh bakteri *Nitrosomonas* (oksidasi NH₃ menjadi NO₂⁻) dan bakteri *Nitrobacter* (oksidasi NO₂⁻ menjadi NO₃⁻), dan (4) denitrifikasi (mengubah NO₃⁻ menjadi gas NO dan N₂O).

Dua bentuk nitrogen oksida (NO dan N₂O) terdapat di atmosfer sebagai hasil interaksi antara unsur nitrogen dengan oksigen. Unsur nitrogen itu akan bereaksi dengan oksigen pada tekanan dan temperatur tinggi. Kondisi itu dapat terjadi di sekitar percikan listrik (petir) dan reaktor, dihasilkan N₂O, NO, dan NO₂. Selanjutnya NO₂ dapat bereaksi dengan air (hujan) membentuk asam HNO₃ yang dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman.

Nitrogen di atmosfer menjadi bagian dari proses fiksasi N pada industri pupuk N dan fiksasi biologis oleh bakteri penambat N secara individu maupun bekerjasama dengan tanaman inang (tanaman legum).

Fiksasi N tersebut mentransformasikan N dari atmosfer menjadi ammonia (NH_3), kemudian menjadi ion nitrit (NO_2^-), dan akhirnya menjadi ion nitrat (NO_3^-).

Ammonium (NH_4^+) terbentuk melalui proses sintesa yang dikenal dengan proses Haber. Nitrogen dan hidrogen direaksikan pada tekanan dan temperatur tinggi dengan bantuan suatu katalis untuk menghasilkan ammonium. Ammonium yang dihasilkan dapat diproses lebih lanjut menjadi ammonia (NH_3); dan jika pada suasana masam, NH_3 dapat diubah menjadi ammonium (NH_4^+). Selanjutnya, ammonium direaksikan dengan asam karbonat sehingga dihasilkan pupuk urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), atau dengan asam nitrat dihasilkan pupuk ammonium nitrat (NH_4NO_3). Dari jalur lain, dekomposisi senyawa organik (protein), limbah/kotoran, dan bahan organik lain juga menghasilkan ion nitrat. Pada kondisi oksidatif, ion ammonium dapat teroksidasi menjadi nitrat. Sebaliknya, nitrat dapat ditransformasi menjadi gas nitrogen (N_2O) oleh bakteri denitrifikasi dalam kondisi anaerob, bakteri memanfaatkan oksigen dari nitrat tersebut.

Berdasarkan siklus hara seperti dijelaskan di atas, unsur N sangat labil, mudah berubah dari bentuk yang dapat dimanfaatkan tanaman (NH_4^+ dan NO_3^-) menjadi gas nitrogen (NH_3 , N_2O) yang mudah hilang dari rizosfir ke atmosfer. Selain itu, pupuk nitrogen (urea atau garam nitrat) sangat mudah larut dalam air sehingga mudah terbawa oleh aliran permukaan dan perkolasi. Kedua sifat tersebut harus menjadi bahan

pertimbangan dalam penggunaan pupuk N dalam usaha tani. Cara praktis yang sering diterapkan dalam usaha tani adalah pemberian pupuk N secara bertahap (2 – 3 kali dalam sekali musim tanam 3 – 4 bulan) dan pupuk tersebut dibenamkan ke dalam tanah, tidak disebar di permukaan tanah.

Fosfor (P).

Unsur hara P dibutuhkan oleh tanaman dalam kuantitas terbesar kedua setelah N. Fungsi P berkaitan dengan penyimpanan dan transfer energi pada proses metabolisme di dalam jaringan tanaman, yaitu sebagai komponen utama dari molekul ATP (*adenosine triphosphate*) yang dapat berubah menjadi ADP (*adenosine diphosphate*) + energi. Selain itu, P merupakan bagian penting dari RNA (*ribonucleic acid*) dan DNA (*deoxyribonucleic acid*). Peran penting lainnya dari P di dalam jaringan tanaman antara lain:

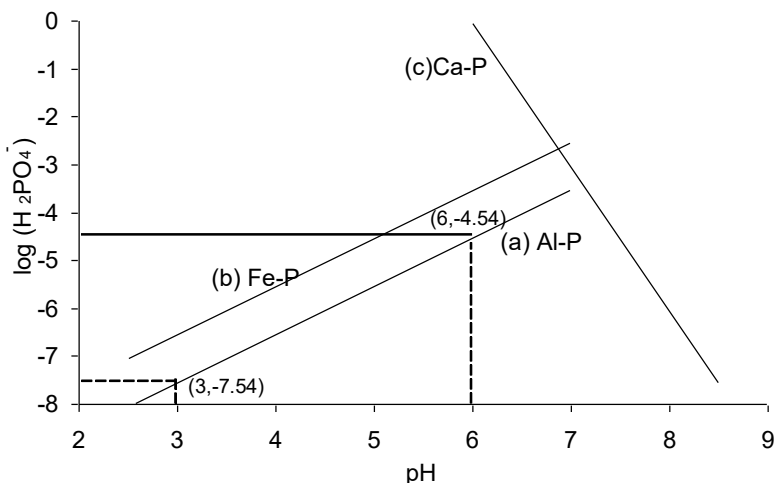
- a. sebagai komponen utama senyawa *phospholipids* yang berperan penting dalam pembentukan membran sel,
- b. diperlukan dalam berbagai proses fisiologi penting, misalnya fotosintesis dan penambatan nitrogen,
- c. diperlukan untuk menstimulir perkembangan akar tanaman, terutama akar serabut,
- d. diperlukan pada tahap perkembangan dan pemasakan buah atau biji tanaman, dan P banyak tersimpan di dalam buah dan biji dalam bentuk senyawa phytin (inositol heksafosfat).

Karena begitu pentingnya peran P bagi tanaman seperti disebutkan di atas, maka jika tanaman kekurangan unsur hara P akan berakibat terhambatnya pertumbuhan dan penurunan hasil tanaman yang signifikan. Pada tanaman yang kekurangan P, pertumbuhan batang dan akarnya serta proses pematangan buah sangat terhambat. Pada tanaman padi, kekurangan P dapat menyebabkan persentase gabah ham-pa sangat tinggi. Tanaman jagung yang kekurangan P dapat dikenali dari perubahan warna daunnya dimana di bagian pinggir daunnya berubah warnanya menjadi kemerahan tua.

Tanaman menyerap P dalam bentuk ion fosfat (terutama H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-}). Bentuk P di dalam tanah sangat beragam dan relatif sulit tersedia bagi tanaman. Hal itu karena ion fosfat tersebut sangat mudah membentuk senyawa kompleks dengan kation bervalensi ganda (*divalent*), misalnya Ca^{+2} dan Mg^{+2} , dan bervalensi jamak (*polyvalent*), misalnya Fe^{+3} , Mn^{+5} , dan Al^{+3} , atau terjerap oleh senyawa oksida dan partikel koloidal organik maupun anorganik lainnya sehingga tidak tersedia bagi tanaman.

Ketersediaan P di dalam tanah bagi tanaman sangat dipengaruhi oleh tingkat kelarutan senyawa kompleks tersebut yang dikontrol terutama oleh pH tanah. Pada pH rendah (tanah masam), kelarutan logam *polyvalent* relatif tinggi dan membentuk senyawa kompleks dengan P; sedangkan pada pH tinggi (tanah basa), asam fosfat banyak berikatan dengan

kation *divalent* (Ca dan Mg) membentuk senyawa kompleks Ca-P dan Mg-P. Tingkat ketersediaan P tertinggi adalah pada pH tanah sekitar netral (pH 7.5), seperti tampak pada diagram hubungan antara pH dengan P terlarut pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram hubungan antara pH dengan $\log (H_2PO_4^-)$ pada sistem (a) Al-P dan $Al(OH)_3$, (b) Fe-P dan $Fe(OH)_2$, dan (c) Ca-P dan $CaCO_3$ (Priyono, 2005b).

Selain dari pupuk, sumber utama P di dalam tanah adalah dari bahan induk (batuan) yang mengandung mineral fosfat (apatit) dan senyawa/mineral renik pada batuan itu yang umumnya berkadar P sangat rendah. Misalnya, batuan basalt dari beberapa gunung api di Pulau Jawa, Lombok, dan Sumbawa (Priyono et al., 2009) mengandung total fosfat < 0,01 % P_2O_5 . Sumber P tanah lainnya yang cukup signifikan adalah bahan organik dengan kadar P yang sangat beragam, tergantung pada jenis dan tingkat

kematangan/dekomposisi bahan organik tersebut. Biomasa tanaman kelompok legum umumnya mengandung P relatif tinggi dibanding biomasa dari tanaman non-legum.

Berbeda dengan pupuk N, masalah yang sering dihadapi dalam aplikasi pupuk P adalah sangat lambatnya pelarutan unsur P dari pupuk di dalam tanah. Misalnya dari pupuk SP-36, umumnya hanya sekitar 40 % unsur P dari pupuk yang diaplikasikan itu yang dapat diserap tanaman. Selain daya larut pupuk P relatif rendah, ion fosfat yang telah terlarut dari pupuk itu juga mudah membentuk senyawa kompleks seperti dijelaskan di atas. Unsur P dari senyawa kompleks P-organik relatif lebih mudah terlarut dibanding P dari senyawa kompleks anorganik (Al-P, Fe-P, Ca-P, atau Mg-P). Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi aplikasi pupuk P sebaiknya dibarengi dengan pemberian bahan organik (kompos). Selain itu, penggunaan mikoriza juga direkomendasikan untuk tujuan meningkatkan kelarutan P yang ada di dalam tanah. Pupuk hayati yang berisi organisme pelarut P atau/ dan penambat N juga telah banyak ditawarkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk P.

Kalium (K).

Unsur K merupakan unsur hara primer yang dibutuhkan oleh tanaman dalam kuantitas tinggi ketiga setelah N dan P, diserap oleh tanaman dalam bentuk ion K^+ . Kalium tergolong unsur hara yang labil dalam jaringan tanaman. Selain sebagai salah satu

komponen sel jaringan, terutama jaringan tanaman muda, unsur K berfungsi dalam proses fisiologis tanaman sebagai katalisator dan pengatur transfortasi ion. Misalnya, keberadaan K di dalam jaringan tanaman membantu pembentukan protein dan karbohidrat, mengeraskan jerami dan bagian kayu, meningkatkan resisten tanaman terhadap serangan hama dan penyakit, dan meningkatkan kualitas biji atau buah. Unsur K juga berfungsi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan melalui mekanisme penguatan kerangka jaringan sel, sehingga pupuk K sangat penting dalam usaha tani di lahan kering.

Indikasi tanaman yang mengalami defisiensi K adalah warna daunnya terlihat lebih tua, mengkerut keriting, timbul bercak merah kecoklatan, dan perkembangan buahnya tidak sempurna (terlambat matang, mudah rontok, dan daya simpannya rendah). Pada tanaman padi, kekurangan K dapat menyebabkan kualitas gabah atau beras rendah, kurang bernas. Namun kelebihan K kurang berdampak terhadap kuantitas produksi tanaman pangan.

Sumber utama unsur K di dalam tanah adalah bahan induk, terutama kelompok mineral mika, misalnya, mineral muskovit [$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$] dan biotit [$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$], dan kelompok K-feldspar, misalnya, ortoklas (KAlSi_3O_8). Komposisi mineral pada batuan felsik umumnya didominasi oleh K-feldspar, sehingga tanah yang terbentuk dari kelompok batuan felsik jarang kahat K. Sebaliknya, tanah yang

terbentuk dari batuan mafik (didominasi oleh mineral ferromagnesium silikat) juga mengandung mineral Ca-feldspar, umumnya kadar K relatif rendah sehingga diperlukan aplikasi pupuk K secara rutin, terutama jika tanah itu telah ditanami secara intensif dalam jangka waktu yang lama.

b. Unsur Hara Mineral Sekunder

Yang termasuk unsur hara sekunder adalah sulfur (S), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg). Kebutuhan tanaman akan ketiga unsur hara sekunder cukup tinggi, tetapi masih lebih rendah dibanding unsur hara primer (lihat Tabel 1).

Sulfur (S).

Sulfur diserap tanaman dalam bentuk ion sulfat (SO_4^{2-}). Unsur tersebut merupakan bagian dari komponen protein, yaitu *cystein*, *methionin* serta *thiamine*. Sulfur terutama dibutuhkan oleh tanaman yang masih muda. Di bagian buah, kadar S lebih tinggi daripada kadar P. Pada tanaman legum, unsur S berperan penting dalam pembentukan bintik akar. Sesuai dengan fungsi S tersebut, dan jika tanaman kekurangan S maka pertumbuhannya akan terhambat.

Kasus keracunan S secara langsung jarang terjadi. Tetapi, masalah kesuburan tanah yang berkaitan dengan keberadaan unsur S umumnya secara tidak langsung berkaitan dengan kemasaman tanah. Tanah yang mengandung sulfur tinggi umumnya bereaksi sangat masam. Pada tanah masam tersebut, kelarutan

unsur mikro (Fe, Zn, dan Cu) sangat tinggi dan bersifat racun bagi tanaman.

Sumber utama unsur S di dalam tanah adalah mineral sulfida dan bahan organik. Batuan beku umumnya mengandung sangat sedikit mineral sulfida, sehingga sumbangan S secara langsung dari batuan beku relatif kecil. Contoh mineral sulfida adalah pirit atau markasit (FeS_2). Mineral itu banyak dijumpai pada tanah di lahan pasang surut atau rawa, dan limbah galian pada industri pertambangan logam dan batubara. Pada kondisi oksidatif, mineral pirit sangat labil, cepat teroksidasi menghasilkan mineral jarosit yang berwarna kuning jerami [$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$], gipsum (CaSO_4), dan asam sulfat (H_2SO_4). Peningkatan konsentrasi asam sulfat sebagai akibat terjadinya oksidasi pirit menyebabkan tanah menjadi sangat masam ($\text{pH} < 2,5$).

Kalsium (Ca).

Kalsium diserap oleh tanaman dalam bentuk ion (Ca^{+2}). Sumber utama Ca di dalam tanah adalah dari bahan induk (mineral dan batuan), terutama yang termasuk dalam kelompok batuan mafik dan kapur. Peran Ca sangat penting sebagai komponen membran sel dan dalam pengaturan beragam fungsi sel, seperti halnya hormon. Misalnya, Ca berperan dalam pengaturan fungsi mobilisasi protein yang mengatur penyerapan dan pergerakan unsur hara ke dalam akar dan seluruh sel tanaman. Agar fungsi tersebut dapat berjalan normal, diperlukan Ca tersedia yang cukup pada

permukaan akar tanaman. Fungsi tersebut juga berkaitan dengan kemampuan tanaman dalam menetralkan senyawa dan kondisi tanah yang merugikan tanaman itu.

Tanaman legum membutuhkan Ca lebih tinggi dibanding yang dibutuhkan oleh tanaman non-legum. Jika kekurangan Ca, setiap jenis tanaman menunjukkan gejala yang berbeda. Umumnya, kekurangan Ca dicirikan oleh munculnya klorosis di bagian tepi daun muda, kemudian menjalar ke tulang daun sehingga daun tidak dapat berkembang dengan baik. Kekurangan Ca pada tanaman kacang tanah (legum) dapat signifikan menurunkan kuantitas dan kualitas produksi (biji).

Magnesium (Mg).

Magnesium diserap tanaman dalam bentuk ion (Mg^{+2}). Sumber utama Mg di dalam tanah adalah bahan induk tanah (mineral dan batuan), terutama yang termasuk dalam kelompok batuan mafik dan dolomit. Unsur Mg mempunyai fungsi sangat penting terutama dalam fotosintesis (komponen penting dalam molekul klorofil). Magnesium juga terlibat dalam berbagai reaksi enzimatik, misalnya pembentukan asam amino, vitamin, lemak, dan gula. Ion Mg^{+2} bereaksi dengan P dalam proses penyerapan dan transportasi unsur hara di dalam jaringan tanaman. Gejala pada tanaman yang kekurangan Mg adalah warna kekuningan, dimulai pada daun yang tua kemudian

menjalar ke daun yang muda. Gejala tersebut mirip dengan gejala tanaman yang kekurangan N.

c. Unsur Hara Mikro

Unsur hara mikro meliputi besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), boron (B), molibdenum (Mo), dan klor (Cl), dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah relatif sedikit (mikro gram). Sumber utama unsur hara mikro adalah dari bahan induk tanah (batuan/mineral), limbah industri/pertambangan logam, dan bahan organik. Ketersediaan/kelarutan unsur hara mikro di dalam tanah masam umumnya tinggi (kecuali Mo) dan dapat bersifat toksik bagi tanaman. Sebaliknya, tanaman dapat mengalami kekahatan unsur mikro pada tanah bereaksi basa. Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman adalah terlibat dalam berbagai reaksi enzimatik (Tabel 2).

Meskipun diperlukan oleh tanaman dalam kuantitas sangat rendah, kekurangan unsur hara mikro dapat menurunkan kuantitas maupun kualitas produksi tanaman yang signifikan. Kondisi sebaliknya, dampak dari keracunan (kelebihan) unsur hara mikro umumnya lebih nyata terhadap kuantitas maupun kualitas produksi tanaman. Tanaman yang keracunan unsur mikro sering terjadi di sekitar daerah industri tambang logam, atau daerah pertanian yang terkena cemaran limbah dari industri yang banyak mengandung logam atau/dan senyawa organik bersifat toksik bagi tanaman.

Tabel 2. Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman

No	Unsur	Fungsi utama
1.	Besi (Fe)	Penting dalam pembentukan klorofil
2.	Mangan (Mn)	Terlibat dalam reaksi enzimatis pemecahan karbohidrat, dan metabolisme nitrogen
3.	Seng (Zn)	Penting dalam proses transformasi karbohidrat, pengaturan konsumsi gula, dan komponen dari enzim yang mengatur pertumbuhan tanaman.
4.	Tembaga (Cu)	Penting dalam proses reproduktif (pemasakan buah)
5.	Boron (B)	Penting dalam perkembangan buah dan biji, membantu dalam penggunaan unsur hara dan pengaturan unsur hara lain, dan terlibat dalam proses pembentukan gula dan karbohidrat
6.	Molibdenum (Mo)	Berperan dalam penggunaan nitrogen oleh tanaman
7.	Klor (Cl)	Berperan dalam proses metabolisme

2. Unsur Hara Fungsional

Suatu jenis unsur yang selama ini tidak atau belum dianggap sebagai unsur hara esensial, tetapi mempunyai peran fisiologis penting pada banyak jenis tanaman, adalah unsur silikat (Si). Banyak peneliti menunjukkan bukti tentang peran penting unsur Si pada tanaman, terutama pada jenis tanaman rerumputan (*gramineae*). Selain di bidang pertanian, fungsi sangat penting dari Si dalam bidang kesehatan hewan dan manusia juga telah diketahui, yaitu sebagai penguat jaringan tulang dan organ tubuh lainnya (termasuk jaringan jantung). Demikian halnya di bidang kosmetik, unsur silikat telah lama menjadi komponen

penting pada teknologi penundaan penuaan (*anti aging*) sel kulit dan memodifikasi bentuk organ tubuh sesuai dengan kehendak pasien. Oleh karena itu, penggunaan pupuk Si yang telah terbukti meningkatkan kualitas (kandungan Si) bahan pangan, tentu akan berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kesehatan manusia sebagai konsumen produk pertanian.

Berkaitan dengan bidang pertanian, aplikasi Si terbukti dapat (1) menstimulir pertumbuhan dan meningkatkan hasil dari beberapa jenis tanaman (Epstein, 1999), misalnya *ryegrass* (Priyono, 2005a) dan padi (Priyono et al., 2007), (2) mengurangi efek keracunan Mn pada beberapa spesies tanaman (Marschner, 1986) dan inhibisi Al pada perakaran jagung (Ma et al., 1996; Corrales et al., 1996), dan (3) meningkatkan daya tahan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit tanaman (Volk et al., 1958; Priyono et al., 2020) serta terhadap cekaman kekeringan (Ma & Takahashi, 2002). Peneliti lain, Coventry et al. (2001) mengaitkan pengaruh positif dari penggunaan bubuk batuan silikat basaltik terhadap penurunan tingkat keracunan tanaman oleh Al pada tanah lateritik. Hal itu tampaknya berkaitan dengan peran bubuk batuan sebagai bahan pengapuran (*liming material*) dan sumber unsur Ca dan Mg untuk tanah lateritik (masam) daripada sebagai sumber unsur Si yang dapat meredam toksisitas Al. Artyszak et al. (2018) menelaah detail tentang pengaruh aplikasi Si

meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil tanaman dari hasil penelitian di Eropa.

Berbagai informasi yang berkaitan dengan keuntungan dari aplikasi pupuk berkadar Si tinggi terhadap pertumbuhan serta kuantitas dan kualitas hasil tanaman banyak diulas *online* dalam '*Beneficial Nutrient News*'. Ma dan Takahachi (2002) merangkum berbagai hasil penelitian di Jepang tentang sifat dan peran unsur Si pada tanaman padi. Saat ini pupuk berbasis silikat mulai banyak diproduksi oleh industri pupuk dan digunakan oleh petani, terutama pada usaha tani tanaman padi dan tebu. Kontribusi Si yang berasal dari pupuk batuan silikat terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman, merupakan salah satu keuntungan dari penggunaan pupuk dari bahan geologi (mineral dan batuan) tersebut.

B. Permasalahan Unsur Hara

Masalah teknis usaha tani yang dihadapi oleh para petani antara lain berkaitan dengan status unsur hara esensial pada tanah di lahan usahanya. Permasalahan itu meliputi kekurangan (kahat), kelebihan (toksik), atau ketidakimbangan unsur hara tersedia bagi tanaman. Masalah pertanian muncul karena sebagian tanah pertanian yang ada tidak dapat berfungsi optimal sebagai pemasok utama unsur hara tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut. Untuk dapat mengatasi masalah itu secara tepat, maka penyebab utama yang memicu kondisi keharaan yang

tidak optimal bagi pertumbuhan dan hasil tanaman tersebut harus diidentifikasi.

Seperti telah dijelaskan pada sub bab 2.1, kekurangan (kekahatan) atau kelebihan (keracunan) oleh satu atau beberapa unsur hara esensial yang tercantum dalam Tabel 1 akan menyebabkan pertumbuhan atau/dan hasil tanaman itu kurang optimal. Kuantitas yang 'cukup' dan proporsi yang 'berimbang' tersebut bersifat spesifik, tergantung pada jenis unsur hara dan tanaman. Nilai proporsi unsur hara esensial (pada Tabel 1) menunjukkan kebutuhan unsur hara relatif dari masing-masing jenis unsur hara esensial.

Proporsi unsur hara yang tercantum pada Tabel 1 adalah nilai rerata untuk berbagai jenis tanaman. Meskipun agak kasar, setidaknya nilai tersebut dapat memberi gambaran umum tentang perlunya diperhatikan proporsi unsur hara dalam tanah yang tersedia bagi tanaman. Konsep 'pemupukan berimbang' harus memperhatikanimbangan antar semua unsur hara esensial, bukan hanya status unsur hara N, P, dan K.

Ketersediaan unsur hara esensial tersebut juga harus dalam proporsi yang berimbang. Unsur hara yang ketersediaannya paling tidak optimal (kekurangan ataupun kelebihan) akan menjadi faktor penentu kondisi pertumbuhan dan produksi tanaman tersebut. Permasalahan usaha tani yang berkaitan dengan kekurangan unsur hara dapat diatasi dengan pemupukan, sedangkan masalah keracunan unsur hara umumnya karena kelebihan unsur hara mikro atau

logam berat dan dapat diatasi dengan aplikasi bahan amelioran.

Masalah kondisi tanah tersebut dapat disebabkan oleh (1) sifat bawaan (*inherent properties*) dari tanah itu sendiri yang miskin hara, atau hanya mengandung beberapa jenis unsur hara tertentu, (2) akibat pengelolaan lahan yang kurang tepat sehingga terjadinya degradasi unsur hara pada tanah tersebut, atau (3) akibat dari kedua masalah tersebut. Khusus ketersediaan untuk unsur hara makro (N, P, dan K) di berbagai jenis tanah umumnya lebih rendah dibanding kebutuhan tanaman sehingga tanaman harus dipasok unsur hara tersebut melalui pemupukan.

Contoh sifat tanah bawaan umumnya berkaitan dengan jenis dan sifat bahan induknya, yaitu tanah yang terbentuk dari bahan batuan felsik (kadar silikatnya $> 60\% \text{ SiO}_2$). Tanah tersebut umumnya miskin hara esensial, baik unsur hara makro maupun mikro, tetapi cukup kaya unsur K. Sebaliknya, tanah yang terbentuk dari batuan mafik (kadar silikat total $< 50\% \text{ SiO}_2$) umumnya kaya kation basa (unsur hara makro maupun mikro). Perbedaan sifat tanah bawaan tersebut menunjukkan bahwa masalah kesuburan yang mungkin muncul pada kedua jenis tanah itu. Masalah itu menentukan kuantitas dan kualitas pupuk atau amelioran yang diperlukan untuk dapat meningkatkan produktivitas masing-masing tanah itu.

Selain karena sifat bawaan seperti dicontohkan di atas, munculnya masalah kesuburan tanah

pertanian dapat disebabkan oleh terjadinya penurunan kuantitas dan kualitas unsur hara di daerah perakaran (rizosfir) karena (1) hilangnya unsur hara oleh erosi yang berlebihan, volatilisasi (penguapan), pelindihan atau (2) defisit unsur hara karena terjadi pengurasan unsur hara sebagai karena intensitas tanam yang tinggi dan terus-menerus tanpa diimbangi dengan pasokan unsur hara ke dalam larutan tanah yang memadai. Jika faktor lain (misalnya iklim dan ketersediaan air) berada pada kondisi optimal, maka pertumbuhan dan hasil tanaman yang optimal akan terjadi secara berkelanjutan apabila terdapat keseimbangan antara pasokan unsur hara ke dalam dan yang keluar dari zona perakaran (diserap oleh tanaman). Upaya praktis untuk mempertahankan keseimbangan hara itu adalah dengan mengembalikan unsur hara yang terangkut ke luar sistem melalui panen ke petak tanam.

Dalam praktek usaha tani yang diterapkan saat ini, penggunaan varietas tanaman yang rakus unsur hara dan intensitas tanam yang tinggi (2 - 4 kali tanam per tahun) menyebabkan laju penyerapan unsur hara oleh tanaman (*out flow*) melebihi laju masukan (*in flow*) unsur hara tersebut ke larutan tanah, karena pelarutan unsur hara dari bahan induk ke larutan tanah relatif lambat. Upaya praktis yang dilakukan oleh petani untuk menyeimbangkan unsur hara tersebut (laju $in\ flow \geq out\ flow$) adalah melakukan pemupukan. Tetapi yang mereka aplikasikan umumnya hanya pupuk berhara makro (N, P

atau/dan K) dengan dosis relatif tinggi, tanpa pemberian unsur hara mikro. Praktek usaha tani seperti itu yang harus dibenahi.

Satu hal penting yang sering diabaikan adalah yang berkaitan dengan penggunaan pupuk N, P atau/ dan K secara rutin, berdosis relatif tinggi, tetapi tidak diimbangi dengan pasokan unsur hara mikro. Tindakan itu dapat menyebabkan terjadinya percepatan pengurasan unsur hara mikro dari tanah, sedangkan laju pelepasan unsur hara mikro dari sumber utama (batuan dan senyawa kompleks) umumnya sangat lambat (lebih lambat daripada pelarutan unsur hara makro). Banyak fakta lapang menunjukkan bahwa penggunaan pupuk N, P, atau/ dan K secara terus-menerus seperti itu telah menyebabkan munculnya banyak masalah degradasi tanah pertanian di banyak daerah sentra produksi tanaman pangan, diindikasikan dengan terjadinya kekahatan unsur hara mikro. Lebih jauh, praktek usaha tani seperti itu telah menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi aplikasi pupuk N, P/ dan K dan produktivitas lahan, serta kualitas produksi. Penggunaan pupuk yang mengandung unsur hara makro (N, P, K) secara terus-menerus seharusnya juga diimbangi dengan pemberian unsur hara mikro. Mengacu pada anjuran tersebut, penggunaan pupuk majemuk (mengandung unsur hara makro dan mikro, atau/ dan Si) diperkirakan akan menjadi model pertanian ke depan. Bahan baku pupuk yang memenuhi kriteria tersebut dan ketersediaannya

melimpah di berbagai tempat adalah bahan geologis (batuan vulkanik).

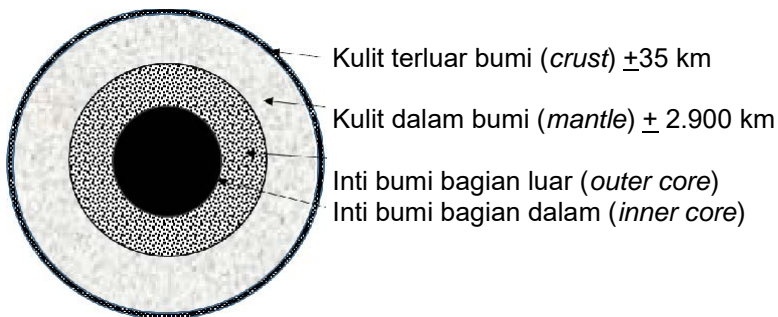
Uraian di atas menunjukkan tentang peran penting pengembangan agrogeologi untuk dapat berkontribusi signifikan terhadap upaya mengatasi masalah yang berkaitan dengan unsur hara bagi tanaman atau produktivitas lahan pertanian. Bahan geologis tersedia melimpah di permukaan bumi, mengandung multi nutrisi, dan merupakan bahan alami sehingga terjangkau ramah lingkungan dan berkelanjutan.

BAB III

BAHAN GEOLOGIS-MINERAL DAN BATUAN

A. Sumber Bahan Geologis

Bahan geologis yang dibahas dalam buku ini adalah mineral dan batuan yang berada pada lapisan terluar kerak bumi. Untuk tujuan ilustrasi tentang batuan penyusun bumi disajikan skema struktur kerak bumi pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema struktur kerak bumi

Seperti tampak pada Gambar 3, kerak bumi terdiri atas beberapa lapisan, yaitu lapisan kulit bumi terluar (*crust*), kulit bumi bagian dalam (*mantle*), inti bumi bagian luar (*outer core*), dan inti bumi bagian dalam (*inner core*). Lapisan *crust* ketebalannya ± 35

km, berupa daratan (*continental crust*) dan dasar lautan (*oceanic crust*) dengan berat jenis (BJ) umumnya $< 3,5$. Lapisan kulit bumi bagian dalam (*mantle*) mencakup sekitar 83 % volume bumi (radius 2.900 km), mempunyai BJ 3,3 - 5,7 dan terdiri atas dua lapisan utama. *Mantle* bagian teratas (dasar dari *crust*) ketebalannya sekitar 670 km, sering disebut pula sebagai lapisan SiAl (Si dan Al) karena didominasi oleh unsur Si dan Al; sedangkan di bagian bawahnya merupakan lapisan SiMg (didominasi oleh Si dan Mg) yang panas dan plastis. Inti bumi (radiusnya ± 3.500 km) terdiri atas bagian luar (*outer core*) banyak mengandung unsur besi (Fe) dan bagian dalam (*inner core*) terutama terdiri dari unsur nikel (Ni). Bobot jenis material penyusun kerak bumi makin ke dalam makin tinggi, berkorelasi dengan bobot atom dari logam yang mendominasi pada setiap lapisan.

Mineral dan batuan yang ada di bagian kulit bumi terluar (*crust*) kemungkinan dapat dimanfaatkan sebagai *input* usaha tani (pupuk atau amelioran). Material pada lapisan terluar tersebut sebagian besar terdiri atas mineral dan batuan silikat; komposisi kimia utamanya ditunjukkan di Tabel 3.

Berkaitan dengan pemanfaatannya untuk pupuk dan amelioran, aspek penting dari mineral dan batuan adalah ketersediaannya yang melimpah dan mengandung hampir semua unsur hara esensial bagi tanaman (kecuali N).

Tabel 3. Unsur kimia yang umumnya ditemukan pada mineral dan batuan di kerak bumi*

No	Unsur Kimia	Simbul	Persentase (% w/w)
1.	Oksigen	O	46,60
2.	Silika	Si	27,72
3.	Aluminium	Al	8,13
4.	Besi	Fe	5,00
5.	Kalsium	Ca	3,63
6.	Natrium	Na	2,83
7.	Kalsium	K	2,59
8.	Magnesium	Mg	2,09

*<https://www.kean.edu/~csmart/Observing/03.%20Rocks%20and%20minerals.pdf>

Layak - tidaknya bahan geologis tersebut untuk dimanfaatkan sebagai bahan pupuk atau amelioran sangat ditentukan oleh sifat fisik dan kimia batuan. Kedua sifat itu menentukan kualitas pupuk atau amelioran yang dihasilkan serta pemilihan teknik pengolahannya (*processing*) yang harus diterapkan untuk menghasilkan *input* usaha tani tersebut.

B. Pengertian Mineral dan Batuan

Menurut Klein & Philpotts (2013), mineral didefinisikan sebagai suatu bahan padatan anorganik yang homogen, memiliki komposisi kimia serta cara penyusunan unit dasar (struktur) yang teratur dan unik; sedangkan batuan adalah benda padat anorganik yang tersusun dari beberapa jenis mineral. Mengacu pada definisi tersebut, pada setiap jenis mineral terdapat dua aspek penting, yaitu struktur dasar dan komposisi kimiawinya yang unik. Karena batuan

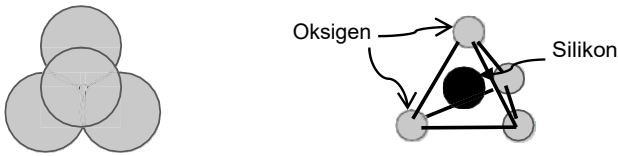
terdiri atas beberapa jenis mineral, maka sifat fisiko-kimia batuan itu ditentukan oleh gabungan dari sifat mineral penyusunnya.

1. Jenis dan Sifat Mineral

Lebih dari 2.000 jenis mineral yang telah teridentifikasi saat ini, dan mineral tersebut dapat dipilah menjadi dua kelompok, yaitu mineral silikat dan mineral non-silikat. Masing-masing kelompok tersebut dapat dipilah lebih rinci menjadi beberapa sub kelas berdasarkan kemiripan komposisi kimia dan penataan unit (struktur) dasarnya, sebagai berikut:

a. Mineral Silikat

Mineral silikat tersusun dari rangkaian silikat - oksigen (Si - O) yang membentuk struktur dasar 'tetrahedral' (Gambar 4). Struktur dasar tetrahedral Si terdiri atas satu ion Si^{+4} dikelilingi oleh 4 ion O^{-2} . Suatu unit dasar tetrahedral dapat berikatan dengan unit dasar tetrahedral yang lain melalui pemanfaatan bersama atom oksigen di sudut struktur itu membentuk rangkaian tetrahedral silikat dan dihasilkan padatan mineral silikat. Karakteristik suatu jenis mineral silikat sangat ditentukan oleh cara penyusunan struktur dasar tersebut membentuk suatu struktur padatan mineral itu.



Gambar 4. Struktur dasar tetrahedral silikat

Rumus kimia umum untuk mineral silikat adalah $X_m Y_n (Z_p P_q) W_r$:

X: kation yang mempunyai radius ionik lebih besar dan valensi lebih kecil daripada Si^{+4} , membentuk 6, 8, dan 12 koordinasi dengan O.

Y: kation dengan radius ionik sedang dan valensi 2 atau 3, membentuk 6 koordinasi dengan O.

Z: kation dengan radius ionik kecil dan valensi besar (3 atau 4) membentuk 4 koordinasi dengan O.

W: ion asesoris bervalensi 1, umumnya OH^- , F^- , Cl^- , atau yang ekuivalen.

Indeks p , q , m , n , dan r adalah angka yang menunjukkan jumlah ekuivalen ion untuk memenuhi keseimbangan muatan (*electronic neutrality*).

Sub klas mineral silikat dibedakan atas dasar nisbah $p : q$ (Si : O), atau cara penyusunan unit dasar tetrahedral SiO_4 pada kristal mineral tersebut. Terdapat enam sub klas mineral silikat, yaitu nesosilikat, sorosilikat, siklosilikat, inosilikat rangkaian tunggal dan ganda pilosilikat, dan tektosilikat. Struktur dasar dan contoh mineral dari masing-masing sub kelompok mineral silikat (kecuali Pilosilikat) disajikan pada Tabel 4, dan karakteristik dari setiap sub kelompok mineral silikat dijelaskan sbb:

1) Nesosilikat

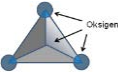

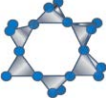
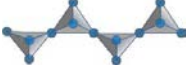
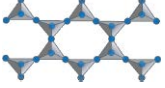
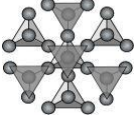
Sub kelompok mineral nesosilikat terdiri atas rangkaian tetrahedral SiO_4 tunggal dengan nisbah $p : q = 1 : 4$, yaitu $(\text{SiO}_4)^{-4}$, atau $3 : 12$, yaitu $(\text{Si}_3\text{O}_{12})^{-12}$. Empat atom oksigen pada masing-masing unit tetrahedral itu bebas, sehingga dapat berikatan dengan kation atau polihedral (rangkaian beberapa tetrahedral); dan unit tetrahedral lainnya dapat berikatan dengan polihedral tersebut. Karena struktur dasarnya tersusun dari beberapa unit tetrahedral bebas, maka umumnya kristal pada nesosilikat mempunyai dimensi dan bentuk yang sama, berkembang ke semua arah sehingga tidak mempunyai atau memperlihatkan sifat belahan (*cleavage*) yang unik. Karena cara penyusunan struktur dasar seperti itu, jenis mineral nesosilikat sangat kokoh/keras, tidak mudah terlapuk. Stabilitas relatif antar jenis mineral dalam sub kelas nesosilikat sangat ditentukan oleh jumlah dan jenis kation (unsur logam) yang terikat pada mineral tersebut.

2) Sorosilikat

Mineral pada sub kelas sorosilikat tersusun dari unit dasar gabungan dari dua unit tetrahedral yang terhubung melalui penggunaan satu atom oksigen secara bersamaan dengan nisbah $p : q = 2 : 7$ [$(\text{Si}_2\text{O}_7)^{-6}$]. Pada setiap unit dasar sorosilikat terdapat enam atom oksigen yang bebas untuk berikatan dengan kation atau polihedral. Unit sorosilikat itu dapat berikatan dengan polihedral lainnya. Contoh di mineral sub kelas sorosilikat, Epidot $[\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})]$

terdiri atas rantai tetrahedral aluminium oksida yang diikat bersama oleh tetrahedral silikat tunggal (SiO_4) dan tetrahedral silikat ganda (Si_2O_7).

