Turnitin Originality Report

Processed on: 25-Jun-2022 05:22 WIB
ID: 1862484003
Word Count: 44978
Submitted: 1

Similarity Index	Similarity by Source	
12%	Internet Sources:	12%
	Publications:	7%
	Student Papers:	6%

Agrogeologi Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran By Joko Priyono

1% match (Internet from 23-Jan-2020)
https://www.scribd.com/doc/146239034/Ref-Batuan-Silikat

< 1% match (Internet from 07-Sep-2018)
https://www.scribd.com/doc/316993546/Buku-II-Rkp-2013

< 1% match (Internet from 09-Jun-2020)
https://www.scribd.com/document/68584092/ilmu-tanah

< 1% match (Internet from 13-Nov-2018)
https://www.scribd.com/doc/302423000/Susunan-dan-Penyusun-Bumi

< 1% match (Internet from 28-Apr-2019)
https://www.scribd.com/document/391645921/makalah-manajemen-strategis

< 1% match (Internet from 11-Apr-2020)
https://www.scribd.com/document/365149874/Modul-PRAKTEK-KEMAHIRAN-HUKUM-Contract-Drafting-pdf

< 1% match (Internet from 18-Apr-2019)
https://www.scribd.com/document/327879272/Sistem-Pengelolaan

< 1% match (Internet from 08-Jun-2020)
https://www.scribd.com/document/388763520/Isi-Jilid-2-pdf

< 1% match (Internet from 26-Dec-2021)
http://repository.lppm.unila.ac.id/30475/1/2020%20Ilmu%20Tanah.pdf

< 1% match (Internet from 30-Mar-2021)
http://repository.lppm.unila.ac.id/view/year/2017.type.html

< 1% match (Internet from 06-Sep-2019)
https://es.scribd.com/document/355903589/Tanah-Andosol-di-Indonesia-pdf

< 1% match (Internet from 31-Mar-2020)
https://es.scribd.com/document/374902212/Kelas-10-SMK-Pengelolaan-Tanah-Pertanian

< 1% match (Internet from 17-Jul-2016)
https://es.scribd.com/doc/107178251/fullteks-disertasi-2011-2011dsu1

< 1% match (Internet from 11-Feb-2019)
https://es.scribd.com/doc/306742695/Draft-seminar

< 1% match (Internet from 13-Mar-2020)
https://es.scribd.com/document/375137104/123dok-Analisis-Faktor-faktor-yang-Mempengaruhi-Risiko-Produksi-Mentimun-Cucumis-sativusL-di-Desa-Citape

< 1% match (Internet from 21-Jul-2018)
https://es.scribd.com/doc/282853015/Buku-Pend-Sejarah

< 1% match (Internet from 08-Mar-2020)
https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-008-9805-z

< 1% match (Internet from 02-Feb-2022)
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78356-2_7?code=8fe579ed-9099-4031-97c3-37a1b33404c0&error=cookies_not_supported

< 1% match (Internet from 19-Feb-2022)
https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-022-03136-9?code=0d31f560-daa6-46ae-b159-69d3e6bcd460&error=cookies_not_supported

< 1% match (Internet from 10-May-2022)
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-95193-1_3?code=0b1adb37-4d25-4e1d-a73d-0d71a9b3e11b&error=cookies_not_supported

< 1% match (Internet from 04-Mar-2022)
https://coek.info/pdf-silica-bodies-of-selaginella-erythropus-detection-morphology-and-development-.html

< 1% match (Internet from 14-Oct-2021)
https://coek.info/pdf-farm-biogas-production-in-organic-agriculture-system-implications-.html

< 1% match (Internet from 09-Jan-2022)
https://coek.info/pdf-production-and-release-of-dimethylsulphide-from-an-estuary-in-portugal-.html

< 1% match (Internet from 03-Feb-2022)
http://eprints.unram.ac.id/24311/1/Dinamika%20Prngaturan%20dan%20Pengawasan%20Perbankan.pdf

< 1% match (Internet from 30-Dec-2021)
http://eprints.unram.ac.id/21538/1/Hukum%20Kependudukan.pdf

< 1% match (Internet from 05-Mar-2022)
https://keckgeology.org/2020/12/carletongateway2021/

< 1% match (publications)
J. Priyono, R. J. Gilkes. "High-Energy Milling Improves the Effectiveness of Silicate Rock Fertilizers: A Glasshouse Assessment", Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008

< 1% match (Internet from 05-Dec-2021)
https://www.scielo.br/j/aabc/a/YbyT87xxXscZbZ7MhwZbVsN/?lang=en

< 1% match (Internet from 13-Mar-2022)
https://www.scielo.br/j/cr/a/KGp5SjrQ8Dbbt9rPDNdmDmf/?format=html

< 1% match ()
Joko Priyono, Raden Sutriono, Zaenal Arifin. "Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from FourVolcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant", University of Lampung, 2009

< 1% match (Internet from 26-Nov-2012)
http://www.slideshare.net/hpau_vee/organic-agriculture-presentation

< 1% match (Internet from 07-Oct-2021)
https://www.slideshare.net/liakristiana/tm-2-sistem-pertanian-pip1

< 1% match (Internet from 14-Jul-2016)
http://www.slideshare.net/13-2/geologia-i-parte

< 1% match (Internet from 13-Nov-2020)
https://www.slideshare.net/YukmaWijaya/dasar-dasar-budidaya-tanamanx2

< 1% match (Internet from 11-Jun-2022)
http://agroganik.blogspot.com/2012/03/

< 1% match (Internet from 27-Sep-2018)
https://docplayer.info/34883144-Pillar-of-physics-vol-4-november-2014-01-08.html

< 1% match (Internet from 27-Sep-2021)
http://docplayer.info/77035220-Daftar-isi-siti-aminah-2013.html

< 1% match (Internet from 04-Sep-2021)
http://docplayer.info/34469536-Bab-ii-tinjauan-pustaka.html

< 1% match (Internet from 09-Feb-2018)
https://documents.mx/download/link/man-soil-qual

< 1% match (Internet from 26-Nov-2020)
http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/tanah%20sawah%20dan%20teknologi%20pengelolaannya.pdf

< 1% match (Internet from 23-Nov-2020)

http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/fosfatalam/buku%20fosfat%20alam1.pdf

< 1% match (Internet from 08-Oct-2021)
https://docobook.com/ilmu-tanah.html

< 1% match (Internet from 01-Dec-2020)
https://docobook.com/toksikologi-umum-farmasi-udayana.html

< 1% match (Internet from 11-Oct-2019)
https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1078203/1/LivroCongressoderochagemFormatoWeb.pdf

< 1% match (Internet from 17-May-2014)
http://www.coursehero.com/file/3094473/choiw042/

< 1% match (Internet from 11-Mar-2021)
https://www.coursehero.com/file/43705043/digital-20285678-S-Anastasia-Rizkapdf/

< 1% match (Internet from 16-Mar-2020)
https://www.coursehero.com/file/41067187/I-lanjutandocx/

< 1% match (Internet from 09-Dec-2020)
https://www.coursehero.com/file/63123185/Chapter-Idoc/

< 1% match (Internet from 10-Feb-2014)
http://www.coursehero.com/file/533034/mineralform/

< 1% match (publications)
Perret, D.. "Thermodynamic stability of waste glasses compared to leaching behaviour", Applied Geochemistry, 200308

< 1% match ()
http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/ES_W_Y1.html

< 1% match ()
"Buku 'Perspektif pertanian tropika basah : potensi dan tantangannya dalam rangka pertanian berkelanjutan'", universitas andalas

< 1% match ()
Artikel, Prosiding Semnas IV PAGI 2018 - UMI, "Artikel: Pemetaan Beberapa Sifat Kimia Ultisol Pada Perkebunan Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis Jacq.) Berdasarkan Kelas Lereng Di Nagari Timpeh Kabupaten Dharmasraya", Faperta

< 1% match (Internet from 26-Nov-2020)
http://repo.unand.ac.id/4976/1/MORFOLOGI%20DAN%20%20%20KLASIFIKASI%20TANAH.pdf

< 1% match (Internet from 27-Oct-2014)
http://www.researchgate.net/publication/223952959_Kinetics_of_brucite_dissolution_at_25C_in_the_presence_of_organic_and_inorganic_ligands_and_divalent_metals

< 1% match (Internet from 21-Aug-2015)
http://worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/11_Rocks_for_crops.pdf

< 1% match (Internet from 15-Jan-2007)
http://jeeves.essc.psu.edu/~brantley/publications/GeoTreastie.pdf

< 1% match (Internet from 13-Apr-2022)
http://journal.ummat.ac.id/index.php/SEMNASPUMMAT/article/view/6865

< 1% match (Internet from 22-Oct-2020)
https://archive.org/stream/Encyclopedia_Of_Agriculture_And_Food_Systems/Encyclopedia%20of%20Agriculture%20and%20Food%20Systems_djvu.txt

< 1% match ()
Priyono, Joko, Yasin, Ismail, Bustan, Bustan. "Modifikasi Sifat Mineralogi dan Fisiko-Kimia Bahan Tanah Vertik dengan Ball Mill Berenergi Tinggi", 'Universitas Mataram', 2021

< 1% match (Internet from 03-Nov-2021)
https://123dok.com/article/tinjauan-pustaka-lahan-sawah-identifikasi-status-tekstur-produksi.lg5vd1jy

< 1% match (Internet from 28-Oct-2021)
https://123dok.com/document/zw173xvq-rencana-kerja-renja.html

< 1% match (Internet from 19-Sep-2021)
https://123dok.com/title/pengaruh-dosis-nitrogen-sipramin-pertumbuhan-tanaman-kacang-radiata

< 1% match (Internet from 10-Mar-2022)
https://123dok.com/document/q7w9dwld-pengantar-penulis-panjatkan-kehadirat-limpahan-karunia-berjudul-eektivitas.html

< 1% match (Internet from 27-Feb-2022)
http://www.cprm.gov.br/remineralizadores/media/anais_ivcbr_2021.pdf

< 1% match (publications)
Bruno Yaron. "Soil–Subsurface Interrelated Matrix", Soil-Subsurface Change, 2012

< 1% match ()
Paye, Wooiklee S.. "Silicon Fertilization in Rice and Wheat: Dynamics with Trace Elements and Effect of Silicate Slag Granular Size on the Release Pattern of Monosilicic Acid in Soil", LSU Digital Commons, 2019

< 1% match (Internet from 30-Mar-2021)
http://lppm.unram.ac.id/wp-content/uploads/2019/12/Prosiding-semnas-Saintek-2019.pdf

< 1% match (Internet from 08-Apr-2019)
https://core.ac.uk/download/pdf/35336860.pdf

< 1% match (Internet from 11-Apr-2021)
https://core.ac.uk/download/pdf/297264717.pdf

< 1% match (Internet from 04-Jun-2021)
https://core.ac.uk/download/pdf/328103866.pdf

< 1% match (Internet from 04-Oct-2019)
https://pinpdf.com/557184fcd883e8f0aaa38f556db6cca745730.html

< 1% match (student papers from 02-Jun-2014)
Submitted to Midlands State University on 2014-06-02

< 1% match (Internet from 28-Aug-2020)
https://mafiadoc.com/geology-of-devils-tower-explore-nature_59f5f0d11723dd010cea4217.html

< 1% match (Internet from 05-Nov-2018)
https://mafiadoc.com/sustaining-livelihoods-through-organic-agriculture-in-citeseerx_5a1045f11723dd5f5392309b.html

< 1% match (Internet from 09-Feb-2020)
https://mafiadoc.com/alternatif-pengelolaan-unsur-hara-p-fosfor-pada-wordpresscom_59f7a04c1723dd2ad43df962.html

< 1% match ()
Peter Van Straaten, APPLETON JD, APPLETON JD, ARCAND M et al. "Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities", 'FapUNIFESP (SciELO)'

< 1% match (Internet from 29-Jun-2021)
https://adoc.pub/prosiding-seminar-nasional-ketahanan-pangan-dan-pertanian-be.html

< 1% match (Internet from 19-May-2021)
https://adoc.pub/riset-pengembangan-model-pengelolaan-sumberdaya-perikanan-be.html

< 1% match (Internet from 06-Nov-2021)
https://adoc.pub/konservasi-lahan-padi-sawah-oryza-sativa-l-dengan-sistem-pen.html

< 1% match (Internet from 25-Aug-2021)
https://adoc.pub/model-pengelolaan-lahan-rawa-lebak-berbasis-sumberdaya-lokal.html

< 1% match (Internet from 09-Jul-2018)
https://media.neliti.com/media/publications/132407-EN-adding-organic-matter-enhanced-the-effec.pdf

< 1% match (Internet from 26-Sep-2019)
https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1099984/1/AdilsonLuisBambergteseMatheusGrecco.pdf

< 1% match (publications)
"Diet for a Sustainable Ecosystem", Springer Science and Business Media LLC, 2020

< 1% match (Internet from 26-Dec-2019)
https://blog.akhmadshare.com/2016/12/fungsi-unsur-hara-makro-dan-unsur-hara.html

< 1% match (Internet from 18-Mar-2020)
https://pt.scribd.com/doc/217590709/149221608201002071-pdf

< 1% match (Internet from 31-May-2020)
https://pt.scribd.com/doc/312669523/Acara-7

< 1% match (Internet from 25-Mar-2020)
https://pt.scribd.com/doc/313340000/Hidrologi-Aplikasi-Metode-Statistik-Untuk-Analisa-Data-Jilid-1-Soewarno

< 1% match (Internet from 07-Jul-2019)
http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Organic-Agriculture/Organic-Agriculture.pdf

< 1% match (Internet from 22-Apr-2021)
https://text-id.123dok.com/document/lq5m4p3y-analisis-intrusi-air-laut-pada-sumur-gali-dan-sumur-bor-dengan-metode-konduktivitas-listrik-di-kecamatan-medan-marelan.html

< 1% match (Internet from 19-Mar-2021)
https://text-id.123dok.com/document/9yn5d8ly-strategi-manajemen-mutu-proses-produksi-karkas-ayam-pedaging-di-rumah-pemotongan-ayam-rpa-pt-sierad-produce-tbk-parung-bogor-1.html

< 1% match (Internet from 30-May-2021)
https://text-id.123dok.com/document/oy858ewy-respons-fisiologi-benih-udang-galah-terhadap-penambahan-garam-yang-berbeda-minyak-cengkeh-zeolit-dan-karbon-aktif-pada-transportasi-tertutup.html

< 1% match (Internet from 04-Oct-2020)
https://text-id.123dok.com/document/ozl2672q-tanggap-3-varietas-padi-sawah-terhadap-pembenaman-jerami-dan-pengurangan-dosis-pupuk-npk-pada-musim-tanam-ketujuh.html

< 1% match (Internet from 23-Mar-2016)
http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA440035&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf

< 1% match (Internet from 11-Nov-2021)
https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01072/full

< 1% match (Internet from 20-Mar-2009)
http://www.geocities.com/chlorophil.geo/SoilRemineralisation1.htm

< 1% match (publications)
Eric H. Oelkers, Jacques Schott. "Experimental study of anorthite dissolution and the relative mechanism of feldspar hydrolysis", Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995

< 1% match (Internet from 02-Jun-2021)
https://banten.litbang.pertanian.go.id/new/images/pdf/adopsi-mkrpl-pdf.pdf

< 1% match (Internet from 15-Mar-2022)
https://dspace.emu.ee/jspui/bitstream/10492/6615/1/Palmist_Marilin_MA2021_t%c3%a4istekst.pdf

< 1% match (Internet from 29-Aug-2016)
https://issuu.com/aprohansaputra/docs/jamalam_cetak

< 1% match (student papers from 07-Jul-2020)
Submitted to Wageningen University on 2020-07-07

< 1% match (Internet from 01-Mar-2022)
https://dea.unideb.hu/dea/bitstream/handle/2437/78391/de_1415.pdf?isAllowed=y&sequence=1

< 1% match (Internet from 22-Dec-2021)
https://ebin.pub/growth-and-mineral-nutrition-of-field-crops-3nbsped-1439816956-9781439816950.html

< 1% match (Internet from 15-Jan-2022)
https://nanopdf.com/download/usul-penelitian-hibah-bersaing-kajian-distribusi-material-vulkanik_pdf

< 1% match (Internet from 30-Sep-2021)
https://nanopdf.com/download/kesetimbangan-kimia-e-learning-sekolah-menengah-kejuruan_pdf

< 1% match ()
PRIYONO, J. (JOKO). "Effect of Ball Milling Under Various Conditions on Several Physicochemical Properties of Rock Phosphate Fertilizer", Indonesian Ministry of Agriculture, 2007

< 1% match ()
I, F. A. (FAUZI), ZAUYAH, S. (S), STOOPS, G. (G). "Micromorphological Characteristics of Volcanic Soils in Banten Area", Indonesian Ministry of Agriculture, 2004

< 1% match ()
Mills, Keely. "Ugandan crater lakes: limnology, palaeolimnology and palaeoenvironmental history", © Keely Mills

< 1% match (Internet from 21-Nov-2020)
https://duniaku-area.blogspot.com/

< 1% match (Internet from 15-Jun-2021)
http://earthresources.sakura.ne.jp/er/A-Resources/text/Chap5.doc

< 1% match (Internet from 03-Oct-2021)
https://harjoshrian.blogspot.com/2014/09/jenis-jenis-unsur-hara-makro-dan-mikro_29.html

< 1% match (Internet from 15-Oct-2021)
https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-605X/aaf701

< 1% match (Internet from 12-Nov-2021)
https://pages.uoregon.edu/palandri/documents/georefs.htm

< 1% match (Internet from 30-Sep-2021)
https://researchspace.ukzn.ac.za/xmlui/bitstream/handle/10413/9878/Jadoo_Shiksha_2012.pdf;jsessionid=124C73B4D4710F1487C0F9F1AA81F5C5

< 1% match (Internet from 26-Aug-2021)
https://researchspace.ukzn.ac.za/jspui/bitstream/10413/16396/1/Mduduma_Hlumela_2018.pdf

< 1% match (Internet from 03-Jun-2022)
https://weixinmo259765220.wordpress.com/2013/10/09/highlights-from-the-2013-ii-brazilian-rochagem-conference/

< 1% match (Internet from 14-Jul-2021)
https://www.ccof.org/sites/default/files/CCOF-RoadmaptoOrganic-Report-Final-HighRes.pdf

< 1% match (Internet from 25-Jan-2021)
http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ijaas.20200602.11.pdf

< 1% match ()
Suharjo, Usman Kris Joko, Marlin, Marlin, Purnama, Dita S.. "Penggunaan Bahan Organik untuk Mengurangi Cekaman Salinitas pada Tanaman Bawang Merah", Prosiding Seminar Nasional Fakultas Pertanian UNS, 2021

< 1% match (Internet from 16-Nov-2020)
https://parwawk.blogspot.com/

< 1% match (Internet from 15-Feb-2020)
https://profiles.forestry.ubc.ca/person/maja-krzic/

< 1% match (publications)
Nitika Thakur, Mohit Nigam, Retika Tewary, Khushboo Rajvanshi et al. "Drivers for the behavioural receptiveness and non-receptiveness of farmers towards organic cultivation system", Journal of King Saud University - Science, 2022

< 1% match (publications)
Sean Low, Chad M. Baum, Benjamin K. Sovacool. "Taking it outside: Exploring social opposition to 21 early-stage experiments in radical climate interventions", Energy Research & Social Science, 2022

< 1% match (Internet from 11-Dec-2020)
https://atp2blog.blogspot.com/2014/03/pupuk-dan-16-unsur-hara-esensial-bagi.html

< 1% match (Internet from 15-Dec-2009)
http://www.ceoe.udel.edu/cms/wullman/01Ullman-Crerar_no_reg.pdf

< 1% match (Internet from 03-Jan-2022)
https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/revce-2020-0044/html

< 1% match (publications)
Keith Van Cleve, Robert F. Powers. "Soil Carbon, Soil Formation, and Ecosystem Development", Soil Science Society of America, 2006

< 1% match (student papers from 28-May-2020)
Submitted to University of Salford on 2020-05-28

< 1% match (Internet from 19-Sep-2021)
https://smujo.id/biodiv/article/download/4985/3710/18045

< 1% match (Internet from 07-Oct-2021)
https://www.springerprofessional.de/sustainable-crop-protection-and-farming/18896362

< 1% match (Internet from 14-Feb-2022)
https://cuhso.uct.cl/index.php/safer/article/download/2642/2302/11032

< 1% match (Internet from 24-Jan-2022)
https://epdf.pub/air-pollution-global-change-and-forests-in-the-new-millennium-volume-3-developme.html

< 1% match (Internet from 05-Feb-2019)
http://eprints.uny.ac.id/2340/1
/PERSEPSI%20SISWA%20TERHADAP%20USAHA%20GURU%20DALAM%20MEMOTIVASI%20BERWIRAUSAHA%20SISWA%20PADA%20MATA%20DIKLAT%20PENGELOLAAN%20USAHA%20BOGA%20DI%20SMK%20N%203%20WONOS

< 1% match (Internet from 02-Jan-2022)
http://www.ijalsr.org/index.php/journal/article/view/134

< 1% match (publications)
Pete Ritchie. "Framing and Farming", Wiley, 2019

< 1% match ()
Silveira, Rafael Toscani Gomes da. "Uso de rochagem pela mistura de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural de solos tropicais lixiviados", 'Biblioteca Central da UNB', 2016

< 1% match ()
Septiani, Maria Ratih. "Pengaruh penggunaan mind map terhadap kemampuan menganalisis dan mengevaluasi pada mata pelajaran IPA di SD Kanisius Sengkan", 2012

< 1% match (Internet from 27-Sep-2021)
http://www.aimspress.com/aimspress-data/aimsagri/2021/1/PDF/agrfood-06-01-009.pdf

< 1% match (student papers from 07-May-2011)
Submitted to Alfred University on 2011-05-07

< 1% match (student papers from 14-Jan-2018)
Submitted to University of West London on 2018-01-14

< 1% match ()
Bray, Andrew William. "Mineral weathering and soil formation: the role ofmicroorganisms", School of Earth and Environment (Leeds), 2014

< 1% match (Internet from 14-Dec-2020)
https://materitatasurya06.blogspot.com/2017/05/materi-tata-surya-dan-benda-benda.html

< 1% match (Internet from 08-Jan-2022)
https://econpapers.repec.org/article/arpjacarp/

< 1% match (Internet from 22-Jun-2003)
http://geologia.fc.ul.pt/Aulas/GeolSoc3/TextosApoio.htm

< 1% match (publications)
Claire Lesur-Dumoulin, Eric Malézieux, Tamara Ben-Ari, Christian Langlais, David Makowski. "Lower average yields but similar yield variability in organic versus conventional horticulture. A meta-analysis", Agronomy for Sustainable Development, 2017

< 1% match ()
http://mindepos.bg.tu-berlin.de/eurolat/litlat/laterit1.txt

< 1% match (Internet from 15-Nov-2018)
http://www.biobio-indicator.org/deliverables/D41.pdf

< 1% match (Internet from 22-Sep-2020)
http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1083.2158&rep=rep1&type=pdf

< 1% match (Internet from 14-Jun-2020)
https://id.123dok.com/document/zwvx5dlq-12615-097-ilmu-pengetahuan-alam.html

< 1% match (Internet from 29-Nov-2018)
https://id.123dok.com/s/hayati-fertilizer

< 1% match ()
Nursyamsi, Dedi, Suprihati, ,. "Sifat-sifat Kimia dan Mineralogi Tanah serta Kaitannya dengan Kebutuhan Pupuk untuk Padi (Oryza sativa), Jagung (Zea mays), dan Kedelai (Glycine max)", 'Department of Agronomy and Horticulture', 2010

< 1% match ()
NURBAYAN, R., BAKHTIAR, T., KUSNANTO, A.. "APLIKASI KONTROL OPTIMUM PADA MODEL PEMANENAN IKAN DI ZONA NONCADANGAN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ZONA CADANGAN", Dept. of Mathematics, Bogor Agricultural University, 2014

< 1% match (Internet from 04-Aug-2021)
http://repositori.kemdikbud.go.id/12642/1/1.%20Jasa%20Boga%20A.pdf

< 1% match ()
Direktorat Pembinaan Pendidikan Anak Usia Dini, Direktorat Jenderal Pendidikan Anak Usia Dini dan Pendidikan Mas. "Norma, standar, prosedur, dan kriteria (nspk) petunjuk teknis bantuan kerjasama antar intansi tahun 2013", Direktorat Pembinaan Pendidikan Anak Usia Dini, 2013

< 1% match (Internet from 13-Mar-2020)
https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/35aeb79d-a2a0-437b-83c8-42b8195b3ee0?X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAXL7W7Q3XHXDVDQYS%2F20200313%2Feu-west-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200313T144641Z&X-Amz-Expires=86400&X-Amz-Signature=3f57342771c298ab659f6c1e63098bc8de23b69a4a628c3fdf3c85fc4850deeb&X-Amz-SignedHeaders=host&response-content-disposition=attachment%3B+filename%2A%3DUTF-8%27%27Paper%252012.pdf&response-content-type=application%2Fpdf

< 1% match (Internet from 12-Nov-2020)
https://yogarananda.wordpress.com/category/mata-kuliah-semester-3/

< 1% match (Internet from 05-Jun-2022)
https://9dok.org/document/g2n99256-brief-literature-investigations-foliar-nutrition-function-protection-horticultural.html

< 1% match (student papers from 15-Sep-2020)
Submitted to Negros Oriental State University on 2020-09-15

< 1% match (student papers from 10-Aug-2020)
Submitted to University of Derby on 2020-08-10

< 1% match (Internet from 03-Sep-2019)
http://dyazo.blogspot.com/2012/04/

< 1% match (Internet from 27-Mar-2014)
http://pioc-ciremai.puzl.com/-berita

< 1% match (Internet from 14-Dec-2020)
https://rahmawatyarsyad1989.wordpress.com/berkas-ujian/ruang-ujian-4/

< 1% match (Internet from 11-Nov-2020)
https://rahmawatyarsyad1989.wordpress.com/berkas-ujian/ruang-ujian-3/

< 1% match (Internet from 10-Nov-2020)
http://repository.poltekeskupang.ac.id/1200/1/ibu%20nurmin.pdf

< 1% match (Internet from 16-Nov-2019)
https://uho.ac.id/prodi/ilmutanah/wp-content/uploads/sites/12/2016/12/LAPORAN-HASIL-SURVEI-UMUM_ILMU-TANAH_2018-1.pdf

< 1% match (Internet from 17-Oct-2021)
https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13245/Singh_Arshdeep.pdf?isAllowed=y&sequence=1

< 1% match (publications)
Eliyani ., Susylowati, Alvera Prihatini Dewi Nazari. "Utilization of Household Wasteas Liquid Organic Fertilizer on Shallot (Allium cepavar. ascalonicum (L.) Back).", AGRIFOR, 2018

< 1% match (Internet from 26-Nov-2020)
https://aprianustelaumbanua.wordpress.com/

< 1% match (Internet from 23-Jun-2022)
https://cucea.udg.mx/sites/default/files/documentos/adjuntos_pagina/responsabilidad_social_y_la_investigacion_final_1.pdf

< 1% match (Internet from 14-Nov-2020)
https://stay-control.xyz/view/87419/proses-terbentuknya-gunung-apixu6-31266jmtr0

< 1% match ()

Tarigan, Fathir Muhammad, Baskara, Medha, Santosa, Mudji. "Respons Dua Tipe Buncis (Phaseolus vulgaris L.) terhadap Berbagai Aplikasi Dosis Pupuk Urea", Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, 2019

< 1% match (Internet from 24-Apr-2022)
https://pustakabangsa.com/buku/tanggung-jawab-negara-korban-perdaganan-orang-dan-hak-asasi-manusia/?v=f58b7a56f3a3

< 1% match (Internet from 16-Jun-2022)
https://repo.ur.krakow.pl/docstore/download/URbfb3858aba3d4fb7bf0e3ab05bf1a576/497_374_Lis-Krzy%C5%9Bcin.pdf?entityType=

< 1% match ()
Lanfranco, Jorge Washington, Pellegrini, Andrea, Cattani, Valeria Marcela. "Contenidos de edafología : Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo", 'Universidad Nacional de La Plata', 2014

< 1% match (Internet from 31-May-2020)
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00758914.2018.1442076?needAccess=true&scroll=top

< 1% match (Internet from 09-Jun-2020)
https://fr.scribd.com/doc/150340161/laporan-resmi-kesuburan-UGM-2012

< 1% match (Internet from 25-Dec-2021)
https://mahasiswa.unq.ac.id/613412110/home/categories/1228?page=1

< 1% match (Internet from 11-Mar-2020)
https://repository.ipb.ac.id/bitstream/handle/123456789/10700/Joharman.%20Tomando%20%28F34101118%29.pdf?sequence=4

< 1% match (Internet from 02-Aug-2019)
http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.guoos.com.br/downloads/Disciplinas/FisicaSolo/FS_argilominerais.pdf

< 1% match (publications)
McMillan, N.J.. "Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of minerals: Carbonates and silicates", Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 200712

< 1% match (student papers from 13-Dec-2004)
Submitted to South Cobb High School on 2004-12-13

< 1% match (student papers from 27-Sep-2018)
Submitted to Syiah Kuala University on 2018-09-27

< 1% match (student papers from 20-Dec-2020)
Submitted to Universität Hohenheim on 2020-12-20

< 1% match (Internet from 24-Nov-2018)
https://epdf.tips/deans-analytical-chemistry-handbookb72bb4c303f5abc3570d7ed55d479e9855406.html

< 1% match (Internet from 25-Dec-2021)
https://investor.id/national/180951/presiden-minta-wartawan-jadi-pencegah-hoaks

< 1% match (publications)
"Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles", Springer Science and Business Media LLC, 1988

< 1% match (Internet from 14-Oct-2021)
https://pangan.litbang.pertanian.go.id/files/BukuTikussudarmadji.pdf

< 1% match (Internet from 15-Jan-2022)
https://pub.h-brs.de/frontdoor/deliver/index/docId/5966/file/S004896972106054X.pdf

< 1% match (Internet from 10-Jan-2021)
http://wsrcj.srbiau.ac.ir/article_14913.html

< 1% match (Internet from 08-Jun-2019)
https://www.futa.edu.ng/futacm/fileuploads/Inaugural%20series%2091%20(Prof.%20Adekayode).pdf

< 1% match (Internet from 13-Aug-2017)
http://forda-mof.org/files/8_Kade_klm.pdf

< 1% match (Internet from 12-May-2020)
http://gardaremaja.blogspot.com/2018/01/manfaat-serta-penjelasan-unsur-hara.html

< 1% match (Internet from 02-Nov-2020)
https://inba.info/handbook-of-plant-nutrition_585efce3b6d87ff3bd8b6e4e.html

< 1% match (Internet from 11-Sep-2020)
https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/1483/thesis_fulltext.pdf?isAllowed=y&sequence=1

< 1% match ()
Lernoud, Julia, Willer, Helga. "Organic Agriculture Worldwide: Key results from the FiBL survey on organic agriculture worldwide 2019 Part 3: Organic agriculture in the regions", 2019

< 1% match (Internet from 01-Sep-2021)
https://puputwawan.wordpress.com/tag/kelapa-sawit/page/14/

< 1% match (Internet from 10-Jun-2020)
https://slideum.com/doc/8495648/www.mkk.szie.hu-dep-talt-rg-agrokemia_bsc_levelezo.ppt

< 1% match (Internet from 15-Nov-2020)
https://topjurnalpertanian.blogspot.com/

< 1% match (Internet from 23-Aug-2020)
https://www.remineralize.org/2017/10/rochagem-congress-part-4-rocks-for-crops-in-the-world/

< 1% match (Internet from 06-Oct-2015)
http://yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/sersoy_51d39cf6882d96214b3f28946c17e12f.pdf

< 1% match (publications)
Ulrike Lebender, Mehmet Senbayram, Joachim Lammel, Hermann Kuhlmann. " Effect of mineral nitrogen fertilizer forms on N O emissions from arable soils in winter wheat production ", Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014

< 1% match (Internet from 09-Jun-2022)
http://agebaturimba.blogspot.com/2011/

< 1% match (Internet from 19-Dec-2017)
http://apriliageografi.blogspot.com/

< 1% match (Internet from 15-Nov-2017)
https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/articles/sssabookseries/soilmineralogyw/637

< 1% match (Internet from 25-Nov-2019)
https://fh.unram.ac.id/wp-content/uploads/2018/05/M.-AINUL-YAQIN-D1A212312-1.pdf

< 1% match (Internet from 06-Aug-2020)
http://ilmudasartani.blogspot.com/2016/08/budidaya-tanaman-nilam.html

< 1% match (Internet from 11-Nov-2020)
https://mantri-suster.blogspot.com/2011_04_17_archive.html

< 1% match (Internet from 06-Jan-2021)
https://moam.info/prosiding-seminar-nasional-indonesia-timur-2014-senanti-_59be4dc91723dd46288dcaf4.html

< 1% match (Internet from 04-Jun-2020)
https://mulpix.com/instagram/rencana_dan_tujuan.html

< 1% match (Internet from 07-Apr-2022)
https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_Chapter12.pdf

< 1% match (Internet from 11-Mar-2021)
http://repositori.uin-alauddin.ac.id/347/1/syamsuddin%20ab.pdf

< 1% match (Internet from 22-Aug-2020)
http://repository.ipb.ac.id:8080/handle/123456789/92621

< 1% match ()
QONIAH, UMI. "PENGARUH PEMBERIAN PUPUK CAIR DAUN GAMAL (Gliricidia sepium) TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PRODUKTIVITAS TANAMANSELADA (Lactuca sativa L.)DENGANMEDIA HIDROPOIK", 2019

< 1% match (Internet from 28-Feb-2022)
http://repository.uin-suska.ac.id/54002/1/FILE%20LENGKAP%20KECUALI%20HASIL%20PENELITIAN%20%28BAB%20IV%29.pdf

< 1% match (publications)

Hajar Isworo, Rendy Zakaria. ELEMEN : JURNAL TEKNIK MESIN, 2021

< 1% match (publications)
Iskandar Hamid. "Pertumbuhan dan Produksi Bawang Merah (allium ascalonicum l.) Pada Perlakuan Pemotongan Umbi dan Berbagai Takaran Bokashi Pupuk Kandang Ayam di Desa Waefusi Kecamatan Namrole Kab. Buru Selatan", Agrikan: Jurnal Agribisnis Perikanan, 2016

< 1% match (publications)
Mulyati Mulyati, Joko Priyono, Muliatiningsih Muliatiningsih. "PENERAPAN MODEL USAHATANI SEHAT MELALUI PENGGUNAAN PUPUK SILIKAT PLUS PADA TANAMAN KAKAO DI KECAMATAN GANGGA KABUPATEN LOMBOK UTARA", SELAPARANG Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan, 2020

< 1% match (publications)
Surati Surati, Nur Alim Natsir. "APLIKASI AMPAS TEBU DAN KULIT PISANG TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PRODUKSI KANGKUNG DARAT (Ipomea reptans Poir)", Biosel: Biology Science and Education, 2018

< 1% match (Internet from 30-Nov-2020)
https://abenchanafia.blogspot.com/2012/09/dasar-dasar-ilmu-tabah-agroekoteknologi_5209.html

< 1% match (Internet from 30-Sep-2019)
https://celebestopnews.com/daerah/2019/02/komisi-ii-dprd-kabupaten-kapuas-bahas-program-serasi-bersama-kementrian-pertanian-dan-ketahanan-pangan/

< 1% match (Internet from 21-May-2019)
http://docshare.tips/mobile-business-intelligent-center-mbic_57476886b6d87f3b928b45d8.html

< 1% match (Internet from 23-Nov-2020)
https://doku.pub/documents/makalah-pembuatan-pupuk-npk-pik-nl2pwxko2808

< 1% match (Internet from 16-May-2021)
https://ejournal.unisi.ac.id/index.php/jai/article/download/1019/673/

< 1% match ()
Hidajat, Achsien, Fatharani, Fakhry, Martika, Desy, Andika, Fitra, Putih, Glagah. "Kajian Penggunaan Material Kayu dan Bambu Ditinjau Dari Pengawetan dan Perawatan", Institut Teknologi Nasional, 2014

< 1% match ()
Destiani, Ita. "Analisis model transaksi bisnis : studi kasus Ibu Organik Semarang dalam perspektif ekonomi Islam", 2019

< 1% match (Internet from 15-Nov-2020)
https://hadariagroteknologi.wordpress.com/2013/09/17/dasar-dasar-ilmu-tanah/

< 1% match (Internet from 01-Jan-2018)
http://iccri.net/download/Review/Volume%201%20No.%201/3.%20Tekno%20Cryooresvation-STT(Pjo)-final.pdf

< 1% match (Internet from 07-Jun-2020)
https://id.scribd.com/doc/66025718/Lingkungan-Hidup-Dan-Pelestarian

< 1% match ()
Harsanti, S.Si, Lilik, Dwimahyani, Ita, SP, Tarmizi,. "Perbaikan Produksi Kapas (Gossypium hirsutum) Varietas Niab 999 dengan Teknik Mutasi Radiasi", BATAN, 2017

< 1% match (Internet from 15-Aug-2019)
http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/jta/article/download/2573/2175

< 1% match (Internet from 14-Jan-2021)
https://karyatulisilmiah.com/implementasi-reservoir-management-untuk-reservoir-karbonat-studi-kasus-lapangan-sopa/

< 1% match (Internet from 20-Aug-2020)
http://kebunku.blogspot.com/2014/07/membuat-pupuk-cair.html?showComment=1471194230598

< 1% match (Internet from 19-Jan-2021)
https://noordi14.blogspot.com/2015/03/pratiukum-dasar-dasar-ilmu-tanah-tanah.html

< 1% match (Internet from 15-Nov-2020)
https://ramsonsitorus.blogspot.com/

< 1% match (Internet from 07-Oct-2010)
http://rmsui.vlsm.org/fusilkom-ui/fusilkom-01-mti01abs.html

< 1% match (Internet from 15-Oct-2020)
https://talenta.usu.ac.id/joa/article/download/2521/1907/8172

< 1% match (Internet from 14-Oct-2020)
https://ujianoke.blogspot.com/2012/10/normal-0-false-false-false-in-x-none-x.html

< 1% match (Internet from 11-Nov-2020)
https://ukm2016.wordpress.com/

< 1% match (Internet from 17-Aug-2018)
https://vdocuments.mx/documents/wawasan-30-desember-2014.html

< 1% match (Internet from 30-Mar-2020)
https://worldwidescience.org/topicpages/e/enhance+soil+fertility.html

< 1% match (Internet from 16-Aug-2019)
http://www.bpdp.or.id/wp-content/uploads/2019/04/LAKSMITA-PRIMA-SANTI-PROSIDING-2016.pdf

< 1% match (Internet from 23-Dec-2020)
http://www.i-scholar.in/index.php/PSECAAS/search/authors/view?firstName=J.&lastName=Szakova&middleName=

< 1% match (publications)
Derek R. Vardon, Bryan J. Sherbacow, Kaiyu Guan, Joshua S. Heyne, Zia Abdullah. "Realizing "net-zero-carbon" sustainable aviation fuel", Joule, 2022

< 1% match (publications)
J.M.G. Nunes, R.M. Kautzmann, C. Oliveira. "Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil)", Journal of Cleaner Production, 2014

< 1% match (publications)
Organic Acids in Geological Processes, 1994.

