
AGROMINERALOGI
(Mineralogi untuk Ilmu Pertanian)

DR. IR. I WAYAN WARMADA
IR. ANASTASIA DEWI TITISARI, M.T.

Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik UGM
Jl. Grafika No. 2 – Bulaksumur
Yogyakarta 55281

2004

Buku ini disunting dan dilayout dengan program LyX dan L^AT_EX 2_ε.

Gambar dan bagan disunting dengan program GIMP dan Xfig.

Agromineralogi
(Mineralogi untuk Ilmu Pertanian)

[TKG23.. / 3 SKS]

I Wayan Warmada & Anastasia Dewi Titisari

2004

Kata pengantar

Buku ini dibuat sebagai buku pembelajaran untuk matakuliah mineralogi khusus untuk mahasiswa ilmu pertanian atau bagi pembaca yang tertarik untuk mempelajari hubungan antara mineralogi, geologi dan tanah. Buku ini dibagi menjadi 7 Bab, mulai dari pendahuluan, kristalografi, mineralogi, agromineral, agromineral I dan II, dan batuan.

Pembuatan buku ini tidak terlepas dari dukungan dari Proyek Peningkatan Kualitas Jurusan dan Program Studi – Hibah Sistem Perencanaan Penyusunan Program dan Penganggaran (Hibah – SP4) Ditjend DIKTI – Depdiknas tahun anggaran 2004 pada Jurusan Teknik Geologi FT UGM.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak baik yang secara langsung maupun tidak langsung membantu, di antaranya: Anto dan Wanni yang telah menscan beberapa gambar.

Yogyakarta, November 2004

Penyusun

Daftar Isi

1	Pendahuluan	1
1.1	Pengantar geologi untuk pertanian	2
1.2	Definisi mineral dan agromineral	2
1.3	Hubungan antara mineral – batuan – tanah – tanaman	3
2	Kristalografi	5
2.1	Kimia kristal	6
2.2	Sistem kristal	7
2.2.1	Sistem isometrik	7
2.2.2	Sistem tetragonal	7
2.2.3	Sistem rombis	8
2.2.4	Sistem heksagonal	8
2.2.5	Sistem trigonal	10
2.2.6	Sistem monoklin	10
2.2.7	Sistem triklin	12
2.3	Unsur-unsur simetri kristal	12
2.3.1	Bidang simetri	13
2.3.2	Sumbu simetri	13
2.3.3	Pusat simetri	14
2.4	Klasifikasi kristal	14

3	Mineralogi	15
3.1	Kimia mineral	15
3.2	Sifat-sifat fisik mineral	19
3.3	Sistematika mineral	24
4	Agromineral	27
5	Agromineral I: Nutrisi makro	29
5.1	Nitrogen	30
5.2	Fosfor	32
5.3	Potasium	35
5.4	Karbon	38
5.5	Kalsium	41
5.6	Magnesium	43
5.7	Belerang	45
6	Agromineral II: Nutrisi mikro	49
6.1	Boron	50
6.2	Tembaga	52
6.3	Besi	52
6.4	Klor	53
6.5	Mangan	53
6.6	Molibdenum	55
6.7	Seng	56
6.8	Perlit	56
6.9	Zeolit	57
7	Batuan sebagai bahan induk tanah	59
7.1	Macam-macam bebatuan	61
7.1.1	Batuan beku	61
7.1.2	Batuan sedimen	64
7.1.3	Batuan metamorf	68
7.2	Pelapukan dan alterasi pada batuan	71

Daftar Gambar

2.1	Sistem kubik	7
2.2	Sistem tetragonal	8
2.3	Sistem ortorombik	9
2.4	Sistem heksagonal	9
2.5	Sistem trigonal	10
2.6	Sistem monoklin	11
2.7	Sistem triklin	12
3.1	Belahan tiga arah pada gipsum	22
3.2	Pecahan konkoidal pada beril	23
3.3	Beberapa kebiasaan mineral dan asal mulanya	25
5.1	Sumber nitrogen dari bumi	32
5.2	Apatit dengan sistem kristal heksagonal	34
5.3	Siklus fosfor marin	35
5.4	Aspek permukaan siklus karbon jangka panjang	39
5.5	Magnesit berstruktur trigonal	46
5.6	Belerang murni dalam bentuk kristal ortorombik	47
5.7	Kristal gipsum dengan struktur kristal monoklin	48
6.1	Borak dengan sistem kristal monoklin	51
6.2	Halit dengan sistem kristal kubik	54

7.1	Contoh batuan kristalin	60
-----	-----------------------------------	----

7.2	Seri reaksi Bowen	62
-----	-----------------------------	----

Bab 1

Pendahuluan

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab ini akan menjelaskan gambaran umum mengenai mineral, batuan dan agromineral yang akan dibahas pada bab-bab selanjutnya. Subbab pertama akan membahas mengenai pengenalan geologi untuk pertanian, yang akan diikuti definisi mineral dan agromineral, serta hubungan antara mineral, batuan dan tanaman.

Eksplorasi mineral telah dimulai ribuan tahun yang lalu, pertambangan barangkali merupakan profesi tertua. Manusia menggunakan mineral awalnya untuk zat pewarna, dan batuan untuk penghalusan dan pemotong. Pada batuan silikat terdapat lebih dari 100 jenis mineral dan unsur-unsur jarang yang berguna untuk semua jenis kehidupan dan pembentukan kesuburan tanah (Manning, 1995).

Saat ini di banyak tempat tanah mengalami pemiskinan unsur hara, sehingga menjadi tidak subur untuk tanaman. Sehingga dibutuhkan suatu teknik untuk mengembalikan kesuburan tanah, seperti teknik pemineralan kembali pada tanah (*soil remineralization, SR*). SR menciptakan tanah-tanah subur dengan cara mengembalikan mineral-mineral ke dalam tanah secara alami, seperti selama jaman es, glasier menghancurkan batuan menjadi tanah, angin meniup

debu sehingga membentuk lapisan tipis halus melingkupi seluruh permukaan bumi (Anonim, 2003a; 2003b).

1.1 Pengantar geologi untuk pertanian

Ilmu geologi tidak dapat dipisahkan dari ilmu-ilmu yang berhubungan secara langsung dengan bumi. Geologi mempelajari segala aspek yang berhubungan dengan bumi, seperti batuan, kegempaan, gunungapi, geologi teknik. Bagi ilmu pertanian, mengenal bebatuan dan mineral merupakan basis untuk memahami lebih lanjut tentang tanah dan proses pembentukannya.

Ada tiga aspek utama yang dipelajari di geologi, yaitu petrologi, stratigrafi dan struktur geologi. Geomorfologi mempelajari bentuk permukaan yang menjadi cerminan dari ketiga aspek utama tersebut.

Petrologi mempelajari tentang semua aspek bebatuan (beku, sedimen dan malihan), dari komponen penyusun batuan (mineralogi), macam-macam batuan, dan asal mula (petrogenesis). Stratigrafi mempelajari proses pengendapan serta urutan pengendapan dari suatu batuan sedimen, sedangkan struktur geologi mempelajari proses deformasi setelah batuan terbentuk, meliputi perlipatan, patahan dan kekar/retakan.

Pengetahuan dasar ini merupakan basis untuk mempelajari proses terhadap bahan di alam (bebatuan). Seperti telah diketahui, lapisan tanah terbentuk oleh hasil ubahan batuan dasar, baik oleh karena ubahan mekanis (fisika) maupun kimiawi (hidrolisis).

1.2 Definisi mineral dan agromineral

Suatu mineral dapat didefinisikan sebagai suatu ikatan kimia padat yang terbentuk secara alamiah dan termasuk di dalamnya materi geologi padat yang menjadi penyusun terkecil dari batuan (Klein & Hurlbut, 1993). Nickel (1995, dalam Hibbard, 2002) mendefinisikan mineral sebagai suatu unsur atau senyawa kimia yang biasanya berbentuk kristal dan merupakan hasil dari proses-proses geologi. Pemakaian kata “biasanya” memberikan fleksibilitas dalam definisi dan memungkinkan klasifikasi beberapa substansi amorf

atau paraamorf sebagai mineral. Meskipun sebagian besar mineral adalah anorganik, kristal-kristal organik yang terbentuk dari material organik pada lingkungan geologi juga dapat dikelompokkan sebagai mineral (Nickel, 1996 dalam Hibbard, 2002).

Agromineral adalah mineral-mineral yang bermanfaat bagi perkembangbiakan tumbuhan, seperti mineral-mineral yang mengandung nitrogen, karbon, fosfor, potasium, belerang, kalsium, magnesium, boron, zeolit, dan perlit (Van Straaten, 1999).

1.3 Hubungan antara mineral – batuan – tanah – tanaman

Seperti telah diketahui, mineral merupakan komponen penyusun batuan, yang merupakan bahan induk dari tanah. Dengan demikian, secara tidak langsung mineral merupakan komponen dari tanah. Dalam pertanian, tanah merupakan bahan vital sebagai tempat berkembangbiak tanaman atau tumbuhan. Pengetahuan secara rinci mengenai sifat-sifat tanah dan tanaman merupakan hal yang mendasar di dalam pertanian, khususnya pada bidang ilmu tanah.

Sebagian besar permukaan bumi tersusun atas batuan sedimen, yaitu batuan yang terbentuk akibat pengerjaan kembali batuan yang telah ada sebelumnya (batuan beku, sedimen dan metamorf). Proses pembentukan batuan sedimen disebut dengan istilah proses sedimentasi, yang dimulai dari pelapukan baik mekanis maupun kimiawi, pengangkutan dan pengendapan. Proses pelapukan dapat menyebabkan terlepasnya komponen penyusun batuan menjadi ukuran yang lebih kecil, sehingga mudah mengalami proses eksogenik berikutnya.

Tanah merupakan bahan atau tempat dimana tumbuhan bisa hidup. Tanah terbentuk melalui proses pelapukan bahan baku tanah, dalam hal ini batuan. Kecepatan proses pembentukan tanah sangat tergantung kepada ukuran butir dari bahan induk tanah. Semakin halus, semakin mudah mengalami proses

pentanahan. Dalam kasus ini, batuan vulkanik resen yang berukuran halus, yang kaya unsur hara sangat mudah mengalami proses pentanahan. Hal ini sangat kontras dengan batuan-batuan tua yang telah mengalami kompaksi. Proses pentanahan di sini berjalan sangat lambat.

Perkembangan tanaman dan tumbuhan sangat tergantung kepada kekayaan unsur hara pada tanah. Jadi kecepatan perkembangan tumbuhan atau tanaman tergantung kepada batuan induk yang menjadi tanah.

Soal-soal:

1. Apakah yang anda ketahui tentang agromineral?
2. Jelaskan ruang lingkup mineralogi di dalam ilmu geologi dan ilmu pertanian?

Bab 2

Kristalografi

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab akan menjelaskan gambaran umum mengenai kristalografi, macam-macam sistem kristal, dan hubungan antara kristal dan mineral sebagai bahan utama penyusun batuan.

Kristalografi adalah suatu cabang dari mineralogi yang mempelajari sistem-sistem kristal. Suatu kristal dapat didefinisikan sebagai padatan yang secara esensial mempunyai pola difraksi tertentu (Senechal, 1995 dalam Hibbard, 2002). Jadi, suatu kristal adalah suatu padatan dengan susunan atom yang berulang secara tiga dimensional yang dapat mendifraksi sinar X. Kristal secara sederhana dapat didefinisikan sebagai zat padat yang mempunyai susunan atom atau molekul yang teratur. Keteraturannya tercermin dalam permukaan kristal yang berupa bidang-bidang datar dan rata yang mengikuti pola-pola tertentu.

Bidang-bidang datar ini disebut sebagai bidang muka kristal. Sudut antara bidang-bidang muka kristal yang saling berpotongan besarnya selalu tetap pada suatu kristal. Bidang muka kristal itu baik letak maupun arahnya ditentukan oleh perpotongannya dengan sumbu-sumbu kristal. Dalam sebuah kristal, sumbu kristal berupa garis bayangan yang lurus yang menem-

bus kristal melalui pusat kristal. Sumbu kristal tersebut mempunyai satuan panjang yang disebut sebagai parameter.

2.1 Kimia kristal

Komposisi kimia suatu mineral merupakan hal yang sangat mendasar, beberapa sifat-sifat mineral/kristal tergantung kepadanya. Sifat-sifat mineral/kristal tidak hanya tergantung kepada komposisi tetapi juga kepada susunan meruang dari atom-atom penyusun dan ikatan antar atom-atom penyusun kristal/mineral.

Komposisi kimia kerak bumi

Bumi dibagi menjadi:

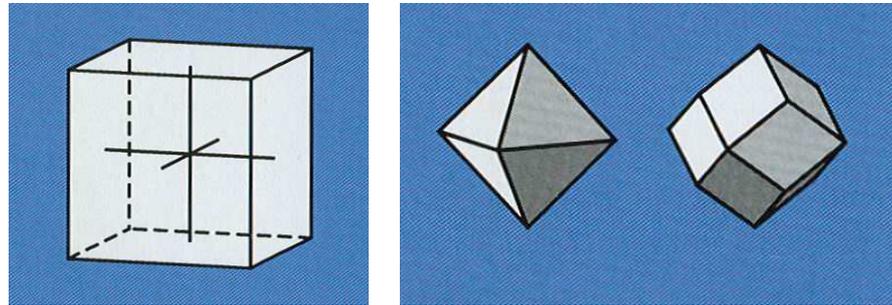
- kerak
- mantel, dan
- inti bumi

ketebalan kerak bumi di bawah kerak benua sekitar 36 km dan di bawah kerak samudra berkisar antara 10 sampai 13 km. Batas antara kerak dengan mantel dikenal dengan *Mohorovicic discontinuity*.

Kimia kristal Sejak penemuan sinar X, penyelidikan kristalografi sinar X telah mengem-bangkan pengertian kita tentang hubungan antara kimia dan struktur. Tujuannya adalah: 1) untuk mengetahui hubungan antara susunan atom dan komposisi kimia dari suatu jenis kristal. 2) dalam bidang geokimia tujuan mempelajari kimia kristal adalah untuk memprediksi struktur kristal dari komposisi kimia dengan diberikan temperatur dan tekanan.

Daya Ikat dalam Kristal

Daya yang mengikat atom (atau ion, atau grup ion) dari zat pada kristalin adalah bersifat listrik di alam. Tipe dan intensitasnya sangat berkaitan dengan sifat-sifat fisik dan kimia dari mineral. Kekerasan, belahan, daya lebur, ke-listrikan dan konduktivitas termal, dan koefisien ekspansi termal berhubungan secara langsung terhadap daya ikat.



(a) (b)
GAMBAR 2.1: Sistem kubik: (a) asli, (b) modifikasi

Secara umum, ikatan kuat memiliki kekerasan yang lebih tinggi, titik leleh yang lebih tinggi dan koefisien ekspansi termal yang lebih rendah. Ikatan kimia dari suatu kristal dapat dibagi menjadi 4 macam, yaitu: ionik, kovalen, logam dan van der Waals.

2.2 Sistem kristal

Hingga saat ini baru terdapat 7 macam sistem kristal. Dasar penggolongan sistem kristal tersebut ada tiga hal, yaitu:

- jumlah sumbu kristal,
- letak sumbu kristal yang satu dengan yang lain
- parameter yang digunakan untuk masing-masing sumbu kristal

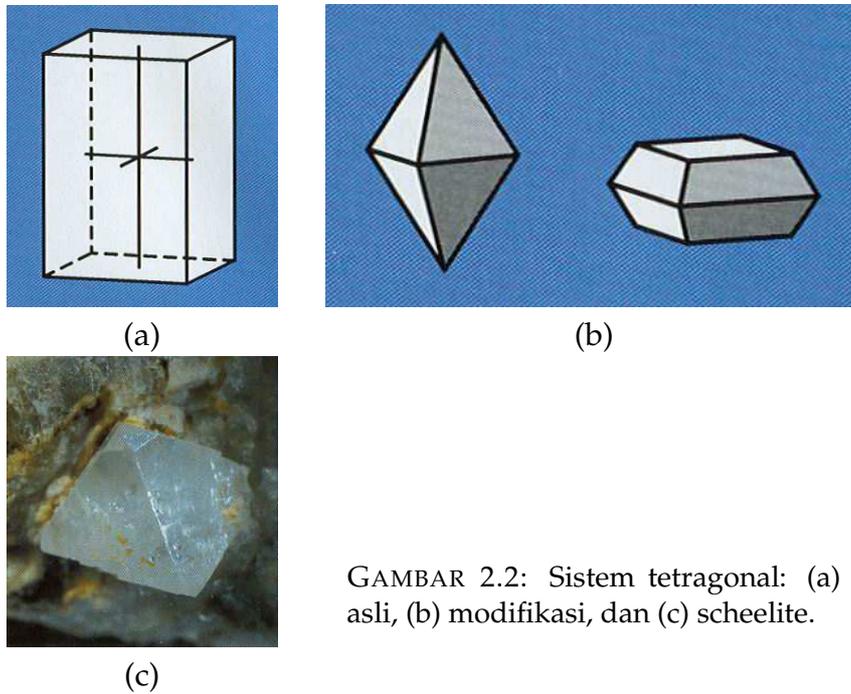
Adapun ke tujuh sistem kristal tersebut adalah:

2.2.1 Sistem isometrik

Sistem ini juga disebut sistem reguler, bahkan sering dikenal sebagai sistem kubus/kubik (Gambar 2.1). Jumlah sumbu kristalnya 3 dan saling tegak lurus satu dengan yang lainnya. Masing-masing sumbu sama panjangnya.

2.2.2 Sistem tetragonal

Sama dengan sistem isometrik, sistem ini mempunyai 3 sumbu kristal yang masing-masing saling tegak lurus (Gambar 2.2). Sumbu a dan b mempunyai



GAMBAR 2.2: Sistem tetragonal: (a) asli, (b) modifikasi, dan (c) scheelite.