Tabel 4. Sub klas, struktur dasar, dan contoh mineral silikat*

Sub Klas & Struktur Dasar	Contoh Mineral	Rumus Kimia Ideal
Nesosilikat 	Olivin Zirkon Topas Garnet	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ ZrSiO_4 $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F, OH})_2$ $\text{X}_3\text{Y}_2(\text{SiO}_4)_3$; X = Ca, Mg, Fe ⁺² , Mn ⁺² , Y = Al, Fe ⁺³ , Cr ⁺³
Sorosilitat 	Epidot Hemimorphite	$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$
Siklosilikat 	Beril Turmalin	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ $(\text{Ca, Na})(\text{Li, Mg, Al})(\text{Al, Fe, Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$
Inosilikat Tunggal 	Piroksin: Augit Hipersten Diopsit Piroksinoid: Wollastinit Rodonit	$(\text{Ca, Na})(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$ $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ CaSiO_3 MnSiO_3
Inosilikat Ganda 	Hornblend Tremolit Aktinolit	$(\text{Ca, Na})_{2-3}(\text{Mg, Fe, Al})_5\text{Si}_8(\text{Si, Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Tektosilikat 	Kwarsa Mikroclin Ortoklas Sanidin Albit Anortit Nepelin Kalsilit Leusit Analsin Khabasit Mesolit	SiO_2 KAISi_3O_8 KAISi_3O_8 $(\text{K, Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ $\text{Na AlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ $(\text{Na, K})\text{AlSiO}_4$ KAISi_2O_6 KAISi_2O_6 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\text{-H}_2\text{O}$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} - 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30} - 8\text{H}_2\text{O}$

* disarikan dari https://en.wikipedia.org/wiki/Silicate_mineral

3) Siklosilikat

Struktur dasar sub kelompok mineral siklosilikat terbentuk dari rangkaian tertutup (cincin), terdiri atas enam unit tetrahedral silikat yang saling berikatan dengan ikatan oksigen. Nisbah $p : q = 1 : 3$ $[(Si_2O_6)^{-4}]$ atau $6 : 18$ $[(Si_6O_{18})^{-12}]$. Dua belas atom oksigen pada setiap unit dasar siklosilikat bebas untuk berikatan dengan polihedral, sehingga unit dasar cincin itu dapat mengikat atom atau polihedral silikat lainnya. Ion lain dapat terjebak di dalam struktur cincin dan di dalam ruang antar struktur cincin tersebut.

4) Inosilikat

Mineral pada sub klas inosilikat terdiri atas rangkaian tetrahedral silikat yang memanjang melalui penggunaan bersama dua atom oksigen oleh dua unit tetrahedral silikat yang berdekatan. Inosilikat dibagi dua, yaitu inosilikat rangkaian tunggal $(SiO_3)^{-2}$ dan ganda $(Si_4O_{11})^{-6}$. Mineral dalam sub klas ini banyak terdapat pada batuan basalt.

Unit struktur dasar inosilikat rangkaian tunggal, lembaran struktur dasar polihedral silikat berikatan dengan lembaran polihedral lainnya, sehingga menghasilkan sifat belahan (*cleavage*) dua arah 90° (saling tegak lurus). Pada inosilikat rangkaian ganda, antar unit struktur dasar dipisahkan oleh rangkaian polihedral, menghasilkan sifat belahan (*cleavage*) dua arah 120° dan 60° .

5) Pinosilikat

Kelompok pinosilikat terdiri atas lembaran dari rangkaian unit dasar tetrahedral. Setiap unit memanfaatkan tiga O^{2-} secara bersamaan. Nisbah $p : q = 2 : 5$ atau $4 : 10$ menghasilkan unit dasar $(Si_2O_5)^{2-}$ atau $(AlSi_3O_{10})^{5-}$. Pada unit dasar tersebut terjadi substitusi isomorfik, yaitu suatu atom dalam rangkaian struktur kristal mineral digantikan kedudukannya oleh atom lain yang diameternya hampir sama sehingga penggantian kedudukan atom itu tidak merubah dimensi unit dasar dan struktur mineral tersebut. Pada kelompok pinosilikat, atom Al^{+3} menggantikan posisi sebagian atom Si^{+4} . Beberapa unit lembaran pinosilikat dipisahkan oleh unit polihedral sehingga menghasilkan sifat belahan (*cleavage*) berbentuk lembaran yang berkembang ke satu arah. Unsur logam (kation) lain dapat tersemat di ruang antar lembaran atau unit tetrahedral tersebut.

Pinosilikat yang banyak dijumpai pada tanah mineral adalah mineral liat (*clay*). Keberadaan mineral liat sebagai bagian dari partikel primer tanah mineral sangat penting. Keunikan dari mineral liat itu berkaitan dengan ukurannya yang sangat kecil ($< 2 \mu m$) sehingga permukaan efektifnya sangat luas. Setiap jenis mineral liat mempunyai muatan elektrik (negatif) yang unik. Kandungan mineral liat pada suatu jenis tanah sangat menentukan sifat fisik dan kimia tanah tersebut.

6) Tektosilikat

Sub klas mineral tektosilikat berupa rangkaian tetrahedral tiga dimensi, setiap unit struktur tektosilikat menggunakan 4 atom oksigen secara bersamaan. Pada struktur tektosilikat banyak terjadi substitusi isomorfik, yaitu Al^{+3} menggantikan posisi Si^{+4} pada struktur tetrahedral, sehingga terjadi kekurangan muatan positif atau kelebihan muatan negatif pada unit dasar tersebut, memungkinkan terbentuknya ikatan antara polihedral dengan oksigen di dalam struktur tetrahedral.

Nisbah p : q unit dasar tektosilikat beragam, yaitu 1:2, 2:4, 4:8, dan 6:12, atau (SiO_2) , $(\text{AlSiO}_4)^{-1}$, $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)^{-2}$, dan $(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12})^{-2}$. Pada unit dasar SiO_2 tidak terjadi substitusi isomorfik sehingga mutaatannya nol, sedangkan pada unit dasar berikutnya dari kiri ke kanan pada deret unit dasar itu terjadi substitusi Si^{+4} oleh Al^{+3} yang makin intensif sehingga muatannya makin negatif.

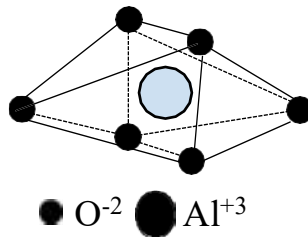
b. Mineral Silikat Khusus

Beberapa mineral silikat, terutama mineral liat (*clay*) dan zeolit, perlu dibahas secara khusus dan lebih detail karena sifat, peran dan kegunaan praktisnya yang dalam bidang pertanian serta bidang industri. Mineral liat adalah mineral silikat sekunder yang merupakan partikel primer tanah mineral yang sangat reaktif sehingga sangat menentukan sifat fisik dan kimia tanah; sedangkan zeolit adalah mineral silikat primer, daya jerapnya sangat tinggi, dan telah

banyak dimanfaatkan dalam bidang industri maupun pertanian.

1) Mineral Liat

Dalam bidang ilmu tanah, mineral liat secara fisik didefinisikan sebagai partikel mineral yang berukuran $< 2 \mu\text{m}$. Berdasarkan struktur kristalnya, mineral liat tersusun dari dua struktur dasar, yaitu struktur tetrahedral (T) dan oktahedral (O). Struktur dasar tetrahedral yang ideal terdiri atas satu ion silikat (Si^{+4}) yang dikelilingi oleh empat atom oksigen (4O^{-2}) membentuk struktur tiga dimensi empat bidang (tetra) seperti ditunjukkan pada Gambar 4; sedangkan struktur dasar oktahedral (Gambar 5) terdiri atas satu ion aluminium (Al^{+3}) dikelilingi oleh enam atom oksigen (6O^{-2}).



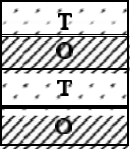
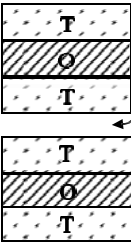
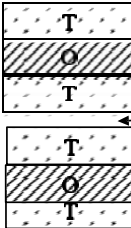
Gambar 5. Struktur dasar oktahedral aluminium

Struktur dasar tetrahedral dan oktahedral yang ideal tidak bermuatan (netral). Namun dalam proses alami pembentukannya, posisi Si^{+4} (diameter ioniknya 0,039 nm) pada struktur tetrahedral dapat tergantikan oleh Al^{+3} (diameter ioniknya 0,051 nm); sedangkan ion Al^{+3} pada struktur oktahedral dapat tergantikan oleh

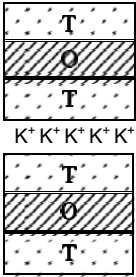
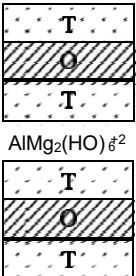
ion Ca^{+2} atau Mg^{+2} (diameter ioniknya berturut-turut adalah 0,099 dan 0,066 nm). Proses itu disebut substitusi isomorfik, yaitu penggantian kation pada struktur dasar mineral silikat tanpa merubah morfologi fisik dari struktur dasar itu. Substitusi isomorfik tersebut menyebabkan terjadinya ketidakimbangan muatan, yaitu kelebihan muatan negatif. Artinya, karena substitusi isomorfik, maka struktur tetrahedral maupun oktahedral yang kondisi idealnya tidak bermuatan (netral) menjadi bermuatan negatif; dan muatan itu bersifat tetap (tidak tergantung pH di sekitarnya). Ukurannya mineral liat sangat halus, dan adanya muatan tetap tersebut menyebabkan reaktivitasnya tinggi. Partikel yang memiliki reaktivitas tinggi umumnya kegunaannya sangat luas.

Mineral liat dibagi menjadi beberapa tipe berdasarkan susunan struktur dasar tetrahedral (T) dan oktahedral (O) pada kisi-kisinya serta jenis ion/senyawa penghubung antar kisi tersebut. Nama, tipe, struktur, dan karakteristik utama masing-masing jenis mineral liat dijelaskan secara ringkas pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan karakteristik utama mineral liat *

No	Nama, Tipe, dan Struktur Mineral	Karakteristik
1.	<p>Kaolinit dan Halloisit (1:1)</p>  <p>T = tetrahedral O = oktahedral</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kisi mineral tetrahedral – oktahedrat (T – O); antar 2 kisi dihubungkan O⁻² (Kaolinit, Al₂Si₂O₅(OH)₄) atau H₂O (Halloisit, Al₂Si₂O₅(OH)₄. 2H₂O) yang digunakan bersama oleh dua kisi. • Substitusi isomorfik pada tetrahedral, KTK liat 1 – 10 cmol_e kg⁻¹. • Ukuran mineral 0,2 - 2,0 μm, luas permukaan efektif 10. 10³ - 20.10³ m².kg⁻¹. • Sifat koloidal, adhesi - kohesi, plastisitas, dan mengembang – mengerut rendah. • Dominan pada tanah yang sudah berkembang lanjut (Ultisol, Oksisol).
2.	<p>Montmorilonit (2:1)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Kisi mineral T – O – T (2:1); antar dua kisi dihubungkan oleh Ca⁺² (musim kering) atau H₂O – Ca – H₂O (musim basah), sehingga mengembang-mengerut intensif. • Substitusi isomorfik terjadi di kisi tetrahedral (Si⁺⁴ di tetrahedral diganti Al⁺³) maupun pada oktahedral (Al⁺³ diganti Mg⁺²); • Rumus umum M_x(Al_{2-x}Mg_x)Si₄O₁₀(OH)₂, M_x = kation dapat bertukarkan (Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺). • Ukuran mineral kecil (0,01 - 1 μm), luas permukaan efektif 600.10³ - 800. 10³ m².kg⁻¹. • KTK liat 80 - 120 cmol_ekg⁻¹. • Sifat koloidal dan mengembang - mengerut sangat tinggi. • Dominan pada tanah Vertisol.
3.	<p>Vermikulit (2:1)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur montmorilonit, antar dua kisi dihubungkan dengan Mg(H₂O)⁺² yang dapat bertukarkan; mengembang-mengerut < montmorilonit. • Substitusi isomorfik pada tetrahedral dan octahedral > montmorilonit, sehingga KTK-nya 120 - 150 cmol_ekg⁻¹; rumus kimia [Mg(H₂O)₆]_{2n} [(Mg, Fe)₃(Si, Al)_{4-n}O₁₀(OH)₂]_n. • Ukuran mineral dan luas permukaan efektif mirip dengan montmorilonit: 0,01 - 1 μm, 600.10³ s/d 800. 10³ m².kg⁻¹. • Sifat koloidal, adhesi - kohesi, plastisitas, dan mengembang - mengerut agak tinggi. • Dominan pada tanah tanah belum berkembang lanjut, beragam jenis tanah.

Tabel 5 (Lanjutan)

No	Nama, Tipe, dan Struktur Mineral	Karakteristik	
4.	Mika (2:1), tidak mengembang/dan mengkerut	<ul style="list-style-type: none"> • Struktur kisi mineral seperti montmorilonit, namun antar dua kisi dihubungkan dengan K^{+2}, mengikat kuat kedua kisi. • Substitusi isomorfik pada tetrahedral, seperempat bagian Si^{4+} digantikan oleh Al^{3+}; rumus kimia setengah sel mika: $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$. • Perbedaan komposisi kimia dapat terjadi selama proses pembentukan mineral, misalnya, ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} dapat menggantikan posisi Mg^{2+} atau Al^{3+} dalam unit struktur dasar oktahedral; Na^+ dan Ca^{2+} menggantikan sebagian K^+ dalam ruang antar kisi 2:1 sehingga terdapat beberapa jenis mineral mika, antara lain muskovit $[K(Si_3Al)Al_2O_{10}(OH)_2]$, margarit $[Ca(Si_2Al_2)Al_2O_{10}(OH)_2]$, dan biotit $[K(Si_3Al)(Mg,Fe^{2+})_3O_{10}(OH)_2]$. • KTK mika hanya 20 - 40 cmol_c. kg⁻¹ dan luas permukaan efektifnya $70 \cdot 10^3$ - $120 \cdot 10^3$ m² kg⁻¹ • Terdapat di hampir semua jenis tanah mineral. 	
 <p data-bbox="239 517 362 538">$K^+ K^+ K^+ K^+ K^+$</p>	5.	Klorit (2:1:1), tidak mengembang/mengkerut	<ul style="list-style-type: none"> • Dua kisi 2:1 bermuatan negatif yang mengapit brusit ($[AlMg_2(OH)_6]^{2-}$), disebut tipe 2:1:1. • Rumus kimia $[(AlMg_2(OH)_6)_x(Mg_3(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_2)]_y$. • Posisi Si^{4+} pada tetrahedral ditempati oleh Mg^{2+}, sedangkan sebagian Al^{4+} pada struktur dasar oktahedral ditempati oleh Si^{+3}. • KTK 10 - 40 cmol_c kg⁻¹. • Luas permukaan efektif klorit berkisar antara $70 \cdot 10^3$ sampai $150 \cdot 10^3$ m² kg⁻¹.
 <p data-bbox="239 1008 362 1029">$AlMg_2(OH)_6^{2-}$</p>			

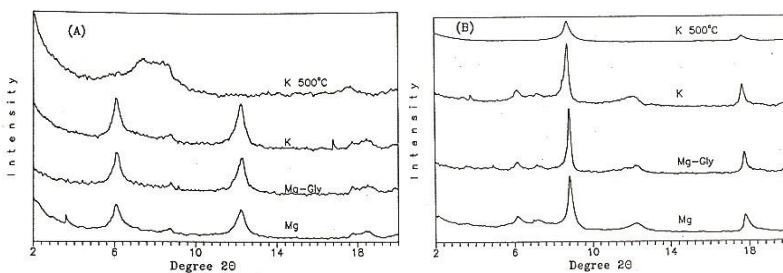
* Disarikan dari Bohn *et al.* (1985).

Mineral liat tipe 1:1.

Pada struktur mineral liat tipe 1:1, setiap kisinya terdiri atas satu unit tetrahedral (T) dan satu unit oktahedral (O) yang dihubungkan oleh oksigen, digunakan secara bersamaan (T- O⁻² - O); sedangkan antar

dua kisi dihubungkan oleh O^{2-} (pada Kaolinit) atau H_2O (pada Haloisit). Ikatan antar kisi mineral tipe 1:1 sangat rapat sehingga jarak antar kisinya pendek (7.0 \AA pada Kaolinit, $8 - 10 \text{ \AA}$ pada Haloisit). Ikatan antar kisi yang kuat dan rapat tersebut menyebabkan sifat mengembang - mengkerut pada mineral liat tipe 1:1 sangat terbatas. Struktur mineral liat 1:1 akan hancur jika dipanaskan $\geq 500^\circ \text{ C}$.

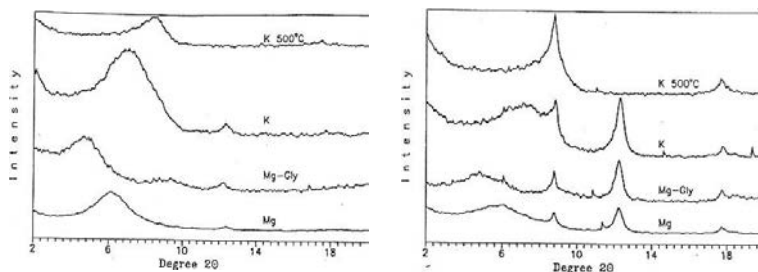
Sifat tersebut digunakan untuk membedakan kaolinit dengan mika dalam identifikasi mineral liat menggunakan difraksi sinar X. Pada kondisi normal (tidak dipanaskan), kaolinit/haloisit dengan mika mempunyai *d-spacing* hampir sama (sekitar 7 \AA). Jika keduanya dibakar 500° C , dan masih muncul *peak* difraksi sinar X pada *d-spacing* sekitar 7 \AA , berarti pada sampel itu terdapat mineral mika (atau dan kaolinit/haloisit); tetapi, jika tidak muncul *peak* lagi pada *d-spacing* $\sim 7 \text{ \AA}$, pada sampel itu hanya ada mineral kaolinit atau/dan haloisit saja (Gambar 6).



Gambar 6. Contoh pola difraksi sinar x (*XRD patterns*) mineral liat tipe 1:1. Pada gambat (A) terdapat mineral vermikulit dan kaolinit, sedangkan pada gambat (B) terdapat vermikulit, kaolinit, dan mika dalam suatu sampel yang dianalisis (Priyono, 1991).

Mineral liat tipe 2:1.

Ciri struktur mineral liat tipe 2:1, pada setiap kisinya terdiri dari T – O – T. Jika dua kisi T – O – T itu dihubungkan oleh Ca^{+2} atau/dan H_2O (mineral Montmorilonit), $Mg(H_2O)_6^{+2}$ (mineral Vermikulit), atau K^+ (mineral Mika). Perbedaan kation atau senyawa yang menghubungkan dua kisi dari struktur mineral tipe 2:1 tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan nilai *d-spacing* pada masing-masing jenis mineral tipe 2:1 (Gambar 7 dan Tabel 6).



Gambar 7. Contoh pola difraksi sinar X (*XRD patterns*) mineral liat tipe 2:1. Pada gambar kiri hanya terdapat mineral montmorillonit, sedangkan pada gambar kanan terdapat mineral montmorillonit dan vermikulit (Priyono, 1991).

Tabel 6. Nilai *d-spacing* mineral liat tipe 2:1 (Priyono, 1991)

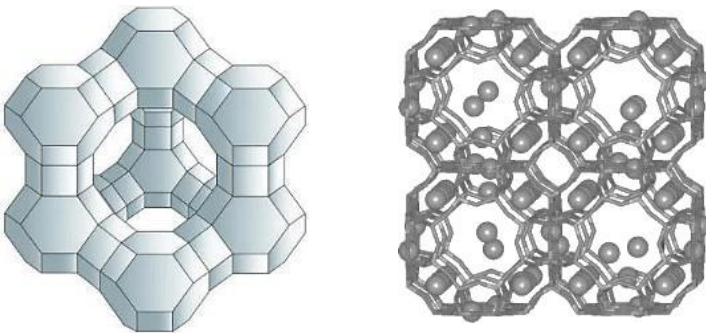
No	Nama Mineral	Penghubung antar Kisi	Perlakuan & <i>d-spacing</i> (Å)		
			Mg	Mg - gliserol	Mg-500° C
1.	Montmorilonit	Ca^{+2} /dan H_2O	14 - 15	18	9 - 10
2.	Vermikulit	$Mg(H_2O)_6^{+2}$	14 - 15	14 - 15	9 - 10
3.	Mika	K^+	7	9 - 10	7

Mineral liat tipe 2:1:1.

Struktur mineral 2:1:1 sebenarnya mirip dengan struktur pada tipe 2:1, hanya saja dua struktur T – O – T pada tipe 2:1:1 dihubungkan secara kuat (tak bertukarkan) oleh senyawa brusit $[\text{AlMg}_2(\text{OH})_6]^{2+}$. Contoh mineral 2:1:1 adalah Klorit. Jarak antar kisi (*d-spacing*) Klorit sekitar 12 – 13 Å dan tidak berubah jika dijenuhi dengan Mg maupun gliserol. Seperti halnya mineral Mika, Klorit secara fisik termasuk mineral yang relatif stabil.

2) Mineral Zeolit

Zeolit adalah salah satu jenis mineral silikat dengan struktur dasar tektosilikat, yaitu beberapa struktur dasar tetrahedral silikat terangkai membentuk cincin (Gambar 8). Pengaturan struktur dasar tetrahedral seperti itu menghasilkan banyak ruang (pori-pori) mikro antar struktur cincin tersebut.



Gambar 8. Model struktur mineral zeolit, memperlihatkan ruang mikro pada rangkaian unit dasar tetrahedral berbentuk cincin, dikelilingi oleh atom aluminium, silikat, dan oksigen (<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Zeolite>).

Mineral zeolit telah digunakan secara intensif sebagai katalis, bahan pembersih, dan penyaring (filter) dalam bidang industri, kesehatan, dan pertanian. Selain sebagai campuran detergen dan bahan pembersih air minum, zeolit juga dapat digunakan untuk menyerap gas beracun, logam berat, dan material radioaktif. Dalam bidang pertanian, zeolit dapat digunakan sebagai amelioran untuk meningkatkan kemampuan tanah memegang air (*water holding capacity*) dan kapasitas tukar kation, campuran pada pakan ternak, menghilangkan bau feses (kotoran) pada usaha peternakan dan budidaya ikan (aquarium).

c. Mineral Non-Silikat

Mineral non-silikat (Tabel 7) meliputi sub kelompok halida, karbonat, sulfida dan sulfat, mineral fosfat, dan oksida-hidroksida. Mineral non-silikat mempunyai struktur dan komposisi kimia relatif lebih sederhana dan mudah terlapuk dibanding mineral silikat. Ikatan kimia antar ion pada struktur mineral non-silikat umumnya bersifat ionik. Berbeda lagi dengan mineral silikat, kelompok oksida-hidroksida umumnya tidak berstruktur atau strukturnya sangat lemah (amorfus), muatan listriknya berada di gugus fungsional sehingga mudah berubah oleh perubahan pH larutan di sekitarnya.

Pada mineral halida (NaCl), ikatan Na^+ dan Cl^- membentuk suatu balok (struktur kubus). Struktur mineral lainnya dalam kelompok ini sangat mirif dengan struktur halida. Jenis ikatan antara kation (Na^+)

Tabel 7. Mineral non-silikat yang telah dimanfaatkan atau mempunyai kaitan dengan permasalahan di bidang pertanian (Allen dan Hajek, 1989)

Klas Mineral	Contoh Mineral	Rumus Kimia Ideal
Halida	Halit	NaCl
Sulfat	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O
Sulfida	Jarosit Pirit	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ FeS ₂
Karbonat	Kalsit Dolomit	CaCO ₃ CaMg(CO ₃) ₂
Fosfat	Augellit Barrandit Brushit Crandallit Fluorapatit Hidroksiapatit Millisit Strengit Struvit Taranakit Varisit Vivianit Wavelit	Al ₂ PO ₄ (OH) ₃ (Al,Fe)PO ₄ .H ₂ O CaHPO ₄ .2H ₂ O CaAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₅ .H ₂ O Ca ₅ (PO ₄) ₃ F Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH (Ca,Na,K)(OH,O) ₄ (PO ₄) ₂ .2H ₂ O FePO ₄ .2H ₂ O NH ₄ MgPO ₄ .6H ₂ O H ₆ K ₃ Al ₅ (PO ₄) ₈ .18H ₂ O AlPO ₄ .2H ₂ O Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O Al ₃ (OH) ₃ (PO ₄) ₂ .5H ₂ O
Oksida - Hidroksida	Hematit Korundum Anatase Ilminit Brusit Gibsit Geotit	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ TiO ₂ FeTiO ₃ Mg(OH) ₂ Al(OH) ₃ FeO(OH)

dengan anion (Cl⁻) pada mineral halida adalah ikatan ionik, sehingga kelompok mineral ini sangat mudah larut dalam air dibandingkan dengan kelompok mineral silikat. Tetapi, jenis unsur hara esensial bagi

tanaman yang dapat dipasok oleh mineral non-silikat sangat terbatas (lihat rumus kimianya di Tabel 7).

1) Mineral Halida

Mineral halida atau halit banyak dijumpai pada tanah garaman (*saline/saline-sodic soils*) yang terbentuk dan berkembang di daerah dekat pantai, sedangkan mineral sulfat (gypsum) berkembang di daerah arid). Halit juga dapat terbentuk pada tanah yang posisinya cukup jauh dari pantai yang terpengaruh oleh intrusi air laut.

Keberadaan mineral halit (NaCl) pada tanah pertanian (yaitu tanah garaman) sangat menghambat atau mengganggu pertumbuhan tanaman pada tanah itu. Sebaliknya, mineral gipsium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dapat digunakan sebagai bahan pembenah tanah garaman melalui pertukaran Na^+ oleh Ca^{+2} dan Cl^- oleh SO_4^{-2} , diikuti dengan pencucian Na^+ dan Cl^- yang telah tertukar/terlarut tersebut.

2) Mineral Sulfida

Contoh mineral sulfida adalah pirit atau markasit [FeS_2]. Mineral ini banyak dijumpai pada tanah sulfat masam (*Sulphaquents*) di lahan pasang surut atau rawa dan pada tanah yang tercemar limbah bahan galian industri pertambangan logam dan batubara. Pada kondisi oksidatif, mineral sulfida (pirit) sangat labil, mudah teroksidasi, dan dihasilkan asam sulfat yang menyebabkan tanah menjadi sangat masam. Jika lahan dengan tanah sulfat masam (kadar pirit >

2,5 %) tersebut dibuka, dibuatkan saluran drainase, maka tanah tersebut akan menjadi sangat masam karena terjadinya reaksi oksidasi pirit tersebut. Demikian halnya dengan limbah bahan galian industri pertambangan logam yang umumnya banyak mengandung senyawa sulfida, jika terkena air hujan dan terekspos ke atmosfer akan menghasilkan larutan limbah tambang yang sangat masam (*acid-mine tailing*).

Dalam proses pelapukan mineral sulfida, terutama melalui oksidasi, dihasilkan antara lain mineral jarosit [$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$] yang berwarna kuning jerami, gipsum (CaSO_4), dan asam sulfat (H_2SO_4). Adanya mineral jarosit tersebut (tampak sebagai becak berwarna kuning jerami) pada suatu batuan merupakan indikator adanya senyawa sulfida pada batuan itu.

Kadar pirit pada suatu tanah sering dijadikan sebagai salah satu indikator masalah atau faktor pembatas utama dalam pengelolaan lahan pertanian. Demikian halnya dengan pengelolaan limbah (galian) tambang logam dan batubara, umumnya dihadapkan pada masalah pencemaran terhadap lingkungan oleh limbah berupa larutan masam, sebagai hasil oksidasi mineral pirit dan senyawa sulfida lainnya yang terdapat pada limbah galian tersebut.

Selain potensi masalah yang dapat ditimbulkan oleh keberadaan mineral itu seperti dijelaskan di atas, mineral sulfida juga potensial untuk dimanfaatkan sebagai *input* usaha tani, yaitu sebagai sumber unsur hara (pupuk) makro (S) dan mikro (Fe, Cu, dan Zn).

Secara teoritis, pupuk dari bahan mineral sulfida tersebut dapat digunakan pada tanah yang terbentuk dari batuan kapur atau dari batuan silikat felsik yang umumnya miskin unsur S, Fe, Cu, dan Zn.

3) Mineral Karbonat

Mineral karbonat yang utama adalah mineral kalsit (CaCO_3) dan dolomit $[(\text{Ca},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2]$. Keduanya merupakan hasil proses kristalisasi dari senyawa kalsium karbonat hasil dari pelapukan batuan berkapur (*calcareous*). Dalam bidang pertanian, kedua jenis mineral itu banyak digunakan sebagai bahan pengapuran (*liming materials*) untuk meningkatkan pH tanah masam, sekaligus sebagai sumber unsur hara Ca atau/dan Mg bagi tanaman.

4) Mineral Fosfat.

Seperti dijelaskan pada Tabel 7, banyak jenis mineral fosfat yang telah teridentifikasi. Mineral fosfat yang banyak digunakan sebagai bahan baku pupuk P adalah kelompok mineral apatit. Terdapat beberapa varian dari mineral apatit, antara lain *fluorapatite*, *hydroxyapatite*, dan *chlorapatite* dengan rumus kimia $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F})$, $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH})$, dan $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl})$. Mineral apatit jarang dijumpai dalam bentuk deposit mineral murni, tetapi lebih sering terdapat pada batuan beku dan malihan. Struktur kristal mineral apatit terbentuk dari rangkaian PO_4 - tetrahedral yang berikatan dengan dua Capolihedral: Ca_1O_9 and $\text{Ca}_2\text{O}_6\text{X}$, dimana X adalah anion F, OH, atau Cl.

Mineral fosfat adalah jenis bahan geologis yang sangat penting dalam bidang pertanian karena kandungan unsur fosfat pada batuan itu yang relatif tinggi. Unsur fosfat (P) merupakan unsur hara esensial yang diserap oleh tanaman dalam kuantitas relatif tinggi daripada unsur lain. Namun di dalam larutan tanah pertanian, kuantitas unsur P yang tersedia bagi tanaman (terlarut) umumnya lebih rendah daripada yang dibutuhkan oleh tanaman pangan untuk tumbuh dan berproduksi optimum. Oleh karena itu, pupuk P hampir selalu diaplikasikan oleh petani pada setiap musim tanam.

Pada industri pembuatan pupuk super fosfat (SP), unsur fosfat umumnya diekstrak dari batuan fosfat dengan asam keras (H_2SO_4 atau/dan H_3PO_4). Mineral atau batuan fosfat yang telah dihaluskan juga sering digunakan secara langsung sebagai pupuk P, terutama untuk diaplikasikan pada tanaman perkebunan.

5) Mineral Oksida - Hidroksida

Mineral oksida - hidroksida adalah kelompok mineral renik yang sifatnya sangat beragam, dari yang sangat keras (misalnya Korundum) sampai yang lunak (misalnya *Psilomelane*); dan dari yang berwarna gelap sampai sangat cerah. Ikatan kimia antar unsur pada mineral oksida - hidroksida umumnya ikatan ionik; sebaliknya, ikatan antar unsur pada kelompok mineral lain (termasuk mineral silikat) secara alami

umumnya kovalen. Mineral silikat - kwarsa (SiO_2) sering juga disebut sebagai oksida silikat.

2. Jenis dan Sifat Batuan

Batuan umumnya dikelompokan berdasarkan proses pembentukannya, yaitu kelompok batuan beku (*igneous rocks*), batuan endapan (*sedimentary rocks*), dan batuan malihan (*metamorphic rocks*). Masing-masing kelompok batuan itu dibagi lagi lebih rinci menjadi beberapa sub kelompok berdasarkan perbedaan komposisi mineral dan unsur kimianya. Masing-masing kelompok batuan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

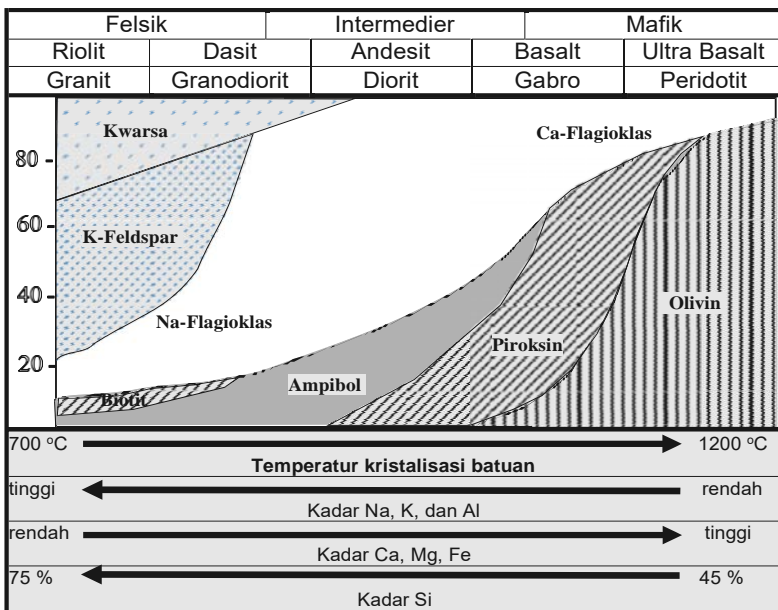
a. Batuan Beku

Batuan beku adalah jenis batuan yang dihasilkan melalui proses pembekuan dan kristalisasi magma. Berdasarkan posisi (kedalaman) terjadinya proses pembekuannya, batuan beku dibedakan menjadi dua, yaitu batuan beku dalam (intrusif) dan batuan beku luar (ekstrusif). Proses pembekuan pada batuan dalam terjadi pada jalur keluarnya magma dari dapur magma ke permukaan bumi; sedangkan proses pembekuan pada batuan beku luar terjadi di luar/permukaan bumi, yaitu setelah magma dimuntahkan dari dapurnya ke permukaan bumi melalui proses erupsi gunung api.

Proses pembekuan magma merupakan reaksi eksotermik (melepaskan energi panas) dan melibatkan perubahan wujud dari bahan cairan kental menjadi

padatan. Keragaman jenis batuan beku ditentukan oleh tiga faktor utama, yaitu komposisi kimia, temperatur dan kecepatan pembekuan (titik beku) magma yang mempengaruhi proses kristalisasi, dan ukuran partikel batuan.

Para ahli geologi mengelompokkan batuan beku menjadi 3 sub kelompok utama berdasarkan komposisi kimianya, yaitu batuan beku felsik, intermedier, dan batuan mafik. Komposisi mineral pada masing-masing kelompok batuan tersebut dijelaskan secara skematik pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema pengelompokan jenis batuan beku dan faktor yang mempengaruhinya (<http://jersey.uoregon.edu>)

Kadar SiO_2 pada batuan adalah salah satu ciri pembeda antar sub kelompok batuan beku tersebut. Batuan yang mengandung $> 65\%$ SiO_2 termasuk dalam sub kelompok batuan silikat felsik, $55 - 65\%$ SiO_2 batuan silikat intermedier, sedangkan $< 55\%$ SiO_2 adalah batuan mafik. Batuan beku mafik mempunyai titik beku tinggi (pembekuan terjadi pada suhu tinggi). Sebaliknya, batuan beku felsik mempunyai titik beku rendah.

Pada pembentukan batuan mafik, proses pembekuannya relatif cepat (spontan), sehingga hasil kristalisasinya kurang sempurna dan banyak terjadi substitusi isomorfik pada struktur dasar (tetrahedral) mineral penyusun batuan mafik tersebut. Sebaliknya pada batuan felsik, proses pembekuan berjalan relatif lambat karena memerlukan perubahan suhu dari ribuan menjadi puluhan derajat, sehingga dihasilkan kristal mineral (rangkaiannya struktur dasar tetrahedral) yang lebih sempurna. Akibat dari perbedaan proses pembekuan tersebut bahwa batuan felsik relatif lebih stabil (tidak mudah terlapuk atau berubah) daripada batuan mafik terhadap perubahan kondisi lingkungan (misalnya suhu, tekanan, dan kelembaban udara) maupun oleh pengaruh benturan secara mekanis dalam proses penggilingan batuan.

Sifat lain yang dapat digunakan sebagai pembeda antara batuan felsik dengan batuan mafik adalah berat jenis (BJ). Batuan felsik adalah batuan yang didominasi oleh unsur kimia ringan (bobot atomnya

rendah, yaitu Si), sehingga BJ batuan felsik relatif rendah (< 3) dan titik bekunya juga rendah. Sebaliknya, batuan mafik banyak mengandung unsur kimia yang bobot atomnya tinggi, sehingga BJ batuan mafik relatif tinggi (≥ 3) dan titik bekunya juga relatif tinggi, lebih tinggi daripada titik beku batuan felsik.

Seperti tampak pada Gambar 9, komposisi mineral utama pada masing-masing jenis batuan beku dapat dijelaskan sbb:

- a. Batuan beku ultramafik atau ultra basalt: olivin [Mg_2SiO_4 s/d Fe_2SiO_4] dan piroksin [$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$].
- b. Batuan beku mafik (basaltik): olivin [Mg_2SiO_4 s/d Fe_2SiO_4], piroksin [$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$], dan plagioklas [$\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$ s/d $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$].
- c. Batuan beku intermediet: plagioklas [$\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$ s/d $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$], amphibol [$\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$], muskovit/biotit [$\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$ s/d $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$], dan kwarsa [SiO_2].
- d. Batuan beku felsik (granitik): K-feldspar [KAlSi_3O_8], kwarsa [SiO_2].

Batu apung (*pumice stones*) adalah batuan beku yang sangat ringan. Gas di dalam magma mengalami tekanan tinggi hingga membentuk larutan. Ketika terjadi erupsi, terjadi penurunan tekanan secara cepat menyebabkan gas lepas ke atmosfer meninggalkan banyak ruang kosong pada lelehan magma. Tetapi pada temperatur atmosfer, lelehan magma juga mengalami pendinginan dan membeku secara cepat. Banyak gas

terjebak di dalam pori-pori, kemudian menghasilkan batuan beku yang porus dan ringan yang kita sebut batu apung.

Tabel 8. Contoh batuan beku, ciri dan sifat utamanya*

Jenis Batuan	Ciri dan Sifat Utama
 Basalt	Batuan beku extrusive paling banyak di kulit bumi; warna gelap (hitam - kebiruan), kristal berukuran kasar, keras; kaya Mg dan Fe (mineral-mineral ferromagnesium silikat), SiO < 50 %. Mineral utama: Ca-feldspar, piroksin, dan olivine; tambahan/renik: ilminit, mgnetit, biotit, plagofit.
 Diorit	Batuan beku plutonik/ekstrusif, sangat keras, hitam-kebiruan-kehijauan; kaya Mg dan Fe (mineral-mineral ferromagnesium silikat), SiO < 50 %. Mineral utama: plagioklas feldspar, biotit, hornblend, atau/dan piroksin..
 Gabro	Seperti batuan basalt, hasil pembekuan lambat, sangat keras.
 Granit	Batuan beku intrusif, warna campuran putih, pink, orange, kelabu, gelap; batuan masam, tekstur batuan granular. Komposisi mineral utama: kwarsa, K-feldspar, mika, hornbled.
 Obsidian	Batuan beku ekstrusif, masam, pembekuan lava masam secara cepat menghasilkan glas (kristalisasi jelek), warna terang – gelap. Mineral utama: kwarsa (> 70 % SiO ₂)
 Pigmatit	Batuan beku ekstrusif, butiran kasar dengan warna kontras. Mineral utama germstone (batu hias), turmalin, emeralds.
 Batu Apung	Batuan beku ekstrusif, porus, umumnya masam (kaya silikat). Banyak digunakan dalam bidang konmetik, bahan penghalus (abrasive).