< 1% match (publications)
Salmabi K. Assainar, Lynette K. Abbott, Bede S. Mickan, Paul J. Storer et al. "Polymer-coated rock mineral fertilizer has potential to substitute soluble fertilizer for increasing growth, nutrient uptake, and yield of wheat", Biology and Fertility of Soils, 2020

< 1% match (Internet from 18-Nov-2020)
https://ipsspensa.blogspot.com/2012/09/batuan-dan-jenisnya.html

< 1% match (Internet from 29-Nov-2020)
https://jurnalagriepat.wordpress.com/category/penelitian/page/6/

< 1% match (Internet from 13-Nov-2020)
https://portalpupuk.blogspot.com/2016/

< 1% match (Internet from 26-Nov-2020)
http://stutzartists.org/buku-ajar-dasar-dasar-ilmu-tanah-edisi-2012pdf-pdf-free.html

< 1% match (Internet from 19-Nov-2020)
http://www.sos.siena.edu/~rfinn/research/KISSGalaxies/K1759/SDSS/K1759_r_SDSS.fits

< 1% match (Internet from 23-Nov-2020)
https://wwwryan-vv.blogspot.com/2015/09/

< 1% match (publications)
Clemente, R.. "A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia (Spain)", Agriculture, Ecosystems and Environment, 200701

< 1% match (publications)
Joko Priyono, Anak Agung Ketut Sudharmawan. "Seed Coating with Organomineral Fertilizer, an Alternative Method to Improve the Efficiency of Farming", Asian Research Journal of Agriculture, 2020

< 1% match (Internet from 26-Nov-2020)
https://hendrapedia.blogspot.com/2014/11/pengenalan-geologi-teknik.html

< 1% match (Internet from 20-Nov-2020)
https://mukariagriculture.blogspot.com/2018/

PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI PUPUK DAN AMELIORAN Joko Priyono Penerbit PUSTAKA BANGSA Jalan Swakarsa VI No 28 Mataram, NTB Anggota IKAPI No.003/NTB/Anggota Luar Biasa/17 AGROGEOLOGI PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI PUPUK DAN AMELIORAN AGROGEOLOGI PEMANFAATAN BATUAN SEBAGAI PUPUK DAN AMELIORAN JOKO PRIYONO Pustaka Bangsa (Anggota IKAPI) Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan ... iii Judul : Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran Penulis Editor Layout : Joko Priyono : Sarkawi, SH., MH. : Albadawi Design Sampul : Usman Ali Cetak : Tim CV. Pustaka Bangsa Jumlah Halaman : 228 + xviii hlm. Dimensi Buku : 15 cm x 23 cm Penerbit: Pustaka Bangsa (Anggota IKAPI) e-mail: pustakabangsa05@gmail.com website:

www.pustakabangsa.com Alamat: I. Jln. Swakarsa VII Nomor 28 Gerisak, Mataram-NTB Telp. (0370) 629946 / Mobile Phone ; +6281999271122 II. Jalan Udayana Mataram-NTB (Jln. Gili Gde No.12, Komplek Pertokoan Nusantara) Telp. (0370) 7508536 / Mobile Phone; +6285338884131 Cetakan Pertama : Agustus 2021 ISBN: 978-623-6592-24-3 Hak cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan dengan cara apapun, tanpa izin penulis dan penerbit. KATA PENGANTAR Alhamdulillahi robillalamin - segala puji bagi Allah SWT penguasa seluruh alam semesta, saya bersyukur dapat menyelesaikan penulisan sebuah buku Agrogeologi: Pemanfaatan Batuan Sebagai Pupuk dan Amelioran. Tiada sesuatu pekerjaan yang dapat saya selesaikan kecuali atas izin-Nya pula. Agrogeologi merupakan bidang ilmu yang relatif baru dibandingkan dengan cabang ilmu lainnya di bidang pertanian. Di Indonesia, agrogeologi diajarkan kepada mahasiswa terutama di Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian sejak tahun 2000-an. Dalam bidang Agrogeologi dibicarakan lebih banyak aspek praktis atau terapan dari ilmu geologi, yaitu peman- faatan bahan geologi berupa mineral dan batuan seba- gai input usaha tani berupa pupuk dan pembenah tanah (soil ameliorant). Bahan geologi – mineral dan batuan merupakan sumber daya alam yang sangat melimpah di permu- kaan bumi. Batuan volkanik di Indonesia relatif segar (fresh) karena sering terbarui oleh letusan gunung api yang masih aktif dan bahan erupsi itu tersebar di hampir semua kepulauan di Indonesia. Dari aspek Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … v pedologis, kesuburan alami tanah pertanian di selu- ruh dunia yang sebagian besar adalah tanah mineral sangat dipengaruhi oleh jenis dan sifat batuan induk tanahnya. Dari aspek praktis usaha tani, batuan sangat potensial untuk dimanfaatkan secara langsung sebagai pupuk karena mengandung berbagai jenis unsur hara esensial. Selain itu, batuan juga dapat di- manfaatkan sebagai pembenah (amelioran) tanah untuk mengatasi masalah sifat tanah yang kurang optimal sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara esensial bagi tanaman. Masalah tersebut dapat disebabkan oleh sifat genetis (bahan induk) maupun karena salah pengelolaan tanahnya. Agrogeologi di- kembangkan untuk berperan penting dalam meng- atasi masalah pertanian tersebut. Sebagai salah satu cabang ilmu di bidang per- tanian yang relatif baru berkembang, kajian dan pu- blikasi yang berkaitan dengan agrogeologi masih sangat terbatas, terutama di Indonesia. Para peneliti maupun mahasiswa yang sedang melakukan peneliti- an skripsi/tesis cukup kesulitan mendapatkan refe- rensi yang memadai tentang agrogeologi, terutama yang ditulis dalam bahasa Indonesia. Hal tersebut yang mendorong saya berinisiatif untuk menulis buku Agrogeologi ini berdasarkan bahan referensi terkait secara umum, sebagian dari pengalaman lapang, dan hasil penelitian yang pernah kami lakukan. Buku ini terdiri atas delapan bab utama, menca- kup aspek teoritis dan praktis (teknologi terapan). Secara garis besar, buku ini membicarakan tentang unsur hara esensial dan permasalahannya, jenis ba- han geologi (mineral dan batuan) beserta karakteris- tiknya, pemikiran/konsep tentang pemanfaatan bahan geologi dalam bidang pertanian, pengembangan tekno- logi terapan dalam pemanfaatan mineral dan batuan secara langsung sebagai pupuk multi nutrisi dan amelioran untuk beragam jenis tanah yang berma- salah keharaan, ditutup dengan diskusi mengenai pe- ran penting agrogeologi dalam pengembangan perta- nian berkelanjutan. Karena penerapan agrogeologi berkaitan dengan suatu sistem yang sangat kompleks, yaitu bidang per- tanian, penulis menyadari bahwa masih banyak aspek terkait yang belum tercakup dalam buku ini. Hal ter- sebut semata-mata karena kekurangan dari penulis yang masih harus terus belajar dan mengikuti per- kembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang sangat dinamis. Oleh karena itu, kritik dan saran membangun dari semua pihak sangat kami harapkan dan hargai. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan teri- makasih kepada kolega, khususnya di Jurusan Ilmu Tanah Faperta Universitas Mataram yang telah mem- berikan dorongan untuk penulisan buku ini. Demikian pula kepada pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, diucapkan terima kasih atas support-nya kepada penulis untuk menyelesaikan buku ini. Akhir kata, semoga sekelumit upaya penulis un- tuk sharing pengalaman dan ilmu pengetahuan ini bermanfaat bagi pembaca, memberikan inspirasi ino- vatif kepada para peneliti lain, mahasiswa, ataupun masyarakat umum pemerhati bidang petani. Mataram, Agustus 2021 Penulis Joko Priyono

DAFTAR ISI Hal HALAMAN SAMPUL ----------i KATA PENGANTAR ---------- v DAFTAR ISI ---------- ix DAFTAR TABEL ----------xiii DAFTAR GAMBAR ---------- xv BAB I. PENDAHULUAN ----------1 A. Mengenal Agrogeologi ----------1 B. Perkembangan Agrogeologi---------- 10 C. Penerapan Agrogeologi ---------- 18 BAB II. UNSUR HARA TANAMAN ---------- 23 A. Jenis Unsur Hara ---------- 23 1. Unsur Hara Esensial ---------- 24 2. Unsur Hara Fungsional ---------- 41 B. Permasalahan Unsur Hara ---------- 43 BAB III. BAHAN GEOLOGIS - MINERAL DAN BATUAN ---------- 49 A. Sumber Bahan Geologis ---------- 49 B. Pengertian Mineral dan Batuan ------- 51 1. Jenis dan Sifat Mineral ---------- 52 2. Jenis dan Sifat Batuan---------- 72 BAB IV. BAB V. BAB VI. BAB VII. C. Stabilitas Mineral dan Batuan --------- 79 D. Sifat Kimia Batuan ---------- 84 PELARUTAN UNSUR HARA DARI BATUAN ---------- 89 A. Pengertian Pelarutan ---------- 89 B. Prinsip Reaksi Pelarutan ---------- 91 1. Mekanisme Pelarutan Unsur Hara ---------- 95 2. Kinetika Pelarutan Unsur Hara --- 98 3. Faktor yang Mempengaruhi Laju Pelarutan Hara ----------101 C. Pelarutan Batuan dalam Tanah ------106 BATUAN INDUK TANAH MINERAL--------111 A. Bahan Induk Tanah ----------111 B. Dari Batuan Menjadi Tanah ----------115 C. Sifat Batuan Induk dan Tanah -------118 D. Peremajaan Tanah ----------123 PUPUK DAN AMELIORAN ----------127 A. Pengertian Pupuk dan Amelioran ----127 B. Jenis dan Sifat Pupuk----------130 1. Pupuk Sintetis vs Alami----------132 2. Pupuk Organik vs Anorganik ----133 C. Amelioran ----------135 1. Ameliorasi Tanah Masam ---------136 2. Ameliorasi Tanah Garaman ------142 3. Ameliorasi Tanah Tercemar ------148 PUPUK BERBASIS BATUAN SILIKAT-----153 A. Pupuk Batuan Silikat (PBS)----------154 B. Perkembangan Teknologi PBS --------156 x Joko Priyono 1. PBS Bubuk----------158 2. PBS Partikel Nano ----------161 3. PBS Cair ----------163 C. Multi Fungsi PBS ----------165 BAB VIII. AGROGEOLOGI & PERTANIAN BERKELANJUTAN ----------171 A. Konsep Pertanian Berkelanjutan -----172 1. Menguntungkan. ----------174 2. Dapat memenuhi kebutuhan primer masyarakat. ----------176 3. Ramah lingkungan. ----------176 4. Mandiri dalam penyediaan input usaha tani.----------176 5. Adaftif terhadap perubahan iklim. ----------177 B. Model Usaha Tani Berkelanjutan ----180 1. Usaha Tani Organik ----------181 2. Usaha Tani Sehat ----------197 C. Peran Agrogeologi ----------208 DAFTAR PUSTAKA ----------211 DAFTAR TABEL Tabel 1. Tabel 2. Tabel 3. Tabel 4. Tabel 5. Tabel 6. Tabel 7. Tabel 8. Tabel 9. Tabel 10. Jenis, bentuk, proporsi, serta sumber dan fungsi utama unsur hara esensial bagi tanaman ..... 26 Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman ..... 41 Unsur kimia yang umumnya dite- mukan pada mineral dan batuan di kerak bumi* ..... 51 Sub klas, struktur dasar, dan contoh mineral silikat* ..... 55 Ringkasan kharakteristik utama mineral liat * ..... 61 Nilai d-spacing mineral liat tipe 2:1 (Priyono, 1991) ..... 64 Mineral non-silikat yang telah di- manfaatkan atau mempunyai ka- itan dengan permasalahan di bi- dang pertanian (Allen dan Hajek, 1989) ..... 67 Contoh batuan beku, ciri dan sifat utamanya* ..... 76 Contoh batuan endapan (sedi- mentary rocks)* ..... 78 Contoh batuan malihan (meta- morphic rocks)*..... 79 Tabel 11. Tabel 12. Tabel 13. Tabel 14. Tabel 15. Tabel 16. Tabel 17. Tabel 18. Tabel 19. Tabel 20. Tabel 21. Urutan stabilitas mineral terha- dap pelapukan (Allen & Hajek, 1989) ..... 80 Komposisi kimia pada beberapa jenis batuan ..... 85 Ringkasan mekanisme reaksi pe- larutan (pelapukan kimiawi) ba- tuan induk secara alami (Ross, 1989) ..... 96 Persamaan pelarutan bubuk ba- tuan yang digiling dengan ball mill dalam waktu dan kondisi penggilingan dalam larutan 0,01M asam asetat + oksalat (Priyono, 2005a) ..... 99 Bahan induk tanah mineral..... 112 Hubungan antara jenis bahan induk dengan kemungkinan sifat dan ciri tanah yang terbentuk ..... 120 Beberapa jenis pupuk sintetis yang sering digunakan dalam usaha tani modern ..... 133 Kharakteristik pupuk sintetis dan pupuk alami ..... 133 Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan untuk pengapuran (Rehm et al., 2002). ..... 138 Kharakteristik tanah garaman ..... 143 Kuantitas relatif bahan amende- men yang diperlukan sebagai pe- netral tanah garaman..... 147 xiv Joko Priyono DAFTAR GAMBAR Gambar 1. Gambar 2. Gambar 3. Gambar 4. Gambar 5. Gambar 6. Gambar 7. Skema siklus nitrogen ..... 30 Diagram hubungan antara pH dengan log (H2PO4-) pada sistem (a) Al-P dan Al(OH)3, (b) Fe-P dan Fe(OH)2, dan (c) Ca-P dan CaCO3 (Priyono, 2005b). ..... 34 Skema struktur kerak bumi ..... 53 Struktur dasar tetrahedral silikat .... 53 Struktur dasar oktahedral alumi- nium ..... 59 Contoh pola difraksi sinar x (XRD patterns) mineral liat tipe 1:1. Pada gambat (A) terdapat mineral vermikulit dan kaolinit, sedang- kan pada gambar (B) terdapat vermikulit, kaolinit, dan mika dalam suatu sampel yang diana- lisis (Priyono, 1991). ..... 63 Contoh pola difraksi sinar X (XRD patterns) mineral liat tipe 2:1. Pada gambar kiri hanya terdapat mineral montmorillonit, sedang- kan pada gambar kanan terdapat mineral montmorillonit dan ver- mikulit (Priyono, 1991). ..... 64 Gambar 8. Gambar 9. Gambar 10. Gambar 11. Gambar 12. Gambar 13. Model struktur mineral zeolit, memperlihatkan ruang mikro pa- da rangkaian unit dasar tetra- hedral berbentuk cincin, dikeli- lingi oleh atom aluminium, sili- kat, dan oksigen (https:// commons.wikimedia.org/ wiki/Category: Zeolite). ..... 65 Skema pengelompokan jenis ba- tuan beku dan faktor yang mempengaruhinya (http://jersey.uoregon.edu) ..... 73 Hubungan antara waktu pelarut- an (t, jam) dengan proporsi unsur hara terlarut (%) dari bubuk batuan basalt yang digiling dengan ball mill dalam kondisi basah ( ) dan kering (---) selama 10, 60, dan 120 menit (Priyono, 2005a). ..... 100 Pola XRD mineral K-feldspar yang digiling dengan ball mill selama 10, 60, dan 120 menit (sebelah kiri) dan pola laju pelarutannya dalam asam asetat + asam oksa- lat 0,1 N (sebelah kanan) (Priyono, 2005a) ..... 105 Ilustrasi tahapan proses pemben- tukan tanah mineral, dari bong- kahan batuan tak terpindahkan menjadi tanah..... 115 Contoh beberapa profil tanah mi- neral yang terbentuk dari bahan induk pindahan. Bahan pindah- an dapat berupa batuan kasar ataupun halus yang terbawa air pada proses erosi kemudian dien- xvi Gambar 14. Gambar 15. Gambar 16. dapkan menjadi bahan induk ta- nah yang baru. ..... 117 Pengaruh ukuran partikel bahan kapur terhadap perubahan pH tanah (digambar ulang dari Rehm et al., 2002). ..... 140 Pengaruh intensitas (waktu) penggilingan (dengan ball mill) terhadap pH bubuk batuan sili- kat (dolerite dan K-feldspar) (Priyono, 2005a) ..... 141 Negara dengan kontribusi lahan pertanian organik > 10 % terha- dap total lahan pertanian (data dari FiBL & IFOAM, 2020). ..... 186 xviii Joko Priyono BAB I PENDAHULUAN A. Mengenal Agrogeologi Agrogeologi adalah suatu bidang ilmu yang mem- pelajari tentang pemanfaatan bahan geologis (mineral dan batuan) sebagai input usaha tani. Chesworth (1993) menjelaskan bahwa pemanfaatan bahan geo- logis tersebut dimaksudkan untuk memberikan nilai tambah atau keuntungan dalam usaha tani, baik ke- untungan yang berkaitan dengan aspek sosial, ekono- mi, maupun lingkungan. Dalam bukunya yang berju- dul 'Rocks for Crops', van Strateen (2002) menjelaskan bahwa konsep agrogeologi adalah suatu pendekatan antar disiplin ilmu yang bertujuan untuk mempelajari bahan geologis, yaitu mineral dan batuan, kaitannya dengan kontribusi dari pemanfaatan bahan tersebut dalam pengelolaan agroekosistem atau ekosistem per- tainan. Berdasarkan penjelasan itu, konsep agrogeo- logi menggabungkan pendekatan disiplin ilmu geologi dan pertanian, bertujuan untuk dapat menerapkan strategi pengelolaan lahan pertanian yang berkelan- jutan, khususnya dalam pengelolaan unsur hara tanaman dan kualitas tanah atau lahan pertanian secara integratif. Dua aspek penting yang berkaitan dengan fungsi mineral dan batuan dalam bidang pertanian adalah (1) aspek pedologis - mineral dan batuan sebagai bahan induk tanah mineral, sebagai faktor genetis yang menentukan ciri dan sifat tanah yang terbentuk serta produktivitasnya, dan (2) aspek managemen usaha tani dimana bahan geologis tersebut digunakan seba- gai bahan baku atau langsung diaplikasikan sebagai pupuk atau amelioran. Suatu fakta penting bahwa batuan adalah bahan alami yang melimpah di per- mukaan bumi yang dapat dimanfaatkan untuk mem- pertahankan atau meningkatkan produktivitas lahan, memperbaiki kuantitas dan kualitas hasil pertanian, serta memulihkan kondisi lingkungan (ekologis) yang terdegradasi. Perlu ditekankan bahwa pendekatan agrogeologis merupakan salah satu upaya untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam yang melimpah dalam praktek usaha tani. Banyak konsep serta teknologi aplikatif pertanian yang telah lebih dulu dikembang- kan dan diterapkan serta telah mempunyai andil besar dalam mendorong penerapan teknologi pengelo- laan lahan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Misalnya, pengolahan tanah minimum (minimum tilla- ge), olah tanah konservasi (OTK), penggunaan kompos (pupuk organik), dan pemanfaatan berbagai jazad re- nik (pupuk hayati). Penerapan konsep agrogeologis 2 dapat diintegrasikan dengan berbagai teknologi tersebut dalam rangka menciptakan usaha tani yang sangat peduli pada keseimbangan ekologis sehingga usaha tani itu produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Pemikiran tentang pemanfaatan mineral dan batuan sebagai sumber unsur hara tanaman (pupuk) dan pembenah (amelioran) tanah didasarkan pada teori pembentukan dan perkembangan tanah (pedolo- gi). Beragam jenis tanah mineral, yaitu jenis tanah yang penyebarannya paling luas (setelah tanah orga- nik), terbentuk dari beragam jenis mineral dan batu- an. Sebagian besar unsur hara esensial yang diserap oleh tanaman yang tumbuh pada tanah mineral ter- sebut berasal dari bahan induk tanah berupa batuan. Batuan tersebut mengalami proses pelapukan yang kompleks dan lama (ratusan – jutaan tahun) untuk berubah menjadi tanah. Pada fase perkembangan awal hingga menengah/sedang, kandungan unsur hara pada tanah tersebut sangat ditentukan oleh kompo- sisi unsur kimia dari batuan induknya. Tetapi pada fase perkembangannya lebih lanjut, faktor pembentuk tanah lainnya, yaitu kondisi iklim, pengelolaan, topo- grafi, hidrologi, dan waktu dapat lebih menentukan sifat tanah mineral tersebut daripada bahan induk- nya. Intensitas pengaruh dari masing-masing faktor tersebut tergantung pada kondisi setempat dimana tanah itu terbentuk dan berkembang. Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 3 Pada kondisi alami, pasokan unsur hara dari hasil pelapukan batuan induk, ditambah unsur hara dari atmosfir yang terlarutkan oleh air hujan, umum- nya sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan unsur hara optimum bagi tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut. Hal itu dapat dilihat pada berbagai jenis tanaman yang dapat tumbuh subur di hutan primer, meskipun tanaman itu tidak pernah dipupuk. Kebu- tuhan optimal akan unsur hara esensial bagi tanaman di hutan primer tersebut tercukupi dari tanah tempat tumbuhnya, ditambah unsur hara dari atmosfir (kar- bon, nitrogen, sulfur, dan air). Pada sistem pertanian tradisional yang dulu diterapkan oleh nenek-moyang kita selama berabad-abad, tanaman yang diusahakan tidak pernah dipasok dengan pupuk sintetis karena pupuk tersebut memang belum tersedia. Input yang digunakan hanya serasah (biomas tanaman), kotoran ternak, dan abu dapur; atau secara umum merupakan daur ulang unsur hara yang juga berasal dari tanah dan atmosfir setempat. Jadi, Sang Penguasa Alam ini telah mengatur dengan indah dan lengkap. Kebutuhan unsur hara untuk tanaman itu sebagian besar dicu- kupi oleh tanah dimana tanaman itu tumbuh, ditam- bah unsur hara dari udara (atmosfir), air hujan atau dari badan air (sungai, danau). Sejak tahun 70-an hingga sekarang, sistem per- tanian di seluruh dunia telah mengalami banyak per- ubahan. Meningkatnya populasi penduduk menuntut ketersediaan pangan yang makin tinggi. Tuntutan itu telah mendorong terjadinya eksploitasi sumber daya lahan (terutama tanah), peningkatan intensitas ta- nam, pengembangan varietas tanaman baru berpo- tensi produksi tinggi, dan sarana - prasarana pendu- kung usaha tani lainnya, terutama pupuk, pestisida, herbisida, dan sarana irigasi. Tuntutan peningkatan produksi bahan pangan untuk masyarakat tersebut telah berdampak pada praktek bertani yang eksploi- tatif dan kurang mempertimbangkan aspek keseim- bangan ekologis dan kapasitas daya dukung lahan. Dampak lebih jauh penerapan usaha tani intensif ter- sebut adalah munculnya berbagai persoalan pada usaha tani itu sendiri, antara lain yang berkaitan dengan unsur hara tanaman, yaitu terjadinya keka- hatan, keracunan, dan ketidak-imbangnya komposisi unsur hara esensial di dalam larutan tanah per- tanian, atau gabungan dari ketiganya. Munculnya persoalan unsur hara dalam tanah yang tersedia bagi tanaman dapat disebabkan oleh faktor genetis (sifat bahan induk tanah yang miskin hara) maupun karena salah kelola. Meskipun hingga sekarang pemenuhan kebutuhan pangan yang harus ditempuh melalui kegiatan usaha tani tetap mende- sak, seyogyanya kegiatan usaha tani modern tetap memperhatikan aspek ekologis. Memang anjuran itu tidak mudah diwujudkan di tingkat hamparan. Secara konseptual, kita dapat mengadopsi pelajaran dari praktek cerdas yang pernah diterapkan oleh nenek moyang, yaitu sistem usaha tani berbasis bahan dan mengikuti proses alami. Konsep tersebut harus dikemas dalam bentuk teknologi terapan sesuai dengan perkembangan IPTEK di era modern. Sejarah tentang eksploitasi sumber daya lahan untuk memenuhi kebutuhan pangan manusia dimulai pada akhir Perang Dunia II, dikenal dengan istilah revolusi hijau (green revolution). Konsep pengem- bangan bidang pertanian tersebut ditandai dengan meningkatnya penggunaan bahan agrokimia, yaitu berbagai jenis pestisida, herbisida, dan pupuk sintetis; perakitan varietas tanaman yang mempunyai potensi hasil yang tinggi dan berumur pendek (genjah), ditun- jang dengan pengembangan sarana irigasi yang pro- gresif. Hal tersebut memungkinkan dilakukannya pe- nanaman yang lebih intensif dibanding sebelumnya. Misalnya, penaman padi dari satu kali menjadi dua atau tiga kali tanam per tahun. Areal tanam juga diperluas dengan membuka kawasan hutan untuk pertanian. Tetapi disisi lain, meningkatnya kegiatan pembangunan industri, perumahan, dan infrastruk- tur pada beberapa dekade terakhir juga telah me- nyebabkan terjadinya alih fungsi lahan pertanian yang produktif menjadi lahan non-pertanian. Situasi terse- but telah mendorong munculnya kebijakan pemerin- tah (Kementerian Pertanian) untuk mengoptimalkan pemanfaatan lahan marginal sebagai lahan usaha tani tanaman pangan maupun perkebunan. Tidak dapat dipungkiri bahwa revolusi dalam bidang pertanian tersebut telah berhasil meningkat- kan persediaan pangan di banyak negara agraris secara signifikan. Tetapi, selain berdampak positif ter- hadap peningkatan kuantitas persediaan bahan pa- ngan, penerapan konsep usaha tani itu ternyata juga menimbulkan banyak masalah lingkungan hidup yang serius. Di Indonesia misalnya, penerapan teknologi usaha tani ala revolusi hijau telah berhasil mening- katkan produksi pangan nasional pada tahun 1980-an hingga 1990-an. Pada saat itu, bangsa Indonesia mampu mencapai swasembada beras, bahkan meng- ekspor beras ke negara tetangga. Tetapi setelah perio- de keemasan itu, produktivitas lahan pertanian di banyak daerah sentra produksi pangan di Indonesia mencapai titik jenuh, produksi bahan pangan (beras) nasional mengalami stagnan, bahkan kemudian pro- duktivitasnya cenderung menurun. Di lain pihak, jumlah penduduk terus meningkat, meskipun laju peningkatannya dapat ditekan melalui penerapan pro- gram keluwarga berencana. Aspek lain yang kurang mendapat perhatian adalah kualitas produk pertanian (bahan pangan) yang kurang sehat karena kandungan nutrisinya yang tidak berimbang dan mengandung residu bahan beracun (bahan aktif pestisida sintetis). Penggunaan bahan agrokimia - pupuk dan pestisida sintetis yang berlebihan kemungkinan telah menjadi salah satu kontributor munculnya berbagai jenis pe- nyakit pada masyarakat umum saat ini. Banyak faktor yang menyebabkan terjadinya ke- merosotan produksi bahan pangan di Indonesia. Satu hal yang pasti bahwa sumber daya lahan pertanian yang ada sudah terlalu lelah, karena dieksploitasi terus-menerus tanpa pasokan energi berupa multi nutrisi yang memadai. Pemanfaatan lahan untuk usaha tani telah melampaui kapasitas daya dukung lahan sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi tanaman. Hal itu tidak hanya terjadi di Indonesia, tetapi juga dialami oleh banyak negara lain di dunia. Sebagian besar lahan pertanian yang ada telah dieksploitasi secara berlebihan; dan sebagian lahan yang lain menjadi rusak karena kesalahan da- lam pengelolaan sehingga terjadi penurunan kualitas (degradasi) lahan secara drastis, akhirnya produkti- vitasnya cenderung terus menurun. Untuk mengatasi masalah degradasi lahan terse- but, selain upaya penormalan kondisi lahan (reme- diasi) atau peremajaan lahan (land rejuvination), perlu pula dilakukan reorientasi target usaha tani. Reori- entasi yang dimaksud antara lain berkaitan dengan target pencapaian produksi 'maksimum' menjadi 'opti- mum' serta perlunya memperhatikan kualitas produk pertanian (khususnya bahan pangan) bagi kesehatan konsumen (masyarakat luas). Usaha tani yang terfo- kus pada pencapaian produksi maksimum telah ter- bukti cenderung mengarah pada eksploitasi sumber daya lahan, penggunaan input sintetis (agrokimia) yang berlebihan, dan kurang memperhatikan dampak negatifnya terhadap aspek keseimbangan ekologis se- hingga usaha tani tersebut tidak berkelanjutan. Seba- liknya, target produksi optimum diarahkan pada pen- capaian keuntungan maksimum. Keuntungan terse- but bukan hanya pada aspek finansial (income) bagi aktor usaha tani, tetapi juga keuntungan bagi konsu- men pangan dan ekologis. Keuntungan bagi konsu- men adalah mendapatkan produk bahan pangan yang sehat, mengandung nutrisi yang berimbang sesuai dengan sifat genetis tanaman, dan kuantitas yang cukup. Konsep tingkat produksi optimum lebih mem- pertimbangkan pemanfaatan sumber daya alam sesuai dengan kemampuan daya dukungnya untuk jangka panjang. Sumber daya lahan yang nantinya akan di- wariskan kepada generasi penerus harus dimanfa- atkan secara bijaksana, produktif, tetapi tidak berle- bihan yang dapat menimbulkan kerusakan. Seperti telah dijelaskan di depan bahwa pening- katan produksi pertanian yang terjadi pada era 'revo- lusi hijau' adalah hasil dari pengembangan dan pe- manfaatan keunggulan sifat genetis dari berbagai jenis tanaman, didukung dengan penggunaan bahan agro- kimia, serta peningkatan sarana irigasi. Perlu dicatat bahwa berbagai masukan (input) eksternal untuk menghasilkan bahan pangan yang tinggi tersebut, khususnya berupa bahan agrokimia sintetis, sangat tergantung pada sumber energi yang tidak dapat ter- barukan (non-renewabled energies); atau sebagian harus diimport. Bagi sebagian besar negara berkem- bang, termasuk Indonesia, harus menyisihkan ang- garan pembangunan untuk mengimpor bahan masuk- an (input) usaha tani tersebut. Penerapan sistem usa- ha tani yang sarat dengan penggunaan bahan agro- kimia sintetis itu sering sangat membebani APBN un- tuk mensubsidi petani melalui kebijakan subsidi harga sarana produksi, khususnya pupuk, pestisida, dan benih. Sebenarnya tidak ada salahnya penggu- naan APBN untuk kepentingan masyarakat luas, asal- kan kebijakan itu berjalan efektif. Aspek penting lain yang perlu mendapat perha- tian bahwa penggunaan bahan agrokimia ala 'green revolution' tersebut dalam jangka panjang ternyata kurang ramah lingkungan dan tidak berkelanjutan. Selain itu, hanya sebagian kecil keuntungan dari penggunaan bahan agrokimia sintetis tersebut yang dapat dinikmati oleh petani kecil dan miskin (Sanyu & Azuba, 1996) yang merupakan bagian terbesar dari populasi di banyak negara berkembang, termasuk pe- tani di Indonesia. Berkaitan dengan masalah tersebut, reorientasi usaha tani yang mengoptimalkan pemanfa- atan input usaha tani dari sumber daya lokal harus digalakan. Sumber daya lokal tersebut antara lain adalah bahan geologis (mineral dan batuan) yang dibahas dalam buku ini. B. Perkembangan Agrogeologi Pemanfaatan mineral atau batuan sebagai pupuk dan pembenah tanah sebenarnya bukan ide yang baru muncul.

Berdasarkan referensi yang ada, pemikiran tentang penggunaan batuan sebagai pupuk dan pem- benah tanah telah diperkenalkan oleh Missoux sekitar 1853/54 (Hensel, 1884) melalui tulisannya yang ber-judul 'Bread from Stone'. Pada saat itu, pemikiran tersebut kurang mendapatkan tanggapan dari para pakar, praktisi, ataupun pengambil kebijakan 10 Joko Priyono pembangunan sektor pertanian, sehingga pemikiran itu hilang dari pembicaraan selama sekitar dua abad. Seperti telah disinggung di atas bahwa penggu- naan mineral atau batuan sebagai pupuk dan ame- lioran didasarkan pada konsep pedologi. Tanah mi- neral yang mendominasi lahan pertanian berfungsi sebagai media tumbuh dan pemasok sebagian besar unsur hara esensial untuk berbagai jenis tanaman, terbentuk dari beragam jenis batuan. Bahan induk tanah itu menyediakan berbagai unsur hara esensial bagi tanaman (kecuali N). Tentu saja unsur hara dari bahan induk tanah itu hanya dapat diserap oleh ta- naman setelah terlapuk melalui proses yang kompleks dan lama (ratusan bahkan ribuan tahun). Berdasar- kan kandungan berbagai unsur hara esensial pada batuan tersebut, maka muncul ide bahwa batuan itu kemungkinan dapat digunakan sebagai pupuk maje- muk (multi nutrient fertilizer). Pemanfaatan batuan dapat secara langsung (dalam bentuk bubuk batuan) maupun sebagai bahan baku pupuk lain dimana unsur hara pada batuan itu masih perlu diproses lebih lanjut untuk mengekstrak unsur haranya. Masalah utama dari pemanfaatan batuan untuk pupuk secara langsung (dalam bentuk bubuk atau partikel berukuran mikro – nano meter) adalah lambatnya proses pelarutan unsur hara dari struktur mineral penyusun batuan itu ke larutan tanah. Hambatan itu menjadi tantangan utama bagi pakar agrogeologi untuk berinovasi mencari alternatif solusi teknis yang tepat. Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 11 Sejak dua dekade terakhir telah banyak dilaku- kan kegiatan riset yang bertujuan untuk mengopti- malkan pemanfaatan batuan sebagai pupuk dan pem- benah tanah. Target dari upaya tersebut adalah diha- silkan produk pupuk batuan yang efektif digunakan oleh petani pada tingkat hamparan usaha tani (on farm) secara luas. Secara teoritis, proses pelarutan unsur hara dari partikel batuan itu dapat dipercepat sedemikian rupa sehingga kebutuhan unsur hara ta- naman dapat terpenuhi dari aplikasi pupuk batuan tersebut. Laju pelepasan unsur hara dari pupuk batu- an yang diaplikasikan itu harus dapat mengimbangi laju serapan unsur hara oleh tanaman dalam usaha tani yang intensif, sehingga usaha tani itu produktif dan berkelanjutan. Kembali ke sejarah perkembangan agrogeologi. Konsep 'Bread from Stone' ditindak-lanjuti melalui kegiatan riset oleh Hensel (1880, 1884), kemudian diikuti oleh peneliti lainnya, misalnya Keller (1948) dan Keller et al. (1963). Penelitian mereka saat itu lebih terfokus pada aspek konseptual/dasar. Seorang ahli geologi, de Vilier (1961), mungkin dapat dianggap sebagai orang pertama yang menerapkan konsep 'Bread from Stone' di tingkat hamparan usaha tani. Ia melaporkan hasil penelitiannya bahwa aplikasi ±180 t/ha partikel halus batuan silikat (< 200 µm) dari limbah industri pemecah batuan (quarry by product) dapat meningkatkan produksi tebu dan rendemen gula selama beberapa tahun. Tentu saja dosis pemu- pukan tersebut ekstrim tinggi, sehingga kurang dapat diterima oleh masyarakat petani. Namun hasil peneli- tian itu telah menunjukan manfaat langsung dari ba- tuan terhadap produktivitas dan kualitas hasil tanam- an. Sekitar dua dekade kemudian, kegiatan riset yang berkaitan dengan upaya penggunaan batuan untuk pertanian sangat kurang. Beberapa peneliti, misalnya Huang & Keller (1970) dan Huang & Kiang (1972) mempublikasikan hasil riset dasar tentang alur dan mekanisme pelarutan unsur hara dari mineral dalam beberapa jenis larutan organik maupun anorganik murni. Peneliti tersebut berharap bahwa dengan dike- tahuinya alur, mekanisme, dan faktor yang dominan yang mempengaruhinya, pelarutan unsur hara dari partikel batuan ke larutan tanah dapat disiasati un- tuk dipercepat. Sejak tahun 1980-an, kemungkinan penggunaan batuan sebagai pupuk majemuk (multi nutrient ferti- lizer) mendapat perhatian lebih serius dan luas dari para pakar pertanian. Munculnya gairah baru itu didorong oleh meningkatnya kesadaran banyak pihak tentang pentingnya untuk memperhatikan aspek eko- logis dalam praktek usaha tani. Penggunaan bahan alami, antara lain mineral dan batuan, menjadi salah satu pilihan penting. Penggunaan pupuk sintetis ber- hara makro (N, P/dan K) dan pestisida sintetis yang cenderung berlebihan, terbukti telah menimbulkan banyak dampak negatif. Dampak negatif itu bukan saja terhadap kondisi sosial - ekonomi petani kecil, tetapi juga terhadap lingkungan geofisik, kimia, dan biologi yang luas. Berkaitan dengan meningkatnya perhatian terse- but di atas, banyak peneliti dari berbagai negara yang merekomendasikan penggunaan pupuk majemuk yang unsur haranya lambat tersedia (slow release fertilizers) dari batuan. Misalnya, Fyfe dkk (1983, 1987, 1989, 2000), Chesworth berserta timnya (1982, 1983, 1985, 1987), van Strateen & Pride (1993), dan van Strateen (2002). Peneliti lain dari British Geological Survey (Appleton, 1990, 1994; dan Mathers, 1994); peneliti dari Brazil, antara lain Leonardos et al. (1987, 2000), dari Eropa (Barak et al., 1983, 2000; Bakken et al., 1997, 2000; Weerasuriya et al., 1993); dan dari Australia (Coroneos et al., 1996; Hinsinger et al., 1993, 1996; Bolland& Backer, 2000; Harley & Gilkes, 2000; Coventry et al., 2001). Sejak tahun 1991, Campe telah mempromosikan melalui majalah online 'Remineralize the Earth'. Majalah itu terutama mengupas tentang pentingnya penggunaan bubuk batuan untuk perema- jaan dan penyehatan lahan pertanian dan hutan. Me- lalui majalah tersebut, banyak bukti yang ditun- jukkan oleh para peneliti dari berbagai penjuru dunia tentang pengaruh positif dari penggunaan bubuk ba- tuan terhadap kuantitas dan kualitas produk pertani- an (bahan pangan) dan lingkungan biofisik – penim- bunan karbon di dalam tanah. Besarnya perhatian para peneliti tersebut di atas terdorong oleh meningkatnya kesadaran dan perha- tian banyak pihak terhadap kenyataan tentang dam- pak negatif penggunaan bahan agrokimia (pupuk dan pestisida sintetis) terhadap lingkungan. Kondisi itu juga telah mendorong upaya menemukan solusi yang tepat untuk mengatasi masalah terjadinya penurunan kuantitas dan kualitas produk pertanian sebagai aki- bat terjadinya degradasi lahan. Antusiasme peneliti dari manca negara juga men- dorong dilakukannya penelitian tentang kemungkinan pemanfaatan batuan sebagai pupuk dan ameliioran di Indonesia, meskipun agak lambat. Pemanfaatan batu- an kapur (kalsit dan dolomit), gipsum, dan batuan fos- fat telah banyak dilakukan, tetapi riset tentang pe- manfaatan batuan silikat atau volkanik hingga seka- rang masih sangat terbatas. Padahal, batuan silikat atau volkanik di Indonesia umumnya kaya akan kan- dungan unsur hara makro (Ca, Mg, K, dan S) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, dan B) (Priyono & Arifin, 2009), sehingga sangat potensial untuk digunakan sebagai bahan baku pupuk majemuk yang efektif dan efisien. Berdasarkan referensi yang tersedia, upaya pe- manfaatan batuan silikat/volkanik di Indonesia telah dimulai (Priyono et al., 2006a) dengan dilakukannya identifikasi sifat mineralogi dan kimiawi batuan volka- nik dari beberapa gunung api di Indonesia, yaitu dari Gunung Galunggung, Kelud, Rinjani, dan Tambora. Kemudian dilanjutkan dengan mengevaluasi kemung- kinan pemanfaatan batuan itu sebagai pupuk majemuk (multinutrient fertilizer) dan pembenah tanah melalui percobaan di rumah kaca dan lapang. Harap- annya, pupuk batuan silikat tersebut efektif untuk di- aplikasikan secara langsung di tingkat hamparan (on farm) dalam upaya mengatasi beragam masalah ta- nah yang mengalami penurunan kesuburan, tercemar, terdegradasi, ataupun secara genetis tanahnya kurang subur. Tujuan khusus dari riset tersebut (Priyono et al., 2006a, dilanjutkan oleh Priyono et al., 2007, 2008; Priyono, 2008) adalah untuk mengetahui teknologi yang tepat untuk mempercepat proses pelarutan un- sur hara dari bubuk batuan ke larutan tanah, sehing- ga dapat meningkatkan efektivitas agronomis bubuk batuan itu untuk diaplikasikan pada beberapa jenis tanaman pangan. Prijatna et al. (2007) dan Priyono et al. (2007) telah mengidentifikasi variabel sifat tanah yang ber- pengaruh signifikan terhadap laju pelarutan unsur hara dari bubuk batuan ke larutan tanah. Dari hasil penelitian itu diketahui bahwa kadar asam organik atau bahan organik tanah adalah variabel tanah mine- ral yang dominan dalam mengendalikan laju pelepas- an unsur hara dari bubuk batuan berukuran mikro – nano meter yang diaplikasikan pada tanah itu. Makin tinggi kadar asam atau bahan organik tanah, makin tinggi laju pelarutan unsur hara dari bubuk batuan tersebut ke larutan tanah. Berdasarkan hasil kajian itu dan pengujian di lapang (Priyono et al., 2010), direkomendasikan bahwa penggunaan bubuk batuan silikat sebagai pupuk sebaiknya dikombinasikan dengan pupuk organik (kompos limbah peternakan). Batuan volkanik juga terbukti efektif digunakan sebagai pembenah (amelioran) tanah. Misalnya, untuk menekan pengaruh negatif dari kadar garam tanah yang tinggi terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman jagung (Sumarlin, 2008) dan meningkatkan pH tanah masam atau sebagai bahan pengapuran yang efektif (Sofyan, 2008). Pemanfaatan bubuk batuan basaltik yang dikombinasikan dengan kompos kotoran ternak juga terbukti efektif sebagai pembenah tanah terde- gradasi akibat kegiatan penambangan batu apung (ba- han induk) di Lombok Utara (Priyono et al., 2010). Dari rangkaian penelitian tersebut di atas diperoleh informasi penting tentang potensi yang sangat besar dari batuan volkanik di Indonesia untuk digunakan sebagai pupuk multi nutrisi dan amelioran. Kemungkinan timbulnya dampak negatif dari aplikasi pupuk batuan dalam bentuk bubuk nano par- ticles pada areal yang luas juga telah diantisipasi. Kemungkinan dampak negatif tersebut antara lain adalah terjadinya polusi udara oleh partikel halus dari bubuk batuan yang dapat membahayakan kesehatan petani (Priyono, 2005). Untuk menghindari timbulnya masalah itu, telah dikaji pula teknik formulasi pupuk batuan silikat dari bentuk bubuk menjadi granular (Yulianti, 2009; Rahmi, 2009) atau cair (Oklima, 2008). Pupuk batuan silikat dikembangkan lebih jauh menjadi pupuk cair berpestisida nabati (Priyono & Sutriono, 2010; Priyono & Muthahanas, 2011). Pupuk batuan silikat dalam bentuk bubuk dan cair juga telah diuji-cobakan penggunaannya sebagai bahan pelapis benih tanaman pangan, yaitu pada benih jagung (Zukron, 2012) dan kacang tanah (Sahnun, 2012), padi (Priyono & Sudharmawan, 2020). Meskipun penyempurnaan komposisi bahan pelapis benih terse- but masih perlu dilakukan, setidaknya hasil riset itu dapat menginspirasi para peneliti untuk melihat lebih jauh multi fungsi bubuk batuan silikat. Perkembang- an terbaru, pupuk batuan silikat telah berhasil dipro- ses menjadi pupuk cair dalam skala industri (Priyono, 2017) dan mulai dimanfaatkan oleh petani, terutama di NTB. Berdasarkan uraian di atas, pemanfaatan batuan silikat untuk pupuk dan pembenah tanah yang ramah lingkungan dalam sistem usaha tani di Indonesia sa- ngat prospektif. Tetapi, masih banyak jenis batuan silikat atau batuan volkanik di Indonesia yang belum dikaji pemanfaatannya sebagai pupuk atau pembenah tanah. Hal itu merupakan kesempatan, sekaligus tan- tangan bagi peneliti dan pemerhati bidang pertanian untuk dapat mengambil bagian dalam mewujudkan pertanian ramah lingkungan dan berkelanjutan mela- lui optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal. Upa- ya tersebut selaras dengan kebijakan pembangunan bidang pertanian yang sedang digalakan Pemerintah Indonesia. C. Penerapan Agrogeologi Agrogeologi merupakan salah cabang ilmu yang relatif baru dibanding cabang ilmu lain yang diajarkan kepada mahasiswa di Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, misalnya kesuburan tanah atau pupuk dan pemupukan. Agrogeologi lebih menekankan pada aspek kegunaan praktis dari cabang ilmu geologi dalam bidang pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Agrogeologi diajarkan kepada maha- siswa S-1 Jurusan Ilmu Tanah di Indonesia sekitar 2000-an. Karena relatif baru, kajian pengembangan dalam bidang agrogeologi dan penerapan teknologinya relatif masih terbatas dan belum populer di kalangan masyarakat. Bidang pertanian tampaknya akan terus dituntut untuk menghasilkan bahan pangan lebih banyak ka- rena populasi penduduk yang cenderung terus me- ningkat. Tuntutan itu akan dapat terpenuhi melalui penerapan usaha tani intensif yang produktivif, tetapi harus ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pene- rapan konsep agrogeologi, yaitu pemanfaatan mineral dan batuan sebagai pupuk dan ameliioran dalam prak- tek usaha tani, secara luas perlu terus digalakan. Hal itu tidak harus dianggap untuk menghapuskan peng- gunaan bahan agrokimia (pupuk) sintetis, tetapi un- tuk memadukan kedua jenis pupuk tersebut dalam kegiatan usaha tani yang lebih ramah lingkungan. Penerapan agrogeologi dalam praktek usaha tani tersebut sangat memperhatikan aspek ekologis, tanpa harus melupakan target capaian produksi optimal. Seperti telah dijelaskan bahwa banyak peneliti yang merekomendasikan penggunaan batuan silikat sebagai pupuk pelepas unsur hara lambat (slow- release fertilizer), karena banyak keunggulan dari penggunaan pupuk batuan tersebut. Berkaitan dengan promosi dan ajakan terhadap penerapan kon- sep agrogeologi, beberapa istilah atau jargon khusus telah sering digunakan secara luas. Misalnya, Campe (1991) menggunakan istilah pengkayaan lahan dengan mineral (remineralized the earth), Conventry et al. (2001) dengan istilahnya peremajaan lahan (land reju- venation), para pemerhati lingkungan (enviromental- ists) menggunakan istilah 'kembali ke alam' (back to nature), dan banyak istilah senada lainnya. Semuanya itu merupakan ajakan dan upaya penyadaran akan perlu dan pentingnya bagi berbagai pihak untuk mem- perhatikan kondisi lahan pertanian saat ini yang kua- litasnya makin menurun. Respon terhadap ajakan itu antara lain munculnya upaya pengembangan dan me- nerapkan konsep agrogeologi dalam praktek usaha tani secara luas. Fakta yang ada hingga saat ini, penggunaan pu- puk berbasis batuan belum banyak diterapkan secara luas dalam praktek usaha tani. Selain karena pupuk batuan belum banyak dikenal oleh masyarakat luas, bahkan sebagian dari masyarakat menganggapnya se- bagai barang aneh, juga karena adanya beberapa kendala teknis penerapannya di tingkat hamparan (on farm). Kendala teknis tersebut misalnya berkaitan dengan kadar dan laju pelarutan unsur hara dari pu- puk batuan yang rendah, sehingga penggunaannya memerlukan dosis yang sangat tinggi (puluhan ton per hektar). Hal itu dinilai oleh kebanyakan petani kecil tidak ekonomis dan tidak mungkin dapat diterapkan. Selain itu, tidak semua jenis tanah cukup responsip terhadap aplikasi pupuk batuan itu dalam waktu sing- kat. Misalnya, aplikasi bubuk batuan basaltik dalam jangka waktu satu tahun, terbukti hanya efektif pada tanah yang sangat miskin hara, tanah masam, atau gabungan keduanya (Priyono, 2005a). Sebenarnya, penggunaan bubuk batuan dosis tinggi tersebut dapat mempertahankan produktivitas lahan tetap tinggi da- lam waktu cukup lama (2 – 5 tahun), seperti ditun- jukan oleh de Vilier (1961) dan banyak peneliti lainnya (dicitir pada paragraf sebelumnya). Artinya, keuntung- an dan efektivitas penggunaan pupuk batuan harus dievaluasi untuk jangka panjang. Khusus di Indonesia, kemungkinan penggunaan batuan sebagai pupuk majemuk (multi nutrient ferti- lizer) yang murah dan ramah lingkungan belum ba- nyak diketahui, apalagi diterapkan. Masih banyak hal yang harus dikaji lebih jauh agar sumber daya geologi (batuan) yang melimpah di Indonesia dapat dimanfaat- kan secara optimal dalam pelaksanaan pembangunan bidang pertanian, sebagai sumber hara tanaman dan bahan pembenah tanah. Beberapa hasil pengembang- an agrogeologi, baik aspek teoritis ataupun teknologi aplikasinya dalam praktek usaha tani, serta prospek- nya ke depan dijelaskan dalam beberapa bab terpisah dalam buku ini. BAB II UNSUR HARA TANAMAN Konsep dan aplikasi teknologi agrogeologi sangat erat kaitannya dengan managemen unsur hara tanam- an, baik dengan penyediaan sumber unsur hara (pu- puk), pengendalian dinamika unsur hara di zona per- akaran tanaman (rizosfir), maupun remediasi sifat tanah bermasalah yang secara tidak langsung berpe- ngaruh pada perbaikan status keharaan pada tanah yang diremediasi. Agar diperoleh pemahaman yang komprehensif tentang peran agrogeologi tersebut di atas, serta untuk penyamaan persepsi, dalam Bab 2 ini dibahas secara garis besar mengenai beberapa aspek penting tentang unsur hara itu sendiri serta permasalahan terkait. A. Jenis Unsur Hara Unsur hara adalah kelompok unsur kimia khu- sus yang dibutuhkan oleh dan berfungsi esensial pada proses fisiologi pertumbuhan dan produksi tanaman. Bersama dengan faktor lingkungan, unsur hara sa- ngat menentukan kuantitas dan kualitas hasil tanam- an. Jika kondisi faktor lingkungannya optimal, tanam- an akan tumbuh dan berproduksi maksimal jika terpenuhi kebutuhan unsur haranya dalam jumlah yang cukup dan proporsi antar unsur hara yang berimbang. Karena perannya yang sangat krusial itu, ketersediaan unsur hara bagi tanaman dalam tanah (media tumbuh tanaman) sering menjadi faktor pembatas dalam praktek usaha tani yang harus diatasi. Permasalahan unsur hara umumnya muncul ka- rena tidak semua tanah pada lahan pertanian yang diusahakan dapat berfungsi optimal sebagai pemasok unsur hara yang cukup dan proporsional. Ada tanah pertanian yang kandungan satu atau lebih jenis unsur haranya memang rendah sehingga diperlukan tindak- an pemupukan; atau kandungannya berlebihan se- hingga bersifat toksik bagi tanaman dan memerlukan tindakan remediasi; atau kombinasi dari kedua kon- disi tersebut sehingga diperlukan tindakan pemu- pukan sekaligus remediasi secara integratif. Berkaitan dengan jenis, fungsi, dan proporsi opti- malnya yang dibutuhkan oleh tanaman, unsur hara tanaman dapat dipilah menjadi dua kelompok besar, yaitu unsur hara esensial dan unsur hara fungsional. Kedua kelompok tersebut dibahas lebih rinci pada sub bab berikut. 1. Unsur Hara Esensial Pada pertengahan abad 19, ilmuwan dari Jerman (von Liebig) menjelaskan bahwa sejumlah unsur hara adalah mutlak dibutuhkan oleh tanaman, dan disebut unsur hara esensial. Artinya, jika suatu unsur hara esensial tidak tersedia optimal bagi tanaman, baik karena kuantitasnya yang kurang ataupun kelebihan, maka pertumbuhan tanaman itu akan terganggu, dan tingkat ketersediaan unsur hara yang tidak optimal itu akan menjadi faktor pembatas pertumbuhan mau- pun hasil tanaman. Hingga sekarang telah teridentifikasi sebanyak 16 jenis unsur hara esensial seperti ditampilkan pada Tabel 1. Selain itu, pada beberapa dekade terakhir telah terbukti bahwa unsur silikat (Si) berfungsi sa- ngat penting bagi pertumbuhan dan produksi tanam- an. Tetapi, hingga sekarang unsur Si belum diakui sebagai unsur hara esensial, meskipun telah teridenti- fikasi fungsinya yang sangat penting dalam proses fisiologi pertumbuhan dan produksi tanaman. Unsur silikat (Si) diklasifikasikan sebagai unsur fungsional. Unsur hara esensial dapat dipilah menjadi dua kelompok, yaitu unsur hara mineral dan unsur hara non-mineral. Unsur hara mineral adalah semua unsur hara pada Tabel 1 (kecuali C, H, dan O), sebagian besar (kecuali N) bersumber dari mineral/batuan atau bahan geologi. Unsur hara non-mineral meliputi unsur C, H, dan O bersumber dari udara dan air, dan men- duduki 60 – 70 % jaringan tanaman. Tabel 1. Jenis, bentuk, proporsi, serta sumber dan fungsi utama unsur hara esensial bagi tanaman Jenis dan Bentuk Unsur No Simbul Unsur yang Diserap Hara Tanaman Proporsi Sumber dan Fungsi Serapan Utama dalam Hara Tanaman (%) * 1. Karbon (C) 2. Hidrogen (H) 3. Oksigen (O) Air dan atmosfir: komponen utama jaringan tanaman 4. Nitrogen (N) NH4+, NO3- 5. Fosfat (P) H2PO4-, HPO4-2 6. Kalium (K) K+ 7. Sulfur (S) SO4-2 8. Kalsium (Ca) Ca+2 9. Magnesium (Mg) Mg+2 10. Besi (Fe) Fe+2/+3 11. Mangan (Mn) Mn+2/+5 9. Magnesium (Mg) Mg+2 10. Besi (Fe) Fe+2/+3 11. Mangan (Mn) Mn+2/+5 12. Seng (Zn) Zn+2 13. Tembaga (Cu) Cu+2 14. Boron (B) BO-3 15. Molibdenum (Mo) Mo-2 16. Klor (Cl) Cl- 100 Udara dan bahan organik: protein, asam amino 16 Mineral/batuan, bahan organik: asam nukleat: ATP: 25 Mineral/batuan: katalis, transfortasi ion 12,5 Mineral/batuan: asam amino 8 Mineral/batuan: komponen dinding sel 3 Mineral/batuan: bagian dari klorofil 0,2 Mienral/batuan: sintesa klorofil 0,2 Mineral/batuan: aktivator enzim 3 Mineral/batuan: bagian dari klorofil 0,2 Mienral/batuan: sintesa klorofil 0,2 Mineral/batuan: activator enzim 0,03 Mineral/b tuan: activator enzim 0,01 Mineral/batuan: komponen enzim 0,2 Mineral/batuan: komponen dinding sel 0,00 Mineral/ba tuan: 1 fiksasi N 0,3 Mineral/ba tuan: reaksi fotosintesis *Dirangkum dari Bennett (1993) Dalam konteks pemenuhan kebutuhan unsur hara bagi tanaman yang optimal, masalah kekurangan atau kelebihan unsur hara sering terjadi pada unsur hara mineral. oleh karena itu unsur hara tersebut lebih banyak mendapat perhatian pelaku usaha tani dibandingkan unsur hara lainnya. Unsur hara mineral dapat dibagi lebih rinci ber- dasarkan bandingan relatif kuantitasnya yang dibu- tuhkan oleh tanaman, yaitu (1) unsur hara primer (N, P, dan K), (2) unsur hara sekunder (S, Ca, dan Mg), dan (3) unsur hara mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, dan Cl). Unsur hara primer dan sekunder sering diga- bungkan menjadi satu kelompok sebagai unsur hara makro. Welch (1995) memasukan unsur kobal (Co) dan natrium (Na) sebagai unsur hara esensial bebe- rapa jenis tanaman tertentu dan dimasukan ke dalam kelompok unsur hara mikro. a. Unsur Hara Mineral Primer Unsur hara primer (N, P, dan K) mempunyai peran sangat penting kaitannya dengan pertumbuhan dan hasil tanaman. Kebutuhan tanaman akan ketiga unsur tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan un- sur hara esensial lainnya. Ketidak-mampuan suatu tanah untuk memasok salah satu atau ketiga unsur hara tersebut dalam jumlah yang cukup dan berim- bang akan sangat berpengaruh terhadap pertum- buhan serta kuantitas maupun kualitas hasil tanam- an yang diusahakan pada tanah tersebut. Pada usaha tani modern, peningkatan intensitas tanam dan penggunaan varietas tanaman yang berpo- tensi produksi tinggi sering menyebabkan terjadinya kekahatan ketiga unsur tersebut. Oleh karena itu, pupuk yang mengandung unsur N, P, dan K meru- pakan jenis pupuk yang paling banyak digunakan dalam usaha tani saat ini. Nitrogen (N). Unsur N diserap oleh tanaman dalam bentuk NH4+ dan NO3-. Diantara unsur hara mineral seperti tertera pada Tabel 1, nitrogen adalah yang paling banyak dibutuhkan tanaman. Tetapi, dosis aplikasi pupuk N yang optimum untuk berbagai jenis tanaman sangat beragam. Tanaman serealia, misalnya padi dan jagung, membutuhkan pupuk N relatif lebih tinggi dibandingkan untuk tanaman kacang (legum). Tanam- an legum dapat memasok sendiri sebagian besar - seluruh kebutuhan unsur hara N melalui kerjasama yang saling menguntungkan (simbiosis mutualisme) antara akar tanaman legum itu dengan bakteri pe- nambat N (Ryzobium sp) di dalam tanah. Dalam proses fisiologis pada jaringan tanaman, unsur N berfungsi terutama sebagai komponen asam amino dan protein; keduanya merupakan bagian uta- ma pada setiap sel jaringan tanaman. Tanaman mem- butuhkan unsur N untuk pembentukan seluruh or- gannya, terutama pada fase pertumbuhan (vegetatif). Oleh sebab itu, apabila suatu tanaman kekurangan N, maka tanaman itu akan sangat terhambat pertumbuhan vegetatifnya dan berakibat hasil tanaman yang sangat rendah, bahkan dapat mati atau gagal panen. Ciri tanaman yang kekurangan N umumnya adalah daunnya berwarna kekuningan pucat dan per- tumbuhannya sangat terhambat atau kerdil. Sebalik- nya, jika kelebihan N, tanaman itu akan tumbuh ter- lalu subur (succulent), sehingga mudah rebah dan peka terhadap serangan hama dan penyakit. Kedua kondisi ekstrim itu menyebabkan rendahnya kuanti- tas atau/dan kualitas hasil tanaman. Sumber unsur N tersebar luas di kerak bumi (litosfir), udara (atmosfir), air (hidrosfir), dan organa- nisme (biosfir). Stevenson (1972) memperkirakan kan- dungan N yang terbesar adalah di litosfir (16.360 x 1013 m3) dalam berbagai bentuk, karena masa litosfir yang sangat besar; sedangkan sumber N terbesar kedua adalah atmosfir (386 x 1013 m3). Atmosfir me- ngandung sekitar 78 % N dalam bentuk gas (ter- utama N2), sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tanaman. Agar dapat diserap oleh tanaman, gas N itu perlu diubah menjadi amonium (NH4+) atau nitrat (NO3-). Untuk memahami proses transformasi unsur N, disajikan skema siklus N pada Gambar 1. Komponen utama dari siklus nitrogen dimulai dari gas N di atmosfir. Selain proses fiksasi N oleh industri pupuk melalui reaksi anorganik, ada 4 proses biologis yang terlibat dalam siklus N, yaitu (1) fiksasi Fiksasi N oleh Fiksasi N melalui N2 – Atmosfir Industri Pupuk NO, N2O, NH3 Proses Biologis Amonia dan Protein, tanaman, ammonium (NH3 dan mikroba dan NH4+) Percikan Listrik Bakteri (Petir) Denitrifikas i Nitrit (NO2-) Bakteri Nitrat Nitrifikasi (NO3-) Proses Perombakan/Dekomposisi GaGmambbaarr 111..SSkkeemmaasiskilukslunsitrongietrnogen nitrogen oleh bakteri Rizobium, (2) perombakan bahan organik oleh beragam jenis organisme tanah, (3) nitrifikasi N oleh bakteri Nitrosomonas (oksidasi NH3 menjadi NO2-) dan bakteri Nitrobacter (oksidasi NO2- menjadi NO3-), dan (4) denitrifikasi (mengubah NO3- menjadi gas NO dan N2O). Dua bentuk nitrogen oksida (NO dan N2O) terda- pat di atmosfir sebagai hasil interaksi antara unsur nitrogen dengan oksigen. Unsur nitrogen itu akan bereaksi dengan oksigen pada tekanan dan tempe- ratur tinggi. Kondisi itu dapat terjadi di sekitar per- cikan listrik (petir) dan reaktor, dihasilkan N2O, NO, dan NO2. Selanjutnya NO2 dapat bereaksi dengan air (hujan) membentuk asam HNO3 yang dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman. Nitrogen di atmosfir menjadi bagian dari proses fiksasi N pada industri pupuk N dan fiksasi biologis oleh bakteri penambat N secara individu maupun be- kerjasama dengan tanaman inang

