



Adi Tonggiroh

BIOGEOKIMIA dan GEOBOTANI

(Interaksi Tanah-Tumbuhan dan Indikator Geokimia)



BIOGEOKIMIA *dan* **GEOBOTANI**

(Interaksi Tanah-Tumbuhan dan Indikator Geokimia)

Adi Tonggiroh

**BIOGEOKIMIA DAN GEOBOTANI
(INTERAKSI TANAH-TUMBUHAN DAN INDIKATOR GEOKIMIA)**

Penulis:
Adi Tonggiroh

Desain Cover:
Andi Juliandi

Sumber Ilustrasi:
www.freepik.com

Tata Letak:
Handarini Rohana

Editor:
Hendra Pachri

ISBN:
978-634-246-863-0

Cetakan Pertama:
April, 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang
by Penerbit Widina Media Utama

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT:
WIDINA MEDIA UTAMA

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 519/JBA/2025
Website: www.penerbitwidina.com
Instagram: @penerbitwidina
Telepon (022) 87355370

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, karunia, serta bimbingan-Nya sehingga buku *Biogeokimia dan Geobotani (Interaksi Tanah-Tumbuhan dan Indikator Geokimia)* ini dapat diselesaikan. Penyusunan buku ini merupakan upaya untuk merangkum perkembangan konsep, pendekatan, dan pemahaman ilmiah mengenai peran Biogeokimia dan Geobotani (Interaksi Tanah-Tumbuhan dan Indikator Geokimia) yang lebih adaptif terhadap dinamika lingkungan.

Buku ini disusun sebagai hasil integrasi dari pengalaman penelitian, kajian literatur, serta pemutakhiran berbagai referensi ilmiah yang relevan dalam bidang geokimia, geologi ekonomi, dan ilmu lingkungan. Harapannya, buku ini dapat memberikan kontribusi akademik bagi pengembangan pemahaman mengenai hubungan antara proses geologi, sistem tanah-tumbuhan, dan siklus biogeokimia unsur dalam konteks eksplorasi sumber daya mineral.

Kami menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam proses penyusunan buku ini. Meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu, kontribusi dan perhatian yang diberikan sangat berarti bagi penyelesaian karya ini.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki berbagai keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat kami harapkan sebagai bagian dari proses penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa, peneliti, serta berbagai

pihak yang memiliki ketertarikan pada kajian biogeokimia, geobotani, dan eksplorasi sumber daya mineral yang berkelanjutan.

Makassar, 1 Maret 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
BAB 1 ILMU BIOGEOKIMIA DAN GEOBOTANI	1
A. Sejarah Biogeokimia dan Geobotani	1
B. Konsep Dasar	7
C. Biogeokimia dan Geobotani untuk Eksplorasi Mineral	14
BAB 2 GEOKIMIA PELAPUKAN – TANAH – TUMBUHAN.....	31
A. Batuan Sumber Pelapukan	31
B. Geokimia Tanah.....	44
C. Kebutuhan Tumbuhan, Kimia, dan Mineralogi	50
BAB 3 GEOBOTANI UNTUK EKSPLORASI MINERAL	55
A. Tumbuhan dan Anomali Geokimia	55
B. Geobotani dan Integrasi Metode	61
C. Prospek Geobotani di Indonesia	66
D. Akar sebagai Pengontrol Unsur: Rizosfer Aktif.....	68
E. Bioavailabilitas Termodinamika: EH–PH, Kompleksasi.....	78
BAB 4 SIKLUS BIOGEOKIMIA UNSUR DAN GEOBOTANI	83
A. Biotik dan Abiotik	83
B. Biogeokimia Tanah	86
C. Siklus Karbon, Nitrogen, Fosfor, Sulfur, Besi dan Silikon.....	91
D. Siklus Unsur Logam.....	124
E. Klasifikasi Alga dan Bakteri.....	128
F. Siklus dan Pengendapan Karbonat oleh Metazoa.....	131
G. Pelarutan Karbonat	134