* Foto batuan diambil dari www.fi.edu/fellows/fellow/oct98/create (12/11/2016)

Contoh visual dari masing-masing jenis batuan beku tersebut disajikan pada Tabel 8. Salah satu ciri pembeda yang paling mudah adalah warna batuan.

Makin gelap/hitam warnanya (makin tinggi kadar Fe dan Mg), maka batuan itu sifatnya makin basa; dan sebaliknya makin pucat (kadar Si makin tinggi) maka sifatnya makin masam (felsik). Batu apung juga merupakan jenis gelas (non-kristalin), bukan campuran dari banyak jenis mineral dan sangat ringan. Batu apung banyak digunakan untuk dekorasi bangunan, dan digiling digunakan untuk kosmetik atau bahan penggosok (*abrasive material*).

b. Batuan Endapan

Batuan endapan (*sedimentary rocks*) terbentuk melalui proses pengendapan patikel batuan yang sudah ada sebelumnya. Sebagian batuan penyusun kulit bumi tergerus oleh air, angin, atau gerakan es (*glacier*) dan diendapkan di bagian hilir, dasar sungai, danau, atau dasar laut selama ratusan, bahkan jutaan tahun. Karena meningkatnya tekanan ke bawah secara terus-menerus, maka terjadi pengerasan pada bahan endapan tersebut dan dihasilkan batuan endapan. Adanya tanda pengerasan oleh tekanan besar pada batuan tersebut digunakan sebagai penanda (penciri) batuan endapan, misalnya garis pemisah antar lapisan pada batuan endapan. Contoh batuan endapan disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Contoh batuan endapan (*sedimentary rocks*)*




Contoh Batuan	Keterangan
	Batu pasir terbentuk dari endapan butiran (pasir) mineral kwarsa dan feldspar.
Batu Pasir	
	Batu kapur (gamping) terbentuk dari mineral kalsit, berasal dari dasar laut dan danau yang mengalami evaporasi, dan dari binatang laut (kulit kerang)
Batu Kapur	
	Batu <i>shale</i> terbentuk dari mineral liat (<i>clay</i>) yang mengalami tekanan.
Batu <i>Shale</i>	
	Batu konglomerat terbentuk dari endapan pecahan batuan berukuran pasir dan kerikil yang mengalami tekanan dan sementasi.
Konglomerat	

* Gambar/foto diambil dari: www.fi.edu/fellows/fellow1/oct98/create/sediment.htm, tanggal 14 September 2016.

c. Batuan Malihan

Batuan malihan adalah batuan beku maupun endapan yang mengalami perubahan karena terjadinya tekanan dan peningkatan temperatur yang sangat tinggi. Contoh visual batuan metamor disajikan pada Tabel 10, meliputi *schist*, *gneiss*, dan *marble*. Selain jenis bahan batuan, intensitas tekanan dan temperatur serta waktu yang menyebabkan perubahan karakteristik batuan tersebut.

Tabel 10. Contoh batuan malihan (*metamorphic rocks*)*

Contoh Batuan	Keterangan
 <i>Schist</i>	Lebih dari 50 % terdiri atas lembaran kristal mineral, umumnya terdiri atas kwarsa dan feldspar
 <i>Gneiss</i>	Tampak garis-garis batas antar mineral penyusunnya yang jelas, komposisi mirip dengan <i>schist</i> , sedikit mika dan klorit.
 <i>Marmer</i>	Terbentuk karena tekanan dan panas tinggi terhadap batuan/ mineral kalsit; sangat reaktif (mudah larut) terhadap cairan masam.

* Gambar/foto diambil dari: ww.fi.edu/fellows/fellow1/oct98/create/sediment.htm, tanggal 14 September 2012.

C. Stabilitas Mineral dan Batuan

Setiap mineral mempunyai tingkatan daya tahan terhadap proses pelapukan oleh media pelapuk dan energi mekanik (misalnya penggilingan) yang berbeda-beda. Para ahli mineralogi telah menyusun urutan stabilitas mineral seperti disajikan pada Tabel 11.

Ada hubungan yang erat antara jenis mineral pada Tabel 11 dengan kelompok batuan yang dijelaskan pada Gambar 9. Batuan mafik tersusun dari mineral dengan stabilitas rendah (Ca-plagioklas s/d olivine), sehingga stabilitas batuan mafik relatif rendah (mudah terlapuk). Sebaliknya, kelompok batuan felsik tersusun dari mineral yang stabilitasnya tinggi, terutama kwarsa dan kelompok feldspar (muskovit, mikroklin, dan ortoklas), sehingga stabilitas batuan

Tabel 11. Urutan stabilitas mineral terhadap pelapukan (Allen & Hajek, 1989)

Mineral Primer	Mineral Sekunder
Zirkon	Anatase
Rutil	Gipsit
Turmalin	Hematit (dan Geotit)
Garnet	Vermikulit
Kwarsa	Illit
Epidot	Haloisit
Sphene	Sepiolit (dan
Muskovit	Polygorskit)
Mikroklin	Alofan (dan Imogolit)
Ortoklas	Kalsit
Na-Plagioklas	Halit (Garam lain yang
Ca-plagioklas	sama kelarutannya)
Hornblend	
Klorit	
Augit	
Biotit	
Apatit	
Olivin	

Stabilitas mineral makin menurun

felsik relatif tinggi atau tidak mudah terlapuk. Stabilitas batuan andesit (*intermediate*) adalah sedang (berada di antara batuan feksik dan mafik).

Stabilitas mineral terhadap proses pelapukan ditentukan oleh: (1) temperatur pembentukan mineral, (2) substitusi isomorfik/posisi ion dalam struktur mineral, (3) jenis ikatan antar kisi tetrahedral mineral, (4) kadar unsur polivalen (Fe dan Mn) pada mineral, dan (5) ukuran patikel, dijelaskan sbb:

1. Temperatur pembentukan.

Mineral dan batuan yang terbentuk (membeku) pada temperatur tinggi umumnya lebih mudah terlapuk daripada yang terbentuk pada suhu lebih rendah.

Seperti telah ditunjukkan pada Gambar 10, mineral penyusun batuan mafik membeku pada suhu lebih tinggi daripada mineral/batuan felsik, sehingga mineral atau batuan mafik lebih mudah terlapuk/dihancurkan secara mekanik daripada batuan felsik. Sifat itu penting untuk diketahui sehubungan dengan proses penghalusan (penggilingan) batuan sebagai pupuk atau amelioran.

2. Substitusi isomorfik.

Stabilitas mineral juga ditentukan oleh intensitas terjadinya substitusi isomorfik pada struktur dasar mineral itu. Pada beberapa mineral liat, misalnya montmorilonit, substitusi isomorfik terjadi pada struktur dasar tetrahedral (ion Si^{4+} digantikan oleh Al^{3+}) dan pada struktur dasar oktahedral (ion Al^{3+} digantikan oleh Ca^{2+} atau Mg^{2+}). Proses tersebut menyebabkan terjadinya kelebihan muatan negatif dalam struktur montmorilonit. Misalnya, ion Al^{3+} menggantikan posisi ion Si^{4+} dalam unit struktur tetrahedral montmorilonit. Meskipun diameter Al^{3+} (0,051 nm) dan Si^{4+} (0,039 nm) hanya berbeda sedikit, proses substitusi tersebut dapat merenggangkan struktur tetrahedral mineral tersebut secara keseluruhan. Pada suhu udara normal (ruangan), ion Al^{3+} akan mantap jika berikatan dengan 8 ligan oksigen atau/dan hidroksil dalam unit struktur oktahedral, sedangkan ion Si^{4+} akan mantap jika berikatan dengan empat ligan oksigen atau/dan hidroksil dalam unit struktur tetrahedral. Terjadinya

substitusi isomorfik tersebut menurunkan stabilitas mineral itu terhadap proses pelapukan.

3. Ikatan antar struktur dasar

Stabilitas mineral juga ditentukan oleh jenis ikatan dan pengaturan antar struktur dasar tetrahedral. Makin kuat ikatan antar struktur tetrahedral suatu mineral, makin sulit mineral tersebut terlapuk. Mineral kwarsa dan feldspar merupakan rangkaian kerangka struktur tetrahedral yang memanfaatkan empat atom oksigen pada titik sudut tetrahedral untuk saling berikatan. Penggunaan bersama ion oksigen yang maksimum tersebut menciptakan stabilitas mineral kwarsa dan feldspar sangat tinggi. Sebaliknya pada mineral olivin, struktur tetrahedral tunggal saling berikatan secara acak, menyebabkan mineral tersebut mudah hancur membentuk butiran halus jika terlapuk oleh air atau udara. Penjelasan lebih lengkap tentang struktur mineral adalah di luar jangkauan dari buku ini, dan telah banyak disajikan pada buku/referensi geologi dan mineralogi.

4. Kadar kation polivalen (Fe dan Mn)

Unsur Fe dan Mn mudah teroksidasi (muatan positifnya meningkat) dan menyebabkan ketidakimbangan muatan dalam struktur mineral yang mengandung kedua unsur itu. Perubahan muatan pada Fe dan Mn menyebabkan terjadinya peningkatan tegangan dalam struktur mineral karena terjadi perubahan diameter ioniknya (diameter $\text{Fe}^{2+} < \text{Fe}^{3+}$, dan $\text{Mn}^{2+} < \text{Mn}^{4+} < \text{Mn}^{5+}$). Mineral yang mengandung unsur

yang mudah tereduksi/teroksidasi akan mudah terlapuk. Hal itu juga menjadi alasan mengapa mineral ferromagnesium silikat (pada batuan mafik) lebih mudah terlapuk daripada mineral feldspatik, karena mineral feromagnesium silikat mengandung banyak kation yang mudah tereduksi - teroksidasi (Fe dan Mn) dibandingkan pada mineral feldspatik.

5. Ukuran partikel

Pada mineral berukuran halus (mikro meter), perbedaan ukuran partikel sangat mempengaruhi stabilitasnya terhadap pelapukan kimiawi. Makin kecil ukuran partikel mineral sampai batas tertentu, makin luas permukaan efektifnya per satuan berat, sehingga makin banyak bagian mineral tersebut yang berkontak langsung dengan agen pelapuk (pelarut). Akibatnya, pelapukan lebih intensif terjadi pada mineral berukuran halus daripada yang kasar. Pada mineral atau batuan yang porus (Priyono, 2005b), ukuran partikel kurang menentukan intensitas reaksi pelapukan dibanding luas permukaan efektif mineral tersebut, karena agen pelarut dapat masuk melalui permukaan efektif internal pada mineral porus tersebut.

Dari uraian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa stabilitas mineral dan batuan ditentukan oleh gabungan sifat fisik dan kimia mineral tersebut. Stabilitas mineral atau batuan tersebut juga akan menentukan laju perkembangan relatif tanah mineral, mineral residu dominan pada tanah yang telah berkembang lanjut atau tererosi berat, dan energi yang

diperlukan untuk menghanurkan batuan menjadi pupuk atau amelioran melalui proses penggilingan.

D. Sifat Kimia Batuan

Komposisi kimia atau unsur hara esensial bagi tanaman pada batuan merupakan faktor sangat penting kaitannya dengan fungsinya sebagai bahan induk tanah maupun pemanfaatannya langsung sebagai pupuk atau sebagai bahan baku pupuk. Sebagai bahan induk tanah, sifat kimia batuan tersebut sangat menentukan jenis dan kesuburan tanah. Sebagai pupuk, sifat kimia batuan menentukan kualitas pupuk tersebut. Contoh hasil analisis komposisi unsur kimia utama pada batuan dari beberapa tempat di Tabel 12.

Kelompok batuan mafik (misalnya basalt) mengandung unsur hara esensial yang paling lengkap. Kadar unsur hara makro Ca dan Mg dan mikro Fe, Zn, dan Cu relatif tinggi, tetapi kadar K umumnya relatif rendah dibandingkan kadar K pada batuan felsik. Sebaliknya, pada batuan felsik (misalnya *gneiss* dan *schist*), kadar unsur hara Ca, Mg, Fe, Zn, dan Cu relatif rendah, tetapi kadar K tinggi. Kelompok batuan intermedier mengandung unsur hara tanaman dengan komposisi lengkap.

Berdasarkan komposisi unsur hara pada setiap jenis batuan (Tabel 12) maka kesuburan genetis dari tanah yang terbentuk pada kondisi lingkungan yang sama akan bervariasi sesuai dengan variasi jenis batuan induknya.

Tabel 12. Komposisi kimia pada beberapa jenis batuan

No	Jenis dan asal batuan	Kadar Total (% oksida)												
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₄	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO	CuO	Lain ²
1	Basaltik (G. Galunggung, Jawa Barat)	54,73	24,36	7,38	3,30	0,55	1,88	-	-	7,25	0,16	0,01	0,38	<0,01
2	Basaltik (G. Kelud – Jawa Timur)	51,98	25,14	6,95	3,03	1,19	2,19	-	-	8,99	0,16	0,01	0,36	<0,01
3	Basaltik (G. Rinjani – P. Lombok, NTB)	52,28	24,77	4,84	1,83	6,30	3,25	-	-	6,24	0,15	0,01	0,33	<0,01
4	Basaltik (G. Tambora – P. Sumbawa, NTB)	51,78	26,23	7,12	3,36	0,37	2,06	-	-	8,56	0,16	0,01	0,34	<0,01
6	Basalt (Bumbury - Western Australia)	47,95	19,15	11,11	6,08	0,18	2,10	0,05	0,19	11,25	0,16	-	-	-
7	Dolerite (Jarahdale – Western Australia)	49,92	13,94	11,37	6,32	0,37	1,21	0,12	0,13	15,22	0,21	-	-	-
8	Gneiss (Northern – Western Australia)	74,01	15,02	2,01	0,74	1,09	4,06	0,01	0,08	2,64	0,02	-	-	-
9	K-feldspard (Northern – Western Australia)	61,53	19,05	0,05	0,01	11,56	2,51	0,01	0,22	0,02	0,01	-	-	-
Sumber: No 1–4 (Priyono et al., 2008), 5–9 (Priyono, 2005)														

Dengan makin berkembangnya tanah tersebut dan pengaruh faktor lingkungan makin intensif, maka faktor lingkungan dapat menjadi dominan menentukan karakteristik tanah yang terbentuk.

Faktor pembentuk tanah tersebut dari satu tempat ke tempat lain sangat beragam. Tanah yang terbentuk dari bahan induk batuan basaltik, misalnya, semula sangat subur karena kaya akan unsur hara mineral makro (Ca, Mg) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu). Namun, jika tanah itu berkembang di daerah dengan curah hujan yang tinggi, maka makin lama kation di bagian atas (zona perakaran) makin banyak yang terlindih ke horizon bawah, menyisakan kation masam (Al dan Fe) dalam bentuk oksida dan hidroksida. Tanah yang tadinya bereaksi netral - basa menjadi agak masam - sangat masam. Warna tanah dari gelap berubah menjadi lebih cerah, coklat - kemerahan, atau merah - kekuningan karena adanya oksida dan hidroksida Fe dan Al yang dominan. Secara alami, perubahan sifat tanah tersebut memerlukan waktu puluhan - ratusan tahun. Karena air merupakan agen pelarut utama, perkembangan tanah yang terbentuk di daerah basah (curah hujan tinggi) relatif lebih cepat, atau solurnya lebih dalam daripada yang terbentuk di daerah kering (curah hujan rendah).

Perubahan sifat atau tingkat kesuburan tanah yang relatif cepat dapat terjadi karena pengaruh manusia (managemen penggunaannya). Peningkatan intensitas tanam yang tinggi, dari sekali tanam menjadi

2 – 3 kali tanam per tahun, dibarengi dengan penggunaan pupuk berhara makro (terutama N dan P) yang tinggi, dapat menyebabkan terkurasnya unsur hara mikro di larutan tanah. Meskipun bahan induknya kaya unsur hara mikro (batuan basaltik, misalnya), kekahatan (kekurangan) unsur hara mikro akibat intensitas tanam yang tinggi pada tanah tersebut tidak dapat dihindari. Hal itu disebabkan oleh laju serapan unsur hara mikro oleh tanaman sepanjang tahun lebih tinggi daripada laju pelarutan unsur hara tersebut dari bahan induk ke larutan tanah. Pada beberapa dekade terakhir (pertanian modern), penggunaan pupuk berhara mikro dalam usaha tani menjadi sangat penting.

Sebagai pupuk atau bahan pupuk, kelompok batuan intermedier (andesitik – basaltik) mungkin yang paling cocok, karena komposisi unsur hara makro dan mikronya berimbang untuk berbagai jenis tanaman. Namun, meskipun kenampakan fisiknya sama, komposisi unsur haranya dapat saja beragam, seperti tampak pada Tabel 12.

BAB IV

PELARUTAN UNSUR HARA DARI BATUAN

A. Pengertian Pelarutan

Pelarutan unsur hara adalah proses kimiawi pelepasan ion atau unsur hara dari senyawa kompleks, endapan, atau padatan (batuan) ke dalam zat pelarut. Pelarutan unsur hara dari mineral atau batuan sangat penting untuk dibicarakan dalam bab ini untuk memahami fungsi bahan geologis sebagai bahan induk tanah (sumber unsur hara tanaman), atau pengembangan teknologi produksi pupuk multi nutrisi yang efektif dan efisien berbahan baku batuan.

Seperti telah dimaklumi bahwa tanaman menyerap unsur hara dalam bentuk ion. Oleh karena itu, unsur hara yang ada di batuan induk tanah atau bubuk batuan (pupuk) hanya dapat dimanfaatkan langsung oleh tanaman jika unsur hara itu terlarut dari struktur mineral penyusun batuan itu menjadi bentuk ion dalam larutan. Unsur hara yang terlarut (tersedia bagi tanaman) tersebut idealnya harus dalam kuantitas yang cukup untuk pertumbuhan tanaman dan proporsi yang berimbang. Untuk mencapai kondisi itu,

perlu diketahui mengenai prinsip reaksi pelarutan unsur hara dari batuan serta faktor yang mempengaruhinya. Pelarutan dibahas pada dua kondisi yang berbeda, yaitu pada kondisi alami yang berkaitan dengan proses pembentukan dan perkembangan tanah (aspek pedologis) dan pelarutan batuan pada kondisi terkontrol – berkaitan dengan pemanfaatan batuan sebagai bahan baku pupuk atau amelioran (teknologi produksi pupuk).

Pada proses pedologis, reaksi pelarutan unsur hara dapat terjadi secara beriringan dengan proses pembentukan senyawa baru dari unsur hara yang terlarut dari batuan induk itu melalui berbagai mekanisme reaksi sesuai dengan kondisi lingkungannya. Pemahaman kedua jenis reaksi (penguraian dan pembentukan) tersebut sangat penting untuk dapat mengenal sifat dan ciri tanah yang terbentuk sebagai hasil dari proses pedologis tersebut. Implikasinya, kita dapat melakukan pengelolaan tanah yang tepat, mengacu pada sifat dan ciri serta kapasitas daya dukung tanah itu. Karena kondisi faktor pembentuk tanah dari satu tempat ke tempat lain sangat beragam, mekanisme reaksi pelarutan alami yang dominan di setiap tempat juga beragam. Mekanisme reaksi pelarutan (pelapukan kimiawi) batuan induk tanah yang umum terjadi secara alami dijelaskan dalam bab ini.

Hal lain yang sangat penting untuk difahami adalah yang berkaitan dengan efektivitas pupuk batuan dalam bentuk bubuk atau granular. Banyak

hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor pembatas utama terhadap efektivitas pupuk dari batuan itu adalah lambatnya pelarutan unsur hara dari partikel batuan sehingga dosis yang harus diterapkan sangat tinggi (puluhan ton per hektar). Secara teoritis, laju pelarutan unsur hara dari batuan dapat dipercepat dengan mengendalikan atau memodifikasi faktor yang mempengaruhi reaksi pelarutan unsur hara tersebut. Modifikasi tersebut dapat dilakukan terhadap sifat batuan (misalnya ukuran partikel dan kristalinitasnya), pelarut (jenis, pH, dan konsentrasinya), atau keduanya. Untuk memahami sehingga dapat memilih faktor tersebut yang layak dimodifikasi, maka dalam bab ini juga dibicarakan mengenai kinetika reaksi pelarutan partikel batuan.

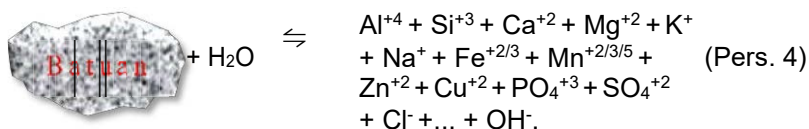
B. Prinsip Reaksi Pelarutan

Reaksi pelarutan unsur hara dari batuan merupakan salah satu jenis reaksi keseimbangan antara partikel batuan dengan zat pelarut (sebagai reaktan) menghasilkan larutan unsur hara (sebagai produk). Keseimbangan tersebut meliputi keseimbangan masa maupun energi. Reaksi keseimbangan masa secara umum dapat diilustrasikan sebagai berikut (Priyono, 2005b):



Senyawa A dan B sebagai reaktan, sedangkan C dan D sebagai produk. Pada reaksi pelarutan mineral/batuan, zat pelarut utama di alam adalah air (H₂O).

Pada kondisi seimbang, laju reaksi ke kanan dan ke kiri sama, maka hasil kali aktivitas atau konsentrasi produk dibanding hasil kali dari aktivitas reaktan adalah tetap (konstan), dan nilai itu disebut konstanta keseimbangan. Reaksi pelarutan suatu batuan dengan H₂O dapat disederhanakan sbb:



Reaksi sebenarnya yang terjadi secara alami amapun di kondisi terkontrol (laboratorium) tentu tidak sesederhana itu. Unsur yang telah terlarut dari batuan dapat membentuk berbagai senyawa kompleks yang baru. Untuk tujuan praktis berkaitan dengan pembuatan pupuk dari batuan, kondisi unsur hara tersebut dapat dipilah menjadi dua, terlepas dari apapun bentuk senyawa kompleksnya, yaitu unsur hara terekstrak (terlarut) yang umumnya berbentuk ion dan yang tidak terlarut (berbagai senyawa kompleks dan batuan yang utuh maupun sebagian terlarut).

Selain pendekatan keseimbangan masa seperti dijelaskan di atas, reaksi pelarutan unsur hara dapat pula dijelaskan melalui konsep keseimbangan energi (termodinamika). Dalam konsep keseimbangan energi, dikenal tiga bentuk energi yang saling berkaitan, yaitu energi bebas Gibb (G), entalpi (H), dan entropi (S). Pada suatu sistem reaksi kimia, energi bebas Gibb (G) dapat didefinisikan sebagai energi yang dihasilkan oleh suatu reaksi kimia. Entalpi (H) adalah energi dari

pembentukan suatu ikatan kimia, sedangkan entropi (S) adalah energi yang menyatakan tingkat keacakan (*randomness*) ion dalam bergerak dan mengatur posisinya, atau kecenderungan ion untuk melepaskan diri dari ikatan sehingga bebas bergerak dalam suatu sistem itu. Nilai S dipengaruhi oleh temperatur T (derajat Kelvin) dalam sistem tersebut. Makin tinggi temperatur dalam sistem itu, makin tinggi pula kecenderungan ion untuk bergerak bebas. Ketiga energi tersebut saling berkaitan, nilai absolutnya tidak dapat diukur, tetapi perubahan nilainya dapat diukur. Hubungan antara perubahan (Δ) ketiga bentuk energi itu adalah:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (\text{Pers. 5})$$

Perubahan energi yang dihasilkan oleh suatu reaksi kimia (ΔG) merupakan resultan dari perubahan energi yang saling berlawanan, yaitu perubahan energi ikatan kimia (ΔH) dan perubahan energi keacakan ion atau molekul (ΔS) yang dipengaruhi oleh suhu (T) dalam sistem tersebut. Energi ikatan kimia menunjukkan kekuatan ikatan atau energi saling tarik antar ion dalam molekul atau senyawa yang terbentuk dalam reaksi itu; sedangkan energi keacakan menunjukkan tingkat kecenderungan ion dalam molekul atau senyawa tersebut untuk membebaskan diri dari ikatan kimianya sehingga dapat bergerak bebas dalam larutan (bentuk ion). Kondisi seimbang akan terjadi jika perubahan energi bebas (ΔG) dalam sistem itu minimum atau nol ($\Delta H \approx T\Delta S$), yaitu suatu kondisi yang

paling mantap untuk keberadaan masing-masing bentuk senyawa atau ion dalam sistem tersebut. Implikasi dari penjelasan keseimbangan energi tersebut, produk berupa kation maupun anion pada Pers. 4 dapat membentuk senyawa baru yang lebih stabil sehingga energi bebas (ΔG) dalam sistem itu minimum atau mendekati nol.

Hal penting dari pemahaman reaksi kesimbangan melalui pendekatan keseimbangan energi yang dapat diterapkan secara praktis dalam pembuatan pupuk dari batuan bahwa, makin tinggi temperatur (sampai batas tertentu), maka reaksi akan mengarah ke kanan (laju pelarutan batuan dipercepat). Prinsip ini dapat diterapkan dalam memodifikasi kondisi lingkungan proses pembuatan pupuk tersebut.

Kelarutan atau nilai konstanta keseimbangan dari masing-masing unsur ditentukan antara lain oleh bobot jenis, diameter, dan elektronegativitas atomnya. Pada konteks mineral atau batuan, kelarutan unsur penyusunnya secara umum ditentukan oleh stabilitas relatif dari mineral atau batuan tersebut (lihat Tabel 11 pada Bab 3). Selain itu, karakteristik zat pelarut juga menentukan mekanisme reaksi dan tingkat kelarutan unsur hara dari mineral atau batuan. Pada konsentrasi yang sama, larutan asam organik umumnya lebih kuat daripada asam anorganik dalam melarutkan unsur penyusun mineral atau batuan.

1. Mekanisme Pelarutan Unsur Hara

Berkaitan dengan mekanisme reaksi pelarutan yang terjadi secara alami (pelapukan kimiawi pada batuan induk tanah), banyak referensi pedologi tanah, misal-nya Ross (1989), menjelaskan beberapa mekanisme umum pelarutan seperti diringkas pada Tabel 13. Dalam kenyataan di lapang, reaksi pelarutan batuan induk sangat kompleks, beberapa mekanisme dapat terjadi secara bersamaan dan umumnya lambat.

Pada Tabel 13 tampak bahwa air (H_2O) adalah pelarut alami yang utama. Kemampuan yang tinggi dari molekul air dalam melarutkan kation maupun anion dari batuan berkaitan dengan sifat dipolar (mempunyai dua kutub bermuatan) dari molekul air tersebut, sehingga air merupakan senyawa yang reaktif. Selain itu, pelepasan kation dari struktur kristal mineral atau batuan memerlukan input asam (H^+).

Berkaitan dengan reaksi pelarutan pada kondisi terkontrol, banyak peneliti telah melakukan riset pelarutan unsur hara dari mineral yang relatif murni, antara lain Huang & Keller (1970), Bloom & Erich (1986), Lundström & Öhman (1990), Barman et al. (1992), Zhang & Bloom (1999), Harley (2002), atau unsur hara dari batuan (Priyono, 2005a; Priyono & Gilkes, 2008a), menggunakan media pelarut berupa asam anorganik maupun organik murni. Beberapa penelitian pelarutan bubuk batuan di dalam tanah tanpa tanaman (Priyono, 2015) maupun pada sistem

tanah - tanaman (Priyono & Gilkes, 2008b). Dari hasil kerja para peneliti tersebut dapat diketahui bahwa setidaknya ada dua mekanisme reaksi pelarutan unsur hara dari partikel batuan atau mineral ke media pelarut, yaitu reaksi asam - basa dan pembentukan ligan 'metal - organik'. Pada sistem tanah - tanaman, kedua reaksi pelarutan unsur hara tersebut umumnya terjadi bersamaan dan sulit dipisahkan.

Tabel 13. Ringkasan mekanisme reaksi pelarutan (pelapukan kimiawi) batuan induk secara alami (Ross, 1989)

1) Pelarutan mineral atau senyawa garam dalam air, atau disosiasi:		
a.	$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{OH}^- + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$	
b.	$\text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{OH}^- + \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$	
2. Karbonasi:		
a.	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	
b.	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_2.6\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{CO}_3 + 4\text{SiO}_2$	
	Ortoklas	Kaolinit
3. Hidrasi:		
a.	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{O}_3.n\text{H}_2\text{O}$	
	Hematit (merah)	Geotit (coklat)
b.	$\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$	
	Gibsum	Gibsum terhidrasi
4. Hidrolisis:		
a.	$\text{K}_2.\text{Al}_2\text{O}_2.6\text{SiO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O} + \text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{OH}^-$	
	Ortoklas	Kaolinit
b.	Pada hujan masam (air hujan mengandung H_2SO_4 , HNO_3 , H_2CO_3):	
	$\text{Al-silikat} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{liat} + (\text{Ca}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+ \text{ dsb}) + \text{OH}^- + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{SO}_4^{2-}$	
5. <u>Oksidasi - reduksi:</u>		
		<u>Eh (mV)</u>
a.	Anion anorganik	(pH 5) (pH 7)
	$\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	-70 -220
	$\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	-70 -220
b.	Kation anorganik	
	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	170 -180
	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	640 -410

Reaksi asam - basa pada prinsipnya adalah penetralan senyawa yang bersifat basa (kation pada mineral) oleh larutan asam, menghasilkan garam. Yang

berperan sebagai asam dalam reaksi asam – basa adalah zat pelarut, sedangkan sebagai basa adalah partikel batuan/mineral dengan kation penyusunnya, diilustrasikan pada (Pers. 4). Tingkat kemasaman (aktivitas H^+) sangat menentukan besarnya proporsi unsur hara yang dapat terlarut dari batuan atau mineral. Makin masam pelarutnya, makin banyak kation yang dapat terlarutkan.

Reaksi pembentukan ligan ‘metal – organik’ adalah pembentukan senyawa kompleks antara logam (kation) dengan asam organik. Unsur hara (kation) dari batuan, terutama kation bervalensi jamak, bereaksi dengan gugus fungsional dari asam organik membentuk ligan ‘logam – organik’.

Pada media pelarut asam anorganik, terlarutnya unsur hara dari partikel batuan umumnya melalui mekanisme reaksi asam – basa; sedangkan pada pelarutan menggunakan pelarut asam organik, selain mekanisme reaksi asam – basa juga pembentukan ligan ‘logam – organik’ yang dipengaruhi oleh pH pelarut. Mekanisme pelarutan melalui pembentukan ligan ‘logam - organik’ itu terutama untuk kation (logam) polivalen. Hal itu merupakan penjelasan mengapa proses pelarutan unsur hara dari batuan oleh asam organik umumnya lebih tinggi daripada asam anorganik encer (Ludwig et al. 1996; Priyono, 2005a). Hasil kajian pelarutan batuan pada beragam jenis tanah (Priyono, 2005a; Priyono et al., 2008) menunjukkan bahwa kadar asam organik atau C-organik tanah

mempunyai kontribusi besar (> 80 %) dalam proses pelepasan unsur hara dari pupuk batuan silikat ke larutan tanah.

2. Kinetika Pelarutan Unsur Hara

Proses pelarutan unsur hara dari partikel mineral maupun batuan tidak berjalan spontan, tetapi bertahap dari laju pelarutan yang sangat cepat (spontan) menjadi makin lambat hingga mendekati nol (mencapai keseimbangan). Hubungan antara proporsi batuan, atau unsur hara yang terlarut dengan waktu pelarutan dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan berpangkat (*power equation*) (Priyono, 2005a):

$$E_t = E_o + a t^n \quad (\text{Pers. 6})$$

Notasi E_t adalah proporsi (%) dari batuan atau total unsur hara terlarut dalam waktu t (satuan waktu); E_o adalah proporsi (%) batuan atau total unsur hara yang terlarut secara spontan ($E_o = E_t$ pada nilai $t \approx 0$); a adalah tetapan (konstanta) yang berkaitan dengan luas permukaan reaktif dari partikel yang dilarutkan; sedangkan n adalah konstanta eksperimental atau order reaksi. Laju pelarutan (R_t) pada periode waktu tertentu (t) dihitung sebagai turunan pertama dari (Pers. 6):

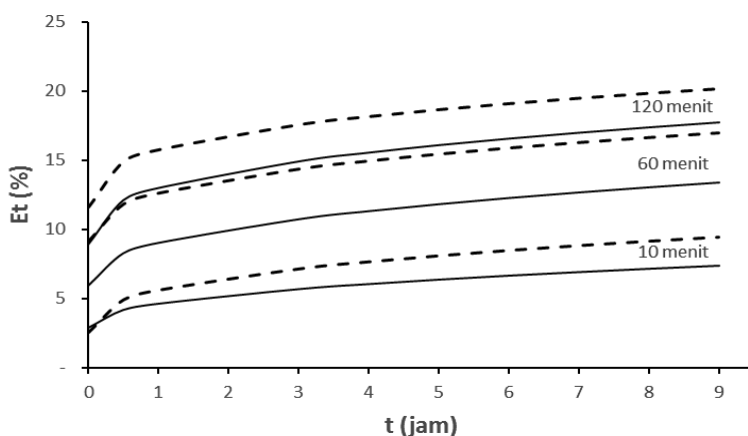
$$R_t = dE_t/dt = a n t^{n-1} \quad (\text{Pers. 7})$$

Nilai E_o mempunyai arti praktis sangat penting karena menunjukkan proporsi unsur hara dari batuan yang cepat tersedia bagi tanaman. Contoh hasil penelitian pelarutan unsur hara dari beberapa jenis batu-

an dalam 0,01 M campuran asam asetat dan oksalat, batuan digiling dengan *ball mill* pada kondisi kering dan basah, disajikan pada Tabel 14. Untuk memudahkan pemahaman persamaan pada Tabel 14, data pelarutan batuan basalt yang digiling pada kondisi basah maupun kering divisualisasikan di Gambar 10.

Tabel 14. Persamaan pelarutan bubuk batuan yang digiling dengan *ball mill* dalam waktu dan kondisi penggilingan dalam larutan 0,01M asam asetat + oksalat (Priyono, 2005a)

Jenis Batuan	Penggilingan		Persamaan Kinetik Pelarutan
	Kondisi Waktu (menit)		
Basalt	Basah	10	$E_t = 2,86 + 1,76 t^{0,43}$
		60	$E_t = 5,93 + 3,11 t^{0,40}$
		120	$E_t = 8,92 + 4,07 t^{0,35}$
	Kering	10	$E_t = 2,56 + 3,04 t^{0,37}$
		60	$E_t = 9,16 + 3,46 t^{0,37}$
		120	$E_t = 14,58 + 4,14 t^{0,33}$
Dolorit	Basah	10	$E_t = 2,05 + 1,71 t^{0,46}$
		60	$E_t = 4,83 + 2,77 t^{0,42}$
		120	$E_t = 7,17 + 3,31 t^{0,41}$
	Kering	10	$E_t = 5,08 + 2,02 t^{0,50}$
		60	$E_t = 13,52 + 3,40 t^{0,41}$
		120	$E_t = 19,44 + 5,15 t^{0,30}$
Gneiss	Basah	10	$E_t = 1,44 + 0,56 t^{0,57}$
		60	$E_t = 5,66 + 1,28 t^{0,45}$
		120	$E_t = 8,35 + 2,31 t^{0,42}$
	Kering	10	$E_t = 2,87 + 1,28 t^{0,44}$
		60	$E_t = 8,55 + 0,35 t^{0,71}$
		120	$E_t = 15,20 + 1,36 t^{0,43}$
K-feldspar	Basah	10	$E_t = 0,26 + 0,43 t^{0,55}$
		60	$E_t = 1,85 + 0,62 t^{0,60}$
		120	$E_t = 1,53 + 0,87 t^{0,57}$
	Kering	10	$E_t = 1,29 + 0,46 t^{0,64}$
		60	$E_t = 4,74 + 0,94 t^{0,54}$
		120	$E_t = 8,31 + 1,57 t^{0,47}$



Gambar 10. Hubungan antara waktu pelarutan (t , jam) dengan proporsi unsur hara terlarut (%) dari bubuk batuan basalt yang digiling dengan *ball mill* dalam kondisi basah (—) dan kering (- - -) selama 10, 60, dan 120 menit (Priyono, 2005a).

Dari hasil penelitian tersebut dapat diambil beberapa kesimpulan penting yang dapat dijadikan acuan teknis dalam upaya meningkatkan efektivitas pupuk batuan dalam bentuk bubuk. Pertama, hingga batas tertentu, makin halus partikel batuan (digiling makin intensif), makin tinggi proporsi batuan atau unsur hara yang cepat terlarut (E_0), makin tinggi pula proporsi total unsur hara terlarut (E_t), tetapi makin turun order reaksinya. Hal tersebut dikarenakan permukaan efektifnya makin luas (partikelnya makin halus), atau nilai a makin tinggi. Order reaksi (nilai n) makin rendah, berarti reaksi makin cepat mencapai keseimbangan. Aspek kedua, penggilingan batuan dengan *ball mill* yang berdampak pada penghalusan partikel dan kristalinitas mineral sampai batas tertentu meningkatkan laju pelarutan unsur hara dari

batuan; dan penggilingan dalam kondisi kering lebih efektif daripada dalam kondisi basah. Pada penggilingan batuan dalam kondisi basah, gerakan bola baja (*milling balls*) dalam *vial* alat giling itu terhambat oleh larutan sehingga daya tumbuknya relatif rendah daripada yang digiling pada kondisi kering. Namun penggilingan dengan *ball mill* yang terlalu intensif dapat menyebabkan terjadinya *agglomerasion* atau *sintering*. Partikel yang halus (amorfus) dan bermuatan tinggi menyatu membentuk partikel baru yang berukuran lebih kasar dan unsur haranya mejadi lebih sulit terlarutkan.

3. Faktor yang Mempengaruhi Laju Pelarutan Hara

Laju pelarutan unsur hara dari mineral/batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain adalah (1) sifat/jenis unsur hara, (2) posisi unsur hara itu pada struktur mineral, (3) jenis zat pelarut, (4) ukuran patikel mineral atau batuan, dan (5) tingkat kristalinitas (*crystalinity*) dari mineral penyusun batuan itu. Semua faktor tersebut secara bersamaan menentukan laju pelarutan unsur hara dari mineral atau batuan. Pengaruh masing-masing faktor tersebut dijelaskan sebagai berikut:

a. Jenis unsur hara.