(tanaman legum). Fiksasi N tersebut mentransformasikan N dari atmos- fir menjadi ammonia (NH3), kemudian menjadi ion nitrit (NO2-), dan akhirnya menjadi ion nitrat (NO3). Ammonium (NH4+) terbentuk melalui proses sin- tesa yang dikenal dengan proses Haber. Nitrogen dan hidrogen direaksikan pada tekanan dan temperatur tinggi dengan bantuan suatu katalis untuk mengha- silkan ammonium. Ammonium yang dihasilkan dapat diproses lebih lanjut menjadi ammonia (NH3); dan jika pada suasana masam, NH3 dapat diubah menjadi am- monium (NH4+). Selanjutnya, ammonium direaksikan dengan asam karbonat sehingga dihasilkan pupuk urea (CO(NH2)2), atau dengan asam nitrat dihasilkan pupuk ammonium nitrat (NH4NO3). Dari jalur lain, dekomposisi senyawa organik (protein), limbah/kotor- an, dan bahan organik lain juga menghasilkan ion nitrat. Pada kondisi oksidatif, ion ammonium dapat teroksidasi menjadi nitrat. Sebaliknya, nitrat dapat di- transformasi menjadi gas nitrogen (N2O) oleh bakteri denitrifikasi dalam kondisi anaerob, bakteri meman- faatkan oksigen dari nitrat tersebut. Berdasarkan siklus hara seperti dijelaskan di atas, unsur N sangat labil, mudah berubah dari ben- tuk yang dapat dimanfaatkan tanaman (NH4+ dan NO3-) menjadi gas nitrogen (NH3, N2O) yang mudah hilang dari rizosfir ke atmosfir. Selain itu, pupuk nitrogen (urea atau garam nitrat) sangat mudah larut dalam air sehingga mudah terbawa oleh aliran permukaan dan perkolasi. Kedua sifat tersebut harus menjadi bahan pertimbangan dalam penggunaan pupuk N dalam usa- ha tani. Cara praktis yang sering diterapkan dalam usaha tani adalah pemberian pupuk N secara berta- hap (2 – 3 kali dalam sekali musim tanam 3 – 4 bulan) dan pupuk tersebut dibenamkan ke dalam tanah, ti- dak disebar di permukaan tanah. Fosfor (P). Unsur hara P dibutuhkan oleh tanaman dalam kuantitas terbesar kedua setelah N. Fungsi P berkait- an dengan penyimpanan dan transfer energi pada pro- ses metabolisme di dalam jaringan tanaman, yaitu sebagai komponen utama dari molekul ATP (adenosine triphosphate) yang dapat berubah menjadi ADP (ade- nosine diphosphate) + energi. Selain itu, P merupakan bagian penting dari RNA (ribonucleic acid) dan DNA (deoxyribonucleic acid). Peran penting lainnya dari P di dalam jaringan tanaman antara lain: a. sebagai komponen utama senyawa phospholypids yang berperan penting dalam pembentukan mem- bran sel, b. diperlukan dalam berbagai proses fisiologi penting, minsalnya fotosintesis dan penambatan nitrogen, c. diperlukan untuk menstimulir perkembangan akar tanaman, terutama akar serabut, d. diperlukan pada tahap perkembangan dan pema- sakan buah atau biji tanaman, dan P banyak ter- simpan di dalam buah dan biji dalam bentuk se- nyawa phytin (inositol heksafosfat). Karena begitu pentingnya peran P bagi tanaman seperti disebutkan di atas, maka jika tanaman keku- rangan unsur hara P akan berakibat terhambatnya pertumbuhan dan penurunan hasil tanaman yang sig- nifikan. Pada tanaman yang kekurangan P, pertum- buhan batang dan akarnya serta proses pematangan buah sangat terhambat. Pada tanaman padi, keku- rangan P dapat menyebabkan persentase gabah ham- pa sangat tinggi. Tanaman jagung yang kekurangan P dapat dikenali dari perubahan warna daunnya dimana di bagian pinggir daunnya berubah warnanya menjadi kemerahan tua. Tanaman menyerap P dalam bentuk ion fosfat (terutama H2PO4- dan HPO4-2). Bentuk P di dalam tanah sangat beragam dan relatif sulit tersedia bagi tanaman. Hal itu karena ion fosfat tersebut sangat mudah membentuk senyawa kompleks dengan kation bervalensi ganda (divalent), misalnya Ca+2 dan Mg+2, dan bervalensi jamak (polyvalent), misalnya Fe+3, Mn+5, dan Al+3, atau terjerap oleh senyawa oksida dan parti- kel koloidal organik maupun anorganik lainnya se- hingga tidak tersedia bagi tanaman. Ketersediaan P di dalam tanah bagi tanaman sangat dipengaruhi oleh tingkat kelarutan senyawa kompleks tersebut yang dikontrol terutama oleh pH tanah. Pada pH rendah (tanah masam), kelarutan logam polyvalent relatif tinggi dan membentuk senya- wa kompleks dengan P; sedangkan pada pH tinggi (tanah basa), asam fosfat banyak berikatan dengan kation divalent (Ca dan Mg) membentuk senyawa kompleks Ca-P dan Mg-P. Tingkat ketersediaan P tertinggi adalah pada pH tanah sekitar netral (pH 7.5), seperti tampak pada diagram hubungan antara pH dengan P terlarut pada Gambar 2. 0 -1 (c)Ca-P -2 log (H 2PO 4-) -3 -4 (6,-4.54) -5 (a) Al-P (b) Fe-P -6 -7 -8 (3,-7.54) 2 3 4 5 6 7 8 9 pH Gambar 2. Diagram hubungan antara pH dengan log (H2PO4-) pada sistem (a) Al-P dan Al(OH)3, (b) Fe-P dan Fe(OH)2, dan (c) Ca-P dan CaCO3 (Priyono, 2005b). Selain dari pupuk, sumber utama P di dalam tanah adalah dari bahan induk (batuan) yang me- ngandung mineral fosfat (apatit) dan senyawa/mineral renik pada batuan itu yang umumnya berkadar P sa- ngat rendah. Misalnya, batuan basalt dari beberapa gunung api di Pulau Jawa, Lombok, dan Sumbawa (Priyono et al., 2009) mengandung total fosfat < 0,01 % P2O5. Sumber P tanah lainnya yang cukup signifikan adalah bahan organik dengan kadar P yang sangat be- ragam, tergantung pada jenis dan tingkat kematangan/dekomposisi bahan organik tersebut. Biomasa tanaman kelompok legum umumnya me- ngandung P relatif tinggi dibanding biomasa dari ta- naman non-legum. Berbeda dengan pupuk N, masalah yang sering dihadapi dalam aplikasi pupuk P adalah sangat lam- batnya pelarutan unsur P dari pupuk di dalam tanah. Misalnya dari pupuk SP-36, umumnya hanya sekitar 40 % unsur P dari pupuk yang diaplikasikan itu yang dapat diserap tanaman. Selain daya larut pupuk P relatif rendah, ion fosfat yang telah terlarut dari pupuk itu juga mudah membentuk senyawa kompleks seperti dijelaskan di atas. Unsur P dari senyawa kompleks P- organik relatif lebih mudah terlarut dibanding P dari senyawa kompleks anorganik (Al-P, Fe-P, Ca-P, atau Mg-P). Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi aplikasi pupuk P sebaiknya dibarengi dengan pembe- rian bahan organik (kompos). Selain itu, penggunaan mikoriza juga direkomendasikan untuk tujuan me- ningkatkan kelarutan P yang ada di dalam tanah. Pupuk hayati yang berisi organisme pelarut P atau/ dan penambat N juga telah banyak ditawarkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk P. Kalium (K). Unsur K merupakan unsur hara primer yang dibutuhkan oleh tanaman dalam kuantitas tinggi keti- ga setelah N dan P, diserap oleh tanaman dalam ben- tuk ion K+. Kalium tergolong unsur hara yang labil dalam jaringan tanaman. Selain sebagai salah satu komponen sel jaringan, terutama jaringan tanaman muda, unsur K berfungsi dalam proses fisiologis ta- naman sebagai katalisator dan pengatur transfortasi ion. Misalnya, keberadaan K di dalam jaringan tanam- an membantu pembentukan protein dan karbohidrat, mengeraskan jerami dan bagian kayu, meningkatkan resisten tanaman terhadap serangan hama dan penya- kit, dan meningkatkan kualitas biji atau buah. Unsur K juga berfungsi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan melalui mekanisme pe- nguatan kerangka jaringan sel, sehingga pupuk K sa- ngat penting dalam usaha tani di lahan kering. Indikasi tanaman yang mengalami defisiensi K adalah warna daunnya terlihat lebih tua, mengkerut keriting, timbul bercak merah kecoklatan, dan per- kembangan buahnya tidak sempurna (terlambat ma- tang, mudah rontok, dan daya simpannya rendah). Pada tanaman padi, kekurangan K dapat menyebab- kan kualitas gabah atau beras rendah, kurang bernas. Namun kelebihan K kurang berdampak terhadap kuantitas produksi tanaman pangan. Sumber utama unsur K di dalam tanah adalah bahan induk, terutama kelompok mineral mika, misal- nya, mineral muskovit [KAl2(AlSi3O10)(OH)2] dan biotit [K(Mg,Fe)2(AlSi3O10) (OH)2], dan kelompok K -feldspar, misalnya, ortoklas (KAlSi3O8). Komposisi mineral pada batuan felsik umumnya didominasi oleh K-feldspar, sehingga tanah yang terbentuk dari kelompok batuan felsik jarang kahat K. Sebaliknya, tanah yang terbentuk dari batuan mafik (didominasi oleh mineral ferromagnesium silikat) juga mengandung mineral Ca- feldspar, umumnya kadar K relatif rendah sehingga diperlukan aplikasi pupuk K secara rutin, terutama jika tanah itu telah ditanami secara intensif dalam jangka waktu yang lama. b. Unsur Hara Mineral Sekunder Yang termasuk unsur hara sekunder adalah sulfur (S), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg). Kebu- tuhan tanaman akan ketiga unsur hara sekunder cukup tinggi, tetapi masih lebih rendah dibanding unsur hara primer (lihat Tabel 1). Sulfur (S). Sulfur diserap tanaman dalam bentuk ion sulfat (SO4-2). Unsur tersebut merupakan bagian dari kompo- nen protein, yaitu cystein, methionin serta thiamine. Sulfur terutama dibutuhkan oleh tanaman yang masih muda. Di bagian buah, kadar S lebih tinggi daripada kadar P. Pada tanaman legum, unsur S berperan pen- ting dalam pembentukan bintik akar. Sesuai dengan fungsi S tersebut, dan jika tanaman kekurangan S maka pertumbuhannya akan terhambat. Kasus keracunan S secara langsung jarang terja- di. Tetapi, masalah kesuburan tanah yang berkaitan dengan keberadaan unsur S umumnya secara tidak langsung berkaitan dengan kemasaman tanah. Tanah yang mengandung sulfur tinggi umumnya bereaksi sangat masam. Pada tanah masam tersebut, kelarutan unsur mikro (Fe, Zn, dan Cu) sangat tinggi dan bersi- fat racun bagi tanaman. Sumber utama unsur S di dalam tanah adalah mineral sulfida dan bahan organik. Batuan beku umumnya mengandung sangat sedikit mineral sulfida, sehingga sumbangan S secara langsung dari batuan beku relatif kecil. Contoh mineral sulfida adalah pirit atau markasit (FeS2). Mineral itu banyak dijumpai pada tanah di lahan pasang surut atau rawa, dan lim- bah galian pada industri pertambangan logam dan batubara. Pada kondisi oksidatif, mineral pirit sangat labil, cepat teroksidasi menghasilkan mineral jarosit yang berwarna kuning jerami [KFe3(SO4)2(OH)6], gyp- sum (CaSO4), dan asam sulfat (H2SO4). Peningkatan konsentrasi asam sulfat sebagai akibat terjadinya ok- sidasi pirit menyebabkan tanah menjadi sangat ma- sam (pH < 2,5). Kalsium (Ca). Kalsium diserap oleh tanaman dalam bentuk ion (Ca+2). Sumber utama Ca di dalam tanah adalah dari bahan induk (mineral dan batuan), terutama yang termasuk dalam kelompok batuan mafik dan kapur. Peran Ca sangat penting sebagai komponen membran sel dan dalam pengaturan beragam fungsi sel, seperti halnya hormon. Misalnya, Ca berperan dalam penga- turan fungsi mobilisasi protein yang mengatur penye- rapan dan pergerakan unsur hara ke dalam akar dan seluruh sel tanaman. Agar fungsi tersebut dapat ber- jalan normal, diperlukan Ca tersedia yang cukup pada permukaan akar tanaman. Fungsi tersebut juga ber- kaitan dengan kemampuan tanaman dalam menetrali- sir senyawa dan kondisi tanah yang merugikan ta- naman itu. Tanaman legum membutuhkan Ca lebih tinggi dibanding yang dibutuhkan oleh tanaman non-legum. Jika kekurangan Ca, setiap jenis tanaman menun- jukan gejala yang berbeda. Umumnya, kekurangan Ca dicirikan oleh munculnya klorosis di bagian tepi daun muda, kemudian menjalar ke tulang daun sehingga daun tidak dapat berkembang dengan baik. Kekurang- an Ca pada tanaman kacang tanah (legum) dapat sig- nifikan menurunkan kuantitas dan kualitas produksi (biji). Magnesium (Mg). Magnesium diserap tanaman dalam bentuk ion (Mg+2). Sumber utama Mg di dalam tanah adalah ba- han induk tanah (mineral dan batuan), terutama yang termasuk dalam kelompok batuan mafik dan dolomit. Unsur Mg mempunyai fungsi sangat penting ter- utama dalam fotosintesis (komponen penting dalam molekul klorofil). Magnesium juga terlibat dalam ber- bagai reaksi enzimatik, misalnya pembentukan asam amino, vitamin, lemak, dan gula. Ion Mg+2 bereaksi dengan P dalam proses penyerapan dan transportasi unsur hara di dalam jaringan tanaman. Gejala pada tanaman yang kekurangan Mg adalah warna keku- ningan, dimulai pada daun yang tua kemudian menjalar ke daun yang muda. Gejala tersebut mirif dengan gejela tanaman yang kekurangan N. c. Unsur Hara Mikro Unsur hara mikro meliputi besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), boron (B), molibdenum (Mo), dan klor (Cl), dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah relatif sedikit (mikro gram). Sumber utama unsur hara mikro adalah dari bahan induk tanah (batuan/mineral), limbah industri/pertambangan lo- gam, dan bahan organik. Ketersediaan/kelarutan un- sur hara mikro di dalam yang tanah masam umumnya tinggi (kecuali Mo) dan dapat bersifat toksik bagi ta- naman. Sebaliknya, tanaman dapat mengalami keka- hatan unsur mikro pada tanah bereaksi basa. Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman adalah terlibat dalam berbagai reaksi enzimatik (Tabel 2). Meskipun diperlukan oleh tanaman dalam kuantitas sangat rendah, kekurangan unsur hara mikro dapat menurunkan kuantitas maupun kualitas produksi tanaman yang signifikan. Kondisi sebaliknya, dampak dari keracunan (kelebihan) unsur hara mikro umumnya lebih nyata terhadap kuantitas maupun kualitas produksi tanaman. Tanaman yang keracunan unsur mikro sering terjadi di sekitar daerah industri tambang logam, atau daerah pertanian yang terkena cemaran limbah dari industri yang banyak mengan- dung logam atau/dan senyawa organik bersifat toksik bagi tanaman. Tabel 2. Fungsi utama unsur hara mikro dalam jaringan tanaman No Unsur Fungsi utama 1. Besi (Fe) Penting dalam pembentukan klorofil 2. Mangan (Mn) Terlibat dalam reaksi ensimatik pemecahan karbohi- drat, dan metabolism nitrogen 3. Seng (Zn) Penting dalam proses transformasi karbohidrat, peng- aturan konsumsi gula, dan komponen dari enzim yang mengatur pertumbuhan tanaman. 4. Tembaga (Cu) Penting dalam proses reproduktif (pemasakan buah) 5. Boron (B) Penting dalam perkembangan buah dan biji, mem- bantu dalam penggunaan unsur hara dan pengaturan unsur hara lain, dan terlibat dalam proses pemben- tukan gula dan karbohirat 6. Molibdenum (Mo) Berperan dalam penggunaan nitrogen oleh tanaman 7. Klor (Cl) Berperan dalam proses metabilisme 2. Unsur Hara Fungsional Suatu jenis unsur yang selama ini tidak atau belum dianggap sebagai unsur hara esensial, tetapi mempunyai peran fisiologis penting pada banyak jenis tanaman, adalah unsur silikat (Si). Banyak peneliti menunjukan bukti tentang peran penting unsur Si pa- da tanaman, terutama pada jenis tanaman rerumput- an (gramineae). Selain di bidang pertanian, fungsi sangat penting dari Si dalam bidang kesehatan hewan dan manusia juga telah diketahui, yaitu sebagai pe- nguat jaringan tulang dan organ tubuh lainnya (ter- masuk jaringan jantung). Demikian halnya di bidang kosmetik, unsur silikat telah lama menjadi komponen penting pada teknologi penundaan penuaan (anti aging) sel kulit dan memodifikasi bentuk organ tubuh sesuai dengan kehendak pasien. Oleh karena itu, penggunaan pupuk Si yang telah terbukti meningkat- kan kualitas (kandungan Si) bahan pangan, tentu akan berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kesehatan manusia sebagai konsumen produk perta- nian. Berkaitan dengan bidang pertanian, aplikasi Si terbukti dapat (1) menstimulir pertumbuhan dan me- ningkatkan hasil dari beberapa jenis tanaman (Epstein, 1999), misalnya ryegrass (Priyono, 2005a) dan padi (Priyono et al., 2007), (2) mengurangi efek keracunan Mn pada beberapa spesies tanaman (Marschner, 1986) dan inhibisi Al pada perakaran jagung (Ma et al., 1996; Corrales et al., 1996), dan (3) meningkatkan daya tahan tanaman terhadap serang- an hama dan penyakit tanaman (Volk et al., 1958; Priyono et al., 2020) serta terhadap cekaman keke- ringan (Ma & Takahashi, 2002). Peneliti lain, Coventry et al. (2001) mengaitkan pengaruh positif dari penggu- naan bubuk batuan silikat basaltik terhadap penu- runan tingkat keracunan tanaman oleh Al pada tanah lateritik. Hal itu tampaknya berkaitan dengan peran bubuk batuan sebagai bahan pengapuran (liming material) dan sumber unsur Ca dan Mg untuk tanah lateritik (masam) daripada sebagai sumber unsur Si yang dapat meredam toksisitas Al. Artyszak et al. (2018) menelaah detail tentang pengaruh aplikasi Si meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil tanaman dari hasil penelitian di Eropa. Berbagai informasi yang berkaitan dengan keun- tungan dari aplikasi pupuk berkadar Si tinggi terha- dap pertumbuhan serta kuantitas dan kualitas hasil tanaman banyak diulas online dalam 'Beneficial Nutrient News'. Ma dan Takahachi (2002) merangkum berbagai hasil penelitian di Jepang tentang sifat dan peran unsur Si pada tanaman padi. Saat ini pupuk berbasis silikat mulai banyak diproduksi oleh industri pupuk dan digunakan oleh petani, terutama pada usaha tani tanaman padi dan tebu. Kontribusi Si yang berasal dari pupuk batuan silikat terhadap pertum- buhan dan hasil tanaman, merupakan salah satu ke- untungan dari penggunaan pupuk dari bahan geologi (mineral dan batuan) tersebut. B. Permasalahan Unsur Hara Masalah teknis usaha tani yang dihadapi oleh para petani antara lain berkaitan dengan status unsur hara esensial pada tanah di lahan usahanya. Perma- salahan itu meliputi kekurangan (kahat), kelebihan (toksik), atau ketidak imbangan unsur hara tersedia bagi tanaman. Masalah pertanian muncul karena se- bagian tanah pertanian yang ada tidak dapat ber- fungsi optimal sebagai pemasok utama unsur hara tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut. Untuk dapat mengatasi masalah itu secara tepat, maka penyebab utama yang memicu kondisi keharaan yang tidak optimal bagi pertumbuhan dan hasil tanaman tersebut harus diidentifikasi. Seperti telah dijelaskan pada sub bab 2.1, keku- rangan (kekahatan) atau kelebihan (keracunan) oleh satu atau beberapa unsur hara esensial yang tercan- tum dalam Tabel 1 akan menyebabkan pertumbuhan atau/dan hasil tanaman itu kurang optimal. Kuantitas yang 'cukup' dan proporsi yang 'berimbang' tersebut bersifat spesifik, tergantung pada jenis unsur hara dan tanaman. Nilai proporsi unsur hara esensial (pada Tabel 1) menunjukan kebutuhan unsur hara relatif dari masing-masing jenis unsur hara esensial. Proporsi unsur hara yang tercantum pada Tabel 1 adalah nilai rerata untuk berbagai jenis tanaman. Meskipun agak kasar, setidaknya nilai tersebut dapat memberi gambaran umum tentang perlunya diperhati- kan proporsi unsur hara dalam tanah yang tersedia bagi tanaman. Konsep 'pemupukan berimbang' harus memperhatikan imbangan antar semua unsur hara esensial, bukan hanya status unsur hara N, P, dan K. Ketersediaan unsur hara esensial tersebut juga harus dalam proporsi yang berimbang. Unsur hara yang ketersediaannya paling tidak optimal (kekurang- an ataupun kelebihan) akan menjadi faktor penentu kondisi pertumbuhan dan produksi tanaman tersebut. Permasalahan usaha tani yang berkaitan dengan ke- kurangan unsur hara dapat diatasi dengan pemupuk- an, sedangkan masalah keracunan unsur hara umumnya karena kelebihan unsur hara mikro atau logam berat dan dapat diatasi dengan aplikasi bahan amelioran. Masalah kondisi tanah tersebut dapat disebab- kan oleh (1) sifat bawaan (inherent properties) dari ta- nah itu sendiri yang miskin hara, atau hanya mengan- dung beberapa jenis unsur hara tertentu, (2) akibat pengelolaan lahan yang kurang tepat sehingga terjadi- nya degradasi unsur hara pada tanah tersebut, atau (3) akibat dari kedua masalah tersebut. Khusus keter- sediaan untuk unsur hara makro (N, P, dan K) di berbagai jenis tanah umumnya lebih rendah diban- ding kebutuhan tanaman sehingga tanaman harus di- pasok unsur hara tersebut melalui pemupukan. Contoh sifat tanah bawaan umumnya berkaitan dengan jenis dan sifat bahan induknya, yaitu tanah yang terbentuk dari bahan batuan felsik (kadar sili- katnya > 60 % SiO2). Tanah tersebut umumnya miskin hara esensial, baik unsur hara makro maupun mikro, tetapi cukup kaya unsur K. Sebaliknya, tanah yang terbentuk dari batuan mafik (kadar silikat total < 50 % SiO2) umumnya kaya kation basa (unsur hara makro maupun mikro). Perbedaan sifat tanah bawaan terse- but menunjukan bahwa masalah kesuburan yang mungkin muncul pada kedua jenis tanah itu. Masalah itu menentukan kuantitas dan kualitas pupuk atau amelioran yang diperlukan untuk dapat meningkatkan produktivitas masing-masing tanah itu. Selain karena sifat bawaan seperti dicontohkan di atas, munculnya masalah kesuburan tanah pertanian dapat disebabkan oleh terjadinya penurun- an kuantitas dan kualitas unsur hara di daerah perakaran (rizosfir) karena (1) hilangnya unsur hara oleh erosi yang berlebihan, volatilisasi (penguapan), pelindihan atau (2) defisit unsur hara karena terjadi pengurasan unsur hara sebagai karena intensitas tanam yang tinggi dan terus-menerus tanpa diimbangi dengan pasokan unsur hara ke dalam larutan tanah yang memadai. Jika faktor lain (misalnya iklim dan ketersediaan air) berada pada kondisi optimal, maka pertumbuhan dan hasil tanaman yang optimal akan terjadi secara berkelanjutan apabila terdapat kese- imbangan antara pasokan unsur hara ke dalam dan yang keluar dari zona perakaran (diserap oleh tanaman). Upaya praktis untuk mempertahankan keseimbangan hara itu adalah dengan mengembalikan unsur hara yang terangkut ke luar sistem melalui panen ke petak tanam. Dalam praktek usaha tani yang diterapkan saat ini, penggunaan varietas tanaman yang rakus unsur hara dan intensitas tanam yang tinggi (2 - 4 kali tanam per tahun) menyebabkan laju penyerapan un- sur hara oleh tanaman (out flow) melebihi laju masuk- an (in flow) unsur hara tersebut ke larutan tanah, karena pelarutan unsur hara dari bahan induk ke larutan tanah relatif lambat. Upaya praktis yang dila- kukan oleh petani untuk menyeimbangkan unsur hara tersebut (laju in flow > out flow) adalah melakukan pemupukan. Tetapi yang mereka aplikasi- kan umumnya hanya pupuk berhara makro (N, P atau/dan K) dengan dosis relatif tinggi, tanpa pem- berian unsur hara mikro. Praktek usaha tani seperti itu yang harus dibenahi. Satu hal penting yang sering diabaikan adalah yang berkaitan dengan penggunaan pupuk N, P atau/ dan K secara rutin, berdosis relatif tinggi, tetapi tidak diimbangi dengan pasokan unsur hara mikro. Tindak- an itu dapat menyebabkan terjadinya percepatan pengurasan unsur hara mikro dari tanah, sedangkan laju pelepasan unsur hara mikro dari sumber utama (batuan dan senyawa kompleks) umumnya sangat lambat (lebih lambat daripada pelarutan usur hara makro). Banyak fakta lapang menunjukan bahwa penggunaan pupuk N, P, atau/dan K secara terus- menerus seperti itu telah menyebabkan munculnya banyak masalah degradasi tanah pertainan di banyak daerah sentra produksi tanaman pangan, diindikasi- kan dengan terjadinya kekahatan unsur hara mikro. Lebih jauh, praktek usaha tani seperti itu telah me- nyebabkan terjadinya penurunan efisiensi aplikasi pu- puk N, P/dan K dan produktivitas lahan, serta kuali- tas produksi. Penggunaan pupuk yang mengandung unsur hara makro (N, P, K) secara terus- menerus seharusnya juga diimbangi dengan pemberian unsur hara mikro. Mengacu pada anjuran tersebut, penggu- naan pupuk majemuk (mengandung unsur hara ma- kro dan mikro, atau/dan Si) diperkirakan akan men- jadi model pertanian ke depan. Bahan baku pupuk yang memenuhi kriteria tersebut dan ketersediaannya melimpah di berbagai tempat adalah bahan geologis (batuan volkanik). Uraian di atas menunjukan tentang peran pen- ting pengembangan agrogeologi untuk dapat berkon- tribusi signifikan tehadap upaya mengatasi masalah yang berkaitan dengan unsur hara bagi tanaman atau produktivitas laha pertanian. Bahan geologis tersedia melimpah di permukaan bumi, mengandung multi nu- trisi, dan merupakan bahan alami sehingga terjamin ramah lingkungan dan berkelanjutan. BAB III BAHAN GEOLOGIS-MINERAL DAN BATUAN A. Sumber Bahan Geologis Bahan geologis yang dibahas dalam buku ini adalah mineral dan batuan yang berada pada lapisan terluar kerak bumi. Untuk tujuan ilustrasi tentang batuan penyusun bumi disajikan skema struktur kerak bumi pada Gambar 3. Kulit terluar bumi (crust) +35 km Kulit dalam bumi (mantle) + 2.900 km Inti bumi bagian luar (outer core) Inti bumi bagian dalam (inner core) Gambar 1. SGkaemmbaatirk 3st.ruSkkteumrkaersatkrubkutmuir kerak bumi Seperti tampak pada Gambar 3, kerak bumi terdiri atas beberapa lapisan, yaitu lapisan kulit bumi terluar (crust), kulit bumi bagian dalam (manttle), inti bumi bagian luar (outer core), dan inti bumi bagian dalam (inner core). Lapisan crust ketebalannya ± 35 km, berupa daratan (continental crust) dan dasar lautan (oceanic crust) dengan berat jenis (BJ) umum- nya < 3,5. Lapisan kulit bumi bagian dalam (mantle) mencakup sekitar 83 % volume bumi (radius 2.900 km), mempunyai BJ 3,3 - 5,7 dan terdiri atas dua lapisan utama. Manttle bagian teratas (dasar dari crust) ketebalannya sekitar 670 km, sering disebut pula sebagai lapisan SiAl (Si dan Al) karena didomi- nasi oleh unsur Si dan Al; sedangkan di bagian ba- wahnya merupakan lapisan SiMa (didominasi oleh Si dan Mg) yang panas dan plastis. Inti bumi (radiusnya ± 3.500 km) terdiri atas bagian luar (outer core) banyak mengandung unsur besi (Fe) dan bagian dalam (inner core) terutama terdiri dari unsur nikel (Ni). Bobot jenis material penyusun kerak bumi makin ke dalam makin tinggi, berkorelasi dengan bobot atom dari logam yang mendominasi pada setiap lapisan. Mineral dan batuan yang ada di bagian kulit bumi terluar (crust) kemungkinan dapat dimanfaatkan sebagai input usaha tani (pupuk atau amelioran). Material pada lapisan terluar tersebut sebagian besar terdiri atas mineral dan batuan silikat; komposisi kimia utamanya ditunjukkan di Tabel 3. Berkaitan dengan pemanfaatannya untuk pupuk dan amelioran, aspek penting dari mineral dan batuan adalah ketersediaannya yang melimpah dan mengan- dung hampir semua unsur hara esensial bagi tanaman (kecuali N). Tabel 3. Unsur kimia yang umumnya ditemukan pada mineral dan batuan di kerak bumi* No Unsur Kimia Simbul Persentase (% w/w) 1. Oksigen O 46,60 2. Silika Si 27,72 3. Aluminium Al 8,13 4. Besi Fe 5,00 5. Kalsium Ca 3,63 6. Natrium Na 2,83 7. Kalsium K 2,59 8. Magnesium Mg 2,09 *https://www.kean.edu/~csmart/Observing/03. Rocks and minerals.pdf) Layak - tidaknya bahan geologis tersebut untuk dimanfaatkan sebagai bahan pupuk atau amelioran sangat ditentukan oleh sifat fisik dan kimia batuan. Kedua sifat itu menentukan kualitas pupuk atau amelioran yang dihasilkan serta pemilihan teknik pengolahannya