BAB 5 BIOGEOKIMIA MINERAL BESI.....	141
A. Geokimia Mineral Besi.....	141
B. Besi dan Mikroba	143
C. Besi dan Geokimia Lingkungan	145
BAB 6 BIOGEOKIMIA MINERAL MANGAN	149
A. Geokimia Mineral Mangan	149
B. Mangan dan Mikroba	151
C. Mangan dan Geokimia Lingkungan	153
D. Siklus Global Mangan dan Besi	159
BAB 7 SIKLUS SULFUR BIOLOGIS	163
A. Geokimia Sulfur	163
B. Siklus Biogeokimia Sulfur.....	165
C. Reaksi Reduktif Oksidatif dalam Siklus Sulfur.....	168
D. Ekologi dan Metabolisme Sulfur.....	174
E. Biogeokimia Sulfur di Batubara	176
F. Biogeokimia Sulfur dan Remediasi Lahan Tambang.....	180
G. Biogeokimia Sulfur dan Sedimen Marin	184
H. Biogeokimia Sulfur dan Perangkap Minyak	186
BAB 8 SILICON	193
A. Aspek Biologis dalam Siklus Silika.....	193
B. Dekomposisi Silikat Secara Biologis dan Kimia Organik	201
C. Deposisi dan Diagenesis Silika Biogenik	205
D. Siklus Biogeokimia Silicon dan Bakteri Pelarut Silikat untuk Pertanian Berkelanjutan.....	209
BAB 9 BIOGEOKIMIA MINERAL URANIUM	213
A. Biogeokimia Uranium (U)	213
B. Penambangan dan <i>Tailing</i>	214

C. Organik, Reduksi Oksidasi dan Bioremediasi.....	216
D. Geobotani Uranium.....	224
E. Uranium-Tanah, Batuan Induk dan Tumbuhan.....	226
F. Siklus Biogeokimia Global Unsur-Unsur Tanah Jarang.....	228
BAB 10 METODOLOGI BIOGEOKIMIA GEOBOTANI UNTUK	
EKSPLORASI MINERAL	239
A. Konsep <i>Sampling</i>	239
B. Tahapan Umum Eksplorasi Mineral	241
C. Desain <i>Sampling</i>	242
DAFTAR PUSTAKA	255

BAB 1

ILMU BIOGEOKIMIA DAN GEOBOTANI

A. SEJARAH BIOGEOKIMIA DAN GEOBOTANI

Akar konseptual biogeokimia dan geobotani dapat ditelusuri dari pengamatan empiris yang pada awalnya bersifat sederhana, yakni kenyataan bahwa vegetasi pada suatu lokasi tertentu sering memperlihatkan karakter yang berbeda dibandingkan kawasan di sekitarnya. Dalam praktik tradisional, sejumlah masyarakat lokal memanfaatkan perbedaan vegetasi tersebut sebagai petunjuk alami untuk mengidentifikasi keberadaan endapan emas plaser. Meskipun belum dilandasi oleh kerangka teoritis yang mapan, observasi ini mencerminkan intuisi ekologis bahwa terdapat keterkaitan antara kondisi geologi bawah permukaan dan respons biologis di permukaan.

Memasuki abad ke-19, para ahli botani dan geologi mulai mendokumentasikan secara lebih sistematis hubungan antara variasi komposisi tumbuhan dengan jenis batuan induk serta sifat fisik–kimia tanah. Dari sinilah muncul pemahaman awal bahwa tumbuhan dapat berfungsi sebagai indikator geologi (*geobotanical indicators*), khususnya dalam merefleksikan kondisi geokimia substratnya. Walaupun mekanisme fisiologis dan geokimia yang mendasari fenomena tersebut belum sepenuhnya

BAB 2

GEOKIMIA PELAPUKAN – TANAH – TUMBUHAN

A. BATUAN SUMBER PELAPUKAN

Tanah merupakan hasil transformasi jangka panjang batuan melalui proses pelapukan fisik, kimia, dan biologis. Dalam perspektif geokimia, tanah bukan sekadar material lepas di permukaan, melainkan sistem reaktif yang mencerminkan interaksi antara batuan induk, atmosfer, hidrosfer, dan biosfer. Oleh karena itu, karakteristik tanah sangat dipengaruhi oleh sifat geokimia batuan sumbernya. Secara konseptual, faktor-faktor utama yang mengontrol pembentukan tanah dapat dirangkum sebagai berikut:

1. **Litologi.** Litologi menentukan komposisi mineral primer, kandungan unsur mayor dan jejak, serta kestabilan mineral terhadap pelapukan. Batuan ultramafik, misalnya, cenderung menghasilkan tanah kaya Mg, Fe, Ni, dan Cr, sedangkan batuan felsik menghasilkan tanah dengan dominasi Si, Al, K, dan Na. Dengan demikian, litologi merupakan kontrol awal terhadap jalur evolusi geokimia tanah.