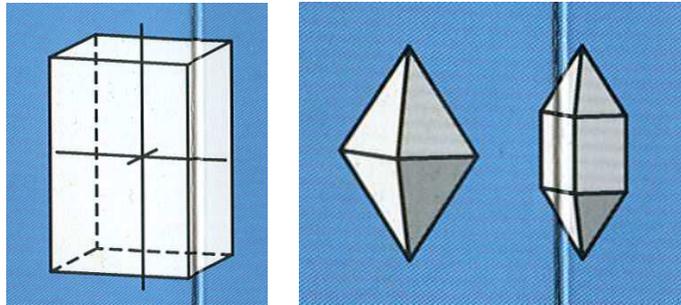
satuan panjang yang sama. Sedangkan sumbu c berlainan, dapat lebih panjang atau lebih pendek (umumnya lebih panjang).

2.2.3 Sistem rombik

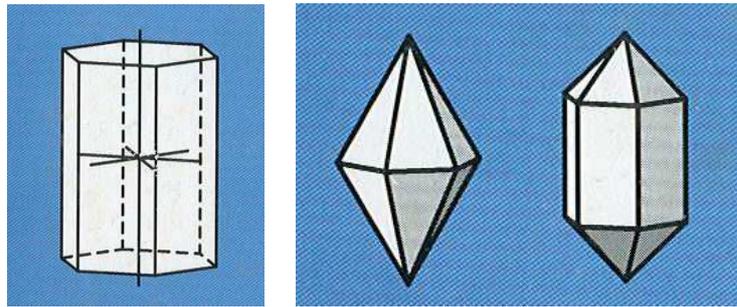
Sistem ini disebut juga orthorombik (Gambar 2.3) dan mempunyai 3 sumbu kristal yang saling tegak lurus satu dengan yang lain. Ketiga sumbu kristal tersebut mempunyai panjang yang berbeda.

2.2.4 Sistem heksagonal

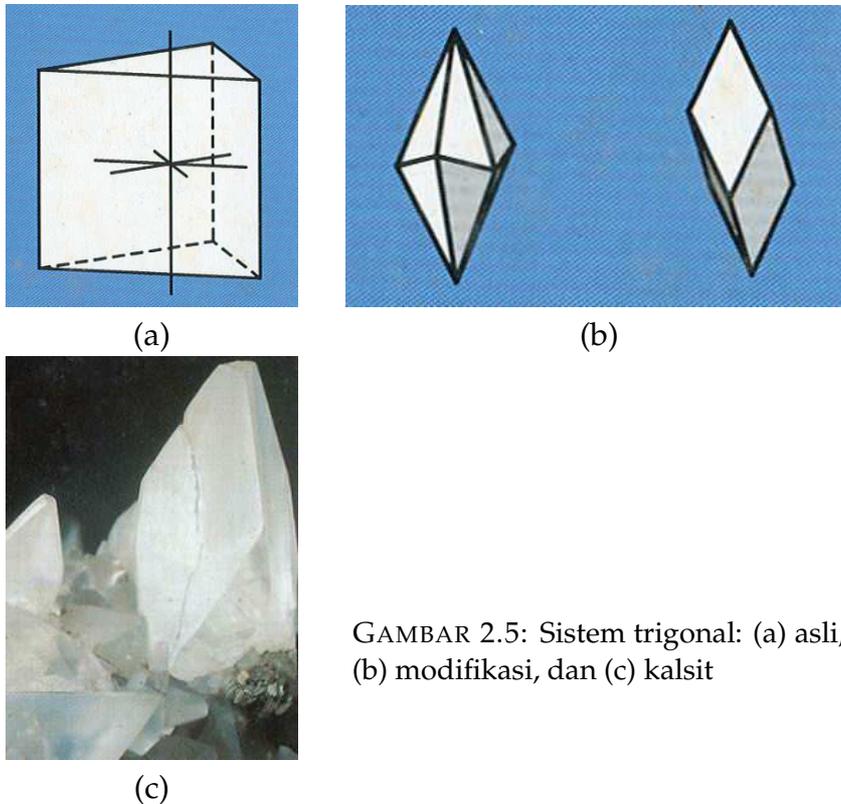
Sistem ini mempunyai empat sumbu kristal, dimana sumbu c tegak lurus terhadap ketiga sumbu yang lain. Sumbu a , b , dan d masing-masing saling membentuk sudut 120° satu terhadap yang lain (Gambar 2.4). Sumbu a , b , dan d mempunyai panjang yang sama. Sedangkan panjang c berbeda, dapat lebih panjang atau lebih pendek (umumnya lebih panjang).



(a) (b)
GAMBAR 2.3: Sistem ortorombik: (a) asli, (b) modifikasi



(c) (d)
GAMBAR 2.4: Sistem heksagonal: (a) asli, (b) modifikasi, (c) vanadinit, dan (d) kuarsa



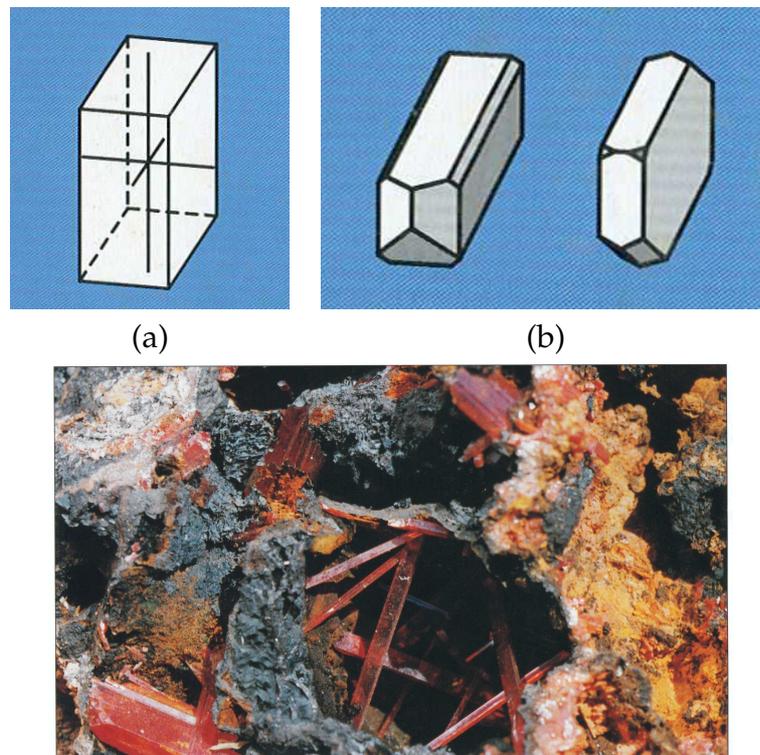
GAMBAR 2.5: Sistem trigonal: (a) asli, (b) modifikasi, dan (c) kalsit

2.2.5 Sistem trigonal

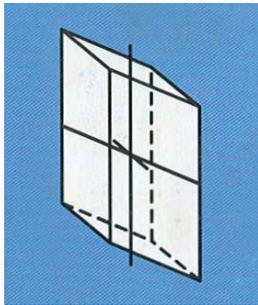
Beberapa ahli memasukkan sistem ini ke dalam sistem heksagonal (Gambar 2.5). Demikian pula cara penggambarannya juga sama. Perbedaannya bila pada trigonal setelah terbentuk bidang dasar, yang berbentuk segienam kemudian dibuat segitiga degnan menghubungkan dua titik sudut yang melewati satu titik sudutnya.

2.2.6 Sistem monoklin

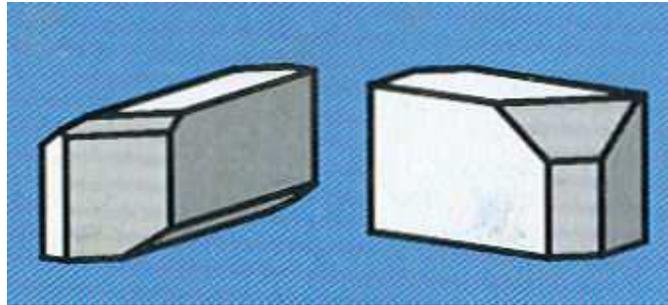
Monoklin artinya hanya mempunyai satu sumbu yang miring dari tiga sumbu yang dimilikinya. Sumbu a tegak lurus terhadap sumbu b ; b tegak lurus terhadap c , tetapi sumbu c tidak tegak lurus terhadap sumbu a . Ketiga sumbu tersebut mempunyai panjang yang tidak sama, umumnya sumbu c yang paling panjang dan sumbu b yang paling pendek.



GAMBAR 2.6: Sistem monoklin: (a) asli, (b) modifikasi, dan (c) mineral krokoit



(a)



(b)



(c)

GAMBAR 2.7: Sistem triklin: (a) asli, (b) modifikasi, dan (c) rodokrosit.

2.2.7 Sistem triklin

Sistem ini mempunyai tiga sumbu yang satu dengan lainnya tidak saling tegak lurus. Demikian juga panjang masing-masing sumbu tidak sama.

2.3 Unsur-unsur simetri kristal

Dari masing-masing sistem kristal dapat dibagi lebih lanjut menjadi klas-klas kristal yang jumlahnya 32 klas. Penentuan klasifikasi kristal tergantung dari banyaknya unsur-unsur simetri yang terkandung di dalamnya. Unsur-unsur simetri tersebut meliputi:

1. bidang simetri
2. sumbu simetri
3. pusat simetri

2.3.1 Bidang simetri

Bidang simetri adalah bidang bayangan yang dapat membelah kristal menjadi dua bagian yang sama, dimana bagian yang satu merupakan pencerminan dari yang lain. Bidang simetri ini dapat dibedakan menjadi dua, yaitu bidang simetri aksial dan bidang simetri menengah.

Bidang simetri aksial bila bidang tersebut membagi kristal melalui dua sumbu utama (sumbu kristal). Bidang simetri aksial ini dibedakan menjadi dua, yaitu bidang simetri vertikal, yang melalui sumbu vertikal dan bidang simetri horisontal, yang berada tegak lurus terhadap sumbu c . Bidang simetri menengah adalah bidang simetri yang hanya melalui satu sumbu kristal. Bidang simetri ini sering pula dikatakan sebagai bidang simetri diagonal.

2.3.2 Sumbu simetri

Sumbu simetri adalah garis bayangan yang dibuat menembus pusat kristal, dan bila kristal diputar dengan poros sumbu tersebut sejauh satu putaran penuh akan didapatkan beberapa kali kenampakan yang sama. Sumbu simetri dibedakan menjadi tiga, yaitu gire, giroide dan sumbu inversi putar. Ketiganya dibedakan berdasarkan cara mendapatkan nilai simetrinya.

Gire, atau sumbu simetri biasa, cara mendapatkan nilai simetrinya adalah dengan memutar kristal pada porosnya dalam satu putaran penuh. Bila terdapat dua kali kenampakan yang sama dinamakan digire, bila tiga trigire (Δ), empat tetragire (\diamond), heksagire (\circ) dan seterusnya.

Giroide adalah sumbu simetri yang cara mendapatkan nilai simetrinya dengan memutar kristal pada porosnya dan memproyeksikannya pada bidang horisontal. Dalam gambar, nilai simetri giroide disingkat tetragiroide (\diamond) dan heksagiroide (\circ).

Sumbu inversi putar adalah sumbu simetri yang cara mendapatkan nilai simetrinya dengan memutar kristal pada porosnya dan mencerminkannya melalui pusat kristal. Penulisan nilai simetrinya dengan cara menambahkan bar pada angka simetri itu.

2.3.3 Pusat simetri

Suatu kristal dikatakan mempunyai pusat simetri bila kita dapat membuat garis bayangan tiap-tiap titik pada permukaan kristal menembus pusat kristal dan akan menjumpai titik yang lain pada permukaan di sisi yang lain dengan jarak yang sama terhadap pusat kristal pada garis bayangan tersebut. Atau dengan kata lain, kristal mempunyai pusat simetri bila tiap bidang muka kristal tersebut mempunyai pasangan dengan kriteria bahwa bidang yang berpasangan tersebut berjarak sama dari pusat kristal, dan bidang yang satu merupakan hasil inversi melalui pusat kristal dari bidang pasangannya.

2.4 Klasifikasi kristal

Dari tujuh sistem kristal dapat dikelompokkan menjadi 32 klas kristal. Pengelompokkan ini berdasarkan pada jumlah unsur simetri yang dimiliki oleh kristal tersebut. Sistem isometrik terdiri dari lima kelas, sistem tetragonal mempunyai tujuh kelas, rombik memiliki tiga kelas, heksagonal mempunyai tujuh kelas dan trigonal lima kelas. Selanjutnya sistem monoklin mempunyai tiga kelas.

Tiap kelas kristal mempunyai singkatan yang disebut simbol. Ada dua macam cara simbolisasi yang sering digunakan, yaitu simbolisasi Schonflies dan Herman Mauguin (simbolisasi internasional).

Bab 3

Mineralogi

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab akan menjelaskan gambaran umum mengenai mineralogi, kimia mineral, sifat-sifat fisik mineral, dan sistematika mineral.

Mineral adalah zat atau benda yang biasanya padat dan homogen dan hasil bentukan alam yang memiliki sifat-sifat fisik dan kimia tertentu serta umumnya berbentuk kristalin. Meskipun demikian ada beberapa bahan yang terjadi karena penguraian atau perubahan sisa-sisa tumbuhan dan hewan secara alamiah juga digolongkan ke dalam mineral, seperti batubara, minyak bumi, tanah diatome.

3.1 Kimia mineral

Kimia mineral merupakan suatu ilmu yang dimunculkan pada awal abad ke-19, setelah dikemukakannya "hukum komposisi tetap" oleh Proust pada tahun 1799, teori atom Dalton pada tahun 1805, dan pengembangan metode analisis kimia kuantitatif yang akurat. Karena ilmu kimia mineral didasarkan pada pengetahuan tentang komposisi mineral, kemungkinan dan keterbatasan analisis kimia mineral harus diketahui dengan baik. Analisis kimia kuantitatif bertujuan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang menyusun su-

atu substansi dan menentukan jumlah relatif masing-masing unsur tersebut. Analisis harus lengkap —seluruh unsur-unsur yang ada pada mineral harus ditentukan— dan harus tepat.

Komposisi kimia sebagian besar mineral yang diketahui, menunjukkan suatu kisaran tertentu mengenai penyusun dasarnya. Dalam analisis kimia, jumlah kandungan unsur dalam suatu senyawa dinyatakan dengan persen berat dan dalam analisis yang lengkap jumlah total persentase penyusunnya harus 100. Namun dalam prakteknya, akibat keterbatasan ketepatan, jumlah 100 merupakan suatu kebetulan; umumnya kisaran 99,5 sampai 100,5 sudah dianggap sebagai analisis yang baik.

Prinsip-prinsip kimia yang berhubungan dengan kimia mineral

1. Hukum komposisi tetap

(*The Law of Constant Composition*) oleh Proust (1799):

"Perbandingan massa unsur-unsur dalam tiap senyawa adalah tetap"

2. Teori atom Dalton (1805)

1. Setiap unsur tersusun oleh partikel yang sangat kecil dan berbentuk seperti bola yang disebut atom.

- a) Atom dari unsur yang sama bersifat sama sedangkan dari unsur yang berbeda bersifat berbeda pula.
- b) Atom dapat berikatan secara kimiawi menjadi molekul.

Teknik analisis mineral secara kimia

Analisis kimia mineral (dan batuan) diperoleh dari beberapa macam teknik analisis. Sebelum tahun 1947 analisis kuantitatif mineral diperoleh dengan teknik analisis "basah", yang mana mineral dilarutkan dalam larutan tertentu. Penentuan unsur-unsur dalam larutan biasanya dipakai satu atau lebih teknik-teknik berikut: (1) ukur warna (*colorimetry*), (2) analisis volumetri (titrimetri) dan (3) analisis gravimetri.

Sejak tahun 1960 sebagian besar analisis telah dilakukan dengan teknik instrumental seperti spektroskop serapan atom, analisis fluoresen sinar X, analisis electron microprobe, dan spektroskop emisi optis. Masing-masing teknik ini memiliki preparasi sampel yang khusus dan memiliki keterbatasan deteksi dan kisaran kesalahan sedang - baik. Hasil analisis biasanya ditampilkan dalam bentuk tabel persen berat dari unsur-unsur atau oksida dalam mineral yang dianalisis. Teknik analisis basah memberikan determinasi secara kuantitatif variasi kondisi oksidasi suatu kation (seperti Fe^{2+} dengan Fe^{3+}) dan juga untuk determinasi kandungan H_2O dari mineral-mineral hidrous. Metode instrumen umumnya tidak dapat memberikan informasi seperti kondisi oksidasi atau kehadiran H_2O .

Dalam analisis kimia mineral dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu analisis kimia kualitatif dan analisis kimia kuantitatif. Analisis kualitatif menyangkut deteksi dan identifikasi seluruh komposisi dari suatu senyawa. Analisis kuantitatif meliputi penentuan persen berat (atau *parts per million* [ppm]) unsur-unsur dalam suatu senyawa. Dengan demikian kedua analisis ini akan menjawab pertanyaan "Apa yang dikandung dan berapa besar jumlahnya?". Analisis kualitatif awal umumnya sangat membantu dalam memutuskan metode apa yang akan dipakai untuk analisis kuantitatif.

Analisis kimia basah

Cara ini biasanya dilakukan di laboratorium kimia. Setelah sampel digerus menjadi bubuk, langkah pertama yang dilakukan adalah menguraikan sampel. Biasanya pada tahap ini digunakan satu dari beberapa larutan asam, seperti asam klorida (HCl), asam sulfat (H_2SO_4), atau asam florida (HF), atau campuran dari larutan asam tersebut. Jika sampel sudah dalam bentuk larutan, langkah selanjutnya adalah colorimetry, volumetri atau gravimetri untuk menentukan unsur-unsur yang diinginkan.

Kisaran konsentrasi unsur-unsur berdasarkan teknik analisis ini adalah:

Metode	Konsentrasi unsur dalam sampel
Gravimetri	rendah - 100%
Volumetri	rendah - 100%
Colorimetri	ppm - rendah

Keuntungan menggunakan cara basah adalah reaksi dapat terjadi dengan cepat dan relatif mudah untuk dikerjakan.

Analisis serapan atom (AAS)

AAS (*atomic absorption spectroscopy*) ini dapat dimasukkan dalam analisis kimia cara basah karena sampel asli yang akan dianalisis secara sempurna terlarutkan dalam suatu larutan sebelum dilakukan analisis. Cara ini didasarkan atas pengamatan panjang gelombang yang dipancarkan suatu unsur atau serapan suatu panjang gelombang oleh suatu unsur. Dalam perkembangannya yang terakhir alat ini dilengkapi oleh *inductively coupled plasma* (ICP) dan metode *ICP-mass spectrometric* (ICP-MS).