(processing) yang harus diterapkan untuk menghasilkan input usaha tani tersebut. B. Pengertian Mineral dan Batuan Menurut Klein & Philpotts (2013), mineral didefi- nisikan sebagai suatu bahan padatan anorganik yang homogen, memiliki komposisi kimia serta cara penyusunan unit dasar (struktur) yang teratur dan unik; sedangkan batuan adalah benda padat anorga- nik yang tersusun dari beberapa jenis mineral. Meng- acu pada definisi tersebut, pada setiap jenis mineral terdapat dua aspek penting, yaitu struktur dasar dan komposisi kimiawinya yang unik. Karena batuan terdiri atas beberapa jenis mineral, maka sifat fisiko- kimia batuan itu ditentukan oleh gabungan dari sifat mineral penyusunnya. 1. Jenis dan Sifat Mineral Lebih dari 2.000 jenis mineral yang telah ter- identifikasi saat ini, dan mineral tersebut dapat dipi- lah menjadi dua kelompok, yaitu mineral silikat dan mineral non-silikat. Masing-masing kelompok tersebut dapat dipilah lebih rinci menjadi beberapa sub klas berdasarkan kemirifan komposisi kimia dan penataan unit (struktur) dasarnya, sebagai berikut: a. Mineral Silikat Mineral silikat tersusun dari rangkaian silikat - oksigen (Si – O) yang membentuk struktur dasar 'tetrahedral' (Gambar 4). Struktur dasar tetrahedral Si terdisi atas satu ion Si+4 dikelilingi oleh 4 ion O-2. Suatu unit dasar tetrahedral dapat berikatan dengan unit dasar tetrahedral yang lain melalui pemanfaatan bersama atom oksigen di sudut struktur itu memben- tuk rangkaian tetrahedral silikat dan dihasilkan pa- datan mineral silikat. Kharakteristik suatu jenis mine- ral silikat sangat ditentukan oleh cara penyusunan struktur dasar tersebut membentuk suatu struktur padatan mineral itu. Oksigen Silikon GambarG2a.mSbtraurk4tu.rSdtrauskatrumridnaesraalr stielitkraath,etedtrraalhseidlikraaltsilikat. Rumus kimia umum untuk mineral silikat adalah XmYn(ZpPq)Wr: X: kation yang mempunyai radius ionik lebih besar dan valensi lebih kecil daripada Si+4, membentuk 6, 8, dan 12 koordinasi dengan O. Y: kation dengan radius ionik sedang dan valensi 2 atau 3, membentuk 6 koordinasi dengan O. Z: kation dengan radius ionik kecil dan valensi besar (3 atau 4) membentuk 4 koordinasi dengan O. W: ion asesoris bervalensi 1, umumnya OH-, F-, Cl-, atau yang ekuivalen. Indeks p, q, m, n, dan r adalah angka yang menunjukan jumlah ekuivalen ion untuk memenuhi keseimbangan muatan (electronic neutrality). Sub klas mineral silikat dibedakan atas dasar nisbah p : q (Si : O), atau cara penyusunan unit dasar tetrahedral SiO4 pada kristal mineral tersebut. Terda- pat enam sub klas mineral silikat, yaitu nesosilikat, sorosilikat, siklosilikat, inosilikat rangkaian tunggal dan ganda pilosilikat, dan tektosilikat. Struktur dasar dan contoh mineral dari masing-masing sub kelompok mineral silikat (kecuali Pilosilikat) disajikan pada Tabel 4, dan kharakteristik dari setiap sub kelompok mineral silikat dijelaskan sbb: 1) Nesosilikat Sub kelompok mineral nesosilikat terdiri atas rangkaian tetrahedral SiO4 tunggal dengan nisbah p : q = 1 : 4, yaitu (SiO4)-4, atau 3 : 12, yaitu (Si3O12)-12. Empat atom oksigen pada masing-masing unit tetra- hedral itu bebas, sehingga dapat berikatan dengan kation atau polihedral (rangkaian beberapa tetrahe- dral); dan unit tetrahedral lainnya dapat berikatan dengan polihedral tersebut. Karena struktur dasarnya tersusun dari beberapa unit tetrahedral bebas, maka umumnya kristal pada nesosilikat mempunyai dimen- si dan bentuk yang sama, berkembang ke semua arah sehingga tidak mempunyai atau memperlihatkan sifat belahan (cleavage) yang unik. Karena cara penyusun- an struktur dasar seperti itu, jenis mineral nesosilikat sangat kokoh/keras, tidak mudah terlapuk. Stabilitas relatif antar jenis mineral dalam sub klas nesosilikat sangat ditentukan oleh jumlah dan jenis kation (unsur logam) yang terikat pada mineral tersebut. 2) Sorosilikat Mineral pada sub klas sorosilikat tersusun dari unit dasar gabungan dari dua unit tetrahedral yang terhubung melalui penggunaan satu atom oksigen se- cara bersamaan dengan nisbah p : q = 2 : 7 [(Si2O7)-6]. Pada setiap unit dasar sorosilikat terdapat enam atom oksigen yang bebas untuk berikatan dengan kation atau polihedral. Unit sorosilikat itu dapat berikatan dengan polihedral lainnya. Contoh di mineral sub klas sorosilikat, Epidot [Ca2(Al,Fe)Al2O(SiO4)(Si2O7)(OH)] terdiri atas rantai tetrahedral aluminium oksida yang diikat bersama oleh tetrahedral silikat tunggal (SiO4) dan tetrahedral silikat ganda (Si2O7). Tabel 4. Sub klas, struktur dasar, dan contok mineral silikat* Sub Klas & Struktur Contoh Mineral Rumus Kimia Ideal Dasar Nesosilikat Olivin (Mg,Fe)2SiO4 Zirkon ZrSiO4 Topas Al2SiO4(F,OH)2 Garnet X3Y2(SiO4)3; X =Ca,Mg,Fe+2,Mn+2, Y = Al,Fe+3,Cr+3 Sorosilikat Epidot Ca2(Al,Fe)Al2O(SiO4)(Si2O7)(OH) Hemimorphite Zn4Si2O7(OH).H2O Siklosilikat Beril Be3Al2(Si6O18) Turmalin (Ca,Na)(Li,Mg,Al)(Al,Fe,Mn)6 (BO3)3(Si6O18)(OH)4 Inosilikat Tunggal Piroksin: Augit Hipersten Diopsit Piroksinoid: Wollastinit Rodonit (Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)2O6 (Mg,Fe)SiO3 CaMgSi2O6 CaSiO3 MnSiO3 Inosilikat Ganda Hornblend (Ca,Na)2-3(Mg,Fe,Al)5Si6(Si,Al)2O22 (OH)2 Tremolit Ca2Mg5Si8O22(OH)2 Aktinolit Ca2(Mg,Fe)5Si8O22(OH)2 Tektosilikat Kwarsa Mikroklin Ortoklas Sanidin Albit Anortit Nepelin Kalsilit Leusit Analsin Khabasit Mesolit SiO2 KAlSi3O8 KAlSi3O8 (K, Na)AlSi3O8 Na AlSi3O8 CaAl2Si2O8 (Na,K)AlSi4O4 KAlSi2O6 KAlSi2O6 NaAlSi2O6-H2O CaAl2Si4O12 - 6H2O Na2Ca2Al6Si9O30 - 8H2O * disarikan dari https://en.wikipedia.org/wiki/Silicate_mineral 3) Siklosilikat Struktur dasar sub kelompok mineral siklosilikat terbentuk dari rangkaian tertutup (cincin), terdiri atas enam unit tetrahedral silikat yang saling berikatan dengan ikatan oksigen. Nisbah p : q = 1 : 3 [(Si2O6)-4] atau 6 : 18 [(Si6O18)-12]. Dua belas atom oksigen pada setiap unit dasar siklosilikat bebas untuk berikatan dengan polihedral, sehingga unit dasar cincin itu da- pat mengikat atom atau polihedral silikat lainnya. Ion lain dapat terjebak di dalam struktur cincin dan di dalam ruang antar struktur cincin tersebut. 4) Inosilikat Mineral pada sub klas inosilikat terdiri atas rang- kaian tetrahedral silikat yang memanjang melalui penggunaan bersama dua atom oksigen oleh dua unit tetrahedral silikat yang berdekatan. Inosilikat dibagi dua, yaitu inosilikat rangkaian tunggal (SiO3)-2 dan ganda (Si4O11)-6. Mineral dalam sub klas ini banyak terdapat pada batuan basalt. Unit struktur dasar inosilikat rangkaian tunggal, lembaran struktur dasar polihedral silikat berikatan dengan lembaran polihedral lainnya, sehingga menghasilkan sifat belahan (cleavage) dua arah 90o (saling tegak lurus). Pada inosilikat rangkaian ganda, antar unit struktur dasar dipisahkan oleh rangkaian polihedral, menghasilkan sifat belahan (cleavage) dua arah 120o dan 60o. 5) Pilosilikat Kelompok pilosilikat terdiri atas lembaran dari rangkaian unit dasar tetrahedral. Setiap unit meman- faatkan tiga O-2 secara bersamaan. Nisbah p : q = 2 : 5 atau 4 :10 menghasilkan unit dasar (Si2O5)-2 atau (AlSi3O10)-5. Pada unit dasar tesebut terjadi substitusi isomorfik, yaitu suatu atom dalam rangkaian struktur kristal mineral digantikan kedudukannya oleh atom lain yang diameternya hampir sama sehingga peng- gantian kedudukan atom itu tidak merubah dimensi unit dasar dan struktur mineral tersebut. Pada kelom- pok pilosilikat, atom Al+3 menggantikan posisi sebagi- an atom Si+4. Beberapa unit lembaran pilosilikat dipi- sahkan oleh unit polihedral sehingga menghasilkan sifat belahan (cleavage) berbentuk lembaran yang ber- kembang ke satu arah. Unsur logam (kation) lain da- pat tersemat di ruang antar lembaran atau unit tetra- hedral tersebut. Pilosilikat yang banyak dijumpai pada tanah mi- neral adalah mineral liat (clay). Keberadaan mineral liat sebagai bagian dari partikel primer tanah mineral sangat penting. Keunikan dari mineral liat itu ber- kaitan dengan ukurannya yang sangat kecil (< 2 µm) sehingga permukaan efektifnya sangat luas. Setiap jenis mineral liat mempunyai muatan elektrik (negatif) yang unik. Kandungan mineral liat pada suatu jenis tanah sangat menentukan sifat fisik dan kimia tanah tersebut. 6) Tektosilikat Sub klas mineral tektosilikat berupa rangkaian tetrahedral tiga dimensi, setiap unit struktur tekto- silikat menggunakan 4 atom oksigen secara bersa- maan. Pada struktur tektosilikat banyak terjadi sub- stitusi isomorfik, yaitu Al+3 menggantikan posisi Si+4 pada struktur tetrahedral, sehingga terjadi kekurang- an muatan positif atau kelebihan muatan negatif pada unit dasar tersebut, memungkinkan terbentuknya ikatan antara polihedral dengan oksigen di dalam struktur tetrahedral. Nisbah p : q unit dasar tektosilikat beragam, yai- tu 1:2, 2:4, 4:8, dan 6:12, atau (SiO2), (AlSiO4)-1, (Al2Si2O8)-2, dan (Al2Si4O12)-2. Pada unit dasar SiO2 tidak terjadi substitusi isomorfik sehingga mutatannya nol, sedangkan pada unit dasar berikutnya dari kiri ke kanan pada deret unit dasar itu terjadi substitusi Si+4 oleh Al+3 yang makin intensif sehingga muatannya makin negatif. b. Mineral Silikat Khusus Beberapa mineral silikat, terutama mineral liat (clay) dan zeolit, perlu dibahas secara khusus dan lebih detail karena sifat, peran dan kegunaan praktis- nya yang dalam bidang pertanian serta bidang industri. Mineral liat adalah mineral silikat sekunder yang merupakan partikel primer tanah mineral yang sangat reaktif sehingga sangat menentukan sifat fisik dan kimia tanah; sedangkan zeolit adalah mineral sili- kat primer, daya jerapnya sangat tinggi, dan telah banyak dimanfaatkan dalam bidang industri maupun pertanian. 1) Mineral Liat Dalam bidang ilmu tanah, mineral liat secara fisik didefinisikan sebagai partikel mineral yang ber- ukuran < 2 µm. Berdasarkan struktur kristalnya, mineral liat tersusun dari dua struktur dasar, yaitu struktur tetrahedral (T) dan oktahedral (O). Struktur dasar tetrahedral yang ideal terdiri atas satu ion silikat (Si+4) yang dikelilingi oleh empat atom oksigen (4O-2) membentuk struktur tiga dimensi empat bidang (tetra) seperti ditunjukkan pada Gambar 4; sedangkan struktur dasar oktahedral (Gambar 5) terdiri atas satu ion aluminium (Al+3) dikelilingi oleh enam atom oksigen (6O-2). O-2 Al+3 Gambar 5. Struktur dasar oktahedral aluminium Struktur dasar tetrahedral dan oktahedral yang ideal tidak bermuatan (netral). Namun dalam proses alami pembentukannya, posisi Si+4 (diameter ioniknya 0,039 nm) pada struktur tetrahedral dapat tergantikan oleh Al+3 (diameter ioniknya 0,051 nm); sedangkan ion Al+3 pada struktur oktahedral dapat tergantikan oleh ion Ca+2 atau Mg+2 (diameter ioniknya berturut-turut adalah 0,099 dan 0,066 nm). Proses itu disebut sub- stitusi isomorfik, yaitu penggantian ration pada struk- tur dasar mineral silikat tanpa merubah morfologi fisik dari struktur dasar itu. Substitusi isomorfik tersebut menyebabkan terjadinya ketidakimbangan muatan, yaitu kelebihan muatan negatif. Artinya, karena sub- stitusi isomorfik, maka struktur tetrahedral maupun oktahedral yang kondisi idealnya tidak bermuatan (ne- tral) menjadi bermuatan negatif; dan muatan itu bersifat tetap (tidak tergantung pH di sekitarnya). Ukurannya mineral liat sangat halus, dan adanya muatan tetap tersebut menyebabkan reaktivitasnya tinggi. Partikel yang memiliki reaktivitas tinggi umum- nya kegunaannya sangat luas. Mineral liat dibagi menjadi beberapa tipe berda- sarkan susunan struktur dasar tetrahedral (T) dan oktahedral (O) pada kisi-kisinya serta jenis ion/senya- wa penghubung antar kisi tersebut. Nama, tipe, struk- tur, dan kharakteristik utama masing-masing jenis mineral liat dijelaskan secara ringkas pada Tabel 5. Tabel 5. Ringkasan kharakteristik utama mineral liat * No Nama, Tipe, dan Struktur Mineral 1. Kaolinit dan Halloisit (1:1) O-2/H2O T = tetrahedral O = oktahedral Kharakteristik ? Kisi mineral tetrahedral – oktahedrat (T – O); antar 2 kisi dihubungkan O+2 (Kaolinit, Al2Si2O5 (OH)4) atau H2O (Halloisit, Al2Si2O5(OH)4. 2H2O) yang digunakan bersama oleh dua kisi. ? Substitusi isomorfik pada tetrahedral, KTK liat 1 – 10 cmolc kg-. ? Ukuran mineral 0,2 - 2,0 ?m, luas permukaan efektif 10. 103 - 20.103 m2. kg-. ? Sifat koloidal, adhesi - kohesi, plastisitas, dan mengembang – mengkerut rendah. ? Dominan pada tanah yang sudah berkembang lanjut (Ultisol, Oksisol). 2. Montmorilonit (2:1) ? Kisi mineral T – O – T (2:1); antar dua kisi dihubungkan oleh Ca+2 (musim kering) atau H2O – Ca – H2O (musim basah), sehingga mengembang-mengkerut intensif. ? Substitusi isomorfik terjadi di kisi tetrahedral (Si+4 di tetrahedral diganti Al+3) maupun pada Ca+2, H2O oktahedral (Al+3 diganti Mg+2); ? Rumus umum Mx(Al2-xMgx)Si4O10(OH)2, Mx = kation dapat tertukarkan (Ca+2, Mg+2, K+, Na+). ? Ukuran mineral kecil (0,01 - 1 µm), luas permukaan efektif 600.103 - 800. 103 m2.kg-. ? KTK liat 80 - 120 cmolc.kg-. ? Sifat koloidal dan mengembang - mengkerut sangat tinggi. ? Dominan pada tanah Vertisol. 3. Vermikulit (2:1) ? Struktur montmorilonit, antar dua kisi dihubung- kan dengan Mg(H2O)6+2 yang dapat tertukar- kan; mengembang-mengkerut < montmorilonit. ? Substitusi isomorfik pada tetrahedral dan octahedral > montmorilonit, sehingga KTK-nya Mg(H2O)6+2 120 - 150 cmolc.kg-; rumus kimia [Mg(H2O)6]2/n [(Mg,Fe2+)3 (Si4-n,Aln)O10 (OH)2]. ? Ukuran mineral dan luas permukaan efektif minf dengan montmorilonit: 0,01 - 1 µm, 600.103 s/d 800. 103 m2.kg-. ? Sifat koloidal, adhesi - kohesi, plastisitas, dan mengembang - mengkerut agak tinggi. ? Dominan pada tanah tanah belum berkembang lanjut, beragam jenis tanah. Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 61 TTaabbeell35(L(aLnajuntjaunt)an) No Nama, Tipe, dan Struktur Mineral 4. Mika (2:1), tidak mengembang/dan mengkerut K+ K+ K+ K+ K+ 5. Klorit (2:1:1), tidak mengembang/mengkerut AlMg2(HO)6+2 Kharakteristik ? Struktur kisi mineral seperti montmorilonit, namun antar dua kisi dihubungkan dengan K+2, mengikat kuat kedua kisi. ? Substitusi isomorfik pada tetrahedral, seperempat bagian Si4+ digantikan oleh Al3+; rumus kimia setengah sel mika: KAl2(AlSi3)O10(OH)2. ? Perbedaan komposisi kimia dapat terjadi selama proses pembentukan mineral, misalnya, ion Fe2+ dan Fe3+ dapat menggantikan posisi Mg2+ atau Al3+ dalam unit struktur dasar oktahedral; Na+ dan Ca2+ menggantikan sebagian K+ dalam ruang antar kisi 2:1 sehingga terdapat beberapa jenis mineral mika, antara lain muskovit [K(Si3Al)Al2O10(OH)2], margarit [Ca(Si2Al2)Al2O10 (OH)2], dan biotit [K(Si3Al)(Mg,Fe2+)3O10(OH)2]. ? KTK mika hanya 20 - 40 cmolc. kg- dan luas permu-kaan efektifnya 70.103 - 120.103 m2 kg- ? Terdapat di hampir semua jenis tanah mineral. ? Dua kisi 2:1 bermuatan negatif yang mengapit brusit ([AlMg2(OH)6]2+), disebut tipe 2:1:1. ? Rumus kimia [(AlMg2(OH)6)x(Mg3(Si4-xAlx)O10 (OH)2)]. ? Posisi Si4+ pada tetrahedral ditempati oleh Mg2+, sedangkan sebagian Al4+ pada struktur dasar oktahedral ditempati oleh Si+3. ? KTK 10 - 40 cmolc kg- . ? Luas permukaan efektif klorit berkisar antara 70.103 sampai 150.103 m2 kg-. * Disarikan dari Bohn et al. (1985). Mineral liat tipe 1:1. Pada struktur mineral liat tipe 1:1, setiap kisinya terdiri atas satu unit tetrahedral (T) dan satu unit oktahedral (O) yang dihubungkan oleh oksigen, digu- nakan secara bersamaan (T-O-2 - O); sedangkan antar dua kisi dihubungkan oleh O-2 (pada Kaolinit) atau H2O (pada Haloisit). Ikatan antar kisi mineral tipe 1:1 sangat rapat sehingga jarak antar kisinya pendek (7.0 Å pada Kaolinit, 8 – 10 Å pada Haloisit). Ikatan antar kisi yang kuat dan rapat tersebut menyebabkan sifat mengembang - mengkerut pada mineral liat tipe 1:1 sangat terbatas. Struktur mineral liat 1:1 akan hancur jika dipanaskan > 500o C. Sifat tersebut digunakan untuk membedakan kaolinit dengan mika dalam identifikasi mineral liat menggunakan difraksi sinar X. Pada kondisi normal (tidak dipanaskan), kaolinit/haloisit dengan mika mempunyai d-spacing hampir sama (sekitar 7 Å). Jika keduanya dibakar 500o C, dan masih muncul peak difraksi sinar X pada d-spacing sekitar 7 Å, berarti pada sampel itu terdapat mineral mika (atau dan kao- linit/haloisit); tetapi, jika tidak muncul peak lagi pada d-spacing ~7 Å, pada sampel itu hanya ada mineral kaolinit atau/dan haloisit saja (Gambar 6).
GamGbaamrb4a.rC6on.tCohonptoolah dpiforlaaksdiisfrinaakrsXis(iXnRaDr xpa(XtteRrDnsp)amtitneernrasl)liat tipe 1:1.
Padmaingearmablalira(tAt)pteerd1a:1pa.tPmadinaergaalmvebramtik(Aul)ittdeardnakpaootlinmitinseerdaalngkan pada
gamvbearrm(Bik)vuelrimtdikaunlit,kaolinit,dsaendmanikgakdaanlapmadsuaagtuamsabmapre(IBy)ang dianalisis t(ePrrdiyaopnaot, 1v9e9rm1).ikulit, kaolinit, dan mika dalam suatu sampel yang dianalisis (Priyono, 1991). Mineral liat tipe 2:1. Ciri sturktur mineral liat tipe 2:1, pada setiap kisinya terdiri dari T – O – T. Jika dua kisi T – O – T itu dihubungkan oleh Ca+2 atau/dan H2O (mineral Mont- morilonit), Mg(H2O)6+2 (mineral Vermikulit), atau K+ (mineral Mika). Perbedaan kation atau senyawa yang menghubungkan dua kisi dari struktur mineral tipe 2:1 tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan nilai d-spacing pada masing-masing jenis mineral tipe 2:1 (Gambar 7 dan Tabel 6). Gambar 5. Contoh pola difraksi sinar X (XRD patterns) mineral liat tipe
2:1G.Paamdabgaarm7b.aCrokinrithoahnypaotlearddaipfaratmksiniesrainlMaronXtm(XorRiloDnitp,asettdearnngsk)an padmaingaemrablarliaktantiapne
t2e:r1da.pPaatdmaingearmalbmaornktmiroirhiloannityadatnervdearpmaiktulit (Pmriyionneor,a1I99m1)o.ntmorillonit, sedangkan pada gambar kanan terdapat mineral montmorillonit dan vermikulit (Priyono, 1991). Tabel 6. Nilai d-spacing mineral liat tipe 2:1 (Priyono, 1991) No Nama Mineral Penghubung Perlakuan & d-spacing (Å) antar Kisi Mg Mg - gliserol Mg-500o C 1. Montmorilonit Ca+2/dan H2O 14 - 15 2. Vermikulit Mg(H2O)6+2 14 - 15 3. Mika K+ 7 18 14 - 15 9 - 10 9 - 10 9 - 10 7 Mineral liat tipe 2:1:1. Struktur mineral 2:1:1 sebenarnya mirif dengan struktur pada tipe 2:1, hanya saja dua strukkur T – O – T pada tipe 2:1:1 dihubungkan secara kuat (tak tertukarkan) oleh senyawa brusit [AlMg2(OH)6]2+. Con- toh mineral 2:1:1 adalah Klorit. Jarak antar kisi (d- spacing) Klorit sekitar 12 – 13 Å dan tidak berubah jika dijenuhi dengan Mg maupun gliserol. Seperti hal- nya mineral Mika, Klorit secara fisik termasuk mineral yang relatif stabil. 2) Mineral Zeolit Zeolit adalah salah satu jenis mineral silikat dengan struktur dasar tektosilikat, yaitu beberapa struktur dasar tetrahedral silikat terangkai memben- tuk cincin (Gambar 8). Pengaturan struktur dasar te- trahedral seperti itu menghasilkan banyak ruang (pori- pori) mikro antar struktur cincin tersebut. Gambar 8. Model struktur mineral zeolit, memperlihatkan ruang mikro pada rangkaian unit dasar tetrahedral berben- tuk cincin, dikelilingi oleh atom aluminium, silikat, dan oksigen (https://commons.wikimedia.org/ wiki/Category: Zeolite). Mineral zeolit telah digunakan secara intensif sebagai katalis, bahan pembersih, dan penyaring (fil- ter) dalam bidang industri, kesehatan, dan pertanian. Selain sebagai campuran ditergen dan bahan pember- sih air minum, zeolit juga dapat digunakan untuk menjerap gas beracun, logam berat, dan material radioaktif. Dalam bidang pertainan, zeolit dapat digu- nakan sebagai amelioran untuk meningkatkan ke- mampuan tanah memegang air (water holding capa- city) dan kapasitas tukar kation, campuran pada pa- kan ternak, menghilangkan bau fises (kotoran) pada usaha peternakan dan budidaya ikan (aquarium). c. Mineral Non-Silikat Mineral non-silikat (Tabel 7) meliputi sub kelompok halida, karbonat, sulfida dan sulfat, mineral fosfat, dan oksida-hidroksida. Mineral non-silikat mempu- nyai struktur dan komposisi kimia relatif lebih se- derhana dan mudah terlapuk dibanding mineral sili- kat. Ikatan kimia antar ion pada struktur mineral non-silikat umumnya bersifat ionik. Berbeda lagi dengan mineral silikat, kelompok oksida-hidroksida umumnya tidak berstruktur atau strukturnya sangat lemah (amorfus), muatan elektriknya berada di gugus fungsional sehingga mudah berubah oleh perubahan pH larutan di sekitarnya. Pada mineral halida (NaCl), ikatan Na+ dan Cl- membentuk suatu balok (struktur kubus). Struktur mineral lainnya dalam kelompok ini sangat mirif de- ngan struktur halida. Jenis ikatan antara ration (Na+) Tabel 7. Mineral non-silikat yang telah dimanfaatkan atau mempunyai kaitan dengan permasalahan di bidang pertanian (Allen dan Hajek, 1989) Klas Mineral Contoh Mineral Rumus Kimia Ideal Halida Sulfat Sulfida Karbonat Fosfat Oksida - Hidroksida Halit Gipsum Jarosit Pirit Kalsit Dolomit Augellit Barrandit Brushit Crandallit Fluorapatit Hidroxiapatit Millisit Strengit Struvit Taranakit Varisit Vivianit Wavelit Hematit Korundum Anatase Ilminit Brusit Gibsit Geotit NaCl CaSO4.2H2O KFe3(SO4)2(OH)6 FeS2 CaCO3 CaMg(CO3)2 Al2PO4(OH)3 (Al,Fe)PO4.H2O CaHPO4.2H2O CaAl3(PO4)2(OH)5.H2O Ca5(PO4)3F Ca5(PO4)3OH (Ca,Na,K)(OH,O)4(PO4)2.2H2O FePO4.2H2O NH4MgPO4.6H2O H6K3Al5(PO4)8.18H2O AlPO4.2H2O Fe3(PO4)2.8H2O Al3(OH)3(PO4)2.5H2O Fe2O3 Al2O3 TiO2 FeTiO3 Mg(OH)2 Al(OH)3 FeO(OH) dengan anion (Cl-) pada mineral halida adalah ikatan ionik, sehingga kelompok mineral ini sangat mudah larut dalam air dibandingkan dengan kelompok mine- ral silikat. Tetapi, jenis unsur hara esensial bagi tanaman yang dapat dipasok oleh mineral non-silikat sangat terbatas (lihat rumus kimianya di Tabel 7). 1) Mineral Halida Mineral halida atau halit banyak dijumpai pada tanah garaman (saline/saline-sodic soils) yang terben- tuk dan berkembang di daerah dekat pantai, sedang- kan mineral sulfat (gipsum) berkembang di daerah arid). Halit juga dapat terbentuk pada tanah yang posisinya cukup jauh dari pantai yang terpengaruh oleh intrusi air laut. Keberadaan mineral halit (NaCl) pada tanah per- tanian (yaitu tanah garaman) sangat menghambat atau mengganggu pertumbuhan tanaman pada tanah itu. Sebaliknya, mineral gipsum (CaSO4.2H2O) dapat digunakan sebagai bahan pembenah tanah garaman melalui pertukaran Na+ oleh Ca+2 dan Cl- oleh SO4-2, diikuti dengan pencucian Na+ dan Cl- yang telah tertu- kar/terlarut tersebut. 2) Mineral Sulfida Contoh mineral sulfida adalah pirit atau markasit [FeS2]. Mineral ini banyak dijumpai pada tanah sulfat masam (Sulphaquents) di lahan pasang surut atau rawa dan pada tanah yang tercemar limbah bahan galian industri pertambangan logam dan batubara. Pada kondisi oksidatif, mineral sulfida (pirit) sangat labil, mudah teroksidasi, dan dihasilkan asam sulfat yang menyebabkan tanah menjadi sangat masam. Jika lahan dengan tanah sulfat masam (kadar pirit > 2,5 %) tersebut dibuka, dibuatkan saluran drainase, maka tanah tersebut akan menjadi sangat masam karena terjadinya reaksi oksidasi pirit tersebut. Demi- kian halnya dengan limbah bahan galian industri per- tambangan logam yang umumnya banyak mengan- dung senyawa sulfida, jika terkena air hujan dan ter- ekspos ke atmosfir akan menghasilkan larutan limbah tambang yang sangat masam (acid-mine tailling). Dalam proses pelapukan mineral sulfida, teruta- ma melalui oksidasi, dihasilkan antara lain mineral jarosit [KFe3(SO4)2(OH)6] yang berwarna kuning jerami, gipsum (CaSO4), dan asam sulfat (H2SO4). Adanya mineral jarosit tersebut (tampak sebagai becak ber- warna kuning jerami) pada suatu batuan merupakan indikator adanya senyawa sulfida pada batuan itu. Kadar pirit pada suatu tanah sering dijadikan sebagai salah satu indikator masalah atau faktor pem- batas utama dalam pengelolaan lahan pertanian. Demikian halnya dengan pengelolaan limbah (galian) tambang logam dan batubara, umumnya dihadapkan pada masalah pencemaran terhadap lingkungan oleh limbah berupa larutan masam, sebagai hasil oksidasi mineral pirit dan senyawa sulfida lainnya yang ter- dapat pada limbah galian tersebut. Selain potensi masalah yang dapat ditimbulkan oleh keberadaan mineral itu seperti dijelaskan di atas, mineral sulfida juga potensial untuk dimanfaatkan sebagai input usaha tani, yaitu sebagai sumber unsur hara (pupuk) makro (S) dan mikro (Fe, Cu, dan Zn). Secara teoritis, pupuk dari bahan mineral sulfida ter- sebut dapat digunakan pada tanah yang terbentuk dari batuan kapur atau dari batuan silikat felsik yang umumnya miskin unsur S, Fe, Cu, dan Zn. 3) Mineral Karbonat Mineral karbonat yang utama adalah mineral kalsit (CaCO3) dan dolomit [(Ca,Mg)(CO3)2]. Keduanya merupakan hasil proses kristalisasi dari senyawa kal- sium karbonat hasil dari pelapukan batuan berkapur (calcareous). Dalam bidang pertanian, kedua jenis mineral itu banyak digunakan sebagai bahan penga- puran (liming materials) untuk meningkatkan pH ta- nah masam, sekaligus sebagai sumber unsur hara Ca atau/dan Mg bagi tanaman. 4) Mineral Fosfat. Seperti dijelaskan pada Tabel 7, banyak jenis mineral fosfat yang telah teridentifikasi. Mineral fosfat yang banyak digunakan sebagai bahan baku pupuk P adalah kelompok mineral apatit. Terdapat beberapa varian dari mineral apatit, antara lain fluorapatite, hydroxyapatite, dan chlorapatite dengan rumus kimia (Ca5(PO4)3F), (Ca5(PO4)3OH), dan (Ca5(PO4)3Cl). Mineral apatit jarang dijumpai dalam bentuk deposit mineral murni, tetapi lebih sering terdapat pada batuan beku dan malihan. Struktur kristal mineral apatit terbentuk dari rangkaian PO4 – tetrahedral yang berikatan dengan dua Capolihedral: Ca1O9 and Ca2O6X, dimana X adalah anion F, OH, atau Cl. Mineral fosfat adalah jenis bahan geologis yang sangat penting dalam bidang pertanian karena kan- dungan unsur fosfat pada batuan itu yang relatif tinggi. Unsur fosfat (P) merupakan unsur hara esensial yang diserap oleh tanaman dalam kuantitas relatif tinggi daripada unsur lain. Namun di dalam larutan tanah pertainan, kuantitas unsur P yang tersedia bagi tanaman (terlarut) umumnya lebih rendah daripada yang dibutuhkan oleh tanaman pangan untuk tum- buh dan berproduksi optimum. Oleh karena itu, pu- puk P hampir selalu diaplikasikan oleh petani pada setiap musim tanam. Pada industri pembuatan pupuk super fosfat (SP), unsur fosfat umumnya diekstrak dari batuan fos- fat dengan asam keras (H2SO4 atau/dan H3PO4). Mineral atau batuan fosfat yang telah dihaluskan juga sering digunakan secara langsung sebagai pupuk P, terutama untuk diaplikasikan pada tanaman perke- bunan. 5) Mineral Oksida - Hidroksida Mineral oksida - hidroksida adalah kelompok mi- neral renik yang sifanya sangat beragam, dari yang sangat keras (misalnya Korundum) sampai yang lunak (misalnya Psilomelane); dan dari yang berwarna gelap sampai sangat cerah. Ikatan kimia antar unsur pada mineral oksida – hidroksida umumnya ikatan ionik; sebaliknya, ikatan antar unsur pada kelompok mine- ral lain (termasuk mineral silikat) secara alami umumnya kovalen. Mineral silikat -

kwarsa (SiO2) sering juga disebut sebagai oksida silikat. 2. Jenis dan Sifat Batuan Batuan umumnya dikelompokan berdasarkan proses pembentukannya, yaitu kelompok batuan beku (igneous rocks), batuan endapan (sedimentary rocks), dan batuan malihan (metamorphic rocks). Masing-ma- sing kelompok batuan itu dibagi lagi lebih rinci menjadi beberapa sub kelompok berdasarkan perbe- daan komposisi mineral dan unsur kimianya. Masing- masing kelompok batuan tersebut dijelaskan sebagai berikut: a. Batuan Beku Batuan beku adalah jenis batuan yang dihasil- kan melalui proses pembekuan dan kristalisasi mag- ma. Berdasarkan posisi (kedalaman) terjadinya proses pembekuannya, bantuan beku dibedakan menjadi dua, yaitu batuan beku dalam (intrusif) dan batuan beku luar (ekstrusif). Proses pembekuan pada batuan dalam terjadi pada jalur keluarnya magma dari dapur magma ke permukaan bumi; sedangkan proses pem- bekuan pada batuan beku luar terjadi di luar/permu- kaan bumi, yaitu setelah magma dimuntahkan dari dapurnya ke permukaan bumi melalui proses erupsi gunung api. Proses pembekuan magma merupakan reaksi eksotermik (melepaskan energi panas) dan melibatkan perubahan wujud dari bahan cairan kental menjadi padatan. Keragaman jenis batuan beku ditentukan oleh tiga faktor utama, yaitu komposisi kimia, tempe- ratur dan kecepatan pembekuan (titik beku) magma yang mempengaruhi proses kristalisasi, dan ukuran partikel batuan. Para ahli geologi mengelompokan batuan beku menjadi 3 sub kelompok utama berdasarkan kompo- sisi kimianya, yaitu batuan beku felsik, intermedier, dan batuan mafik. Komposisi mineral pada masing- masing kelompok batuan tersebut dijelaskan secara skematik pada Gambar 9. Felsik Intermedier Mafik Riolit Dasit Andesit Basalt Ultra Basalt Granit Granodiorit Diorit Gabro Peridotit 700 oC Kwarsa K-Feldspar Na-Flagioklas Biotit Ampibol Ca-Flagioklas Piroksin Olivin 1200 oC Temperatur kristalisasi batuan tinggi rendah Kadar Na, K, dan Al rendah tinggi Kadar Ca, Mg, Fe 75 % 45 % Kadar Si Gambar 9. Skema pengelompokan jenis batuan beku dan faktor yang mempengaruhinya (http://jersey.uoregon.edu) Kadar SiO2 pada batuan adalah salah satu ciri pembeda antar sub kelompok batuan beku tesebut. Batuan yang mengandung > 65 % SiO2 termasuk da- lam sub kelompok batuan silikat felsik, 55 – 65 % SiO2 batuan silikat intermedier, sedangkan < 55 % SiO2 adalah batuan mafik. Batuan beku mafik mempunyai titik beku tinggi (pembekuan terjadi pada suhu tinggi). Sebaliknya, batuan beku felsik mempunyai titik beku rendah. Pada pembentukan batuan mafik, proses pembe- kuannya relatif cepat (spontan), sehingga hasil kris- talisasinya kurang sempurna dan banyak terjadi sub- stitusi isomorfik pada struktur dasar (tetrahedral) mi- neral penyusun batuan mafik tersebut. Sebaliknya pa- da batuan felsik, proses pembekuan berjalan relatif lambat karena memerlukan perubahan suhu dari ri- buan menjadi puluhan derajat, sehingga dihasilkan kristal mineral (rangkaian struktur dasar tetrahedral) yang lebih sempurna. Akibat dari perbedaan proses pembekuan tersebut bahwa batuan felsik relatif lebih stabil (tidak mudah terlapuk atau berubah) daripada batuan mafik terhadap perubahan kondisi lingkungan (misalnya suhu, tekanan, dan kelembaban udara) maupun oleh pengaruh benturan secara mekanis da- lam proses penggilingan batuan. Sifat lain yang dapat digunakan sebagai pembeda antara batuan felsik dengan batuan mafik adalah berat jenis (BJ). Batuan felsik adalah batuan yang didominasi oleh unsur kimia ringan (bobot atomnya rendah, yaitu Si), sehingga BJ batuan felsik relatif rendah (< 3) dan titik bekunya juga rendah. Sebalik- nya, batuan mafik banyak mengandung unsur kimia yang bobot atomnya tinggi, sehingga BJ batuan mafik relatif tinggi (> 3) dan titik bekunya juga relatif tinggi, lebih tinggi daripada titik beku batuan felsik. Seperti tampak pada Gambar 9, komposisi mine- ral utama pada masing-masing jenis batuan beku dapat dijelaskan sbb: a. Batuan beku ultramafik atau ultra basalt: olivin [Mg2SiO4 s/d Fe2SiO4] dan piroksin [Ca(Mg,Fe,Al) (Al,Si)2O6]. b. Batuan beku mafik (basaltik): olivin [Mg2SiO4 s/d Fe2SiO4], piroksin [Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si)2O6],dan pla- gioklas [CaAlSi3O8 s/d NaAlSi3O8]. c. Batuan beku intermediet: plagioklas [CaAlSi3O8 s/d NaAlSi3O8], amphibol [NaCa2(Mg,Fe,Al)5(Si,Al)8O22 (OH)2], muskovit/biotit [CaAlSi3O8 s/d NaAlSi3O8], dan kwarsa [SiO2]. d. Batuan beku felsik (granitik): K-feldspar [KAlSi3O8], kwarsa [SiO2]. Batu apung (pumice stones) adalah batuan beku yang sangat ringan. Gas di dalam magma mengalami tekanan tinggi hingga membentuk larutan. Ketika ter- jadi erupsi, terjadi penurunan tekanan secara cepat menyebabkan gas lepas ke atmosfir meninggalkan ba- nyak ruang kosong pada lelehan magma. Tetapi pada temperatur atmosfir, lelehan magma juga mengalami pendinginan dan membeku secara cepat. Banyak gas terjebak di dalam pori-pori, kemudian menghasilkan batuan beku yang porus dan ringan yang kita sebut batu apung. TabTela6b.eBle8be.rCapoanctoonhtoh batuan beku, ciricdiarin dsiafant ustiafmaatnuytaamanya* Jenis Batuan Ciri dan Sifat Utama Basalt Batuan beku extrusive paling banyak di kulit bumi; warna gelap (hitam - kebiruan), kristal berukuran kasar, keras; kaya Mg dan Fe (mineral-mineral ferromagnesium silikat), SiO < 50 %. Mineral utama: Ca-feldspar, piroksin, dan olivine; tambahan/renik: ilminit, mgnetit, biotit, plagofit. Diorit Batuan beku flutonik/ekstrusif, sangat keras, hitam- kebiruan-kehijauan; kaya Mg dan Fe (mineral-mineral ferromagnesium silikat), SiO < 50 %. Mineral utama: plagioklas feldspar, biotit, hornblend, atau/dan piroksin.. Gabro Seperti batuan basalt, hasil pembekuan lambat, sangat keras. Batuan beku intrusif, warna campuran putih, pink, orange, kelabu, gelap; batuan masam, tekstur batuan granular. Komposisi mineral utama: kwarsa, K-feldspar, mika, hornbled. Granit Batuan beku ekstrusif, masam, pembekuan lava masam secara cepat menghasilkan glas (kristalisasi jelek), warna terang – gelap. Mineral utama: kwarsa (> 70 % SiO2) Obsidian Batuan beku ektrusif, butiran kasar dengan warna kontras. Mineral utama germstone (batu hias), turmalin, emerals. Pigmatit Batuan beku ektrusif, porus, umumnya masam (kaya silikat). Banyak digunakan dalam bidang konmetik, bahan penghalus (abrasive). Batu Apung * Foto batuan diambil dari www.fi.edu/fellows/fellow/oct98/create (12/11/2016) Contoh visual dari masing-masing jenis batuan beku tersebut disajikan pada Tabel 8. Salah satu ciri pembeda yang paling mudah adalah warna batuan. Makin gelap/hitam warnanya (makin tinggi kadar Fe dan Mg), maka batuan itu sifatnya makin basa; dan sebaliknya makin pucat (kadar Si makin tinggi) maka sifatnya makin masam (felsik). Batu apung juga me- rupakan jenis gelas (non-kristalin), bukan campuran dari banyak jenis mineral dan sangat ringan. Batu apung banyak digunakan untuk dekorasi bangunan, dan digiling digunakan untuk kosmetik atau bahan penggosok (abrasive material). b. Batuan Endapan Batuan endapan (sedimentary rocks) terbentuk melalui proses pengendapan patikel batuan yang sudah ada sebelumnya. Sebagian batuan penyusun kulit bumi tergerus oleh air, angin, atau gerakan es (glacier) dan diendapkan di bagian hilir, dasar sungai, danau, atau dasar laut selama ratusan, bahkan jutaan tahun. Karena meningkatnya tekanan ke bawah secara terus-menerus, maka terjadi pengerasan pada bahan endapan tersebut dan dihasilkan batuan endapan. Adanya tanda pengerasan oleh tekanan besar pada batuan tersebut digunakan sebagai penanda (penciri) batuan endapan, misalnya garis pemisah antar lapisan pada batuan endapan. Contoh batuan endapan disajikan pada Tabel 9. TabeTla7b.CeoIn9to.hCboantutaonhenbdaatpuaann(seednedmaepntaanry (rsocekdsi)m*entary rocks)* Contoh Batuan Keterangan Batu pasir terbentuk dari endapan butiran (pasir) mineral kwarsa dan feldspar. Batu Pasir Batu kapur (gamping) terbentuk dari mineral kalsit, berasal dari dasar laut dan danau yang mengalami evaporasi, dan dari binatang laut (kulit kerang) Batu Kapur Batu shale terbentuk dari mineral liat (clay) yang mengalami tekanan. Batu Shale Batu konglomerat terbentuk dari endapan pecahan batuan berukuran pasir dan kerikil yang mengalami tekanan dan sementasi. Konglomerat * Gambar/foto diambil dari: www.fi.edu/fellows/fellow1/oct98/create/ sediment.htm, tanggal 14 September 2016. c. Batuan Malihan Batuan malihan adalah batuan beku maupun endapan yang mengalami perubahan karena terjadi- nya tekanan dan peningkatan temperatur yang sangat tinggi. Contoh visual batuan metamor disajikan pada Tabel 10, meliputi schist, gneiss, dan marble. Selain jenis bahan batuan, intensitas tekanan dan tempera- tur serta waktu yang menyebabkan perubahan kha- rakteristik batuan tersebut. TabTeal8b.eClo1nt0o.h Cbaotnuatnohmabliahatuna(mnetmamaolirhphaicnro(mckes)t*amorphic rocks)* Contoh Batuan Keterangan Lebih dari 50 % terdiri atas lembaran kristal mineral, umumnya terdiri atas kwarsa dan feldspar Schist Tampak garis-garis batas antar mineral penyusunnya yang jelas, komposisi mirif dengan schist, sedikit mika dan klorit. Gneiss Terbentuk karena tekanan dan panas tinggi terhadap batuan/ mineral kalsit; sangat reaktif (mudah larut) terhadap cairan masam. Marmer * Gambar/foto diambil dari: ww.fi.edu/fellows/fellow1/oct98/create/sediment. htm, tanggal 14 September 2012. C. Stabilitas Mineral dan Batuan Setiap mineral mempunyai tingkatan daya tahan terhadap proses pelapukan oleh media pelapuk dan energi mekanik (misalnya penggilingan) yang berbeda- beda. Para ahli mineralogi telah menyusun urutan stabilitas mineral seperti disajikan pada Tabel 11. Ada hubungan yang erat antara jenis mineral pada Tabel 11 dengan kelompok batuan yang dijelas- kan pada Gambar 9. Batuan mafik tersusun dari mineral dengan stabilitas rendah (Ca-plagioklas s/d olivine), sehingga stabilitas batuan mafik relatif ren- dah (mudah terlapuk). Sebaliknya, kelompok batuan felsik tersusun dari mineral yang stabilitasnya tinggi, terutama kwarsa dan kelompok feldspar (muskovit, mikroklin, dan ortoklas), sehingga stabilitas batuan TabTealb9e.lU1ru1t.aUnrsutatbailnitasstmabinileirtaalsprmiminereedraalntseerkhuanddaeprteprehlaadpaupkpaenlapukan (Allen dan Hajek, 1989) (Allen & Hajek, 1989) Mineral Primer Mineral Sekunder Zirkon Rutil Turmalin Garnet Kwarsa Epidot Sphene Muskovit Stabilitas mineral Mikroklin makin menurun Ortoklas Na-Plagioklas Ca-plagioklas Hornblend Klorit Augit Biotit Apatit Olivin Anatase Gibsit Hematit (dan Geotit) Vermikulit Illit Haloisit Sepiolit (dan Polygorskit) Alofan (dan Imogolit) Kalsit Halit (Garam lain yang sama kelarutannya) felsik relatif tinggi atau tidak mudah terlapuk. Stabi- litas batuan andesit (intermediate) adalah sedang (ber- ada di antara batuan feksik dan mafik). Stabilitas mineral terhadap proses pelapukan ditentukan oleh: (1) temperatur pebentukan mineral, (2) substitusi isomorfik/posisi ion dalam struktur mineral, (3) jenis ikatan antar kisi tetrahedral mineral, (4) kadar unsur polivalen (Fe dan Mn) pada mineral, dan (5) ukuran patikel, dijelaskan sbb: 1. Temperatur pembentukan. Mineral dan batuan yang terbentuk (membeku) pada temperatur tinggi umumnya lebih mudah terla- puk daripada yang terbentuk pada suhu lebih rendah. Seperti telah ditunjukkan pada Gambar 10, mineral penyusun batuan mafik membeku pada suhu lebih tinggi daripada mineral/batuan felsik, sehingga mine- ral atau batuan mafik lebih mudah terlapuk/dihan- curkan secara mekanik daripada batuan felsik. Sifat itu penting untuk diketahui sehubungan dengan pro- ses penghalusan (penggilingan) batuan sebagai pupuk atau amelioran. 2. Substitusi isomorfik. Stabilitas mineral juga ditentukan oleh intensitas terjadinya substitusi isomorfik pada struktur dasar mineral itu. Pada beberapa mineral liat, misalnya montmorilonit, substitusi isomorfik terjadi pada struk- tur dasar tetrahedral (ion Si4+ digantikan oleh Al3+) dan pada struktur dasar oktahedral (ion Al3+ digantikan oleh Ca2+ atau Mg2+). Proses tersebut menyebabkan terjadinya kelebihan muatan negatif dalam struktur montmorilonit. Misalnya, ion Al3+ menggantikan posisi ion Si4+ dalam unit struktur tetrahedral montmorilo- nit. Meskipun diameter Al3+ (0.051 nm) dan Si4+ (0,039 nm) hanya berbeda sedikit, proses substitusi tersebut dapat merenggangkan struktur tetrahedral mineral tersebut secara keseluruhan. Pada suhu udara normal (ruangan), ion Al3+ akan mantap jika berikatan dengan 8 ligan oksigen atau/dan hidroksil dalam unit struktur oktahedral, sedangkan ion Si4+ akan mantap jika berikatan dengan empat ligan oksigen atau/dan hidroksil dalam unit struktur tetrahedral. Terjadinya substitusi isomorfik tersebut menurunkan stabilitas mineral itu terhadap proses pelapukan. 3. Ikatan antar struktur dasar Stabilitas mineral juga ditentukan oleh jenis ikat- an dan pengaturan antar struktur dasar tetrahedral. Makin kuat ikatan antar struktur tetrahedral suatu mineral, makin sulit mineral tersebut terlapuk. Mine- ral kwarsa dan feldspar merupakan rangkaian kerang- ka struktur tetrahedral yang memanfaatkan empat atom oksigen pada titik sudut tetrahedral untuk saling berikatan. Penggunaan bersama ion oksigen yang maksimum tersebut menciptakan stabilitas mineral kwarsa dan feldspar sangat tinggi. Sebalinya pada mineral olivin, struktur tetrahedral tunggal saling ber- ikatan secara acak, menyebabkan mineral tersebut mudah hancur membentuk butiran halus jika terla- puk oleh air atau udara. Penjelasan lebih lengkap ten- tang struktur mineral adalah di luar jangkauan dari buku ini, dan telah banyak disajikan pada buku/refe- rensi geologi dan mineralogi. 4. Kadar ration polivalen (Fe dan Mn) Unsur Fe dan Mn mudah teroksidasi (muatan po- sitifnya meningkat) dan menyebabkan ketidak- imbangan muatan dalam struktur mineral yang me- ngandung kedua unsur itu. Perubahan muatan pada Fe dan Mn menyebabkan terjadinya peningkatan tegangan dalam struktur mineral karena terjadi per- ubahan diameter ioniknya (diameter Fe2+ < Fe3+, dan Mn2+ < Mn4+ < Mn5+). Mineral yang mengandung unsur yang mudah tereduksi/teroksidasi akan mudah terla- puk. Hal itu juga menjadi alasan mengapa mineral ferromagnesium silikat (pada batuan mafik) lebih mu- dah terlapuk daripada mineral feldspatik, karena mineral feromagnesium silikat mengandung banyak kation yang mudah tereduksi - teroksidasi (Fe dan Mn) dibandingkan pada mineral feldspatik. 5. Ukuran partikel Pada mineral berukuran halus (mikro meter), perbedaan ukuran partikel sangat mempengaruhi sta- bilitasnya terhadap pelapukan kimiawi. Makin kecil ukuran partikel mineral sampai batas tertentu, makin luas permukaan efektifnya per satuan berat, sehingga makin banyak bagian mineral tersebut yang berkontak langsung dengan agen pelapuk (pelarut). Akibatnya, pelapukan lebih intensif terjadi pada mineral berukur- an halus daripada yang kasar. Pada mineral atau batuan yang porus (Priyono, 2005b), ukuran partikel kurang menentukan intensitas reaksi pelapukan di- banding luas permukaan efektif mineral tersebut, karena agen pelarut dapat masuk melalui permukaan efektif internal pada mineral porus tersebut. Dari uraian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa stabilitas mineral dan batuan ditentukan oleh gabungan sifat fisik dan kimia mineral tersebut. Sta- bilitas mineral atau batuan tersebut juga akan menentukan laju perkembangan relatif tanah mineral, mineral residu dominan pada tanah yang telah ber- kembang lanjut atau tererosi berat, dan energi yang diperlukan untuk menghanurkan batuan menjadi pupuk atau amelioran melalui proses penggilingan. D. Sifat Kimia Batuan Komposisi kimia atau unsur hara esensial bagi tanaman pada batuan merupakan faktor sangat pen- ting kaitannya dengan fungsinya sebagai bahan induk tanah maupun pemanfaatannya langsung sebagai pu- puk atau sebagai bahan baku pupuk. Sebagai bahan induk tanah, sifat kimia batuan tersebut sangat me- nentukan jenis dan kesuburan tanah. Sebagai pupuk, sifat kimia batuan menentukan kualitas pupuk terse- but. Contoh hasil analisis komposisi unsur kimia uta- ma pada batuan dari beberapa tempat di Tabel 12. Kelompok batuan mafik (misalnya basalt) me- ngandung unsur hara esensial yang paling lengkap. Kadar unsur hara makro Ca dan Mg dan mikro Fe, Zn, dan Cu relatif tinggi, tetapi kadar K umumnya relatif rendah dibandingkan kadar K pada batuan felsik. Sebaliknya, pada batuan felsik (misalnya gneiss dan schist), kadar unsur hara Ca, Mg, Fe, Zn, dan Cu relatif rendah, tetapi kadar K tinggi. Kelompok batuan intermedier mengandung unsur hara tanaman dengan komposisi lengkap. Berdasarkan komposisi unsur hara pada setiap jenis batuan (Tabel 12) maka kesuburan genetis dari tanah yang terbentuk pada kondisi lingkungan yang sama akan bervariasi sesuai dengan variasi jenis ba- tuan induknya. Tabel 12. T K a o bel m 1 p 0. o K s o i m si pos k ii si k m ii mi a a p p a a da db a eb b er e ap b a ejr eni as p b a atj ua e n nis batuan No Jenis dan asal Kadar Total (% oksida) batuan SiO2 Al2O3 CaO MgO K2O Na2O SO4 P2O5 Fe2O3 MnO ZnO CuO Lain2 1 Galunggung, Jawa 54,73 Basaltik (G. Barat) 24,36 7,38 3,30 0,55 1,88 - - 7,25 0,16 0,01 0,38 <0,01 Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 85 2 Basaltik (G. Kelud – Jawa Timur) 51,98 25,14 6,95 3,03 1,19 2,19 - - 8,99 0,16 0,01 0,36 <0,01 3 Basaltik (G. Rinjani – P. Lombok, NTB) 52,28 24,77 4,84 1,83 6,30 3,25 - - 6,24 0,15 0,01 0,33 <0,01 Basaltik (G. 4 Tambora – P. Sumbawa, NTB) 51,78 26,23 7,12 3,36 0,37 2,06 - - 8,56 0,16 0,01 0,34 <0,01 6 Basalt (Bumbary - Western Australia 47,95 19,15 11,11 6,08 0,18 2,10 0,05 0,19 11,25 0,16 - - - Dolerite (Jarahdale 7 – Western Australia) 49,92 13,94 11,37 6,32 0,37 1,21 0,12 0,13 15,22 0,21 - - - Sumber: No 1 – 4 (Priyono et al., 2008), 5 – 9 (Priyono, 2005) 8 Gneiss (Northem – Western Australia) 74,01 15,02 2,01 0,74 1,09 4,06 0,01 0,08 2,64 0,02 - - - Joko Priyono K-feldspard 9 (Northem – Western Australia 61,53 19,05 0,05 0,01 11,56 2,51 0,01 0,22 0,02 0,01 - - - Dengan makin berkembangnya tanah tersebut dan pengaruh faktor lingkungan makin intensif, maka faktor lingkungan dapat menjadi dominan menentu- kan karakteristik tanah yang terbentuk. Faktor pembentuk tanah tersebut dari satu tem- pat ke tempat lain sangat beragam. Tanah yang ter- bentuk dari bahan induk batuan basaltik, misalnya, semula sangat subur karena kaya akan unsur hara mineral makro (Ca, Mg) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu). Namun, jika tanah itu berkembang di daerah dengan curah hujan yang tinggi, maka makin lama kation di bagian atas (zona perakaran) makin banyak yang terlindih ke horizon bawah, menyisakan kation masam (Al dan Fe) dalam bentuk oksida dan hidrok- sida. Tanah yang tadinya bereaksi netral - basa men- jadi agak masam - sangat masam. Warna tanah dari gelap berubah menjadi lebih cerah, coklat – keme- rahan, atau merah – kekuningan karena adanya oksi- da dan hidroksida Fe dan Al yang dominan. Secara alami, perubahan sifat tanah tersebut memerlukan waktu puluhan - ratusan tahun. Karena air merupa- kan agen pelarut utama, perkembangan tanah yang terbentuk di daerah basah (curah hujan tinggi) relatif lebih cepat, atau solumnya lebih dalam daripada yang terbentuk di daerah kering (curah hujan rendah). Perubahan sifat atau tingkat kesuburan tanah yang relatif cepat dapat terjadi karena pengaruh ma- nusia (managemen penggunaannya). Peningkatan in- tensitas tanam yang tinggi, dari sekali tanam menjadi 2 – 3 kali tanam per tahun, dibarengi dengan peng- gunaan pupuk berhara makro (terutama N dan P) yang tinggi, dapat menyebabkan terkurasnya unsur hara mikro di larutan tanah. Meskipun bahan induk- nya kaya unsur hara mikro (batuan basaltik, misal- nya), kekahatan (kekurangan) unsur hara mikro aki- bat intensitas tanam yang tinggi pada tanah tersebut tidak dapat dihindari. Hal itu disebabkan oleh laju serapan unsur hara mikro oleh tanaman sepanjang tahun lebih tinggi daripada laju pelarutan unsur hara tersebut dari bahan induk ke larutan tanah. Pada beberapa dekade terakhir (pertanian modern), penggu- naan pupuk berhara mikro dalam usaha tani menjadi sangat penting. Sebagai pupuk atau bahan pupuk, kelompok ba- tuan intermedier (andesitik – basaltik) mungkin yang paling cocok, karena komposisi unsur hara makro dan mikronya berimbang untuk berbagai jenis tanaman. Namun, meskipun kenampakan fisiknya sama, kom- posisi unsur haranya dapat saja beragam, seperti tampak pada Tabel 12. BAB IV PELARUTAN UNSUR HARA DARI BATUAN A. Pengertian Pelarutan Pelarutan unsur hara adalah proses kimiawi pe- lepasan ion atau unsur hara dari senyawa kompleks, endapan, atau padatan (batuan) ke dalam zat pelarut. Pelarutan unsur hara dari mineral atau batuan sangat penting untuk dibicarakan dalam bab ini untuk me- mahami fungsi bahan geologis sebagai bahan induk tanah (sumber unsur hara tanaman), atau pengem- bangan teknologi produksi pupuk multi nutrisi yang efektif dan efisien berbahan baku batuan. Seperti telah dimaklumi bahwa tanaman menye- rap unsur hara dalam bentuk ion. Oleh karena itu, unsur hara yang ada di batuan induk tanah atau bu- buk batuan (pupuk) hanya dapat dimanfaatkan lang- sung oleh tanaman jika unsur hara itu terlarut dari struktur mineral penyusun batuan itu menjadi bentuk ion dalam larutan. Unsur hara yang terlarut (tersedia bagi tanaman) tersebut idealnya harus dalam kuanti- tas yang cukup untuk pertumbuhan tanaman dan proporsi yang berimbang. Untuk mencapai kondisi itu, perlu diketahui mengenai prinsip reaksi pelarutan un- sur hara dari batuan serta faktor yang mempenga- ruhinya. Pelarutan dibahas pada dua kondisi yang berbeda, yaitu pada kondisi alami yang berkaitan dengan proses pembentukan dan perkembangan ta- nah (aspek pedologis) dan pelarutan batuan pada kon- disi terkontrol – berkaitan dengan pemanfaatan batu- an sebagai bahan baku pupuk atau amelioran (tekno- logi produksi pupuk). Pada proses pedologis, reaksi pelarutan unsur hara dapat terjadi secara beriringan dengan proses pembentukan senyawa baru dari unsur hara yang ter- larut dari batuan induk itu melalui berbagai me- kanisme reaksi sesuai dengan kondisi lingkungannya. Pemahaman kedua jenis reaksi (penguraian dan pem- bentukan) tersebut sangat penting untuk dapat me- ngenal sifat dan ciri tanah yang terbentuk sebagai hasil dari proses pedologis tersebut. Implikasinya, kita dapat melakukan pengelolaan tanah yang tepat, me- ngacu pada sifat dan ciri serta kapasitas daya dukung tanah itu. Karena kondisi faktor pembentuk tanah dari satu tempat ke tempat lain sangat beragam, me- kanisme reaksi pelarutan alami yang dominan di se- tiap tempat juga beragam. Mekanisme reaksi pela- rutan (pelapukan kimiawi) batuan induk tanah yang umum terjadi secara alami dijelaskan dalam bab ini. Hal lain yang sangat penting untuk difahami adalah yang berkaitan dengan efektivitas pupuk ba- tuan dalam bentuk bubuk atau granular. Banyak hasil penelitian menunjukan bahwa faktor pembatas utama terhadap efektivitas pupuk dari batuan itu ada- lah lambatnya pelarutan unsur hara dari partikel ba- tuan sehingga dosis yang harus diterapkan sangat tinggi (puluhan ton per hektar). Secara teoritis, laju pelarutan unsur hara dari batuan dapat dipercepat dengan mengendalikan atau memodifikasi faktor yang mempengaruhi reaksi pelarutan unsur hara tersebut. Modifikasi tersebut dapat dilakukan terhadap sifat ba- tuan (misalnya ukuran partikel dan kristalinitasnya), pelarut (jenis, pH, dan konsentrasinya), atau kedua- nya. Untuk memahami sehingga dapat memilih faktor tersebut yang layak dimodifikasi, maka dalam bab ini juga dibicarakan mengenai kinetika reaksi pelarutan partikel batuan. B. Prinsip Reaksi Pelarutan Reaksi pelarutan unsur hara dari batuan meru- pakan salah satu jenis reaksi keseimbangan antara partikel batuan dengan zat pelarut (sebagai reaktan) menghasilkan larutan unsur hara (sebagai produk). Keseimbangan tersebut meliputi keseimbangan masa maupun energi. Reaksi keseimbangan masa secara umum dapat diilustrasikan sebagai berikut (Priyono, 2005b): A+B⇌C+D (Pers. 3) Senyawa A dan B sebagai reaktan, sedangkan C dan D sebagai produk. Pada reaksi pelarutan mineral/ batuan, zat pelarut utama di alam adalah air (H2O). Pada kondisi seimbang, laju reaksi ke kanan dan ke kiri sama, maka hasil kali aktivitas atau konsentrasi produk dibanding hasil kali dari aktivitias reaktan adalah tetap (konstan), dan nilai itu disebut konstanta keseimbangan. Reaksi pelarutan suatu batuan dengan H2O dapat disederhanakan sbb: Al+4 + Si+3 + Ca+2 + Mg+2 + K+ + H2O ⇌ + Na+ + Fe+2/3 + Mn+2/3/5 + (Pers. 4) Zn+2 + Cu+2 + PO4+3 + SO4+2 + Cl- +... + OH-. Reaksi sebenarnya yang terjadi secara alami amaupun di kondisi terkontrol (laboratorium) tentu tidak sesederhana itu. Unsur yang telah terlarut dari batuan dapat membentuk berbagai senyawa kompleks yang baru. Untuk tujuan praktis berkaitan dengan pembuatan pupuk dari batuan, kondisi unsur hara tersebut dapat dipilah menjadi dua, terlepas dari apa- pun bentuk senyawa kompleksnya, yaitu unsur hara terekstrak (terlarut) yang umumnya berbentuk ion dan yang tidak terlarut (berbagai senyawa kompleks dan batuan yang utuh maupun sebagian terlarut). Selain pendekatan keseimbangan masa seperti dijelaskan di atas, reaksi pelarutan unsur hara dapat pula dijelaskan melalui konsep keseimbangan energi (termodinamika). Dalam konsep keseimbangan energi, dikenal tiga bentuk energi yang saling berkaitan, yaitu energi bebas Gibb (G), entalpi (H), dan entropi (S). Pada suatu sistem reaksi kimia, energi bebas Gibb (G) dapat didefinisikan sebagai energi yang dihasilkan oleh suatu reaksi kimia. Entalpi (H) adalah energi dari pembentukan suatu ikatan kimia, sedangkan entropi (S) adalah energi yang manyatakan tingkat keacakan (randomness) ion dalam bergerak dan mengatur posi- sinya, atau kecenderungan ion untuk melepaskan diri dari ikatan sehingga bebas bergerak dalam suatu sis- tem itu. Nilai S dipengaruhi oleh temperatur T (derajad Kelvin) dalam sistem tersebut. Makin tinggi tempera- tur dalam sistem itu, makin tinggi pula kecende- rungan ion untuk bergerak bebas. Ketiga energi ter- sebut saling berkaitan, nilai absolutnya tidak dapat di- ukur, tetapi perubahan nilainya dapat diukur. Hu- bungan antara perubahan (Δ) ketiga bentuk energi itu adalah: ΔG = ΔH – T ΔS (Pers. 5) Perubahan energi yang dihasilkan oleh suatu reaksi kimia (ΔG) merupakan resultan dari perubahan energi yang saling berlawanan, yaitu perubahan energi ikatan kimia (ΔH) dan perubahan energi keacakan