Pada pelarutan mineral dengan pelarut air, kelarutan unsur kation bervalensi ganda (Ca^{+2} dan Mg^{+2}) dan jamak ($\text{Fe}^{+2/3}$, $\text{Mn}^{+2/5}$, Al^{+3} , Si^{+4}) lebih rendah dibandingkan dengan kelarutan kation monovalen (K^{+} , Na^{+}). Hal tersebut dibuktikan oleh Priyono (2005a) dan

Priyono & Gilkes (2008). Penjelasan lain, konstanta kelarutan (K_{sp}) garam atau senyawa dari kation monovalen lebih tinggi daripada kation divalen maupun polyvalen (Priyono, 2005b).

b. Posisi unsur pada struktur mineral

Posisi kation pada struktur mineral juga menentukan mudah-tidaknya kation itu terlarut dari mineral itu. Misalnya, pada struktur kelompok mineral mika, kation K^+ terjepit (tersemat) kuat pada ruang antar kisi struktur dasar (tetrahedral) mineral tersebut. Kation K^+ itu relatif sulit terlepas dari mineral tersebut dibanding dengan yang berada pada permukaan terluar (K^+ yang dapat bertukarkan) atau K^+ yang berada di permukaan jerapan partikel.

Batuan beku basaltik terbentuk melalui proses pembekuan magma yang kental karena mengandung banyak logam yang bobot atomnya relatif tinggi. Proses pembekuan tersebut sangat cepat (titik bekunya tinggi), menyebabkan proses kristalisasi kurang sempurna, kation berdiameter lebih besar daripada Si dan Al (yaitu Ca, Mg, Fe, Zn dan Cu) akan berada pada posisi acak di antara unit dasar tetrahedral silikat maupun oktahedral Al. Selain itu, banyak pula terjadi substitusi isomorfik, yaitu Al menggantikan posisi Si pada struktur tetrahedral dan Ca, Mg, ataupun Fe menggantikan posisi Al pada struktur dasar oktahedral. Substitusi isomorfik tersebut memperl lemah unit dasar tetrahedral maupun oktahedral pada batuan basaltik. Terjadinya substitusi isomorfik

tersebut melemahkan struktur dasar dari mineral. Sebaliknya, batuan felsik didominasi oleh silikat, titik didihnya lebih rendah daripada titik didih batuan basaltik, sehingga proses kristalisasi batuan felsik relatif lambat, dihasilkan kristal mineral (struktur tetrahedral Si) yang lebih sempurna dan terjadinya substitusi isomorfik relatif rendah. Perbedaan karakteristik dari batuan tersebut berimplikasi pada perbedaan laju pelarutan unsur hara dari batuan ke larutan tanah. Hal itu menjelaskan mengapa pelarutan unsur hara dari batuan basaltik lebih cepat daripada dari batuan feksik.

c. Jenis zat pelarut

Agen pelarut utama dalam proses pelarutan mineral atau batuan secara alami adalah air. Molekul air mempunyai dua kutub bermuatan (kovalen dipolar), yaitu muatan agak positif pada dua atom hidrogennya dan agak negatif pada atom oksigennya. Adanya dua jenis muatan itu, air mampu melarutkan kation maupun anion dari mineral atau batuan. Selain itu, molekul air dapat bereaksi dengan gas CO_2 , H_2S , dan NH_3 di atmosfer dan dihasilkan asam karbonat, sulfat, dan nitrat sehingga air tersebut bertambah masam dan menjadi lebih efektif sebagai pelarutan mineral atau batuan secara alami. Berdasarkan penjelasan itu, pelarut yang polar (H_2O) lebih efektif sebagai pelarut mineral/batuan daripada larutan non-polar (misalnya ethanol); dan pelarut yang masam lebih efektif daripada yang kurang masam. Berkaitan

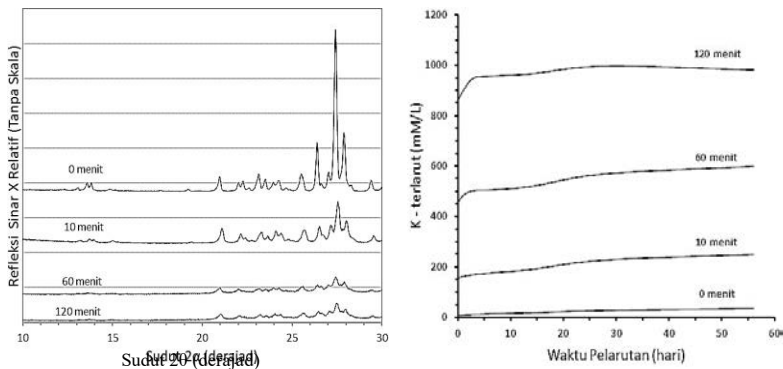
dengan jenis pelarut organik, Huang & Kiang (1972) menunjukkan urutan efektivitas beberapa jenis asam organik sebagai pelarut mineral Ca-plagioklas: asam asetat < asam aspartat < asam salisilik < asam sitrat.

d. Ukuran partikel

Pengaruh ukuran partikel batuan terhadap kelarutannya berkaitan dengan permukaan efektif partikel tersebut. Makin halus partikel itu, makin luas permukaan efektifnya sehingga makin banyak bagian dari partikel itu bersentuhan atau bereaksi dengan zat pelarutnya sehingga makin tinggi laju pelarutan partikel tersebut. Dari aspek praktis pemanfaatan bahan geologis sebagai pupuk, penggilingan intensif (*high-energy milling*) merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efektivitas pupuk batuan dalam bentuk bubuk (*nano particles*). Metode penggilingan batuan akan dibahas lebih detail pada Bab 6 dalam buku ini.

e. Tingkat kristalinitas partikel mineral

Kesempurnaan struktur kristal mineral menyusun batuan, sampai tingkat tertentu menentukan mudah - tidaknya mineral tersebut terlarutkan. Contoh pelarutan kinetik pada mineral K-feldspar yang berbeda tingkat kristalinitasnya karena digiling dengan *ball mill* disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Pola XRD mineral K-feldspar yang digiling dengan *ball mill* selama 10, 60, dan 120 menit (sebelah kiri) dan pola laju pelarutannya dalam asam asetat + asam oksalat 0,1 N (sebelah kanan) (Priyono, 2005a)

Penggilingan menyebabkan makin halus partikel dan rusaknya kristal mineral K-feldspar ditunjukkan dengan makin menurunnya intensitas dan melebarnya pola difraksi sinar X (Gambar 11 sebelah kiri). Kerusakan kristal mineral tersebut (sampai batas tertentu) diikuti dengan meningkatnya laju pelarutan kation K^+ dari K-feldspar (Gambar 11 sebelah kanan). Namun perlu dicatat bahwa pengaruh dari meningkatnya intensitas penggilingan, atau tingkat kerusakan struktur mineral atau batuan akibat penggilingan, tidak selalu diikuti oleh peningkatan laju pelarutan unsur hara yang sama. Bahkan, penggilingan yang terlalu intensif justru dapat menurunkan laju pelarutan unsur hara, karena terjadinya '*sintering*' atau '*agglomeration*'. Kapan penggilingan tersebut dikatakan optimal (laju pelarutan unsur hara atau batuan maksimal), masing-masing jenis mineral/batuan

mempunyai waktu penggilingan kritikal yang berbeda, tergantung pada jenis (karakteristik) mineral yang digiling dan kondisi (*setting*) alat gilingnya.

C. Pelarutan Batuan dalam Tanah

Tanah dapat berperan sebagai media pelarut mineral/batuan induk tanah, maupun bubuk batuan yang diaplikasikan sebagai pupuk pada tanah tersebut. Karena tanah merupakan suatu sistem yang kompleks, terlebih lagi sistem 'tanah - tanaman', mekanisme pelarutan batuan pada sistem tersebut tidak mungkin dijelaskan secara sederhana seperti pada pelarutan menggunakan asam organik atau anorganik murni di laboratorium. Mekanisme reaksi asam - basa, pertukaran, redoks, dan pembentukan ligand 'logam - organik' dapat terjadi secara bersamaan pada proses pelarutan batuan dalam sistem tanah atau 'tanah - tanaman' (*rizosfir*). Selain itu, banyak agen pelarut yang terlibat yang harus diperhitungkan, terutama asam organik yang ada di tanah yang sangat beragam dan yang berasal dari akar (eksudat) tanaman. Serapan hara oleh tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut juga mempengaruhi laju pelarutan unsur hara dari bahan induk tanah atau pupuk batuan yang diaplikasikan.

Seperti telah dijelaskan di depan bahwa masalah lambatnya pelarutan unsur hara dari pupuk batuan merupakan faktor pembatas efektivitas pupuk batuan tersebut sebagai pemasok unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman. Hasil penelitian pelarutan mineral

dengan larutan murni (Welch & Ullman, 1992, 1996; Blake & Walter, 1999; Zhang & Bloom, 1999; Oelkers & Gislason, 2001) menunjukkan bahwa asam organik lebih efektif daripada asam anorganik sebagai pelarut bahan geologis tersebut. Hasil penelitian pelarutan bubuk batuan di dalam tanah (Priyono, 2005a; Priyatna et al., 2007) menunjukkan bahwa konsentrasi asam organik dan pH tanah mempunyai peran dominan dalam proses pelarutan unsur hara dari bubuk batuan tersebut. Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa pada pelarutan dengan asam organik terlibat mekanisme pembentukan ligand 'logam - organik' (Shotyk & Nesbitt, 1992); dan mekanisme tersebut dipengaruhi oleh pH larutan (Ludwig et al. 1996). Laju pelarutan meningkat secara linier dengan makin menurunnya pH (Amrhein dan Suarez, 1988). Mekanisme peningkatan laju pelarutan melalui pembentukan kompleks Al - organik dapat terjadi hanya pada kondisi masam ($\text{pH} < 5$) (Stumm & Furrer 1987); tetapi mekanisme itu tidak terjadi pada pH sekitar netral (Ludwig et al., 1996) karena pada pH netral, kompleks Si - organik di permukaan mineral tidak stabil (Driscoll et al., 1985). Peneliti lain (Stumm & Furrer, 1987; Wieland et al., 1988) menunjukkan bahwa mekanisme koordinasi ligan Si - organik sangat mempengaruhi pelarutan silika. Menurut Bennett (1991), ada mekanisme interaksi ligan organik di dalam kristal mineral dan proses itu dapat melemahkan kerangka struktur mineral tersebut.

Asam organik di dalam tanah dapat berasal dari dekomposisi bahan organik, hasil metabolisme mikro organisme, dan eksudasi dari akar (Stevenson & Arkadani, 1972). Menurut hasil penelitian Jones (1988), konsentrasi asam organik di dalam tanah sangat beragam dari mendekati nol sampai ratusan $\mu\text{m.L}$ larutan tanah. Di antara asam organik tersebut, asam asetat merupakan asam organik yang paling lemah, sedangkan asam sitrat adalah yang paling kuat sebagai pelarut unsur logam dari mineral (Huang & Kiang, 1972).

Hasil penelitian tentang pelarutan bubuk batuan pada sistem 'tanah - tanaman' (rizosfir) merupakan gambaran yang lebih riil tentang efektivitas penggunaan bubuk batuan sebagai pupuk dalam usaha tani. Hasil penelitian Priyono (2005a) yang menggunakan bubuk batuan basalt, dolerit, gneiss, dan mineral K-feldspar menunjukkan bahwa semua jenis bubuk batuan itu tidak hanya berperan sebagai sumber hara bagi tanaman, tetapi juga sebagai bahan pengapuran (*liming material*) yang dapat digunakan untuk meningkatkan pH tanah. Hal serupa dilaporkan oleh peneliti sebelumnya, antara lain Leonardos et al. (1987), Gillman (1980), Gillman et al. (2001, 2002), dan Coventry et al. (2002), Sanz Scovino & Rowell (1988), dan Bakken et al. (2000). Peningkatan pH tanah (sebagai media pelarutan bubuk batuan) tentu akan menghambat proses pelepasan unsur hara (kation) dari batuan ke larutan tanah. Selain itu, konsentrasi unsur hara yang sudah ada di dalam tanah (media

pelarut) juga akan menghambat pelarutan unsur hara dari bubuk batuan yang diaplikasikan pada tanah tersebut.

Pelarutan unsur hara dari bubuk batuan di dalam tanah yang masam atau/dan miskin hara lebih cepat daripada di dalam tanah yang bereaksi netral - alkalin dan subur. Implikasi praktisnya, pupuk batuan dalam bentuk bubuk tersebut akan lebih efektif jika diaplikasikan pada tanah yang bermasalah kehaeraan (masam atau/dan miskin hara) daripada tanah yang normal atau subur.

BAB V

BATUAN INDUK TANAH MINERAL

A. Bahan Induk Tanah

Tanah dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan jenis bahan induknya, yaitu tanah mineral dan tanah organik. Berdasarkan definisi *Soil Survey Staffs* - USDA (2014), bahan (induk) tanah mineral adalah bahan padatan yang mengandung unsur karbon (C) < 12 % jika kadar liat (*clay*)-nya 0, atau < 18 % jika kadar liatnya > 60 %. Dari definisi itu dapat diformulasikan bahwa bahan (induk) tanah mineral mengandung C (%) < 12 + 0,1 kadar liat (%). Jika kadar C-organiknya bahan padatan itu lebih tinggi dari nilai tersebut dikategorikan sebagai bahan tanah organik. Sesuai dengan cakupan buku ini, maka yang dibahas dalam bab ini adalah bahan induk untuk tanah mineral, yaitu padatan anorganik atau batuan.

Seperti telah dibahas pada Bab 3, bahan induk tanah mineral (batuan) dapat dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan proses pembentukannya, yaitu batuan beku, endapan, dan metamorf. Selain itu, bahan induk tanah mineral juga dapat dikelompokkan berdasarkan tempat asalnya, yaitu bahan induk yang

menetap (*sedentary*) dan bahan induk yang terpin-dahkan (*transforted*). Bahan induk menetap berada di tempat aslinya, merupakan bahan induk residual yang kemudian terlapuk membentuk tanah di situ. Bahan induk terpin-dahkan adalah bahan induk yang terpin-dahkan dari tempat aslinya, kemudian membentuk ta-nah di tempat yang baru.

Berdasarkan jenis energi yang bekerja pada pro-ses pemindahannya, bahan induk terpin-dahkan dapat dikelompokkan lebih lanjut menjadi bahan induk (1) kolovial, (2) alluvial, (3) marin, (4) lakustrin, (5) gla-sial, dan (6) eolin. Proses pemindahan bahan induk dari tempat semula menyebabkan terjadinya beberapa perubahan sifat semula, sesuai dengan proses dan jenis energi yang memindahkan bahan induk tersebut (Tabel 15).

Batuan yang terpin-dahkan minimal mengalami perubahan ukuran partikelnya. Pada batuan induk koluvial, perubahan ukuran terjadi dari bongkahan besar menjadi lebih kecil dengan bentuk tak teratur (tajam atau rigit) karena jatuh dari tempat aslinya yang lebih tinggi dan pecah. Tetapi sifat kimianya rela-tif sama seperti di tempat asalnya. Perubahan ukuran batuan induk tersebut kemungkinan berpengaruh pa-da sifat fisik tanah yang terbentuk, yaitu ukuran struktur tanah (*pad*) yang lebih kecil daripada struktur tanah yang terbentuk dari batuan induk asli-nya (tidak terpin-dahkan).

Tabel 15. Bahan induk tanah mineral

No	Jenis Bahan Induk	Tenaga Pemindah	Proses dan Karakteristik
1.	Bahan induk menetap (<i>sedentary</i>)	-	<ul style="list-style-type: none"> • Menetap, sifat sesuai aslinya. • Ukurannya umumnya besar (bongkahan): batuan beku, endapan dan metamorfik.
2.	Bahan induk terpindahkan (<i>transformed</i>):		<ul style="list-style-type: none"> • Batuan terpindahkan oleh proses erosi, transportasi, dan sedimentasi.
	a. Kolovial	Gravitasi bumi	<ul style="list-style-type: none"> • Terjadi di sekitar tebing/lereng yang curam. • Pecahan batuan kasar, sifat kimia sama dengan aslinya
	b. Aluvial	Erosi air	<ul style="list-style-type: none"> • Terangkut oleh erosi air, diendapkan di bagian lereng bawah (datar); berlapis-lapis, ukuran partikel beragam, acak.
	c. Marin	Pengendapan di laut	<ul style="list-style-type: none"> • Pengendapan dan pembentukan batuan/mineral di laut (termasuk kapur dan dolomit).
	d. Lakustrin	Pengendapan di danau	<ul style="list-style-type: none"> • Pengendapan dan pembentukan (sintesis) bahan baru di dasar danau.
	e. Glasial	Pencairan es	<ul style="list-style-type: none"> • Terpindahkan oleh proses pencairan es skala besar. • Sifat kimianya tidak banyak berubah dari aslinya
	f. Eolin	Erosi angin	<ul style="list-style-type: none"> • Erosi dan transportasi oleh angin, dan pengendapan • Ukuran partikel kasar (pasir – debu)

Pada batuan induk aluvial, perubahan sifat fisik dan kimia dapat terjadi dengan intensitas perubahan sesuai dengan posisi dan kemiringan lereng dimana material yang terbawa oleh aliran air itu diendapkan.

Intensitas perubahan sifat bahan alluvial yang diendapkan di lereng atas dan miring, relatif kecil dibandingkan dengan yang diendapkan di lereng bagian bawah yang lebih datar dimana ukuran partikelnya menjadi makin halus dan lebih kaya unsur hara esensial. Tanah yang terbentuk dari bahan induk alluvial umumnya sangat subur.

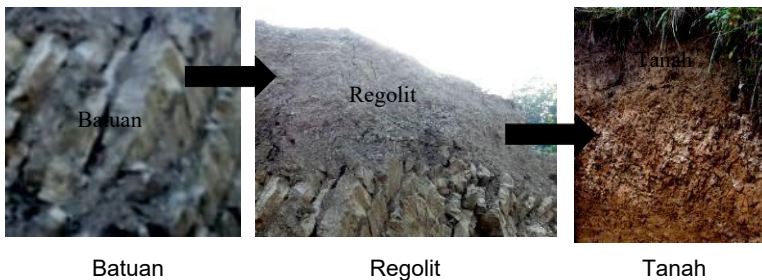
Batuan endapan marin adalah bahan endapan yang terakumulasi di lingkungan laut, kemudian endapan tersebut terekspos ke permukaan laut melalui proses angkatan (*uplifted*) atau menurunnya permukaan air laut. Partikel endapan marin umumnya berukuran liat (*clay*), mengandung beberapa kulit kerang, sangat asin, dan umumnya tidak berlapis-lapis. Tanah yang terbentuk dari bahan marin umumnya bersifat sodik atau salin - sodik. Jika bahan tererosi oleh air tersebut diendapkan di danau disebut bahan endapan lakustrin, berupa partikel halus (pasir halus, debu, dan liat). Bahan lakustrin tersebut terekspos ke atmosfer oleh proses angkatan atau lipatan dasar danau, berlapis-lapis sesuai dengan proses pengendapan bahan aluvial.

Batuan induk endapan glasial terbentuk di daerah dekat kutub, misalnya di Canada dan Alaska (Krzic et al., 2009). Bahan tersebut diendapkan langsung dari es glasial dan strukturnya beragam dari agak lepas (di bagian atas/permukaan bumi) hingga kompak (di bagian lebih dalam). Bahan fluvial glasial diendapkan oleh pencairan glasial di dataran banjir

(*floodplain*). Endapan itu terdiri atas butiran pasir kasar dan kerikil dengan beragam bentuk. Endapan glasial dapat tererosi dan diendapkan di danau menjadi batuan induk endapan glasial-lakustrin.

B. Dari Batuan Menjadi Tanah

Pembentukan dan perkembangan tanah dipengaruhi oleh 5 faktor pembentuk tanah (Jenny, 1941). Dengan kata lain, tanah merupakan fungsi dari bahan induk (B), iklim (I), topografi (T), organisme (O), dan waktu (W): Tanah = f (B, I, T, O, W).

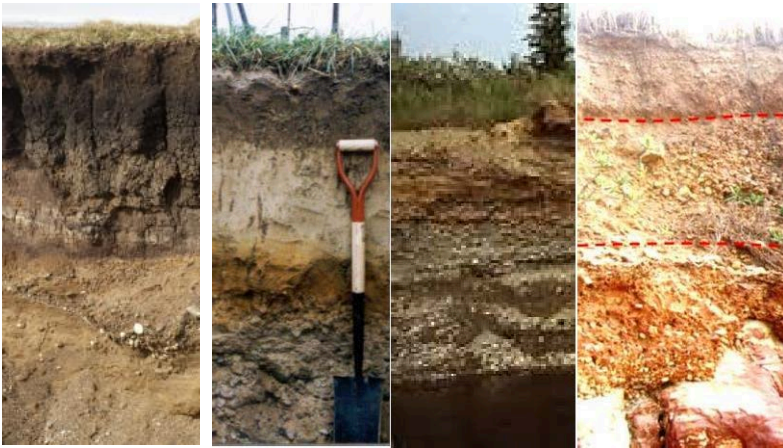


Gambar 12. Ilustrasi tahapan proses pembentukan tanah mineral, dari bongkahan batuan tak terpindahkan menjadi tanah

Pada Gambar 12 diilustrasikan bongkahan batuan yang mengalami proses pelapukan menjadi regolit, kemudian dari regolit menjadi tanah. Bahan induk berupa bongkahan batuan mengalami pelapukan (disintegrasi) menjadi pecahan batuan kasar dan halus (regolit) yang sifatnya masih seperti batuan induk; kemudian regolit mengalami proses lebih lanjut menjadi tanah. Dalam proses pelapukan batuan induk

menjadi tanah, faktor iklim (terutama aspek suhu dan kelembaban/air), organisme, dan topografi bekerja pada material regolit dan tanah. Oleh karena itu, bahan induk dan waktu dapat dikategorikan sebagai faktor pembentuk tanah pasif, sedangkan iklim, topografi, dan organisme sebagai faktor pembentuk tanah aktif.

Pada tanah Aluvial (Fluvents), bahan induk tanah tersebut berupa bahan endapan anorganik (batu, kerikil, debu, ataupun liat) yang dipindahkan melalui proses erosi dari tempat lain. Profil tanah Alluvial (Gambar 13) terbentuk dari bahan alluvial. Setiap lapisan pada suatu profil tanah itu tampak berbeda-beda dan tidak ada pola tertentu. Ukuran bahan yang diendapkan tergantung pada intensitas energi pengangkut pada setiap kali terjadi erosi – transfortasi – pengendapan. Energi erosi yang tinggi dapat memindahkan bahan berukuran besar (partikel/batuan kasar); sebaliknya, energi erosi yang rendah/kecil hanya mampu memindahkan partikel ukuran kecil dan ringan. Batas antar lapisan tanah tersebut tampak jelas dan rata. Meskipun beberapa lapisan itu terdiri atas bahan halus (partikel primer tanah, yaitu pasir, debu, dan liat), material tersebut tetap dianggap sebagai bahan induk tanah yang akan berkembang di situ.



Gambar 13. Contoh beberapa profil tanah mineral yang terbentuk dari bahan induk pindahan. Bahan pindahan dapat berupa batuan kasar ataupun halus yang terbawa air pada proses erosi kemudian diendapkan menjadi bahan induk tanah yang baru.

Meskipun solumnya dalam, tanah tersebut tetap dianggap sebagai tanah yang belum berkembang secara pedogenik, sehingga diklasifikasikan ke dalam ordo Entisol (diambil dari bagian kata '*recent*' = baru, dan sol = tanah) dan sub ordo Fluvent (Entisol yang terbentuk melalui proses pengendapan/fluviiasi).

Karakteristik batuan induk sangat menentukan sifat tanah yang terbentuk dari batuan itu, terutama pada tahap awal perkembangan tanah (ordo Entisol atau Inceptisols). Pada tahap perkembangan lebih lanjut (ordo Ultisol dan Oksisol), kontribusi pengaruh dari faktor lingkungan (iklim, topografi, dan organisme) terhadap sifat dan ciri tanah makin intensif (sesuai dengan kondisi setempat) menutupi dominasi pengaruh dari bahan induk. Karakteristik tanah tersebut

ditentukan oleh hasil kerja kolektif dari semua faktor pembentuk tanah.

Proses pelapukan batuan induk hingga menjadi tanah dapat terjadi secara fisik (mekanik), kimia, dan biologi; ketiganya sulit dipisahkan karena secara alami proses itu berjalan simultan. Namun, intensitas masing-masing proses pelapukan tersebut pada setiap tahapan perkembangan tanah dapat berbeda dari satu tempat ke tempat lain, tergantung pada kondisi faktor pembentuk tanah di masing-masing lokasi.

Pelapukan batuan secara fisik dapat terjadi karena (1) perubahan suhu udara pada siang hari (panas) dan dingin (malam hari) menyebabkan terjadinya pemuaian – pengkerutan batuan, (2) tetesan air hujan, dan (3) penetrasi akar tanaman ke dalam bongkahan batuan.

C. Sifat Batuan Induk dan Tanah

Batuan induk merupakan faktor genetis tanah mineral yang terbentuk dari batuan tersebut, sehingga karakteristik batuan induk akan sangat menentukan sifat alami tanah yang terbentuk, terutama pada tingkat awal perkembangan tanah tersebut. Pada tingkat perkembangan lebih lanjut dimana telah terjadi proses iluviasi dan eluviasi misalnya, pengaruh faktor lingkungan (iklim, topografi, dan organisme) dalam menentukan sifat tanah menjadi lebih intensif. Adanya keragaman jenis bahan induk tanah dan kondisi

lingkungan menyebabkan terbentuknya beragam jenis tanah di dunia yang ada saat ini.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, pengaruh setiap faktor pembentuk tanah (lingkungan) terhadap sifat tanah yang terbentuk dari suatu jenis batuan, sulit dipisahkan karena faktor itu saling terkait dan saling berpengaruh (*interdependency*). Kombinasi kondisi (intensitas pengaruh) faktor pembentuk tanah sangat banyak, tentu saja banyak pula kemungkinan hubungan antara jenis batuan induk dengan sifat dan ciri tanah yang terbentuk pada lingkungan yang beragam. Hubungan antara faktor genetis (batuan induk) dengan sifat dan ciri tanah yang terbentuk dijelaskan secara ringkas dalam Tabel 16.

Pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa kandungan unsur hara dominan pada jenis batuan terlihat pada rumus kimia mineral utama penyusun batuan itu. Batuan beku basaltik, misalnya berwarna gelap karena tersusun dari mineral ferromagnesium silikat yang berwarna hitam, kaya Mg, Fe, dan unsur mikro Mn, Zn, dan Cu. Mineral tersebut relatif mudah terlapuk karena banyak terjadi substitusi isomorfik pada struktur dasarnya sehingga mudah hancur oleh faktor lingkungan. Tanah yang terbentuk tentu kaya unsur hara tersebut; dan mineral sekunder (liat) yang terbentuk terutama adalah tipe 2:1 (smektit), nilai KTK tinggi, relatif subur. Dalam proses perkembangannya, terutama jika berada di daerah beriklim basah, curah hujan tinggi menyebabkan pencucuan material tanah

Tabel 16. Hubungan antara jenis bahan induk dengan kemungkinan sifat dan ciri tanah yang

No	Jenis Batuan	Komposisi Mineral		Sifat dan Ciri Tanah	
		Mineral	Rumus Kimia	Perkembangan Awal	Perkembangan Lanjut
1.	Batuan Beku: a. Basalt	Olivin	Mg_2SiO_4 s/d Fe_2SiO_4	Tanah liat (lat 2:1), gelap, kaya kation basa (Ca, Mg), miskin K, unsur mikro (Fe, Mn, Zn, Cu) tinggi, pH netral-agak salin, porositas rendah. Entisols, Inceptisols, Mollisol)	Tanah berlempung s/d berpasir (loamy – sandy), cerah (kecoklatan – kemerahan), kation Ca, Mg terindih menyisakan oksida – hidroksida Al, Fe, Mn dominan (laterisasi, podsolisasi), masam (Ultisol, Oksisols)
		Pliroksin	$Ca(Mg, Fe, Al)(AlSi)_2O_6$		
		Plagioklas	$CaAlSi_3O_8 - NaAlSi_3O_8$		
b.	Andesitik	Plagioklas	$CaAlSi_3O_8 - NaAlSi_3O_8$	Tanah berliat - berlempung (clayey - loamy), unsur hara makro dan mikro berimbang (sedang – tinggi), pH netral, porositas sedang (Entisols, Inceptisols, Mollisol)	Tanah berlempung – berpasir (loamy – sandy), oksida - hidroksida Al, Fe, Mn dominan (laterisasi, podsolisasi), masam, porositas sedang – tinggi (Ultisol, Oksisol)
		Ampibol	$NaCa_2(Mg, Fe, Al)_2(Si, Al)_5O_{22}(OH)_2$		
c.	Granitik	Feldspard	$CaAlSi_3O_8, NaAlSi_3O_8$		
		K-feldspar	$KAlSi_3O_8$	Tanah pasir, berwarna pucat (keputihan), kaya K, miskin Ca, Mg, dan unsur mikro, KTK rendah – sedang, pH agak masam – netral, porositas tinggi (Psamment)	Tanah pasir, silikat, berwarna pucat (keputihan), miskin unsur hara makro dan mikro, sangat porus (Ultisol)
2.	Batuan Endapan a. Batu Pasir	Kwarsa	SiO_2	Tanah pasir, miskin hara makro maupun mikro, porositas tinggi (Psamment)	Tanah pasir, miskin hara makro maupun mikro, porositas tinggi (Psamment)
		Kalsit	$CaCO_3$		
		Dolomit	$(Ca, Mg)CO_3$	Tanah vertik (lat montmorilonit), gelap, kaya Ca, Mg, miskin K dan unsur mikro (Fe, Zn, Cu), porositas rendah (Vertisol)	Tanah berliat - berlempung (clayey - loamy), miskin kation basa Ca, Mg, dan mikro, porositas sedang (Ultisols)
c.	Shale	Beragam Liat	Beragam, tipe 1:1, 2:1, 2:2	Tanah berliat, struktur berliapis (platy), unsur hara makro – mikro sedang, pH netral, porositas sedang (Entisol, Inceptisol, Mollisol)	Tanah berliat, struktur berliapis (platy), unsur hara makro – mikro sedang, pH netral, porositas sedang (Entisol, Inceptisol, Mollisol)

Table 114 (Lanjutan)

No	Jenis Batuan	Komposisi Mineral		Sifat dan Ciri Tanah	
		Mineral	Rumus Kimia	Perkembangan Awal	Perkembangan Lanjut
	d. Konglomerat	Beragam mineral basaltik - silisious		Tanah berliat - berlempung (clayey - loamy), unsur hara makro dan mikro berimbang (sedang - tinggi), pH netral, porositas sedang (Entisols, Inceptisols, Molisols)	Tanah berlempung - berpasir (loamy - sandy), oksida - hidroksida Al, Fe, Mn dominan (laterisasi, podsolisasi), masam, porositas sedang - tinggi (Ultisol, Oksisol).
	e. Batu apung	Kwarsa Feldspar	SiO ₂ KAISi ₃ O ₈	Tanah pasiran, miskin hara makro maupun mikro, porositas tinggi (Psamment)	Tanah pasiran, miskin hara makro maupun mikro, porositas tinggi (Psamments)
4.	Batuan Malihan	K-feldspar	KAISi ₃ O ₈	Tanah berlempung - pasiran, berwarna agak pucat, kaya K, miskin Ca, Mg, dan unsur mikro, KTK rendah - sedang, pH agak masam - netral, porositas tinggi (Psamment)	Tanah pasiran, silikat, berwarna pucat (keputihan), miskin unsur hara makro dan mikro, sangat porus (Ultisol)
	a. Schist	Kwarsa Mika Klorit	SiO ₂ KA ₂ (AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂) _x (Mg ₃ (Si ₄ Al ₁ O ₁₀ (OH) ₂) _y		
	b. Gneiss	K-feldspar	KAISi ₃ O ₈	Tanah berlempung - pasiran, berwarna agak pucat, kaya K, miskin Ca, Mg, dan unsur mikro, KTK rendah - sedang, pH agak masam - netral, porositas tinggi (Psamment)	Tanah pasiran, silikat, berwarna pucat (keputihan), miskin unsur hara makro dan mikro, sangat porus (Ultisol)
	c. Marmer	Kalsit	CaCO ₃	Tanah vertikal (lat montmorilonit), gelap, kaya Ca, Mg, miskin K dan unsur mikro (Fe, Zn, Cu), porositas rendah (Vertisol).	Tanah berliat - berlempung (clayey - loamy), miskin kation basa Ca, Mg, dan mikro, porositas sedang (Ultisols)

(clay) dan unsur hara yang intensif. Kation basa banyak tercuci dan tersisa senyawa kompleks yang stabil/tidak mudah terlapuk, yaitu oksida dan hidroksida Al, Fe, Mn, Zn, dan Cu, warna cerah (coklat, kuning, dan kemerahan) dominan (ordo Ultisols dan Oksisol). Sebaliknya, batuan felsik (misalnya granit, batu apung, atau gneiss), kaya mineral silisium (kwarza dan K-feldspar), berwarna pucat (terang/bening), miskin kation basa (Ca, Mg) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu), tetapi kaya K dan Si. Mineral tersebut relatif sulit terlapuk karena tersusun oleh tetrahedral silikat yang sempurna (sedikit terjadi substitusi isomorfik). Tanah yang terbentuk dari batuan felsik tersebut umumnya miskin kation (unsur hara) basa, kecuali K, miskin unsur hara mikro. Karena mineralnya relatif sulit terlapuk, tekstur tanahnya umumnya pasir (ordo Entisols, sub ordo Psamment).

Tanah yang terbentuk dari jenis batuan intermedier (antara mafik dan felsik), tentu sifatnya berada di antara sifat tanah yang terbentuk dari batuan mafik dan dari batuan felsik. Tekstur tanah tersebut umumnya sedang – lempungan (*loamy*), kandungan kation basa/makro maupun mikronya cukup (sedang). Sifat tanah semacam itu yang umumnya dikehendaki oleh sebagian besar jenis tanaman; tidak terlalu basa atau masam, teksturnya tidak terlalu halus (berliat) maupun kasar (pasiran), tetapi sedang (lempungan).

D. Peremajaan Tanah

Peremajaan tanah (*soil rejuvenation*) adalah suatu cara atau teknologi untuk memulihkan kondisi tanah yang kualitasnya sudah terlalu rendah atau tua, nutrisi dari batuan induk mineral primernya di zona perakaran sudah habis. Tanah itu sudah tidak dapat berfungsi optimal sebagai pemasok unsur hara bagi tanaman yang bersumber dari bahan induk. Tanah semacam itu perlu diremajakan dengan menambahkan bahan induk (batuan) yang baru (*fresh*).

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, batuan induk sangat menentukan sifat tanah yang terbentuk, baik sifat fisik, kimia, maupun biologi. Perubahan atau perbaikan mendasar yang diperlukan pada tanah yang miskin hara yang disebabkan oleh faktor genetis, faktor lingkungan, maupun oleh karena salah kelola dapat dilakukan melalui perbaikan pada bahan induknya yang berperan sebagai sumber utama unsur hara bagi tanaman yang tumbuh pada tanah itu. Jadi, peremajaan tanah adalah bagian dari teknologi reklamasi atau remediasi tanah yang lebih difokuskan pada upaya perbaikan dan pengkayaan kembali kandungan unsur hara pada bahan induknya, mengembalikan kondisi tanah untuk menjadi lebih baik, mempunyai cadangan unsur hara esensial yang tinggi.

Peremajaan tanah dengan bubuk batuan vulkanik yang masih segar telah lama dilakukan pada tanah yang secara alami sudah sangat tua (berkembang lanjut), misalnya yang termasuk dalam ordo Ultisol

dan Oksisol (tanah Lateritik atau Podzolik). Contoh tanah lain yang perlu diremajakan adalah tanah yang terbentuk dari batu apung, kwarsa, atau granit yang secara alami memang miskin hara makro maupun mikro. Tanah yang terbentuk dari batu kapur, kaya Ca atau/dan Mg, tetapi miskin K dan unsur hara mikro (Fe, Zn, dan Cu). Tanah semacam itu perlu diremajakan, diperkaya dengan batuan yang kaya unsur hara yang lain yang tidak terdapat pada batuan induk aslinya tanah tersebut. Untuk peremajaan tanah tersebut dapat digunakan misalnya batuan basaltik atau andesitik.

Hasil positif dari penerapan teknologi peremajaan tanah ditunjukkan oleh beberapa peneliti. Pada tanaman tebu di Mauritius, de Villier (1948) mengaplikasikan bubuk batuan basalt (\pm 180 ton/ha), dan perlakuan tersebut mampu meningkatkan produksi tebu selama beberapa tahun. Marten-Lake (1950) menunjukkan bahwa tanaman tebu ratun sangat responsif terhadap pemberian pupuk N, P, K pada tanah yang telah diberi bubuk batuan basalt; sedangkan Coventry et al. (2001) meningkatkan produktivitas dan memperbaiki sifat tanah lateritik di Queensland yang diremajakan dengan batuan basalt (Minplus^{MT}). Aplikasi bubuk batuan gneiss atau K-feldspar sebagai sumber hara K (Priyono dan Gilkes, 2008), efektif meningkatkan pertumbuhan dan kadar K tersedia tanah pasiran yang miskin K. Hasil penelitian lain yang dilakukan di Lombok Utara (Priyono et al., 2009) menunjukkan bahwa pemberian bubuk batuan silikat basaltik yang

dikombinasikan dengan bahan organik (kompos) dapat meningkatkan produktivitas tanah yang berbahan induk batu apung (miskin Ca, Mg, Fe, Zn, dan Cu).

Pemilihan jenis batuan sebagai peremaja tanah yang tidak tepat dapat menyebabkan kegagalan peremajaan tersebut. Misalnya, penggunaan batuan granit sebagai bahan peremaja tanah lateritik dinilai tidak efektif (Coroneus et al., 1996; Bolland et al., 2000). Hasil negatif tersebut karena unsur hara yang disumbangkan oleh batuan granit (didominasi oleh mineral kwarsa dan feldspar) relatif rendah dan sulit terlarutkan.

Kelemahan utama dari teknik peremajaan tanah dengan bubuk batuan seperti dijelaskan di atas adalah dosis bubuk batuan yang harus diaplikasikan sangat tinggi, yaitu > 20 ton/ha untuk bubuk batuan yang partikelnya ≤ 50 μm ; atau > 5 ton/ha untuk bubuk batuan berukuran ≤ 30 nm (Priyono et al., 2009). Dosis tersebut tentu sulit diterapkan oleh petani kecil untuk peremajaan tanah pada areal tanaman pangan. Alternatif yang dapat diterapkan oleh petani adalah pemberian bahan amelioran (bubuk batuan) tersebut secara bertahap; atau diterapkan pada usaha tani dengan luas areal terbatas, misalnya pada areal taman atau tanaman dalam pot. Oleh karena itu, penggunaan partikel batuan terutama direkomendasikan untuk diterapkan pada perkebunan besar yang berorientasi produksi jangka panjang.