Sumber energi yang digunakan pada teknik ini adalah lampu katoda dengan energi berkisar antara cahaya tampak sampai ultraviolet dari spektrum elektromagnetik. Sampel dalam bentuk larutan dipanaskan, dengan anggapan atom-atom akan bebas dari ikatan kimianya. Pada sampel panas dilewatkan sinar katoda, akan terjadi penyerapan energi yang akan terekam dalam spektrometer.

Analisis fluoresen sinar X (XRF)

Analisis ini juga dikenal dengan spektrografi emisi sinar X, yang banyak digunakan untuk laboratorium penelitian yang mempelajari kimia substansi anorganik. Di samping untuk laboratorium penelitian analisis ini juga digunakan untuk keperluan industri, seperti: industri tambang (untuk kontrol kualitas hasil yang akan dipasarkan), industri kaca dan keramik, pabrik logam dan bahan baku logam, dan dalam perlindungan lingkungan dan pengawasan pulusi.

Pada analisis ini sampel digerus menjadi bubuk dan ditekan dalam bentuk pelet bundar. Pelet ini nantinya akan ditembak dengan sinar X. Spektrum

emisi sinar X yang dihasilkan merupakan ciri-ciri tiap-tiap unsur yang terkandung dalam sampel.

Analisis ini dapat digunakan untuk penentuan sebagian besar unsur, dan juga sangat sensitif untuk penentuan secara tepat beberapa unsur jejak (seperti Y, Zr, Sr, Rb dalam kisaran ppm).

Electron probe microanalysis

Metode ini didasarkan atas prinsip yang sama dengan analisis fluoresen sinar X, kecuali energi yang dipakai bukan tabung sinar X tetap digantikan oleh sinar elektron. Disebut mikroanalisis karena dapat menganalisis baik kualitatif maupun kuantitatif material dalam jumlah yang sangat sedikit. Sampel yang dianalisis biasanya berbentuk sayatan yang sudah dikilapkan (polished section atau polished thin section) dari suatu mineral, batuan atau material padat yang lain.

Volume minimum yang dapat dianalisis dengan metode ini sekitar 10 sampai $20\mu\text{m}^3$, yang dalam satuan berat sekitar 10-11 gram (untuk material silikat).

Analisis spektrografik optis

Spektrograf emisi optik didasarkan pada kenyataan bahwa atom suatu unsur dapat menghasilkan energi. Ketika energi ini terdispersi, dengan menggunakan prisma dapat direkam sebagai suatu spektrum. Jumlah garis dan intensitas garis dalam spektrum yang terekam ditentukan oleh konfigurasi atom. Analisis kuantitatif dengan teknik ini memerlukan pengukuran terhadap ketajaman dari garis-garis spektral yang terekam dalam fotograf.

3.2 Sifat-sifat fisik mineral

Penentuan nama mineral dapat dilakukan dengan membandingkan sifat-sifat fisik mineral antara mineral yang satu dengan mineral yang lainnya. Sifat-sifat fisik mineral tersebut meliputi: warna, kilap (*luster*), kekerasan (*hardness*), cerat (*streak*), belahan (*cleavage*), pecahan (*fracture*), struktur/bentuk kristal, berat jenis, sifat dalam (*tenacity*), dan kemagnetan.

Warna adalah kesan mineral jika terkena cahaya. Warna mineral dap-

at dibedakan menjadi dua, yaitu idiokromatik, bila warna mineral selalu tetap, umumnya dijumpai pada mineral-mineral yang tidak tembus cahaya (opak), seperti galena, magnetit, pirit; dan alokromatik, bila warna mineral tidak tetap, tergantung dari material pengotornya. Umumnya terdapat pada mineral-mineral yang tembus cahaya, seperti kuarsa, kalsit.

Kilap adalah kesan mineral akibat pantulan cahaya yang dikenakan padanya. Kilap dibedakan menjadi dua, yaitu kilap logam dan kilap bukan-logam. Kilap logam memberikan kesan seperti logam bila terkena cahaya. Kilap ini biasanya dijumpai pada mineral-mineral yang mengandung logam atau mineral bijih, seperti emas, galena, pirit, kalkopirit. Kilap bukan-logam tidak memberikan kesan seperti logam jika terkena cahaya. Kilap jenis ini dapat dibedakan menjadi:

- Kilap kaca (*vitreous luster*)
memberikan kesan seperti kaca bila terkena cahaya, misalnya: kalsit, kuarsa, halit.
- Kilap intan (*adamantine luster*)
memberikan kesan cemerlang seperti intan, contohnya intan
- Kilap sutera (*silky luster*)
memberikan kesan seperti sutera, umumnya terdapat pada mineral yang mempunyai struktur serat, seperti asbes, aktinolit, gipsum
- Kilap damar (*resinous luster*)
memberikan kesan seperti damar, contohnya: sfalerit dan resin
- Kilap mutiara (*pearly luster*)
memberikan kesan seperti mutiara atau seperti bagian dalam dari kulit kerang, misalnya talk, dolomit, muskovit, dan tremolit.
- Kilap lemak (*greasy luster*)
menyerupai lemak atau sabun, contohnya talk, serpentin
- Kilap tanah
kenampakannya buram seperti tanah, misalnya: kaolin, limonit, bentonit.

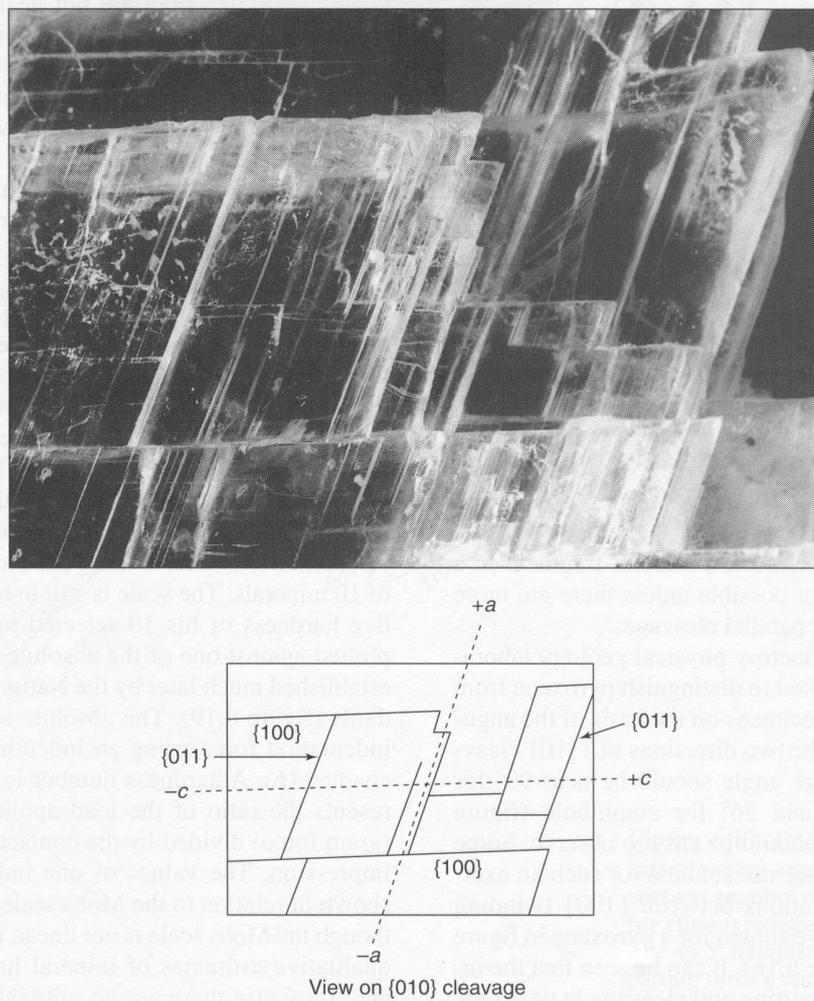
Kekerasan adalah ketahanan mineral terhadap suatu goresan. Secara relatif sifat fisik ini ditentukan dengan menggunakan skala Mohs, yang dimulai dari skala 1 yang paling lunak hingga skala 10 untuk mineral yang paling keras. Skala Mohs tersebut meliputi (1) talk, (2) gipsum, (3) kalsit, (4) fluorit, (5) apatit, (6) feldspar, (7) kuarsa, (8) topaz, (9) korundum, dan (10) intan.

Cerat adalah warna mineral dalam bentuk bubuk. Cerat dapat sama atau berbeda dengan warna mineral. Umumnya warna cerat tetap. Belahan adalah kenampakan mineral berdasarkan kemampuannya membelah melalui bidang-bidang belahan yang rata dan licin (Gambar 3.1). Bidang belahan umumnya sejajar dengan bidang tertentu dari mineral tersebut.

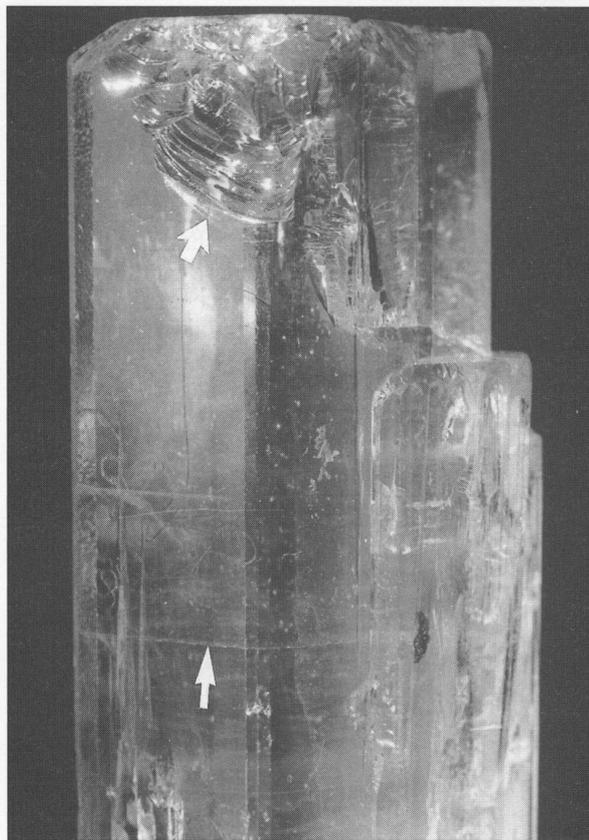
Pecahan adalah kemampuan mineral untuk pecah melalui bidang yang tidak rata dan tidak teratur. Pecahan dapat dibedakan menjadi: (a) pecahan konkoidal, bila memperlihatkan gelombang yang melengkung di permukaan (Gambar 3.2); (b) pecahan berserat/fibrus, bila menunjukkan kenampakan seperti serat, contohnya asbes, augit; (c) pecahan tidak rata, bila memperlihatkan permukaan yang tidak teratur dan kasar, misalnya pada garnet; (d) pecahan rata, bila permukaannya rata dan cukup halus, contohnya: mineral lempung; (e) pecahan runcing, bila permukaannya tidak teratur, kasar, dan ujungnya runcing-runcing, contohnya mineral kelompok logam murni; (f) tanah, bila kenampakannya seperti tanah, contohnya mineral lempung.

Bentuk mineral dapat dikatakan kristalin, bila mineral tersebut mempunyai bidang kristal yang jelas dan disebut amorf, bila tidak mempunyai batas-batas kristal yang jelas. Mineral-mineral di alam jarang dijumpai dalam bentuk kristalin atau amorf yang ideal, karena kondisi pertumbuhannya yang biasanya terganggu oleh proses-proses yang lain. Struktur mineral dapat dibagi menjadi beberapa, yaitu:

- Granular atau butiran: terdiri atas butiran-butiran mineral yang mempunyai dimensi sama, isometrik.
- Struktur kolom, biasanya terdiri dari prisma yang panjang dan bentuknya ramping. Bila prisma tersebut memanjang dan halus, dikatakan mempunyai struktur fibrus atau berserat.



GAMBAR 3.1: Belahan tiga arah pada gipsium yang dihasilkan dari fragmen semirombohedral (Hibbard, 2002)



GAMBAR 3.2: Pecahan konkoidal pada beril (Hibbard, 2002)

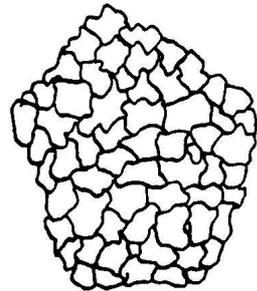
- Struktur lembaran atau lamelar, mempunyai kenampakan seperti lembaran. Struktur ini dibedakan menjadi: tabular, konsentris, dan foliasi.
- Struktur imitasi, bila mineral menyerupai bentuk benda lain, seperti asikular, filiformis, membilah, dll.

Sifat dalam merupakan reaksi mineral terhadap gaya yang mengenainya, seperti penekanan, pemotongan, pembengkokan, pematihan, pemukulan atau penghancuran. Sifat dalam dapat dibagi menjadi: rapuh (*brittle*), dapat diiris (*sectile*), dapat dipintal (*ductile*), dapat ditempa (*malleable*), kenyal/lentur (*elastic*), dan fleksibel (*flexible*).

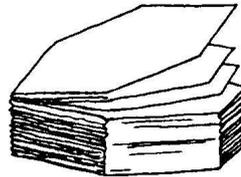
3.3 Sistematika mineral

Sistematika atau klasifikasi mineral yang biasa digunakan adalah klasifikasi dari Dana, yang berdasarkan pada kemiripan komposisi kimia dan struktur kristalnya. Dana membagi mineral menjadi delapan golongan (Klein & Hurlbut, 1993), yaitu:

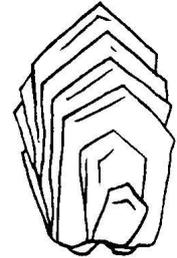
1. Unsur murni (native element), yang dicirikan oleh hanya memiliki satu unsur kimia, sifat dalam umumnya mudah ditempa dan/atau dapat dipintal, seperti emas, perak, tembaga, arsenik, bismuth, belerang, intan, dan grafit.
2. Mineral sulfida atau sulfosalt, merupakan kombinasi antara logam atau semi-logam dengan belerang (S), misalnya galena (PbS), pirit (FeS₂), proustit (Ag₃AsS₃), dll
3. Oksida dan hidroksida, merupakan kombinasi antara oksigen atau hidroksil/air dengan satu atau lebih macam logam, misalnya magnetit (Fe₃O₄), goethit (FeOOH).
4. Haloid, dicirikan oleh adanya dominasi dari ion halogenida yang elektronegatif, seperti Cl, Br, F, dan I. Contoh mineralnya: halit (NaCl), silvit (KCl), dan fluorit (CaF₂).
5. Nitrat, karbonat dan borat, merupakan kombinasi antara logam/semi-logam dengan anion kompleks, CO₃ atau nitrat, NO₃ atau borat



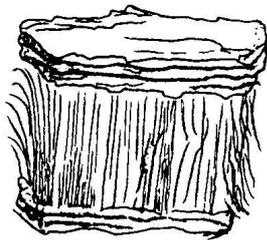
Massive and granular, as in marble



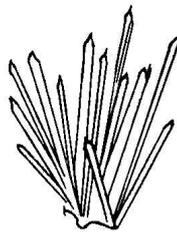
Lamellar, foliated, micaceous, as in mica



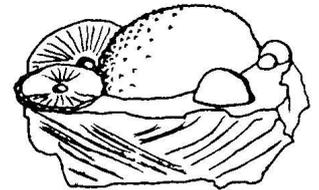
Bladed as in stibnite



Fibrous as in asbestos



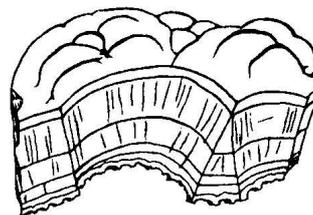
Acicular, radiating as in millerite



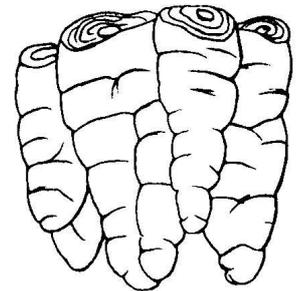
Radiating and globular as in wavelite



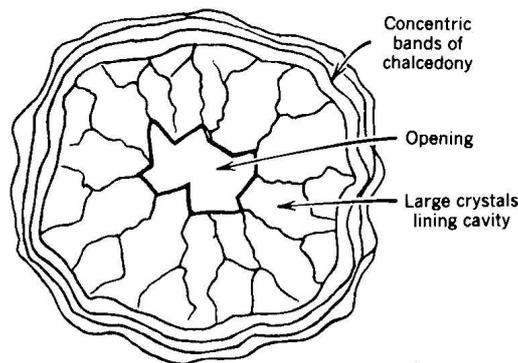
Dendritic as in pyrolusite



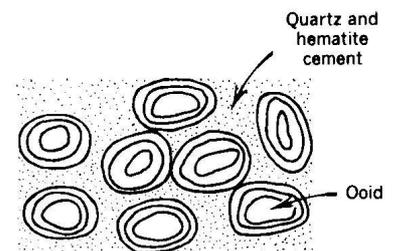
Mammillary, botryoidal as in hematite



Colloform, stalactitic as in cave deposits



Geode



Oolitic as in oolitic iron ore

GAMBAR 3.3: Beberapa kebiasaan mineral dan asal mulanya (Klein & Hurlbut, 1993)

- (BO_3). Contohnya: kalsit (CaCO_3), niter (NaNO_3), dan borak ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).
6. Sulfat, kromat, molibdat, dan tungstat, dicirikan oleh kombinasi logam dengan anion sulfat, kromat, molibdat, dan tungstat. Contohnya: barit (BaSO_4), wolframit ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$)
 7. Fosfat, arsenat, dan vanadat, contohnya apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), vanadinit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$)
 8. Silikat, merupakan mineral yang jumlah meliputi 25% dari keseluruhan mineral yang dikenal atau 40% dari mineral yang umum dijumpai. Kelompok mineral ini mengandung ikatan antara Si dan O. Contohnya: kuarsa (SiO_2), zeolit-Na ($\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{30}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$).