ion atau molekul (ΔS) yang dipengaruhi oleh suhu (T) dalam sistem tersebut. Energi ikatan kimia menun- jukan kekuatan ikatan atau energi saling tarik antar ion dalam molekul atau senyawa yang terbentuk da- lam reaksi itu; sedangkan energi keacakan menun- jukan tingkat kecenderungan ion dalam molekul atau senyawa tersebut untuk membebaskan diri dari ikatan kimianya sehingga dapat bergerak bebas dalam larutan (bentuk ion). Kondisi seimbang akan terjadi jika perubahan energi bebas (ΔG) dalam sistem itu mi- nimum atau nol (ΔH ≈ TΔS), yaitu suatu kondisi yang paling mantap untuk keberadaan masing-masing ben- tuk senyawa atau ion dalam sistem tersebut. Implikasi dari penjelasan keseimbangan energi tersebut, produk berupa kation maupun anion pada Pers. 4 dapat membentuk senyawa baru yang lebih stabil sehingga energi bebas (ΔG) dalam sistem itu minimum atau mendekati nol. Hal penting dari pemahaman reaksi kesimbang- an melalui pendekatan keseimbangan energi yang dapat diterapkan secara praktis dalam pembuatan pupuk dari batuan bahwa, makin tinggi termperatur (sampai batas tertentu), maka reaksi akan mengarah ke kanan (laju pelarutan batuan dipercepat). Prinsip ini dapat diterapkan dalam memodifikasi kondisi lingkungan proses pembuatan pupuk tersebut. Kelarutan atau nilai konstanta keseimbangan dari masing-masing unsur ditentukan antara lain oleh bobot jenis, diameter, dan elektronegativitas atomnya. Pada konteks mineral atau batuan, kelarutan unsur penyusunnya secara umum ditentukan oleh stabilitas relatif dari mineral atau batuan tersebut (lihat Tabel 11 pada Bab 3). Selain itu, kharakteristik zat pelarut juga menentukan mekanisme reaksi dan tingkat kela- rutan unsur hara dari mineral atau batuan. Pada konsentrasi yang sama, larutan asam organik umumnya lebih kuat daripada asam anorganik dalam melarutkan unsur penyusun mineral atau batuan. 1. Mekanisme Pelarutan Unsur Hara Berkaitan dengan mekanisme reaksi pelarutan yang terjadi secara alami (pelapukan kimiawi pada batuan induk tanah), banyak referensi pedologi tanah, misal-nya Ross (1989), menjelaskan beberapa mekanisme umum pelarutan seperti diringkas pada Tabel 13. Dalam kenyataan di lapang, reaksi pelarutan batuan induk sangat kompleks, beberapa mekanisme dapat terjadi secara bersamaam dan umumnya lambat. Pada Tabel 13 tampak bahwa air (H2O) adalah pelarut alami yang utama. Kemampuan yang tinggi dari molekul air dalam melarutkan kation maupun anion dari batuan berkaitan dengan sifat dipolar (mempunyai dua kutub bermuatan) dari molekul air tersebut, sehingga air merupakan senyawa yang reak- tif. Selain itu, pelepasan kation dari struktur kristal mineral atau batuan memerlukan input asam (H+). Berkaitan dengan reaksi pelarutan pada kondisi terkontrol, banyak peneliti telah melakukan riset pela- rutan unsur hara dari mineral yang relatif murni, antara lain Huang & Keller (1970), Bloom & Erich (1986), Lundtröm & Öhman (1990), Barman et al. (1992), Zhang & Bloom (1999), Harley (2002), atau unsur hara dari batuan (Priyono, 2005a; Priyono & Gilkes, 2008a), menggunakan media pelarut berupa asam anorganik maupun organik murni. Beberapa penelitian pelarutan bubuk batuan di dalam tanah tanpa tanaman (Priyono, 2015) maupun pada sistem tanah - tanaman (Priyono & Gilkes, 2008b). Dari hasil kerja para peneliti tersebut dapat diketahui bahwa setidaknya ada dua mekansime reaksi pelarutan un- sur hara dari partikel batuan atau mineral ke media pelarut, yaitu reaksi asam - basa dan pembentukan ligan 'metal – organik'. Pada sistem tanah – tanaman, kedua reaksi pelarutan unsur hara tersebut umumnya terjadi bersamaan dan sulit dipisahkan. Tabel 13. Ringkasan mekanisme reaksi pelarutan (pela- pukan kimiawi) batuan induk secara alami (Ross, 1989) 1) Pelarutan mineral atau senyawa garam dalam air, atau disosiasi: a. NaCl + H2O ≈ Na+ + OH- + H+ + Cl- b. KNO3 + H2O ≈ K+ + OH- + H+ + NO3- 2. Karbonasi: a. CaCO3 + H2O + CO2 ≈ Ca2+ + 2HCO3- b. K2Al2O2.6SiO2 +2H2O+CO2 ≈ Al2O32SiO22H2O + K2CO3 + 4SiO2 Ortoklas Kaolinit 3. Hidrasi: a. Fe2O3 + nH2O ≈ Fe2O3.nH2O Hematit (merah) Geotit (coklat) b. CaSO4 + 2H2O ≈ CaSO4.2H2O Gibsum Gibsum terhidrasi 4. Hidrolisis: a. K2.Al2O2.6SiO2+11H2O ≈ Al2O3.2SiO2.2H2O+K+ + 4H4SiO4 + OH- Ortoklas Kaolinit b. Pada hujan masam (air hujan mengandung H2SO4, HNO3, H2CO3): Al-silikat +H2O +H2SO4 ≈ liat +(Ca2+, K+, Na+ dsb)+ OH- + H4SiO4+SO42- 5. Oksidasi - reduksi: Eh (mV) a. Anion anorganik (pH 5) (pH 7) NO3- + H+ + 2e ≈ NO + H2O -70 -220 SO42- + 10H+ + 2e H2S + 4H2O -70 -220 b. Kation anorganik Fe(OH)3 + 3H+ + e ≈ Fe2+ + 4H2O 170 -180 MnO2 + 4H+ + 2e ≈ Mn2+ + 2H2O 640 - 410 Reaksi asam - basa pada prinsipnya adalah pe- netralan senyawa yang bersifat basa (kation pada mi- neral) oleh larutan asam, menghasilkan garam. Yang berperan sebagai asam dalam reaksi asam – basa adalah zat pelarut, sedangkan sebagai basa adalah partikel batuan/mineral dengan kation penyusunnya, diilustrasikan pada (Pers. 4). Tingkat kemasaman (aktivitas H+) sangat menentukan besarnya proporsi unsur hara yang dapat terlarut dari batuan atau mi- neral. Makin masam pelarutnya, makin banyak kation yang dapat terlarutkan. Reaksi pembentukan ligan 'metal – organik' ada- lah pembentukan senyawa kompleks antara logam (kation) dengan asam organik. Unsur hara (kation) dari batuan, terutama kation bervalensi jamak, bere- aksi dengan gugus fungsional dari asam organik mem- bentuk ligan 'logam – organik'. Pada media pelarut asam anorganik, terlarutnya unsur hara dari partikel batuan umumnya melalui mekanisme reaksi asam – basa; sedangkan pada pelarutan menggunakan pelarut asam organik, selain mekanisme reaksi asam – basa juga pembentukan ligan 'logam – organik' yang dipengaruhi oleh pH pelarut. Mekanisme pelarutan melalui pembentukan ligan 'logam - organik' itu terutama untuk kation (lo- gam) polivalen. Hal itu merupakan penjelasan menga- pa proses pelarutan unsur hara dari batuan oleh asam organik umumnya lebih tinggi daripada asam anorga- nik encer (Ludwig et al. 1996; Priyono, 2005a). Hasil kajian pelarutan batuan pada beragam jenis tanah (Priyono, 2005a; Priyono et al., 2008) menunjukan bahwa kadar asam organik atau C-organik tanah mempunyai kontribusi besar (> 80 %) dalam proses pelepasan unsur hara dari pupuk batuan silikat ke larutan tanah. 2. Kinetika Pelarutan Unsur Hara Proses pelarutan unsur hara dari partikel mine- ral maupun batuan tidak berjalan spontan, tetapi ber- tahap dari laju pelarutan yang sangat cepat (spontan) menjadi makin lambat hingga mendekati nol (men- capai keseimbangan). Hubungan antara proporsi batu- an, atau unsur hara yang terlarut dengan waktu pela- rutan dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan berpangkat (power equation) (Priyono, 2005a): Et = Eo + atn (Pers. 6) Notasi Et adalah proporsi (%) dari batuan atau total unsur hara terlarut dalam waktu t (satuan wak- tu); Eo adalah proporsi (%) batuan atau total unsur hara yang terlarut secara spontan (Eo= Et pada nilai t ≈ 0); a adalah tetapan (konstanta) yang berkaitan dengan luas permukaan reaktif dari partikel yang dila- rutkan; sedangkan n adalah konstanta eksperimental atau order reaksi. Laju pelarutan (Rt) pada periode waktu tertentu (t) dihitung sebagai turunan pertama dari (Pers. 6): Rt = dEt/dt = antn-1 (Pers. 7) Nilai Eo mempunyai arti praktis sangat penting karena menunjukan proporsi unsur hara dari batuan yang cepat tersedia bagi tanaman. Contoh hasil pene- litian pelaruatan unsur hara dari beberaja jenis batu- an dalam 0,01 M campuran asam asetat dan oksalat, batuan digiling dengan ball mill pada kondisi kering dan basah, disajikan pada Tabel 14. Untuk memudahkan pemahaman persamaan pada Tabel 14, data pelarutan batuan basalt yang digiling pada kondisi basah maupun kering divisualisasikan di Gambar 10. Tabel 14. Persamaan pelarutan bubuk batuan yang digiling dengan ball mill dalam waktu dan kondisi penggilingan dalam larutan 0,01M asam asetat + oksalat (Priyono, 2005a) Penggilingan Jenis Batuan Kondisi Persamaan Kinetik Pelarutan Waktu (menit) Basah Basalt Kering 10 60 120 10 60 120 Et = 2,86 + 1,76 t 0,43 Et = 5,93 + 3,11 t 0,40 Et = 8,92 + 4,07 t 0,35 Et = 2,56 + 3,04 t 0,37 Et = 9,16 + 3,46 t 0,37 Et = 14,58 + 4,14 t 0,33 Basah Dolorit Kering Basah Gneiss Kering 10 60 120 Et = 2,05 + 1,71 t 0,46 Et = 4,83 + 2,77 t 0,42 Et = 7,17 + 3,31 t 0,41 10 60 120 Et = 5,08 + 2,02 t 0,50 Et = 13,52 + 3,40 t 0,41 Et = 19,44 + 5,15 t 0,30 10 60 120 Et = 1,44 + 0,56 t 0,57 Et = 5,66 + 1,28 t 0,45 Et = 8,35 + 2,31 t 0,42 10 60 120 Et = 2,87 + 1,28 t 0,44 Et = 8,55 + 0,35 t 0,71 Et = 15,20 + 1,36 t 0,43 Basah K-feldspar Kering 10 60 120 10 60 120 Et = 0,26 + 0,43 t 0,55 Et = 1,85 + 0,62 t 0,60 Et = 1,53 + 0,87 t 0,57 Et = 1,29 + 0,46 t 0,64 Et = 4,74 + 0,94 t 0,54 Et = 8,31 + 1,57 t 0,47 Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 99 Gambar 10. Hubungan antara waktu pelarutan (t, jam) dengan proporsi unsur hara terlarut (%) dari bubuk batuan basalt yang digiling dengan ball mill dalam kondisi basah ( ) dan kering (---) selama 10, 60, dan 120 menit (Priyono, 2005a). Dari hasil penelitian tersebut dapat diambil be- berapa kesimpulan penting yang dapat dijadikan acuan teknis dalam upaya meningkatkan efektivitas pupuk batuan dalam bentuk bubuk. Pertama, hingga batas tertentu, makin halus partikel batuan (digiling makin intensif), makin tinggi proporsi batuan atau unsur hara yang cepat terlarut (Eo), makin tinggi pula proporsi total unsur hara terlarut (Et), tetapi makin turun order reaksinya. Hal tersebut dikarenakan per- mukaan efektifnya makin luas (partikelnya makin halus), atau nilai a makin tinggi. Order reaksi (nilai n) makin rendah, berarti reaksi makin cepat mencapai keseimbangan. Aspek kedua, penggilingan batuan dengan ball mill yang berdampak pada penghalusan partikel dan kristalinitas mineral sampai batas terten- tu meningkatkan laju pelarutan unsur hara dari batuan; dan penggilingan dalam kondisi kering lebih efektif daripada dalam kondisi basah. Pada penggiling- an batuan dalam kondisi basah, gerakan bola baja (milling balls) dalam vial alat giling itu terhambat oleh larutan sehingga daya tumbuknya relatif rendah daripada yang digiling pada kondisi kering. Namun penggilingan dengan ball mill yang terlalu intensif dapat menyebabkan terjadinya agglomerasion atau sintering. Partikel yang halus (amorfus) dan bermuatan tinggi menyatu membentuk partikel baru yang berukuran lebih kasar dan unsur haranya mejadi lebih sulit terlarutkan. 3. Faktor yang Mempengaruhi Laju Pelarutan Hara Laju pelarutan unsur hara dari mineral/batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain adalah (1) sifat/jenis unsur hara, (2) posisi unsur hara itu pada struktur mineral, (3) jenis zat pelarut, (4) ukuran patikel mineral atau batuan, dan (5) tingkat kristali- nitas (crystalinity) dari mineral penyusun batuan itu. Semua faktor tersebut secara bersamaan menentukan laju pelarutan unsur hara dari mineral atau batuan. Pengaruh masing-masing faktor tersebut dijelaskan sebagai berikut: a. Jenis unsur hara. Pada pelarutan mineral dengan pelarut air, kela- rutan unsur kation bervalensi ganda (Ca+2 dan Mg+2) dan jamak (Fe+2/3, Mn+2/5, Al+3, Si+4) lebih rendah dibandingkan dengan kelarutan kation monovalen (K+, Na+). Hal tersebut dibuktikan oleh Priyono (2005a) dan Priyono & Gilkes (2008). Penjelasan lain, konstanta kelarutan (Ksp) garam atau senyawa dari kation monovalen lebih tinggi daripada kation divalen maupun polyvalen (Priyono, 2005b). b. Posisi unsur pada struktur mineral Posisi kation pada struktur mineral juga menen- tukan mudah-tidaknya kation itu terlarut dari mineral itu. Misalnya, pada struktur kelompok mineral mika, kation K+ terjepit (tersemat) kuat pada ruang antar kisi struktur dasar (tetrahedral) mineral tersebut. Kation K+ itu relatif sulit terlepaskan dari mineral tersebut dibanding dengan yang berada pada permukaan ter- luar (K+ yang dapat tertukarkan) atau K+ yang berada di permukaan jerapan partikel. Batuan beku basaltik terbentuk melalui proses pembekuan magma yang kental karena mengandung banyak logam yang bobot atomnya relatif tinggi. Pro- ses pembekuan tersebut sangat cepat (titik bekunya tinggi), menyebabkan proses kristalisasi kurang sem- purna, kation berdiameter lebih besar daripada Si dan Al (yaitu Ca, Mg, Fe, Zn dan Cu) akan berada pada posisi acak di antara unit dasar tetrahedral silikat maupun oktahedral Al. Selain itu, banyak pula terjadi substitusi isomorfik, yaitu Al menggantikan posisi Si pada struktur tetrahedral dan Ca, Mg, ataupun Fe menggantikan posisi Al pada struktur dasar oktahedral. Substitusi isomorfik tersebut mem- perlemah unit dasar tetrahedral maupun oktahedral pada batuan basaltik. Terjadinya substitusi isomorfik tersebut melemahkan struktur dasar dari mineral. Sebaliknya, batuan felsik didominasi oleh silikat, titik didihnya lebih rendah daripada titik didih batuan basaltik, sehingga proses kristalisasi batuan felsik relatif lambat, dihasilkan kristal mineral (struktur tetrahedral Si) yang lebih sempurna dan terjadinya substitusi isomorfik relatif rendah. Perbedaan kharakteristik dari batuan tersebut berimplikasi pada perbedaan laju pelarutan unsur hara dari batuan ke larutan tanah. Hal itu menjelaskan mengapa pelarutan unsur hara dari batuan basaltik lebih cepat daripada dari batuan feksik. c. Jenis zat pelarut Agen pelarut utama dalam proses pelarutan mi- neral atau batuan secara alami adalah air. Molekul air mempunyai dua kutub bermuatan (kovalen dipolar), yaitu muatan agak positif pada dua atom hidrogen- nya dan agak negatif pada atom oksigennya. Adanya dua jenis muatan itu, air mampu melarutkan kation maupun anion dari mineral atau batuan. Selain itu, molekul air dapat bereaksi dengan gas CO2, H2S, dan NH3 di atmosfir dan dihasilkan asam karbonat, sulfat, dan nitrat sehingga air tersebut bertambah masam dan menjadi lebih efektif sebagai pelarutan mineral atau batuan secara alami. Berdasarkan penjelasan itu, pelarut yang polar (H2O) lebih efektif sebagai pelarut mineral/batuan daripada larutan non-polar (misalnya ethanol); dan pelarut yang masam lebih efektif daripada yang kurang masam. Berkaitan dengan jenis pelarut organik, Huang & Kiang (1972) menunjukan urutan efektivitas beberapa jenis asam organik sebagai pelarut mineral Ca-plagioklas: asam asetat < asam aspartat < asam salisilik < asam sitrat. d. Ukuran partikel Pengaruh ukuran partikel batuan terhadap kela- rutannya berkaitan dengan permukaan efektif partikel tersebut. Makin halus partikel itu, makin luas permu- kaan efektifnya sehingga makin banyak bagian dari pertikel itu bersentuhan atau bereaksi dengan zat pelarutnya sehingga makin tinggi laju pelarutan par- tikel tersebut. Dari aspek praktis pemanfaatan bahan geologis sebagai pupuk, penggilingan intensif (high- energy milling) merupakan salah satu cara untuk me- ningkatkan efektivitas pupuk batuan dalam bentuk bubuk (nano particles). Metode penggilingan batuan akan dibahas lebih detail pada Bab 6 dalam buku ini. e. Tingkat kristalinitas partikel mineral Kesempurnaan struktur kristal mineral menyu- sun batuan, sampai tingkat tertentu menentukan mu- dah - tidaknya mineral tersebut terlarutkan. Contoh pelarutan kinetik pada mineral K-feldspar yang berbe- da tingkat kristalinitasnya karena digiling dengan ball mill disajikan pada Gambar 11. Sudut 2θ (derajad) GamGbaarm7b.Paorla1X1R.DPomlianeXraRlKD-femldisnpearraylanKg-dfeiglidlinsgpdaernygaannbgadllimgiilllisneglama 1d0e,n6g0,andanba1I2I0mmilinliste(sleabmelaah1k0ir,i)6d0a,n dpaolna I1a2ju0pemlaeruntaitnn(syaebdeallaamh aksiarmi) asetdaat+napsaomlaolkasjaulatp0e,1laNru(ktaannann)y(aPrdiyaonlaom,20a0s5a).m asetat + asam oksalat 0,1 N (sebelah kanan) (Priyono, 2005a) Penggilingan menyebabkan makin halus partikel dan rusaknya kristal mineral K-feldspar ditunjukkan dengan makin menurunnya intensitas dan melebarnya pola difraksi sinar X (Gambar 11 sebelah kiri). Keru- sakan kristal mineral tersebut (sampai batas tertentu) diikuti dengan meningkatnya laju pelarutan kation K+ dari K-feldspar (Gambar 11 sebelah kanan). Namun perlu dicatat bahwa pengaruh dari meningkatnya intensitas penggilingan, atau tingkat kerusakan struk- tur mineral atau batuan akibat penggilingan, tidak selalu diikuti oleh peningkatan laju pelarutan unsur hara yang sama. Bahkan, penggilingan yang terlalu intensif justru dapat menurunkan laju pelarutan un- sur hara, karena terjadinya 'sintering' atau 'angglo- merasion'. Kapan penggilingan tersebut dikatakan optimal (laju pelarutan unsur hara atau batuan maksimal), masing-masing jenis mineral/batuan mempunyai waktu penggilingan kritikal yang berbeda, tergantung pada jenis (kharakteristik) mineral yang digiling dan kondisi (setting) alat gilingnya. C. Pelarutan Batuan dalam Tanah Tanah dapat berperan sebagai media pelarut mi- neral/batuan induk tanah, maupun bubuk batuan yang diaplikasikan sebagai pupuk pada tanah terse- but. Karena tanah merupakan suatu sistem yang kompleks, terlebih lagi sistem 'tanah – tanaman', me- kanisme pelarutan batuan pada sistem tersebut tidak mungkin dijelaskan secara sederhana seperti pada pelarutan menggunakan asam organik atau anorganik murni di laboratorium. Mekanisme reaksi asam - basa, pertukaran, redoks, dan pembentukan ligand 'logam – organik' dapat terjadi secara bersamaan pada proses pelarutan batuan dalam sistem tanah atau 'tanah – tanaman' (rizosfir). Selain itu, banyak agen pelarut yang terlibat yang harus diperhitungkan, ter- utama asam organik yang ada di tanah yang sangat beragam dan yang berasal dari akar (eksudat) tanam- an. Serapan hara oleh tanaman yang tumbuh pada tanah tersebut juga mempengaruhi laju pelarutan un- sur hara dari bahan induk tanah atau pupuk batuan yang diaplikasikan. Seperti telah dijelaskan di depan bahwa masalah lambatnya pelarutan unsur hara dari pupuk batuan merupakan faktor pembatas efektivitas pupuk batuan tersebut sebagai pemasok unsur hara yang dibutuh- kan oleh tanaman. Hasil penelitian pelarutan mineral dengan larutan murni (Welch & Ullman, 1992, 1996; Blake & Walter, 1999; Zhang & Bloom, 1999; Oelkers & Gislason, 2001) menunjukkan bahwa asam organik lebih efektif daripada asam anorganik sebagai pelarut bahan geologis tersebut. Hasil penelitian pelarutan bubuk batuan di dalam tanah (Priyono, 2005a; Priyatna et al., 2007) menunjukan bahwa konsentrasi asam organik dan pH tanah mempunyai peran domi- nan dalam proses pelarutan unsur hara dari bubuk batuan tersebut. Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa pada pelarutan dengan asam organik terlibat meka- nisme pembentukan ligand 'logam - organik' (Shotyk & Nesbitt, 1992); dan mekanisme tersebut dipengaruhi oleh pH larutan (Ludwig et al. 1996). Laju pelarutan meningkat secara linier dengan makin menurunnya pH (Amrhein dan Suarez, 1988). Mekanisme pening- katan laju pelarutan melalui pembentukan kompleks Al - organik dapat terjadi hanya pada kondisi masam (pH < 5) (Stumm & Furrer 1987); tetapi mekanisme itu tidak terjadi pada pH sekitar netral (Ludwig et al., 1996) karena pada pH netral, kompleks Si - organik di permukaan mineral tidak stabil (Driscoll et al., 1985). Peneliti lain (Stumm & Furrer, 1987; Wieland et al., 1988) menunjukan bahwa mekanisme koordinasi ligan Si - organik sangat mempengaruhi pelarutan silika. Menurut Bennett (1991), ada mekanisme interaksi ligan organik di dalam kristal mineral dan proses itu dapat melemahkan kerangka struktur mineral tersebut. Asam organik di dalam tanah dapat berasal dari dekomposisi bahan organik, hasil metabolism mikro organisme, dan eksudasi dari akar (Stevenson & Arkadani, 1972). Menurut hasil penelitian Jones (1988), konsentrasi asam organik di dalam tanah sangat beragam dari mendekati nol sampai ratusan μm.L- larutan tanah. Di antara asam organik tersebut, asam asetat merupakan asam organik yang paling lemah, sedangkan asam sitrat adalah yang paling kuat sebagai pelarut unsur logam dari mineral (Huang & Kiang, 1972). Hasil penelitian tentang pelarutan bubuk batuan pada sistem 'tanah – tanaman' (rizosfir) merupakan gambaran yang lebih riel tentang efektivitas penggu- naan bubuk batuan sebagai pupuk dalam usaha tani. Hasil penelitian Priyono (2005a) yang menggunakan bubuk batuan basalt, dolerit, gneiss, dan mineral K- felsdspar menunjukan bahwa semua jenis bubuk ba- tuan itu tidak hanya berperan sebagai sumber hara bagi tanaman, tetapi juga sebagai bahan pengapuran (liming material) yang dapat digunakan untuk mening- katkan pH tanah. Hal serupa dilaporkan oleh peneliti sebelumnya, antara lain Leonardos et al. (1987), Gillman (1980), Gillman et al. (2001, 2002), dan Coventry et al. (2002), Sanz Scovino & Rowell (1988), dan Bakken et al. (2000). Peningkatan pH tanah (se- bagai media pelarutan bubuk batuan) tentu akan menghambat proses pelepasan unsur hara (kation) dari batuan ke larutan tanah. Selain itu, konsentrasi unsur hara yang sudah ada di dalam tanah (media pelarut) juga akan menghambat pelarutan unsur hara dari bubuk batuan yang diaplikasikan pada tanah tersebut. Pelarutan unsur hara dari bubuk batuan di da- lam tanah yang masam atau/dan miskin hara lebih cepat daripada di dalam tanah yang bereaksi netral - alkalin dan subur. Implikasi praktisnya, pupuk batu- an dalam bentuk bubuk tersebut akan lebih efektif jika diaplikasikan pada tanah yang bermasalah keha- raan (masam atau/dan miskin hara) daripada tanah yang normal atau subur. BAB V BATUAN INDUK TANAH MINERAL A. Bahan Induk Tanah Tanah dapat dikelompokan menjadi dua berda- sarkan jenis bahan induknya, yaitu tanah mineral dan tanah organik. Berdasarkan definisi Soil Survey Staffs - USDA (2014), bahan (induk) tanah mineral adalah bahan padatan yang mengandung unsur karbon (C) < 12 % jika kadar liat (clay)-nya 0, atau < 18 % jika kadar liatnya > 60 %. Dari definisi itu dapat diformu- lasikan bahwa bahan (induk) tanah mineral mengan- dung C (%) < 12 + 0,1 kadar liat (%). Jika kadar C- organiknya bahan padatan itu lebih tinggi dari nilai tersebut dikategorikan sebagai bahan tanah organik. Sesuai dengan cakupan buku ini, maka yang dibahas dalam bab ini adalah bahan induk untuk tanah mine- ral, yaitu padatan anorganik atau batuan. Seperti telah dibahas pada Bab 3, bahan induk tanah mineral (batuan) dapat dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan proses pembentukannya, yaitu batuan beku, endapan, dan metamorf. Selain itu, ba- han induk tanah mineral juga dapat dikelompokan berdasarkan tempat asalnya, yaitu bahan induk yang menetap (sedentary) dan bahan induk yang terpin- dahkan (transforted). Bahan induk menetap berada di tempat aslinya, merupakan bahan induk residual yang kemudian terlapuk membentuk tanah di situ. Bahan induk terpindahkan adalah bahan induk yang terpin- dahkan dari tempat aslinya, kemudian membentuk ta- nah di tempat yang baru. Berdasarkan jenis energi yang bekerja pada pro- ses pemindahannya, bahan induk terpindahkan dapat dikelompokan lebih lanjut menjadi bahan induk (1) kolovial, (2) alluvial, (3) marin, (4) lakustrin, (5) gla- sial, dan (6) eolin. Proses pemindahan bahan induk dari tempat semula menyebabkan terjadinya beberapa perubahan sifat semula, sesuai dengan proses dan jenis energi yang memindahkan bahan induk tersebut (Tabel 15). Batuan yang terpindahkan minimal mengalami perubahan ukuran partikelnya. Pada batuan induk koluvial, perubahan ukuran terjadi dari bongkahan besar menjadi lebih kecil dengan bentuk tak teratur (tajam atau rigit) karena jatuh dari tempat aslinya yang lebih tinggi dan pecah. Tetapi sifat kimianya rela- tif sama seperti di tempat asalnya. Perubahan ukuran batuan induk tersebut kemungkinan berpengaruh pa- da sifat fisik tanah yang terbentuk, yaitu ukuran struktur tanah (pad) yang lebih kecil daripada struktur tanah yang terbentuk dari batuan induk asli- nya (tidak terpindahkan). Tabel 13. BahaTnainbdeulk1ta5n.ahBmaihnearnalinduk tanah mineral No Jenis Bahan Induk Tenaga Proses dan Kharakterisitik Pemindah 1. Bahan induk menetap (sedentary) 2. Bahan induk terpindahkan (transformed): a. Kolovial b. Aluvial c. Marin d. Lakustrin e. Glasial f. Eolin - ? Menetap, sifat sesuai aslinya. ? Ukurannya umumnya besar (bongkahan): batuan beku, endapan dan metamorfik. ? Batuan terpindahkan oleh pro- ses erosi, transportasi, dan sedimentasi. Gravitasi bumi ? Terjadi di sekitar tebing/lereng yang curam. ? Pecahan batuan kasar, sifat kimia sama dengan aslinya Erosi air ? Terangkut oleh erosi air, dien- dapkan di bagian lereng bawah (datar); berlapis-lapis, ukuran partikel beragam, acak. Pengendapan ? Pengendapan dan pembentu- di laut kan batuan/mineral di laut (ter- masuk kapur dan dolomit). Pengendapan ? Pengendapan dan pembentuk- di danau an (sintesis) bahan baru di da- sar danau. Pencairan es ? Terpindahkan oleh proses pen- cairan es skala besar. ? Sifat kimianya tidak banyak berubah dari aslinya Erosi angin ? Erosi dan transfortasi oleh angin, dan pengendapan ? Ukuran partikel kasar (pasir – debu) Pada batuan induk aluvial, perubahan sifat fisik dan kimia dapat terjadi dengan intensitas perubahan sesuai dengan posisi dan kemiringan lereng dimana material yang terbawa oleh aliran air itu diendapkan. Intensitas perubahan sifat bahan alluvial yang dien- dapkan di lereng atas dan miring, relatif kecil diban- dingkan dengan yang diendapkan di lereng bagian ba- wah yang lebih datar dimana ukuran partikelnya men- jadi makin halus dan lebih kaya unsur hara esensial. Tanah yang terbentuk dari bahan induk alluvial umumnya sangat subur. Batuan endapan marin adalah bahan endapan yang terakumulasi di lingkungan laut, kemudian en- dapan tersebut terekspos ke permukaan laut melalui proses angkatan (uplifted) atau menurunnya permu- kaan air laut. Partikel endapan marin umumnya ber- ukuran liat (clay), mengandung beberapa kulit kerang, sangat asin, dan umumnya tidak berlapis-lapis. Tanah yang terbentuk dari bahan marin umumnya bersifat sodik atau salin - sodik. Jika bahan tererosi oleh air tersebut diendapkan di danau disebut bahan endapan lakustrin, berupa partikel halus (pasir halus, debu, dan liat). Bahan lakustrin tersebut terekspos ke at- mosfir oleh proses angkatan atau lipatan dasar danau, berlapis-lapis sesuai dengan proses pengendapan ba- han aluvial. Batuan induk endapan glasial terbentuk di dae- rah dekat kutub, misalnya di Canada dan Alaska (Krzic et al., 2009). Bahan tersebut diendapkan lang- sung dari es glasial dan strukturnya beragam dari agak lepas (di bagian atas/permukaan bumi) hingga kompak (di bagian lebih dalam). Bahan fluvial glasial diendapkan oleh pencairan glasial di dataran banjir (floodplain). Endapan itu terdiri atas butiran pasir