Peremajaan tanah menggunakan bubuk batuan vulkanik mempunyai banyak keuntungan potensial, antara lain (1) meningkatkan stok unsur hara makro (selain N) dan mikro yang lambat tersedia bagi tanaman sehingga tidak mudah hilang tercuci maupun tererosi, (2) menetralkan pH tanah masam, (3) meningkatkan kuantitas dan kualitas produksi, (4) meningkatkan resistensi tanaman terhadap serangan hama dan penyakit tanaman (karena pasokan unsur Si), dan (4) mengurangi penggunaan pupuk sintetis. Berdasarkan pertimbangan tersebut, teknologi peremajaan tanah dapat dijadikan sebagai alternatif untuk mengatasi beberapa masalah usaha tani secara simultan.

BAB 6

PUPUK DAN AMELIORAN

A. Pengertian Pupuk dan Amelioran

Pupuk adalah bahan organik maupun anorganik dalam bentuk padat maupun cair yang mengandung satu atau lebih jenis unsur hara esensial yang umumnya digunakan untuk memenuhi kekurangan unsur hara tanaman sehingga tanaman tersebut dapat tumbuh dan berproduksi optimal. Amelioran (pembenah tanah) adalah bahan organik maupun anorganik yang diaplikasikan melalui tanah untuk memperbaiki atau mengembalikan kondisi (sifat kimiawi, fisik, maupun biologis) tanah yang bermasalah pada salah satu atau gabungan dari beberapa aspek kesuburan tersebut, sehingga tanah tersebut dapat berfungsi optimal sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut.

Berdasarkan definisi di atas dapat dikatakan bahwa pupuk adalah bahan amelioran yang berisi terutama unsur hara esensial dan digunakan khusus untuk memenuhi kekurangan (kekahatan) unsur hara tertentu yang dibutuhkan oleh tanaman. Namun dalam praktek usaha tani, bahan amelioran umumnya

digunakan untuk mengatasi masalah tanah yang disebabkan oleh faktor lain selain kekurangan unsur hara esensial. Misalnya, tanah yang terkontaminasi oleh limbah industri tambang logam (*tailing*), tanah masam, atau tanah garaman. Banyak jenis bahan amelioran dapat berfungsi ganda atau jamak, yaitu sebagai pembenah tanah dan pemasok unsur hara tanaman. Misalnya, bahan kapur CaCO_3 atau $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$, umumnya digunakan untuk meningkatkan pH tanah masam (pengapuran), tetapi juga untuk memasok unsur hara Ca atau/dan Mg bagi tanaman. Contoh lain, kompos (bahan organik) dapat berfungsi sebagai amelioran, yaitu perekat partikel primer tanah (menstimulir proses granulasi), meningkatkan daya tanah untuk menahan air (*water holding capacity*), serta penyerap logam berat, sekaligus dapat berfungsi sebagai pupuk - memasok beragam jenis unsur hara esensial ke tanaman.

Dalam bab sebelumnya telah dibahas tentang unsur hara dan masalah yang sering muncul dalam usaha tani yang berkaitan dengan kebutuhan unsur hara esensial bagi tanaman. Permasalahan usaha tani tersebut dapat muncul karena sifat bawaan (*in herent*) dari media tumbuh (yaitu batuan induk) dan faktor lingkungan pembentuk tanah, cara pemanfaatan dan pengelolaan lahan, atau kombinasi kedua faktor tersebut. Masalah tersebut umumnya dapat diatasi melalui tindakan pemupukan atau/dan remediasi (penormalan kondisi tanah) menggunakan bahan amelioran. Bahan geologis (batuan) merupakan salah satu bahan

alami yang potensial dapat dimanfaatkan untuk mengatasi masalah lahan tersebut, baik sebagai pupuk, amelioran, maupun sekaligus berfungsi ganda sebagai pupuk dan amelioran.

Mineral umumnya hanya mengandung 1 – 3 jenis unsur hara esensial, sedangkan batuan, karena terdiri atas beberapa jenis mineral, mengandung lebih banyak jenis unsur hara esensial. Misalnya, mineral feldspar mengandung unsur hara esensial K dan fungsional Si, sedangkan batuan basalt mengandung banyak jenis unsur hara esensial - unsur hara makro (Ca, Mg, dan K) maupun mikro (Fe, Zn, dan Cu) serta unsur fungsional Si. Berdasarkan kandungan unsur haranya, bahan geologis sangat potensial untuk digunakan sebagai bahan baku pupuk atau langsung sebagai pupuk dan amelioran. Bahkan, beberapa jenis mineral dan batuan telah umum dimanfaatkan sebagai bahan baku atau digunakan secara langsung (dalam bentuk bubuk halus) sebagai pupuk. Misalnya, mineral sylvite (KCl), K-feldspar, dan biotit sebagai bahan baku pembuatan pupuk K, sedangkan mineral apatit digunakan sebagai bahan pupuk atau langsung sebagai pupuk fosfat. Bahan geologis yang belum banyak dimanfaatkan dalam bidang pertanian adalah batuan silikat atau volkanik yang tersusun dari berbagai jenis mineral.

Batu kapur (CaCO_3) dan dolomit ($(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$) umumnya digunakan sebagai bahan penetral tanah masam, sedangkan gipsum (CaSO_4) digunakan sebagai

penetrasi tanah garaman. Mekanismenya, batuan kapur bereaksi dengan air menghasilkan ion OH^- yang menetralkan kemasaman tanah (H^+); sedangkan gipsum terdisosiasi oleh air menjadi ion Ca^{+2} dan asam sulfat (SO_4^{-2}). Selanjutnya, peningkatan konsentrasi ion Ca^{+2} menurunkan aktivitas Na^+ , sedangkan peningkatan konsentrasi SO_4^{-2} menurunkan pH tanah alkalin (garaman).

Pada beberapa dekade terakhir, banyak peneliti berinovasi untuk memanfaatkan batuan silikat sebagai pupuk maupun amelioran yang efektif, karena batuan silikat tersedia melimpah, mengandung beragam jenis mineral dan unsur hara esensial. Batuan silikat (dalam bentuk partikel halus) dapat digunakan secara langsung maupun diproses terlebih dahulu secara fisik (*high-energy milling*) dan kimiawi (ekstraksi unsur hara dalam batuan) untuk menjadi pupuk multi nutrisi. Pupuk berbasis batuan silikat relatif baru diperkenalkan ke masyarakat dan masih perlu pengembangan lebih jauh. Oleh karenanya topik itu dibahas secara khusus dalam buku ini (Bab 7).

B. Jenis dan Sifat Pupuk

Pada saat ini telah dikenal berbagai macam jenis pupuk yang beredar di pasar dan telah digunakan secara rutin oleh petani. Beragam jenis pupuk tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan beberapa aspek. Berdasarkan wujudnya, pupuk dapat dipilah menjadi tiga, yaitu pupuk granular (*granule*), bubuk (*powder*), dan cair (*liquid*). Berdasarkan proses pembuatannya,

pupuk dapat digolongkan menjadi dua, yaitu pupuk sintesis (*syntetic fertilizers*) dan alami (*natural fertilizers*); sedangkan berdasarkan bahan baku utamanya, pupuk dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu pupuk organik (*organic fertilizers*), anorganik (*inorganic fertilizers*), dan pupuk hayati (*biofertilizers*). Berdasarkan jumlah jenis unsur hara utamanya, dikenal pula pupuk tunggal (*single nutrient fertilizer*) – mengandung satu unsur hara utama, dan pupuk majemuk (*multi nutrient fertilizer*) – mengandung dua atau lebih jenis unsur hara esensial. Berdasarkan cara aplikasinya, ada tiga cara, yaitu pemupukan melalui daun (*foliar fertilization*), disuntikan atau *in push* melalui batang tanaman, dan pemupukan melalui tanah. Pada sistem hidroponik, pupuk dilarutkan dan diserap oleh akar tanaman dari media tumbuh tanaman berupa larutan pupuk lengkap yang diatur terus mengalir. Di tengah-tengah masyarakat petani juga dikenal istilah 'pupuk kimia' (contohnya urea, TSP, dan KCl) dan pupuk 'non-kimia' (mencakup pupuk organik, pupuk alami, dan hayati). Sebenarnya istilah jenis pupuk tersebut (kimia vs non-kimia) kurang tepat, karena semua pupuk tersebut terdiri atas zat/unsur kimiawi, baik organik maupun anorganik. Yang dimaksud adalah pupuk sintesis, dan lawannya adalah pupuk non-sintesis atau pupuk alami.

Pertanyaan yang sering muncul di masyarakat adalah, jenis pupuk apa yang baik atau tepat untuk digunakan dalam usaha tani? Tentu saja jawaban yang tepat tergantung pada kondisi setempat,

terutama berkaitan dengan permasalahan keharaan yang ada pada tanah dan jenis tanaman yang diusahakan. Selain itu, aspek praktis yang berkaitan dengan ketersediaan jenis pupuk, kemudahan dan efektivitas penerapannya oleh petani harus menjadi pertimbangan dalam pembuatan rekomendasi penggunaan jenis pupuk untuk petani yang kondisi lahannya beragam.

1. Pupuk Sintetis vs Alami

Pupuk sintetis adalah pupuk yang dibuat dari bahan mineral atau gas melalui serangkaian proses fisik maupun kimiawi sehingga dihasilkan bahan lain (berubah wujud aslinya), mengandung unsur hara tertentu dengan kadar lebih tinggi daripada di bahan bakunya. Tujuan dari pemrosesan tersebut adalah untuk memurnikan, meningkatkan kadar unsur haranya, atau/dan mengubah komposisi kimianya yang kompleks dan sulit terlarutkan menjadi lebih sederhana dan mudah larut dalam air atau tersedia bagi tanaman. Beberapa pupuk sintetis yang umum digunakan oleh petani disajikan di Tabel 17.

Perbedaan karakteristik dan aplikasinya antara pupuk sintetis dengan pupuk alami diringkas pada Tabel 18. Berdasarkan kelemahan dan kelebihan umum dari pupuk sintetis dan alami tersebut, kombinasi dari kedua jenis pupuk tersebut secara teknis

Tabel 17. Beberapa jenis pupuk sintetis yang sering digunakan dalam usaha tani modern

No	Nama Pupuk/Merk Dagang	Unsur Hara Utama dan kadarnya
1.	Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	46 % N
2.	Ammonium nitrat (NH_4NO_3)	35 % N
3.	Zulfure Ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	21 % N, 24 % S
4.	TSP ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	36 % P_2O_5
5.	NPK	15 % N, 15 % P_2O_5 , 15 % K_2O
6.	NPK PONSKA	15 % N, 15 % P_2O_5 , 15 % K_2O , 10 % S
7.	KCl	65 % K_2O
8.	KNO_3	38 % K, 14 % N

Tabel 18. Karakteristik pupuk sintetis dan pupuk alami

No	Karakteristik	Pupuk Sintetis	Pupuk Alami
1.	Unsur hara utama	1 – 3 jenis, kadar tinggi	Lengkap, kadar rendah
2.	Kelarutan hara	Tinggi - sedang	Rendah
3.	Dosis	Rendah (< 300 kg/ha)	>1 ton/ha
4.	Sifat tanah yang dipengaruhi	Kadar unsur hara (sifat kimia)	Kadar unsur hara dan perbaikan sifat fisik tanah

usaha tani mungkin secara umum akan lebih baik daripada hanya menggunakan salah satu jenis pupuk sintetis atau alami saja. Tentu saja perlu memperhatikan kondisi setempat, antara lain ketersediaan pupuk dan kondisi lahan/tanah sesuai dengan permasalahannya, dan jenis tanaman yang diusahakan.

2. Pupuk Organik vs Anorganik

Pupuk organik umumnya didefinisikan sebagai jenis pupuk yang dibuat dari bahan atau senyawa organik, antara lain biomasa (limbah tanaman) dan kotoran atau urin ternak. Bahan organik tersebut dapat diaplikasikan langsung sebagai pupuk melalui tanah atau tanaman, maupun difermentasikan terlebih dahulu. Sebaliknya, pupuk anorganik dibuat atau berupa bahan anorganik yang diaplikasikan sebagai

pupuk secara langsung maupun diproses terlebih dahulu. Bahan anorganik tersebut misalnya gas nitrogen, mineral atau batuan, dan limbah industri logam (*slug*). Gas nitrogen diproses menjadi pupuk urea; mineral K-feldspar diproses menjadi pupuk KCl atau dikombinasikan dengan senyawa nitrat menjadi pupuk KNO_3 ; sedangkan batuan fosfat diproses menggunakan asam keras menjadi pupuk TSP (*Triple Super Phosphate*).

Saat ini banyak industri yang memproduksi pupuk organik dalam bentuk padat (granular) maupun cair. Kandungan unsur hara pada pupuk organik umumnya lengkap, tetapi kadar masing-masing unsur hara relatif rendah (< 5 %). Pada pupuk organik granular, kadar senyawa karbon (organik) umumnya sangat tinggi (> 60 %) dan hanya sebagian dari unsur hara esensial lainnya yang dapat langsung diserap tanaman. Dosis pupuk organik granular yang harus digunakan sangat tinggi (beberapa ton per hektar), dan hal itu sering menjadi kendala bagi petani tanaman pangan. Namun, perlu diketahui bahwa penggunaan pupuk organik granular bukan hanya berfungsi untuk memasok unsur hara bagi tanaman, tetapi juga untuk memperbaiki sifat tanah, misalnya untuk meningkatkan daya jerap tanah terhadap air dan unsur hara. Pada pupuk organik cair, umumnya kadar unsur hara tersedia < 5 %, dan dapat diaplikasikan melalui daun ataupun tanah.

C. Amelioran

Setidaknya ada tiga penamaan bahan atau istilah *input* usaha tani yang mungkin sering membingungkan, yaitu amelioran, kondisioner, dan amendemen. Pengertian tentang amelioran pada prinsipnya sama dengan kondisioner atau pembenah tanah, yaitu bahan organik maupun anorganik, sintetis maupun alami yang digunakan untuk memperbaiki kondisi tanah sehingga tanaman yang tumbuh pada tanah itu menjadi lebih produktif. Amendemen bermakna bahan tambahan atau yang diaplikasikan ke tanah untuk memperbaiki atau memodifikasi kondisi tanah. Amendemen tanah (*soil ammendment*) umumnya diartikan sebagai bahan yang ditambahkan ke dalam tanah agar kondisinya sebagai media tumbuh tanaman tersebut menjadi lebih baik. Jadi, ketiga istilah tersebut pada prinsipnya mempunyai makna yang sama, hanya berbeda pada penekanan tujuan penggunaan bahan tersebut. Bahan amelioran atau kondisioner digunakan untuk memperbaiki atau menormalkan kondisi tanah yang bermasalah (tidak produktif), terutama karena sifat fisiknya, menjadi tanah yang produktif. Bahan amendemen digunakan hanya sebagai tambahan yang dapat berdampak pada peningkatan atau mempertahankan kualitas (keberkelanjutan) tanah tersebut. Dalam buku ini dibahas tentang bahan amelioran, yaitu bahan yang digunakan untuk memperbaiki atau menormalkan kondisi tanah yang bermasalah, yaitu tanah yang tidak dapat berfungsi optimal sebagai

media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi tanaman yang tumbuh pada tanah itu.

Banyak jenis bahan amelioran yang dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas tanah sesuai dengan kasus spesifik yang berkaitan dengan kondisi tanah pertanian setempat. Kondisi tanah yang tidak/kurang optimal dapat dipilah menjadi 3 kelompok, yaitu tanah masam, garaman, terkontaminasi/tercemar logam berat dan senyawa beracun. Sebagai salah satu bentuk penerapan agrogeologi adalah untuk mengatasi kondisi tanah bermasalah tersebut menggunakan bahan geologis (batuan) sebagai amelioran.

1. Ameliorasi Tanah Masam

Banyak lahan pertanian yang kondisi tanahnya masam ($\text{pH} < 5,5$), dan kondisi itu menimbulkan masalah ketersediaan unsur hara bagi tanaman pada tanah tersebut. Pada tanah masam, ketersediaan unsur Al dan mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu) dalam tanah sangat tinggi hingga dapat bersifat toksik bagi beragam jenis tanaman dan organisme tanah, sedangkan ketersediaan unsur hara makronya (misalnya Ca dan Mg) sangat rendah hingga kahat. Sebaliknya, pada tanah basa ($\text{pH} > 7,5$), ketersediaan unsur mikro (kecuali Mo) rendah (kahat), sedangkan ketersediaan unsur hara makro relatif tinggi. Sebagian besar jenis tanaman pangan maupun perkebunan menghendaki pH tanah ideal sekitar netral (6 – 7).

Pengapuran umumnya dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan pH tanah masam. Tetapi karena tanah masam umumnya juga miskin unsur hara Ca atau/dan Mg, pengapuran juga dapat dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan tanaman akan unsur Ca atau/dan Mg. Tanaman kacang (*legume*) memerlukan Ca dalam jumlah relatif tinggi dan responnya terhadap pengapuran lebih nyata dibanding jenis tanaman lain (*non-legume*). Dalam hal ini, disebabkan oleh dampak dari peningkatan pH dan ketersediaan Ca^{2+} bagi tanaman akibat pengapuran, kebutuhan optimal tanaman legum akan unsur hara esensial dapat terpenuhi secara optimal.

Khusus yang berkaitan dengan penggunaan bubuk batuan fosfat dan batuan silikat, umumnya bertujuan untuk pemupukan, meningkatkan ketersediaan unsur hara. Penggunaan bubuk batuan fosfat bertujuan untuk meningkatkan kadar unsur hara P di dalam tanah yang tersedia bagi tanaman; sedangkan penggunaan bubuk batuan silikat bertujuan untuk meningkatkan kadar unsur Si, K, Ca, dan Mg serta unsur mikro. Tetapi, aplikasi kedua jenis batuan itu ternyata juga mempunyai efek pengapuran (*liming effects*) yang cukup berarti, tetapi mekanisme reaksi yang agak berbeda dengan reaksi pada penggunaan bahan kapur (lihat Tabel 19).

Reaksi pelarutan unsur hara dari bubuk batuan fosfat maupun batuan silikat tersebut memerlukan ion H^+ , seperti telah dijelaskan pada Gambar 11.

Tabel 19. Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan untuk pengapuran (Rehm et al., 2002).

No	Bahan Kapur dan Reaksinya	Bobot Molekul (g mol ⁻¹)	KNR (%)	EK
1	CaCO ₃ (kalsit murni) CaCO ₃ + 2H ⁺ ⇌ Ca ⁺² + H ₂ O + CO ₂	100	100	1,0
2	Batuan kalsitik	-	75 - 100	1,3 - 1,0
3	CaO (kalsium oksida) CaO + 2H ⁺ ⇌ Ca ⁺² + H ₂ O	56	160 - 175	0,7 - 0,6
4	Ca(OH) ₂ (kalsium hidroksida/aragonit) Ca(OH) ₂ + 2H ⁺ ⇌ Ca ⁺² + 2H ₂ O	74	120 - 136	0,8 - 0,7
5	CaMg(CO ₃) ₂ (dolomit) CaMg(CO ₃) ₂ + 4H ⁺ ⇌ Ca ⁺² + Mg ⁺² + 2H ₂ O + 2CO ₂	184	75 - 108	1,3 - 0,9

Terjadinya sinergi dua mekanisme reaksi, yaitu pelarutan unsur hara dan peningkatan pH (mengonsumsi H⁺), menjelaskan bahwa bubuk batuan fosfat maupun silikat akan lebih efektif jika diaplikasi pada tanah masam atau/dan miskin hara dibandingkan jika diaplikasikan pada tanah yang bereaksi netral atau tanah yang subur - mengandung unsur hara esensial yang cukup dan berimbang (Priyono, 2005b). Ion OH⁻ yang dihasilkan dari reaksi tersebut menetralkan H⁺ dalam larutan tanah maupun pada tapak jerapan koloid tanah membentuk H₂O. Adanya tambahan Ca²⁺ yang terlarut dalam tanah dari CaCO₃ dapat menggantikan posisi H⁺ yang terjerap pada permukaan koloid tanah, sehingga dapat mempercepat proses netralisasi H⁺ dalam tanah tersebut.

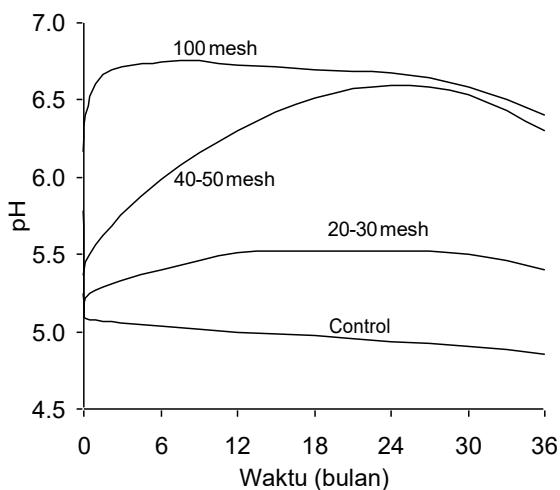
Bahan untuk pengapuran (*liming materials*) yang sering digunakan dalam praktek pertanian hingga saat ini adalah CaCO_3 , CaO , CaOH , dan $(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$. Batuan lain yang juga direkomendasikan para peneliti sebagai bahan pengapuran yang cukup efektif adalah bubuk batuan fosfat (Lim et al., 2003) dan bubuk batuan silikat (Coventry et al., 2002; Gillman et al., 2002; Priyono, 2005a).

Efektivitas bahan kapur untuk meningkatkan pH tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama oleh jenis batuan dan ukuran (kehalusan) partikelnya. Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan pengapuran yang dipengaruhi oleh jenis bahan kapur (Tabel 19).

Batuan CaCO_3 umumnya digunakan sebagai standar untuk menghitung ekivalensi jumlah kebutuhan atau kapasitas netralisasi bahan kapur lainnya. Kapasitas netralisasi kapur diukur dengan metode titrasi asam - basa. Jumlah asam yang dibutuhkan untuk menetralkan tanah per satuan berat masing-masing bahan kapur tersebut digunakan untuk menghitung nilai kapasitas netralisasi relatif (KNR). Nilai KNR bahan kapur X = [(jumlah asam untuk menetralkan 1g bahan X)/(jumlah asam untuk menetralkan 1g CaCO_3)] x 100 (%). Nilai efektivitas kapur (EK) bahan X = [bobot molekul bahan X/bobot molekul CaCO_3]/[KNR bahan X].

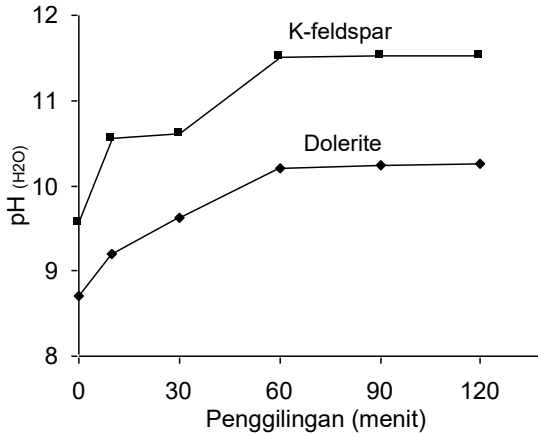
Faktor lain yang sangat mempengaruhi laju pelarutan dan efektivitas bahan pengapuran adalah

ukuran partikelnya. Contoh hasil penelitian berkaitan dengan pengaruh ukuran partikel terhadap efektivitas bahan pengapuran disajikan pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14. Pengaruh ukuran partikel bahan kapur terhadap perubahan pH tanah (digambar ulang dari Rehm et al., 2002).

Tampak pada Gambar 14 dan 15 bahwa makin halus ukuran partikel bahan pengapuran, makin tinggi laju pelarutannya. Pengaruh ukuran partikel itu tampak nyata terutama pada periode waktu awal inkubasi (nilai E_0), dan makin lama laju pelarutannya menjadi makin rendah hingga mencapai keseimbangan (mendekati nol). Pola laju pelarutan tersebut mirip dengan pelarutan mineral dan batuan yang dibahas di Bab 4.



Gambar 15. Pengaruh intensitas (waktu) penggilingan (dengan *ball mill*) terhadap pH bubuk batuan silikat (dolerite dan K-feldspar) (Priyono, 2005a)

Pada Gambar 14 tampak bahwa peningkatan pH tanah tertinggi dicapai pada aplikasi batuan kapur yang paling halus dengan periode inkubasi terpendek (dua minggu). Demikian pula pada Gambar 15, penggilingan batuan silikat memperhalus ukuran partikel batuan dan meningkatkan pH bubuk batuan tersebut, sehingga meningkatkan potensi bubuk batuan silikat itu sebagai penetral kemasaman tanah (bahan pengapuran). Jadi, makin halus bahan kapur, makin tinggi reaktivitas dan efektivitasnya dalam meningkatkan pH tanah.

Selain karakteristik bahan kapur, beberapa sifat tanah yang diberi kapur juga mempengaruhi efektivitas pengapuran, antara lain pH, tekstur, dan kadar bahan organik. Kurva hubungan antara peningkatan pH tanah vs dosis pengapuran umumnya tidak linier, tetapi membentuk garis lengkung (*sigmoid*), makin

tinggi dosis pengapuran maka sudut arah kurva makin mengecil mendekati nilai nol. Artinya, makin tinggi dosis kapur yang diaplikasikan, makin rendah efektivitas peningkatan pH per satuan berat bahan pengapuran yang ditambahkan. Hal itu juga berarti bahwa untuk meningkatkan satu unit pH tanah, misalnya dari 5 ke 6, dibutuhkan jumlah kapur yang lebih banyak daripada untuk meningkatkan pH dari 4,5 menjadi 5,5. Karakteristik tersebut berkaitan dengan kapasitas penyangga (*buffering capacity*) tanah itu. Makin tinggi kadar liat (*clay*) atau/dan koloid organik, makin tinggi kapasitas penyangga tanah tersebut, sehingga makin banyak pula jumlah kapur yang diperlukan untuk dapat menaikkan per satu unit pH.

2. Ameliorasi Tanah Garaman

Tanah garaman adalah tanah yang mengandung garam terlarut berlebihan sehingga berpengaruh negatif signifikan terhadap pertumbuhan tanaman secara umum. Pengaruh utama dari kadar garam yang tinggi adalah membatasi akar tanaman untuk dapat menyerap air tanah meskipun dalam kondisi basah. Air tanah mengalir dari bagian bertekanan potensial osmotik tinggi (kadar garam rendah) ke bagian yang tekanan osmotiknya lebih rendah (kadar garam tinggi). Potensial osmotik larutan tanah rendah karena konsentrasi garam yang lebih tinggi daripada di dalam sel tanaman. Kondisi itu akan menghalangi akar tanaman untuk mengambil air dari tanah, sehingga terjadi

gejala kekeringan meskipun banyak air tersedia di zona perakaran. Pengaruh dari kondisi seperti itu disebut 'efek osmotik'.

Jenis senyawa garam pada tanah garaman didominasi oleh natrium klorida (NaCl), kalsium dan magnesium karbonat (CaCO_3 dan MgCO_3). Berdasarkan dominasi jenis garam tersebut, tanah garaman dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu tanah salin, sodik, dan salin - sodik. Penciri khusus dari masing-masing jenis tanah garaman itu diringkas pada Tabel 20.

Tabel 20. Karakteristik tanah garaman

Klasifikasi	DHL (mmhos/cm)	Soil pH	Na Tertukarkan (%)	Sodium Adsorption Ratio (SAR)	Kondisi Sifat Fisik
Salin	> 4.0	< 8.5	< 15	< 13	Normal
Sodik	< 4.0	> 8.5	> 15	> 13	Jelek
Salin-Sodik	> 4.0	< 8.5	> 15	> 13	Normal

Tanah salin mengandung sodium (Na^+) tinggi dan pada kompleks jerapannya masih cukup banyak Ca tertukarkan, sehingga nilai SAR relatif rendah (< 13 %). Proses akumulasi garam itu disebut salinisasi. Tanah salin umumnya mengandung sodium klorida (NaCl), sodium sulfat (Na_2SO_4), sodium bikarbonat (Na_2CO_3), dan terkadang sodium nitrat (NaNO_3). Adanya akumulasi garam NaCl dan Na_2SO_4 menyebabkan tanahnya berwarna putih keruh; tetapi jika NaNO_3 cukup banyak, maka warna tanah menjadi kecoklatan. Persentase Na tertukarkan (ESP) rendah (< 15 % relative terhadap KTK) dan daya hantar listrik (DHL) larutan tanah ≥ 4 mmhos/cm, pH tanah

umumnya kurang dari 8,5 (bervariasi antara 7,5 sampai 8,5). Total kadar garam > 0,1 % dan kadar garam tersebut cukup mengganggu pertumbuhan berbagai spesies tanaman. Karena tanah salin mengandung cukup banyak Ca, partikel tanah tetap terflokulasi (membentuk agregat), sehingga aerasinya tanah tersebut tetap baik. Permukaan tanah salin umumnya dipenuhi dengan garam (tampak butiran putih). Terutama pada musim kering, dimana air tanah yang mengandung garam bergerak ke permukaan tanah dan garam terlarut diendapkan di permukaan tanah, tampak warna putih itu.

Tanah sodik dicirikan dengan kompleks patikel koloidalnya yang dijenuhi oleh Na (> 15 % terhadap nilai KTK), mengandung banyak garam Na_2CO_3 tetapi sedikit garam terlarut lainnya, sehingga tanah ini sangat alkalin (pH 8,5 - 10). Daya hantar listrik umumnya < 4 mmhos/cm. Dari sifat fisiknya, terjadi dispersi partikel koloidalnya dan patikel terdispersi itu mengisi (menyumbat) pori-pori tanah sehingga permeabilitas air dan udara (aerasi) sangat jelek dan laju infiltrasinya rendah. Kadar Na karbonat pada tanah sodik tinggi dan toksik terhadap akar tanaman, kondisi fisiknya jelek, dan pH-nya sangat tinggi (> 8,5).

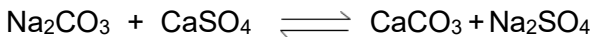
Tanah salin - sodik mempunyai ciri antara (transisi atau gabungan) dari tanah salin dan sodik tersebut. Jika garam Na tidak terlindih (tercuci), maka akan tetap pada tanah itu, sehingga kompleks jerapannya dijenuhi Na (Na-liat) dan banyak garam lain di

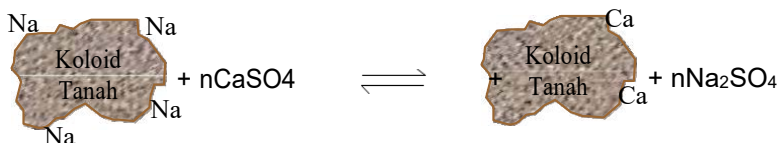
dalam larutan tanah. Pada tanah tersebut terjadi proses salinisasi dan alkalinisasi. Karena adanya garam Na menghalangi terjadinya dispersi Na-liat.

Berdasarkan sifat dan ciri tanah garaman yang menimbulkan gangguan terhadap pertumbuhan tanaman, atau terganggunya fungsi tanah sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara tanaman, maka untuk mengatasinya diperlukan teknologi reklamasi (pemulihan) atau remediasi (penyembuhan) tanah. Bahan amelioran digunakan untuk mengurangi aktivitas Na pada tanah tersebut, sekaligus menurunkan pH tanah garaman. Peran bahan amelioran menurunkan aktivitas Na pada tanah garaman dijelaskan sbb:

a. Menggunakan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Jika tanah garaman itu tidak banyak mengandung Ca karbonat, maka gipsum umumnya efektif digunakan untuk menormalkan tanah garaman tersebut. Karena aplikasi gipsum, Na^+ yang jenuh pada permukaan koloid tanah didesak (tertukarkan) oleh Ca^{+2} (dari gipsum) dan Na^+ membentuk garam mudah larut (Na_2SO_4). Demikian juga dengan NaCO_3 di luar kompleks jerapan, bereaksi dengan CaSO_4 membentuk garam CaCO_3 dan Na_2SO_4 . Kemudian, garam Na_2SO_4 yang mudah larut dalam air itu dikeluarkan melalui saluran drainase.





b. Menggunakan pupuk dan senyawa masam.

Untuk menetralsir atau mengurangi alkalinitas pada tanah garaman dapat diaplikasikan pupuk masam (NH₄)₂SO₄, asam sulfat atau sulfur elementer, dan pirit (FeS₂). Ion Na⁺ pada kompleks jerapan koloid tanah dilepaskan (digantikan posisinya oleh NH₄⁺ maupun H⁺), kemudian bereaksi dengan sulfat menghasilkan Na₂SO₄ yang mudah terlarut dan tercuci melalui saluran drainase. Contoh kuantitas relatif dari bahan amelioran tanah garaman dapat dilihat pada Tabel 21.

- 1) 2Na-koloid + (NH₄)₂SO₄ ⇒ 2NH₄-koloid + Na₂SO₄.
- 2) S + 4H₂O ⇒ 8H⁺ + SO₄⁻²

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{-2} = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \begin{array}{l} \text{CO}_2(\text{g}) \\ \text{H}_2\text{O} \end{array}$$
 2Na-koloid + 2H⁺ + SO₄⁻² ⇒ 2H-koloid + Na₂SO₄.
- 3) FeS₂ + 2 H₂O + 7 O₂ ⇒ 2 FeSO₄ + 2 H₂SO₄
 2Na-koloid + Fe²⁺ + SO₄⁻² ⇒ Fe-koloid + Na₂SO₄.

c. Menggunakan bahan organik.

Penggunaan bahan organik sebagai amelioran tanah garaman pada prinsipnya adalah untuk menurunkan pH tanah garaman. Dekomposisi bahan organik menghasilkan beragam asam organik, dan asam organik tersebut berperan langsung menurunkan pH tanah garaman. Selain itu, bahan organik juga

Tabel 21. Kuantitas relatif bahan amendemen yang diperlukan sebagai penetral tanah garaman

Amandemen	Kuantitas Relatif *
Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	1,00
Kalsium klorida ($\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$)	0,85
Asam sulfat (H_2SO_4)	0,57
Besi sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)	1,62
Aluminium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$)	1,29
Sulfur elementer (S)	0,19
Pyrite (FeS_2) - 30% sulfur	0,63
Kalsium polysulfat (CaS_5) - 24% sulfur	0,77

* Penggunaan 1 kg gypsum hasilnya setara dengan penggunaan 0,85 kg kalsium klorida, atau 1,29 kg aluminium sulfat.

menyumbangkan beragam jenis unsur hara yang secara tidak langsung menurunkan dominasi aktivitas Na pada tanah garaman; koloid organik dari hasil perombakan bahan organik juga memperbaiki sistem aerasi (memacu proses granulasi partikel tanah) dan daya jerap partikel tanah terhadap air. Pengaruh pemberian bahan organik terhadap sifat tanah garaman merupakan pengaruh gabungan dari berbagai komponen bahan organik melalui beberapa kemungkinan mekanisme tersebut.

d. Menggunakan bubuk batuan silikat

Penggunaan bubuk batuan silikat sebagai bahan amelioran untuk tanah garaman belum banyak diteliti. Hasil penelitian Sumarlin (2008) di rumah kaca menunjukkan bahwa pemberian bubuk batuan basaltik dari Gunung Tambora dengan dosis setara 30 – 50

t/ha dapat memperbaiki tanah garaman yang semula tidak dapat ditanami jagung (tidak tumbuh) menjadi subur - tanaman jagung dapat tumbuh normal.

Mekanisme yang menyertai pemulihan kondisi tanah garaman tersebut diperkirakan akibat dari penyeimbangan unsur hara tersedia bagi tanaman oleh beragam unsur hara (kation dan anion) yang terlarut dari bubuk batuan basaltik tersebut. Dengan tambahan unsur hara yang terlarut dari bubuk batuan tersebut, kation Na^+ menjadi tidak dominan (nilai ESP menurun drastis). Masih banyak penelitian yang harus dilakukan untuk mengetahui efektivitas bubuk batuan sebagai bahan amelioran, khususnya untuk meremediasi tanah garaman dan pengapuran tanah masam.

3. Ameliorasi Tanah Tercemar

Tanah di sekitar daerah pertambangan logam dan areal kegiatan berbagai jenis industri umumnya sangat mungkin tercemar oleh limbah dari kegiatan tersebut. Mengatasi masalah lingkungan (termasuk aspek tanah) yang tercemar oleh limbah kegiatan industri tersebut umumnya relatif mahal. Oleh karena itu, upaya pencegahan terjadinya pencemaran tersebut lebih diutamakan dan wajib dilakukan oleh pihak perusahaan melalui pengelolaan limbah industri yang tepat.

Teknik ameliorasi tanah yang tercemar oleh limbah dari kegiatan industri sangat tergantung pada sifat bahan pencemarnya. Beberapa dasar pemikiran

yang dapat digunakan sebagai panduan penentuan teknik remediasi tanah (untuk kegunaan usaha tani) yang harus diterapkan dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Unsur hara

Banyak unsur hara esensial yang dianggap sebagai pencemar tanah, misalnya S, Fe, Zn, dan Cu. Unsur hara tersebut dapat merugikan (bersifat toksik) bagi tanaman dan organisme tanah jika konsentrasinya di zona perakaran terlalu tinggi. Mengacu pada mekanisme itu, maka upaya yang harus dilakukan adalah menurunkan aktivitas ion tersebut melalui proses pengendapan, penjerapan, atau/dan pencucian. Alternatif lainnya adalah dengan memanfaatkan limbah yang mengandung unsur hara esensial tersebut sebagai pupuk atau salah satu bahan pupuk multi nutrisi. Tentu saja diperlukan bahan campuran lain yang fungsinya adalah untuk menyeimbangkan komposisi unsur hara dalam pupuk itu sehingga cocok digunakan untuk pupuk.

b. Limbah masam

Limbah dari pertambangan logam umumnya bersifat masam, atau berpotensi mengubah tanah di sekitarnya menjadi masam. Bijih logam, misalnya emas (Au) dan tembaga (Cu), umumnya ditambang dari kedalaman puluhan hingga ratusan meter. Limbah *tailing* umumnya mengandung logam lain (Zn, Pb, Cd, dan Hg) dan sulfur (garam sulfida) yang jika teroksidasi (terbuka ke atmosfer) dan terkena air hujan akan

menghasilkan asam sulfat yang sangat masam. Selanjutnya, larutan yang masam tersebut yang dapat menyebabkan pemasaman tanah. Dalam kondisi masam, unsur logam yang terkandung dalam *tailing* menjadi terlarut dan konsentrasinya bersifat toksik bagi tanaman. Upaya yang umumnya dilakukan adalah mencegah terjadinya oksidasi bahan yang mengandung sulfida tersebut dengan menimbunnya ke dalam tanah, atau menetralkan larutan masam dengan bahan pengapuran (*liming materials*).

c. Senyawa beracun

Limbah dari beragam jenis industri, misalnya industri kimia dan tekstil, umumnya mengandung senyawa beracun, baik organik maupun anorganik. Pada prinsipnya, bahan tersebut dapat bersifat racun bagi organisme karena bahan itu reaktif. Limbah tersebut dapat berbentuk padat, bubuk/butiran halus, gas, maupun cair.