BAB 3

GEOBOTANI UNTUK EKSPLORASI MINERAL

A. TUMBUHAN DAN ANOMALI GEOKIMIA

Dalam kegiatan eksplorasi mineral, berbagai informasi penting diperlukan untuk menilai apakah anomali geobotani merefleksikan kondisi geologi dangkal atau berkaitan dengan sistem geologi yang lebih dalam. Oleh karena itu, integrasi antara data tanah, sistem perakaran tumbuhan, serta data geokimia merupakan prasyarat utama dalam menghasilkan interpretasi geobotani yang andal. Integrasi data tersebut mendukung kegiatan eksplorasi mineral dengan mempertimbangkan cakupan informasi geobotani, antara lain: (1) pemilihan jenis tumbuhan sebagai indikator geokimia batuan, (2) penentuan kedalaman informasi geokimia dari endapan mineral, serta (3) interpretasi perbedaan kadar unsur antara komposisi kimia tanah dan jaringan tumbuhan.

Tumbuhan merupakan produsen primer yang bersifat autotrof, yaitu organisme fotosintetik yang mampu menghasilkan makanannya sendiri dan secara langsung maupun tidak langsung menopang seluruh kehidupan di Bumi. Melalui proses fotosintesis, tumbuhan menghasilkan oksigen, menyerap gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), serta melepaskan

BAB 4

SIKLUS BIOGEOKIMIA UNSUR DAN GEOBOTANI

A. BIOTIK DAN ABIOTIK

Semua unsur utama yang ditemukan dalam organisme biologis mengalami peredaran melalui proses yang relatif teratur dan dapat diprediksi. Secara keseluruhan, proses peredaran berbagai unsur tersebut dikenal sebagai siklus biogeokimia. Siklus ini mencakup beberapa unsur utama yang berperan penting dalam sistem kehidupan, terutama karbon, nitrogen, sulfur, dan besi.

Dalam siklus karbon, karbon dioksida dari atmosfer difiksasi menjadi karbon organik melalui proses fotosintesis oleh tumbuhan dan mikroorganisme. Karbon organik tersebut kemudian kembali ke lingkungan dalam bentuk karbon dioksida melalui proses respirasi biologis serta dekomposisi bahan organik. Pada siklus nitrogen, proses transformasi mikroba memainkan peran penting. Gas nitrogen (N_2) dari atmosfer pertama-tama difiksasi menjadi amonia melalui proses fiksasi nitrogen. Amonia tersebut selanjutnya dapat diasimilasi menjadi senyawa nitrogen organik atau mengalami oksidasi melalui proses nitrifikasi menjadi nitrat.

BAB 5

BIOGEOKIMIA MINERAL BESI

A. GEOKIMIA MINERAL BESI

Di Dalam kerak benua, besi adalah unsur keempat yang paling melimpah dengan konsentrasi sebesar 4,32 wt%. Proses geokimia konsentrasi selektif unsur-unsur dikendalikan oleh evolusi tektonik bumi yang dinamis dalam skala waktu geologis. Besi mengkristal dari lelehan magmatik jika lelehan basaltik yang berevolusi dan sangat diperkaya dengan Fe (aktivitas kimia Fe yang tinggi) dan kondisi tekanan suhu (termodinamika) yang sesuai untuk menstabilkan magnetit spinel dan ilmenit. Besi larut dalam kondisi Eh–pH atmosfer dan dapat mengendap sebagai hidroksida, oksihidroksida, karbonat, dan sulfida dalam perubahan Eh–pH lokal. Mineral silikat mengalami pelapukan untuk melepaskan Fe yang mengendap sebagai goethit, chamosit, siderit, pirit dalam lingkungan geokimia sedimen tergantung pada termodinamika suhu rendah yang berlaku di lokasi pengendapan. Transisi fase ke magnetit dan hematit juga dimungkinkan selama metamorfisme dan martitisasi. Jadi, konsentrasi besi dalam susunan geologis dapat terjadi dalam kondisi yang sangat beragam, mulai dari danau hingga laut, bahkan magmatik hingga metamorfik. Sementara endapan besi sedimen terkait

BAB 6

BIOGEOKIMIA MINERAL MANGAN

A. GEOKIMIA MINERAL MANGAN

Unsur mangan ditemukan dalam berbagai jenis endapan mineral dalam jumlah yang relatif terbatas, namun hadir dalam konsentrasi yang bervariasi pada tanah, perairan, dan organisme hidup. Dalam sistem geokimia alami, mangan umumnya dijumpai dalam tiga keadaan bilangan oksidasi utama, yaitu Mn(II), Mn(III), dan Mn(IV).