kasar dan kerikil dengan beragam bentuk. Endapan glasial dapat tererosi dan diendapkan di danau menja- di batuan induk endapan glasial-lakustrin. B. Dari Batuan Menjadi Tanah Pembentukan dan perkembangan tanah dipenga- ruhi oleh 5 faktor pembentuk tanah (Jenny, 1941). Dengan kata lain, tanah merupakan fungsi dari bahan induk (B), iklim (I), topografi (T), organisme (O), dan waktu (W): Tanah = f (B, I, T, O, W). Tanah Regolit Batuan Batuan Regolit Tanah Gamb9a.r I1lu2st.raIsluispt rorasessi tpaehmabpenatnukapnrotsaenashpmeminebrealn,tduakriabnontgaknaahhan bmatuinanerteatla,pd(taarkitebropinndgakhakhana)nmbenajatudiatannatahk terpindahkan menjadi tanah Pada Gambar 12 diilustrasikan bongkahan batu- an yang mengalami proses pelapukan menjadi regolit, kemudian dari regolit menjadi tanah. Bahan induk be- rupa bongkahan batuan mengalami pelapukan (disin- tegrasi) mejadi pecahan batuan kasar dan halus (regolit) yang sifatnya masih seperti batuan induk; kemudian regolit mengalami proses lebih lanjut menjadi tanah. Dalam proses pelapukan batuan induk Gambar 10. Contoh beberapa profil tanah mineral yang terbentuk dari bahan induk pindahkan. Bahan pindahan dapat berupa batuan kasar ataupun bahan tanah yang halus yang teArbgarwogaeoolleohgi,pProesmesanefraoasti,ankeBmautduiaann d…iend1ap1a5n menjadi bahan induk tanah baru. menjadi tanah, faktor iklim (terutama aspek suhu dan kelembaban/air), organisme, dan topografi bekerja pada material regolit dan tanah. Oleh karena itu, bahan induk dan waktu dapat dikategrikan sebagai faktor pembentuk tanah pasif, sedangkan iklim, topografi, dan organisme sebagai faktor pembentuk tanah aktif. Pada tanah Aluvial (Fluvents), bahan induk ta- nah tersebut berupa bahan endapan anorganik (batu, kerikil, debu, ataupun liat) yang dipindahkan melalui proses erosi dari tempat lain. Profil tanah Alluvial (Gambar 13) terbentuk dari bahan alluvial. Setiap lapisan pada suatu profil tanah itu tampak berbeda- beda dan tidak ada pola tertentu. Ukuran bahan yang diendapkan tergantung pada intensitas energi peng- angkut pada setiap kali terjadi erosi – transfortasi – pengendapan. Energi erosi yang tinggi dapat memin- dahkan bahan berukuran besar (partikel/batuan ka- sar); sebaliknya, energi erosi yang rendah/kecil hanya mampu memindahkan partikel ukuran kecil dan ri- ngan. Batas antar lapisan tanah tersebut tampak jelas dan rata. Meskipun beberapa lapisan itu terdiri atas bahan halus (partikel primer tanah, yaitu pasir, debu, dan liat), material tersebut tetap dianggap sebagai bahan induk tanah yang akan berkembang di situ. Batuan Regolit Tanah Gambar 9. Ilustrasi proses pembentukan tanah mineral, daJroikbooPnrgikyaohnaon batuan tetap (tak terpindahkan) menjadi tanah GamGbaamr1b0a.rCo1n3to.hCboenbetorahpabperbofeilrtaanpaahpmrionefirlaltyaannaghtemrbeinnteurkadlayriabnahgan indtuekrpbinednathukkand.Baarhiabnaphinadnahianndduapkaptbinerdupaahbaantu.aBnakhasaanraptaiunpduanhbaahnan tdaanaphatyabnegruhpalausbyaatnuganterkbaawsaaroaletthaupr pousens hearolsui,s kyeamnugdiatenrdbiaenwdaapaainr mepnajaddiabaphraonsiensduekrtoasnaihkbeamruu.dian diendapkan menjadi bahan induk tanah yang baru. Meskipun solumnya dalam, tanah tersebut tetap dianggap sebagai tanah yang belum berkembang seca- ra pedogenik, sehingga diklasifikasikan ke dalam ordo Entisol (diambil dari bagian kata 'recent' = baru, dan sol = tanah) dan sub ordo Fluvent (Entisol yang ter- bentuk melalui proses pengendapan/fluviasi). Kharakteristik batuan induk sangat menentukan sifat tanah yang terbentuk dari batuan itu, terutama pada tahap awal perkembangan tanah (ordo Entisol atau Inceptisols). Pada tahap perkembangan lebih lan- jut (ordo Ultisol dan Oksisol), kontribusi pengaruh dari faktor lingkungan (iklim, topografi, dan organisme) terhadap sifat dan ciri tanah makin intensif (sesuai dengan kondisi setempat) menutupi dominasi penga- ruh dari bahan induk. Kharakteritisik tanah tersebut ditentukan oleh hasil kerja kolektif dari semua faktor pembentuk tanah. Proses pelapukan batuan induk hingga menjadi tanah dapat terjadi secara fisik (mekanik), kimia, dan biologi; ketiganya sulit dipisahkan karena secara alami proses itu berjalan simultan. Namun, intensitas ma- sing-masing proses pelapukan tersebut pada setiap tahapan perkembangan tanah dapat berbeda dari satu tempat ke tempat lain, tergantung pada kondisi faktor pembentuk tanah di masing-masing lokasi. Pelapukan batuan secara fisik dapat terjadi kare- na (1) perubahan suhu udara pada siang hari (panas) dan dingin (malam hari) menyebabkan terjadinya pe- muaian – pengkerutan batuan, (2) tetesan air hujan, dan (3) penetrasi akar tanaman ke dalam bongkahan batuan. C. Sifat Batuan Induk dan Tanah Batuan induk merupakan faktor genetis tanah mineral yang terbentuk dari batuan tersebut, sehingga kharakteristik batuan induk akan sangat menentukan sifat alami tanah yang terbentuk, terutana pada ting- kat awal perkembangan tanah tersebut. Pada tingkat perkembangan lebih lanjut dimana telah terjadi proses iluviasi dan eluviasi misalnya, pengaruh faktor ling- kungan (iklim, topografi, dan organisme) dalam me- nentukan sifat tanah menjadi lebih intensif. Adanya keragaman jenis bahan induk tanah dan kondisi lingkungan menyebabkan terbentuknya beragam jenis tanah di dunia yang ada saat ini. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, pengaruh setiap faktor pembentuk tanah (lingkungan) terhadap sifat tanah yang terbentuk dari suatu jenis batuan, sulit dipisahkan karena faktor itu saling terkait dan saling berpengaruh (interdepency). Kombinasi kondisi (intensitas pengaruh) faktor pembentuk tanah sangat banyak, tentu saja banyak pula kemungkinan hu- bungan antara jenis batuan induk dengan sifat dan ciri tanah yang terbentuk pada lingkungan yang be- ragam. Hubungan antara faktor genetis (batuan in- duk) dengan sifat dan ciri tanah yang terbentuk dije- laskan secara ringkas dalam Tabel 16. Pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa kandungan unsur hara dominan pada jenis batuan terlihat pada rumus kimia mineral utama penyusun batuan itu. Batuan beku basaltik, misalnya berwarna gelap kare- na tersusun dari mineral ferromagnesium silikat yang berwarna hitam, kaya Mg, Fe, dan unsur mikro Mn, Zn, dan Cu. Mineral tersebut relatif mudah terlapuk karena banyak terjadi substitusi isomorfik pada struk- tur dasarnya sehingga mudah hancur oleh faktor ling- kungan. Tanah yang terbentuk tentu kaya unsur hara tersebut; dan mineral sekunder (liat) yang terbentuk terutama adalah tipe 2:1 (smektit), nilai KTK tinggi, relatif subur. Dalam proses perkembangannya, ter- utama jika berada di daerah beriklim basah, curah hujan tinggi menyebabkan pencucuian material tanah Tabel 16. Hubungan antara jenis bahan induk dengan kemungkinan sifat dan ciri tanah yang Tabel 16. (Lanjutan) (clay) dan unsur hara yang intensif. Kation basa ba- nyak tercuci dan tersisa senyawa kompleks yang sta- bil/tidak mudah terlapuk, yaitu oksida dan hidrok- sida Al, Fe, Mn, Zn, dan Cu, warna cerah (coklat, ku- ning, dan kemerahan) dominan (ordo Ultisols dan Oksisol). Sebaliknya, batuan felsik (misalnya granit, batu apung, atau gneiss), kaya mineral silisius (kwar- sa dan K-feldspar), berwarna pucat (terang/bening), miskin kation basa (Ca, Mg) maupun mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu), tetapi kaya K dan Si. Mineral tersebut relatif sulit terlapuk karena tersusun oleh tetrahedral silikat yang sempurna (sedikit terjadi substitusi iso- morfik). Tanah yang terbentuk dari batuan felsik ter- sebut umumnya miskin kation (unsur hara) basa, kecuali K, miskin unsur hara mikro. Karena mineral- nya relatif sulit terlapuk, tekstur tanahnya umumnya pasiran (ordo Entisols, sub ordo Psamment). Tanah yang terbentuk dari jenis batuan inter- medier (antara mafik dan feksik), tentu sifatnya bera- da di antara sifat tanah yang terbentuk dari batuan mafik dan dari batuan felsik. Tekstur tanah tersebut umumnya sedang – lempungan (loamy), kandungan kation basa/makro maupun mikronya cukup (sedang). Sifat tanah semacam itu yang umumnya dikehendaki oleh sebagian besar jenis tanaman; tidak terlalu basa atau masam, teksturnya tidak terlalu halus (berliat) maupun kasar (pasiran), tetapi sedang (lempungan). D. Peremajaan Tanah Peremajaan tanah (soil rejuvenation) adalah sua- tu cara atau teknologi untuk memulihkan kondisi tanah yang kualitasnya sudah terlalu rendah atau tua, nutrisi dari batuan induk mineral primernya di zona perakaran sudah habis. Tanah itu sudah tidak dapat berfungsi optimal sebagai pemasok unsur hara bagi tanaman yang bersumber dari bahan induk. Tanah semacam itu perlu diremajakan dengan me- nambahkan bahan induk (batuan) yang baru (fresh). Seperti telah dijelaskan sebelumnya, batuan in- duk sangat menentukan sifat tanah yang terbentuk, baik sifat fisik, kimia, maupun biologi. Perubahan atau perbaikan mendasar yang diperlukan pada tanah yang miskin hara yang disebabkan oleh faktor genetis, faktor lingkungan, maupun oleh karena salah kelola dapat dilakukan melalui perbaikan pada bahan induk- nya yang berperan sebagai sumber utama unsur hara bagi tanaman yang tumbuh pada tanah itu. Jadi, pe- remajaan tanah adalah bagian dari teknologi rekla- masi atau remediasi tanah yang lebih difokuskan pada upaya perbaikan dan pengkayaan kembali kandungan unsur hara pada bahan induknya, mengembalikan kondisi tanah untuk menjadi lebih baik, mempunyai cadangan unsur hara esensial yang tinggi. Peremajaan tanah dengan bubuk batuan volka- nik yang masih segar telah lama dilakukan pada ta- nah yang secara alami sudah sangat tua (berkembang lanjut), misalnya yang termasuk dalam ordo Ultisol dan Oksisol (tanah Lateritik atau Podzolik). Contoh tanah lain yang perlu diremajakan adalah tanah yang terbentuk dari batu apung, kwarsa, atau granit yang secara alami memang miskin hara makro maupun mikro. Tanah yang terbentuk dari batu kapur, kaya Ca atau/dan Mg, tetapi miskin K dan unsur hara mikro (Fe, Zn, dan Cu). Tanah semacam itu perlu dire- majakan, diperkaya dengan batuan yang kaya unsur hara yang lain yang tidak terdapat pada batuan induk aslinya tanah tersebut. Untuk peremajaan tanah ter- sebut dapat digunakan misalnya batuan basaltik atau andesitik. Hasil positif dari penerapan teknologi peremajaan tanah ditunjukkan oleh beberapa peneliti. Pada ta- naman tebu di Mauritius, de Villier (1948) meng- aplikasikan bubuk batuan basalt (+ 180 ton/ha), dan perlakuan tersebut mampu meningkatkan produksi tebu selama beberapa tahun. Marten-Lake (1950) me- nunjukan bahwa tanaman tebu ratun sangat responsif terhadap pemberian pupuk N, P, K pada tanah yang telah diberi bubuk batuan basalt; sedangkan Coventry et al. (2001) meningkatkan produktivitas dan memper- baiki sifat tanah lateritik di Quensland yang direma- jakan dengan batuan basalt (MinplusMT). Aplikasi bu- buk batuan gneiss atau K-feldspar sebagai sumber hara K (Priyono dan Gilkes, 2008), efektif meningkat- kan pertumbuhan dan kadar K tersedia tanah pasiran yang miskin K. Hasil penelitian lain yang dilakukan di Lombok Utara (Priyono et al., 2009) menunjukan bahwa pemberian bubuk batuan silikat basaltik yang dikombinasikan dengan bahan organik (kompos) da- pat meningkatkan produktivitas tanah yang berbahan induk batu apung (miskin Ca, Mg, Fe, Zn, dan Cu). Pemilihan jenis batuan sebagai peremaja tanah yang tidak tepat dapat menyebabkan kegagalan pere- majaan tersebut. Misalnya, penggunaan batuan granit sebagai bahan peremaja tanah lateritik dinilai tidak efektif (Coroneus et al., 1996; Bolland et al., 2000). Hasil negatif tersebut karena unsur hara yang disum- bangkan oleh batuan granit (didominasi oleh mineral kwarsa dan feldspar) relatif rendah dan sulit terla- rutkan. Kelemahan utama dari teknik peremajaan tanah dengan bubuk batuan seperti dijelaskan di atas ada- lah dosis bubuk batuan yang harus diaplikasikan sangat tinggi, yaitu > 20 ton/ha untuk bubuk batuan yang partikelnya < 50 µm; atau > 5 ton/ha untuk bubuk batuan berukuran < 30 nm (Priyono et al., 2009). Dosis tersebut tentu sulit diterapkan oleh petani kecil untuk peremajaan tanah pada areal ta- naman pangan. Alternatif yang dapat diterapkan oleh petani adalah pemberian bahan amelioran (bubuk ba- tuan) tersebut secara bertahap; atau diterapkan pada usaha tani dengan luas areal terbatas, misalnya pada areal taman atau tanaman dalam pot. Oleh karena itu, penggunaan partikel batuan terutama direkomenda- sikan untuk diterapkan pada perkebunan besar yang berorientasi produksi jangka panjang. Peremajaan tanah menggunakan bubuk batuan volkanik mempunyai banyak keuntungan potensial, antara lain (1) meningkatkan stok unsur hara makro (selain N) dan mikro yang lambat tersedia bagi tanam- an sehingga tidak mudah hilang tercuci maupun ter- erosi, (2) menetralkan pH tanah masam, (3) mening- katkan kuantitas dan kualitas produksi, (4) mening- katkan resistensi tanaman terhadap serangan hama dan penyakit tanaman (karena pasokan unsur Si), dan (4) mengurangi penggunaan pupuk sintetis. Berdasar- kan pertimbangan tersebut, teknologi peremajaan ta- nah dapat dijadikan sebagai alternatif untuk meng- atasi beberapa masalah usaha tani secara simultan. BAB 6 PUPUK DAN AMELIORAN A. Pengertian Pupuk dan Amelioran Pupuk adalah bahan organik maupun anorganik dalam bentuk padat maupun cair yang mengandung satu atau lebih jenis unsur hara esensial yang umum- nya digunakan untuk memenuhi kekurangan unsur hara tanaman sehingga tanaman tersebut dapat tum- buh dan berproduksi optimal. Amelioran (pembenah tanah) adalah bahan organik maupun anorganik yang diaplikasikan melalui tanah untuk memperbaiki atau mengembalikan kodisi (sifat kimiawi, fisik, maupun biologis) tanah yang bermasalah pada salah satu atau gabungan dari beberapa aspek kesuburan tersebut, sehingga tanah tersebut dapat berfungsi optimal seba- gai media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi ta- naman yang tumbuh pada tanah tersebut. Berdasarkan definisi di atas dapat dikatakan bahwa pupuk adalah bahan amelioran yang berisi ter- utama unsur hara esensial dan digunakan khusus untuk memenuhi kekurangan (kekahatan) unsur hara tertentu yang dibutuhkan oleh tanaman. Namun da- lam praktek usaha tani, bahan amelioran umumnya digunakan untuk mengatasi masalah tanah yang dise- babkan oleh faktor lain selain kekurangan unsur hara esensial. Misalnya, tanah yang terkontaminasi oleh limbah industri tambang logam (tailing), tanah ma- sam, atau tanah garaman. Banyak jenis bahan ame- lioran dapat berfungsi ganda atau jamak, yaitu seba- gai pembenah tanah dan pemasok unsur hara tanam- an. Misalnya, bahan kapur CaCO3 atau (Ca,Mg)CO3, umumnya digunakan untuk meningkatkan pH tanah masam (pengapuran), tetapi juga untuk memasok unsur hara Ca atau/dan Mg bagi tanaman. Contoh lain, kompos (bahan organik) dapat berfungsi sebagai amelioran, yaitu perekat partikel primer tanah (men- stimulir proses granulasi), meningkatkan daya tanah untuk menahan air (water holding capacity), serta pen- jerap logam berat, sekaligus dapat berfungsi sebagai pupuk - memasok beragam jenis unsur hara esensial ke tanaman. Dalam bab sebelumnya telah dibahas tentang unsur hara dan masalah yang sering muncul dalam usaha tani yang berkaitan dengan kebutuhan unsur hara esensial bagi tanaman. Permasalahan usaha tani tersebut dapat muncul karena sifat bawaan (in herent) dari media tumbuh (yaitu batuan induk) dan faktor lingkungan pembentuk tanah, cara pemanfaatan dan pengelolaan lahan, atau kombinasi kedua faktor terse- but. Masalah tersebut umumnya dapat diatasi melalui tindakan pemupukan atau/dan remediasi (penormal- an kondisi tanah) menggunakan bahan amelioran. Bahan geologis (batuan) merupakan salah satu bahan alami yang potensial dapat dimanfaatkan untuk mengatasi masalah lahan tersebut, baik sebagai pu- puk, amelioran, maupun sekaligus berfungsi ganda sebagai pupuk dan amelioran. Mineral umumnya hanya mengandung 1 – 3 jenis unsur hara esensial, sedangkan batuan, karena terdiri atas beberapa jenis mineral, mengandung lebih ba- nyak jenis unsur hara esensial. Misalnya, mineral feldspar mengandung unsur hara esensial K dan fung- sional Si, sedangkan batuan basalt mengandung ba- nyak jenis unsur hara esensial - unsur hara makro (Ca, Mg, dan K) maupun mikro (Fe, Zn, dan Cu) serta unsur fungsional Si. Berdasarkan kandungan unsur haranya, bahan geologis sangat potensial untuk digu- nakan sebagai bahan baku pupuk atau langsung se- bagai pupuk dan amelioran. Bahkan, beberapa jenis mineral dan batuan telah umum dimanfaatkan seba- gai bahan baku atau digunakan secara langsung (da- lam bentuk bubuk halus) sebagai pupuk. Misalnya, mineral sylvite (KCl), K-feldspar, dan biotit sebagai bahan baku pembuatan pupuk K, sedangkan mineral apatit digunakan sebagai bahan pupuk atau langsung sebagai pupuk fosfat. Bahan geologis yang belum ba- nyak dimanfaatkan dalam bidang pertanian adalah batuan silikat atau volkanik yang tersusun dari ber- bagai jenis mineral. Batu kapur (CaCO3) dan dolomit ((Ca,Mg)CO3) umumnya digunakan sebagai bahan penetral tanah masam, sedangkan gipsum (CaSO4) digunakan sebagai penetral tanah garaman. Mekanismenya, batuan ka- pur bereaksi dengan air menghasilkan ion OH- yang menetralkan kemasaman tanah (H+); sedangkan gip- sum terdisosiasi oleh air menjadi ion Ca+2 dan asam sulfat (SO4-2). Selanjutnya, peningkatan konsentrasi ion Ca+2 menurunkan aktivitas Na+, sedangkan pe- ningkatan konsentrasi SO4-2 menurunkan pH tanah alkalin (garaman). Pada beberapa dekade terakhir, banyak peneliti berinovasi untuk memanfaatkan batuan silikat seba- gai pupuk maupun amelioran yang efektif, karena batuan silikat tersedia melimpah, mengandung bera- gam jenis mineral dan unsur hara esensial. Batuan silikat (dalam bentuk partikel halus) dapat digunakan secara langsung maupun diproses terlebih dahulu secara fisik (high-energy milling) dan kimiawi (ekstraksi unsur hara dalam batuan) untuk menjadi pupuk multi nutrisi. Pupuk berbasis batuan silikat relatif baru diperkenalkan ke masyarakat dan masih perlu pengembangan lebih jauh. Oleh karenanya topik itu dibahas secara khusus dalam buku ini (Bab 7). B. Jenis dan Sifat Pupuk Pada saat ini telah dikenal berbagai macam jenis pupuk yang beredar di pasar dan telah digunakan secara rutin oleh petani. Beragam jenis pupuk terse- but dapat dikelompokan berdasarkan beberapa aspek. Berdasarkan wujudnya, pupuk dapat dipilah menjadi tiga, yaitu pupuk granular (granule), bubuk (powder), dan cair (liquid). Berdasarkan proses pembuatannya, pupuk dapat digolongkan menjadi dua, yaitu pupuk sintetis (syntetic fartilizers) dan alami (natural fertili- zers); sedangkan berdasarkan bahan baku utamanya, pupuk dapat dikelompokan menjadi tiga, yaitu pupuk organik (organic fertilizers), anorganik (inorganic fertili- zers), dan pupuk hayati (biofertilizers). Berdasarkan jumlah jenis unsur hara utamanya, dikenal pula pu- puk tunggal (single nutrient fertilizer) – mengandung satu unsur hara utama, dan pupuk majemuk (multi nutrient fertilizer) – mengandung dua atau lebih jenis unsur hara esensial. Berdasarkan cara aplikasinya, ada tiga cara, yaitu pemupukan melalui daun (foliar fertilization), disuntikan atau in push melalui batang tanaman, dan pemupukan melalui tanah. Pada sistim hidroponik, pupuk dilarutkan dan diserap oleh akar tanaman dari media tumbuh tanaman berupa larutan pupuk lengkap yang diatur terus mengalir. Di tengah- tengah masyarakat petani juga dikenal istilah 'pupuk kimia' (contohnya urea, TSP, dan KCl) dan pupuk 'non-kimia' (mencakup pupuk organik, pupuk alami, dan hayati). Sebenarnya istilah jenis pupuk tersebut (kimia vs non-kimia) kurang tepat, karena semua pu- puk tersebut terdiri atas zat/unsur kimiawi, baik or- ganik maupun anorganik. Yang dimaksud adalah pu- puk sintetis, dan lawannya adalah pupuk non-sintetis atau pupuk alami. Pertanyaan yang sering muncul di masyarakat adalah, jenis pupuk apa yang baik atau tepat untuk digunakan dalam usaha tani? Tentu saja jawaban yang tepat tergantung pada kondisi setempat, terutama berkaitan dengan permasalahan keharaan yang ada pada tanah dan jenis tanaman yang diusahakan. Selain itu, aspek praktis yang berkaitan dengan ketersediaan jenis pupuk, kemudahan dan efektivitas penerapannya oleh petani harus menjadi pertimbangan dalam pembuatan rekomendasi peng- gunaan jenis pupuk untuk petani yang kondisi lahannya beragam. 1. Pupuk Sintetis vs Alami Pupuk sintetis adalah pupuk yang dibuat dari bahan mineral atau gas melalui serangkaian proses fisik maupun kimiawi sehingga dihasilkan bahan lain (berubah wujud aslinya), mengandung unsur hara ter- tentu dengan kadar lebih tinggi daripada di bahan bakunya. Tujuan dari pemrosesan tersebut adalah untuk memurnikan, meningkatkan kadar unsur hara- nya, atau/dan mengubah komposisi kimianya yang kompleks dan sulit terlarutkan menjadi lebih seder- hana dan mudah larut dalam air atau tersedia bagi tanaman. Beberapa pupuk sintetis yang umum digu- nakan oleh petani disajikan di Tabel 17. Perbedaan kharakteristik dan aplikasinya antara pupuk sintetis dengan pupuk alami diringkas pada Tabel 18. Berdasarkan kelemahan dan kelebihan umum dari pupuk sintetis dan alami tersebut, kombi- nasi dari kedua jenis pupuk tersebut secara teknis Tabel 17. Beberapa jenis pupuk sintetis yang sering digunakan dalam usaha tani modern No Nama Pupuk/Merk Dagang Unsur Hara Utama dan kadarnya 1. Urea (CO(NH2)2) 46 % N 2. Ammonium nitrat (NH4NO3) 35 % N 3. Zulfure Ammonium (NH4)2SO4) 21 % N, 24 % S 4. TSP (Ca(H2PO4)2.H2O) 36 % P2O5 5. NPK 15 % N, 15 % P2O5, 15 % K2O 6. NPK PONSKA 15 % N, 15 % P2O5, 15 % K2O, 10 % S 7. KCl 65 % K2O 8. KNO3 38 % K, 14 % N Tabel 18. Kharakteristik pupuk sintetis dan pupuk alami No Kharakteristik Pupuk Sintetis Pupuk Alami 1. Unsur hara utama 1 – 3 jenis, kadar tinggi 2. Kelarutan hara Tinggi - sedang 3. Dosis Rendah (< 300 kg/ha) 4. Sifat tanah yang Kadar unsur hara (sifat dipengaruhi kimia) Lengkap, kadar rendah Rendah >1 ton/ha Kadar unsur hara dan perbaikan sifat fisik tanah usaha tani mungkin secara umum akan lebih baik daripada hanya menggunakan salah satu jenis pupuk sintetis atau alami saja. Tentu saja perlu memperha- tikan kondisi setempat, antara lain ketersediaan pu- puk dan kondisi lahan/tanah sesuai dengan permasa- lahannya, dan jenis tanaman yang diusahakan. 2. Pupuk Organik vs Anorganik Pupuk organik umumnya didefinisikan sebagai jenis pupuk yang dibuat dari bahan atau senyawa organik, antara lain biomasa (limbah tanaman) dan kotoran atau urin ternak. Bahan organik tersebut da- pat diaplikasikan langsung sebagai pupuk melalui tanah atau tanaman, maupun difermentasikan terle- bih dahulu. Sebaliknya, pupuk anorganik dibuat atau berupa bahan anorganik yang diaplikasikan sebagai pupuk secara langsung maupun diproses terlebih da- hulu. Bahan anorganik tersebut misalnya gas nitrogen, mineral atau batuan, dan limbah industri logam (slug). Gas nitrogen diproses menjadi pupuk urea; mineral K-feldspar diproses menjadi pupuk KCl atau dikombinasikan dengan senyawa nitrat menjadi pupuk KNO3; sedangkan batuan fosfat diproses menggunakan asam keras menjadi pupuk TSP (Triple Super Phosphate). Saat ini banyak industri yang memproduksi pupuk organik dalam bentuk padat (granular) mau- pun cair. Kandungan unsur hara pada pupuk organik umumnya lengkap, tetapi kadar masing-masing unsur hara relatif rendah (< 5 %). Pada pupuk organik granular, kadar senyawa karbon (organik) umumnya sangat tinggi (> 60 %) dan hanya sebagian dari unsur hara esensial lainnya yang dapat langsung diserap tanaman. Dosis pupuk organik granular yang harus digunakan sangat tinggi (beberapa ton per hektar), dan hal itu sering menjadi kendala bagi petani ta- naman pangan. Namun, perlu diketahui bahwa peng- gunaan pupuk organik granular bukan hanya ber- fungsi untuk memasok unsur hara bagi tanaman, tetapi juga untuk memperbaiki sifat tanah, misalnya untuk meningkatkan daya jerap tanah terhadap air dan unsur hara. Pada pupuk organik cair, umumnya kadar unsur hara tersedia < 5 %, dan dapat diapli- kasikan melalui daun ataupun tanah. C. Amelioran Setidaknya ada tiga penamaan bahan atau istilah input usaha tani yang mungkin sering membingung- kan, yaitu amelioran, kondisioner, dan amendemen. Pengertian tentang amelioran pada prinsipnya sama dengan kondisioner atau pembenah tanah, yaitu ba- han organik maupun anorganik, sintetis maupun alami yang digunakan untuk memperbaiki kondisi tanah sehingga tanaman yang tumbuh pada tanah itu menjadi lebih produktif. Amendemen bermakna bahan tambahan atau yang diaplikasikan ke tanah untuk memperbaiki atau memodifikasi kondisi tanah. Amen- demen tanah (soil ammendement) umumnya diartikan sebagai bahan yang ditambahkan ke dalam tanah agar kondisinya sebagai media tumbuh tanaman tersebut menjadi lebih baik. Jadi, ketiga istilah tersebut pada prinsipnya mempunyai makna yang sama, hanya ber- beda pada penekanan tujuan penggunaan bahan ter- sebut. Bahan amelioran atau kondisioner digunakan untuk memperbaiki atau menormalkan kondisi tanah yang bermasalah (tidak produktif), terutama karena sifat fisiknya, menjadi tanah yang produktif. Bahan amendemen digunakan hanya sebagai tambahan yang dapat berdampak pada peningkatan atau memperta- hankan kualitas (keberkelanjutan) tanah tersebut. Dalam buku ini dibahas tentang bahan amelioran, yaitu bahan yang digunakan untuk memperbaiki atau menormalkan kondisi tanah yang bermasalah, yaitu tanah yang tidak dapat berfungsi optimal sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara bagi tanaman yang tumbuh pada tanah itu. Banyak jenis bahan amelioran yang dapat digu- nakan untuk memperbaiki kualitas tanah sesuai dengan kasus spesifik yang berkaitan dengan kondisi tanah pertanian setempat. Kondisi tanah yang tidak/ kurang optimal dapat dipilah menjadi 3 kelompok, yaitu tanah masam, garaman, terkontaminasi/ter- cemar logam berat dan senyawa beracun. Sebagai salah satu bentuk penerapan agrogeologi adalah un- tuk mengatasi kondisi tanah bermasalah tersebut menggunakan bahan geologis (batuan) sebagai amelio- ran. 1. Ameliorasi Tanah Masam Banyak lahan pertanian yang kondisi tanahnya masam (pH < 5,5), dan kondisi itu menimbulkan ma- salah ketersediaan unsur hara bagi tanaman pada tanah tersebut. Pada tanah masam, ketersediaan un- sur Al dan mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu) dalam tanah sangat tinggi hingga dapat bersifat toksik

bagi bera- gam jenis tanaman dan organisme tanah, sedangkan ketersediaan unsur hara makronya (misalnya Ca dan Mg) sangat rendah hingga kahat. Sebaliknya, pada ta- nah basa (pH > 7,5), ketersediaan unsur mikro (kecu- ali Mo) rendah (kahat), sedangkan ketersediaan unsur hara makro relatif tinggi. Sebagian besar jenis tanaman pangan maupun perkebunan menghendaki pH tanah ideal sekitar netral (6 – 7). Pengapuran umumnya dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan pH tanah masam. Tetapi karena tanah masam umumnya juga miskin unsur hara Ca atau/dan Mg, pengapuran juga dapat dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan tanaman akan unsur Ca atau/dan Mg. Tanaman kacang (legume) memerlukan Ca dalam jumlah relatif tinggi dan responnya terhadap pengapuran lebih nyata dibanding jenis tanaman lain (non-legume). Dalam hal ini, disebabkan oleh dampak dari peningkatan pH dan ketersediaan Ca2+ bagi ta- naman akibat pengapuran, kebutuhan optimal tanam- an legum akan unsur hara esensial dapat terpenuhi secara optimal. Khusus yang berkaitan dengan penggunaan bu- buk batuan fosfat dan batuan silikat, umumnya ber- tujuan untuk pemupukan, meningkatkan ketersedia- an unsur hara. Penggunaan bubuk batuan fosfat ber- tujuan untuk meningkatkan kadar unsur hara P di dalam tanah yang tersedia bagi tanaman; sedangkan penggunaan bubuk batuan silikat bertujuan untuk meningkatkan kadar unsur Si, K, Ca, dan Mg serta unsur mikro. Tetapi, aplikasi kedua jenis batuan itu ternyata juga mempunyai efek pengapuran (liming effects) yang cukup berarti, tetapi mekanisme reaksi yang agak berbeda dengan reaksi pada penggunaan bahan kapur (lihat Tabel 19). Reaksi pelarutan unsur hara dari bubuk batuan fosfat maupun batuan silikat tersebut memerlukan ion H+, seperti telah dijelaskan pada Gambar 11. Tabel 19. Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan untuk pengapuran (Rehm et al., 2002). Bobot KNR EK No Bahan Kapur dan Reaksinya Molekul (%) (g mol-) 1 CaCO3 (kalsit murni) CaCO3 + 2H+ ≈ Ca+2 + H2O + CO2 100 2 Batuan kalsitik - 3 CaO (kalsium oksida) CaO + 2H+ ≈ Ca+2 + H2O 56 4 Ca(OH)2 (kalsium hidroksida/aragonit) Ca(OH)2 + 2H+2 = Ca+2 + 2H2O 74 5 CaMg(CO3)2 (dolomit) CaMg(CO3)2 + 4H+ ≈ Ca+2 + Mg+2 + 2H2O + 2CO2 184 100 75 - 100 160 - 175 120 - 136 75 - 108 1,0 1,3 – 1,0 0,7 – 0,6 0.8 -0,7 1,3 – 0,9 Terjadinya sinergi dua mekanisme reaksi, yaitu pelarutan unsur hara dan peningkatan pH (mengkon- sumsi H+), menjelaskan bahwa bubuk batuan fosfat maupun silikat akan lebih efektif jika diaplikasi pada tanah masam atau/dan miskin hara dibandingkan jika diaplikasikan pada tanah yang bereaksi netral atau tanah yang subur - mengandung unsur hara esensial yang cukup dan berimbang (Priyono, 2005b). Ion OH- yang dihasilkan dari reaksi tersebut menetral- kan H+ dalam larutan tanah maupun pada tapak jerap- an koloid tanah membentuk H2O. Adanya tambahan Ca2+ yang terlarut dalam tanah dari CaCO3 dapat meng- gantikan posisi H+ yang terjerap pada permukaan koloid tanah, sehingga dapat mempercepat proses netralisasi H+ dalam tanah tersebut. Bahan untuk pengapuran (liming materials) yang sering digunakan dalam praktek pertanian hingga saat ini adalah CaCO3, CaO, CaOH, dan (Ca,Mg)(CO3)2. Batuan lain yang juga direkomendasikan para peneliti sebagai bahan pengapuran yang cukup efektif adalah bubuk batuan fosfat (Lim et al., 2003) dan bubuk batuan silikat (Coventry et al., 2002; Gillman et al., 2002; Priyono, 2005a). Efektivitas bahan kapur untuk meningkatkan pH tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama oleh jenis batuan dan ukuran (kehalusan) partikelnya. Kapasitas netralisasi relatif (KNR) dan ekuivalensi kebutuhan (EK) bahan pengapuran yang dipengaruhi oleh jenis bahan kapur (Tabel 19). Batuan CaCO3 umumnya digunakan sebagai standar untuk menghitung ekivalensi jumlah kebu- tuhan atau kapasitas netralisasi bahan kapur lainnya. Kapasitas netralisasi kapur diukur dengan metode titrasi asam - basa. Jumlah asam yang dibutuhkan untuk menetralkan tanah per satuan berat masing- masing bahan kapur tersebut digunakan untuk meng- hitung nilai kapasitas netralisasi relatif (KNR). Nilai KNR bahan kapur X = [(jumlah asam untuk mene- tralkan 1g bahan X)/(jumlah asam untuk menetralkan 1g CaCO3)] x 100 (%). Nilai efektivitas kapur (EK) bahan X = [bobot molekul bahan X/bobot molekul CaCO3]/[KNR bahan X]. Faktor lain yang sangat mempengaruhi laju pela- rutan dan efektivitas bahan pengapuran adalah ukuran partikelnya. Contoh hasil penelitian berkaitan dengan pengaruh ukuran partikel terhadap efektivitas bahan pengapuran disajikan pada Gambar 14 dan 15. 7.0 100 mesh 6.5 6.0 pH 5.5 40-50 mesh 20-30 mesh 5.0 Control 4.5 0 6 12 18 24 30 36 Waktu (bulan) Gambar 14. Pengaruh ukuran partikel bahan kapur terhadap perubahan pH tanah (digambar ulang dari Rehm et al., 2002). Tampak pada Gambar 14 dan 15 bahwa makin halus ukuran partikel bahan pengapuran, makin ting- gi laju pelarutannya. Pengaruh ukuran pertikel itu tampak nyata terutama pada periode waktu awal in- kubasi (nilai Eo), dan makin lama laju pelarutannya menjadi makin rendah hingga mencapai keseimbang- an (mendekati nol). Pola laju pelarutan tersebut mirif dengan pelarutan mineral dan batuan yang dibahas di Bab 4. 12 K-feldspar 11 pH (H2O) Dolerite 10 9 8 0 30 60 90 120 Penggilingan (menit) Gambar 15. Pengaruh intensitas (waktu) penggilingan (dengan ball mill) terhadap pH bubuk batuan silikat (dolerite dan K-feldspar) (Priyono, 2005a) Pada Gambar 14 tampak bahwa peningkatan pH tanah tertinggi dicapai pada aplikasi batuan kapur yang paling halus dengan periode inkubasi terpendek (dua minggu). Demikian pula pada Gambar 15, peng- gilingan batuan silikat memperhalus ukuran partikel batuan dan meningkatkan pH bubuk batuan tersebut, sehingga meningkatkan potensi bubuk batuan silikat itu sebagai penetral kemasaman tanah (bahan penga- puran). Jadi, makin halus bahan kapur, makin tinggi reaktivitas dan efektivitasnya dalam meningkatkan pH tanah. Selain kharakteristik bahan kapur, beberapa si- fat tanah yang diberi kapur juga mempengaruhi efekti- vitas pengapuran, antara lain pH, tekstur, dan kadar bahan organik. Kurva hubungan antara peningkatan pH tanah vs dosis pengapuran umumnya tidak linier, tetapi membentuk garis lengkung (sigmoid), makin tinggi dosis pengapuran maka sudut arah kurva ma- kin mengecil mendekati niai nol. Artinya, makin tinggi dosis kapur yang diaplikasikan, makin rendah efektivitas peningkatan pH per satuan berat bahan pengapuran yang ditambahkan. Hal itu juga berarti bahwa untuk meningkatkan satu unit pH tanah, mi- salnya dari 5 ke 6, dibutuhkan jumlah kapur yang lebih banyak daripada untuk meningkatkan pH dari 4,5 menjadi 5,5. Karakteristik tersebut berkaitan dengan kapasitas penyangga (buffering capacity) tanah itu. Makin tinggi kadar liat (clay) atau/dan koloid or- ganik, makin tinggi kapasitas penyangga tanah ter- sebut, sehingga makin banyak pula jumlah kapur yang diperlukan untuk dapat menaikan per satu unit pH. 2. Ameliorasi Tanah Garaman Tanah garaman adalah tanah yang mengandung garam terlarut berlebihan sehingga berpengaruh nega- tif signifikan terhadap pertumbuhan tanaman secara umum. Pengaruh utama dari kadar garam yang tinggi adalah membatasi akar tanaman untuk dapat me- nyerap air tanah meskipun dalam kondisi basah. Air tanah mengalir dari bagian bertekanan potensial os- motik tinggi (kadar garam rendah) ke bagian yang te- kanan osmotiknya lebih rendah (kadar garam tinggi). Potensial osmotik larutan tanah rendah karena kon- sentrasi garam yang lebih tinggi daripada di dalam sel tanaman. Kondisi itu akan menghalangi akar tanaman untuk mengambil air dari tanah, sehingga terjadi gejala kekeringan meskipun banyak air tersedia di zona perakaran. Pengaruh dari kondisi seperti itu disebut 'efek osmotik'. Jenis senyawa garam pada tanah garaman dido- minasi oleh natrium klorida (NaCl), kalsium dan mag- nesium karbonat (CaCO3 dan MgCO3). Berdasarkan dominasi jenis garam tersebut, tanah garaman dibe- dakan menjadi tiga jenis, yaitu tanah salin, sodik, dan salin - sodik. Penciri khusus dari masing-masing jenis tanah garaman itu diringkas pada Tabel 20. Tabel 20. Kharakteristik tanah garaman DHL Soil pH Na Sodium Klasifikasi (mmohs/cm) Tertukarkan Adsorption (%) Ratio (SAR) Salin > 4.0 < 8.5 < 15 < 13 Sodik < 4.0 > 8.5 > 15 > 13 Salin-Sodik > 4.0 < 8.5 > 15 > 13 Kondisi Sifat Fisik Normal Jelek Normal Tanah salin mengandung sodium (Na+) tinggi dan pada kompleks jerapannya masih cukup banyak Ca tertukarkan, sehingga nilai SAR relatif rendah (< 13 %). Proses akumulasi garam itu disebut salinisasi. Tanah salin umumnya mengandung sodium klorida (NaCl), sodium sulfat (Na2SO4), sodium bikarbonat (Na2CO3), dan terkadang sodium nitrat (NaNO3). Ada- nya akumulasi garam NaCl dan Na2SO4 menyebabkan tanahnya berwarna putih keruh; tetapi jika NaNO3 cukup banyak, maka warna tanah menjadi kecoklatan. Persentase Na tertukarkan (ESP) rendah (< 15 % relative terhadap KTK) dan daya hantar listrik (DHL) larutan tanah > 4 mmhos/cm, pH tanah umumnya kurang dari 8,5 (bervariasi antara 7,5 sampai 8,5). Total kadar garam > 0,1 % dan kadar garam tersebut cukup mengganggu pertumbuhan ber- bagai spesies tanaman. Karena tanah salin mengan- dung cukup banyak Ca, partikel tanah tetap terflo- kulasi (membentuk agregat), sehingga aerasinya tanah tersebut tetap baik. Permukaan tanah salin umumnya dipenuhi dengan garam (tampak butiran putih). Ter- utama pada musim kering, dimana air tanah yang mengandung garam bergerak ke permukaan tanah dan garam terlarut diendapkan di permukaan tanah, tampak warna putih itu. Tanah sodik dicirikan dengan kompleks patikel koloidalnya yang dijenuhi oleh Na (> 15 % terhadap nilai KTK), mengandung banyak garam Na2CO3 tetapi sedikit garam terlarut lainnya, sehingga tanah ini sangat alkalin (pH 8,5 – 10). Daya hantar listrik umumnya < 4 mmhos/cm. Dari sifat fisiknya, terjadi dispersi partikel koloidalnya dan patikel terdispersi itu mengisi (menyumbat) pori-pori tanah sehingga perme- abilitas air dan udara (aerasi) sangat jelek dan laju infiltrasinya rendah. Kadar Na karbonat pada tanah sodik tinggi dan toksik terhadap akar tanaman, kondi- si fisiknya jelek, dan pH-nya sangat tinggi (> 8,5). Tanah salin - sodik mempunyai ciri antara (tran- sisi atau gabungan) dari tanah salin dan sodik tersebut. Jika garam Na tidak terlindih (tercuci), maka akan tetap pada tanah itu, sehingga kompleks jerap- annya dijenuhi Na (Na-liat) dan banyak garam lain di dalam larutan tanah. Pada tanah tersebut terjadi pro- ses salinisasi dan alkalinisasi. Karena adanya garam Na menghalangi terjadinya dispersi Na-liat. Berdasarkan sifat dan ciri tanah garaman yang menimbulkan gangguan terhadap pertumbuhan ta- naman, atau terganggunya fungsi tanah sebagai media tumbuh dan pemasok unsur hara tanaman, maka untuk mengatasinya diperlukan teknologi reklamasi (pemulihan) atau remediasi (penyembuhan) tanah. Bahan amelioran digunakan untuk mengurangi akti- vitas Na pada tanah tersebut, sekaligus menurunkan pH tanah garaman. Peran bahan amelioran menurun- kan aktivitas Na pada tanah garaman dijelaskan sbb: a. Menggunakan gipsum (CaSO4.2H2O) Jika tanah garaman itu tidak banyak mengan- dung Ca karbonat, maka gipsum umumnya efektif di- gunakan untuk menormalkan tanah garaman terse- but. Karena aplikasi gipsum, Na+ yang jenuh pada permukaan koloid tanah didesak (tertukarkan) oleh Ca+2 (dari gipsum) dan Na+ membentuk garam mudah Na larut (Na2SO4). Demikian juga dengan NaCO3 di luar Koloidkompleks jerapan, bereaksi deKnogloaind CaSO4 memben- Na Ca Tanahtuk +ganrCaamSO4CaCO3 dan N+a2STOa4n.ahKem+udnNiaan2S,Og4aram Na NaN2SaO4 yang mudah larut dalam air itu dikeluarkan Ca melalui saluran drainase. Na2CO3 + CaSO4 CaCO3 + Na2SO4 Na Na Ca Koloid Koloid Tanah + nCaSO4 + Na Tanah Ca+ nNa2SO4 Na b. Menggunakan pupuk dan senyawa masam. Na2CO3 + CaSO4 CaCO3 + Na2SO4 Untuk menetralisir atau mengurangi alkalinitas pada tanah garaman dapat diaplikasikan pupuk ma- sam (NH4)2SO4, asam sulfat atau sulfur elementer, dan pirit (FeS2). Ion Na+ pada kompleks jerapan koloid ta- nah dilepaskan (digantikan posisinya oleh NH4+ mau- pun H+), kemudian bereaksi dengan sulfat menghasil- kan Na2SO4 yang mudah terlarut dan tercuci melalui saluran drainase. Contoh kuantitas relatif dari bahan amelioran tanah garaman dapat dilihat pada Tabel 21. 1) 2Na–koloid + (NH4)2SO4 2NH4–koloid + Na2SO4. 2) S + 4H2O 8H+ + SO4-2 Na2SO4 + 2H+ + SO4-2 Na2SO4 + H2CO3 CO2(g) H2O 2Na–koloid +2H+ + SO4-2 2H–koloid + Na2SO4. 3) FeS2 + 2 H2O + 7 O2 2 FeSO4 + 2 H2SO4 2Na–koloid + Fe2+ + SO4-2 Fe-koloid + Na2SO4. c. Menggunakan bahan organik. Penggunaan bahan organik sebagai amelioran tanah garaman pada prinsipnya adalah untuk menu- runkan pH tanah garaman. Dekomposisi bahan orga- nik menghasilkan beragam asam organik, dan asam organik tersebut berperan langsung menurunkan pH tanah garaman. Selain itu, bahan organik juga Tabel 21. Kuantitas relatif bahan amendemen yang diperlukan sebagai penetral tanah garaman Amandemen Kuantitas Relatif * Gypsum (CaSO4 2H2O) Kalsium klorida (CaCl2 2 H2O) Asam sulfat (H2SO4) Besi sulfat (FeSO4.7 H2O) Aluminium sulfat (Al2 (SO4)3.18 H2O) Sulfur elementer (S) Pyrite (FeS2) - 30% sulfur Kalsium polysulfat (CaS5) - 24% sulfur 1,00 0,85 0,57 1,62 1,29 0,19 0,63 0,77 * Penggunaan 1 kg gypsum hasilnya setara dengan penggunaan 0,85 kg kalsium klorida, atau 1,29 kg aluminium sulfat. menyumbangkan beragam jenis unsur hara yang se- cara tidak langsung menurunkan dominasi aktivitas Na pada tanah garaman; koloid organik dari hasil perombakan bahan organik juga memperbaiki sistem aerasi (memacu proses granulasi partikel tanah) dan daya jerap partikel tanah terhadap air. Pengaruh pem- berian bahan organik terhadap sifat tanah garaman merupakan pengaruh gabungan dari berbagai kompo- nen bahan organik melalui beberapa kemungkinan mekanisme tersebut. d. Menggunakan bubuk batuan silikat Penggunaan bubuk batuan silikat sebagai bahan amelioran untuk tanah garaman belum banyak dite- liti. Hasil penelitian Sumarlin (2008) di rumah kaca menunjukkan bahwa pemberian bubuk batuan basal- tik dari Gunung Tambora dengan dosis setara 30 – 50 t/ha dapat memperbaiki tanah garaman yang semula tidak dapat ditanami jagung (tidak tumbuh) menjadi subur - tanaman jagung dapat tumbuh normal. Mekanisme yang menyertai pemulihan kondisi tanah garaman tersebut diperkirakan akibat dari pe- nyeimbangan unsur hara tersedia bagi tanaman oleh beragam unsur hara (kation dan anion) yang terlarut dari bubuk batuan basaltik tersebut. Dengan tambah- an unsur hara yang terlarut dari bubuk batuan tersebut, kation Na+ menjadi tidak dominan (nilai ESP menurun drastis). Masih banyak penelitian yang ha- rus dilakukan untuk mengetahui efektivitas bubuk batuan sebagai bahan amelioran, khususnya untuk meremediasi tanah garaman dan pengapuran tanah masam. 3. Ameliorasi Tanah Tercemar Tanah di sekitar daerah pertambangan logam dan areal kegiatan berbagai jenis industri umumnya sangat mungkin tercemar oleh limbah dari kegiatan tersebut. Mengatasi masalah lingkungan (termasuk aspek tanah) yang tercemar oleh limbah kegiatan in- drustri tersebut umumnya relatif mahal. Oleh karena itu, upaya pencegahan terjadinya pencemaran terse- but lebih diutamakan dan wajib dilakukan oleh pihak perusahaan melalui pengeloaan limbah industri yang tepat. Teknik ameliorasi tanah yang tercemar oleh lim- bah dari kegiatan industri sangat tergantung pada sifat bahan pencemarnya. Beberapa dasar pemikiran yang dapat digunakan sebagai panduan penentuan teknik remediasi tanah (untuk kegunaan usaha tani) yang harus diterapan dapat dijelaskan sebagai ber- ikut: a. Unsur hara Banyak unsur hara esensial yang dianggap seba- gai pencemar tanah, misalnya S, Fe, Zn, dan Cu. Unsur hara tersebut dapat merugikan (bersifat toksik) bagi tanaman dan organisme tanah jika konsentra- sinya di zona perakaran terlalu tinggi. Mengacu pada mekanisme itu, maka upaya yang harus dilakukan adalah menurunkan aktivitas ion tersebut melalui proses pengendapan, penjerapan, atau/dan pencuci- an. Alternatif lainnya adalah dengan memanfaatkan limbah yang mengandung unsur hara esensial terse- but sebagai pupuk atau salah satu bahan pupuk mul- ti nutrisi. Tentu saja diperlukan bahan campuran lain yang fungsinya adalah untuk menyeimbangkan kom- posisi unsur hara dalam pupuk itu sehingga cocok di- gunakan untuk pupuk. b. Limbah masam Limbah dari pertambangan logam umumnya ber- sifat masam, atau berpotensi mengubah tanah di seki- tarnya menjadi masam. Bijih logam, misalnya emas (Au) dan tembaga (Cu), umumnya ditambang dari kedalaman puluhan hingga ratusan meter. Limbah tailing umumnya mengandung logam lain (Zn, Pb, Cd, dan Hg) dan sulfur (garam sulfida) yang jika teroksi- dasi (terbuka ke atmosfir) dan terkena air hujan akan menghasilkan asam sulfat yang sangat masam. Selan- jutnya, larutan yang masam tersebut yang dapat me- nyebabkan pemasaman tanah. Dalam kondisi masam, unsur logam yang terkandung dalam tailing menjadi terlarut dan konsentrasinya bersifat toksik bagi ta- naman. Upaya yang umumnya dilakukan adalah men- cegah terjadinya oksidasi bahan yang mengandung sulfida tersebut dengan menimbunnya ke dalam ta- nah, atau menetralkan larutan masam dengan bahan pengapuran (liming materials). c. Senyawa beracun Limbah dari beragam jenis industri, misalnya industri kimia dan tekstil, umumnya mengandung se- nyawa beracun, baik organik maupun anorganik. Pada prinsipnya, bahan tersebut dapat bersifat racun bagi organisme karena bahan itu reaktif. Limbah tersebut dapat berbentuk padat, bubuk/butiran halus, gas, maupun cair. Berdasarkan penyebab sifat toksik dari limbah itu, strategi utama yang harus diterapkan untuk mengatasinya adalah dengan menetralisis senyawa reaktif pada limbah itu. Secara teknis, senyawa toksik itu dinetralisir dengan cara diendapkan atau dijerap menjadi senyawa kompleks yang stabil (non-reaktif), kemudian disaring (dipisahkan) dari bagian limbah yang bersifat non-toksik. Belum ada satu teknologi multi guna yang dapat diterapkan untuk mengatasi segala jenis limbah yang sangat beragam toksisitasnya. Beberapa prinsip reaksi kimia yang dapat diterapkan sebagai bahan pertim- bangan dalam mendesain teknologi pengolahan lim- bah tersebut adalah (a) reaksi asam – basa, (b) oksi- dasi – reduksi, (c) pengendapan (pembentukan senya- wa kompleks yang stabil). Salah satu atau gabungan dari beberapa prinsip reaksi itu dapat diterapkan untuk mengatasi senyawa toksik secara terpisah atau/dan bertahap. Seperti telah diuraikan di atas, residu asam ke- ras (HCl atau H2SO4) yang digunakan dalam proses suatu industri, jika tidak dikelola dengan baik, maka akan menyebabkan kemasaman yang tinggi terhadap tanah dan badan air di sekitarnya. Limbah tersebut harus dinetralisir dengan larutan basa atau bahan pengapuran sebelum dibuang. Limbah pertambangan logam (tailing) umumnya mengandung senyawa sulfi- da, dan jika terekspos (kontak dengan atmosfir) akan teroksidasi menghasilkan asam sulfat. Agar oksidasi itu tidak terjadi, maka limbah tersebut harus ditim- bun (berada pada kondisi reduktif) supaya tetap stabil dalam bentuk senyawa sulfida. Alternatifnya, asam sulfat pada limbah itu dinetralisir dengan bahan ka- pur dosis tinggi. Selain untuk meningkatkan pH juga untuk mengendapkan logam berat. BAB 7 PUPUK BERBASIS BATUAN SILIKAT Pupuk batuan silikat (PBS) merupakan suatu jenis pupuk yang relatif baru dikembangkan, dibuat dari bahan geologis berupa batuan silikat (volkanik). Pemanfaatan bahan geologis dalam bidang pertanian tersebut terinspirasi dari fakta bahwa tanah mineral, yaitu jenis tanah yang tersebar luas di permukaan bumi, berfungsi antara lain sebagai media tumbuh dan pemasok sebagian besar kebutuhan unsur hara berbagai jenis tanaman, terbentuk dari batuan. Batu- an induk tanah tersebut tidak hanya berkontribusi terhadap pembentukan wujud fisik tanah, tetapi juga menyediakan unsur hara bagi tanaman dari hasil pe- lapukan batuan induk tersebut menjadi tanah. Seperti telah diuraikan pada Bab 5, proses pem- bentukan tanah itu sangat kompleks dan lama (pu- luhan - ratusan tahun). Dengan kata lain, perubahan status unsur hara dari tak tersedia (dalam bentuk batuan) menjadi tersedia bagi tanaman (dalam bentuk tanah) secara alami sangat lama dan kompleks. Oleh karena itu, upaya pengembangan teknologi proses pembuatan PBS harus diarahkan pada percepatan pe- larutan unsur hara dari batuan tersebut. Selain keunikannya sebagai pupuk berbasis sili- kat, PBS juga berpotensi untuk dapat digunakan se- bagai bahan berguna lainnya (multi fungsi) yang be- lum diobservasi secara luas. Bahkan baru pada dua dekade terakhir, perhatian para peneliti terhadap ke- mungkinan pemanfaatan batuan volkanik sebagai pu- puk multi nutrisi baru kelihatan meningkat. Oleh ka- rena itu, kegunaan PBS dan teknologi proses yang tepat akan terus dikembangkan. A. Pupuk Batuan Silikat (PBS) Seperti telah dibahas pada Bab 3, batuan silikat merupakan bahan alami yang keberadaannya di per- mukaan bumi. Indonesia yang merupakan negara ke- pulauan, hampir di semua pulaunya terdapat gunung api yang masih aktif dan secara periodik memun- tahkan material volkanik baru. Material tersebut me- ngandung silikat (Si) dan hampir semua unsur hara esensial kecuali N, sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai pupuk multi nutrisi yang leng- kap. Berkaitan dengan upaya mengatasi permasalah- an teknis dalam bidang pertanian saat ini, banyak para ahli dari berbagai negara merekomendasikan pemanfaatan batuan silikat sebagai pupuk pelepas hara lambat multi nutrisi (slow-release multinutrient fertilizer) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Rekomendasi itu antara lain diajukan oleh Coroneos et al. (1996), Hinsinger et al. (1996), dan Coventry et al. (2001) dari Australia; Leonardos et al. (1987) dari Brazil; dan Bakken et al. (1997, 2001) dari Eropa. Namun, anjuran itu hingga sekarang belum banyak diterapkan di tingkat hamparan, karena masih adanya beberapa kelemahan dari PBS, terutama jika pupuk itu diaplikasikan dalam bentuk bubuk (powder) atau butiran (granule). Batuan silikat tersusun dari beragam jenis mine- ral silikat yang mengandung berbagai macam unsur hara esensial (kecuali N). Kadar dan jenis unsur hara esensial pada batuan tersebut sangat beragam sesuai dengan keragaman jenis mineral penyusun batuan silikat tersebut; dan kadarnya unsur hara esensialnya relatif rendah dibanding kadar unsur hara fungsional Si (40 - 60 % Si). Sebagian besar unsur hara pada partikel batuan itu berada di dalam dan di antara unit dasar struktur kristal mineral penyusun batuan. Un- sur hara itu relatif sulit terlarut, terutama unsur yang menjadi komponen utama struktur dasar mineral, se- hingga ketersediaan unsur hara dari PBS bagi ta- naman sangat rendah. Oleh karena itu, untuk dapat memasok kebutuhan optimal unsur hara tanaman, dosis penggunaan PBS harus tinggi (puluhan ton PBS per hektar). Selain itu, beberapa penelitian pengujian efektivitas PBS dosis tinggi menunjukan hasil yang saling bertentangan. Namun hal itu sebenarnya lebih disebabkan oleh penggunaan jenis dan ukuran parti- kel batuan yang diuji sebagai pupuk, sifat tanah (media tumbuh) yang digunakan, serta jenis tanaman indikator yang berbeda-beda resposivitasnya terhadap pemberian PBS. Ringkasnya, teknologi PBS perlu terus dikem- bangkan untuk mengatasi kelemahannya, terutama dosis penggunaannya yang sangat tinggi sehingga su- lit diterapkan oleh petani. Selain itu, potensi kegunaan PBS tersebut diperkirakan cukup beragam, sehingga multi fungsi dari bubuk batuan tersebut perlu dikaji lebih jauh. Menyadari adanya beberapa kelemahan PBS se- perti dijelaskan di atas, para peneliti terus berusaha untuk meningkatkan efektivitas agronomis maupun ekonomis dari penggunaan PBS. Secara teknis, upaya itu lebih banyak difokuskan pada peningkatan keter- sediaan (kelarutan) unsur hara dari PBS sehingga da- pat diserap oleh tanaman. Keberhasilan upaya terse- but akan menjadikan PBS sebagai jenis pupuk yang efektif dan efisien, sehingga upaya itu dapat berkon- tribusi signifikan terhadap pengembangan pertanian yang produktif, menguntungkan, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. B. Perkembangan Teknologi PBS Pada dua dekade terakhir, perhatian berbagai pi- hak terhadap perlunya optimalisasi pemanfaatan bahan alami secara langsung sebagai input usaha tani makin meningkat. Bahan alami tersebut antara lain adalah batuan silikat yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber unsur hara tanaman (pupuk) dan pembenah (ameliorant), atau untuk bahan peremajaan tanah (soil-rejuvenating agent) yang telah berkembang terlalu lanjut atau terdegradasi intensif. Selain karena bahan tersebut melimpah, penggunaan batuan seba- gai pupuk dijamin ramah lingkungan, memenuhi sa- lah satu persyaratan pertanian berkelanjutan. Khusus tentang PBS, teknologi pembuatannya telah cukup lama dikembangkan. Perkembangan tek- nologi itu dapat dibagi menjadi tiga tahap berdasarkan bentuk dan sifat dari produk pupuk yang dihasilkan. Pupuk batuan silikat (PBS) diaplikasikan dalam ben- tuk partikel yang relatif kasar (berukuran milli - mikro meter). Batuan tersebut diproses dengan metode peng- gilingan biasa (menggunakan stone crusher) untuk memperkecil ukuran partikel batuan, tanpa terjadi kerusakan unit dasar struktur mineral penyusun ba- tuan tersebut. Tahap perkembangan berikutnya ada- lah produksi PBS berbentuk bubuk berukuran nano meter (PBS nano particles). Batuan diproses menggu- nakan teknologi nano (penggilingan berenergi tinggi). Dengan teknologi nano tersebut dihasilkan PBS nano particles yang lebih efektif dibanding yang diproses belalui penggilingan biasa (stone crusher). Meskipun demikian, dosis yang diperlukan masih relatif tinggi (1 - 2 t/ha). Perkembangan produksi terbaru adalah PBS cair atau suspensi, dimana partikel batuan berukuran nano meter itu diproses lebih lanjut menja- di cair melalui pemanasan bersuhu tinggi atau unsur haranya diekstrak dari partikel batuan. 1. PBS Bubuk Menurut Chesworth et al. (1983), pemanfaatan partikel batuan sebagai pupuk pertama kali direko- mendasikan oleh Mexoux sekitar 1853/54 melalui tulisannya yang berjudul 'Bread from Stone'.