Berdasarkan penyebab sifat toksik dari limbah itu, strategi utama yang harus diterapkan untuk mengatasinya adalah dengan menetralkan senyawa reaktif pada limbah itu. Secara teknis, senyawa toksik itu dinetralkan dengan cara diendapkan atau dijerap menjadi senyawa kompleks yang stabil (non-reaktif), kemudian disaring (dipisahkan) dari bagian limbah yang bersifat non-toksik.

Belum ada satu teknologi multi guna yang dapat diterapkan untuk mengatasi segala jenis limbah yang sangat beragam toksisitasnya. Beberapa prinsip reaksi

kimia yang dapat diterapkan sebagai bahan pertimbangan dalam mendesain teknologi pengolahan limbah tersebut adalah (a) reaksi asam – basa, (b) oksidasi – reduksi, (c) pengendapan (pembentukan senyawa kompleks yang stabil). Salah satu atau gabungan dari beberapa prinsip reaksi itu dapat diterapkan untuk mengatasi senyawa toksik secara terpisah atau/dan bertahap.

Seperti telah diuraikan di atas, residu asam keras (HCl atau H_2SO_4) yang digunakan dalam proses suatu industri, jika tidak dikelola dengan baik, maka akan menyebabkan kemasaman yang tinggi terhadap tanah dan badan air di sekitarnya. Limbah tersebut harus dinetralsir dengan larutan basa atau bahan pengapuran sebelum dibuang. Limbah pertambangan logam (*tailing*) umumnya mengandung senyawa sulfida, dan jika terekspos (kontak dengan atmosfer) akan teroksidasi menghasilkan asam sulfat. Agar oksidasi itu tidak terjadi, maka limbah tersebut harus ditimbun (berada pada kondisi reduktif) supaya tetap stabil dalam bentuk senyawa sulfida. Alternatifnya, asam sulfat pada limbah itu dinetralsir dengan bahan kapur dosis tinggi. Selain untuk meningkatkan pH juga untuk mengendapkan logam berat.

BAB 7

PUPUK BERBASIS BATUAN SILIKAT

Pupuk batuan silikat (PBS) merupakan suatu jenis pupuk yang relatif baru dikembangkan, dibuat dari bahan geologis berupa batuan silikat (volkanik). Pemanfaatan bahan geologis dalam bidang pertanian tersebut terinspirasi dari fakta bahwa tanah mineral, yaitu jenis tanah yang tersebar luas di permukaan bumi, berfungsi antara lain sebagai media tumbuh dan pemasok sebagian besar kebutuhan unsur hara berbagai jenis tanaman, terbentuk dari batuan. Batuan induk tanah tersebut tidak hanya berkontribusi terhadap pembentukan wujud fisik tanah, tetapi juga menyediakan unsur hara bagi tanaman dari hasil pelapukan batuan induk tersebut menjadi tanah.

Seperti telah diuraikan pada Bab 5, proses pembentukan tanah itu sangat kompleks dan lama (puluhan - ratusan tahun). Dengan kata lain, perubahan status unsur hara dari tak tersedia (dalam bentuk batuan) menjadi tersedia bagi tanaman (dalam bentuk tanah) secara alami sangat lama dan kompleks. Oleh karena itu, upaya pengembangan teknologi proses

pembuatan PBS harus diarahkan pada percepatan pelarutan unsur hara dari batuan tersebut.

Selain keunikannya sebagai pupuk berbasis silikat, PBS juga berpotensi untuk dapat digunakan sebagai bahan berguna lainnya (multi fungsi) yang belum diobservasi secara luas. Bahkan baru pada dua dekade terakhir, perhatian para peneliti terhadap kemungkinan pemanfaatan batuan vulkanik sebagai pupuk multi nutrisi baru kelihatan meningkat. Oleh karena itu, kegunaan PBS dan teknologi proses yang tepat akan terus dikembangkan.

A. Pupuk Batuan Silikat (PBS)

Seperti telah dibahas pada Bab 3, batuan silikat merupakan bahan alami yang keberadaannya di permukaan bumi. Indonesia yang merupakan negara kepulauan, hampir di semua pulaunya terdapat gunung api yang masih aktif dan secara periodik memuntahkan material vulkanik baru. Material tersebut mengandung silikat (Si) dan hampir semua unsur hara esensial kecuali N, sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai pupuk multi nutrisi yang lengkap.

Berkaitan dengan upaya mengatasi permasalahan teknis dalam bidang pertanian saat ini, banyak para ahli dari berbagai negara merekomendasikan pemanfaatan batuan silikat sebagai pupuk pelepas hara lambat multi nutrisi (*slow-release multinutrient fertilizer*) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Rekomendasi itu antara lain diajukan oleh Coroneos et al. (1996), Hinsinger et al. (1996), dan Coventry et al. (2001) dari Australia; Leonardos et al. (1987) dari Brazil; dan Bakken et al. (1997, 2001) dari Eropa. Namun, anjuran itu hingga sekarang belum banyak diterapkan di tingkat hamparan, karena masih adanya beberapa kelemahan dari PBS, terutama jika pupuk itu diaplikasikan dalam bentuk bubuk (*powder*) atau butiran (*granule*).

Batuan silikat tersusun dari beragam jenis mineral silikat yang mengandung berbagai macam unsur hara esensial (kecuali N). Kadar dan jenis unsur hara esensial pada batuan tersebut sangat beragam sesuai dengan keragaman jenis mineral penyusun batuan silikat tersebut; dan kadarnya unsur hara esensialnya relatif rendah dibanding kadar unsur hara fungsional Si (40 - 60 % Si). Sebagian besar unsur hara pada partikel batuan itu berada di dalam dan di antara unit dasar struktur kristal mineral penyusun batuan. Unsur hara itu relatif sulit terlarut, terutama unsur yang menjadi komponen utama struktur dasar mineral, sehingga ketersediaan unsur hara dari PBS bagi tanaman sangat rendah. Oleh karena itu, untuk dapat memasok kebutuhan optimal unsur hara tanaman, dosis penggunaan PBS harus tinggi (puluhan ton PBS per hektar). Selain itu, beberapa penelitian pengujian efektivitas PBS dosis tinggi menunjukkan hasil yang saling bertentangan. Namun hal itu sebenarnya lebih disebabkan oleh penggunaan jenis dan ukuran partikel batuan yang diuji sebagai pupuk, sifat tanah

(media tumbuh) yang digunakan, serta jenis tanaman indikator yang berbeda-beda resposivitasnya terhadap pemberian PBS.

Ringkasnya, teknologi PBS perlu terus dikembangkan untuk mengatasi kelemahannya, terutama dosis penggunaannya yang sangat tinggi sehingga sulit diterapkan oleh petani. Selain itu, potensi kegunaan PBS tersebut diperkirakan cukup beragam, sehingga multi fungsi dari bubuk batuan tersebut perlu dikaji lebih jauh.

Menyadari adanya beberapa kelemahan PBS seperti dijelaskan di atas, para peneliti terus berusaha untuk meningkatkan efektivitas agronomis maupun ekonomis dari penggunaan PBS. Secara teknis, upaya itu lebih banyak difokuskan pada peningkatan ketersediaan (kelarutan) unsur hara dari PBS sehingga dapat diserap oleh tanaman. Keberhasilan upaya tersebut akan menjadikan PBS sebagai jenis pupuk yang efektif dan efisien, sehingga upaya itu dapat berkontribusi signifikan terhadap pengembangan pertanian yang produktif, menguntungkan, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

B. Perkembangan Teknologi PBS

Pada dua dekade terakhir, perhatian berbagai pihak terhadap perlunya optimalisasi pemanfaatan bahan alami secara langsung sebagai *input* usaha tani makin meningkat. Bahan alami tersebut antara lain adalah batuan silikat yang dapat dimanfaatkan

sebagai sumber unsur hara tanaman (pupuk) dan pembenah (*ameliorant*), atau untuk bahan peremajaan tanah (*soil-rejuvenating agent*) yang telah berkembang terlalu lanjut atau terdegradasi intensif. Selain karena bahan tersebut melimpah, penggunaan batuan sebagai pupuk dijamin ramah lingkungan, memenuhi salah satu persyaratan pertanian berkelanjutan.

Khusus tentang PBS, teknologi pembuatannya telah cukup lama dikembangkan. Perkembangan teknologi itu dapat dibagi menjadi tiga tahap berdasarkan bentuk dan sifat dari produk pupuk yang dihasilkan. Pupuk batuan silikat (PBS) diaplikasikan dalam bentuk partikel yang relatif kasar (berukuran milli - mikro meter). Batuan tersebut diproses dengan metode penggilingan biasa (menggunakan *stone crusher*) untuk memperkecil ukuran partikel batuan, tanpa terjadi kerusakan unit dasar struktur mineral penyusun batuan tersebut. Tahap perkembangan berikutnya adalah produksi PBS berbentuk bubuk berukuran nano meter (*PBS nano particles*). Batuan diproses menggunakan teknologi nano (penggilingan berenergi tinggi). Dengan teknologi nano tersebut dihasilkan *PBS nano particles* yang lebih efektif dibanding yang diproses melalui penggilingan biasa (*stone crusher*). Meskipun demikian, dosis yang diperlukan masih relatif tinggi (1 - 2 t/ha). Perkembangan produksi terbaru adalah PBS cair atau suspensi, dimana partikel batuan berukuran nano meter itu diproses lebih lanjut menjadi cair melalui pemanasan bersuhu tinggi atau unsur haranya diekstrak dari partikel batuan.

1. PBS Bubuk

Menurut Chesworth et al. (1983), pemanfaatan partikel batuan sebagai pupuk pertama kali direkomendasikan oleh Mexoux sekitar 1853/54 melalui tulisannya yang berjudul '*Bread from Stone*'. Kemudian, rekomendasi itu diterapkan oleh de Vilier (1961) dengan memanfaatkan limbah dari industri pemecah batuan (*quarry by product*), partikel batuan berukuran pasir halus ($\emptyset < 2$ mm). Bubuk batuan itu dimanfaatkan sebagai pupuk pada tanaman tebu dengan dosis sekitar 185 ton/ha. Dosis bubuk batuan tersebut sangat tinggi, tetapi pengaruh positifnya terhadap kuantitas dan kualitas produksi cukup lama (> 5 tahun). Artinya, dengan cara pemupukan tersebut, petani tidak perlu setiap tahun (musim tanam) melakukan pemupukan dengan PBS. Namun, karena dosis pemberian PBS yang sangat tinggi, hasil penelitian tersebut kurang mendapat respon positif dalam bentuk penerapannya *on farm* oleh petani.

Pada periode 1990 – 2002, banyak peneliti merasa optimis tentang efektivitas penggunaan PBS setelah mereka menguji efektivitas dari beragam jenis bubuk mineral atau batuan basaltik, baik pada skala rumah kaca maupun lapang. Misalnya, Leonardos et al. (1987 dan 2000), Coroneos et al. (1996), Hinsinger et al. (1996), Bolland dan Baker (2000), Bakken et al. (1987, 2000), dan Coventry et al. (2001). Namun demikian, ada pula yang merasa pesimis tentang efektivitas penggunaan PBS, antara lain Bolland dan Baker

(2000) yang melakukan penelitian lapang dengan menggunakan PBS dari batuan granit sebagai sumber K. Mereka menyimpulkan bahwa batuan silikat (granit) tidak efektif sebagai sumber unsur hara (pupuk) K. Hasil penelitian yang kontradiktif itu kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan jenis batuan yang digunakan sebagai sumber unsur hara, metode penggilingan batuan, jenis tanaman indikator, dan jenis tanah yang digunakan dalam penelitian. Meskipun demikian, para peneliti tersebut sepakat bahwa faktor pembatas utama dari penggunaan PBS dalam bidang pertanian adalah lambatnya pelarutan unsur hara dari PBS sehingga dosis diperlukan sangat tinggi (> 20 t/ha) (Hinsinger et al., 1996). Oleh karena itu, upaya lebih lanjut yang harus dilakukan adalah menemukan metode yang tepat untuk mempercepat laju pelarutan unsur hara dari PBS ke larutan tanah.

Untuk dapat mempercepat laju pelarutan, logikanya, harus diketahui jenis dan mekanisme kerja dari faktor yang bertanggung jawab terhadap laju pelarutan unsur hara dari PBS. Kemudian, diantara faktor penentu (*determinant*) pada reaksi pelarutan unsur hara tersebut dimodifikasi sedemikian rupa sehingga laju pelarutan unsur hara dari PBS ke larutan tanah dapat dipercepat. Berdasarkan pemikiran itu, selain pengujian langsung pada tanaman untuk mengetahui efektivitas PBS (dalam bentuk bubuk), banyak pakar melakukan penelitian tentang pelarutan unsur hara dari mineral/batuan seperti yang telah dibahas cukup detail pada Bab 4.

Pada Bab 4 telah dijelaskan bahwa kinetika reaksi pelarutan dapat diekspresikan sebagai $E_t = E_o + at^n$, dimana E_t adalah total atau persentase unsur atau ion yang terlarut per satuan waktu t (jam, hari, bulan) terhadap total kandungannya pada partikel batuan yang dilarutkan, E_o adalah persentase unsur atau ion yang dapat terlarut secara spontan ($t \approx 0$), a adalah konstanta yang berkaitan dengan kuantitas permukaan reaktif dari partikel batuan, dan n adalah konstanta eksperimental (order reaksi). Laju pelarutan unsur hara dari partikel batuan adalah $R_t = dE_t/dt = ant^{n-1}$.

Berdasarkan persamaan tersebut di atas, variabel penting yang menentukan proporsi unsur hara terlarut secara keseluruhan (E_t) adalah E_o dan a . Artinya, untuk meningkatkan kuantitas unsur hara cepat terlarutkan, maka nilai E_o dan a harus dimaksimalkan. Proporsi unsur hara yang mudah terlarut dari partikel batuan (E_o) ditingkatkan dengan merusak unit struktur kristal mineral penyusun batuan; atau merubah partikel kristalin menjadi partikel amorfus (non-kristalin). Perusakan struktur kristalin tersebut dapat meningkatkan luas permukaan dan reaktivitas partikel tersebut (lihat nilai a pada Tabel 14). Teknologi praktis yang dapat diterapkan untuk merusak struktur partikel kristalin tersebut antara lain adalah teknologi nano (penggilingan dengan *ball mill*).

Banyak hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pelarutan batuan umumnya sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel batuan (Feigenbaum et al., 1981;

Strömberg dan Banwart, 1999; Priyono, 2005a). Makin halus ukuran partikel, makin luas permukaan efektif, dan makin tinggi reaktivitas partikel batuan itu terhadap media pelarut unsur hara, sehingga makin banyak proporsi partikel itu yang mudah terlarutkan. Artinya, berdasarkan persamaan berpangkat ($E_t = E_o + at^n$), makin halus ukuran partikel PBS, makin tinggi nilai variable a , sehingga makin tinggi nilai E_t . Bukti eksperimental ditunjukkan oleh Gillman et al. (2001, 2002) dan Priyono (2005a) bahwa makin halus ukuran partikel batuan (basalt) yang diaplikasikan pada tanah, makin tinggi laju pelarutan unsur dari batuan dan makin tinggi intensitas pengaruh (reaktivitas) bubuk batuan itu terhadap perubahan sifat tanah (peningkatan pH dan KTK tanah). Bukti tersebut telah menginspirasi para peneliti untuk pengembangan PBS dengan menerapkan prinsip teknologi nano.

2. PBS Partikel Nano

Teknologi nano, yaitu suatu teknologi proses untuk menghasilkan partikel berukuran beberapa nano meter (10^{-9} m). Secara praktis, teknologi nano tersebut diterapkan dengan penggilingan berenergi tinggi atau dengan *ball mill*. Teknologi tersebut banyak diterapkan pada industri keramik untuk menghasilkan partikel mineral yang sangat halus (*nano particles*) dan reaktif. Peneliti di bidang keramik tersebut telah dilakukan antara lain oleh Garcia et al. (1991), Sugiyama et al. (1994), dan Suraj et al. (1997). Dalam bidang pertanian, metode penggilingan intensif tersebut juga

telah diterapkan untuk meningkatkan efektivitas beberapa pupuk mineral silikat (Harley, 2002), fosfat (Lim et al., 2003). Evaluasi lebih lanjut dengan metode penggilingan berenergi tinggi, termasuk penggunaan bahan aditif atau *lubricants* (antara lain alkohol dan air), telah dilakukan oleh Priyono (2005a). Para peneliti itu menunjukkan bahwa metode penggilingan berenergi tinggi yang paling efektif adalah penggilingan dalam kondisi kering, tanpa bahan aditif.

Penggilingan berenergi tinggi dengan *ball mill* terbukti mampu meningkatkan efektivitas PBS secara signifikan. Sebagai ilustrasi, efektivitas agronomis dari penggunaan 20 t/ha PBS yang hanya digiling dengan *stone crusher*, setara dengan penggunaan 1 – 2 t/ha PBS yang digiling dengan *ball mill* (Priyono, 2005a). Namun demikian, kelayakan ekonomis dari penggunaan *ball mill* pada skala industri perlu dikaji lebih jauh. Selain itu, secara praktis dosis 1 – 2 t/ha tersebut dinilai masih terlalu tinggi dan relatif mahal untuk diterapkan oleh petani kecil seperti di Indonesia. Penggunaan bubuk batuan sangat halus dalam skala luas juga dikhawatirkan dapat menimbulkan masalah kesehatan pengguna (petani). Karena alasan tersebut, teknologi produksi PBS dengan *ball mill* itu masih perlu dikembangkan lebih jauh.

Saat ini banyak produk pupuk silikat dalam bentuk bubuk (*powder*) dan granular yang ditawarkan secara *online* oleh produsen pupuk dari berbagai negara. Para produsen tersebut menyatakan bahwa pupuk

tersebut mudah terlarut dalam air. Namun demikian, kelayakan ekonomis untuk usaha tani dari produk tersebut masih perlu dievaluasi karena harganya yang relatif tinggi. Penggunaan *ball mill* tentu memerlukan biaya operasional (energi) yang tinggi, sehingga harga produk (pupuk) juga tinggi. Pengembangan desain dan *setting* mesin *ball mill* mungkin perlu pula dilakukan untuk meningkatkan efisiensinya atau mengurangi biaya produksi.

Detail proses produksi pupuk tersebut tentu mereka rahasiakan (telah dipatenkan) sehingga tidak dapat dijelaskan lebih rinci dalam tulisan ini. Selain menggunakan *ball mill*, diperkirakan bahwa tahapan produksinya meliputi pemanasan partikel batuan hingga 1000 – 1200° C, atau dihancurkan menggunakan asam keras (termasuk senyawa HF), dilanjutkan dengan pengekstrakan unsur hara.

3. PBS Cair

Seperti telah dijelaskan di atas bahwa kelemahan PBS dalam bentuk bubuk (*powder*) maupun granular adalah dosis optimum penggunaannya untuk usaha tani yang terlalu tinggi (> 1 t/ha). Dosis itu tidak mungkin diterapkan pada usaha tani tanaman pangan yang banyak dilakukan oleh petani kecil. Hal tersebut menjadi tantangan bagi para peneliti untuk mengembangkan PBS *nano particles* menjadi pupuk cair; sehingga semua unsur hara dalam pupuk cair tersebut tersedia bagi tanaman. Teknologi PBS cair tersebut

telah dikembangkan dan diproduksi dalam skala industri (Priyono, 2013) dengan merek dagang Orrin.

Berdasarkan petunjuk praktisnya, Orrin dapat diaplikasikan melalui tanah, tetapi lebih efektif dan efisien jika diaplikasikan secara langsung melalui daun (disemprotkan). Khusus untuk tanaman berdaun sempit, aplikasi melalui tanah mungkin akan lebih efektif dibanding melalui daun. Untuk tanaman pohon (berbatang besar), Orrin dapat diaplikasikan melalui sistim *in push* melalui batang tanaman. Salah satu kelebihan dari produk tersebut, selain mengandung Si juga semua jenis unsur hara esensial. Produk tersebut telah teruji efektif di lapang pada berbagai jenis tanaman pangan (padi, jagung, kacang tanah), hortikultura (cabe, tomat, semangka) (Priyono, 2017), maupun perkebunan (Priyono et al., 2020a; Priyono et al., 2020b).

Penggunaan pupuk melalui daun juga mempunyai beberapa kelebihan dibanding melalui tanah. Pada tehnik pemupukan melalui daun, unsur hara langsung terserap tanaman melalui permukaan daun. Pada metode pemupukan melalui tanah, sebelum unsur hara itu dapat diserap oleh tanaman, sebagian unsur hara dari pupuk harus melalui banyak proses (reaksi) karena berinteraksi dengan partikel tanah. Tergantung pada sifat tanahnya, seberapa banyak unsur hara dari pupuk tersebut yang dijerap oleh partikel koloidal. Sebagian yang lain dari unsur hara itu mungkin hilang karena terlindih bersama air

perkolasi, atau tidak dapat diserap tanaman karena bereaksi dengan senyawa lain menjadi senyawa kompleks di dalam tanah.

Pemupukan dengan penyemprotan pada daun atau di *in push* melalui batang tanaman juga dapat menekan pengaruh negatif dari kondisi tanah yang bermasalah keharaan dimana tanah tidak mampu memasok unsur hara tanaman secara optimal. Misalnya, tanah masam, garaman, dan tanah tercemar logam berat atau polutan lainnya. Jadi, pemupukan melalui daun juga dapat dijadikan sebagai alternatif solusi praktis untuk mengatasi tanah pertanian yang bermasalah keharaan tersebut di atas.

C. Multi Fungsi PBS

Selain mempunyai kelemahan sebagai pemasok unsur hara seperti telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, PBS dalam bentuk bubuk juga mempunyai kelebihan karena penggunaannya dapat berpengaruh positif terhadap sifat tanah dan ramah lingkungan. Selain sebagai sumber unsur hara, penggunaan PBS juga dapat berperan sebagai bahan amelio-ran untuk memperbaiki sifat tanah yang bermasalah. Pengaruh amelioratif dari PBS tersebut antara lain meningkatkan pH tanah (PBS sebagai bahan penga-puran) dan daya jerap tanah terhadap kation (KTK) (Gillman *et al.*, 2001, 2002; Priyono, 2005a), mengurangi intensitas pengaruh negatif dari kadar garam tinggi (pada tanah garaman), dan menurunkan emisi gas methan yang dihasilkan pada usaha tani

padi sawah (Ali *et al.*, 2008). Efektivitas dari PBS sebagai amelioran tersebut juga sangat dipengaruhi oleh ukuran dan tingkat amorfisasi (kristalinitas) partikelnya. Makin halus atau makin tinggi amorfisasi partikel PBS, makin tinggi reaktivitas partikel PBS tersebut sehingga makin tinggi pula intensitas pengaruhnya terhadap perubahan sifat tanah tersebut. Jadi, meskipun pengaruh langsung sebagai pemasok unsur hara bagi tanaman (pupuk) kurang efektif, PBS dalam bentuk bubuk dapat difungsikan efektif sebagai bahan pembenah tanah yang bermasalah keharaan, antara lain meningkatkan pH tanah masam, KTK tanah, daya jerap tanah terhadap air, dan menurunkan pengaruh garaman (pada tanah salin/sodik), dan emisi gas metan pada usaha tani padi sawah.

Kemampuan PBS mempengaruhi sifat tanah tersebut berkaitan dengan permukaan efektif (reaktivitas partikel) PBS yang luas yang diakibatkan oleh proses penggilingan (amorfisasi). Partikel PBS amorfus mempunyai muatan elektrik yang tinggi. Makin halus partikel batuan dan makin rendah kristalinitasnya, makin tinggi reaktivitas partikel bubuk batuan tersebut. Karena penggilingan yang intensif, permukaan partikel yang tadinya kurang reaktif menjadi jauh lebih reaktif karena terbentuknya gugus fungsional pada lapisan teluar partikel yang dapat menghasilkan muatan elektrik (negatif maupun positif). Selain itu, pada umumnya PBS dalam bentuk bubuk halus pH-nya tinggi (7,5 – 8,5) (Priyono, 2005a), karena banyak

kation basa terlepas dari unit struktur batuan secara mekanik oleh penggilingan. Oleh karena itu, pemberian PBS dapat meningkatkan pH tanah masam, atau PBS dapat berfungsi sebagai bahan pengapuran (*liming material*). Meningkatnya pH tanah yang diberi PBS juga berakibat meningkatkan muatan negatif pada gugus fungsional partikel koloidal tanah, sehingga kapasitas tukar kation (KTK) dan daya jerap tanah terhadap air meningkat (Priyono, 2005a).

Untuk tujuan jangka panjang, penggunaan PBS dalam bentuk bubuk juga efektif sebagai bahan peremaja tanah (*soil rejuvenating agent*) yang telah terdegradasi atau sangat tua. Misalnya, tanah lateritik (Ultisol dan Oksisol) yang sumber unsur haranya (batuan/mineral primer) sudah hampir habis, tinggal batuan/mineral sisa dari proses pelapukan yang telah berlangsung sangat lama dan intensif. Dalam hal ini, penggunaan PBS dimaksudkan untuk memasok bahan induk baru yang kaya unsur hara esensial. Selain itu, tanah yang sudah tua (Ultisol dan Oksisol) umumnya masam, sehingga pemberian PBS tersebut juga berfungsi sebagai bahan kapur (*liming material*). Contoh hasil positif dari penelitian tentang pemanfaatan batuan silikat sebagai bahan peremaja tanah ditunjukkan oleh Coventry et al. (2001) pada tanah leteritik di Australia dan oleh Priyono et al. (2009) pada tanah bekas tambang batu apung di Lombok Utara – NTB.

Reaktivitas patikel merupakan sifat suatu bahan yang sangat penting. Partikel batuan yang reaktif dapat berfungsi jamak (*multi fuctions*). Bubuk batuan (PBS) berbentuk bubuk (*powder*) berukuran nanometer kemungkinan dapat dimanfaatkan sebagai katalisator, bahan perekat, penjerap kation, anion, atau penetral berbagai senyawa reaktif lainnya. Fungsi PBS tersebut mirip dengan fungsi mineral liat (*clay*) atau zeolit sebagai katalisator pada proses pemurnian minyak bumi, dan sebagai bahan aktif (penjerap kotoran) pada sabun cuci. Potensi kegunaan dari PBS tersebut dalam bidang non pertanian itu masih perlu pembuktian lebih jauh.

Telah terbukti bahwa PBS dapat dimanfaatkan untuk menjerap beragam gas beracun, gas yang labil atau reaktif, misalnya NH_3 , H_2S , dan CO_2 . Meskipun belum dikaji secara detail, pengalaman lapang menunjukkan bahwa PBS sangat efektif dan efisien untuk digunakan sebagai penyaring biogas yang baru keluar dari unit digester (Priyono, 2016). Sebelum disaring, biogas tersebut berbau menyengat dan tidak sedap karena selain mengandung bahan bakar berupa gas metan (CH_4), juga gas NH_3 , H_2S , dan CO_2 yang dapat bersifat racun bagi manusia dan hewan. Penyaringan biogas dengan PBS ini dinilai lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan beberapa metode lain yang telah dikembangkan oleh para pakar biogas. Misalnya, pencucian biogas dengan air bertekanan tinggi, menggunakan berbagai bahan kimia oksida, dan mineral zeolit.

Kemungkinan kegunaan PBS yang lebih luas perlu diobservasi, terutama yang berkaitan dengan kandungan unsur Si. Unsur Si, selain fungsinya yang sangat penting bagi tanaman, telah diketahui juga sangat penting dalam bidang kesehatan, antara lain sebagai penyusun dan penguat jaringan otot, tulang, dan kulit (Price et al., 2013; Farooq & Dietz, 2015). Implikasinya, masalah kesehatan masyarakat (manusia) mungkin dapat diatasi melalui pendekatan prinsip agrogeologi, terutama untuk penundaan proses penuaan (*aging*), yaitu menggunakan material geologi yang banyak mengandung Si dan unsur hara (unsur mineral) sebagai pupuk tanaman pangan yang hasilnya dikonsumsi oleh manusia dan hewan ternak. Kualitas pangan yang baik (dilihat dari segi kandungan Si dan mineral) akan berpengaruh positif pada kesehatan (daya tahan) tubuh manusia dan hewan-konsumen bahan pangan tersebut.

BAB 8

AGROGEOLOGI & PERTANIAN BERKELANJUTAN

Munculnya cabang ilmu agrogeologi merupakan satu tahapan signifikan dari perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi bidang pertanian. Seperti telah dibahas pada Bab 1, konsep agrogeologi adalah pendekatan antar disiplin ilmu untuk mempelajari bahan geologis (mineral dan batuan), kaitannya dengan pemanfaatan bahan alami tersebut dalam pengelolaan agroekosistem pertanian (van Strateen (2002)). Tujuan pengembangan dan penerapan konsep agrogeologi adalah untuk berkontribusi dalam mewujudkan usaha tani yang berkelanjutan. Dari penjelasan tersebut dapat difahami bahwa konsep agrogeologi pada prinsipnya merupakan bagian implementasi konsep besar pertanian berkelanjutan yang secara khusus difokuskan pada pemanfaatan bahan geologis sebagai masukan (*input*) utama usaha tani. Pertanyaannya adalah, apa kontribusi nyata dan prospek ke depan dari agrogeologi dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan?

Pengembangan agrogeologi merupakan salah satu upaya praktis untuk mewujudkan suatu sistem

pertanian berkelanjutan. Bahan alami, khususnya batuan silikat, ketersediaannya melimpah di berbagai belahan bumi dan mengandung semua unsur hara esensial (kecuali N) bagi tanaman, dan dapat berfungsi sebagai amelioran untuk tanah bermasalah keharaan. Oleh karena itu, penggunaan praktis bahan geologis yang tepat akan menjamin terbentuknya pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Untuk menyamakan persepsi dan pemahaman, dalam bab ini dibahas konsep dasar pertanian berkelanjutan dan beberapa contoh bentuk usaha tani yang dianggap ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain usaha tani tradisional yang diterapkan oleh nenek - moyang kita, bentuk/model usaha tani yang akan dibahas tersebut adalah 'pertanian organik' dan 'model usaha tani sehat'. Pada bagian akhir dalam bab ini ditutup dengan penjelasan kontribusi dan prospek ke depan agrogeologi dalam pewujudan suatu pertanian yang berkelanjutan.

A. Konsep Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan merupakan sistem pengelolaan konservatif sumber daya alam untuk kegiatan pertanian yang berorientasi pada perubahan teknologi dan kelembagaan yang dilakukan sedemikian rupa untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan dasar (terutama sandang dan pangan) dan kepuasan manusia secara berkelanjutan bagi generasi sekarang dan mendatang (TAC-CGIAR, 1988; FAO, 1989). Pengertian yang lebih operasional, pertanian

berkelanjutan adalah suatu sistem usaha dalam bidang pertanian yang produktif dan ramah lingkungan, dilakukan secara efektif, efisien, dan bijak dalam memanfaatkan sumberdaya alam untuk memenuhi kebutuhan dasar kehidupan manusia, terutama sandang dan pangan, sehingga sumber daya itu bermanfaat optimal hingga generasi mendatang. Setiap model atau sistem usaha tani dapat dikatakan berkelanjutan jika memenuhi ketentuan tersebut.

Berdasarkan pemahaman tersebut di atas, terdapat dua persyaratan penting yang harus terpenuhi dalam mewujudkan suatu sistem atau model pertanian yang berkelanjutan. **Pertama**, terpenuhinya kebutuhan dasar manusia, terutama pangan dan energi dalam jumlah yang cukup dan kualitas yang baik. **Kedua**, cara pemanfaatan sumber daya alam yang tersedia harus efisien dan berkesinambungan. Jadi, usaha tani itu harus produktif, tidak boros dalam pemanfaatan sumber daya alam, dan tidak menimbulkan kerusakan lingkungan yang signifikan sehingga generasi yang akan datang akan tetap dapat memanfaatkan sumber daya alam tersebut untuk memenuhi kebutuhan pokok hidupnya. Agar dapat diterapkan di tingkat lapang, konsep yang ideal tersebut harus diterjemahkan secara teknis yang mudah difahami dan diterapkan oleh petani.

Dua persyaratan umum pertanain berkelanjutan seperti tersebut di atas dapat dielaborasi lebih operasional, bahwa usaha tani tersebut harus:

1. Menguntungkan.

Semua petani pasti berharap mendapatkan hasil atau keuntungan yang memadai dari usaha taninya, minimal terpenuhi kebutuhan primer mereka sehari-hari. Jika tidak menguntungkan, maka dapat dipastikan bahwa cepat atau lambat usaha tersebut akan berhenti (artinya tidak berkelanjutan). Keuntungan usaha tani tersebut seharusnya tidak hanya dimaknai sebagai keuntungan material, tetapi juga keuntungan non-material. Misalnya, kondisi lingkungannya tetap terjaga atau bahkan menjadi lebih baik. Kondisi lingkungan yang dimaksud bukan hanya lingkungan fisik, tetapi lebih luas meliputi aspek non-fisik, yaitu kondisi lingkungan sosial - budaya dan ekonomi.

Apa yang terjadi dalam praktek usaha tani pada era modern? Sebagian besar pelaku usaha tani ternyata masih lebih mengutamakan perolehan keuntungan finansial yang maksimal. Akibatnya, aspek kelestarian sumber daya alam dan keberlanjutan usaha tani itu sendiri kurang mendapat perhatian. Sumber daya alam cenderung dieksploitasi semaksimal mungkin untuk mencapai target keuntungan finansial yang maksimal tersebut, bahkan seringkali pemanfaatan sumber daya alam itu melampaui kapasitas daya dukung alamiahnya.

Banyak contoh tentang sistim usaha tani yang diterapkan oleh petani saat ini yang tidak berkelanjutan dan memicu percepatan degradasi sumber daya alam terutama tanah dan keragaman hayati. Misalnya,

untuk mendapatkan keuntungan finansial yang tinggi, banyak petani bawang merah dan komoditi pangan lainnya sering menggunakan pupuk N sintetis ber-dosis sangat tinggi (berlebihan). Hal itu dimaksudkan agar ukuran dan bobot produk bawangnya saat panen maksimal, tanpa mempertimbangkan kualitas produk bawangnya yang justru rendah. Akibat langsung dari dosis aplikasi pupuk N sintetis yang terlalu tinggi tersebut, tanaman menjadi rentan terhadap serangan hama dan penyakit, memicu penggunaan pestisida sintetis pada usaha tani makin meningkat dan cenderung berlebihan. Tentu hal tersebut dapat menambah dampak negatif terhadap aspek lingkungan yang lebih luas. Selain itu, usaha tani seperti itu akan menghasilkan produk bahan pangan yang kurang sehat karena kemungkinan besar mengandung residu pestisida sintetis yang tinggi. Secara finansial, mungkin petani tersebut memperoleh keuntungan besar. Tetapi, kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan usaha tani seperti itu jauh lebih mahal. Munculnya banyak jenis penyakit di masyarakat saat ini misalnya, kemungkinan karena mereka mengkonsumsi produk pangan yang mengandung residu pestisida sintetis. Oleh karena itu, dalam rangka menciptakan usaha tani yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, praktek usaha tani seperti itu harus dicegah bahkan dilarang.

2. Dapat memenuhi kebutuhan primer masyarakat.

Pertanian memegang peran utama dalam memenuhi kebutuhan dasar masyarakat luas, terutama bahan pangan. Masyarakat membutuhkan bahan pangan dalam jumlah yang cukup, mudah diakses (terjangkau), dan kualitasnya baik (sehat untuk dikonsumsi). Selain harus dapat memenuhi tuntutan tersebut, usaha tani yang diterapkan secara teknis harus ramah lingkungan dan berkelanjutan sehingga mampu memenuhi tuntutan masyarakat konsumen secara berkelanjutan pula.

3. Ramah lingkungan.

Dalam beberapa dekade terakhir, beberapa istilah atau slogan '*go green*', '*green products*', atau '*eco-friendly*' telah dijadikan label jaminan bahwa produk pertanian tersebut dihasilkan dari penerapan teknologi usaha tani yang ramah lingkungan. Dalam usaha tani, *eco-friendly* bermakna bahwa usaha tani tersebut dilakukan dengan memperhatikan aspek keseimbangan ekologis yang proporsional.

4. Mandiri dalam penyediaan *input* usaha tani.

Usaha tani dapat berkelanjutan jika ketersediaan *input* utama usaha tani itu juga berkelanjutan, selalu tersedia pada saat diperlukan oleh petani. *Input* usaha tani penting meliputi benih, pupuk atau amelioran, pestisida, dan herbisida. Keberlanjutan usaha tani tersebut akan terjamin jika kebutuhan bahan tersebut dapat terpenuhi secara mandiri. Secara praktis,

optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal, antara lain benih, pupuk, dan pestisida nabati yang keberadaannya melimpah di suatu kawasan pertanian akan menjamin keberlanjutan ketersediaan bahan dan kegiatan usaha tani tersebut. Khusus yang berkaitan dengan sumber unsur hara (pupuk) dari bahan alami lokal, salah satu contoh yang ketersediaannya melimpah adalah batuan vulkanik.

Ketergantungan terhadap *input* tertentu dari luar (*import*) sering kali tidak dapat dihindari. Tetapi, ketergantungan tersebut harus dapat diminimalisir. Misalnya dengan mengadopsi sumber *input* usaha tani dari luar berupa benih yang memiliki keunggulan tertentu di banding benih lokal, kemudian dikembangkan sehingga adaptif terhadap kondisi lokal. Selanjutnya, benih tersebut diperbanyak di dalam negeri.

5. Adaptif terhadap perubahan iklim.

Perubahan iklim yang terjadi pada beberapa dekade terakhir sangat berpengaruh terhadap kegiatan usaha tani di seluruh dunia, terutama di negara beriklim tropis; dan dampak perubahan iklim itu mungkin sulit atau tidak dapat dihindari. Oleh sebab itu, harus dikembangkan model usaha tani yang adaptif terhadap perubahan iklim tersebut. Fokus dari upaya tersebut lebih diarahkan pada adaptasi, yaitu mengurangi resiko terjadinya kegagalan atau penurunan produksi yang dapat mengancam keberlangsungan usaha tani tersebut.

Perubahan iklim merupakan hasil telaah jangka panjang tentang pola umum kondisi iklim secara global yang menunjukkan kecenderungan atau telah terjadinya perubahan pola yang signifikan. Perubahan iklim pernah terjadi beberapa kali selama sejarah dunia dengan penyebab utama yang berbeda-beda. Terjadinya perubahan iklim pada saat ini jauh lebih cepat daripada variasi iklim secara alami yang terjadi terdahulu. Para pakar lingkungan mengkaitkan perubahan iklim saat ini dengan laju produksi emisi gas rumah kaca, terutama gas karbon dioksida dan metan yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan terjadinya perubahan suhu udara yang ekstrim tinggi di suatu tempat dan ekstrim rendah di tempat lain. Ketidak-teraturan pola, kuantitas, frekuensi, serta sebaran curah hujan karena perubahan iklim sangat mempengaruhi aktivitas usaha tani. Perubahan tersebut menyebabkan para petani kesulitan untuk menentukan waktu tanam yang tepat, atau sering terjadi kekeringan di suatu kawasan dan banjir di kawasan lain yang semuanya itu dapat menyebabkan gagal panen.