Spesies Mn(III) dan Mn(IV) umumnya terdapat dalam mineral (oksi) hidroksida feromangan yang secara lingkungan bersifat dominan dan sering berkembang sebagai mineral berstruktur berlapis. Endapan mineral mangan umumnya terbentuk dari proses sedimentasi dan tersusun atas mineral karbonat, oksida, serta hidroksida mangan.

Keberadaan masing-masing keadaan oksidasi mangan sangat dipengaruhi oleh kondisi kimia lingkungan, terutama nilai pH dan potensial redoks (Eh) sistem. Variasi kedua parameter tersebut menentukan stabilitas termodinamik spesies mangan dalam suatu lingkungan geokimia.

BAB 7

SIKLUS SULFUR BIOLOGIS

A. GEOKIMIA SULFUR

Sulfur (S) merupakan unsur esensial bagi pertumbuhan dan aktivitas organisme. Unsur ini relatif melimpah di kerak Bumi dan juga ditemukan dalam berbagai bentuk di dalam tanah. Sumber sulfur di lingkungan tanah berasal dari berbagai kompartemen, termasuk deposisi atmosfer, pelapukan batuan, penggunaan pupuk dan pestisida, serta masukan dari air irigasi. Sifat dan kuantitas cadangan sulfur dalam tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor pedogenik, termasuk iklim, vegetasi regional, dan kondisi topografi lokal. Interaksi kompleks antara komunitas mikroba dan proses geokimia memainkan peran penting dalam menggerakkan siklus unsur-unsur utama serta mengendalikan fungsi sedimen laut sebagai reservoir dinamis materi organik.

Sejak revolusi industri, peningkatan pembakaran bahan bakar fosil telah menyebabkan bertambahnya masukan sulfur dari atmosfer ke dalam sistem tanah. Selain sumber antropogenik tersebut, berbagai proses alami juga berkontribusi terhadap sirkulasi global sulfur melalui atmosfer. Proses ini meliputi penguapan berbagai senyawa sulfur volatil, seperti hidrogen sulfida

BAB 8

SILICON

A. ASPEK BIOLOGIS DALAM SIKLUS SILIKA

Aktivitas biologis merupakan salah satu kekuatan utama yang membentuk komposisi kimia dan evolusi lingkungan permukaan Bumi. Keberadaan atmosfer dan hidrosfer yang kaya oksigen yang mengelilingi Bumi padat yang relatif reduktif merupakan salah satu konsekuensi paling mencolok dari munculnya kehidupan di planet ini.

Sebaliknya, evolusi biologis dan fungsi ekosistem juga sangat dipengaruhi oleh proses-proses geofisika dan geologi. Dengan demikian, interaksi timbal balik antara organisme hidup dan lingkungan abiotiknya memainkan peran penting dalam perkembangan sistem Bumi.

Memahami hubungan antara organisme dan lingkungan abiotik, serta evolusi yang saling terkait antara biosfer dan geosfer, merupakan tema sentral dalam penelitian biogeologi. Para ahli biogeokimia berkontribusi pada pemahaman ini dengan mempelajari proses transformasi, siklus, dan *transportasi* unsur-unsur kimia di dalam sistem Bumi.

BAB 9

BIOGEOKIMIA MINERAL URANIUM

A. BIOGEOKIMIA URANIUM (U)

Komposisi kimia kerak bumi menunjukkan bahwa uranium merupakan salah satu unsur yang relatif jarang ditemukan, dengan kelimpahan sekitar 0,0027%. Di luar endapan bijih uranium, unsur ini umumnya ditemukan dalam batuan beku dengan kandungan silika tinggi serta dalam berbagai jenis batuan sedimen. Batuan serpih hitam (*black shale*) sering kali menunjukkan pengayaan uranium yang lebih tinggi dibandingkan dengan batuan sedimen lainnya. Kandungan bahan organik yang tinggi pada batuan tersebut menyebabkan beberapa endapan serpih hitam dipertimbangkan sebagai sumber uranium yang berpotensi secara ekonomis.