Kemu- dian, rekomendasi itu diterapkan oleh de Vilier (1961) dengan memanfaatkan limbah dari industri pemecah batuan (quarry by product), partikel batuan berukuran pasir halus (Ø < 2 mm). Bubuk batuan itu dimanfaat- kan sebagai pupuk pada tanaman tebu dengan dosis sekitar 185 ton/ha. Dosis bubuk batuan tersebut sa- ngat tinggi, tetapi pengaruh positifnya terhadap kuan- titas dan kualitas produksi cukup lama (> 5 tahun). Artinya, dengan cara pemupuk tersebut, petani tidak perlu setiap tahun (musim tanam) melakukan pemu- pukan dengan PBS. Namun, karena dosis pemberian PBS yang sangat tinggi, hasil penilitian tersebet ku- rang mendapat respon positif dalam bentuk penerap- annya on farm oleh petani. Pada periode 1990 – 2002, banyak peneliti mera- sa optimis tentang efektivitas penggunaan PBS setelah mereka menguji efektivitas dari beragam jenis bubuk mineral atau batuan basaltik, baik pada skala rumah kaca maupun lapang. Misalnya, Leonardos et al. (1987 dan 2000), Coroneos et al. (1996), Hinsinger et al. (1996), Bolland dan Baker (2000), Bakken et al. (1987, 2000), dan Coventry et al. (2001). Namun demikian, ada pula yang merasa pesimis tentang efektivitas penggunaan PBS, antara lain Bolland dan Baker (2000) yang melakukan penelitian lapang dengan menggunakan PBS dari batuan granit sebagai sumber K. Mereka menyimpulkan bahwa batuan silikat (gra- nit) tidak efektif sebagai sumber unsur hara (pupuk) K. Hasil penelitian yang kontradiktif itu kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan jenis batuan yang digunakan sebagai sumber unsur hara, metode peng- gilingan batuan, jenis tanaman indikator, dan jenis tanah yang digunakan dalam penelitian. Meskipun demikian, para peneliti tersebut sepakat bahwa faktor pembatas utama dari penggunaan PBS dalam bidang pertanian adalah lambatnya pelarutan unsur hara dari PBS sehingga dosis diperlukan sangat tinggi (> 20 t/ha) (Hinsinger et al., 1996). Oleh karena itu, upaya lebih lanjut yang harus dilakukan adalah menemukan metode yang tepat untuk mempercepat laju pelarutan unsur hara dari PBS ke larutan tanah. Untuk dapat mempercepat laju pelarutan, logika- nya, harus diketahui jenis dan mekanisme kerja dari faktor yang bertanggung jawab terhadap laju pelarut- an unsur hara dari PBS. Kemudian, diantara faktor penentu (determinant) pada reaksi pelarutan unsur hara tersebut dimodifikasi sedemikian rupa sehingga laju pelarutan unsur hara dari PBS ke larutan tanah dapat dipercepat. Berdasarkan pemikiran itu, selain pengujian langsung pada tanaman untuk mengetahui efektivitas PBS (dalam bentuk bubuk), banyak pakar melakukan penelitian tentang pelarutan unsur hara dari mineral/batuan seperti yang telah dibahas cukup detail pada Bab 4. Pada Bab 4 telah dijelaskan bahwa kinetika reak- si pelarutan dapat diekspresikan sebagai Et = Eo + atn, dimana Et adalah total atau persentase unsur atau ion yang terlarut per satuan waktu t (jam, hari, bulan) terhadap total kandungannya pada partikel batuan yang dilarutkan, Eo adalah persentase unsur atau ion yang dapat terlarut secara spontan (t ≈ 0), a adalah konstanta yang berkaitan dengan kuantitas permuka- an reaktif dari partikel batuan, dan n adalah konstan- ta eksperimental (order reaksi). Laju pelarutan unsur hara dari partikel batuan adalah Rt = dEt/dt = antn-1. Berdasarkan persamaan tersebut di atas, varia- bel penting yang menentukan proporsi unsur hara terlarut secara keseluruhan (Et) adalah Eo dan a. Arti- nya, untuk meningkatkan kuantitas unsur hara cepat terlarutkan, maka nilai Eo dan a harus dimaksimal- kan. Proporsi unsur hara yang mudah terlarut dari partikel batuan (Eo) ditingkatkan dengan merusak unit struktur kristal mineral penyusun batuan; atau me- rubah partikel kristalin menjadi partikel amorfus (non- kristalin). Perusakan struktur kristalin tersebut dapat meningkatkan luas permukaan dan reaktitivitas partikel tersebut (lihat nilai a pada Tabel 14). Tekno- logi praktis yang dapat diterapkan untuk merusak struktur partikel kristalin tersebut antara lain adalah teknologi nano (penggilingan dengan ball mill). Banyak hasil penelitian menunjukan bahwa laju pelarutan batuan umumnya sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel batuan (Feigenbaum et al., 1981; Strömberg dan Banwart, 1999; Priyono, 2005a). Makin halus ukuran partikel, makin luas permukaan efektif, dan makin tinggi reaktivitas partikel batuan itu ter- hadap media pelarut unsur hara, sehingga makin ba- nyak proporsi partikel itu yang mudah terlarutkan. Artinya, berdasarkan persamaan berpangkat (Et = Eo + atn), makin halus ukuran partikel PBS, makin tinggi nilai variable a, sehingga makin tinggi nilai Et. Bukti eksperimental ditunjukkan oleh Gillman et al. (2001, 2002) dan Priyono (2005a) bahwa makin halus ukuran partikel batuan (basalt) yang diaplikasikan pada ta- nah, makin tinggi laju pelarutan unsur dari batuan dan makin tinggi intensitas pengaruh (reaktivitas) bu- buk batuan itu terhadap perubahan sifat tanah (pe- ningkatan pH dan KTK tanah). Bukti tersebut telah menginspirasi para peneliti untuk pengembangan PBS dengan menerapkan prinsip teknologi nano. 2. PBS Partikel Nano Teknologi nano, yaitu suatu teknologi proses un- tuk menghasilkan partikel berukuran beberapa nano meter (10-9 m). Secara praktis, teknologi nano tersebut diterapkan dengan penggilingan berenergi tinggi atau dengan ball mill. Teknologi tersebut banyak diterapkan pada industri keramik untuk menghasilkan partikel mineral yang sangat halus (nano particles) dan reaktif. Peneliti di bidang keramik tersebut telah dilakukan antara lain oleh Garcia et al. (1991), Sugiyama et al. (1994), dan Suraj et al. (1997). Dalam bidang per- tanian, metode penggilingan intensif tersebut juga telah diterapkan untuk meningkatkan efektivitas be- berapa pupuk mineral silikat (Harley, 2002), fosfat (Lim et al., 2003). Evaluasi lebih lanjut dengan metode penggilingan berenergi tinggi, termasuk penggunaan bahan aditif atau lubricants (antara lain alkohol dan air), telah dilakukan oleh Priyono (2005a). Para pene- liti itu menunjukan bahwa metode penggilingan ber- energi tinggi yang paling efektif adalah penggilingan dalam kondisi kering, tanpa bahan aditif. Penggilingan berenergi tinggi dengan ball mill ter- bukti mampu meningkatkan efektivitas PBS secara signifikan. Sebagai ilustrasi, efektivitas agronomis dari penggunaan 20 t/ha PBS yang hanya digiling dengan stone crusher, setara dengan penggunaan 1 – 2 t/ha PBS yang digiling dengan ball mill (Priyono, 2005a). Namun demikian, kelayakan ekonomis dari pengguna- an ball mill pada skala industri perlu dikaji lebih jauh. Selain itu, secara praktis dosis 1 – 2 t/ha tersebut dinilai masih terlalu tinggi dan relatif mahal untuk diterapkan oleh petani kecil seperti di Indonesia. Peng- gunaan bubuk batuan sangat halus dalam skala luas juga dikhawatirkan dapat menimbulkan masalah ke- sehatan pengguna (petani). Karena alasan tersebut, teknologi produksi PBS dengan ball mill itu masih perlu dikembangkan lebih jauh. Saat ini banyak produk pupuk silikat dalam ben- tuk bubuk (powder) dan granular yang ditawarkan secara online oleh produsen pupuk dari berbagai nega- ra. Para produsen tersebut menyatakan bahwa pupuk tersebut mudah terlarut dalam air. Namun demikian, kelayakan ekonomis untuk usaha tani dari produk tersebut masih perlu dievaluasi karena harganya yang relatif tinggi. Penggunaan ball mill tentu memerlukan biaya operasional (energi) yang tinggi, sehingga harga produk (pupuk) juga tinggi. Pengembangan desain dan setting mesin ball mill mungkin perlu pula dilakukan untuk meningkatkan efisiensinya atau mengurangi biaya produksi. Detail proses produksi pupuk tersebut tentu mereka rahasiakan (telah dipatenkan) sehingga tidak dapat dijelaskan lebih rinci dalam tulisan ini. Selain menggunakan ball mill, diperkirakan bahwa tahapan produksinya meliputi pemanasan partikel batuan hingga 1000 – 1200o C, atau dihancurkan menggu- nakan asam keras (termasuk senyawa HF), dilanjut- kan dengan pengekstrakan unsur hara. 3. PBS Cair Seperti telah dijelaskan di atas bahwa kelemahan PBS dalam bentuk bubuk (powder) maupun granular adalah dosis optimum penggunaannya untuk usaha tani yang terlalu tinggi (> 1 t/ha). Dosis itu tidak mungkin diterapkan pada usaha tani tanaman pangan yang banyak dilakukan oleh petani kecil. Hal tersebut menjadi tantangan bagi para peneliti untuk mengem- bangkan PBS nano particles menjadi pupuk cair; se- hingga semua unsur hara dalam pupuk cair tersebut tersedia bagi tanaman. Teknologi PBS cair tersebut telah dikembangkan dan diproduksi dalam skala industri (Priyono, 2013) dengan merek dagang Orrin. Berdasarkan petunjuk praktisnya, Orrin dapat diaplikasikan melalui tanah, tetapi lebih efektif dan efisien jika diaplikasikan secara langsung melalui da- un (disemprotkan). Khusus untuk tanaman berdaun sempit, aplikasi melalui tanah mungkin akan lebih efektif dibanding melalui daun. Untuk tanaman pohon (berbatang besar), Orrin dapat diaplikasikan melalui sistim in push melalui batang tanaman. Salah satu kelebihan dari produk tersebut, selain mengandung Si juga semua jenis unsur hara esensial. Produk tersebut telah teruji efektif di lapang pada berbagai jenis ta- naman pangan (padi, jagung, kacang tanah), horti- kultura (cabe, tomat, semangka) (Priyono, 2017), mau- pun perkebunan (Priyono et al., 2020a; Priyono et al., 2020b). Penggunaan pupuk melalui daun juga mempu- nyai beberapa kelebihan dibanding melalui tanah. Pada tehnik pemupukan melalui daun, unsur hara langsung terserap tanaman melalui permukaan daun. Pada metode pemupukan melalui tanah, sebelum unsur hara itu dapat diserap oleh tanaman, sebagian unsur hara dari pupuk harus melalui banyak proses (reaksi) karena berinteraksi dengan partikel tanah. Tergantung pada sifat tanahnya, seberapa banyak unsur hara dari pupuk tersebut yang dijerap oleh par- tikel koloidal. Sebagian yang lain dari unsur hara itu mungkin hilang karena terlindih bersama air perkolasi, atau tidak dapat diserap tanaman karena bereaksi dengan senyawa lain menjadi senyawa kompleks di dalam tanah. Pemupukan dengan penyemprotan pada daun atau di in push melalui batang tanaman juga dapat menekan pengaruh negatif dari kondisi tanah yang bermasalah keharaan dimana tanah tidak mampu me- masok unsur hara tanaman secara optimal. Misalnya, tanah masam, garaman, dan tanah tercemar logam berat atau polutan lainnya. Jadi, pemupukan melalui daun juga dapat dijadikan sebagai alternatif solusi praktis untuk mengatasi tanah pertanian yang berma- salah keharaan tersebut di atas. C. Multi Fungsi PBS Selain mempunyai kelemahan sebagai pemasok unsur hara seperti telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, PBS dalam bentuk bubuk juga mempu- nyai kelebihan karena penggunaannya dapat berpe- ngaruh positif terhadap sifat tanah dan ramah ling- kungan. Selain sebagai sumber unsur hara, penggu- naan PBS juga dapat berperan sebagai bahan amelio- ran untuk memperbaiki sifat tanah yang bermasalah. Pengaruh amelioratif dari PBS tersebut antara lain meningkatkan pH tanah (PBS sebagai bahan penga- puran) dan daya jerap tanah terhadap kation (KTK) (Gillman et al., 2001, 2002; Priyono, 2005a), mengurangi intensitas pengaruh negatif dari kadar garam tinggi (pada tanah garaman), dan menurunkan emisi gas methan yang dihasilkan pada usaha tani padi sawah (Ali et al., 2008). Efektivitas dari PBS sebagai amelioran tersebut juga sangat dipengaruhi oleh ukuran dan tingkat amorfisasi (kristalinitas) partikelnya. Makin halus atau makin tinggi amorfisasi partikel PBS, makin tinggi reaktivitas partikel PBS tersebut sehingga makin tinggi pula intensitas pengaruhnya terhadap perubahan sifat tanah tersebut. Jadi, meskipun pengaruh langsung sebagai pemasok unsur hara bagi tanaman (pupuk) kurang efektif, PBS dalam bentuk bubuk dapat difungsikan efektif sebagai bahan pembenah tanah yang bermasalah keharaan, antara lain meningkatkan pH tanah masam, KTK tanah, daya jerap tanah terhadap air, dan menurunkan pengaruh garaman (pada tanah salin/sodik), dan emisi gas methan pada usaha tani padi sawah. Kemampuan PBS mempengaruhi sifat tanah ter- sebut berkaitan dengan permukaan efektif (reaktivitas partikel) PBS yang luas yang diakibatkan oleh proses penggilingan (amorfisasi). Partikel PBS amorfus mem- punyai muatan elektrik yang tinggi. Makin halus par- tikel batuan dan makin rendah kristalinitasnya, ma- kin tinggi reaktivitas partikel bubuk batuan tersebut. Karena penggilingan yang intensif, permukaan partikel yang tadinya kurang reaktif menjadi jauh lebih reaktif karena terbentuknya gugus fungsional pada lapisan teluar partikel yang dapat menghasilkan muatan elektrik (negatif maupun positif). Selain itu, pada umumnya PBS dalam bentuk bubuk halus pH-nya tinggi (7,5 – 8,5) (Priyono, 2005a), karena banyak kation basa terlepaskan dari unit struktur batuan secara mekanik oleh penggilingan. Oleh karena itu, pemberian PBS dapat meningkatkan pH tanah masam, atau PBS dapat berfungsi sebagai bahan pengapuran (liming material). Meningkatnya pH tanah yang diberi PBS juga berakibat meningkatkan muatan negatif pada gugus fungsional partikel koloidal tanah, sehingga kapasitas tukar kation (KTK) dan daya jerap tanah terhadap air meningkat (Priyono, 2005a). Untuk tujuan jangka panjang, penggunaan PBS dalam bentuk bubuk juga efektif sebagai bahan pere- maja tanah (soil rejuveniting agent) yang telah terde- gradasi atau sangat tua. Misalnya, tanah lateritik (Ultisol dan Oksisol) yang sumber unsur haranya (ba- tuan/mineral primer) sudah hampir habis, tinggal ba- tuan/mineral sisa dari proses pelapukan yang telah berlangsung sangat lama dan intensif. Dalam hal ini, penggunaan PBS dimaksudkan untuk memasok ba- han induk baru yang kaya unsur hara esensial. Selain itu, tanah yang sudah tua (Ultisol dan Oksisol) umum- nya masam, sehingga pemberian PBS tersebut juga berfungsi sebagai bahan kapur (liming material). Con- toh hasil positif dari penelitian tentang pemanfaatan batuan silikat sebagai bahan peremaja tanah ditunjukkan oleh Coventry et al. (2001) pada tanah leteritik di Australia dan oleh Priyono et al. (2009) pada tanah bekas tambang batu apung di Lombok Utara – NTB. Reaktivitas patikel merupakan sifat suatu bahan yang sangat penting. Partikel batuan yang reaktif dapat berfungsi jamak (multi fuctions). Bubuk batuan (PBS) berbentuk bubuk (powder) berukuran nanome- ter kemungkinan dapat dimanfaatkan sebagai katali- sator, bahan perekat, penjerap kation, anion, atau pe- netral berbagai senyawa reaktif lainnya. Fungsi PBS tersebut mirif dengan fungsi mineral liat (clay) atau zeolit sebagai katalisator pada proses pemurnian mi- nyak bumi, dan sebagai bahan aktif (penjerap kotor- an) pada sabun cuci. Potensi kegunaan dari PBS ter- sebut dalam bidang non pertanian itu masih perlu pembuktian lebih jauh. Telah terbukti bahwa PBS dapat dimanfaatkan untuk menjerap beragam gas beracun, gas yang labil atau reaktif, misalnya NH3, H2S, dan CO2. Meskipun belum dikaji secara detail, pengalaman lapang menun- jukan bahwa PBS sangat efektif dan efisien untuk digunakan sebagai penyaring biogas yang baru keluar dari unit digester (Priyono, 2016). Sebelum disaring, biogas tersebut berbau menyengat dan tidak sedap karena selain mengandung bahan bakar berupa gas methan (CH4), juga gas NH3, H2S, dan CO2 yang dapat bersifat racun bagi manusia dan hewan. Penyaringan biogas dengan PBS ini dinilai lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan beberapa metode lain yang telah dikembangkan oleh para pakar biogas. Misalnya, pen- cucian biogas dengan air bertekanan tinggi, menggu- nakan berbagai bahan kimia oksida, dan mineral zeolit. Kemungkinan kegunaan PBS yang lebih luas perlu diobservasi, terutama yang berkaitan dengan kandungan unsur Si. Unsur Si, selain fungsinya yang sangat penting bagi tanaman, telah diketahui juga sangat penting dalam bidang kesehatan, antara lain sebagai penyusun dan penguat jaringan otot, tulang, dan kulit (Price et al., 2013; Farooq & Dietz, 2015). Implikasinya, masalah kesehatan masyarakat (manu- sia) mungkin dapat diatasi melalui pendekatan prinsip agrogeologi, terutama untuk penundaan proses pe- nuaan (aging), yaitu menggunakan material geologi yang banyak mengandung Si dan unsur hara (unsur mineral) sebagai pupuk tanaman pangan yang hasil- nya dikonsumsi oleh manusia dan hewan ternak. Kualitas pangan yang baik (dilihat dari segi kandung- an Si dan mineral) akan berpengaruh positif pada kesehatan (daya tahan) tubuh manusia dan hewan- konsumen bahan pangan tersebut. BAB 8 AGROGEOLOGI & PERTANIAN BERKELANJUTAN Munculnya cabang ilmu agrogeologi merupakan satu tahapan signifikan dari perkembangan ilmu pe- ngetahuan dan teknologi bidang pertanian. Seperti telah dibahas pada Bab 1, konsep agrogeologi adalah pendekatan antar disiplin ilmu untuk mempelajari ba- han geologis (mineral dan batuan), kaitannya dengan pemanfaatan bahan alami tersebut dalam pengelolaan agroekosistem pertanian (van Strateen (2002). Tujuan pengembangan dan penerapan konsep agrogeologi adalah untuk berkontribusi dalam mewujudkan usaha tani yang berkelanjutan. Dari penjelasan tersebut da- pat difahami bahwa konsep agrogeologi pada prinsip- nya merupakan bagian implementasi konsep besar pertanian berkelanjutan yang secara khusus difokus- kan pada pemanfaatan bahan geologis sebagai masuk- an (input) utama usaha tani. Pertanyaannya adalah, apa kontribusi nyata dan prospek ke depan dari agro- geologi dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan? Pengembangan agrogeologi merupakan salah sa- tu upaya praktis untuk mewujudkan suatu sistim pertanian berkelanjutan. Bahan alami, khususnya batuan silikat, ketersediaannya melimpah di berbagai belahan bumi dan mengandung semua unsur hara esensial (kecuali N) bagi tanaman, dan dapat berfungsi sebagai amelioran untuk tanah bermasalah keharaan. Oleh karena itu, penggunaan praktis bahan geologis yang tepat akan menjamin terbentuknya pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Untuk menyamakan persepsi dan pemahaman, dalam bab ini dibahas konsep dasar pertanian berke- lanjutan dan beberapa contoh bentuk usaha tani yang dianggap ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain usaha tani tradisional yang diterapkan oleh nenek - moyang kita, bentuk/model usaha tani yang akan dibahas tersebut adalah 'pertanian organik' dan 'model usaha tani sehat'. Pada bagian akhir dalam bab ini ditutup dengan penjelasan kontribusi dan prospek ke depan agrogeologi dalam pewujudan suatu pertani- an yang berkelanjutan. A. Konsep Pertanian Berkelanjutan Pertanian berkelanjutan merupakan sistem pe- ngelolaan konservatif sumber daya alam untuk kegiat- an pertanian yang berorientasi pada perubahan teknologi dan kelembagaan yang dilakukan sedemikian rupa untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan dasar (terutama sandang dan pangan) dan kepuasan manusia secara berkelanjutan bagi generasi sekarang dan mendatang (TAC-CGIAR, 1988; FAO, 1989). Pengertian yang lebih operasional, pertanian berkelanjutan adalah suatu sistem usaha dalam bidang pertanian yang produktif dan ramah lingkungan, dilakukan secara efektif, efisien, dan bijak dalam memanfaatkan sumberdaya alam untuk memenuhi kebutuhan dasar kehidupan manusia, terutama sandang dan pangan, sehingga sumber daya itu bermanfaat optimal hingga generasi mendatang. Setiap model atau sistem usaha tani dapat dikatakan berkelanjutan jika memenuhi ketentuan tersebut. Berdasarkan pemahaman tersebut di atas, terda- pat dua persyaratan penting yang harus terpenuhi dalam mewujudkan suatu sistem atau model pertani- an yang berkelanjutan. Pertama, terpenuhinya kebu- tuhan dasar manusia, terutama pangan dan energi dalam jumlah yang cukup dan kualitas yang baik. Kedua, cara pemanfaatan sumber daya alam yang tersedia harus efisien dan berkesinambungan. Jadi, usaha tani itu harus produktif, tidak boros dalam pemanfaatan sumber daya alam, dan tidak menimbul- kan kerusakan lingkungan yang signifikan sehingga generasi yang akan datang akan tetap dapat meman- faatkan sumber daya alam tersebut untuk memenuhi kebutuhan pokok hidupnya. Agar dapat diterapkan di tingkat lapang, konsep yang ideal tersebut harus diterjemahkan secara teknis yang mudah difahami dan diterapkan oleh petani. Dua persyaratan umum pertanain berkelanjutan seperti tersebut di atas dapat dielaborasi lebih opera- sional, bahwa usaha tani tersebut harus: 1. Menguntungkan. Semua petani pasti berharap mendapatkan hasil atau keuntungan yang memadai dari usaha taninya, minimal terpenuhi kebutuhan primer mereka sehari- hari. Jika tidak menguntungkan, maka dapat dipasti- kan bahwa cepat atau lambat usaha tersebut akan berhenti (artinya tidak berkelanjutan). Keuntungan usaha tani tersebut seharusnya tidak hanya dimaknai sebagai keuntungan material, tetapi juga keuntungan non-material. Misalnya, kondisi lingkungannya tetap terjaga atau bahkan menjadi lebih baik. Kondisi ling- kungan yang dimaksud bukan hanya lingkungan fisik, tetapi lebih luas meliputi aspek non-fisik, yaitu kondi- si lingkungan sosial - budaya dan ekonomi. Apa yang terjadi dalam praktek usaha tani pada era modern? Sebagian besar pelaku usaha tani ternya- ta masih lebih mengutamakan perolehan keuntungan finansial yang maksimal. Akibatnya, aspek kelestarian sumber daya alam dan keberlanjutan usaha tani itu sendiri kurang mendapat perhatian. Sumber daya alam cenderung dieksploitasi semaksimal mungkin untuk mencapai target keuntungan finansial yang maksimal tersebut, bahkan seringkali pemanfaatan sumber daya alam itu melampaui kapasitas daya du- kung alamiahnya. Banyak contoh tentang sistim usaha tani yang diterapkan oleh petani saat ini yang tidak berlanjutan dan memicu percepatan degradasi sumber daya alam terutama tanah dan keragaman hayati. Misalnya, untuk mendapatkan keuntungan finansial yang tinggi, banyak petani bawang merah dan komoditi pangan lainnya sering menggunakan pupuk N sintetis ber- dosis sangat tinggi (berlebihan). Hal itu dimaksudkan agar ukuran dan bobot produk bawangnya saat panen maksimal, tanpa mempertimbangkan kualitas produk bawangnya yang justru rendah. Akibat langsung dari dosis aplikasi pupuk N sintetis yang terlalu tinggi tersebut, tanaman menjadi rentan terhadap serangan hama dan penyakit, memicu penggunaan pestisida sintetis pada usaha tani makin meningkat dan cen- derung berlebihan. Tentu hal tersebut dapat menam- bah dampak negatif terhadap aspek lingkungan yang lebih luas. Selain itu, usaha tani seperti itu akan menghasilkan produk bahan pangan yang kurang se- hat karena kemungkinan besar mengandung residu pestisida sintetis yang tinggi. Secara finansial, mung- kin petani tersebut memperoleh keuntungan besar. Tetapi, kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan usaha tani seperti itu jauh lebih mahal. Mun- culnya banyak jenis penyakit di masyarakat saat ini misalnya, kemungkinan karena mereka mengkonsum- si produk pangan yang mengandung residu pestisida sintetis. Oleh karena itu, dalam rangka menciptakan usaha tani yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, praktek usaha tani seperti itu harus dicegah bahkan dilarang. 2. Dapat memenuhi kebutuhan primer masyarakat. Pertanian memegang peran utama dalam meme- nuhi kebutuhan dasar masyarakat luas, terutama bahan pangan. Masyarakat membutuhkan bahan pa- ngan dalam jumlah yang cukup, mudah diakses (ter- jangkau), dan kualitasnya baik (sehat untuk dikon- sumsi). Selain harus dapat memenuhi tuntutan terse- but, usaha tani yang diterapkan secara teknis harus ramah lingkungan dan berkelanjutan sehingga mam- pu memenuhi tuntutan masyarakat konsumen secara berkelanjutan pula. 3. Ramah lingkungan. Dalam beberapa dekade terakhir, beberapa isti- lah atau slogan 'go green', 'green products', atau 'eco- friendly' telah dijadikan label jaminan bahwa produk pertanian tersebut dihasilkan dari penerapan tekno- logi usaha tani yang ramah lingkungan. Dalam usaha tani, eco-friendly bermakna bahwa usaha tani tersebut dilakukan dengan memperhatikan aspek keseimbang- an ekologis yang proporsional. 4. Mandiri dalam penyediaan input usaha tani. Usaha tani dapat berkelanjutan jika ketersediaan input utama usaha tani itu juga berkelanjutan, selalu tersedia pada saat diperlukan oleh petani. Input usaha tani penting meliputi benih, pupuk atau amelioran, pestisida, dan herbisida. Keberlanjutan usaha tani ter- sebut akan terjamin jika kebutuhan bahan tersebut dapat terpenuhi secara mandiri. Secara praktis, optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal, antara lain benih, pupuk, dan pestisida nabati yang keberadaannya melimpah di suatu kawasan pertanian akan menjamin keberlanjutan ketersediaan bahan dan kegiatan usaha tani tersebut. Khusus yang berkaitan dengan sumber unsur hara (pupuk) dari bahan alami lokal, salah satu contoh yang ketersediaannya melim- pah adalah batuan volkanik. Ketergantungan terhadap input tertentu dari luar (import) sering kali tidak dapat dihindari. Tetapi, keter- gantungan tersebut harus dapat diminimalisir. Misal- nya dengan mengadopsi sumber input usaha tani dari luar berupa benih yang memiliki keunggulan tertentu di banding benih lokal, kemudian dikembangkan se- hingga adaftif terhadap kondisi lokal. Selanjutnya, be- nih tersebut diperbanyak di dalam negeri. 5. Adaftif terhadap perubahan iklim. Perubahan iklim yang terjadi pada beberapa de- kade terakhir sangat berpengaruh terhadap kegiatan usaha tani di seluruh dunia, terutama di negara ber- iklim tropis; dan dampak perubahan iklim itu mung- kin sulit atau tidak dapat dihindari. Oleh sebab itu, harus dikembangkan model usaha tani yang adaftif terhadap perubahan iklim tersebut. Fokus dari upaya tersebut lebih diarahkan pada adaptasi, yaitu mengu- rangi resiko terjadinya kegagalan atau penurunan produksi yang dapat mengancan keberlangsungan usaha tani tersebut. Perubahan iklim merupakan hasil telaah jangka panjang tentang pola umum kondisi iklim secara glo- bal yang menunjukan kecenderungan atau telah terja- dinya perubahan pola yang signifikan. Perubahan iklim pernah terjadi beberapa kali selama sejarah du- nia dengan penyebab utama yang berbeda-beda. Terja- dinya perubahan iklim pada saat ini jauh lebih cepat daripada variasi iklim secara alami yang terjadi terda- hulu. Para pakar lingkungan mengkaitkan perubahan iklim saat ini dengan laju produksi emisi gas rumah kaca, terutama gas karbon dioksida dan methan yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan terjadinya perubah- an suhu udara yang ekstrim tinggi di suatu tempat dan ekstrim rendah di tempat lain. Ketidak-teraturan pola, kuantitas, frekuensi, serta sebaran curah hujan karena perubahan iklim sangat mempengaruhi