Bab 4

Agromineral

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab ini akan menjelaskan mengenai bermacam-macam mineral yang penting dalam tanah, macam-macam mineral sebagai nutrisi penting bagi tanaman. Pembahasan ini dibagi menjadi dua bab, yaitu bab pertama membahas mengenai nutrisi makro dan bab berikutnya membahas nutrisi mikro.

Agromineral adalah mineral-mineral yang bermanfaat bagi perkembangan tumbuhan (Van Straaten, 1999). Enambelas unsur kimia telah diketahui sebagai unsur penting untuk pertumbuhan dan pertahanan tanaman (Anonim, 2004c). Keenambelas unsur tersebut dapat dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu bukan-mineral dan mineral.

Nutrisi bukan-mineral meliputi hidrogen (H), oksigen (O), dan karbon (C). Nutrisi ini dapat ditemukan baik di udara maupun di dalam air. Dalam proses fotosintesis, tanaman menggunakan energi matahari untuk merubah karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) menjadi "starches" dan gula. Keduanya merupakan makanan tanaman.

Nutrisi mineral terdiri atas 13 mineral, yang berasal dari tanah dalam bentuk larutan. Biasanya ketersediaan nutrisi ini pada tanah tidak selalu

lengkap. Petani biasanya menambahkannya dengan memberikan pupuk buatan. Berdasarkan tingkat kebutuhan tanaman, nutrisi ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu nutrisi makro (*macronutrients*) dan nutrisi mikro (*micronutrients*). Kedua kelompok ini akan dibahas secara terpisah setelah bab ini.

Bab 5

Agromineral I: Nutrisi makro

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab ini akan menjelaskan mengenai bermacam-macam mineral yang penting dalam tanah atau memperkaya unsur hara tanah. Mineral-mineral ini dikelompokkan menjadi nutrisi makro bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfor, potas, karbon, kalsium, magnesium, dan belerang.

Nutrisi makro dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu nutrisi primer dan nutrisi sekunder (Anonim, 2004c). Nutrisi primer meliputi: nitrogen (N), fosfor (P), dan potasium (K). Nutrisi ini biasanya paling cepat habis di dalam tanah, karena tanaman menggunakannya dalam jumlah besar untuk perkembangan dan pertahanannya.

Nutrisi sekunder meliputi: kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan belerang (S). Biasanya nutrisi ini cukup banyak di dalam tanah, namun di beberapa tempat diperlukan tambahan kalsium dan magnesium, misalnya pada tanah yang asam. Kalsium dan magnesium diperlukan untuk meningkatkan keasaman tanah. Pada bab ini akan dibahas semua unsur yang termasuk di dalam nutrisi makro, ditambah karbon (C).

5.1 Nitrogen

Nitrogen (N) merupakan salah satu dari 13 unsur utama (esensial) yang dibutuhkan oleh tanaman. Ketigabelas unsur utama ini disebut sebagai *nutrients* (makanan). Tanaman membutuhkan makanan ini untuk pertumbuhannya. Untuk menumbuhkan segantang (1 bushel) jagung dibutuhkan lebih kurang 16 lbs nitrogen. Fungsi nitrogen ini merupakan komponen struktural dari protein, DNA, dan enzim (Anonim, 2004a; 2004b).

Jumlah unsur yang ada pada pupuk biasanya dinyatakan dalam rasio N-P-K. Rasio ini selalu tercantum pada kantong suatu pupuk buatan. Sebagai contoh, pada suatu kantong pupuk tertulis "15-30-15", berarti pada pupuk tersebut mengandung 15 persen nitrogen. Nomor ini mengindikasikan persen berat dari nitrogen, fosfor oksida, dan potasium oksida pada pupuk.

Ada beberapa fungsi nitrogen pada tanaman adalah sebagai berikut (Anonim, 2004c):

- Nitrogen merupakan suatu bagian dari sel hidup dan bagian utama dari semua protein, enzim dan proses metabolik yang disertakan pada sintesa dan perpindahan energi.
- Nitrogen merupakan bagian dari klorofil, pewarna hijau dari tanaman yang bertanggung jawab terhadap fotosintesis.
- Nitrogen membantu tanaman mempercepat pertumbuhannya, meningkatkan produksi bibit dan buah serta memperbaiki kualitas daun dan akar.

Sumber nitrogen

Nitrogen bersumber dari pupuk dan udara (tumbuhan memperolehnya dari atmosfer). Sumber nitrogen yang digunakan pada pupuk buatan sangat banyak, seperti amonia (NH_3), diamonium fosfat ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), amonium nitrat (NH_4NO_3), amonium sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), kalsium cyanamida (CaCN_2), kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), natrium nitrat (NaNO_3), dan urea ($\text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$). Sum-

ber utama nitrogen secara geologi adalah kelompok mineral nitrat, seperti nitratit dan niter (saltpeter).

Nitratit (NaNO_3) mempunyai struktur kristal yang mirip dengan kalsit dan mudah larut dalam air, sehingga hanya dapat ditemukan pada daerah kering. Nitratit mempunyai kekerasan rendah (1 – 2 skala Mohs) dan berat jenis $2,29 \text{ gr/cm}^3$. Mineral ini banyak dijumpai di bagian utara Chile, yang juga dikenal sebagai sumber nitrogen (Klein, 1993; 2004).

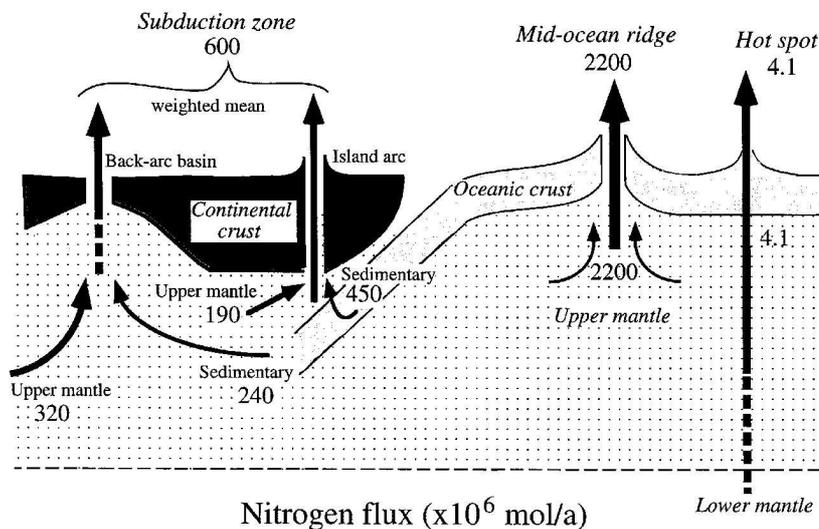
Berbeda dengan nitratit, niter (KNO_3) mempunyai struktur yang sama dengan aragonit dan memiliki kembaran heksagonal semu. Seperti halnya nitratit, mineral ini juga sangat mudah larut dalam air. Niter lebih sedikit dijumpai di alam dibandingkan nitratit, namun di beberapa negara merupakan sumber dari nitrogen untuk pupuk.

Sumberdaya geologi

Distribusi nitrogen di alam dapat dibagi menjadi tiga, yaitu nitrogen dari mantel, sedimen dan atmosfer. Kontribusi nitrogen dari mantel berkisar dari 9 – 30% (Sano, dkk., 2001). Ini terdiri atas, nitrogen yang berasal dari busur kepulauan sebesar $6,4 \times 10^8 \text{ mol/tahun}$; cekungan belakang busur ($5,6 \times 10^8 \text{ mol/tahun}$), dan punggung tengah samudera ($2,8 \times 10^9 \text{ mol/tahun}$) (Gambar 5.1). Jadi, total fluks vulkanik nitrogen pertahun adalah sebesar $2,8 \times 10^9 \text{ mol/tahun}$ berdasarkan nilai yang diambil dari punggung tengah samudera, pusat-pusat panas dan zona penunjaman. Sehingga selama kurang lebih 4,55 milyar tahun umur bumi, akumulasi nitrogen mencapai $1,3 \times 10^{19} \text{ mol}$. Nilai ini lebih kecil 10 kali jumlah nitrogen saat ini di permukaan bumi $1,8 \times 10^{20} \text{ mol}$.

Siklus nitrogen

Siklus nitrogen cukup kompleks, 79 persen atmosfer tersusun atas nitrogen bebas dan paling tidak sejumlah yang sama nitrogen terikat pada litosfer. Reservoir yang besar ini tidak dapat digunakan secara langsung oleh tanaman. Pada konteks ini, mikroorganisme memegang peranan penting. Tanaman



GAMBAR 5.1: Sumber nitrogen dari bumi (Sano, dkk., 2001)

menggunakan nitrogen sebagian besar hanya sebagai ion amonium dan nitrat (Sengbusch, 2003). Pada material organik, nitrogen biasanya digunakan untuk menghasilkan grup-amino yang ditemukan pada protein atau asam nukleus. Bakteri nitrat dan nitrit merubah grup-amino kembali menjadi nitrat atau nitrit. Bakteri ini hidup di dalam tanah.

Produksi ikatan amonium dan nitrat merupakan suatu faktor pembatas pada pertumbuhan tanaman. Litosfer mengandung nitrat dalam jumlah tak terbatas, namun itu terjadi umumnya pada lapisan dalam sehingga tidak dapat dicapai oleh akar tanaman. Hal ini karena ikatan nitrogen sangat mudah larut dalam air, sehingga sebagian besar darinya hilang karena pelarutan.

5.2 Fosfor

Fosfor merupakan bahan makanan utama yang digunakan oleh semua organisme untuk energi dan pertumbuhan. Secara geokimia, fosfor merupakan 11 unsur yang sangat melimpah di kerak bumi (Benitez-Nelson, 2000). Seperti halnya nitrogen, fosfor merupakan unsur utama di dalam proses fotosintesis.

Fosfor biasanya berasal dari pupuk buatan yang kandungannya berdasarkan rasio N-P-K. Sebagai contoh 15-30-15, mengindikasikan bahwa

berat persen fosfor dalam pupuk buatan adalah 30% fosfor oksida (P_2O_5). Fosfor yang dapat dikonsumsi oleh tanaman adalah dalam bentuk fosfat, seperti diamonium fosfat ($(NH_4)_2HPO_4$) atau kalsium fosfat dihidrogen ($Ca(H_2PO_4)_2$).

Fosfat merupakan salah satu bahan galian yang sangat berguna untuk pembuatan pupuk. Sekitar 90% konsumsi fosfat dunia dipergunakan untuk pembuatan pupuk, sedangkan sisanya dipakai oleh industri detergen dan makanan ternak (Suhala & Arifin, 1997).

Mineral-mineral fosfat

Fosfat adalah batuan dengan kandungan fosfor yang ekonomis. Kandungan fosfor pada batuan dinyatakan dengan BPL (*bone phosphate of lime*) atau TPL (*triphosphate of lime*) yang didasarkan atas kandungan P_2O_5 .

Sebagian besar fosfat komersial yang berasal dari mineral apatit ($Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$) adalah kalsium fluo-fosfat dan kloro-fosfat dan sebagian kecil wavelit (fosfat aluminium hidros). Sumber lainnya berasal dari jenis slag, guano, krandalit ($CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$), dan milisit ($(Na,K)CaAl_6(PO_4)_4(OH)_9 \cdot 3H_2O$).

Apatit memiliki struktur kristal heksagonal (Gambar 5.2) dan biasanya dalam bentuk kristal panjang prismatic. Sifat fisik yang dimilikinya: warna putih atau putih kehijauan, hijau, kilap kaca sampai lemak, berat jenis 3,15 – 3,20, dan kekerasan 5. Apatit merupakan mineral asesori dari semua jenis batuan—beku, sedimen, dan metamorf. Ini juga ditemukan pada pegmatit dan urat-urat hidrotermal. Selain sebagai bahan pupuk, mineral apatit yang transparan dan berwarna bagus biasanya digunakan untuk batu permata.

Siklus fosfor

Siklus fosfor sangat mudah terganggu oleh kultivasi tanah yang intensif. Fosfor masuk ke laut melalui sungai (Gambar 5.3). Pelapukan kontinen dari materi kerak bumi, yang mengandung rata-rata 0,1% P_2O_4 merupakan sumber utama dari fosfor sungai.



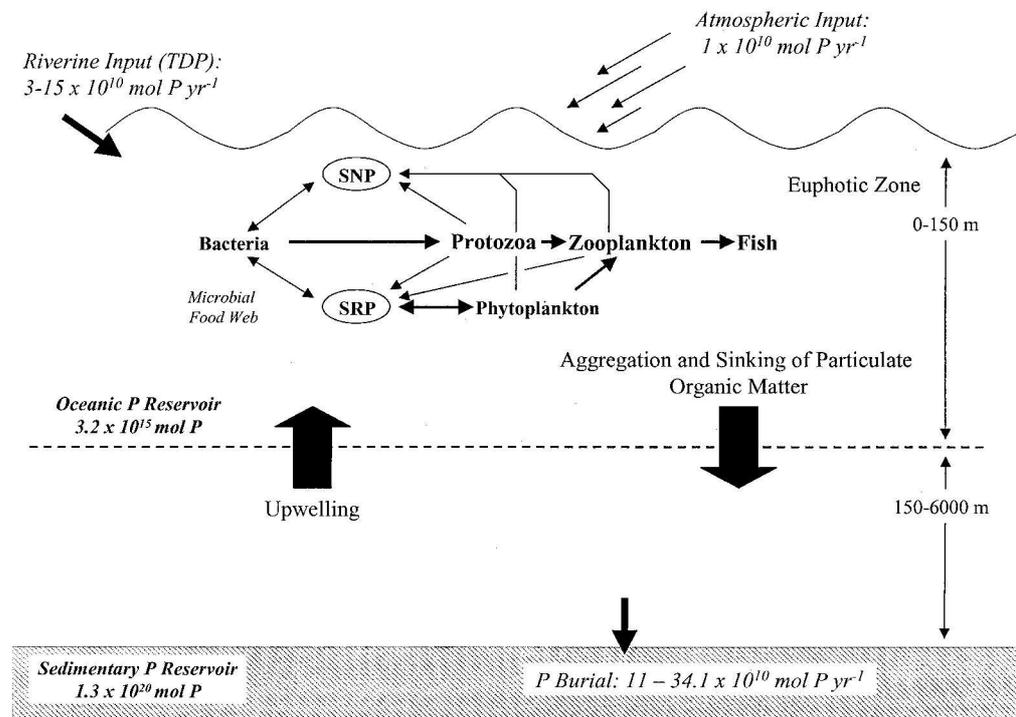
GAMBAR 5.2: Apatit dengan sistem kristal heksagonal

Froelich et al. (1982, dalam Benitez-Nelson, 2000) menggunakan laju penerunan permukaan tahunan untuk menghitung masukan maksimum fosfor ke laut, yaitu sebesar $3,3 \times 10^{11} \text{ mol P th}^{-1}$. Jika aktivitas manusia (anthropogenic), seperti perusakan hutan dan penggunaan pupuk dimasukkan, maka jumlah fosfor yang masuk ke laut akan meningkat sebesar 3 kali lipat, yaitu $7,4 - 15,6 \times 10^{11} \text{ mol P th}^{-1}$ (Froelich et al., 1982; Howarth et al., 1995 dalam Benitez-Nelson, 2000).

Sumberdaya geologi

Reservoir fosfor berupa lapisan batuan yang mengandung fosfor dan endapan fosfor anorganik dan organik. Fosfat biasanya tidak atau sulit terlarut dalam air, sehingga pada kasus ini tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Kehadiran mikroorganisme dapat memicu percepatan degradasi fosfat (Sengbusch, 2003). Sumber fosfor organik adalah perbukitan guano.

Di dunia, cadangan fosfat berjumlah 12 milyar ton dengan cadangan dasar sebesar 34 milyar ton (Suhala & Arifin, 1997). Cadangan fosfat yang ada di



GAMBAR 5.3: Siklus fosfor marin

Indonesia adalah sekitar 2,5 juta ton endapan guano (0,17 – 43% P_2O_5) dan diperkirakan sekitar 9,6 juta ton fosfat marin dengan kadar 20 – 40% P_2O_5 .

5.3 Potasium

Potasium adalah salah satu dari tiga serangkai pupuk buatan yang esensial, yang lainnya adalah fosfor dan nitrogen (Skinner, 1984) dan merupakan satu dari 17 unsur kimia yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan reproduksi tanaman, serta sering dianggap sebagai regulator, karena bergabung dengan 60 sistem enzim yang bekerja pada tanaman (CPHA, 2003). Potasium membantu tanaman untuk tahan terhadap pengaruh suhu dan meningkatkan daya tahan tanaman terhadap penyakit.

Semua tanaman membutuhkan potasium, khususnya tanaman yang kaya karbohidrat seperti kentang. Hasil penyelidikan menunjukkan, konsumsi potasium dalam jumlah yang tepat dapat menyebabkan pertumbuhan serat

kapas yang panjang dan kuat; meningkatkan daya tahan kulit buah, memperpanjang dahan bunga mawar; memperkuat warna hijau dan pertumbuhan helai rumput; dan meningkatkan ukuran dan kualitas buah, butiran, dan sayuran.

Potasium dalam tanah dan tanaman

Potasium cukup melimpah di tanah, biasanya berkisar antara 0,5 sampai 4,0%. Dari jumlah ini, hanya sebagian kecil yang hadir dalam larutan dan siap untuk dipergunakan oleh tanaman, umumnya kurang dari 1% dari total potasium dalam tanah (IF, 2001). Tanah pasiran mengandung paling rendah potasium, tanah lempung dan aluvial mempunyai kandungan potasium tertinggi. Potasium dalam tanah sangat mudah mengalami pelepasan (leaching).

Potasium dibutuhkan paling banyak oleh tanaman, selain nitrogen. Dalam beberapa tanaman, kebutuhannya akan potasium melampaui kebutuhan akan nitrogen, seperti pisang dan kapas. Potasium diserap dalam bentuk ion potasium (K^+). Potasium bukan merupakan suatu komponen dari ikatan organik pada tanaman. Unsur ini penting pada proses fisiologis, termasuk di dalamnya fotosintesis dan pengangkutan gula, efisiensi penggunaan air, metabolisme karbonat dan protein, aktivasi enzim, dan menjaga kualitas tanaman (Harben & Kuřvart, 1996). Konsentrasi optimum potasium pada jaringan tanaman adalah berkisar antara 1,5 sampai 4,5 % K pada berat kering.