Kegiatan usaha tani bukan satu-satunya sektor yang terkena dampak negatif dari perubahan iklim; juga bukan yang dominan menjadi penyebab perubahan iklim. Tetapi, upaya mitigasi untuk menurunkan laju emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian dan untuk adaptasi usaha tani terhadap perubahan iklim harus dilakukan dalam setiap tahapan kegiatan usaha tani di tingkat lapang, agar kegiatan usaha tani yang produktif tetap dapat berlangsung. Bentuk kegiatan

praktis mitigasi tersebut antara lain (a) meningkatkan luas dan kerapatan tutupan lahan oleh vegetasi sehingga dapat meningkatkan serapan gas karbon dioksida di atmosfer melalui fotosintesis, (b) mengembalikan limbah pertanian (biomasa) ke petak usaha tani, tidak membakarnya, (c) penggunaan bahan organik atau *biocharge* sebagai pupuk atau amelioran, dan (d) penggunaan batuan silikat sebagai bahan peremajaan tanah. Berkaitan dengan contoh terakhir, Campe (2013) mengkompilasi informasi berbagai hasil riset tentang penggunaan batuan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman yang secara tidak langsung dapat menurunkan emisi gas CO₂ dan CH₄ di permukaan bumi.

Jika ditelusuri dari sejarah perkembangan pengetahuan dan teknologi pertanian, pengembangan konsep dan promosi pertanian berkelanjutan terjadi setelah timbulnya kesadaran masyarakat dunia terhadap dampak negatif dari praktek usaha tani yang kurang memperhatikan aspek lingkungan dan keberlanjutannya. Sistem usaha tani yang dimaksud telah diterapkan sejak era revolusi hijau tahun 1960-an hingga sekarang.

Kita menyadari bahwa pertanian merupakan sistem yang kompleks, dipengaruhi oleh banyak faktor yang berkaitan langsung dengan kegiatan usaha tani maupun non-pertanian. Konsep pertanian berkelanjutan tersebut sangat ideal. Setiap bentuk/model usaha tani yang dapat diklaim berkelanjutan mungkin

hanya dapat diterapkan pada lokasi dan kondisi spesifik, atau bahkan mungkin hanya dapat diterapkan pada era tertentu.

B. Model Usaha Tani Berkelanjutan

Banyak model atau bentuk pertanian yang berkelanjutan yang sebenarnya telah diterapkan oleh nenek moyang kita selama berabad-abad. Model usaha tani yang mereka lakukan umumnya disebut usaha tani tradisional. Bentuk teknis usaha tani tradisional tersebut antara lain adalah sistem usaha tani campuran, rotasi tanaman, tumpang sari, penggunaan mulsa organik, usaha tani terpadu tanaman & ternak, dan tanaman padi & ikan (mina padi). Teknik usaha tani tersebut berkembang secara alami sesuai dengan kondisi yang ada saat itu, dan ditularkan ke generasi berikutnya secara turun-menurun. Model usaha tani tradisional tersebut berkembang secara alami (*indigenous knowledge*). Petani hanya memanfaatkan *input* alami lokal, karena memang belum tersedia bahan sintetis maupun teknologi untuk memodifikasi sifat genetis tanaman. Hal itu berbeda dengan di era modern dimana konsep pertanian berkelanjutan digagas dan diformulasikan oleh para pakar dengan mempertimbangkan berbagai aspek untuk dipadukan. Pengembangan pertanian berkelanjutan modern merupakan respon terhadap praktek usaha tani yang sarat dengan penggunaan bahan kimia sintetis yang dimulai sejak era revolusi hijau dan berjalan hingga sekarang. Tidak dapat dipungkiri bahwa penggunaan bahan agrokimia

tersebut mampu meningkatkan produksi bahan pangan untuk memenuhi kebutuhan pangan masyarakat dunia. Tetapi, usaha tani tersebut juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan yang sangat luas.

Pada konsep pertanian berkelanjutan modern tampak keinginan kuat untuk kembali ke sistem pertanian tradisional yang telah terbukti berkelanjutan (berlangsung berabad-abad), bertani menyatu dengan alam sehingga memunculkan slogan *'back to nature'*. Namun, penerapan konsep pertanian berkelanjutan di era modern itu tidak mudah, tidak bisa hanya dengan mengadopsi begitu saja model pertanian tradisional. Kondisi berbagai aspek kehidupan (peradapan) telah banyak berubah sehingga diperlukan penyesuaian pertanian tradisional dengan peradapan modern.

Untuk merespon dan menterjemahkan konsep pertanian berkelanjutan modern ke bentuk teknis (terapan), maka dalam sub bab ini dibahas dua model pertanian atau usaha tani yang diklaim oleh banyak pihak saat ini sebagai usaha tani yang berkelanjutan. Dua contoh model yang dimaksud adalah 'pertanian organik' dan 'pertanian sehat'.

1. Usaha Tani Organik

Pengembangan model atau sistem pertanian organik seperti yang kita kenal saat ini merupakan respon terhadap upaya mewujudkan pertanian berkelanjutan. Agar tidak terjadi perbedaan persepsi, konsep dasar pertanian organik ditulis ulang dalam sub

bab ini. Konsep pertanian organik yang diklaim berkelanjutan tersebut diharapkan dapat diterapkan secara global dengan beberapa penyesuaian dengan kondisi lokal.

Pertanian organik adalah suatu pendekatan holistik terhadap pengelolaan sistem produksi yang mempromosikan upaya peningkatan kesehatan agroekosistem, meliputi keragaman hayati (*biodiversity*), siklus aktivitas biologi termasuk biologi tanah. Dikutip dari *International Federation of Organic Agriculture Movements* (IFOAM, 2008):

"Organic agriculture is a production system that sustains the health of soils, ecosystems and people. It relies on ecological processes, biodiversity and cycles adapted to local conditions, rather than the use of inputs with adverse effects. Organic agriculture combines tradition, innovation and science to benefit the shared environment and promote fair relationships and a good" quality of life for all involved."

Dalam penerapan konsep pertanian organik tersebut ada 4 prinsip yang harus dipenuhi, yaitu (IFOAM, 2008):

- a. Kesehatan (*health*): usaha tani organik harus secara berkelanjutan dapat meningkatkan kesehatan tanah, tanaman, ternak, manusia, dan alam sebagai satu kesatuan (*"organic agriculture should sustain and enhance the health of soil, plant, animal, human and planet as one and indivisible"*).

- b. Ekologis (*ecology*): usaha tani organik harus didasarkan pada sistem dan siklus ekologi kehidupan, bekerja dengannya, meningkatkan dan membantu agar berkelanjutan (*"organic farming should be based on the living ecological systems and cycles, work with them, emulate them and help sustain them"*).
- c. Keselarasan (*fairness*): usaha tani organik harus dibangun atas dasar kesetaraan dan keselarasan, dengan proses lingkungan dan kehidupan secara umum (*"organic agriculture should build on relationships that ensure fairness with regard to common environment and life processes"*).
- d. Perhatian (*care*): usaha tani organik harus dikelola dengan memperhatikan dan bersikap bertanggung jawab untuk melindungi kesehatan dan kondisi kehidupan generasi saat ini dan yang akan datang serta terhadap lingkungan (*"organic farming should be managed in a precautionary and responsible manner to protect the health and well being of current and future generations and the environment"*).

Untuk dapat memenuhi persyaratan spesifik dalam sistem tersebut, konsep pertanian organik lebih menekankan pada praktek pengelolaan (*management practices*) yang memungkinkan dapat dilakukan, baik secara agronomis, biologis, maupun mekanis daripada memperhatikan tentang asal-usul sumber *input* (*in farm* atau *off farm*) ataupun jenis bahan (sintetis atau non-sintetis) yang digunakan dalam usaha tani.

IFOAM mengingatkan bahwa pertanian organik seyogyanya tidak hanya dimaknai secara teknis, tetapi juga memperhatikan aspek non-teknis, antara lain meliputi pola pikir, sikap, dan keyakinan. Namun, himbauan itu mungkin sulit difahami dan diterapkan oleh petugas pertanian maupun petani sebagai pelaku usaha tani. Fakta di lapang menunjukkan bahwa petani pada umumnya lebih berorientasi untuk memperoleh keuntungan ekonomis daripada keuntungan ekologis. Kompromi (perhatian yang proporsional) terhadap kedua bentuk keuntungan usaha tani tersebut oleh petani bukan sesuatu yang tidak mungkin dicapai. Tetapi untuk mengubah sikap tersebut umumnya memerlukan upaya keras dan waktu cukup lama.

Promosi tentang penerapan pertanian organik secara internasional pada beberapa dekade terakhir dipelopori oleh IFOAM dan mendapat dukungan FAO serta banyak organisasi profesi lainnya termasuk kalangan akademisi. Mereka menaruh perhatian besar terhadap pentingnya mengimplementasikan konsep pertanian organik tersebut di tingkat hamparan. Hasil nyata dari promosi bertani organik secara global tersebut antara lain adalah meningkatnya persepsi yang positif dari konsumen bahan pangan (masyarakat) terhadap produk organik. Berdasarkan hasil telaah (*review*) oleh banyak pakar pertanian, antara lain Barańskia et al. (2017) dan Gopalakrishnan (2019), produk pertanian organik dipercaya memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan produk dari pertanian konvensional. Praktek usaha tani organik

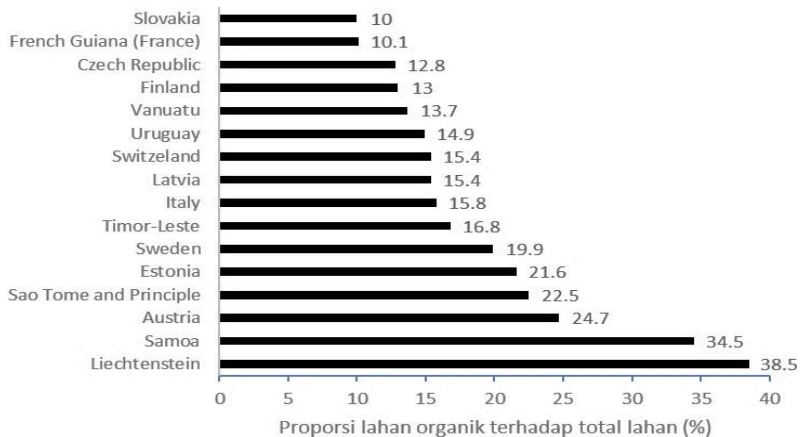
bermunculan dalam berbagai bentuk/pola, meskipun skala usahanya relatif kecil. Misalnya, usaha tani dalam rumah kaca dan di lahan pekarangan.

Untuk mendukung dan menjamin implementasi konsep pertanian organik di tingkat lapang dan untuk memberi jaminan kualitas produk organik kepada konsumen, dikembangkan pula institusi penjaminan mutu (sertifikasi) 'produk organik' di banyak negara. Selain berfungsi konsultatif, institusi tersebut dipercaya untuk mengevaluasi proses dan produk usaha tani organik yang dilakukan oleh petani dan industri makanan. Saat ini label 'organik' mempunyai arti sangat penting bagi pihak produsen maupun konsumen produk pertanian. Pencantuman label 'organik' pada produk pertanian dibolehkan setelah lolos dari proses sertifikasi cukup ketat dan relatif mahal.

Standar teknis sertifikasi 'organik' secara rinci tidak sama di setiap negara, tetapi beberapa ketentuan teknis yang umum yang sama. Pada ketentuan teknis umum tersebut antara lain disebutkan bahwa usaha tani tersebut harus menggunakan bahan alami dan dilarang menggunakan bahan sintetis dengan beberapa pengecualian. Beberapa jenis bahan alami, misalnya batuan yang mengandung arsenik melebihi ambang batas aman tidak boleh digunakan, tetapi bahan sintetis *insect pheromones* (pengusir insek), masih diperbolehkan digunakan dalam pertanian organik.

Berdasarkan uraian di atas, sekilas tampak bahwa pertanian organik akan dapat berkembang pesat

dan diterima oleh semua pihak (*success stories*). Namun, kenyataannya hingga sekarang pertanian organik yang diterapkan sesuai dengan ketentuan yang telah diuraikan di atas sangat terbatas. Perkembangan penerapan pertanian organik di berbagai negara relatif lambat. Proporsi luas lahan pertanian dan produk organik hingga saat ini sangat rendah dibandingkan dengan produk pertanian konvensional atau non-organik (Gambar 16).



Gambar 16. Negara dengan kontribusi lahan pertanian organik ≥ 10 % terhadap total lahan pertanian (data dari FiBL & IFOAM, 2020).

Lahan pertanian organik di Indonesia pada tahun 2017 hanya sekitar 0,38 % dari total luas lahan pertanian yang ada, dan sebagian besar hanya diterapkan pada usaha tani perkebunan.

Menyikapi kenyataan tersebut, banyak pihak yang merasa optimis, tetapi juga banyak yang pesimis. Hal itu wajar karena adanya perbedaan tingkat

pemahaman dan cara pandang tentang pertanian organik, kondisi spesifik lokasi, dan kepentingan lainnya. Usaha tani organik tidak dapat diteapkan begitu saja pada lahan pertanian yang telah lama digunakan untuk usaha tani konvensional. Lahan tersebut dianggap telah tercemar oleh berbagai macam bahan *toxic* terutama pestisida dan herbisida sintetis. Untuk mengeliminir bahan cemaran tersebut memerlukan waktu yang cukup lama. Singkatnya, masih banyak hal dalam pertanian organik yang perlu dibenahi agar dapat diterapkan pada beragam kondisi dan kepentingan di tingkat hamparan usaha tani. Konsep pertanian organik yang luar biasa tidak akan banyak bermakna jika tidak dapat diterapkan di tingkat hamparan usaha tani.

Perkembangan persepsi yang positif dari konsumen pangan terhadap produk organik umumnya didasarkan pada anggapan bahwa produk organik lebih sehat atau lebih unggul kandungan nutrisinya daripada produk hasil dari usaha tani konvensional. Tetapi pandangan tersebut tidak selalu terbukti di lapang. Hingga sekarang masih banyak pakar pertanian dan ahli nutrisi yang memperdebatkan kebenaran dari klaim tersebut. Karena adanya kepentingan yang berbeda-beda antar pihak atau antar pakar dengan spesialisasi masing-masing, telaah terhadap penilaian produk organik vs konvensional sering kali tergantung dengan siapa atau pihak mana kita berdiskusi tentang isu tersebut. Para pakar ekologi/lingkungan umumnya cenderung berpendapat bahwa aspek ekologi

(lingkungan) adalah yang terpenting, mendapatkan proporsi perhatian utama. Sebaliknya, pakar ekonomi umumnya lebih memperhatikan aspek keuntungan finansial daripada atau keuntungan ekologis. Sesuai dengan konsep pertanian organik yang bersifat 'holistik', pihak manapun seharusnya mempertimbangkan berbagai aspek secara proporsional. Cara pandang yang egoistik harus ditransformasi ke kompromistik sehingga dapat diterima oleh semua pihak.

Berkaitan dengan persepsi masyarakat dunia terhadap keunggulan nilai gizi produk organik, Mei et al (1917) juga menelaah banyak hasil penelitian di Eropa, membandingkan kualitas produk pertanian organik dengan produk dari pertanian konvensional. Dari kajian itu disimpulkan bahwa mengkonsumsi produk organik dapat mengurangi resiko munculnya alergi, kegemukan/obesitas pada konsumen. Pakar lain, misalnya Brandt & Møgaard, (2001), Worthington (2001), dan Barański et al. (2014) melaporkan bahwa produk organik lebih bernutrisi daripada produk pertanian konvensional. Keunggulan itu dapat dilihat, misalnya, dari kandungan vitamin C, anti oksidan dan omega-3 asam lemak pada produk organik yang lebih tinggi dibanding dengan produk dari pertanian konvensional. Tetapi sekali lagi, kesimpulan itu tidak didukung dengan bukti yang cukup meyakinkan. Yang dapat dipastikan bahwa kandungan residu bahan aktif pestisida sintetis dan logam berat pada produk organik tidak ada atau sangat minim.

Reganold dan Wacter (2017) menelaah publikasi hasil riset yang lebih luas tentang performa pertanian organik dikaitkan dengan 4 matrik keberlanjutan, yaitu keberlanjutan produksi, dampak terhadap lingkungan, ekonomi, dan sosial kehidupan. Dikaitkan dengan keberlanjutan produksi, pertanian organik dihadapkan pada fakta yang delematis. Di satu sisi, sektor pertanian dituntut untuk terus meningkatkan produksinya agar dapat memenuhi kebutuhan pangan masyarakat dunia yang populasinya cenderung terus meningkat. Tetapi di sisi lain, produktivitas pertanian organik ternyata selalu beberapa persen lebih rendah (tergantung pada lokasi dan jenis tanaman) daripada produksi dari pertanian konvensional (Stanhill, 1990; Badgley et al., 2007; De Ponti et al., 2012; Senfert et al., 2012; Ponisio et al., 2015). Kenyataan tersebut menyebabkan terjadinya dua kelompok pakar pertanian yang bersebrangan. Satu kelompok mendukung diterapkannya konsep pertanian organik di semua negara, sedangkan pihak yang lain justru khawatir jika penerapan pertanian organik diperluas akan menekan kondisi ketahanan pangan di suatu kawasan atau negara tertentu.

Penerapan pertanian organik di masing-masing negara atau kawasan juga sangat dipengaruhi oleh kondisi ketahanan pangan setempat. Keunggulan kualitas produk organik seperti dilaporkan oleh beberapa peneliti tersebut di atas mungkin sampai saat ini belum dapat mempengaruhi kebijakan pemerintah di

suatu kawasan atau negara untuk menerapkan pertanian organik secara penuh atau luas.

Mengacu pada beberapa kesulitan dan hambatan dalam penerapan pertanian organik secara luas seperti diuraikan di atas, maka wajar muncul pertanyaan: haruskah pertanian organik diterapkan sesuai dengan ketentuan yang dikemukakan oleh IFOAM? Alternatifnya, konsep pertanian organik tersebut dimodifikasi agar lebih aplikatif di lapang yang beragam kondisinya.

Beberapa aspek pertanian organik itu sendiri mungkin perlu dibenahi, baik mengenai konsep (teoritis) maupun teknologi praktisnya. Seperti halnya konsep dan teknologi lainnya, umumnya selalu berkembang sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta kebutuhan manusia atau perkembangan peradapan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pembenahan konsep pertanian organik dan tindakan tersebut harus dipandang sebagai sesuatu yang wajar untuk dilakukan.

Setidaknya ada tiga hal dalam pertanian organik yang mungkin perlu ditinjau kembali. **Pertama**, penggunaan istilah 'organik' dalam 'pertanian organik' sangat potensial menimbulkan perbedaan atau salah tafsir, terutama oleh petani atau masyarakat umum. **Kedua**, masalah pertanian yang kita hadapi saat ini (pada pertanian modern) sebenarnya lebih berkaitan dengan penurunan kualitas bahan pangan dan kondisi lingkungan yang diakibatkan oleh '**cara**

penggunaan input yang kurang tepat (umumnya berlebihan), bukan oleh **'jenis input'** usaha tani yang digunakan. **Ketiga**, persyaratan (*standard*) teknis sertifikasi untuk usaha tani dan produk organik yang diberlakukan oleh institusi pemberi sertifikat organik mungkin terlalu kaku dan sulit dipenuhi untuk sebagian besar kawasan atau negara yang kodisinya beragam. Sebagian besar lahan pertanian yang ada saat ini telah lama digunakan untuk usaha tani konvensional, kemungkinan besar telah tercemar oleh residu bahan agrokimia (terutama pestisida dan herbisida sintesis). Setidaknya diperlukan masa transisi yang cukup panjang (3 – 5 tahun) untuk berubah dari bertani konvensional ke organik. Hal itu kemungkinan menjadi salah satu penyebab keengganan petani untuk berubah dari bertani konvensional ke organik.

Seperti dijelaskan oleh IFOAM (2008), pertanian organik sebenarnya tidak berkaitan langsung dengan **jenis bahan** yang digunakan dalam usaha tani, yaitu bahan organik. Tetapi dalam prakteknya, seperti yang tertera pada ketentuan umum standar sertifikasi organik, penggunaan *input* bahan 'organik' adalah suatu keharusan. Bertani organik tidak dibolehkan menggunakan pupuk anorganik atau sintesis. Larangan penggunaan pestisida sintesis, sudah tepat karena berapapun dosis/intensitas pemakaiannya telah terbukti merusak lingkungan. Tetapi, untuk larangan penggunaan pupuk sintesis, misalnya urea, TSP, dan KCl, mungkin harus ditinjau kembali.

Makna 'organik' dalam kehidupan sehari-hari, atau yang difahami oleh masyarakat secara umum adalah semua jenis atau bahan yang berasal dari makhluk hidup (organisme). Misalnya, kompos dari limbah peternakan dan biomasa tanaman, serta berbagai asam atau senyawa organik kompleks lainnya, dan mikro organisme penambat N dan pelarut P. Artinya, sebagian besar petani memahami pertanian organik secara sempit pada aspek teknis saja, yaitu bertani yang hanya menggunakan bahan atau senyawa organik. Tentu saja hal itu berbeda dengan pengertian pertanian organik menurut IFOAM. Selain itu, secara teknis (menurut IFOAM, 2028) dalam berusaha tani organik ternyata masih diperbolehkan menggunakan bahan anorganik tertentu, misalnya kapur, dolomite, dan bermacam jenis batuan. Bahan tersebut adalah non-sintetis atau alami yang dianggap tidak menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Terkait dengan hal itu, agar lebih jelas dan tidak menimbulkan salah tafsir sebaiknya digunakan istilah 'pertanian alami' bukan 'pertanian organik', karena masih diperbolehkan menggunakan bahan organik maupun anorganik yang alami (non-sintetis).

Lebih jauh, dampak dari kurang tepatnya penafsiran oleh sebagian masyarakat umum tersebut terhadap istilah 'pertanian organik' maka muncul anggapan atau stigma bahwa menggunakan *input* organik dalam usaha tani selalu lebih baik daripada menggunakan *input* anorganik atau sintetis (misalnya

pupuk urea, SP, KCl, atau NPK), sehingga penggunaan *input* sintetis harus dihindari. Padahal anggapan itu tidak selalu tepat. Berdasarkan hasil telaah Mei et al (1917), penggunaan *input* 'organik' tidak selalu menghasilkan produk yang kualitasnya lebih tinggi atau lebih sehat (*nutrisious*) daripada yang menggunakan *input* anorganik.

Berdasarkan ketentuan IFOAM (2008), pupuk sintetis yang telah lama dikenal dan digunakan oleh petani (urea, TSP, KCl, dan KNO_3) tidak boleh digunakan dalam usaha tani organik. Tetapi, pupuk anorganik alami berupa batuan fosfat dan mineral/batuan lainnya (kapur, dolomit, dan K-feldspar) boleh digunakan dalam usaha tani organik. Komparasi ini menunjukkan bahwa dalam konsep pertanian organik membedakan '**wujud bahan**', yaitu bahan sintetis tidak boleh digunakan, sedangkan bahan alami (non-sintetis), termasuk bahan organik, boleh digunakan. Tetapi ketentuan tersebut tidak mempertimbangkan aspek '**teknik penggunaan**' pupuk tersebut. Artinya, walaupun dosis dan cara aplikasi pupuk sintetis itu tepat, tetap saja tidak diperbolehkan digunakan dalam usaha tani organik.

Argumentasi dilarangnya penggunaan pupuk sintetis dalam usaha tani organik karena pupuk sintetis mudah larut sehingga dapat mencemari air tanah, menurunkan kualitas produk atau menghilangkan karakteristik kandungan nutrisi alami dari masing-masing jenis tanaman. Selain itu, mungkin suatu

penilaian yang berlebihan bahwa dampak negatif dari penggunaan pupuk sintetis tersebut dikaitkan pula dengan proses pembuatannya yang menghasilkan limbah industri pupuk sintetis yang umumnya bersifat masam (Chandini et al., 2019). Benarkah sedemikian serius dampak negatifnya terhadap lingkungan sehingga menggunakan segala jenis pupuk sintetis harus dilarang dalam usaha tani organik?

Jika penggunaan pupuk sintetis itu dilakukan secara tepat, sesuai dengan kebutuhan tanaman (dan kondisi tanahnya), komposisi unsur hara yang dibagikan ke tanaman berimbang, logikanya tentu tidak akan menimbulkan dampak negatif yang signifikan. Oleh karena itu, pelarangan terhadap penggunaan jenis pupuk sintetis dalam praktek usaha tani organik tersebut layak ditinjau kembali.

Salah satu aspek lain harus dipertimbangkan adalah tentang fakta tuntutan produksi pertanian yang tinggi untuk dapat memenuhi kebutuhan pangan nasional atau global. Tuntutan itu hanya dapat dipenuhi jika didukung dengan penggunaan pupuk sintetis yang tepat dan varietas tanaman berpotensi produksi tinggi atau unggul. Potensi produktivitas yang tinggi itu akan menjadi nyata jika tanaman dipasok dengan unsur hara (pupuk) dosis tinggi pula. Persyaratan tersebut tidak akan dapat terpenuhi jika hanya menggunakan pupuk organik yang kadar unsur hara esensialnya relatif rendah, dosisnya harus sangat tinggi (puluhan ton/ha). Kombinasi pupuk organik

dan sintetis mungkin merupakan cara yang paling tepat, dapat diterima oleh semua pihak.

Pemupukan didefinisikan sebagai kegiatan pemberian bahan organik maupun anorganik yang mengandung unsur hara kepada tanaman, baik melalui tanah maupun daun, sehingga kebutuhan optimal unsur hara tanaman itu terpenuhi (Mashner, 1992). Logika umum, pemupukan akan menimbulkan dampak negatif signifikan terhadap kualitas produk pertanian maupun lingkungan apabila pemberiannya tidak proporsional, tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman, terutama jika berlebihan. Fakta yang sering terjadi di tingkat hamparan (*on farm*), banyak petani yang menggunakan pupuk dengan dosis yang berlebihan (terutama pupuk N). Penggunaan pupuk sintetis berhara makro (N, P, dan K) dengan dosis tinggi secara terus-menerus pada setiap musim tanam, tanpa diimbangi dengan pemberian unsur hara mikro, juga dapat menyebabkan kuantitas maupun kualitas produksi tanaman rendah dan memicu terjadinya degradasi lahan (tanah). Karena pupuk sintetis umumnya relatif mudah larut dalam air, maka penggunaan pupuk sintetis harus dilakukan secara bertahap. Misalnya, pemupukan diaplikasikan beberapa kali dan jumlahnya harus sesuai dengan kebutuhan optimal tanaman pada setiap tahapan pertumbuhannya. Ringkasnya, kemungkinan dampak negatif dari penggunaan pupuk sintetis terhadap kualitas produk maupun lingkungan lebih ditentukan oleh **cara pemupukannya**, bukan oleh **jenis pupuknya** (organik vs

anorganik, sintetis vs alami). Oleh karena itu, larangan penggunaan pupuk sintetis dalam pertanian organik perlu ditinjau kembali.

Berdasarkan penjelasan terhadap beberapa isu di atas, dapat disimpulkan bahwa konsep pertanian organik sangat baik (ideal). Tetapi, beberapa aspek perlu dibenahi agar dapat difahami oleh petani dengan beragam tingkat pengetahuan dan ketrampilan, dan diterapkan di lapang secara luas. Dua aspek penting yang perlu dibenahi meliputi penggunaan istilah 'organik' dan pelarangan penggunaan pupuk sintetis (urea, TSP, KCl, dsb). Kombinasi pupuk organik dengan pupuk sintetis, atau kombinasi sistem pertanian organik dan konvensional mungkin lebih tepat dan realistis untuk diterapkan pada kondisi usaha tani saat ini dan ke depan. Larangan penggunaan pestisida dan herbisida sintetis serta benih dari hasil rekayasa genetik (GM) relatif mudah dan dapat diterima oleh petani, meskipun hal itu akan mendapat perlawanan dari perusahaan penghasil produk tersebut.

2. Usaha Tani Sehat

Seperti telah di bahas pada sub bab sebelumnya, pertanian organik yang telah dianggap sebagai suatu sistem pertanian yang berkelanjutan ternyata hingga sekarang masih sulit diterapkan secara luas, dan beberapa aspek perlu ditinjau kembali agar dapat diterima dan diterapkan oleh petani. Fakta tersebut telah menginspirasi dan menjadi tantangan bagi para pakar pertanian untuk mengembangkan alternatif

model usaha tani lain yang lebih aplikatif di tingkat hamparan dengan tetap memenuhi persyaratan utama pertanian berkelanjutan. Salah satu alternatif model usaha tani yang diajukan dan didiskusikan dalam bagian ini adalah model usaha tani sehat (MUTS).

Seperti halnya pertanian organik, pengembangan MUTS juga mengacu pada konsep pertanian berkelanjutan, dan diharapkan dapat menjadi salah satu bentuk operasional dari konsep pertanian berkelanjutan. Jadi, pengembangan MUTS bukan dimaksudkan untuk menggantikan model atau teknologi usaha tani yang sudah ada yang diklaim oleh banyak pihak sebagai usaha tani yang berkelanjutan, termasuk pertanian organik. Lebih tepatnya, pengembangan MUTS dimaksudkan untuk melengkapi atau penyempurnaan berbagai bentuk usaha tani berkelanjutan yang sudah ada, terutama pada teknis terapannya sesuai dengan kondisi saat ini dan ke depan. Penerapan MUTS dapat dikombinasikan dengan model usaha tani yang sudah ada sejauh kombinasi itu diarahkan untuk terwujudnya pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Istilah 'usaha tani sehat' sebenarnya sudah sering digunakan oleh banyak pihak, terutama dalam komunikasi atau diskusi tentang isu pertanian melalui media sosial. Dalam komunikasi tersebut, usaha tani sehat umumnya diidentikan dengan usaha tani organik. Tetapi, MUTS yang dimaksud di sini agak berbeda dengan pertanian organik berdasarkan

IFOAM (2008) yang telah dijelaskan di sub bab di depan. Bahkan, beberapa aspek mendasar dan teknologi praktis pada MUTS bertolak belakang dengan pada pertanian organik. Preferensi penggunaan istilah 'sehat' dalam MUTS karena disesuaikan dengan tujuan dan sasaran penerapan MUTS, meskipun sebenarnya mirif atau sama dengan tujuan dan sasaran penerapan konsep pertanian organik.

MUTS dikembangkan dan dipromosikan sebagai salah satu cara pengelolaan usaha tani dengan mengoptimalkan sumber daya alami lokal, dilengkapi teknologi terapan yang relatif mudah, murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk diterapkan oleh petani di tingkat hamparan. MUTS sangat memperhatikan aplikabilitas teknologi usaha tani di lapang bagi petani dengan beragam tingkat pengetahuan, ke-trampilan, serta kondisi sosial - budayanya. Ada perbedaan mendasar antara MUTS dengan pertanian organik. Dalam konsep MUTS tidak mempersoalkan **jenis atau wujud bahan input** usaha tani (terutama pupuk) yang digunakan, tetapi lebih menekankan pada **cara penggunaan input** tersebut dalam praktek usaha tani harus tepat. Beragam jenis pupuk organik, anorganik, sintetis, ataupun non-sistetis dapat saja digunakan secara terpisah/dikombinasikan (*blended*) jika tindakan itu dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas usaha tani dan tidak atau minimum berdampak negatif terhadap kondisi lingkungan. Sebaliknya dalam pertanian organik, pupuk sintetis (misalnya urea, TSP, dan KCl) dilarang untuk digunakan.

Tujuan dan sasaran khusus dari pengembangan dan promosi penerapan MUTS adalah tercapainya 4 sehat sebagai berikut:

a. Sehat produksi

Artinya, usaha tani menghasilkan produk (terutama bahan pangan) berkualitas tinggi, sehat untuk dikonsumsi oleh masyarakat konsumen. Target itu dapat dicapai antara lain melalui penggunaan pupuk yang kandungan unsur hara esensialnya lengkap dan berimbang. Selain itu, membunuh organisme menggunakan pestisida sintetis yang umumnya bersifat racun harus dihindarkan; sebaliknya penggunaan pestisida nabati yang berbahan baku dari tanaman lokal sangat dianjurkan. Penggunaan pestisida nabati dapat dikombinasikan dengan pengendalian ayati dengan tujuan utama untuk mencegah, setidaknya meminimalisir, terjadinya serangan HPT yang intensif, bukan untuk membasmi hama dan patogen.

b. Sehat ekonomi

Artinya, usaha tani itu harus menguntungkan terutama bagi petani sebagai aktor utama pada kegiatan usaha tani. Strategi yang dapat ditempuh untuk dapat mencapai target tersebut adalah dengan (a) meningkatkan produktivitas (kuantitas dan kualitas produk), (b) mengurangi biaya usaha tani melalui peningkatan efisiensi penggunaan *input* dan tenaga kerja, atau (c) memadukan kedua strategi tersebut. Aspek keuntungan usaha tani adalah faktor sangat

penting untuk diperhatikan agar terjamin keberlangsungan usaha tani itu sendiri; dan bertani akan menjadi sektor usaha yang sangat diminati oleh masyarakat terutama generasi muda.

c. Sehat (ramah) lingkungan

Secara teoritis, kondisi itu dapat dicapai dengan meminimalisir dampak negatif dan memaksimalkan dampak positif dari kegiatan usaha tani tersebut terhadap lingkungan. Salah satu strateginya adalah dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alami lokal. Contoh bahan alami lokal adalah batuan silikat dan pestisida nabati. Selain ramah lingkungan, sumber daya alami lokal tersebut juga relatif murah karena ketersediaannya melimpah di sekitar kita. Optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal tersebut juga akan mendorong terwujudnya usaha tani yang mandiri, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

d. Sehat cara berpikir dan bijak dalam bertindak

Contoh spesifik sesuai dengan kondisi usaha tani saat ini adalah yang berkaitan dengan cara pandang terhadap keberadaan organisme yang disebut hama dan pathogen. Selama ini, organisme tersebut dianggap sebagai **musuh petani**. Cara pandang itu memicu digunakannya pestisida sintetis (racun) untuk membasmi organisme tersebut. Dalam MUTS, bermusuhan dengan sesama makhluk ciptaan Tuhan tersebut dinilai sebagai cara berpikir yang tidak tepat. Selain bertentangan dengan prinsip ekologis juga dengan ajaran

agama (Islam). Organisme tersebut adalah salah satu komponen penting dalam ekosistem yang ada. Kераgaman organisme (*biodiversity*) sangat diperlukan untuk menjadikan keberlanjutan usaha tani tersebut. Populasi organisme tersebut akan dikontrol oleh siklus alami.

Agar aplikatif di tingkat lapang, maka MUTS dikembangkan dengan memperhatikan kebutuhan urgen dari petani di tingkat hamparan, yaitu solusi praktis untuk mengatasi beberapa masalah teknis yang sering muncul di lahan usaha taninya. Masalah teknis tersebut umumnya berkaitan dengan (1) cara mengatasi terjadinya serangan hama dan penyakit tanaman (HPT), (2) penerapan konsep pemupukan berimbang, dan (3) kondisi tanah pertanian yang kurang optimal sebagai media tumbuh dan pemasok sebagian besar unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman, misalnya tanah masam, garaman, dan tanah yang tercemar oleh beragam kontaminan. Konsep pertanian sehat harus diformulasikan untuk dapat mejadi solusi praktis dalam mengatasi masalah teknis usaha tani tersebut, sekaligus dapat mencapai empat tujuan dan sasaran pertanian sehat yang telah dijelaskan di atas.

Pengembangan aspek teknis MUTS didasarkan pada beberapa pemikiran mendasar sebagai berikut:

- a. Keberadaan organisme yang selama ini disebut sebagai hama dan penyakit tanaman (HPT) tidak dianggap sebagai pengganggu atau sumber

masalah dalam usaha tani. Pemikiran itu didasarkan pada kenyataan bahwa:

- (1) Secara ekologis, keberadaan organisme tersebut berfungsi sebagai bagian penting dari siklus energi atau siklus pangan di alam ini, sehingga organisme tersebut seharusnya tidak selalu dianggap sebagai pengganggu atau musuh petani yang harus dimusnahkan. Cara pandang ekologis seperti itu telah berhasil diterapkan dalam pertanian tradisional oleh nenek moyang kita selama berabad-abad.
- (2) Penggunaan pestisida sintetis (bersifat racun) dengan tujuan untuk membasmi organisme (hama dan patogen) telah diterapkan puluhan tahun, sejak 1960-an hingga sekarang. Tetapi buktinya, cara itu tidak dapat mengatasi munculnya serangan HPT secara tuntas. Masalah serangan HPT tetap ada atau hampir selalu muncul di setiap musim tanam, dan cenderung makin sulit diatasi, serta telah menimbulkan masalah lingkungan yang serius dan luas. Fakta tersebut menjadi bahan pertimbangan penting dalam pengembangan MUTS, khususnya untuk merespon isu tentang serangan HPT.
- (3) Dari sudut pandang religi (terutama berdasarkan ajaran agama Islam), sesuai dengan salah satu sifat dari Sang Maha Pencipta (Maha Pengasih dan Penyayang), penciptaan (keberadaan) organisme tersebut harus diyakini 'bukan untuk mengganggu', tetapi justru

memberikan banyak manfaat bagi manusia. Bahkan, ajaran agama (Islam) juga menganjurkan agar kita mengenali (mempelajari) organisme tersebut; dan membunuh organisme ciptaan-Nya tanpa alasan yang tepat dapat dikategorikan sebagai perbuatan aniaya (dosa).

Lalu, bagaimana MUTS merespon terhadap realitas adanya masalah serangan HPT? MUTS tidak mepermasalahkan keberadaan hama itu, tetapi justru mepermasalahkan kondisi tanamannya - mengapa tidak/kurang resisten terhadap HPT. Oleh karena itu, upaya praktis yang dilakukan pada MUTS untuk mengurangi kerugian usaha tani akibat serangan HPT adalah dengan menyehatkan dan meningkatkan resistensi tanaman terhadap serangan HPT, bukan dengan membasmi hama dan patogen menggunakan pestisida sintetis (racun). Populasi hama dan patogen akan dikontrol oleh alam melalui mekanisme rantai pangan (*food chain*).

Logikanya, jika tanaman itu sehat, yaitu terpenuhi kebutuhan optimal unsur hara esensialnya, ditambah lagi dengan pasokan unsur hara fungsional silikat/Si yang cukup, maka tanaman itu akan tumbuh dan berproduksi optimal serta memiliki resistensi alami maksimal terhadap serangan HPT (Huber & Haneklaus, 2007). Dengan menerapkan konsep berpikir tersebut, MUTS memaklumi jika tetap ada serangan HPT intensitas rendah

di petak usaha tani. Dampak serangan itu tidak akan signifikan terhadap produksi dan keuntungan usaha tani jika tanamannya sehat dan resisten terhadap serangan HPT. Untuk **mencegah kemungkinan terjadinya serangan HPT yang berat**, MUTS hanya mengizinkan penggunaan pestisida nabati, agen hayati, atau kombinasi keduanya. Tindakan tersebut bersifat preventif agar tidak terjadi serangan HPT skala besar, bukan untuk membasmi organisme (hama dan patogen). Karena bersifat pencegahan, maka penggunaan pestisida nabati tersebut harus dilakukan sedini mungkin, yaitu sejak awal pertumbuhan tanaman, sebelum agen pembawa hama dan penyakit itu masuk ke petak tanaman utama.