Uranium memiliki nomor atom 92 dan massa atom relatif sekitar 238,03, sehingga merupakan unsur alami dengan massa atom terbesar yang ditemukan secara alami di kerak bumi. Secara isotopik, uranium memiliki sebelas isotop yang telah diidentifikasi. Namun demikian, uranium alami terutama terdiri atas tiga isotop radioaktif utama, yaitu ^{238}U , ^{235}U , dan ^{234}U . Di antara ketiga isotop tersebut, hanya ^{235}U yang bersifat fisil dan mampu mengalami reaksi fisi nuklir. Isotop ini menyusun sekitar 0,7% dari

BAB 10

METODOLOGI BIOGEOKIMIA GEOBOTANI UNTUK EKSPLORASI MINERAL

A. KONSEP *SAMPLING*

Dalam eksplorasi mineral, strategi *sampling* harus dirancang berdasarkan kerangka geologi regional, tipe mineralisasi, serta kondisi lingkungan permukaan. Oleh karena itu, tahap awal kegiatan eksplorasi umumnya mencakup kajian komprehensif terhadap litologi, geomorfologi, pola pelapukan, dan tutupan vegetasi, karena faktor-faktor tersebut secara langsung mempengaruhi mobilitas unsur, distribusi regolit, serta ekspresi geokimia di permukaan. Integrasi informasi tersebut memungkinkan penentuan lokasi *sampling* yang lebih representatif dan meningkatkan efektivitas identifikasi anomali geokimia.

Pendekatan biogeokimia dalam eksplorasi mineral bertumpu pada prinsip bahwa vegetasi berfungsi sebagai integrator alami kondisi geokimia lingkungan. Unsur-unsur kimia yang berasal dari tanah, regolit, maupun batuan dasar dapat mengalami proses mobilisasi melalui pelapukan, kemudian diserap oleh sistem perakaran tanaman dan selanjutnya terakumulasi pada berbagai jaringan vegetatif. Melalui mekanisme ini,

DAFTAR PUSTAKA

- Akçay, M., Lermi, A. and Van, A., 1998. Biogeochemical exploration for massive sulphide deposits in areas of dense vegetation: an orientation survey around the Kanköy Deposit (Trabzon, northeastern Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, 63(3), pp.173-187.
- Alloway, B.J. ed., 2012. *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media
- Baker, A.J.M. and Brooks, R., 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1(2), pp.81-126.
- Baker, A.J.M. and Brooks, R.R., 1988. Botanical exploration for minerals in the humid tropics. *Journal of Biogeography*, pp.221-229.
- Belkin, H.E., 2008. Environmental geochemistry site characterization, data analysis and case histories.
- Bern, C.R., Brzezinski, M.A., Beucher, C., Ziegler, K. and Chadwick, O.A., 2010. Weathering, dust, and biocycling effects on soil silicon isotope ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(3), pp.876-889.
- Borrelli, N., Alvarez, M.F., Osterrieth, M.L. and Marcovecchio, J.E., 2010. Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina—a preliminary study. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), pp.983-994.
- Brooks, R.R., 1972. Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration.

- Brooks, R.R., 1979. Indicator plants for mineral prospecting—a critique. *Journal of Geochemical Exploration*, 12, pp.67-78.
- Butt, C.R., Lintern, M.J. and Anand, R.R., 2000. Evolution of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain—implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, 16(3-4), pp.167-183.
- Clemens, S., 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), pp.1707-1719.
- Conley, D.J., Sommer, M., Meunier, J.D., Kaczorek, D. and Saccone, L., 2006. Silicon in the terrestrial biogeosphere. In *The silicon cycle: human perturbations and impacts on aquatic systems* (Vol. 66, pp. 13-28). Washington, DC, USA: Island Press
- Dakora, F.D. and Phillips, D.A., 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and soil*, 245(1), pp.35-47
- De Vivo, B., Lima, A., Bove, M.A., Albanese, S., Cicchella, D., Sabatini, G., Di Lella, L.A., Protano, G., Riccobono, F., Frizzo, P. and Raccagni, L., 2008. Environmental geochemical maps of Italy from the FOREGS database. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 8(3-4), pp.267-277.
- Dunn, C.E. and Hale, M., 2007, September. New perspectives on biogeochemical exploration. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 7, pp. 249-261).
- Dunn, C.E., 2011. *Biogeochemistry in mineral exploration* (Vol. 9). Elsevier.
- Gérard, F., Mayer, K.U., Hodson, M.J. and Ranger, J., 2008. Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: application to a temperate forest ecosystem. *Geochimica et cosmochimica acta*, 72(3), pp.741-758.