Mineral-mineral potasium

Potasium adalah tujuh unsur yang paling banyak di dalam kerak bumi, dan hanya 1-2 persen terdapat pada tanaman. Sisanya terikat pada mineral-mineral yang tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Petani biasanya memanfaatkan pupuk buatan potasium untuk mengoptimisasi pertumbuhan tanaman.

Ada beberapa macam mineral yang mengandung potasium yang dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok silikat, seperti: ortoklas ($KAlSi_3O_8$), biotit ($K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$),

dan muskovit ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$); dan kelompok garam, seperti: arkanit (K_2SO_4), glaserit ($3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{N}_2\text{SO}_4$), kainit ($4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$), karnalit ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), langbeinit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$), leonit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), niter (KNO_3), polihalit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dan silvit (KCl). Dari semua mineral ini, yang paling banyak dijumpai adalah silvit.

Silvit (KCl) merupakan mineral garam yang mempunyai struktur kristal isometrik dengan kombinasi kubik atau oktahedron. Secara fisik mineral ini berwarna transparan, putih atau merah; mempunyai belahan yang sempurna, kekerasan 2, dan berat jenis 1,99. Umumnya mineral ini berbentuk kristal-kristal granular yang menunjukkan bentuk kubik.

Silvit mempunyai kesamaan proses pembentukan dan asosiasi dengan garam halit (NaCl), tetapi lebih sedikit dijumpai. Mineral ini merupakan sumber utama potasium, yang digunakan terutama untuk pupuk.

Sumberdaya geologi

Seperti telah dijelaskan di atas, bahwa potasium merupakan salah satu dari tujuh unsur yang paling melimpah di kerak bumi. Kadar potasium (dalam bentuk K_2O) pada kerak benua mencapai 1,9 persen berat (Rudnick, 1995). Namun sebagian besar dari senyawa ini terikat pada mineral-mineral silikat. Jadi, meskipun sumberdaya geologi potasium sangat melimpah di kerak benua, tidak semuanya dapat dimanfaatkan untuk tanaman.

Aspek lingkungan

Unsur potasium terdiri atas tiga isotop: 30 (93,10 %), 40 (0,0119 %), dan 41 (6,88 %). Isotop potasium 40 (^{40}K) merupakan isotop radioaktif, yang mudah mengalami peluruhan menjadi ^{40}Ca melalui emisi β ($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$) dan ^{40}Ar melalui penangkapan elektron ($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$) (Vidal, 1994). Peluruhan ini menyebabkan kenaikan jumlah argon pada atmosfer yang tetap (Krauskopf & Bird, 1995).

5.4 Karbon

Karbon merupakan unsur primer dari semua kehidupan organik yang terbentuk di bumi. Karbon juga tersebar pada material geologi, laut dan atmosfer. Pembentukan karbon dioksida yang sangat cepat di atmosfer – yang meningkat lebih dari 3 milyar ton per tahun (Rice, 2002). Karbon dioksida merupakan suatu gas yang menyerap panas, sehingga menyebabkan efek rumah kaca (*greenhouse effect*).

Perkembangan keilmuan, terutama ilmu tanah, menempatkan karbon sebagai sesuatu yang atraktif, misalnya mengikat karbon. Kita dapat mengelola pertumbuhan tanaman untuk meningkatkan kapasitasnya menangkap karbon dioksida. Pertumbuhan tanaman dapat diatur sehingga tanah dapat menyimpan karbon dalam jangka waktu yang panjang.

Kebutuhan tanaman dan tanah akan karbon

Penyerapan karbon pada tanah terjadi melalui produksi tanaman. Tanaman mengubah karbon dioksida menjadi jaringan melalui fotosintesa. Setelah tanaman mati, komponennya mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme, dan sebagian karbon pada komponen tanaman akan dilepaskan melalui respirasi (pernapasan) ke dalam atmosfer sebagai karbon dioksida.

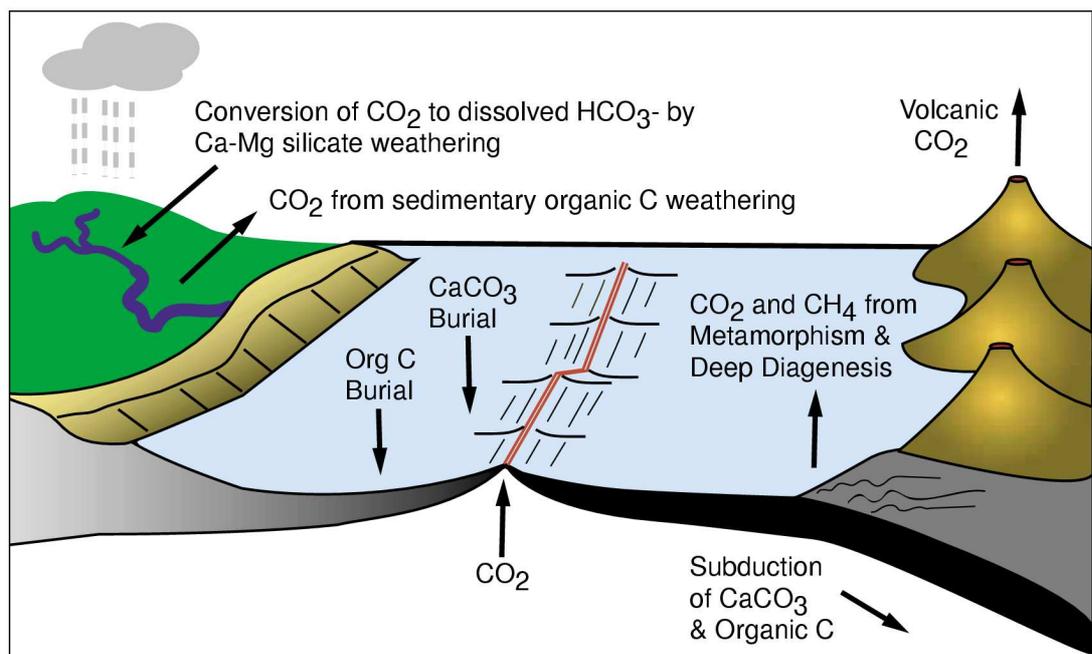
Iklim berpengaruh terhadap penyerapan karbon pada tanah dalam dua cara. Pertama adalah produksi material organik memasuki tanah. Iklim yang panas dan basah umumnya mempunyai produktivitas tanaman yang tinggi. Iklim yang lebih dingin membatasi produksi tanaman. Iklim yang panas barangkali membatasi produksi, karena ketersediaan air yang terbatas, menyebabkan air sebagai faktor pembatas. Iklim juga mempengaruhi kecepatan dekomposisi mikrobial dari materi tanaman dan material organik tanah.

Kehadiran material lempung pada tanah akan menstabilkan karbon organik melalui dua proses. Pertama, karbon organik secara kimia terikat pada permukaan lempung. Lempung yang mempunyai kapasitas adsorpsi tinggi, seperti montmorilonit dapat menyimpan molekul organik. Kedua, tanah

yang mempunyai kandungan lempung tinggi berpotensi tinggi untuk membentuk agregat, yang menangkap karbon organik dan secara fisik dapat melindunginya dari degradasi mikrobial.

Siklus karbon

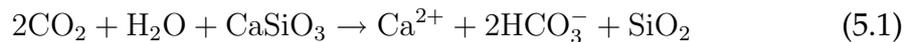
Terminologi “siklus karbon” mempunyai makna bermacam-macam bagi banyak orang. Bagi pemerhati tentang perkembangan CO_2 di atmosfer, karena pembakaran/penembangan hutan dan pembakaran bahan bakar fosil. Pada kasus ini, siklus karbon memuat sumber dan masukan yang memperukarkan karbon pada atmosfer selama rentang waktu manusia. Ini termasuk biosfer, laut, dan tanah (Berner, 1999).



GAMBAR 5.4: Aspek permukaan siklus karbon jangka panjang (Berner, 1999).

Proses yang berpengaruh terhadap CO_2 dapat dibagi menjadi dua sub siklus (Berner, 1999). Pertama, subsiklus silikat–karbonat, yang termasuk di dalamnya pengambilan CO_2 atmosfer (diproses sebagian besar oleh fotosintesa dan respirasi untuk membentuk CO_2 tanah dan asam organik) selama pelapukan

mineral silikat kaya Ca dan Mg. Selanjutnya, pelapukan anortit (feldspar Ca) dipercepat oleh kehadiran karbon dioksida, yang laju pelarutannya tergantung kepada pH dan P_{CO_2} (Berg & Banwart, 2000; Gaillardet, dkk., 1999). Suatu reaksi umum yang representative untuk Ca adalah:



Ca^{2+} dan HCO_3^- terlarut dibawa oleh sungai menuju samudera, dimana keduanya terpresipitasi sebagai CaCO_3 dalam sedimen, melalui reaksi berikut ini:



(Mg dibebaskan dari laut dengan terbentuknya dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_2)_2$) atau oleh pertukaran Ca dengan basalt, Ca akan terpresipitasi sebagai kalsit (CaCO_3). Kedua reaksi di atas dapat disederhanakan menjadi (Ebelmen, 1845; Urey, 1952 dalam Berner, 1999):



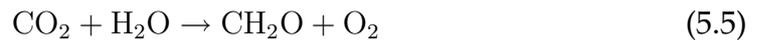
Dengan cara ini, CO_2 dibebaskan dari atmosfer dan membentuk batugamping. Pelapukan karbonat Ca dan Mg, tidak menghasilkan CO_2 dalam jumlah yang sama ketika terbentuknya batuan, hal ini dapat dilihat pembalikan persamaan reaksi 5.2. Untuk menggantikan CO_2 yang hilang pada rekaman batuan, pelepasan gas terjadi sebagai suatu hasil dari penghancuran termal dari karbonat karena vulkanisme, metamorfisme, atau diagenesis dalam. Proses ini melengkapi subsiklus silikat-karbonat dan dapat direpresentasikan secara sederhana sebagai berikut:



yang merupakan pembalikan reaksi 5.3.

Subsiklus karbon yang lain adalah untuk material organik. Subsiklus ini

berpengaruh baik pada CO_2 maupun O_2 . Tertimbunnya material organik dalam sedimen mewakili kelebihan fotosintesis daripada pernapasan dan dapat dinyatakan dengan reaksi yang biasanya diterapkan pada fotosintesa:



Reaksi ini menjelaskan bagaimana material organik tertimbun bisa menghasilkan O_2 atmosfer. Untuk melengkap subsiklus organik, O_2 dikonsumsi dan CO_2 dihasilkan dari oksidasi material organik pada sedimen tua yang tersingkap di permukaan:



Sumberdaya geologi CO_2

Estimasi karbon yang tersimpan pada tanah dunia adalah sekitar 1.100 sampai 1.600 petagram (satu petagram sama dengan satu milyar ton), lebih dari dua kali karbon pada tumbuhan (560 petagram) atau di atmosfer (750 petagram). Sehingga, meskipun perubahan karbon tiap satuan luas pada tanah sangat kecil, ini akan memberikan dampak pada kesetimbangan karbon secara global.

5.5 Kalsium

Tanaman juga membutuhkan kalsium untuk membuat protein (Anonim, 2004b). Kalsium merupakan bagian esensial dari struktur dinding sel tanaman, menyediakan pengangkutan dan retensi unsur-unsur yang lain di dalam tanaman. Kalsium juga diketahui sebagai unsur yang dapat melawan garam alkali dan asam organik di dalam suatu tanaman.

Kalsium dalam tanah

Kalsium yang dapat diekstraksi dari tanah dapat berkisar antara 200 ppm (pasir) sampai 1,6% (kotoran). Kemampuan pertukaran kalsium dalam tanah sangat tergantung kepada kandungan lempung pada tanah. Semakin tinggi kapasitas pertukaran kation (*CEC, Cation Exchange Capacity*), semakin tinggi

kandungan lempung dan semakin tinggi kadar kalsiumnya. Kalsium pada larutan tanah berkisar antara 30 sampai 300 ppm. Keseimbangan kalsium pada tanah pasiran bisa menjadi kritis khususnya jika laju pemakaian potasium tinggi (Cowan, 2004).

Persentase kejenuhan kation pada tanah dengan pH <7,0 dan CEC kurang dari 15 menggunakan persamaan berikut ini untuk menghitung dan menentukan laju penggunaan pupuk untuk menyeimbangkan tanah:

K: $CEC (5,0 - \text{Base Sat on Soil Report}) / 100 \times 936 = \text{lbs } K_2O \text{ per acre}$

Mg: $CEC (15 - \text{Base Sat on Soil Report}) / 100 \times 240 = \text{lbs Mg per acre}$

Ca: $CEC (75 - \text{Base Sat on Soil Report}) / 100 \times 400 = \text{lbs Ca per acre}$

Jika diperlukan pengaturan pH tanah, maka penggunaan batugamping dapat mengatur baik pH maupun kadar kalsium pada tanah. Sebaliknya, jika pengaturan pH tanah tidak diperlukan dan hanya pengaturan kandungan kalsium, maka pengaturan kalsium dapat menggunakan gipsum.

Kalsium pada tanaman

Kalsium hadir pada sitoplasma pada level yang mengindikasikan bahwa kalsium merupakan pakan mikro, $\sim 0,1 \mu\text{M}$. Penggunaan kalsium pada tanaman dikontrol oleh sifat genetik. Fluktuasi kecil kadar Ca pada sitoplasma merupakan bagian dari mekanisme penandaan dari stres lingkungan (Barak, 1999; Cowan, 2004).

Fungsi kalsium pada tanaman adalah sebagai pengaturan osmosis, yang merupakan bagian dari struktur dinding sel. Kalsium berfungsi memperkuat dinding sel untuk mengurangi penetrasi penyakit.

Sumberdaya kalsium

Kalsium dapat bersumber dari pupuk buatan maupun mineral-mineral yang mengandung kalsium. Ada beberapa jenis kalsium yang bersumber dari pupuk buatan, yaitu:

- Kalsium karbonat (CaCO_3), atau kalsium magnesium karbonat ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yang berasal dari batugamping. Kedua jenis ini bi-

asanya digunakan untuk menetralkan keasaman tanah.

- Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) yang mengandung 19% Ca.
- Superfosfat tunggal (18-21% Ca) dan superfosfat *triple* (12-14% Ca).

Secara geologi kalsium dapat diperoleh dari beberapa jenis mineral, seperti Ca-feldspar (pelapukan silikat), kalsit/aragonit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan anhidrit (CaSO_4). Mineral-mineral karbonat dapat diperoleh dari batuan yang tersusun oleh mineral ini, seperti batugamping, *chalk*, batudolomit, dan batunapal.

Batugamping adalah suatu batuan sedimen yang mengandung lebih dari 50% mineral-mineral kalsit dan dolomit. Chalk adalah batuan karbonat berwarna putih yang berukuran halus, yang mengandung 97,5 – 98,5% kalsium karbonat. Batudolomit atau sering disebut sebagai *dolostone* batuan karbonat yang secara dominan tersusun oleh dolomit.

Kalsium sulfat merupakan mineral yang paling umum dijumpai di alam sebagai sulfat alam. Gypsum mengandung 27% air, sedangkan anhidrit adalah bentuk gipsum tanpa air. Selain kedua mineral ini terdapat mineral yang semi stabil (metastable), yaitu basanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Baik gipsum maupun anhidrit terjadi dalam bentuk massa kristalin yang granular, kompak, atau berserat di dalam lapisan batuan sedimen. Batuan yang sering berasosiasi dengannya adalah dolomit dan serpih.

5.6 Magnesium

Meskipun magnesium merupakan pakan utama sekunder, Mg masih merupakan bahan pakan yang penting untuk pertumbuhan. Tanpa magnesium, tanaman tidak dapat menggunakan cahaya untuk membuat makanan. Tanaman juga membutuhkan magnesium untuk dapat mengatur bahan pakan yang lainnya dan untuk membentuk tunas.

Sebagian besar magnesium dalam tanah hadir dalam bentuk yang secara langsung tidak dapat digunakan oleh tanaman. Lebih kurang 5% dari total magnesium hadir dalam bentuk yang dapat saling bertukar. Ini terdiri

atas magnesium yang terkandung dalam lempung dan partikel organik dalam tanah, dan magnesium yang larut dalam air. Tanah yang rendah kalsium maupun magnesium cenderung asam (pH rendah).

Magnesium juga berpengaruh terhadap struktur tanah lempung. Jika persentase magnesium yang dapat saling tukar lebih dari 20%, maka tanah bertambah sulit untuk diolah, karena magnesium menyebabkan partikel lempung berpisah-pisah. Konsentrasi magnesium sering bertambah dengan bertambahnya kedalaman.

Kebutuhan tanaman akan magnesium

Magnesium diambil oleh tanaman sebagai ion magnesium (Mg^{2+}). Ini berperan kunci di dalam proses fotosintesis, merupakan bahan yang penting untuk klorofil, pewarna hijau pada daun dan dahan.

Kehadiran kation lain dalam tanah, atau penggunaan pupuk buatan dapat menyebabkan penurunan penyerapan magnesium oleh tanaman, misalnya kalsium (Ca^{2+}), potasium (K^+), soda (Na^+) dan amonium (NH_4^+). Sebagai contoh, pemberian potasium secara menerus pada tanaman dengan tanah sedikit pasiran dapat menyebabkan penurunan magnesium.

Sumberdaya magnesium

Magnesium dapat diperoleh baik dari pupuk buatan maupun dari mineral-mineral yang mengandung magnesium. Ada beberapa macam pupuk buatan yang mengandung magnesium, yaitu:

- Kalsium magnesium karbonat (dolomit). Bentuk murni dari material ini mengandung 20,8% Ca dan 12,5% Mg. Dolomit di pasaran biasanya mengandung 8 – 12,5% Mg. Dolomit dan produk yang berhubungan dengannya digunakan untuk menyediakan kalsium dan magnesium dan meningkatkan pH tanah.
- Magnesium oksida (Granomag AL7) adalah pupuk buatan yang kaya akan magnesium (54% Mg). Seperti halnya dolomit dan magnesit, magnesium oksida sangat lambat bereaksi dengan tanah.