- b. Penerapan konsep pemupukan berimbang disinkronkan dengan upaya mengatasi serangan HPT. Jelasnya, untuk menyehatkan dan mengoptimalkan resistensi alami tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan yang kurang optimal bagi tanaman (termasuk serangan HPT), maka tanaman itu harus dipasok dengan pupuk berhara lengkap dan berimbang serta mengandung unsur hara fungsional Si (silikat).
- c. Tanah yang bermasalah keharaan antara lain adalah tanah masam, garaman, dan terkontaminasi polutan. Para pakar ilmu tanah dan agronomi umumnya merekomendasikan bahwa tanah tersebut harus dinormalkan kondisinya (diremediasi) sebelum ditanami. Banyak teknologi remediasi

tanah bermasalah telah tersedia (lihat Sub Bab 6.3). Tetapi, penerapan teknologi remediasi tersebut membutuhkan biaya relatif tinggi. Akibatnya, teknik remediasi tanah tersebut jarang/tidak pernah diterapkan oleh petani, kecuali oleh perusahaan perkebunan yang bermodal cukup besar. Berdasarkan pertimbangan tersebut, tanah bermasalah keharaan atau tanah yang tidak mampu berperan optimal sebagai pemasok unsur hara tanaman tidak harus diremediasi terlebih dahulu sebelum ditanami. Faktanya, teknologi remediasi itu jarang – tidak pernah diterapkan oleh petani. Yang perlu dan relatif mudah disiasati adalah cara pemenuhan kebutuhan unsur hara tanaman. Tanaman dipasok unsur hara yang lengkap dan berimbang secara langsung melalui daun atau/dan batang (foliar fertilization), tidak melalui tanah. Hal itu berarti bahwa fungsi tanah sebagai pemasok unsur hara, untuk sementara diminimalisir. Dengan cara itu, kondisi tanah bermasalah tadi tidak akan banyak berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman pada tanah tersebut. Upaya perbaikan tanah melalui aplikasi bahan amelioran dapat tetap dilakukan secara bertahap (dosis atau biaya rendah) bersamaan dengan penerapan pemupukan dengan unsur hara lengkap melalui daun.

Penerapan teknik pemupukan melalui daun tersebut juga relevan dengan upaya untuk mengatasi masalah kesuburan tanah pertanian yang

sangat beragam dari satu tempat ke tempat yang lain. Secara teoritis, untuk dapat melakukan pemupukan melalui tanah yang tepat diperlukan beragam rekomendasi paket pemupukan yang bersifat spesifik lokal. Karena status ketersediaan unsur hara tanah bagi tanaman sangat dinamis, maka rekomendasi itu juga harus ditinjau (*update*) secara berkala. Namun nyatanya rekomendasi pemupukan spesifik lokasi tersebut masih sulit diwujudkan (setidaknya di Indonesia). Selain itu, pemupukan melalui tanah umumnya kurang efektif dan efisien dibandingkan dengan pemupukan melalui daun.

Pengembangan MUTS tidak hanya sampai pada tahapan membangun konsep seperti diuraikan di atas, tetapi konsep itu diterjemahkan dalam bentuk teknologi praktis yang dapat diterapkan oleh petani. Secara garis besar, penerapan MUTS untuk segala jenis komoditi tanaman adalah sebagai berikut:

- a. Penanaman dilakukan seperti biasa dilakukan oleh petani (standar), sesuai dengan jenis dan karakteristik tanaman yang diusahakan. Pemupukan terutama dilakukan melalui daun (*foliar fertilization*) dengan pupuk cair atau larutan yang mengandung semua unsur hara esensial dan Si. Salah satu produk lokal (NTB) untuk pupuk yang bahan baku utamanya batuan silikat dan telah divalidasi efektivitasnya di lapang pada berbagai jenis tanaman pangan dan hortikultura (Priyono, 2017) adalah

- pupuk cair 'Orrin'. Jenis pupuk yang lain dapat digunakan asalkan mengandung unsur hara lengkap dan berimbang dalam bentuk yang dapat langsung diserap oleh tanaman.
- b. Pupuk dasar, terutama pupuk N untuk tanaman non-legum, tetap diperlukan dan diaplikasikan melalui tanah. Unsur N adalah unsur hara esensial yang paling banyak dibutuhkan oleh tanaman, tetapi tidak dapat diberikan semuanya melalui daun dengan konsentrasi tinggi. Pemberian pupuk dasar dosis rendah (misalnya 50 – 100 kg urea/ha untuk tanaman padi) tetap diperlukan. Pemupukan melalui tanah itu dimaksudkan untuk mendukung pertumbuhan awal hingga tanaman memiliki beberapa lembar daun sehingga dapat menerima pasokan unsur hara melalui daun. Pada tahap pertumbuhan selanjutnya, tanaman hanya dipasok unsur hara melalui daun.
 - c. Pestisida nabati diaplikasikan sejak awal pertumbuhan (sebelum hama atau inang pembawa hama dan penyakit masuk ke petak tanaman) sebagai upaya pencegahan agar tidak terjadi serangan HPT yang berlebihan. Penggunaan pestisida nabati dapat dilakukan/disemprotkan ke permukaan daun dan batang tanaman secara terpisah atau dicampur dengan pupuk cair. Motto MUTS terkait dengan isu serangan HPT adalah 'mencegah terjadinya perang, bukan memenangkan perang melawan organisme (hama dan patogen)'.

C. Peran Agrogeologi

Upaya pemanfaatan bahan geologis untuk pertanian (agrogeologi) merupakan respon positif terhadap penerapan sistem pertanian konvensional yang dinilai kurang efisien dan tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, penerapan konsep dan teknologi agrogeologi diharapkan dapat berkontribusi signifikan terhadap pewujudan pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu contoh kontribusi inovatif dan konstruktif dari *agrogeolist* untuk mewujudkan sistem pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan adalah MUTS yang telah dibahas pada sub bab di atas. Penggunaan pupuk cair berbasis batuan silikat (Orrin) menjadi komponen penting dalam MUTS.

Pemanfaatan bahan geologis, terutama batuan silikat sebagai pupuk dan amelioran mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan bahan kimia sintetis. Ketersediaan batuan silikat di permukaan bumi sangat melimpah keberlanjutan ketersediaan produksi *input* usaha tani itu terjamin. Khususnya di Indonesia yang memiliki banyak gunung api yang masih aktif, batuan tersebut relatif segar, unsur haranya belum banyak terlepas dari padatan batuan. Bahan geologis tersebut juga mengandung multi nutrisi (semua unsur hara esensial bagi tanaman, kecuali N) sehingga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan petani dalam menghasilkan produk pertanian yang optimal. Berdasarkan hasil kajian dari beberapa peneliti, antara lain (Beerling et al., 2018,

2020; Kellend et al., 2020; Horton et al., 2021; Binett, 2021), penggunaan bubuk batuan silikat sebagai pupuk bukan saja dapat meningkatkan kuantitas dan kualitas pertumbuhan dan produksi tanaman, tetapi juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari lahan pertanian. Batuan silikat yang telah diproses menjadi bubuk berukuran nanometer atau amorfus dapat berfungsi jamak (multi fungsi). Selain sebagai sumber unsur hara (pupuk majemuk), bubuk batuan vulkanik juga dapat difungsikan efektif sebagai bahan pengapuran (*liming material*), pembenah atau peremaja (*rejuvenating agent*) tanah yang sudah sangat miskin hara atau terdegradasi berat.

Manfaat batuan vulkanik makin luas jika dikaitkan dengan kandungannya unsur silikat (Si) yang tinggi. Seperti disampaikan oleh banyak peneliti, antara lain ditelaan oleh Martin (2013), Price et al (2013), dan Farooq & Dietz (2015), silikat sangat penting hubungannya dengan kesehatan manusia; silikat berperan penting pada kinerja otot dan organ lain termasuk kuku, rambut, dan tulang manusia maupun hewan. Artinya, pemanfaatan batuan silikat atau vulkanik sebagai pupuk dapat meningkatkan kadar Si pada produk pertanian yang dikonsumsi oleh manusia dan hewan. Jadi, penerapan konsep agrogeologi secara tidak langsung juga berperan penting dalam meningkatkan kesehatan manusia melalui pemenuhan kebutuhan manusia akan asupan Si dan unsur hara mineral lainnya.

Berdasarkan kelebihan dari penggunaan batuan sebagai pupuk dan amelioran tersebut, penerapan konsep agrogeologi secara luas sangat potensial berkontribusi signifikan dalam menyelesaikan banyak masalah pertanian dan lingkungan yang kita hadapi saat ini termasuk kesehatan masyarakat. Sebagai cabang ilmu atau kajian yang relatif baru dalam bidang pertanian, riset pengembangan dan promosi penerapan agrogeologi ke depan perlu dilakukan lebih intensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Shahzad, M. A., Basra, S. H., et al. 2012. Salt Stress Alleviation in Field Crops through Nutritional Supplementation of Silicon. *Pakistan J. Nutr.*, 11 (8): 637-655.
- Allen, B.L. & Hajek, B.F. 1989. Mineral Occurance in Soil Environment. In: Dixon, B.J. & Weed, S.B. (Eds.). *Mineral in Soil Environemnt*. 2nd ed. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin.
- Amrhein, C. & Suarez, D.L. 1988. The Use of a Surface Complexion Model to Describe the Kinetics of Ligand-Promoted Dissolution of Anorthite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2785 -2793.
- Anggria, L., Husnain, Kuniaki, S. et al. 2017. Release of Silicon from Silicate Materials and Its Uptake by Rice Plant. *Indonesian J. Agr. Sci.* 18: 69 – 76.
- Appleton, J.D. 1990. Rock and Mineral Fertilizers. *Appropriate Tech.* 17: 25 – 27.
- Appleton, J.D. 1994. Direct-Application Fertilizer and Soil Amendments – Appropriate Technology for Developing? In: Howart, R.W., Stewart, J.W.B. & Ivanov, M.V. (eds.). *Sulphur Cycling on the Continents: Wetlands, Tereestrial Ecosystems, and Associated Water Bodies*. SCOPE 48., Wiley & Sons. NY. pp. 27 – 61.

- Artyszak, A. 2018. Effect of Silicon Fertilization on Crop Yield Quantity and Quality-A Literature Review in Europe. *Plants* 7(54): 1 – 17.
- Barańska, M., Rempelosa, L., Iversenb, P.O. et al. 2017. Effects of organic food consumption on human health; the jury is still out!. *Food & Nutr. Res.*, 61(1):1-5.
- Barman, A.K., Varadachari, C. & Ghosh, K. 1992. Weathering of Silicate Minerals by Organic Acids. I. Nature of Cation Solubilisation. *Geoderma* 53: 45 – 63.
- Barak, P., Chen, Y. & Singer, A. 1983. Ground Basalt and Tuff as Iron Fertilizers for Calcareous Soils. *Plant and Soil* 73: 155 – 158.
- Bakken, A.K., Gautneb, H. & Myhr, K. 1997. The Potential of Crushed Rocks and Mine Tailings as Slow-Releasing K Fertilizers Assessed by Intensive Cropping with Italian ryegrass in Different Soil Types. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47: 41 – 48.
- Bakken, A.K., Gautneb, H., Sveistrup, T. et al. 2000. Crushed Rocks and Mine Tailings Applied as K Fertilizers on Grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56: 53 – 57.
- Barański, M., Tober, D. S., Volakakis, N. et al., 2014. Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses. *British J.Nutr.* 112(05): 794 - 811.
- Badgley, C. Moghtader, J., Quintero, E. et al. 2007. Organic Agriculture and the Global Food Supply. *Renew. Agr. Food Syst.* 22: 86 -108.

- Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P. et al. 2018. Farming with Crops and Rocks to Address Global Climate, Food and Soil Security. *Nature Plants* 4: 138–147.
- Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et.al. 2020. Potential for Large-Scale CO₂ Removal via Enhanced Rock Weathering with Croplands. *Nature*, 583: 242 – 248.
- Bennett, P.C. 1991. Quartz Dissolution in Organic-Rich Aqueous Systems. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55: 1781-1791.
- Bennett, W.F. 1993. Plant Nutrient Utilization and Diagnostic Plant Symptoms. In: Bennett, W.F. (Ed.). *Nutrient Deficiencies & Toxicities in Crop Plants*. APS Press, The American Phytopathological Society, St Paul Minnesota. pp. 1 – 7.
- Binett, W. 2021. New UC Davis Center Paves the Way for Rock Dust Research. An Online News in Remineralize the Earth (February 14, 2021). <https://www.remineralize.org/2021/02/university-of-california-researches-large-scale-remineralization/> (downloaded: June 9, 2021)
- Blake, R.E. & Walter, L.M. 1999. Kinetics of Feldspar and Quartz Dissolution at 70 - 80o C and Near-Neutral pH: Effects of Organic Acids and NaCl. *Geochim. Cosmochim. Acta* 63: 2043 – 2059.
- Bloom, P.R. & Erich, M.S. 1987. Effect of Solution Composition on the Rate and Mechanism of Gibbsite Dissolution in Acid Solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1131 – 1136.
- Bolland, M.D.A. & Baker, M.J. 2000. Powdered Granite is Not an Effective Fertilizer for Clover and Wheat in Sandy Soils from Western Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56: 59 – 68.

- Bohn, H.B, McNeal, B. & O'Connor, G. 1985. Soil Chemistry. 2nd edition. Wiley-Interscience, Chechester.
- Bhatt, D & Sharma, G. 2018. Role of Silicon in Counteracting Abiotic and Biotic Plant Stresses. *Int. J. Chem. Studies*. 6(2): 1434 – 1442.
- Brandt, K. & Mølgaard, J. P. 2001. Organic Agriculture: Does It Enhance or Reduce the Nutritional Value of Plant Foods? *J. Sci. Food Agr.* 81: 924–931.
- Campe, J. 1991. Remineralize the Earth. A Network Newsletter. <https://www.Remine-ralize.org>
- Campe, J. 2013. The Potential of Remineralization as a Global Movement: History, current developments and potential future directions to address ecological and social challenges on a regional and global scale. Presentation in the Second Brazilian “Rochagem” Conference. <https://www.remineralize.org/2013/10/high-lights-from-the-2013-ii-brazilian-rochagem-conference>
- Chandini, Kumar, R., Kumar, R., et al. 2019. The Impact of Chemical Fertilizers on Our Environment and Ecosystem. In: Sherma, P. (Ed.). *Research Trends in Environmental Sciences*, Chapter 5: 69 – 85.
- Chesworth, W. 1982. Late Cenozoic Geology and the Second Oldest Profession. *Geoscience Canada* 9: 54 – 61.
- Chesworth, W., Vasquez, F. M., Acqueye, D. et al. 1983. Agricultural Alchemy: Stone into Bread. *Episodes* 1: 3 – 7.
- Chesworth, W., van Strateen, P., Semoka, J. et al. 1985. Agrogeology in Tanzania. *Episodes* 8: 257 – 258.

- Chesworth, W., van Strateen, P., Smith, P. et al. 1987. Solubility of Apatite in Clay and Zeolite Bearing Systems: Application to Agriculture. *Appl. Clay Sci.* 2: 291 – 297.
- Chesworth, W. 1993. The First Twenty-Nine Days: Prospects for Agrogeology. In: Pride, C. & van Strateen, P (Eds.). *Agrogeology and Small-Scale Mining*. Small Mining International, Bulletin 5 – 6: 2–3.
- Coventry, R.J., Gillman, G.P., Burton, M.E., et al. 2001. Rejuvenating Soils with Minplus™, a Rock Dust and Soil Conditioner to Improve the Productivity of Acidic, Highly Weathered Soils'. (A Report for RIRDC: Townsville, Qld).
- Coroneos, C., Hinsinger, P. & Gilkes, R.J. 1996. Granite Powder as a Source of Potassium for Plants: A Glasshouse Bioassay Comparing Two Pasture Species. *Fert. Res.* 45: 143 – 152.
- Driscoll, C.T., van Breemen, N. & Mulder, J. 1985. Aluminum Chemistry in a Forested Spodosol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 437-444.
- de Villiers, O.H. 1961. Soil Rejuvenation with Crushed Basalt in Mauritius. *Int. Sugar. J.* 63, 363 – 364.
- De Ponti, T., Rijk, B. & van Ittersum, M. K. 2012. The Crop Yield Gap Between Organic and Conventional Agriculture. *Agr. Syst.* 108: 1–9.
- Eick, M.J., Grossl, P.R., Golden, D.C. et al. 1996. Dissolution of a Lunar Basalt Simulant as Affected by pH and Organic Anions. *Geoderma* 74: 139 – 160.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 641 – 664.

- FAO. 1989. The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of UN. Rome.
- FAO - Committee on Agriculture (COAG). 1999. Based on Organic agriculture. Rome on 25-26 January 1999
- Farooq, M.A. & K.J. Dietz. 2015. Silicon as Versatile Player in Plant and Human Biology: Overlooked and Poorly Understood. *Frontier in Plant Sci.*, 6: 1 – 14.
- Feigenbaum, S., Edelstein, R. & Shainberg, I. 1981. Release Rate of Potassium and Structural Micaceous to Ion Exchangers in Dilute Solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 501 – 506.
- FiBL & IFOAM, 2020. Forword from FiBL and IFOAM. In: Willer, H., Schlatter, B., Trávníček, Kemper, L. & Lernoud, J. (Eds.). The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2020.
- Fyfe, W.S., Kronberg, B.I., Leonardos, O.H., & Olorunfemi, N. 1983. Global Tectonics and Agriculture: A Geochemical Perspective. *Agr. Ecosyst. Env.* 9: 383 – 399.
- Fyfe, W.S. 1987. Sustainable Food Production and Agrogeology. In. Pride, C. & van Strateen, P. (eds.), *Agrogeology and Small Scale Mining. Small Mining Intern. Bull.* 5-6: 4 – 5.
- Fyfe, W.S. 1989. Soil and Global Change. *Episodes* 12: 249 – 254.
- Fyfe, W.S. 2000. Truly Sustainable Development for a Positive Future: the Role of the Earth Sciences. *Trends in Geochemistry* 1: 125 – 132.
- Garcia, F.G., Abrio, M.T.R. & Rodziguez, M.G. 1991. Effects of Dry Grinding on Two Kaolins of Different Degree of Crystallinity. *Clay Min.* 26: 549 – 565.

- Gillman, G.P. 1980. The Effect of Crushed Basalt Scoria on the Cation Exchange Properties of a Highly Weathered Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 465 – 468.
- Gillman, G.P., Burkett, D.C. & Coventry, R.J. 2001. A Laboratory Study of Application of Basalt Dust to Highly Weathered Soils: Effect on Soil Cation Chemistry. *Aust. J. Soil Res.* 39: 799 – 811.
- Gillman, G.P., Burkett, D.C. & Coventry, R.J. 2002. Amending Highly Weathered Soils with Finely Ground Basalt Rock. *Applied Geochem.* 17: 987 – 1001.
- Gopalakrishnan, R. 2019. Advantages and Nutritional Value of Organic Food on Human Health. *IJTSRD*, 3(4): 2456 - 6470.
- Harley, A.D. & Gilkes, R.J. 2000. Factors Influencing the Release of Nutrient Elements from Silicate Rock Powders: a Geochemical Overview. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems* 56: 37 – 44.
- Harley, A.D. 2002. Evaluation and Improvement of Silicate Mineral Fertilizers. (Ph.D thesis: The University of Western Australia).
- Hensel, J. 1884. Bread from Stone: A New Rational System of Land Fertilization and Physical Regeneration. Reprint: Soil and Health Library (2009), TRI-STATE PRESS, Long Creek, South Carolina, USA.
- Hinsinger, P., Elsass, F., Jaillard, B. et al. 1993. Root-Induced Irreversible Transformation of a Trioctahedral Mica in the Rhizosphere of Rape. *J. Soil Sci.* 44: 535 – 545.

- Hinsinger, P., Bolland, M.D.A. & Gilkes, R.J. 1996. Silicate Rock Powder: Effect on Selected Chemical Properties of a Range of Soils from Western Australia and on Plant Growth as Assessed in a Glasshouse Experiment. *Fert. Res.* 45: 69 – 79.
- Horton, P., Long, S.P., Smith, P. et al. 2021. Technologies to Deliver Food and Climate Security through Agriculture. *Nat. Plants* 7: 250–255.
- Huang, W.H. & Keller, W.D. 1970. Dissolution of Rock-Forming Silicate Minerals in Organic Acids: Simulated First-Stage Weathering of Fresh Mineral Surfaces. *Am. Mineralogist* 55: 2076 – 2094.
- Huang, W.H. & Kiang, W.C. 1972. Laboratory Dissolution of Plagioclase Feldspars in Water and Organic Acids at Room Temperature. *Am. Mineralogist* 57: 1849 – 1859.
- Huber, D.H. & Haneklaus, S. 2007. Managing Nutrition to Control Plant Disease. *Landbauforschung Völkenrode*, 4(57): 313 - 322
- Hossain, K.A., Horiuci, T. & Miyagawa, S. 2001. Effects of Silicate Materials on Growth and Grain Yield of Rice Plants Grown in Clay Loam and Sandy Loam Soils. *J. Plant Nutr.* 24(1): 1 – 13
- IFOAM, 2008. IFOAM Approved Principles of Organic Agriculture. <https://www.ifoam.bio/principles-organic-agriculture-brochure>
- IFOAM. 2008. Definision of Organic Agriclture. <https://www.ifoam.bio/why-organic/organic-landmarks/definition-organic>

- IFOAM.- IFOAM Standard. <https://www.ifoam.bio/our-work/how/standards-certification/organic-guarantee-system/ifoam-standard>
- Jenny, H. 1941. Faktors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology. Dover Publ. Inc., New York
- Jones, D.L. 1998. Organic Acids in the Rhizosphere – A Critical Review. *Plant and Soil* 205: 25 – 44.
- Kelland, M.E., Wade, P.W., Lewis, A.L. et al. 2020. Increased Yield and CO₂ Sequestration Potential with the C₄ Cereal Sorghum Bicolor Cultivated in Basaltic Rock Dust-Amended Agricultural Soil. *Global Change Biol.* 26: 3658 – 3676.
- Keller, W.D. 1948. Native Rocks and Minerals as Fertilizers. *Science Monthly* 66: 122 – 130.
- Keller, W.D., Balgord, W.D. & Reesman, A.L. 1963. Dissolved Products of Artificially Pulverized Silicate Minerals and Rocks. *J. Sediment Petrol.* 3: 191 – 204.
- Klein, C. & Philotts, A.R. 2013. Earth Materials: Introduction to Mineralogy and Petrology. Cambridge Univ. Press.
- Krzic, M., Zabek, L., C.E. Bulmer, C.E. et al. 2009. Soil Properties and Lodgepole Pine Growth on Forest Landings Rehabilitated by Tillage and Fertilizer Application. *Can. J. Soil Sci. - Special issue on Forest Soil Disturbance* 89:25 - 34.
- Lernaud, J & Willer, H. 2019. Organic Agriculture Worldwide: Key Results from the FiBL Survey on Organic Agriculture Worldwide 2019. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Part 2: Land Use and Key Crops in Organic Agriculture 2017.

- Leonardos, O.H., Fyfe, W.S. & Kronberg, B.I. 1987. The Use of Ground Rocks in Laterite Systems: An Improvement to the Use of Conventional Fertilizers? *Chem. Geol.* 60, 361 – 370.
- Leonardos, O.H., Theodoro, S.H. & Assad, M.L. 2000. Remineralization for Sustainable Agriculture: A Tropical Perspective from a Brazilian Viewpoint. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56: 3 – 9.
- Lim, H.H., Gilkes, R.J. & McCormick, P. 2003. Beneficiation of Rock Phosphate Fertilizers by Mechano-Milling. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67: 177 – 186.
- Ludwig, C., Devidal, J.L. & Casey, W.H. 1996. The Effect of Different Functional Groups on the Ligand-Promoted Dissolution of NiO and Other Oxide Minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60: 213 – 224.
- Lundström, V. & Öhman, L.O. 1990. Dissolution of Feldspars in the Presence of Natural Organic Solutes. *J. Soil Sci* 41: 35 – 50.
- Ma, J.F. & Takahashi, E. 2002. Soil, Fertilizers, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier, Amsterdam, Netherland.
- Ma, J.F., Yamaji, N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cell. Mol. Life Sci.* 65: 3049–3057.
- Marschner, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press: London.
- Martin, K.R. 2013. Silicon: The Health Benefits of a Metalloid. *Met. Ions Life Sci.* 13: 451–473.
- Mathers, S.J. 1994. Industrial Mineral Potential in Uganda. In: Mathers, S.J. & Notholt, A.J.G. (Eds.). *Industrial Minerals in Developing Countries. AGID Geosci. in Intern. Dev.* 18: 144 – 166.

- Mie, A., Andersen, H.R., Gunnarsson, S. et al. 2017. Human Health Implications of Organic Food and Organic Agriculture: A Comprehensive Review. *Env. Health* 16: 1 - 22.
- Mei, A. & Wivstad, M. 2015. Organic Food - Food Quality and Potential Health Effects, a Review of Current Knowledge, and A Discussion of Uncertainties. SLU, EPOK – Centre for Organic Food & Farming, Sweden.
- Oelkers, E.H. & Gislason, S.R. 2001. The Mechanism, Rates and Consequences of Basaltic Glass Dissolution: I. An Experimental Study of the Dissolution Rates of Basaltic Glass as a Function of Aqueous Al, Si and Oxalic Acid Concentration at 250 C and pH = 3 and 11. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65: 3671-3681.
- Oklima, A.M. 2008. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Cair terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung dan Kacang Tanah di Lahan Kering Pasiran Lombok Utara, NTB (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram).
- Pidwiny, 2007. Composition of Rocks. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10d.html>
- Ponisio, L.C., M'Gonigle, L.K., Mace, K.C. et al. 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc. Royal Soc. B* 282: 20141396. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>.
- Price, C. T., Koval, K.J. & Langford, J.R. 2013. Silicon: A Review of Its Potential Role in the Prevention and Treatment of Postmenopausal Osteoporosis. *Int. J. Endocrinology*: 1 – 6.
- Prijatna, S., Priyono, J. & Gunarsa, I.G.E., 2007. Faktor Determinan Sifat Tanah dalam Reaksi Pelarutan Unsur Hara dari Pupuk Batuan Silikat. *Lap. Pen. Fundamental. Dirjen DIKTI*.

- Priyono, J. 1991. Micronutrient Content and Release, Mineralogy and Chemical Properties of Some Residual Soils and Rocks in Alabama. (M.Sc. Thesis: Auburn University, Alabama, USA).
- Priyono, J. 2005a. The Effect of High Energy Milling on the Performance of Silicate Rock Fertilizers. (Ph.D. Thesis: The University of Western Australia).
- Priyono, J. 2005b. Kimia Tanah. Mataram Univ. Press., Mataram NTB.
- Priyono, J., Sutriyono, R. & Arifin, Z. 2007. Penggunaan SROF (Silicate Rock-Organic Fertilizer) Sebagai Sumber Hara Tanaman dalam Rangka Pengembangan Pertanian Berkelanjutan and Ramah Lingkungan: Evaluasi Potensi Beberapa Jenis Batuan Silikat di Indonesia sebagai Sumber Hara Tanaman dan Pembenh Tanah. Lap. Pen. HB. Dirjen DIKTI.
- Priyono, J., 2008. Effect of Ball Milling under Various Conditions on Several Physicochemical Properties of Rock Phosphate Fertilizer. *J. Soil and Chlimate (J. Tanah dan Iklim)* 25: 37 – 44.
- Priyono, J., Rahardjo, C.K., & Rahmiana, A. 2010. Remediating the Degraded Land Due to Mining of Pumice Stone in the Northern Part of Lombok Island by Applying Silicate Rock-Organic Fertilizer. Proceeding of ICSAFA Int. Conf. Bandung.
- Priyono, J., Gilkes, R.J. & McCormick, P. 2002. The Use of High-Energy Milling with Reactive Additives to Improve the Release of Nutrients from Silicate Rock Fertilizers. Proceeding of 17th WCSS, Bangkok.
- Priyono, J. & Gilkes, R.J. 2004. Dissolution of Milled-Silicate Fertilizers in Soil. *Australian J. Soil Res.* 42: 441 – 448.

- Priyono, J. & Gilkes, R.J. 2008a. Dissolution Kinetics of Milled-Silicate Fertilizers in Organic Acid. *J. Tropical Soil*. 13: 1 – 10.
- Priyono, J. & Gilkes, R.J. 2008b. Organic Matter Improve the Effectiveness of Rock Fertilizers: a Glasshouse Assessment. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 358 – 369.
- Priyono, J., Sutriyono, R. & Arifin, Z. 2009. Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from Four Volcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant. *J. Tropical Soils* 14: 1- 8.
- Priyono, J. & Arifin, Z. 2012. Adding Organic Matter Enhanced the Effectiveness of Silicate Rock Fertilizer for Food Crops Grown on Nutritionally Disorder Soils: A Glasshouse Assessment. *J. Tropical Soils* 7: 97-104.
- Priyono, J. & Muthahanas, I. 2010. Pengembangan Biopesticidal Fertilizer Berbasis Sumber daya Alam Lokal untuk Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan. Lap. Penel. HB. I, LPPM Unram., Mataram, NTB.
- Priyono, J. & Muthahanas, I. 2011. Pengembangan Biopesticidal Fertilizer Berbasis Sumber daya Alam Lokal untuk Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan. Lap. Penel. HB. II, LPPM Unram., Mataram, NTB.
- Priyono, J. 2017. Kompilasi Hasil Uji Efektivitas Pupuk Orrin pada Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan Tahun 2014 – 2017. (data tidak dipublikasikan).
- Priyono, J., Tanaya, I.G.M.P, & Ningsih, M. 2020. Foliar Application of Liquid-Silicate Rock Fertilizer Reduced Pest and Disease Attacks and Improved Bean Production of Cocoa. *J. Agr. Crops* 6(5): 68-72.

- Priyono, J. & Sudharmawan, A.A.K. 2020. Seed Coating with Organomineral Fertilizer, an Alternative Method to Improve the Efficiency of Farming. *Asian Res. Agr. J.* 12(1): 12 – 17.
- Priyono, J., Djajadi, Hidayati, N.S., et al. 2020. Silicate Rock-Based Fertilizers Improved the Production of Sugarcane Grown on Udipsamments Kediri, East Java, Indonesia. *Int. J. App. Agr. Sci.* 6(2): 16 – 20.
- Rahmi, 2009. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Granular dan Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan dan Hasil Jagung (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram).
- Reganold, J.P. & Wachter, J.M. 2016. Organic Agriculture in the Twenty-First Century. *Natural Plant* 2: 1 – 8.
- Rehm, G., Munter, R. Rosen, C. & Schmitt, M. 2002. Lime Needs in Minnesota. Publ. FO-05956-GO. University of Minnesota Extension Service.
- Ross, S. 1989. Soil Processes, a Systematic Approach. Routledge, London.
- Sahnun, 2012. Pertumbuhan dan Produksi Kacang Tanah dari Benih Berlapis Pupuk Organomineral (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram).
- Sanyu, F.K. & Azuba, M.S. 1996. Indegenous Farming in Uganda. Book of Abstracts. 11th IFOAM Scientific Conference, 11-15 August 1996. Copenhagen, Denmark
- Sanz-Scovino, J.I. & Rowell, D.L. 1988. The use of feldspars as potassium fertilizers in the savannah of Columbia. *Fert. Res.* 17: 71 – 83.
- Seufert, V., Ramankutty, N. & Foley, J. A. 2012. Comparing the Yields of Organic and Conventional Agriculture. *Nature* 485: 229–232.

- Shotyk, W. & Nesbitt, H.W. 1992. Incongruent and Congruent Dissolution of Plagioclase Feldspar: Effect of Feldspar Composition and Ligand Complexation. *Geoderma* 55: 55-78.
- Sofyan. 2008. Pengaruh Bubuk Batuan Silikat terhadap pH dan KTK Tanah Masam. (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram)
- Soil Survey Staffs. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th edition. USDA, NRCS.
- Stanhill, G. 1990. The Comparative Productivity of Organic Agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 30: 1-26.
- Stevenson, F.J. 1967. Nitrogen: Element and Geochemistry. In: Fairbridge, R.W. (Ed.). The Encycloedia of Geochemistry and Environmental Sciences. Vol IVA. Dowden.
- Stevenson, F. J., and M. S. Arkadani. 1972. Organic Matter Reactions Involving Micronutrients in Soils. In: Mortvedt et.al. (Eds.). Micronutrients in Agriculture, SSSA, Madison, Wisconsin.
- Strömberg, B. & Banwart, S.A. 1999. Experimental Study of Acidity-Consuming Processes in Mining Waste Rock: Some Influences of Mineralogy and Particle Size. *App. Geochem.* 14: 1 - 16.
- Stumm, W. & Furrer, G. 1987. The Dissolution of Oxides and Aluminum Silicates: Examples of Surface Coordination-Controlled Kinetics. In: Stumm, W. (ed.). Aquatic Surface Chemistry. Wiley-Interscience, New York.
- Sugiyama, K., Filio, J.M., Saito, F & Waseda, Y. 1994. Structural Change of Kaolinite and Pyrophyllite Induced by Dry Grinding. *Mineralogical J.* 17: 28 - 41.

- Sumarlin, 2008. Evaluasi Efektivitas Bubuk Batuan Basalt Sebagai Amelioran Tanah Garaman. (Skripsi S-1: Jurusan Ilmu Tanah. Fakultas Pertanian Universitas Mataram).
- Suraj, G., Iyer, C.S.P., Rugmini, S. & Lalithambika, M. 1997. The Effect of Micronization on Kaolinites and Their Sorption Behaviour. *App. Clay Sci.* 12: 111 – 130.
- TAC-CGIAR. 1988. Sustainable Agricultural Production: Implications for International Agricultural Research. CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) Meeting, Berlin, Germany.
- van Strateen, P & Pride, C. 1993. Agrogeological Resources for Small Scale Mining. In: Pride, C. & van Stateen, P (eds). *Agrogeology and Small Scale Mining. Small Mining Intern. Bull.* 5-6: 5 – 9.
- van Strateen, P., 2007. *Agrogeology: The Use of Rock for Crops.* Enviroquest Ltd., Cambridge, Ontario, Canada.
- Volk, R.J., Kahn, R.P. & Weintraub, R.L. 1958. Silicon Content of the Rice Plant as a Factor Influencing Its Resistance to Infection by Blast Fungus, *Piricularia Oryzae.* *Phytophatology* 48: 179 – 659.
- Welch, S.S. & Ullman, W.J. 1996. Feldspar Dissolution in Acidic and Organic Solutions: Compositional and pH Dependence of Dissolution Rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60: 2939 - 2948.
- Weerasuriya, T.J., Pushpakumara, S. & Cooray, P.I. 1993. Acidulated Pegmatic Mica: A Promising New Multi-Nutrient Mineral Fertilizer. *Fert. Res.* 34: 67 – 77.

- Wieland, E., Wehrli, B. & Stumm, W. 1988. The Coordination Chemistry of Weathering: III. A Generalization on the Dissolution Rates of Minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52: 1969-1981.
- Worthington, V. 1998. Effect of Agricultural Methods on Nutritional Quality: A Comparison of Organic with Conventional Crops. *Alter. Theraphy Health Med.* 4(1): 58 – 69.
- Worthington, V. 2001. Nutritional Quality of Organic versus Conventional Fruits, Vegetables, and Grains. *J. Alter. Complem. Med.* 7: 161–173.
- Yulianti, 2009. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Granular dan Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan dan Hasil Padi (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram).
- Zhang, H. & Bloom, P.R. 1999. Dissolution Kinetics of Hornblende in Organic Acid Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 815 - 822.
- Zukron, 2012. Pertumbuhan dan Produksi Jagung dari Benih Berlapis Pupuk Organomineral (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram).

AGROGEOLOGI

Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran

Joko Priyono

AGROGEOLOGI: Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran merupakan gabungan multi disiplin ilmu geologi dan pertanian, khususnya tentang pemanfaatan bahan geologis – mineral dan batuan untuk memenuhi kebutuhan usaha tani (pupuk dan amelioran) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Isi dalam buku ini dibagi dalam 8 bab utama. Bab 1 menjelaskan pengertian tentang agrogeologi, sejarah perkembangannya, dan garis besar penerapannya; dilanjutkan Bab 2 tentang unsur hara tanaman dan permasalahannya. Bab 3 mendiskusikan bahan geologis (mineral dan batuan) beserta karakteristiknya, khususnya yang mempengaruhi sifat tanah dan pemanfaatannya untuk pertanian; sedangkan Bab 4 menjelaskan tentang pelarutan unsur hara dari batuan, sebagai landasan pengembangan teknologi pemanfaatan batuan sebagai pupuk dan amelioran. Bab 5 berbicara tentang aspek pedologis - fungsi batuan sebagai bahan induk tanah mineral yang sangat menentukan ciri dan sifat tanah sebagai media tumbuh tanaman. Bab 6 menjelaskan tentang pupuk dan amelioran secara umum, sedangkan Bab 7 dibicarakan secara khusus mengenai perkembangan teknologi pupuk dan amelioran berbasis batuan silikat. Tulisan ini ditutup dengan Bab 8, mendiskusikan tentang peran agrogeologi dalam pewujudan sistem pertanian berkelanjutan dengan contoh



Penulis:

Ir. Joko Priyono, M.Sc., Ph.D (e-mail: jokotahanunram@gmail.com)
Dosen Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram
Jalan Pendidikan 34 Mataram, P. Lombok, NTB.

Pendidikan Tinggi:

S-1: Departemen Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, IPB-Bogor, 1978 – 1982.
S-2: Soil & Agronomy Department, Auburn University, AL, USA, 1989-1991.
S-3: Faculty of Natural and Agricultural Sciences, The University of Western
Australia, Perth, AU. 2000 – 2005.

Mata Kuliah yang Diampu:

Agrogeologi, Mineralogi, Morfologi dan Klasifikasi Tanah, Geomorfologi, Kimia Tanah, Survei dan Evaluasi Lahan

Bidang Riset Utama:

- Pengembangan pupuk dan amelioran berbasis bahan geologis (batuan silikat).
- Optimalisasi sumber daya alami lokal untuk pertanian.
- Penerapan teknologi nano pada bidang pertanian/ilmu tanah

Paten:

- Pupuk Batuan Silikat Cair dan Metode Pembuatannya.
- Benih Tanaman Padi Berlapis Pupuk Organomineral.
- Mesin *Ball Mill* Horizontal.
- Pupuk Multi Nutrisi Berbasis Batuan Silikat