- Germida, J.J., Wainwright, M. and Gupta, V.V., 2021. Biochemistry of sulfur cycling in soil. In *Soil biochemistry* (pp. 1-53). CRC Press.
- Gewirtzman, J., Tang, J., Melillo, J.M., Werner, W.J., Kurtz, A.C., Fulweiler, R.W. and Carey, J.C., 2019. Soil warming accelerates biogeochemical silica cycling in a temperate forest. *Frontiers in Plant Science*, 10, p.1097.
- Henriet, C., De Jaeger, N., Dorel, M., Opfergelt, S. and Delvaux, B., 2008. The reserve of weatherable primary silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. *Biogeochemistry*, 90(2), pp.209-223.
- Holloway, J.M. and Dahlgren, R.A., 1999. Geologic nitrogen in terrestrial biogeochemical cycling. *Geology*, 27(6), pp.567-570.
- Hyndman, R.D., 1995. The Lithoprobe corridor across the Vancouver Island continental margin: the structural and tectonic consequences of subduction. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(10), pp.1777-1802.
- Kabata-Pendias, A., 2000. *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- Katiyar, N., Kulshreshtha, A. and Singh, P.K., 2024. A review of integration techniques of multi-geoscience data-sets in mineral prospectivity mapping. *Earth Sciences*, 13(4), pp.127-140.
- Kelepertsis, A.E. and Andrulakis, I., 1983. Geobotany-biogeochemistry for mineral exploration of sulphide deposits in northern Greece—heavy metal accumulation by *Rumex acetosella* L. and *Minuartia verna* (L.) Hiern. *Journal of Geochemical Exploration*, 18(3), pp.267-274.
- Krämer, U., 2010. Metal hyperaccumulation in plants. *Annual review of plant biology*, 61(1), pp.517-534.

- Landmeyer, J. (2012). Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-1957-6>
- Lottermoser, B.G., Ashley, P.M. and Munksgaard, N.C., 2008. Biogeochemistry of Pb–Zn gossans, northwest Queensland, Australia: implications for mineral exploration and mine site rehabilitation. *Applied Geochemistry*, 23(4), pp.723-742.
- Lulla, K., 1985. Some observations on geobotanical remote sensing and mineral prospecting. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), pp.17-38.
- Lulla, K., 1985. Some observations on geobotanical remote sensing and mineral prospecting. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), pp.17-38.
- Melzer, S.E., Chadwick, O.A., Hartshorn, A.S., Khomo, L.M., Knapp, A.K. and Kelly, E.F., 2012. Lithologic controls on biogenic silica cycling in South African savanna ecosystems. *Biogeochemistry*, 108(1), pp.317-334.
- Minuartia verna (L.) Hiern. *Journal of Geochemical Exploration*, 18(3), pp.267-274.
- Mohtadi, A. and Ghaderian, S.M., 2015. Biogeochemistry and geobotany of the serpentine soils of the Rezvanshahr area in northwestern Iran: a preliminary investigation. *Australian Journal of Botany*, 63(4), pp.367-371.
- Nagaraju, A. and Karimulla, S., 2001. Geobotany and biogeochemistry of *Gymnosporia montana*—a case study from Nellore Mica Belt, Andhra Pradesh. *Environmental geology*, 41(1), pp.167-173.
- Neff, J.C., Reynolds, R., Sanford Jr, R.L., Fernandez, D. and Lamothe, P., 2006. Controls of bedrock geochemistry on soil and plant nutrients in southeastern Utah. *Ecosystems*, 9(6), pp.879-893.