- Potasium magnesium sulfat mengandung sekitar 18% K, 22% S dan 10,5% Mg. Pupuk ini dapat digunakan jika tanah segera membutuhkan magnesium, misalnya pada tanah yang kadar magnesiumnya rendah. Pupuk ini hanya dapat digunakan dalam keadaan kering.
- Magnesium sulfat [Liquifert Mag] ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) atau sering disebut sebagai garam Epsom. Liquifert Mag mengandung 9,6% Mg dan 13% S. Ini digunakan jika akan memakai magnesium dalam larutan.

Secara geologi, ada beberapa mineral yang mengandung magnesium, seperti bisofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), brusit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), magnesit (MgCO_3), huntit ($\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4$), hidro-magnesit ($\text{Mg}_4(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), dan periklas (MgO). Dari semua jenis mineral ini, yang paling umum dijumpai adalah dolomit dan magnesit.

Dolomit biasanya mempunyai struktur kristal trigonal atau rombohedron sederhana; secara fisik tidak berwarna, putih, kadang kehijauan-keabuan, merah muda, transparan dengan kilap kaca sampai mutiara. Mineral ini mempunyai kekerasan antara $3\frac{1}{2}$ - 4 dengan berat jenis $2,9 \text{ gr/cm}^3$. Dari mineral ini dapat diperoleh 8 - 12,5% Mg.

Magnesit (Gambar 5.5) mempunyai struktur kristal trigonal dengan warna mulai dari putih sampai hitam, abu-abu, biru (kristalin), kuning (kriptokristalin) dan menunjukkan kilap kaca. Mineral ini mempunyai kekerasan $3\frac{1}{2}$ - 5 dengan berat jenis $2,9 - 3 \text{ gr/cm}^3$. Dari mineral ini dapat diperoleh sekitar 47,8% MgO. Magnesit merupakan hasil alterasi dari batuan yang kaya akan magnesium atau sebagai mineral pengotor pada urat bijih hidrotermal.

5.7 Belerang

Belerang adalah bahan galian non-logam yang banyak digunakan di berbagai sektor industri, baik dalam bentuk unsur maupun dalam bentuk senyawa. Meskipun belerang hanya sebagai bahan baku penolong, perannya sangat penting dalam menghasilkan berbagai produk industri, seperti: industri gula, kimia, pupuk, ban, karet, dan korek api (Suhala & Arifin, 1997). Lebih kurang



GAMBAR 5.5: Magnesit berstruktur trigonal

40% dari produksi belerang dunia, dipakai untuk pembuatan superfosfat dan amonium sulfat, yang kedua-duanya merupakan pupuk yang penting.

Semua jenis pemakaian belerang mencapai 60,7 juta ton pada periode 2002 (naik dari 58,8 juta ton pada periode 2001). Keberhasilan pemasaran belerang sangat tergantung kepada industri pupuk fosfat. Penggunaan belerang pada sektor industri pupuk ($\frac{2}{3}$ dari total kebutuhan fosfat) sangat bergantung kepada kebutuhan akan fosfat (Bain, 1997; 2003; Harben & Kužvart, 1996).

Belerang pada tanaman dan dalam tanah

Belerang digunakan oleh tanaman untuk mengelola warna hijau tua pada tanaman atau untuk membentuk protein utama (esensial). Secara ringkas, fungsi belerang pada tanaman adalah sebagai berikut (Anonim, 2004c):

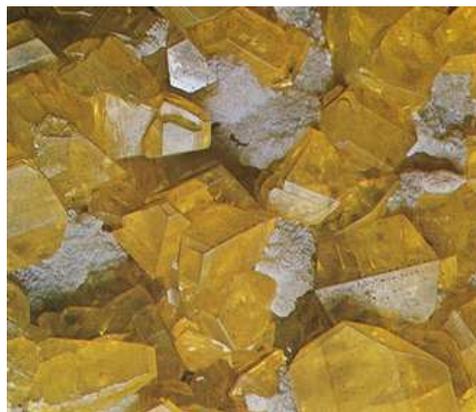
- Bahan makanan utama untuk memproduksi protein
- Membentuk enzim dan vitamin
- Membantu pembentukan khlorofil
- Memperbaiki pertumbuhan akar dan produksi bibit
- Membantu pertumbuhan cepat tanaman dan tahan terhadap dingin

Belerang barangkali disuplai ke dalam tanah dari air hujan. Ini juga ditambahkan dari beberapa pupuk buatan sebagai pengotor, terutama pada pupuk level rendah. Penggunaan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) juga dapat meningkatkan kadar belerang dalam tanah.

Mineralogi belerang

Belerang secara mineralogi dapat sebagai belerang murni (*native sulfur*), ataupun terikat dalam suatu senyawa, seperti mineral-mineral golongan sulfat (gypsum, anhidrit, dan barit) dan sulfida (pirit, pirotit, dan kalkopirit).

Belerang murni (Gambar 5.6) mempunyai sistem kristal ortorombik, biasanya dijumpai dalam bentuk massa tak teratur dan kristal tak sempurna. Secara fisik, belerang murni memiliki berat jenis 2,05 – 2,09 gr/cm³ dan kekerasan 1,5 – 2,5 skala Mohs. Belerang merupakan konduktor panas yang jelek (Klein, 1993; 2004). Belerang jenis ini banyak dijumpai di sekitar aktivitas gunungapi dan biasanya terbentuk oleh kegiatan solfatara yang melewati zona patahan atau rekahan (Suhala & Arifin, 1997) dan air permukaan (bioreduksi ion sulfat) (Hibbard, 1993).



GAMBAR 5.6: Belerang murni dalam bentuk kristal ortorombik

Sekitar 50% produksi belerang dunia merupakan belerang murni, sisanya berasal dari pemisahan belerang dari bijih sulfida. Belerang digunakan sebagian besar untuk industri kimia, seperti asam sulfat (H₂SO₄), dan H₂S. Sebagian besar belerang murni digunakan untuk insektisida, pupuk buatan, dan vulkanisir ban/karet (Klein, 1993; Hibbard, 2002).

Selain belerang murni, pirit (FeS₂) dari kelompok sulfida, merupakan mineral yang kaya akan belerang. Mineral ini mengandung 53,3 % belerang. Secara fisik mineral ini mempunyai sistem kristal kubik, berwarna kuning, kilap

logam. Mineral yang mengandung belerang yang lain adalah dari kelompok sulfat, seperti anhidrit (CaSO_4) dan gipsium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Gambar 5.7). Kedua mineral ini terbentuk pada lingkungan arid.



GAMBAR 5.7: Kristal gipsium dengan struktur kristal monoklin

Sumberdaya geologi

Hanya terdapat 2 sumber belerang murni yang penting. Yang pertama, terutama dieksploitasi di Jepang, yang berasal dari gunung-gunung berapi, yang mengeluarkan gas yang mengandung belerang dan yang mengkristal dalam jalur-jalur dekat permukaan. Sumber yang lain, yang secara kuantitatif lebih besar, berasal dari konsentrasi sekunder CaSO_4 .

Sumberdaya belerang pada endapan evaporit dan vulkanik dan belerang yang berasosiasi dengan gas alam, minyak bumi, dan sulfida logam sekitar 5 milyar ton. Belerang pada gipsium dan anhidrit sangat terbatas. Sumberdaya belerang terbesar (600 milyar ton) terdapat pada batubara, serpih minyak, material organik yang kaya serpih. Namun belum ada teknologi yang ekonomis untuk memisahkan belerang dari material ini (Ober, 2003).

Bab 6

Agromineral II: Nutrisi mikro

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Bab ini akan menjelaskan mengenai bermacam-macam mineral yang termasuk dalam nutrisi mikro untuk tanaman, seperti: boron, tembaga, besi, klor, mangan, molibdenum dan seng. Selain itu juga dibahas mengenai zeolit dan perlit yang sering digunakan untuk mendukung pertanian.

Nutrisi mikro merupakan unsur-unsur penting untuk perkembangan tanaman yang dibutuhkan hanya dalam jumlah kecil (mikro). Unsur-unsur ini kadang-kadang disebut sebagai unsur-unsur minor atau jejak (*trace elements*), namun penamaan nutrisi mikro (*micronutrients*) sangat disarankan oleh ASA (*American Society of Agronomy*) dan SSSA (*Soil Science Society of America*). Unsur-unsur yang termasuk ke dalam nutrisi mikro ini meliputi: boron (B), tembaga (Cu), besi (Fe), klor (Cl), mangan (Mn), molibdenum (Mo), dan seng (Zn). Daur ulang material organik, seperti rumput dan daun-daunan merupakan cara yang paling baik untuk mempertahankan jumlah nutrisi mikro (dan juga nutrisi makro) untuk pertumbuhan tanaman.

Pada bab ini akan dibahas secara singkat semua nutrisi mikro ditambah mineral zeolit dan perlit yang akan memperkaya bahasan mengenai agromin-

eral.

6.1 Boron

Tanaman tidak membutuhkan boron dalam jumlah besar, tetapi boron dapat mengatur penyerapan makanan dan membantu tanaman untuk membuat jaringan baru. Boron telah dikenal sejak 1923 sebagai nutrisi mikro yang penting untuk tanaman tingkat tinggi (Warington, 1923 dalam Blevins & Lukaszewski, 1994).

Boron memiliki beberapa kegunaan, antara lain:

- Membantu penggunaan nutrisi dan mengatur nutrisi yang lainnya.
- Menolong produksi gula dan karbohidrat.
- Esensial untuk perkembangan tunas dan buah

Boron mengatur metabolisme karbohidrat di dalam tanaman. Seperti halnya kalsium, boron tidak mobil di dalam tanaman, sehingga pemberian secara menerus dibutuhkan pada pertumbuhan tanaman. Boron diambil oleh tanaman dalam bentuk anion borat. Boron juga dikenal sebagai pembantu dalam penurunan jaringan dahan tertentu, yang dikenal sebagai jaringan “meristem” (Trotter, 2001).

Sumberdaya boron

Boron tersebar secara alamiah sekitar 0,1 ppm pada air permukaan, 3 ppm dalam kerak bumi, dan 4,6 ppm dalam air laut (Harben & Kuřvart, 1996). Tanaman biasanya menyerap boron dari material organik dan borak. Borak merupakan bagian dari mineral kelompok borat.

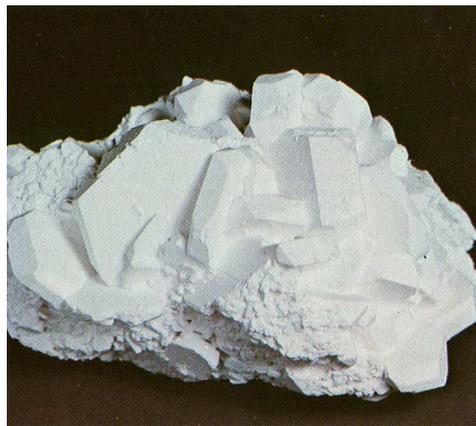
Telah dikenal lebih dari 100 mineral borat, namun hanya empat mineral yang paling umum dijumpai, yaitu:

- Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- Borak ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)
- Uleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

- Kolemanit ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Kernit pertama kali ditemukan di daerah Kern County, Kalifornia. Mineral ini secara fisik tidak berwarna, transparan sampai putih, dengan kilap kaca sampai mutiara. Mineral ini mempunyai struktur kristal monoklin, kekerasan $2\frac{1}{2} - 3$ dan berat jenis 1,9. Ciri khas mineral ini adalah fragmen panjang, belahan splinteri, berat jenis rendah dan larut dengan lambat pada air dingin. Mineral ini sering dijumpai berasosiasi dengan borak, uleksit dan kolemanit pada lapisan lempung yang berumur Tersier.

Istilah borak diambil dari istilah burah (Persia) dan buraq (Arab). Borak mempunyai struktur kristal monoklin (Gambar 6.1) dan biasanya dalam bentuk prismatic. Mineral ini secara fisik tidak berwarna atau putih, kilap kaca, dengan kekerasan $2 - 2\frac{1}{2}$ dan berat jenis 1,7.



GAMBAR 6.1: Borak dengan sistem kristal monoklin

Nama uleksit diambil dari seorang ahli kimia Jerman, George Ludwig Ulex (1811-1893). Uleksit mempunyai sistem kristal triklinik, dan umumnya dijumpai dalam bentuk membundar yang tersusun oleh serat-serat halus. Secara fisik, mineral ini berwarna putih dengan kilap lemak. Mineral ini mempunyai kekerasan $2\frac{1}{2}$ dan berat jenis 1,96.

Kolemanit pertama kali ditemukan oleh seorang pengembang borak di San Francisco, William Tell Coleman (1824-1893). Mineral ini mempunyai struktur kristal monoklin, dan umumnya berbentuk kristal prismatic pendek. Secara

fisik mineral ini berwarna putih sampai tidak berwarna, kilap kaca, kekerasan $4 - 4\frac{1}{2}$ dan berat jenis 2,42.

6.2 Tembaga

Tembaga adalah unsur yang memberi rasa manis pada beberapa jenis buah. Ini diambil oleh tanaman dalam bentuk kation dan memegang peranan penting di dalam pembentukan vitamin A pada tanaman (Trotter, 2001). Tembaga memberikan kontribusi pada proses alamiah termasuk metabolisme dan reproduksi tanaman. Tembaga juga merupakan aktivator penting pada beberapa enzim pertumbuhan tanaman.

Beberapa kegunaan tembaga bagi tanaman adalah:

- Nutrisi penting bagi pertumbuhan reproduktif
- Penolong dalam metabolisme akar
- Membantu dalam pemanfaatan protein

Suplementasi tembaga sangat jarang dibutuhkan, karena secara alamiah suplai tembaga pada tanah sudah mencukupi. Namun demikian, kadang ada jenis tanah yang kekurangan tembaga, seperti tanah yang kaya organik dan tanah pasir. Penambahan tembaga sulfat harus dilakukan dengan hati-hati, karena senyawa ini meskipun dalam jumlah sedikit beracun.

Hanya dikenal beberapa macam mineral yang mengandung tembaga sulfat dan tembaga oksida, yaitu antlerit ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$), brokantit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), kalcantit ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), dan kuprit (CuO). Mineral antlerit mempunyai sistem kristal ortorombik dan biasanya berbentuk tabular. Secara fisik mineral ini berwarna hijau kehitaman, dengan kekerasan $3\frac{1}{2} - 4$ dan berat jenis 3,9.

6.3 Besi

Besi digunakan untuk menyehatkan tanaman dan pertumbuhan hijau tua. Seperti halnya magnesium, besi merupakan mineral utama untuk fotosintesis. Tanaman harus mendapatkan besi untuk membuat klorofil. Besi sangat

melimpah di dalam tanah atau batuan, sehingga suplementasi nutrisi ini tidak diperlukan untuk tanaman.

Besi dapat bersumber dari beberapa mineral, seperti goethit (α -FeOOH), limonit ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), hematit (α -Fe₂O₃), magnetit (FeO · Fe₂O₃), dan siderit (FeCO₃). Goethit mempunyai sistem kristal ortorombik dan umumnya prisma panjang. Mineral ini biasanya dijumpai berwarna coklat kehitaman atau coklat kekuningan/kemerahan, kilap logam dengan kekerasan 5 – 5^{1/2} dan berat jenis 3,3 – 4,3. Hidrolisis mineral ini menghasilkan mineral limonit, yang biasanya sebagai penyusun utama dari lapisan tanah merah.

6.4 Klor

Klor berfungsi untuk menolong metabolisme tanaman. Klor sering tersedia lebih dari cukup untuk tanaman, sehingga suplementasi nutrisi ini tidak diperlukan lagi bagi tanah. Klor sangat penting bagi tanaman, karena dibutuhkan dalam reaksi fotosintesis dalam tanaman. Nutrisi ini diambil dalam bentuk anion klorida (Cl⁻).

Anion klorida terdapat dalam jumlah cukup baik pada air permukaan, air tanah dan tentu saja air laut. Namun demikian, sumber klor yang terkandung pada larutan ini dapat dari bermacam-macam mineral garam, seperti: halit (NaCl) dan silvit (KCl). Mineral halit mempunyai sistem kristal isometrik jenis kubik (Gambar 6.2). Sifat fisik mineral ini tidak berwarna atau berwarna putih, kilap kaca sampai translusen, mempunyai kekerasan 2^{1/2} dan berat jenis 2,16. Mineral ini terjadi karena proses evaporasi larutan garam, dan biasanya berasosiasi dengan gipsum, silvit, anhidrit dan kalsit.

6.5 Mangan

Mangan berfungsi mengatur sistem enzim, yang termasuk di dalam memecah karbohidrat dan metabolisme nitrogen. Selain itu mangan sangat penting untuk pembentukan klorofil. Tanpa mangan, tanaman tidak dapat melakukan fungsi selnya (Anonim, 2004a).

Mangan digunakan tanaman sebagai kation mangan. Ini merupakan akti-



GAMBAR 6.2: Halit dengan sistem kristal kubik

vator untuk beberapa macam enzim di dalam proses pertumbuhan tanaman, dan membantu besi di dalam pembentukan klorofil selama fotosintesis. Konsentrasi mangan yang tinggi barangkali dapat menahan penyerapan besi pada tanaman. Mangan biasanya digunakan bersama-sama seng dan dapat digunakan dalam larutan encer. Jeruk dan tanaman buah-buahan yang lain sering ditritmen dengan mangan suplemen dalam bentuk mangan sulfat. Penambahan mangan suplemen diperlukan jika tanaman mengalami kekurangan akan unsur ini (Trotter, 2001).

Mangan dalam tanah dapat bersumber dari beberapa jenis mineral/batuan. Mangan merupakan salah satu dari duabelas unsur yang melimpah di kerak bumi. Batuan beku mengandung lebih kurang 0,124% mangan. Saat ini dikenal lebih dari 300 jenis mineral yang mengandung mangan (Harben & Kuřvart, 1996). Dari sekian banyak mineral, yang paling banyak dijumpai di alam meliputi (Harben & Kuřvart, 1996; Klein & Hurlbut, 1993): braunit ($2\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$), kriptomelan ($\text{KMn}_8\text{O}_{16}$), hausmanit ($\text{MnO} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3$), jakobsit ($\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), manganit ($\text{MnO}(\text{OH})$), psilomelan ($\text{BaMn}^{2+}\text{Mn}_8^{3+}\text{O}_{16}(\text{OH})_4$), pirolusit ($\beta\text{-MnO}_2$), rodokrosit (MnCO_3), rodonit (MnSiO_3), dan todorokit ($(\text{Mn,Ca,Mg})\text{Mn}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Manganit mempunyai struktur kristal monoklin, dengan kristal umumnya prismatic. Manganit dikenal berwarna hitam atau abu-abu baja dengan cerat berwarna coklat tua. Secara fisik, mineral ini mempunyai kekerasan 4 dan

berat jenis 4,3. Mineral ini ditemukan berasosiasi dengan oksida mangan yang lain.

Rodokrosit merupakan mineral kelompok karbonat dan mempunyai struktur kristal heksagonal. Mineral ini mempunyai karakter fisik: warna merah rosa atau coklat tua; kilap kaca; cerat putih dengan kekerasan $3\frac{1}{2} - 4$ dan berat jenis 3,5 – 3,7.

6.6 Molibdenum

Tanaman membutuhkan molibdenum untuk memproduksi protein esensial dan membantu dalam pemakaian nitrogen. Molibdenum diambil tanaman dalam bentuk anion negatif molibdat. Tanpa molibdenum, tanaman tidak dapat mengolah nitrogen menjadi asam amino. Tumbuh-tumbuhan polong (*legumes*) dan tanaman yang membutuhkan nitrogen lainnya tidak dapat mengambil nitrogen dari atmosfer tanpa molibdenum (Trotter, 2001).

Tanah sangat jarang mengalami defisit akan molibdenum dan biasanya jika suplementasi dibutuhkan, hanya diperlukan satu *ounce per acre* (0,11 gram per m^2). Sehingga, dapat dikatakan nutrisi penting ini hanya dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah yang sedikit. Molibdenum di alam bersumber pada dua mineral, yaitu molibdenit (MoS_2) dan wulfenit ($PbMoO_4$).

Molibdenit mempunyai struktur kristal heksagonal, biasanya berbentuk kristal lembaran. Sifat fisik mineral ini meliputi: warna abu-abu timbal; kilap metalik; cerat hitam keabuan; kekerasan $1 - 1\frac{1}{2}$. Mineral ini merupakan mineral aksesor pada granit timah. Alterasi mineral ini dapat membentuk mineral ferimolibdit ($Fe_2(MoO_4)_3 \cdot 8H_2O$) yang berwarna kuning.

Wulfenit mempunyai struktur kristal tetragonal, biasanya berbentuk bujur sangkar tabular. Mineral ini berwarna kuning, oranye, merah, abu-abu atau putih; kilap kaca atau adamantin; cerat putih; dengan kekerasan 3 dan berat jenis 6,8. Mineral ini ditemukan sebagai hasil oksidasi urat timbal bersama-sama mineral timbal sekunder yang lainnya.

6.7 Seng

Seng merupakan unsur esensial untuk transformasi karbohidrat, mengatur pemakaian gula. Tanaman menggunakan seng dalam hubungannya dengan nutrisi lainnya untuk mengatur proses-proses termasuk membentuk klorofil.

Seng di alam bersumber pada beberapa mineral, seperti smithsonit (ZnCO_3), zincit (ZnO) dan wilemit (Zn_2SiO_4). Zincit merupakan mineral kelompok oksida yang memiliki struktur kristal heksagonal, namun jarang dijumpai dalam bentuk kristal. Mineral ini mempunyai sifat fisik: warna merah atau oranye-kuning; kilap subadamantin; cerat orange-kuning; dengan kekerasan 4 dan berat jenis 5,68.

Smithsonit merupakan mineral kelompok karbonat yang mempunyai struktur heksagonal. Sifat fisik mineral ini meliputi: warna coklat gelap atau kadang-kadang tidak berwarna, putih, hijau, biru atau pink; cerat berwarna putih; kekerasan 4 – 4^{1/2} dan berat jenis 4,3 – 4,45. Mineral ini merupakan mineral supergen yang sering berasosiasi dengan endapan seng di dalam batugamping.

6.8 Perlit

Perlit barangkali tidak secara langsung berhubungan dengan tanah atau tanaman, namun saat ini banyak digunakan sebagai agregat hortikultura. Perlit merupakan suatu batuan vulkanik gelas yang berwarna abu-abu cerah dengan kilap kaca atau mutiara dan mempunyai karakteristik retakan konsentris. Bedanya dengan gelas alam adalah komposisinya yang silisik (riolitik) dan air kimia yang dikandung di dalam struktur gelasnya. Komposisi kimia perlit meliputi: 70-75% SiO_2 , 12-18% Al_2O_3 , 4-6% K_2O , dan 2-5% air (Harben, 1995).

Secara genetik perlit merupakan salah satu anggota dari gelas alam yang mengandung air, yang juga termasuk obsidian hidrus dan berkadar air rendah, batuapung yang terhidrasi, dan *pitchstone*. Perbedaan utama antara perlit dengan anggota yang lain adalah kandungan airnya. Obsidian awal mengandung air total kurang dari 1,0 %berat yang terikat sebagai SiOH di dalam

kerangka silikat. Jika obsidian mengalami pelapukan, alterasi sekunder menghasilkan perlit dengan penambahan air pada struktur silika gelas hingga 2 sampai 5 %berat. Jika kandungan air ini meningkat sampai 10 %berat akan membentuk *pitchstone* (Harben & Kuřvart, 1996).

Salah satu sifat fisik perlit adalah mudah mengembang. Dengan pemanasan cepat hingga 870-1.100 °C perlit melemah dan mengembang hingga 10-20 kali dari volume asalnya dan dari batuan dengan berat jenis 1,159 g/cm³ menjadi material ringan dengan berat jenis 0,08-0,18 g/cm³ (Harben, 1995).

Sifat dalam perlit, pH antara 6,5 sampai 8,0 dan struktur selnya menyebabkan perlit dapat menyerap larutan berkali-kali [dapat membawa herbisida, insektisida, pupuk, pengatur tanah dan akar tanaman].

6.9 Zeolit

Zeolit merupakan aluminosilikat kristalin berpori mikro terhidrasi yang mengandung pori yang saling berhubungan dengan ukuran 3 sampai 10Å. Zeolit tersusun oleh silikon, oksigen, dan aluminium dalam suatu kerangka struktur tiga-dimensional dengan pori-porinya mengandung molekul air yang dapat menyerap kation yang dapat saling bertukar (*cation exchange*). Secara kimia, zeolit mempunyai rumus empiris: $M_2^+, M^{2+} Al_2O_3 \cdot gSiO_2 \cdot zH_2O$, dimana M⁺ biasanya Na atau K, dan M²⁺ adalah Mg, Ca, atau Fe.

Penggunaan komersial zeolit antara lain sebagai “penyaring molekuler” dan sebagai penukar kation. Kation seperti Na⁺, K⁺, dan Ca²⁺ terikat sangat lemah pada kerangka tetrahedra dan dapat dilepaskan dengan mudah dengan larutan kuat dari ion yang lain. Berdasarkan hal ini, zeolit dapat digunakan untuk melunakkan air, dimana air yang keras (kandungan Ca²⁺ tinggi) dapat dilunakkan dengan mengganti ion Ca²⁺ (dalam air) dengan Na⁺ yang terkandung di dalam zeolit alam atau sintetis (Na₂Al₂Si₃O₁₀ · 2H₂O). Air keras, air yang mengandung banyak ion kalsium, dilewatkan melalui tangki yang berisi butiran zeolit. Ion Ca²⁺ pada larutan akan mengganti ion Na⁺ pada zeolit sehingga terbentuk CaAl₂Si₃O₁₀ · 2H₂O. Jika pada zeolit terjadi kejenuhan Ca²⁺, larutan garam NaCl pekat dapat dilewatkan pada zeolit sehing-

ga ion Ca^{2+} pada zeolit diganti oleh Na^+ dari NaCl untuk membentuk kembali Na-zeolit ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Dengan cara seperti ini, larutan yang mengandung logam-logam keras dapat disaring dengan zeolit.

Dalam bidang pertanian, zeolit barangkali tidak digunakan secara langsung, melainkan dipakai sebagai katalis untuk mengurangi kelebihan logam berat pada tanah. Zeolit alam, seperti klinoptilolit ($\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{30}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) dan mordenit ($\text{Na}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) sering ditambahkan pada pakan ternak untuk meningkatkan efisiensi pakan, dan mengurangi masalah kesehatan.

Batuan sebagai bahan induk tanah

TUJUAN INSTRUKSIONAL

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai batuan, jenis-jenis batuan, karakteristik tiap-tiap batuan, proses pelapukan dan alterasi, dan kecepatan pelapukan.

Batuan adalah material alam yang tersusun atas kumpulan (agregat) mineral baik yang terkonsolidasi maupun yang tidak terkonsolidasi yang merupakan penyusun utama kerak bumi serta terbentuk sebagai hasil proses alam. Batuan bisa mengandung satu atau beberapa mineral. Sebagai contoh ada yang disebut sebagai *monomineral rocks* (batuan yang hanya mengandung satu jenis mineral), misalnya marmer, yang hanya mengandung kalsit dalam bentuk granular, kuarsit, yang hanya mengandung mineral kuarsa. Di samping itu di alam ini paling banyak dijumpai batuan yang disebut *polymineral rocks* (batuan yang mengandung lebih dari satu jenis mineral), seperti granit atau monzonit kuarsa yang mengandung mineral kuarsa, feldspar, dan biotit.

Atas dasar cara terbentuknya, batuan dapat dibedakan menjadi 3 kelompok, yaitu:

1. batuan beku : sebagai hasil proses pembekuan atau kristalisasi magma



GAMBAR 7.1: Contoh batuan kristalin. (a) marmer yang monomineral, dan (b) monzonit kuarsa yang polimineral

2. batuan sedimen : sebagai hasil proses sedimentasi
3. batuan metamorf : sebagai hasil proses metamorfisme

Untuk membedakan ketiga jenis batuan di atas tidak lah sulit. Secara sederhana dapat dilakukan algoritma pengamatan sebagai berikut:

- Bedakan apakah batuan itu terdiri atas klastika/detritus atau kristal?
- Jika batuan terdiri atas klastika/detritus, dapat dipastikan sebagai batuan sedimen. Arahkan pikiran anda ke deskripsi batuan sedimen klastik.
- Jika batuan terdiri atas kristal, amati apakah terdiri atas satu macam mineral (*mono-mineralic*) atau bermacam-macam kristal (*poly-mineralic*).
- Jika batuan merupakan batuan kristalin yang monomineralik, amati lebih detail bagaimana kontak antar kristal. Apakah merupakan kontak belahan atau kontak suture. Jika batuan yang monomineralik ini mempunyai kontak belahan maka dapat dipastikan sebagai batuan sedimen non-klastik. Kontak suture disebabkan oleh tekanan dan reaksi antar kristal ketika terkena proses metamorfisme.
- Jika batuan merupakan batuan kristalin yang polimineralik, amati apakah kontakanya *interlocking* (saling mengunci) ataukah *suture*.

- Batugamping yang tersusun oleh material karbonat dimasukkan ke dalam kelompok batuan sedimen.

Setelah diketahui dengan pasti jenis batuan yang diamati, sesuaikan kerangka deskripsi berdasarkan jenis batuannya. Kesalahan dalam deskripsi dapat menyebabkan perlakuan lebih lanjut terhadap batuan yang diamati menjadi tidak tepat.

7.1 Macam-macam bebatuan

7.1.1 Batuan beku

A. Proses pembentukan

Batuan beku adalah batuan yang terbentuk langsung dari pembekuan atau kristalisasi magma. Proses ini merupakan proses perubahan fase dari fase cair (lelehan, melt) menjadi fase padat, yang akan menghasilkan kristal-kristal mineral primer atau gelas. Proses pembekuan magma (temperatur dan tekanan) akan sangat berpengaruh terhadap tekstur dan struktur primer batuan, sedangkan komposisi batuan sangat dipengaruhi oleh sifat magma asal.

Karakteristik tekstur dan struktur pada batuan beku sangat dipengaruhi oleh waktu dan energi kristalisasi. Apabila terdapat cukup energi dan waktu pembentukan kristal maka akan terbentuk kristal berukuran besar, sedangkan bila energi pembentukan rendah akan terbentuk kristal yang berukuran halus. Bila pendinginan berlangsung sangat cepat, maka kristal tidak sempat terbentuk dan cairan magma akan membeku menjadi gelas. *Proses ini sangat identik dengan pembuatan gula pasir, di mana untuk membuat gula yang berukuran kasar diperlukan waktu pendinginan relatif lebih lama dibandingkan gula yang berukuran halus.*

Berdasarkan kecepatan pendinginan ini, maka batuan beku dapat dibagi menjadi 3 macam, yaitu batuan beku plutonik, hipabisal dan batuan beku vulkanik yang berturut-turut mempunyai ukuran kristal dari yang paling kasar ke halus.

GAMBAR 7.2: Seri reaksi Bowen

Urutan mineral yang terbentuk dari kristalisasi magma seiring dengan penurunan suhu dapat dilihat pada Bowen's reaction series (lihat gambar 1). Pada seri reaksi Bowen terdapat 2 kelompok, yaitu:

1. seri terputus (*discontinuous series*), dimana mineral yang terbentuk mempunyai struktur kristal dan komposisi yang berbeda-beda
2. seri berkesinambungan (*continuous series*), dimana mineral yang terbentuk mempunyai struktur kristal yang sama, namun komposisi kimia penyusunnya yang berbeda.

Akhirnya pada cairan magma akan tersisa silika, potasium dan sodium yang akan kemudian akan membentuk mineral-mineral K-feldspar, muskovit dan kuarsa.

Batuan beku berdasarkan atas genesa dapat dibedakan menjadi batuan beku intrusif, yang terbentuk di bawah permukaan bumi, dan batuan beku ekstrusif, yang membeku di atas permukaan bumi. Batuan beku ekstrusif masih dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu batuan aliran (efusif) dan ledakan (eksplosif).

B. Karakteristik

B.1. Sifat fisik

Pengamatan fisik yang perlu diamati adalah warnanya saja. Warna dapat mencerminkan proporsi kehadiran mineral terang (felsik) terhadap mineral berwarna gelap (mafik). Dari pengamatan warna ini, dapat memberikan penafsiran kepada tipe batuan asam, menengah, basa dan ultrabasa. Batuan beku asam memiliki warna relatif lebih terang dibandingkan dengan batuan beku menengah atau basa.

B.2. Tekstur

Pengamatan tekstur meliputi, tingkat kristalisasi, keseragaman kristal dan ukuran kristal yang masing-masing dapat dibedakan menjadi beberapa

macam.

1. Tingkat kristalisasi

- Holokristalin, seluruhnya terdiri atas kristalin
- Holohyalin, seluruhnya terdiri atas gelas
- Hypohyalin, sebagian kristal dan sebagian gelas.

2. Keseragaman kristal

- Equigranular, mempunyai ukuran kristal yang relatif seragam. Sering dipisahkan menjadi idiomorfik granular (kristal berbentuk euhedral), hypidiomorfik granular (kristal berbentuk subhedral) dan allotriomorfik granular (kristal berbentuk anhedral).
- Inequigranular (porfiritik), mempunyai ukuran kristal yang tidak seragam. Kristal yang relatif lebih besar disebut sebagai fenokris (kristal sulung), yang terbentuk lebih awal. Sedangkan kristal yang lebih halus disebut sebagai massa dasar.
- Afanitik, jika batuan kristalin mempunyai ukuran kristal yang sangat halus dan jenis mineralnya tidak dapat dibedakan dengan kaca pembesar.

3. Ukuran kristal

- < 1mm → halus
- 1 – 5mm → sedang
- > 5mm → kasar

B.3. Komposisi

Mineral pada batuan beku dapat dikelompokkan menjadi mineral utama dan mineral asesori. Mineral utama merupakan mineral yang dipakai untuk menentukan nama batuan berdasarkan komposisi mineralogi, karena keberadaannya pada batuan melimpah. Contoh: ortoklas, plagioklas, kuarsa, piroksen dan olivin.

Mineral asesori adalah mineral yang keberadaannya pada batuan tidak melimpah, namun sangat penting dalam penamaan batuan, misalnya biotit atau hornblende pada granit biotit atau granit hornblende.

Mineral yang sangat halus, misalnya pada batuan yang bertekstur afanitik, cukup disebutkan kelompok mineralnya saja, misalnya mineral felsik, intermediat atau mineral mafik. Contoh: Riolit tersusun oleh mineral felsik.

B.4. Struktur

Struktur pada batuan beku adalah kenampakan hubungan antara bagian-bagian batuan yang berbeda. Struktur ini sangat penting di dalam menduga karakteristik keteknikan, misalnya pada batuan beku yang berstruktur kekar tiang (columnar joint) akan mempunyai karakteristik keteknikan yang berbeda dengan batuan beku yang berstruktur kekar lembaran (*sheeting joint*). Kedua struktur ini hanya dapat diamati di lapangan.

Macam-macam struktur yang sering dijumpai pada batuan beku adalah:

- Masif : bila batuan pejal tanpa retakan atau lubang gas
- Teretakkan : bila batuan mempunyai retakan (kekar tiang atau kekar lembaran)
- Vesikuler : bila terdapat lubang gas. Skoriaan, jika lubang gas tidak saling berhubungan; Pumisaan, jika lubang gas saling berhubungan; Aliran, bila ada kenampakan aliran pada orientasi lubang gas.
- Amigdaloidal : bila lubang gas terisi oleh mineral sekunder.

7.1.2 Batuan sedimen

A. Proses pembentukan

Batuan sedimen adalah batuan yang terbentuk karena proses sedimentasi, yang meliputi pelapukan, erosi, transportasi dan deposisi (pengendapan). Proses pelapukan yang terjadi dapat berupa pelapukan fisik maupun pelapukan kimia. Proses erosi dan transportasi terutama dilakukan oleh media air

dan angin. Proses pengendapan terjadi jika energi transport sudah tidak mampu mengangkut detritus tersebut. Material yang lepas ini akan diubah menjadi batuan dengan proses diagenesis dan litifikasi, yang termasuk di dalamnya kompaksi dan sementasi.