- Nesvetaylova, N.G., 1961. Geobotanical investigations in prospecting for ore deposits. *International Geology Review*, 3(7), pp.609-618.
- Prabhakar, B.C., Rashmi, B.N. and Gireesh, R.V., 2017. Trace Elemental Expression in Soil Substratum and Floral Species in Selected Lateritic Profiles in the Northern Part of Kolar Schist Belt, Dharwar Craton, India. *International Journal of Geosciences*, 8(08), p.1004.
- Proctor, J. and Woodell, S.R., 1975. The ecology of serpentine soils. *Advances in ecological research*, 9, pp.255-366.
- Raturi, G., Sharma, Y., Rana, V., Thakral, V., Myaka, B., Salvi, P., Singh, M., Dhar, H. and Deshmukh, R., 2021. Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, pp.827-838.
- Reid, N. and Hill, S.M., 2010. Biogeochemical *sampling* for mineral exploration in arid terrains: Tanami Gold Province, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(3), pp.105-117.
- Reimann, C. and De Caritat, P., 2012. *Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist*. Springer Science & Business Media.
- Rice, S., 2020. *Encyclopedia of biodiversity*. Infobase Holdings, Inc.
- Rose, A.W. and Gundlach, H. eds., 2014. *Geochemical exploration 1980* (Vol. 15). Elsevier.
- Sahai, N., Kaddour, H. and Dalai, P., 2016. The transition from geochemistry to biogeochemistry. *Elements*, 12(6), pp.389-394.
- Schaller, J., Puppe, D., Kaczorek, D., Ellerbrock, R. and Sommer, M., 2021. Silicon cycling in soils revisited. *Plants*, 10(2), p.295.
- Schlesinger, W.H. and Bernhardt, E.S., 2020. The atmosphere. *Biogeochemistry*, p.51.

- Siegel, F.R., 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals* (Vol. 32). Berlin: springer.
- Street-Perrott, F.A. and Barker, P.A., 2008. Biogenic silica: a neglected component of the coupled global continental biogeochemical cycles of carbon and silicon. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(9), pp.1436-1457.
- Sutcliffe, T. E., *et al.* (2018). Remote sensing of vegetation geochemistry.
- Thornton, I., 2002. Geochemistry and the mineral nutrition of agricultural livestock and wildlife. *Applied Geochemistry*, 17(8), pp.1017-1028.
- Trudinger, P.A., Swaine, D.J. and Skyring, G.W., 1979. Biogeochemical cycling of elements—general considerations. In *Studies in environmental science* (Vol. 3, pp. 1-27). Elsevier.
- Van Cappellen, P., 2003. Biomineralization and global biogeochemical cycles. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 54(1), pp.357-381.
- Vernadsky, V.I., 1998. *The biosphere*. Springer Science & Business Media.
- Wolfe, W.J., 1974. Geochemical and biogeochemical exploration research near early Precambrian porphyry-type molybdenum-copper mineralization, northwestern Ontario, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(1), pp.25-41.
- Zaman, W., Ayaz, A. and Puppe, D., 2025. *Biogeochemical cycles in plant–soil systems: Significance for agriculture, interconnections, and anthropogenic disruptions. Biology*, 14 (4), 433

BIOGEOKIMIA dan GEOBOTANI

(Interaksi Tanah–Tumbuhan dan Indikator Geokimia)

Biogeokimia dan geobotani menunjukkan bahwa bumi tidak hanya merekam proses geologi melalui batuan dan mineral, tetapi juga melalui vegetasi yang tumbuh di atasnya. Pola distribusi unsur dalam tumbuhan dapat merefleksikan kondisi geokimia bawah permukaan, sehingga pendekatan ini menempati posisi unik di antara ilmu kebumihan dan ilmu hayati dalam eksplorasi mineral. Metode biogeokimia–geobotani telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi endapan mineral yang tertutupi vegetasi atau lapisan sedimen, dengan keunggulan sebagai pendekatan eksplorasi yang relatif ramah lingkungan (*green exploration*) karena sampling umumnya terbatas pada bagian tumbuhan.

Buku ini membahas konsep dan siklus biogeokimia unsur dalam sistem tanah–tumbuhan, mulai dari pelepasan unsur dari batuan induk, mobilisasi unsur utama, unsur jejak, dan unsur tanah jarang di dalam tanah, penyerapan oleh akar tanaman, distribusi dalam jaringan tumbuhan, hingga pengembaliannya ke lingkungan melalui dekomposisi biomassa. Dengan pendekatan interdisipliner, buku ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai peran biogeokimia geobotani sebagai metode eksplorasi yang efektif, adaptif terhadap lingkungan tropis, dan relevan bagi pengelolaan sumber daya mineral yang bertanggung jawab.

 www.penerbitwidina.com

 @penerbitwidina

 penerbit widina

 penerbitwidina@gmail.com

 widina store

 widina bookstore

Layanan Pembaca & Penerbitan Buku

 0815-7000-699



SCANME

Ilmu Alam

ISBN 978-634-246-863-0



9

786342

468630