Secara umum batuan sedimen dapat dibedakan menjadi dua golongan besar berdasarkan cara pengendapannya, yaitu batuan sedimen klastik dan non-klastik.

- Batuan sedimen klastik tersusun atas butiran-butiran (klastika) yang terbentuk karena proses pelapukan secara mekanis dan banyak dijumpai mineral-mineral alogenik. Mineral-mineral alogenik adalah mineral yang tidak terbentuk pada lingkungan sedimentasi atau pada saat sedimentasi terjadi. Mineral ini berasal dari batuan asal yang telah mengalami transportasi dan kemudian terendapkan pada lingkungan sedimentasi. Pada umumnya berupa mineral yang mempunyai resistensi tinggi, seperti kuarsa, plagioklas, hornblende, garnet dan biotit.
- Batuan sedimen non-klastik, terbentuk karena proses pengendapan secara kimiawi dari larutan maupun hasil aktivitas organik dan umumnya tersusun oleh mineral-mineral autigenik. Mineral-mineral autigenik adalah mineral yang terbentuk pada lingkungan sedimentasi, seperti gipsum, anhidrit, kalsit dan halit.

B. Karakteristik

B.1. Sifat fisik

Pengamatan fisik meliputi pengamatan warna dan derajat kompaksi. Warna batuan sedimen dapat mencerminkan komposisi dominan atau jenis semen penyusunnya, misalnya batuan sedimen yang berukuran pasir berwarna kuning atau kemerahan dapat diduga bahwa batuan tersebut disemen oleh material yang tersusun oleh oksida besi.

B.2. Tekstur

Tekstur batuan sedimen adalah segala kenampakan yang berhubungan dengan butiran penyusunnya, seperti ukuran butir, bentuk butir, hubungan antar butir (kemas). Secara umum tekstur batuan sedimen dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu klastik dan non-klastik.

Pada tekstur klastik, yang diamati meliputi:

- Ukuran butir yang dapat dipisahkan berdasarkan skala Wentworth, seperti bongkah (> 256 mm), berangkal (64 – 256 mm), kerakal (4 – 64 mm), kerikil (2 – 4 mm), pasir (0,063 – 2 mm), lanau (0,004 – 0,063 mm) dan lempung ($< 0,004$ mm).
- Sortasi (pemilahan) dapat berupa sortasi baik, jika besar butiran penyusunnya relatif sama dan sortasi buruk, jika besar butiran penyusunnya tidak sama.
- Bentuk butir dibedakan atas bentuk menyudut (angular) dan membulat (rounded) serta menyudut/membulat tanggung (*subangular* atau *subrounded*).
- Kemas dibedakan menjadi 2 macam, yaitu kemas terbuka (*matrix supported*), jika butiran yang berukuran besar (fragmen) tidak saling bersentuhan atau mengambang dalam matrik. Kemas tertutup (*class supported*) jika butiran penyusunnya saling bersentuhan satu sama lain.

Pada batuan sedimen yang berukuran > 2 mm, masih dapat dideskripsi lebih detail mengenai fragmen (butiran yang lebih besar dari ukuran pasir), matrik (butiran yang berukuran lebih kecil dari fragmen dan diendapkan bersama-sama fragmen), dan semen (material halus yang menjadi pengikat antara matrik dan fragmen). Semen dapat berupa silika, karbonat, sulfat, atau oksida besi.

Pada batuan yang bertekstur non-klastik umumnya memperlihatkan kenampakan mozaik dari kristal penyusunnya. Kristal penyusun biasanya terdiri dari satu macam mineral (monomineralik), seperti gipsum, kalsit, dan anhidrit. Macam-macam tekstur non-klastik adalah:

- Amorf : berukuran lempung/koloid
- Oolitik : kristal berbentuk bulat yang berkumpul, ukurannya 0,25 – 2 mm
- Pisolitik : sama seperti oolitik, ukuran butir kristalnya > 2 mm

B.3. Struktur

Struktur pada batuan sedimen sangat penting baik untuk geologi maupun geologi teknik. Pada analisis geologi struktur ini dapat digunakan untuk menganalisis kondisi tektonik dari daerah dimana batuan sedimen tersebut dijumpai. Di samping itu pada bidang batas struktur sedimen secara keteknikan merupakan bidang lemah. Macam struktur sedimen yang dapat dijumpai, misalnya:

- Perlapisan atau laminasi sejajar, bentuk lapisan yang pada awalnya terbentuk secara horizontal. Posisi lapisan ini dapat berubah jika terkena proses tektonik, misalnya perlapisan miring atau terkena patahan.
- Perlapisan silang-siur, perlapisan batuan saling potong-memotong pada skala kecil, biasanya melengkung.
- Perlapisan bergradasi (graded bedding), yang dicirikan oleh perubahan ukuran butiran pada satu bidang perlapisan. Masif, apabila tidak dijumpai lapisan atau laminasi.

B.4. Komposisi

Pengamatan komposisi pada batuan sedimen lebih kompleks daripada pada batuan beku, karena batuan sedimen dapat tersusun oleh fragmen batuan maupun mineral. Namun pada pengamatan komposisi yang ditekankan cukup pada pengamatan komposisi fragmen dan semen. Fragmen dapat berupa butiran mineral yang berukuran lebih dari 2 mm maupun batuan lain (beku, sedimen, dan metamorf).

Semen biasanya tersusun oleh mineral-mineral berukuran halus, seperti lempung, gipsum, karbonat, oksida besi dan/atau silika. Jenis semen ini akan

berpengaruh terhadap karakteristik keteknikan dari batuan sedimen. Batuan yang tersemen silika akan mempunyai karakteristik keteknikan yang lebih baik daripada batuan yang tersemen karbonat. Jenis semen ini bisa diperkirakan dengan menggunakan alat bantu, misalnya HCl untuk menentukan hadirnya material karbonat. Semen gipsum biasanya mempunyai warna hampir sama dengan karbonat, hanya tidak bereaksi dengan HCl. Semen oksida besi biasanya berwarna kuning atau merah. Sedangkan semen silika biasanya sangat keras.

7.1.3 Batuan metamorf

A. Proses pembentukan

Batuan metamorf adalah batuan yang terbentuk oleh proses metamorfosa pada batuan yang telah ada sebelumnya sehingga mengalami perubahan komposisi mineral, struktur, dan tekstur tanpa mengubah komposisi kimia dan tanpa melalui fase cair. Proses ini merupakan proses isokimia (tidak terjadi penambahan unsur-unsur kimia pada batuan), yang disebabkan oleh perubahan suhu, tekanan dan fluida, atau variasi dari ketiga faktor tersebut.

Secara umum terdapat tiga macam tipe metamorfosa, yaitu:

- Metamorfosa termal, yang disebabkan oleh adanya kenaikan suhu akibat terobosan magma atau lava. Proses yang terjadi adalah rekristalisasi dan reaksi antara mineral dan larutan magmatik serta penggantian dan penambahan mineral.
- Metamorfosa regional, terjadi pada daerah yang luas akibat pembentukan pegunungan. Perubahan terutama disebabkan dominan oleh tekanan.
- Metamorfosa dinamik, yang terjadi pada daerah yang mengalami dislokasi atau deformasi intensif akibat patahan. Proses yang terjadi adalah perubahan mekanis pada batuan, tidak terjadi rekristalisasi kecuali pada tingkat filonitik.

Mineral yang umum dijumpai pada batuan metamorf adalah kuarsa, garnet, kalsit, feldspar, mika, dan amfibol.

B. Karakteristik

B.1. Sifat fisik

Pengamatan fisik pada batuan metamorf meliputi pengamatan warna batuan. Warna batuan dapat mencerminkan ukuran butiran. Warna yang gelap cenderung mempunyai ukuran butiran yang halus yang tersusun oleh mineral-mineral mika yang berukuran halus. Warna yang terang biasanya tersusun oleh kuarsa atau karbonat.

B.2. Tekstur

Pengamatan tekstur pada batuan metamorf relatif hampir sama dengan pada batuan beku, karena sama-sama terdiri atas kristal. Macam-macam pengamatan tekstur pada batuan metamorf adalah sebagai berikut:

- Tektstur berdasarkan bentuk individu kristal: *idioblast* (jika mineral penyusunnya dominan berbentuk euhedra), *hypidioblast* (jika mineral penyusunnya berbentuk anhedra).
- Berdasarkan bentuk mineral, tekstur batuan metamorf dapat dibagi menjadi: *lepidoblastik* (terdiri dari mineral berbentuk tabular seperti mika), *nematoblastik* (terdiri dari mineral berbentuk prismatic, seperti hornblende/amfibol), *granoblastik* (terdiri dari mineral yang berbentuk granular, anhedra, dengan batas-batas suture), dan *porfiroblastik* (terdiri dari mineral-mineral yang berukuran tidak seragam, beberapa mineral ditemukan berukuran lebih besar daripada yang lain).

B.3. Struktur

Struktur pada batuan metamorf lebih penting daripada tekstur, karena merupakan dasar dari penamaan batuan metamorf. Struktur ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu struktur foliasi dan struktur non-foliasi.

- Struktur foliasi adalah struktur paralel yang disebabkan oleh adanya penjajaran mineral-mineral penyusunnya. Umumnya tersusun oleh mineral-mineral pipih dan/atau prismatic, seperti mika, horblende atau piroksen. Struktur foliasi dapat dibedakan menjadi slaty cleavage (adanya bidang-bidang belah yang sangat rapat, teratur dan sejajar; batuanya disebut slate/batusabak), phyllitic (hampir sama dengan slaty cleavage, tetapi tingkatannya lebih tinggi daripada batu sabak, sudah terlihat adanya pemisahan mineral pipih dan mineral granular; batuanya disebut filit), schistose (adanya penjajaran mineral-mineral pipih yang menerus dan tidak terputus oleh mineral granular; batuanya disebut sekis), dan gneissic (adanya penjajaran mineral-mineral granular yang berselingan dengan mineral-mineral prismatic, mineral pipih memiliki orientasi tidak menerus; batuanya disebut gneis).
- Struktur non-foliasi dicirikan oleh tidak adanya penjajaran mineral pipih atau prismatic. Struktur ini terdiri atas hornfelsic (dibentuk oleh metamorfosa termal, dimana butiran mineralnya berukuran relatif seragam; batuanya disebut hornfels [tersusun oleh polimineralik], kuarsit [tersusun dominan oleh kuarsa], dan marmer [tersusun oleh kalsit]), cataclastic (terbentuk karena metamorfosa kataklastik, misalnya akibat patahan; nama batuanya adalah kataklasit), mylonitic (mirip dengan kataklastik, tetapi mineral penyusunnya berukuran halus dan dapat dibelah seperti skis; nama batuanya disebut milonit), dan pyllonitic (struktur ini mirip dengan milonitik, tetapi sudah mengalami rekristalisasi sehingga menunjukkan kilap sutera; nama batuanya disebut filonit).

B.4. Komposisi

Komposisi mineral pada batuan metamorf hampir sama dengan pada batuan beku atau sedimen non-klastik. Perbedaan jenis mineralnya lebih kompleks karena merupakan hasil rekristalisasi dari mineral-mineral pada batuan asalnya. Komposisi mineral pada batuan metamorf berfoliasi biasanya polimineralik, sedangkan pada non-foliasi biasanya monomineralik, kecuali horn-

fels.

7.2 Pelapukan dan alterasi pada batuan

Proses pelapukan dan alterasi menyebabkan terubahnya batuan asal menjadi material lain yang sifat fisiknya menjadi lebih lemah. Proses ini dapat mempermudah atau mempercepat terurainya ikatan kimia mineral pada batuan. Proses pelapukan dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

- Pelapukan mekanik yang mengakibatkan pengurangan ukuran butir.
- Pelapukan kimia, yang menyebabkan mineral pada batuan mengalami dekomposisi.

Proses alterasi sedikit berbeda dengan pelapukan. Pada alterasi, proses kimia lebih berperan dibandingkan proses fisika dan di sini terjadi peningkatan suhu yang signifikan untuk mempercepat proses alterasi. Namun demikian, baik proses pelapukan maupun proses alterasi keduanya akan mempercepat proses pembentukan tanah.

Daftar Pustaka

- [1] Anonim (2003a) About remineralize the earth: Soil remineralization in context. <http://www.remineralize.org/about/context.html>.
- [2] ——— (2003b) About remineralize the earth: Rock dust primer. <http://www.remineralize.org/about/primer.html>.
- [3] ——— (2004a) Agriculture fertilizers: Nitrogen, potassium, and phosphorus. Chemical of the Week. <http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/AgriFert/agrifert.html>.
- [4] ——— (2004b) From boron to zinc: What your plants need and why. http://www.wormway.com/articles/09_03_nutrients.asp
- [5] ——— (2004c) Plant nutrients. <http://www.ncagr.com/cyber/kidswrld/plant/>
- [6] Artiola, J.F. (2004) Environmental chemical properties and processes. *In* Artiola, J.F., Pepper, I.L. & Brusseau, M. (eds) Environmental monitoring and characterization. Elsevier, Inc., Amsterdam, 241-261.
- [7] Bain, B. (1997) Sulfur. *Mining Engineering* 06/1997: 47-49.
- [8] ——— (2003) Sulfur. *Mining Engineering* 06/2003: 49-50.
- [9] Barak, P. (1999) Essential Elements for plant growth: Calcium. <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/calcium.htm>
- [10] Benitez-Nelson, C.R. (2000) The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth-Science Reviews* 51: 109-135.
- [11] Berg, A. & Banwart, S.A. (2000) Carbon dioxide mediated dissolution of Ca-feldspar: implications for silicate weathering. *Chemical Geology* 163: 25-42.
- [12] Berner, R.A. (1999) A new look at the long-term carbon cycle. *GSAToday* 9: 1-6.

- [13] Best, M.G. (1982) *Igneous and metamorphic petrology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 630 pp.
- [14] Blevins, D.G. & Lukaszewski, K.M. (1994) Proposed physiologic functions of boron in plants pertinent to animal and human metabolism. *Environmental Health Perspective* 102: 31-33.
- [15] Boggs, S. (1992) *Petrology of sedimentary rocks*. Macmillan Publishing Co., New York, 707 pp.
- [16] Camp, W.G. & Daugherty, T.B. (1991) *Managing our natural resources*. 2nd edition, Delmar Publishers Inc., 332 h.
- [17] Caron, J.M, Gauthier, A., Schaaf, A., Ulysse, J. & Wozniak, J. (1989) *Comprendre et enseigner la planete terre*. Ophrys, Paris. hal. 47 – 116.
- [18] Cowan, D. (2004) *Measure and manage: Calcium more than just limestone*. <http://www.agtest.com/articles/Calcium.htm>.
- [19] CPHA (2003) *Plant nutrients—Potassium*. Natural Resources Fact Sheet, California Foundation for Agriculture in the Classroom. <http://www.cfaitc.org>
- [20] Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. (1992) *Rock forming mineral*. 2nd edition. Longman Scientific & Technical, London, 696 h.
- [21] Gaillardet, J., Dupré, B. & Allègre, C.J. (1999) Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 4037-4051.
- [22] Gough, L.P. (1997) USGS Fact-Sheet-015-97 – *Mind-Land Reclamation in the Thar Desert, India-INDO-U.S. Technology Exchange*. <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0015-97/>.
- [23] Harben, P.W. (1995) *The industrial mineral handybook: A guide to markets, specifications, & prices*. 2nd edition. Industrial Mineral Division, Metal Bulletin PLC, London, 252 h.
- [24] Harben, P.W. & Kužvart, M. (1996) *Industrial minerals: A global geology*. Industrial Mineral Information Ltd., London, 462 h.
- [25] Harrison, C.G.A. (2000) What factors control mechanical erosion rates? *Int Journ Earth Sciences* 88: 752-763.
- [26] Hibbard, M.J. (2002) *Mineralogy: A geologist's point of view*. McGraw-Hill, Boston. 562 h.

- [27] Hillel, D. (2004) Introduction to environmental soil physics. Elsevier Science, Amsterdam, 494 h.
- [28] IF (2001) Potassium fact sheet, Incitec Fertilizer Ltd, Australia.
- [29] Kirsch, H. (1968) Applied mineralogy for engineers, technologists and students. Chapman and Hall Ltd., London, h. 178-180.
- [30] Klein, C. & Hurlbut, C.S., Jr. (1993) Manual of mineralogy. 21st edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 681 h.
- [31] Klein, C. (2002) Mineral science. 22nd edition, John Wiley & Sons, Inc. New York 641 h.
- [32] Krauskopf, K.B. & Bird, D.K. (1995) Introduction to geochemistry. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc. New York, 647 h.
- [33] Ledin, M. (2000) Accumulation of metals by microorganisms — processes and importance for soil systems. Earth-Science Reviews 51: 1-31.
- [34] Manning, D.A.C. (1995) Introduction to Industrial Minerals. Chapman & Hall, London, h. 72-96.
- [35] Nizeyimana, E.L., Petersen, G.W. & Warner, E.D. (2002) Tracking farmland loss. Geotimes 01/2002.
- [36] Ober, J.A. (2003) Sulfur. USGS, Mineral Commodity Summaries, 01/2003: 164-165.
- [37] Rice, C.W. (2002) Storing carbon in soil: Why and how? Geotimes 01/2002.
- [38] Rudnick, R.L. (1995) Making continental crust. Nature 378: 571-578.
- [39] Sano, Y., Takahata, N., Nishio, Y., Fischer, T. & Williams, S.N. (2001) Volcanic flux of nitrogen from the Earth. Chemical Geology 171: 263-271.
- [40] Sengbusch, P. (2003) Nutrient cycles. <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-onl>
- [41] Skinner, B.J. (1984) Sumberdaya bumi (terjemahan). Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, 189 h.
- [42] Suhala, S. & Arifin, M. (1997) Bahan galian industri. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral, Bandung, 366 h.
- [43] Trotter, D. (2001) Trace minerals for healthier plants and soils. <http://www.stretcher.com/stories/01/010625m.cfm>

- [44] Van Straaten, P. (1999) From rocks to crops: The use of geological resource to improve soils (Agrogeology). http://www.lrs.uoguelph.ca/Course%20Pages/313_out1.htm.
- [45] Vidal, P. (1994) Géochimie. Dunod, Paris, 190 h.