aktivi- tas usaha tani. Perubahan tersebut menyebabkan pa- ra petani kesulitan untuk menentukan waktu tanam yang tepat, atau sering terjadi kekeringan di suatu kawasan dan banjir di kawasan lain yang semuanya itu dapat menyebabkan gagal panen. Kegiatan usaha tani bukan satu-satunya sektor yang terkena dampak negatif dari perubahan iklim; juga bukan yang dominan menjadi penyebab perubah- an iklim. Tetapi, upaya mitigasi untuk menurunkan laju emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian dan untuk adaptasi usaha tani terhadap perubahan iklim harus dilakukan dalam setiap tahapan kegiatan usaha tani di tingkat lapang, agar kegiatan usaha tani yang produktif tetap dapat berlangsung. Bentuk kegiatan praktis mitigasi tersebut antara lain (a) meningkatkan luas dan kerapatan tutupan lahan oleh vegetasi se- hingga dapat meningkatkan serapan gas karbon dioksida di atmosif melalui fotosintesis, (b) mengem- balikan limbah pertanian (biomasa) ke petak usaha tani, tidak membakarnya, (c) penggunaan bahan orga- nik atau biocharge sebagai pupuk atau amelioran, dan (d) penggunaan batuan silikat sebagai bahan perema- jaan tanah. Berkaitan dengan contoh terakhir, Campe (2013) mengkompilasi informasi berbagai hasil riset tentang penggunaan batuan untuk meningkatkan per- tumbuhan dan produktivitas tanaman yang secara tidak langsung dapat menurunkan emisi gas CO2 dan CH4 di permukaan bumi. Jika ditelusuri dari sejarah perkembangan pe- ngetahuan dan teknologi pertanian, pengembangan konsep dan promosi pertanian berkelanjutan terjadi setelah timbulnya kesadaran masyarakat dunia terha- dap dampak negatif dari praktek usaha tani yang kurang memperhatikan aspek lingkungan dan keber- lanjutannya. Sistim usaha tani yang dimaksud telah diterapkan sejak era revolusi hijau tahun 1960-an hingga sekarang. Kita menyadari bahwa pertanian merupakan sis- tem yang kompleks, dipengaruhi oleh banyak faktor yang berkaitan langsung dengan kegiatan usaha tani maupun non-pertanian. Konsep pertanian berkelan- jutan tersebut sangat ideal. Setiap bentuk/model usa- ha tani yang dapat diklaim berlanjutan mungkin hanya dapat diterapkan pada lokasi dan kondisi spesifik, atau bahkan mungkin hanya dapat diterapkan pada era tertentu. B. Model Usaha Tani Berkelanjutan Banyak model atau bentuk pertanian yang berke- lanjutan yang sebenarnya telah diterapkan oleh nenek moyang kita selama berabad-abad. Model usaha tani yang mereka lakukan umumnya disebut usaha tani tradisional. Bentuk teknis usaha tani tradisional terse- but antara lain adalah sistim usaha tani campuran, rotasi tanaman, tumpang sari, penggunaan mulsa organik, usaha tani terpadu tanaman & ternak, dan tanaman padi & ikan (mina padi). Teknik usaha tani tersebut berkembang secara alami sesuai dengan kon- disi yang ada saat itu, dan ditularkan ke generasi ber- ikutnya secara turun-menurun. Model usaha tani tra- disional tersebut berkembang secara alami (indigenous knowledge). Petani hanya memanfaatkan input alami lokal, karena memang belum tersedia bahan sintetis maupun teknologi untuk memodifikasi sifat genetis tanaman. Hal itu berbeda dengan di era modern dima- na konsep pertanian berkelanjutan digagas dan difor- mulasikan oleh para pakar dengan mempertimbang- kan berbagai aspek untuk dipadukan. Pengembangan pertanian berkelanjutan modern merupakan respon terhadap praktek usaha tani yang sarat dengan penggunaan bahan kimia sintetis yang dimulai sejak era revolusi hijau dan berjalan hingga sekarang. Tidak dapat dipungkiri bahwa penggunaan bahan agrokimia tersebut mampu meningkatkan produksi bahan pa- ngan untuk memenuhi kebutuhan pangan masyara- kat dunia. Tetapi, usaha tani tersebut juga menimbul- kan dampak negatif terhadap lingkungan yang sangat luas. Pada konsep pertanian berkelanjutan modern tampak keinginan kuat untuk kembali ke sistem per- tanian tradisional yang telah terbukti berkelanjutan (berlangsung berabad- abab), bertani menyatu dengan alam sehingga memunculkan slogan ‘back to nature”. Namun, penerapan konsep pertanian berkelanjutan di era modern itu tidak mudah, tidak bisa hanya dengan mengadopsi begitu saja model pertanian tradisional. Kondisi berbagai aspek kehidupan (peradapan) telah banyak berubah sehingga diperlukan penyesuaian pertanian tradisional dengan peradapan modern. Untuk merespon dan menterjemahkan konsep pertanian berkelanjutan modern ke bentuk teknis (terapan), maka dalam sub bab ini dibahas dua model pertanian atau usaha tani yang diklaim oleh banyak pihak saat ini sebagai usaha tani yang berkelanjutan. Dua contoh model yang dimaksud adalah ‘pertanian organik’ dan ‘pertanian sehat’. 1. Usaha Tani Organik Pengembangan model atau sistem pertanian or- ganik seperti yang kita kenal saat ini merupakan respon terhadap upaya mewujudkan pertanian berke- lanjutan. Agar tidak terjadi perbedaan persepsi, kon- sep dasar pertanian organik ditulis ulang dalam sub bab ini. Konsep pertanian organik yang diklaim ber- kelanjutan tersebut diharapkan dapat diterapkan se- cara global dengan beberapa penyesuaian dengan kon- disi lokal. Pertanian organik adalah suatu pendekatan ho- listik terhadap pengelolaan sistem produksi yang mempromosikan upaya peningkatan kesehatan agro- ekosistem, meliputi keragaman hayati (biodiversity), siklus aktivitas biologi termasuk biologi tanah. Dikutip dari International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM, 2008): "Organic agriculture is a production system that sus- tains the health of soils, ecosystems and people. It relies on ecological processes, biodiversity and cycles adapted to local conditions, rather than the use of inputs with adverse effects. Organic agriculture combines tradition, innovation and science to benefit the shared environ- ment and promote fair relationships and a good" quality of life for all involved." Dalam penerapan konsep pertanian organik ter- sebut ada 4 prinsip yang harus dipenuhi, yaitu (IFOAM, 2008): a. Kesehatan (health): usaha tani organik harus se- cara berkelanjutan dapat meningkatkan kesehat- an tanah, tanaman, ternak, manusia, dan alam se- bagai satu kesatuan (”organic agriculture should sustain and enhance the health of soil, plant, ani- mal, human and planet as one and indivisible”). b. Ekologis (ecology): usaha tani organik harus dida- sarkan pada sistem dan siklus ekologi kehidupan, bekerja dengannya, meningkatkan dan membantu agar berkelanjutan (”organic farming should be based on the living ecological systems and cycles, work with them, emulate them and help sustain them”). c. Keselarasan (fairness): usaha tani organik harus dibangun atas dasar kesetaraan dan keselarasan, dengan proses lingkungan dan kehidupan secara umum (”organic agriculture should build on relation- ships that ensure fairness with regard to common environment and life processes”). d. Perhatian (care): usaha tani organik harus dikelola dengan memperhatikan dan bersikap bertanggung jawab untuk melindungi kesehatan dan kondisi ke- hidupan generasi saat ini dan yang akan datang serta terhadap lingkungan (”organic farming should be managed in a precautionary and responsible manner to protect the health and well being of current and future generations and the environ- ment”). Untuk dapat memenuhi persyaratan spesifik dalam sistem tersebut, konsep pertanian organik lebih menekankan pada praktek pengelolaan (management practices) yang memungkinkan dapat dilakukan, baik secara agronomis, biologis, maupun mekanis daripada memperhatikan tentang asal-usul sumber input (in farm atau off farm) ataupun jenis bahan (sintetis atau non-sistetis) yang digunakan dalam usaha tani. IFOAM mengingatkan bahwa pertanian organik seyog- yanya tidak hanya dimaknai secara teknis, tetapi juga memperhatikan aspek non-teknis, antara lain meliputi pola pikir, sikap, dan keyakinan. Namun, himbauan itu mungkin sulit difahami dan diterapkan oleh petu- gas pertanian maupun petani sebagai pelaku usaha tani. Fakta di lapang menunjukan bahwa petani pada umumnya lebih berorientasi untuk memperoleh keun- tungan ekonomis daripada keuntungan ekologis. Kom- promi (perhatian yang proporsional) terhadap kedua bentuk keuntungan usaha tani tersebut oleh petani bukan sesuatu yang tidak mungkin dicapai. Tetapi untuk mengubah sikap tersebut umumnya memerlu- kan upaya keras dan waktu cukup lama. Promosi tentang penerapan pertanian organik secara internasional pada beberapa dekade terakhir dipelopori oleh IFOAM dan mendapat dukungan FAO serta banyak organisasi profesi lainnya termasuk ka- langan akademisi. Mereka menaruh perhatian besar terhadap pentingnya mengimplementasikan konsep pertanian organik tersebut di tingkat hamparan. Hasil nyata dari promosi bertani organik secara global ter- sebut antara lain adalah meningkatnya persepsi yang positif dari konsumen bahan pangan (masyarakat) terhadap produk organik. Berdasarkan hasil telaah (review) oleh banyak pakar pertanian, antara lain Barańska et al. (2017) dan Gopalakrishnan (2019), produk pertanian organik dipercaya memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan produk dari pertanian konvensional. Praktek usaha tani organik bermunculan dalam berbagai bentuk/pola, meskipun skala usahanya relatif kecil. Misalnya, usaha tani dalam rumah kaca dan di lahan pekarangan. Untuk mendukung dan menjamin implementasi konsep pertanian organik di tingkat lapang dan untuk memberi jaminan kualitas produk organik kepada konsumen, dikembangkan pula institusi penjaminan mutu (sertifikasi) ‘produk organik’ di banyak negara. Selain berfungsi konsultatif, institusi tersebut diper- caya untuk mengevalusi proses dan produk usaha tani organik yang dilakukan oleh petani dan industri makanan. Saat ini label ‘organik’ mempunyai arti sa- ngat penting bagi pihak produsen maupun konsumen produk pertanian. Pencantuman label ‘organik’ pada produk pertanian dibolehkan setelah lolos dari proses sertifikasi cukup ketat dan relatif mahal. Standar teknis sertifikasi ‘organik’ secara rinci ti- dak sama di setiap negara, tetapi beberapa ketentuan teknis yang umum yang sama. Pada ketentuan teknis umum tersebut antara lain disebutkan bahwa usaha tani tersebut harus menggunakan bahan alami dan dilarang menggunakan bahan sintetis dengan bebera- pa pengecualian. Beberapa jenis bahan alami, misal- nya batuan yang mengandung arsenik melebihi am- bang batas aman tidak boleh digunakan, tetapi bahan sintetis insect pheromones (pengusir insek), masih di- perbolehkan digunakan dalam pertanian organik. Berdasarkan uraian di atas, sekilas tampak bah- wa pertanian organik akan dapat berkembang pesat dan diterima oleh semua pihak (success stories). Na- mun, kenyataannya hingga sekarang pertanian orga- nik yang diterapkan sesuai dengan ketentuan yang telah diuraikan di atas sangat terbatas. Perkembangan penerapan pertanian organik di berbagai negara relatif lambat. Proporsi luas lahan pertanian dan produk or- ganik hingga saat ini sangat rendah dibandingkan dengan produk pertanian konvensional atau non- organik (Gambar 16). Gambar 16. Negara dengan kontribusi lahan pertanian organik > 10 % terhadap total lahan pertanian (data dari FiBL & IFOAM, 2020). Lahan pertanian organik di Indonesia pada tahun 2017 hanya sekitar 0,38 % dari total luas lahan pertanian yang ada, dan sebagian besar hanya dite- rapkan pada usaha tani perkebunan. Menyikapi kenyataan tersebut, banyak pihak yang merasa optimis, tetapi juga banyak yang pesimis. Hal itu wajar karena adanya perbedaan tingkat pemahaman dan cara pandang tentang pertanian or- ganik, kondisi spesifik lokasi, dan kepentingan lain- nya. Usaha tani organik tidak dapat diteapkan begitu saja pada lahan pertanian yang telah lama digunakan untuk usaha tani konvensional. Lahan tersebut diang- gap telah tercemar oleh berbagai macam bahan toxic terutama pestisida dan herbisida sintetis. Untuk me- ngeliminir bahan cemaran tersebut memerlukan wak- tu yang cukup lama. Singkatnya, masih banyak hal dalam pertanian organik yang perlu dibenahi agar dapat diterapkan pada beragam kondisi dan kepen- tingan di tingkat hamparan usaha tani. Konsep perta- nian organik yang luar biasa tidak akan banyak ber- makna jika tidak dapat diterapkan di tingkat hampar- an usaha tani. Perkembangan persepsi yang positif dari konsu- men pangan terhadap produk organik umumnya dida- sarkan pada anggapan bahwa produk organik lebih sehat atau lebih unggul kandungan nutrisinya dari- pada produk hasil dari usaha tani konvensional. Teta- pi pandangan tersebut tidak selalu terbukti di lapang. Hingga sekarang masih banyak pakar pertanian dan ahli nutrisi yang memperdebatkan kebenaran dari klaim tersebut. Karena adanya kepentingan yang ber- beda-beda antar pihak atau antar pakar dengan spe- sialisasi masing-masing, telaah terhadap penilaian produk organik vs konvensional sering kali tergantung dengan siapa atau pihak mana kita berdiskusi tentang isu tersebut. Para pakar ekologi/lingkungan umum- nya cenderung berpendapat bahwa aspek ekologi (lingkungan) adalah yang terpenting, mendapatkan proporsi perhatian utama. Sebaliknya, pakar ekonomi umumnya lebih memperhatikan aspek keuntungan finansial daripada atau keuntungan ekologis. Sesuai dengan konsep pertanian organik yang bersifat ‘holis- tik’, pihak manapun seharusnya mempertimbangkan berbagai aspek secara proporsional. Cara pandang yang egoistik harus ditransformasi ke kompromistik sehingga dapat diterima oleh semua pihak. Berkaitan dengan persepsi masyarakat dunia ter- hadap keunggulan nilai gizi produk organik, Mei et al (1917) juga menelaah banyak hasil penelitian di Eropa, membandingkan kualitas produk pertanian or- ganik dengan produk dari pertanian konvensional. Dari kajian itu disimpulkan bahwa mengkonsumsi produk organik dapat mengurangi resiko munculnya alergi, kegemukan/obesitas pada konsumen. Pakar lain, misalnya Brandt & Møgaard, (2001), Worthington (2001), dan Barański et al. (2014) melaporkan bahwa produk organik lebih bernutrisi daripada produk per- tanian konvensional. Keunggulan itu dapat dilihat, mi- salnya, dari kadungan vitamin C, anti oksidan dan omega-3 asam lemak pada produk organik yang lebih tinggi dibanding dengan produk dari pertanian kon- vensional. Tetapi sekali lagi, kesimpulan itu tidak di- dukung dengan bukti yang cukup meyakinkan. Yang dapat dipastikan bahwa kandungan residu bahan aktif pestisida sintetis dan logam berat pada produk organik tidak ada atau sangat minim. Reganold dan Wacter (2017) menelaah publikasi hasil riset yang lebih luas tentang performa pertanian organik dikaitkan dengan 4 matrik keberlanjutan, yaitu keberlanjutan produksi, dampak terhadap ling- kungan, ekonomi, dan sosial kehidupan. Dikaitkan dengan keberlanjutan produksi, pertanian organik di- hadapkan pada fakta yang delematis. Di satu sisi, sek- tor pertanian dituntut untuk terus meningkatkan pro- duksinya agar dapat memenuhi kebutuhan pangan masyarakat dunia yang populasinya cenderung terus meningkat. Tetapi di sisi lain, produktivitas pertanian organik ternyata selalu beberapa persen lebih rendah (tergantung pada lokasi dan jenis tanaman) daripada produksi dari pertanian konvensional (Stanhill, 1990; Badgley et al., 2007; De Ponti et al., 2012; Senfert et al., 2012; Ponisio et al., 2015). Kenyataan tersebut menyebabkan terjadinya dua kelompok pakar pertani- an yang bersebrangan. Satu kelompok mendukung diterapkannya konsep pertanian organik di semua negara, sedangkan pihak yang lain justru khawatir jika penerapan pertanian organik diperluas akan me- nekan kondisi ketahanan pangan di suatu kawasan atau negara tertentu. Penerapan pertanian organik di masing-masing negara atau kawasan juga sangat dipengaruhi oleh kondisi ketahanan pangan setempat. Keunggulan kua- litas produk organik seperti dilaporkan oleh beberapa peneliti tersebut di atas mungkin sampai saat ini be- lum dapat mempengaruhi kebijakan pemerintah di suatu kawasan atau negara untuk menerapkan perta- nian organik secara penuh atau luas. Mengacu pada beberapa kesulitan dan hambatan dalam penerapan pertanian organik secara luas seper- ti diuraikan di atas, maka wajar muncul pertanyaan: haruskah pertanian organik diterapkan sesuai dengan ketentuan yang dikemukanan oleh IFOAM? Alternatif- nya, konsep pertanian organik tersebut dimodifikasi agar lebih aplikatif di lapang yang beragam kondi- sinya. Beberapa aspek pertanian organik itu sendiri mungkin perlu dibenahi, baik mengenai konsep (teori- tis) maupun teknologi praktisnya. Seperti halnya kon- sep dan teknologi lainnya, umumnya selalu berkem- bang sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta kebutuhan manusia atau perkem- bangan peradapan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pembenahan konsep pertanian organik dan tindakan tersebut harus dipandang sebagai sesuatu yang wajar untuk dilakukan. Setidaknya ada tiga hal dalam pertanian organik yang mungkin perlu ditinjau kembali. Pertama, peng- gunaan istilah ‘organik’ dalam ‘pertanian organik’ sangat potensial menimbulkan perbedaan atau salah tafsir, terutama oleh petani atau masyarakat umum. Kedua, masalah pertanian yang kita hadapi saat ini (pada pertanian modern) sebenarnya lebih berkaitan dengan penurunan kualitas bahan pangan dan kondi- si lingkungan yang diakibatkan oleh ‘cara penggunaan input’ yang kurang tepat (umumnya ber- lebihan), bukan oleh ‘jenis input’ usaha tani yang digunakan. Ketiga, persyaratan (standard) teknis ser- tifikasi untuk usaha tani dan produk organik yang diberlakukan oleh institusi pemberi sertifkat organik mungkin terlalu kaku dan sulit dipenuhi untuk se- bagian besar kawasan atau negara yang kodisinya beragam. Sebagian besar lahan pertanian yang ada saat ini telah lama digunakan untuk usaha tani kon- vensional, kemungkinan besar telah tercemar oleh re- sidu bahan agrokimia (terutama pestisida dan herbi- sida sintetis). Setidaknya diperlukan masa transisi yang cukup panjang (3 – 5 tahun) untuk berubah dari bertani konvensional ke organik. Hal itu kemungkinan menjadi salah satu penyebab keengganan petani un- tuk berubah dari bertani konvensional ke organik. Seperti dijelaskan oleh IFOAM (2008), pertanian organik sebenarnya tidak berkaitan langsung dengan jenis bahan yang digunakan dalam usaha tani, yaitu bahan organik. Tetapi dalam prakteknya, seperti yang tertera pada ketentuan umum standar sertifikasi orga- nik, penggunaan input bahan ‘organik’ adalah suatu keharusan. Bertani organik tidak dibolehkan menggu- nakan pupuk anorganik atau sintetis. Larangan penggunaan pestisida sintetis, sudah tepat karena berapapun dosis/intensitas pemakaiannya telah ter- bukti merusak lingkungan. Tetapi, untuk larangan penggunaan pupuk sintetis, misalnya urea, TSP, dan KCl, mungkin harus ditinjau kembali. Makna ‘organik’ dalam kehidupan sehari-hari, atau yang difahami oleh masyarakat secara umum adalah semua jenis atau bahan yang berasal dari mahluk hidup (organisme). Misalnya, kompos dari limbah peternakan dan biomasa tanaman, serta ber- bagai asam atau senyawa organik kompleks lainnya, dan mikro organisme penambat N dan pelarut P. Artinya, sebagian besar petani memahami pertanian organik secara sempit pada aspek teknis saja, yaitu bertani yang hanya menggunakan bahan atau senya- wa organik. Tentu saja hal itu bebeda dengan penger- tian pertanian organik menurut IFOAM. Selain itu, secara teknis (menurut IFOAM, 2028) dalam berusaha tani organik ternyata masih diperbolehkan mengguna- kan bahan anorganik tertentu, misalnya kapur, dolo- mite, dan bermacam jenis batuan. Bahan tersebut adalah non-sintetis atau alami yang dianggap tidak menimbulkan dampak negatif yang signifikan terha- dap lingkungan. Terkait dengan hal itu, agar lebih jelas dan tidak menimbulkan salah tafsir sebaiknya digunakan istilah ‘pertanian alami’ bukan ‘pertanian organik’, karena masih dibolehkan menggunakan ba- han organik maupun anorganik yang alami (non- sintetis). Lebih jauh, dampak dari kurang tepatnya penaf- siran oleh sebagian masyarakat umum tersebut ter- hadap istilah ‘pertanian organik’ maka muncul anggapan atau stigma bahwa menggunakan input organik dalam usaha tani selalu lebih baik daripada menggunakan input anorganik atau sintetis (misalnya pupuk urea, SP, KCl, atau NPK), sehingga penggunaan input sintetis harus dihindari. Padahal anggapan itu tidak selalu tepat. Berdasarkan hasil telaah Mei et al (1917), penggunan input ‘organik’ tidak selalu menghasilkan produk yang kualitasnya lebih tinggi atau lebih sehat (nutrisious) daripada yang menggunakan input anorganik. Berdasarkan ketentuan IFOAM (2008), pupuk sintetis yang telah lama dikenal dan digunakan oleh petani (urea, TSP, KCl, dan KNO3) tidak boleh digu- nakan dalam usaha tani organik. Tetapi, pupuk anor- ganik alami berupa batuan fosfat dan mineral/batuan lainnya (kapur, dolomit, dan K-feldsfar) boleh diguna- kan dalam usaha tani organik. Komparasi ini me- nunjukan bahwa dalam konsep pertanian organik membedakan ‘wujud bahan’, yaitu bahan sintetis tidak boleh digunakan, sedangkan bahan alami (non- sintetis), termasuk bahan organik, boleh digunakan. Tetapi ketentuan tersebut tidak mempertimbangkan aspek ‘tehnik penggunaan’ pupuk tersebut. Artinya, walapun dosis dan cara aplikasi pupuk sintetis itu tepat, tetap saja tidak diperbolehkan digunakan dalam usaha tani organik. Argumentasi dilarangnya penggunaan pupuk sin- tetis dalam usaha tani organik karena pupuk sintetis mudah larut sehingga dapat mencemari air tanah, mununrukan kualitas produk atau menghilangkan kharakteristik kandungan nutrisi alami dari masing- masing jenis tanaman. Selain itu, mungkin suatu penilaian yang berlebihan bahwa dampak negatif dari penggunaan pupuk sintetis tersebut dikaitkan pula dengan proses pembuatannya yang menghasilkan lim- bah industri pupuk sintetis yang umumnya bersifat masam (Chandini et al., 2019). Benarkah sedemikian serius dampak negatifnya terhadap lingkungan se- hingga menggunakan segala jenis pupuk sintetis ha- rus dilarang dalam usaha tani organik? Jika penggunaan pupuk sintetis itu dilakukan secara tepat, sesuai dengan kebutuhan tanaman (dan kondisi tanahnya), komposisi unsur hara yang dibe- rikan ke tanaman berimbang, logikanya tentu tidak akan menimbulkan dampak negatif yang signifikan. Oleh karena itu, pelarangan terhadap penggunaan je- nis pupuk sintetis dalam praktek usaha tani organik tersebut layak ditinjau kembali. Salah satu aspek lain harus dipertimbangkan adalah tentang fakta tuntutan produksi pertanian yang tinggi untuk dapat memenuhi kebutuhan pangan nasional atau global. Tuntutan itu hanya dapat dipe- nuhi jika didukung dengan penggunaan pupuk sinte- tis yang tepat dan varietas tanaman berpotensi pro- duksi tinggi atau unggul. Potensi produksivitas yang tinggi itu akan menjadi nyata jika tanaman dipasok dengan unsur hara (pupuk) dosis tinggi pula. Persya- ratan tersebut tidak akan dapat terpenuhi jika hanya menggunakan pupuk organik yang kadar unsur hara esensialnya relatif rendah, dosisnya harus sangat tinggi (puluhan ton/ha). Kombinasi pupuk organik dan sintetis mungkin merupakan cara yang paling tepat, dapat diterima oleh semua pihak. Pemupukan didefinisikan sebagai kegiatan pem- berian bahan organik maupun anorganik yang me- ngandung unsur hara kepada tanaman, baik melalui tanah maupun daun, sehingga kebutuhan optimal unsur hara tanaman itu terpenuhi (Mashner, 1992). Logika umum, pemupukan akan menimbulkan dam- pak negatif signifikan terhadap kualitas produk per- tanian maupun lingkungan apabila pemberiannya tidak proporsional, tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman, terutama jika berlebihan. Fakta yang sering terjadi di tingkat hamparan (on farm), banyak petani yang menggunakan pupuk dengan dosis yang ber- lebihan (terutama pupuk N). Penggunaan pupuk sin- tetis berhara makro (N, P, dan K) dengan dosis tinggi secara terus-menerus pada setiap musim tanam, tan- pa diimbangi dengan pemberian unsur hara mikro, juga dapat menyebabkan kuantitas maupun kualitas produksi tanaman rendah dan demicu terjadinya de- gradasi lahan (tanah). Karena pupuk sintetis umum- nya relatif mudah larut dalam air, maka penggunakan pupuk sintetis harus dilakukan secara bertahap. Misalnya, pemupukan diaplikasikan beberapa kali dan jumlahnya harus sesuai dengan kebutuhan optimal tanaman pada setiap tahapan pertumbuhannya. Ring- kasnya, kemungkinan dampak negatif dari penggunaan pupuk sintetis terhadap kualitas produk maupun lingkungan lebih ditentukan oleh cara pemu- pukannya, bukan oleh jenis pupuknya (organik vs anorganik, sintetis vs alami). Oleh karena itu, larang- an penggunaan pupuk sintetis dalam pertanian orga- nik perlu ditinjau kembali. Berdasarkan penjelasan terhadap beberapa isu di atas, dapat disimpulkan bahwa konsep pertanian or- ganik sangat baik (ideal). Tetapi, beberapa aspek perlu dibenahi agar dapat difahami oleh petani dengan bera- gam tingkat pengetahuan dan ketrampilan, dan dite- rapkan di lapang secara luas. Dua aspek penting yang perlu dibenahi meliputi penggunaan istilah ‘organik’ dan pelarangan penggunaan pupuk sintetis (urea, TSP, KCl, dsb). Kombinasi pupuk organik dengan pupuk sintetis, atau kombinasi sistem pertanian orga- nik dan konvensional mungkin lebih tepat dan realis- tis untuk diterapkan pada kondisi usaha tani saat ini dan ke depan. Larangan penggunaan pestisida dan herbisida sintetis serta benih dari hasil rekayasa gene- tik (GM) relatif mudah dan dapat diterima oleh petani, meskipun hal itu akan mendapat perlawanan dari per- usahaan penghasil produk tersebut. 2. Usaha Tani Sehat Seperti telah di bahas pada sub bab sebelumnya, pertanian organik yang telah dianggap sebagai suatu sistem pertanian yang berkelanjutan ternyata hingga sekarang masih sulit diterapkan secara luas, dan beberapa aspek perlu ditinjau kembali agar dapat diterima dan diterapkan oleh petani. Fakta tersebut telah menginspirasi dan menjadi tantangan bagi para pakar pertanian untuk mengembangkan alternatif model usaha tani lain yang lebih aplikatif di tingkat hamparan dengan tetap memenuhi persyataan utama pertanian berkelanjutan. Salah satu alternatif model usaha tani yang ajukan dan didiskusikan dalam bagian ini adalah model usaha tani sehat (MUTS). Seperti halnya pertanian organik, pengembangan MUTS juga mengacu pada konsep pertanian berkelan- jutan, dan diharapkan dapat menjadi salah satu ben- tuk operasional dari konsep pertanian berkelanjutan. Jadi, pengembangan MUTS bukan dimaksudkan un- tuk menggantikan model atau teknologi usaha tani yang sudah ada yang diklaim oleh banyak pihak seba- gai usaha tani

yang berkelanjutan, termasuk perta- nian organik. Lebih tepatnya, pengembangan MUTS dimaksudkan untuk melengkapi atau penyempurnaan berbagai bentuk usaha tani berkelanjutan yang sudah ada, terutama pada teknis terapannya sesuai dengan kondisi saat ini dan ke depan. Penerapan MUTS dapat dikombinasikan dengan model usaha tani yang sudah ada sejauh kombinasi itu diarahkan untuk terwujudnya pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Istilah 'usaha tani sehat' sebenarnya sudah sering digunakan oleh banyak pihak, terutama dalam komunikasi atau diskusi tentang isu pertanian melalui media sosial. Dalam komunikasi tersebut, usaha tani sehat umumnya diidentikan dengan usaha tani organik. Tetapi, MUTS yang dimaksud di sini agak berbeda dengan pertanian organik berdasarkan IFOAM (2008) yang telah dijelaskan di sub bab di depan. Bahkan, beberapa aspek mendasar dan tekno- logi praktis pada MUTS bertolak belakang dengan pada pertanian organik. Preferensi penggunaan istilah 'sehat' dalam MUTS karena disesuaikan dengan tuju- an dan sasaran penerapan MUTS, meskipun sebenar- nya mirif atau sama dengan tujuan dan sasaran pene- rapan konsep pertanian organik. MUTS dikembangkan dan dipromosikan sebagai salah satu cara pengelolaan usaha tani dengan meng- optimalkan sumber daya alami lokal, dilengkapi tek- nologi terapan yang relatif mudah, murah, ramah ling- kungan, dan berkelanjutan untuk diterapkan oleh petani di tingkat hamparan. MUTS sangat memper- hatikan aplikabilitas teknologi usaha tani di lapang bagi petani dengan beragam tingkat pengetahuan, ke- trampilan, serta kondisi sosial - budayanya. Ada per- bedaan mendasar antara MUTS dengan pertanian organik. Dalam konsep MUTS tidak mempersoalkan jenis atau wujud bahan input usaha tani (terutama pupuk) yang digunakan, tetapi lebih menekankan pa- da cara penggunaan input tersebut dalam praktek usaha tani harus tepat. Beragam jenis pupuk organik, anorganik, sintetis, ataupun non-sistetis dapat saja gunakan secara terpisah/dikombinasikan (blended) jika tindakan itu dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas usaha tani dan tidak atau minimum ber- dampak negatif terhadap kondisi lingkungan. Sebalik- nya dalam pertanian organik, pupuk sintetis (misalnya urea, TSP, dan KCl) dilarang untuk digunakan. Tujuan dan sasaran khusus dari pengembangan dan promosi penerapan MUTS adalah tercapainya 4 sehat sebagai berikut: a. Sehat produksi Artinya, usaha tani menghasilkan produk (ter- utama bahan pangan) berkualitas tinggi, sehat untuk dikonsumsi oleh masyarakat konsumen. Target itu dapat dicapai antara lain melalui penggunaan pupuk yang kandungan unsur hara esensialnya lengkap dan berimbang. Selain itu, membunuh organisme menggu- naan pestisida sintetis yang umumnya bersifat racun harus dihidarikan; sebaliknya penggunaan pestisida nabati yang berbahan baku dari tanaman lokal sangat dianjurkan. Penggunaan pestisida nabati dapat di- kombinasikan dengan pengendalian ayati dengan tu- juan utama untuk mencegah, setidaknya meminima- lisir, terjadinya serangan HPT yang intensif, bukan untuk membasmi hama dan patogen. b. Sehat ekonomi Artinya, usaha tani itu harus menguntungkan terutama bagi petani sebagai aktor utama pada kegiat- an usaha tani. Strategi yang dapat ditempuh untuk dapat mencapai target tersebut adalah dengan (a) me- ningkatkan produktivitas (kuntitas dan kualitas pro- duk), (b) mengurangi biaya usaha tani melaui peningkatan efisiensi penggunaan input dan tenaga kerja, atau (c) memadukan kedua strategi tersebut. Aspek keuntungan usaha tani adalah faktor sangat penting untuk diperhatikan agar terjamin keber- langsungan usaha tani itu sendiri; dan bertani akan menjadi sektor usaha yang sangat diminati oleh masyarakat terutama generasi muda. c. Sehat (ramah) lingkungan Secara teoritis, kondisi itu dapat dicapai dengan meminimalisir dampak negatif dan memaksimalkan dampak positif dari kegiatan usaha tani tersebut ter- hadap lingkungan. Salah satu strateginya adalah dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alami lokal. Contoh bahan alami lokal adalah batuan silikat dan pestisida nabati. Selain ramah lingkungan, sumber daya alami lokal tersebut juga relatif murah karena ketersediaannya melimpah di sekitar kita. Optimalisasi pemanfaatan sumber daya lokal tersebut juga akan mendorong terwujudnya usaha tani yang mandiri, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. d. Sehat cara berpikir dan bijak dalam bertindak Contoh spesifik sesuai dengan kondisi usaha tani saat ini adalah yang berkaitan dengan cara pandang terhadap keberadaan organisme yang disebut hama dan pathogen. Selama ini, organisme tersebut diang- gap sebagai musuh petani. Cara pandang itu memicu digunakannya pestisida sintetis (racun) untuk mem- basmi organisme tersebut. Dalam MUTS, bermusuhan dengan sesama mahluk ciptaan Tuhan tersebut dinilai sebagai cara berpikir yang tidak tepat. Selain berten- tangan dengan prinsip ekologis juga dengan ajaran agama (Islam). Organisme tersebut adalah salah satu komponen penting dalam ekosistem yang ada. Kera- gaman organisme (biodiversity) sangat diperlukan un- tuk menjadin keberlanjutan usaha tani tersebut. Populasi organisme tersebut akan dikontrol oleh si- klus alami. Agar aplikatif di tingkat lapang, maka MUTS di- kembangkan dengan memperhatikan kebutuhan urgen dari petani di tingkat hamparan, yaitu solusi praktis untuk mengatasi beberapa masalah teknis yang sering muncul di lahan usaha taninya. Masalah teknis tersebut umumnya berkaitan dengan (1) cara mengatasi terjadinya serangan hama dan penyakit ta- naman (HPT), (2) penerapan konsep pemupukan ber- imbang, dan (3) kondisi tanah pertanian yang kurang optimal sebagai media tumbuh dan pemasok seba- gian besar unsur hara yang dibutuhkan oleh tanam- an, misalnya tanah masam, garaman, dan tanah yang tercemar oleh beragam kontaminan. Konsep pertanian sehat harus diformulasikan untuk dapat mejadi solusi praktis dalam mengatasi masalah teknis usaha tani tersebut, sekaligus dapat mencapai empat tujuan dan sasaran pertanian sehat yang telah dijelaskan di atas. Pengembangan aspek teknis MUTS didasarkan pada beberapa pemikiran mendasar sebagai berikut: a. Keberadaan organisme yang selama ini disebut sebagai hama dan penyakit tanaman (HPT) tidak dianggap sebagai pengganggu atau sumber masalah dalam usaha tani. Pemikiran itu didasarkan pada kenyataan bahwa: (1) Secara ekologis, keberadaan organisme tersebut berfungsi sebagai bagian penting dari siklus energi atau siklus pangan di alam ini, sehingga organisme tersebut seharusnya tidak selalu di- anggap sebagai pengganggu atau musuh petani yang harus dimusnahkan. Cara pandang ekolo- gis seperti itu telah berhasil diterapkan dalam pertanian tradisional oleh nenek moyang kita selama berabad-abad. (2) Penggunaan pestisida sintetis (bersifat racun) dengan tujuan untuk membasmi organisme (hama dan patogen) telah diterapkan puluhan tahun, sejak 1960-an hingga sekarang. Tetapi buktinya, cara itu tidak dapat mengatasi mun- culnya serangan HPT secara tuntas. Masalah serangan HPT tetap ada atau hampir selalu muncul di setiap musim tanam, dan cenderung makin sulit diatasi, serta telah menimbulkan masalah lingkungan yang serius dan luas. Fak- ta tersebut menjadi bahan pertimbangan pen- ting dalam pengembangan MUTS, khususnya untuk merespon isu tentang serangan HPT. (3) Dari sudut pandang religi (terutama berdasar- kan ajaran agama Islam), sesuai dengan salah satu sifat dari Sang Maha Pencipta (Maha Pengasih dan Penyayang), penciptaan (keberadaan) organisme tersebut harus diyakini 'bukan untuk mengganggu', tetapi justru memberikan banyak manfaat bagi manusia. Bahkan, ajaran agama (Islam) juga meng- anjurkan agar kita mengenali (mempelajari) organisme tersebut; dan membunuh organisme ciptaan-Nya tanpa alasan yang tepat dapat dikategorikan sebagai perbuatan aniaya (dosa). Lalu, bagaimana MUTS merespon terhadap realitas adanya masalah serangan HPT? MUTS ti- dak mepermasalahkan keberadaan hama itu, teta- pi justru mempermasalahkan kondisi tanamannya - mengapa tidak/kurang resisten terhadap HPT. Oleh karena itu, upaya praktis yang dilakukan pa- da MUTS untuk mengurangi kerugian usaha tani akibat serangan HPT adalah dengan menyehatkan dan meningkatkan resistensi tanaman terhadap serangan HPT, bukan dengan membasmi hama dan patogen menggunakan pestisida sintetis (ra- cun). Populasi hama dan patogen akan dikontrol oleh alam melalui mekanisme rantai pangan (food chain). Logikanya, jika tanaman itu sehat, yaitu ter- penuhi kebutuhan optimal unsur hara esensialnya, ditambah lagi dengan pasokan unsur hara fung- sional silikat/Si yang cukup, maka tanaman itu akan tumbuh dan berproduksi optimal serta memi- liki resistensi alami maksimal terhadap serangan HPT (Huber & Haneklaus, 2007). Dengan mene- rapkan konsep berpikir tersebut, MUTS memaklu- mi jika tetap ada serangan HPT intensitas rendah di petak usaha tani. Dampak serangan itu tidak akan signifikan terhadap produksi dan keuntung- an usaha tani jika tanamannya sehat dan resisten terhadap serangan HPT. Untuk mencegah ke- mungkinan terjadinya serangan HPT yang berat, MUTS hanya mengijinkan penggunaan pestisida nabati, agen hayati, atau kombinasi keduanya. Tindakan tersebut bersifat preventif agar tidak ter- jadi serangan HPT skala besar, bukan untuk mem- basmi organisme (hama dan patogen). Karena ber- sifat pencegahan, maka penggunaan pestisida na- bati tersebut harus dilakukan sedini mungkin, yaitu sejak awal pertumbuhan tanaman, sebelum agen pembawa hama dan penyakit itu masuk ke petak tanaman utama. b. Penerapan konsep pemupukan berimbang dising- kronkan dengan upaya mengatasi serangan HPT. Jelasnya, untuk menyehatkan dan mengoptimal- kan resistensi alami tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan yang kurang optimal bagi ta- naman (termasuk serangan HPT), maka tanaman itu harus dipasok dengan pupuk berhara lengkap dan berimbang serta mengandung unsur hara fungsional Si (silikat). c. Tanah yang bermasalah keharaan antara lain ada- lah tanah masam, garaman, dan terkontaminasi polutan. Para pakar ilmu tanah dan agronomi umumnya merekomendasikan bahwa tanah terse- but harus dinormalkan kondisinya (diremediasi) sebelum ditanami. Banyak teknologi remediasi tanah bermasalah telah tersedia (lihat Sub Bab 6.3). Tetapi, penerapan teknologi remediasi tersebut membutuhkan biaya relatif tinggi. Akibatnya, teknik remediasi tanah tersebut jarang/tidak pernah diterapkan oleh petani, kecuali oleh perusahaan perkebunan yang bermodal cukup besar. Berdasarkan pertimbangan tersebut, tanah bermasalah keharaan atau tanah yang tidak mampu berperan optimal sebagai pemasok unsur hara tanaman tidak harus diremediasi terlebih dahulu sebelum ditanami. Faktanya, teknologi remediasi itu jarang – tidak pernah diterapkan oleh petani. Yang perlu dan relatif mudah disiasati adalah cara pemenuhan kebutuhan unsur hara tanaman. Tanaman dipasok unsur hara yang lengkap dan berimbang secara langsung melalui daun atau/dan batang (foliar fertilization), tidak melalui tanah. Hal itu berarti bahwa fungsi tanah sebagai pemasok unsur hara, untuk sementara diminimalisir. Dengan cara itu, kondisi tanah bermasalah tadi tidak akan banyak berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman pada tanah tersebut. Upaya perbaikan tanah melalui aplikasi bahan amelioran dapat tetap dilakukan secara bertahap (dosis atau biaya rendah) bersamaan dengan penerapan pemupukan dengan unsur hara lengkap melalui daun. Penerapan teknik pemupukan melalui daun tersebut juga relevan dengan upaya untuk meng- atasi masalah kesuburan tanah pertanian yang sangat beragam dari satu tempat ke tempat yang lain. Secara teoritis, untuk dapat melakukan pe- mupukan melalui tanah yang tepat diperlukan beragam rekomendasi paket pemupukan yang ber- sifat spesifik lokal. Karena status ketersediaan unsur hara tanah bagi tanaman sangat dinamis, maka rekomendasi itu juga harus ditinjau (update) secara berkala. Namun nyatanya rekomendasi pe- mupukan spesifik lokasi tersebut masih sulit di- wujudkan (setidaknya di Indonesia). Selain itu, pemupukan melalui tanah umumnya kurang efek- tif dan efisien dibandingkan dengan pemupukan melalui daun. Pengembangan MUTS tidak hanya sampai pada tahapan membangun konsep seperti diuraikan di atas, tetapi konsep itu diterjemahkan dalam bentuk tekno- logi praktis yang dapat diterapkan oleh petani. Secara garis besar, penerapan MUTS untuk segala jenis ko- modisi tanaman adalah sebagai berikut: a. Penanaman dilakukan seperti biasa dilakukan oleh petani (standar), sesuai dengan jenis dan kharakte- ristik tanaman yang diusahakan. Pemupukan ter- utama dilakukan melalui daun (foliar fertilization) dengan pupuk cair atau larutan yang mengandung semua unsur hara esensial dan Si. Salah satu produk lokal (NTB) untuk pupuk yang bahan baku utamanya batuan silikat dan telah divalidasi efek- tivitasnya di lapang pada berbagai jenis tanaman pangan dan hortikultura (Priyono, 2017) adalah pupuk cair 'Orrin'. Jenis pupuk yang lain dapat digunakan asalkan mengandung unsur hara leng- kap dan berimbang dalam bentuk yang dapat lang- sung diserap oleh tanaman. b. Pupuk dasar, terutama pupuk N untuk tanaman non-legum, tetap diperlukan dan diaplikasikan melalui tanah. Unsur N adalah unsur hara esensial yang paling banyak dibutuhkan oleh tanaman, tetapi tidak dapat diberikan semuanya melalui daun dengan konsentrasi tinggi. Pemberian pupuk dasar dosis rendah (misalnya 50 – 100 kg urea/ha untuk tanaman padi) tetap diperlukan. Pemupuk- an melalui tanah itu dimaksudkan untuk mendu- kung pertumbuhan awal hingga tanaman memiliki beberapa lembar daun sehingga dapat menerima pasokan unsur hara melalui daun. Pada tahap pertumbuhan selanjutnya, tanaman hanya dipasok unsur hara melalui daun. c. Pestisida nabati diaplikasikan sejak awal pertum- buhan (sebelum hama atau inang pembawa hama dan penyakit masuk ke petak tanaman) sebagai upaya pencegahan agar tidak terjadi serangan HPT yang berlebihan. Penggunaan pestisida nabati da- pat dilakukan/disemprotkan ke permukaan daun dan batang tanaman secara terpisah atau dicam- pur dengan pupuk cair. Motto MUTS terkait dengan isu serangan HPT adalah 'mencegah terjadinya perang, bukan memenangkan perang melawan organisme (hama dan patogen)'. C. Peran Agrogeologi Upaya pemanfaatan bahan geologis untuk perta- nian (agrogeologi) merupakan respon positif terhadap penerapan sistem pertanian konvensional yang dinilai kurang efisien dan tidak ramah lingkungan. Oleh ka- rena itu, penerapan konsep dan teknologi agrogeologi diharapkan dapat berkontribusi signifikan terhadap pewujudan pertanian yang ramah lingkungan dan ber- kelanjutan. Salah satu contoh kontribusi inovatif dan konstruktif dari agrogeolist untuk mewujudkan sistem pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan adalah MUTS yang telah dibahas pada sub bab di atas. Penggunaan pupuk cair berbasis batuan silikat (Orrin) menjadi komponen penting dalam MUTS. Pemanfaan bahan geologis, terutama batuan sili- kat sebagai pupuk dan amelioran mempunyai bebe- rapa kelebihan dibandingkan dengan bahan kimia sintetis. Ketersediaan batuan silikat di permukaan bu- mi sangat melimpah keberlanjutan ketersediaan pro- duksi input usaha tani itu terjamin. Khususnya di Indonesia yang memiliki banyak gunung api yang masih aktif, batuan tersebut relatif segar, unsur ha- ranya belum banyak terlepas dari padatan batuan. Bahan geologis tersebut juga mengandung multi nu- trisi (semua unsur hara esensial bagi tanaman, kecu- ali N) sehingga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan petani dalam menghasilkan produk pertanian yang optimal. Berdasarkan hasil kajian dari beberapa peneliti, antara lain (Beerling et al., 2018, 2020; Kellend et al., 2020; Horton et al., 2021; Binett, 2021), penggunaan bubuk batuan silikat sebagai pu- puk bukan saja dapat meningkatkan kuantitas dan kualitas pertumbuhan dan produksi tanaman, tetapi juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari lahan pertanian. Batuan silikat yang telah diproses menjadi bubuk berukuran nanometer atau amorfus dapat berfungsi jamak (multi fungsi). Selain sebagai sumber unsur hara (pupuk majemuk), bubuk batuan volkanik juga dapat difungsikan efektif sebagai bahan pengapuran (liming material), pembe- nah atau peremaja (rejuveniting agent) tanah yang sudah sangat miskin hara atau terdegradasi berat. Manfaat batuan volkanik makin luas jika dikait- kan dengan kandungannya unsur silikat (Si) yang tinggi. Seperti disampikan oleh banyak peneliti, antara lain ditelaan oleh Martin (2013), Price et al (2013), dan Farooq & Dietz (2015), silikat sangat penting hubungannya dengan kesehatan manusia; silikat ber- peran penting pada kinerja otot dan organ lain ter- masuk kuku, rambut, dan tulang manusia maupun hewan. Artinya, pemanfaatan batuan silikat atau vol- kanik sebagai pupuk dapat meningkatkan kadar Si pada produk pertanian yang dikonsumsi oleh manusia dan hewan. Jadi, penerapan konsep agrogeologi secara tidak langsung juga berperan penting dalam mening- katkan kesehatan manusia melalui pemenuhan kebutuhan manusia akan asupan Si dan unsur hara mineral lainnya. Berdasarkan kelebihan dari penggunaan batuan sebagai pupuk dan amelioran tersebut, penerapan konsep agrogeologi secara luas sangat potensial ber- kontribusi signifikan dalam menyelesaikan banyak masalah pertanian dan lingkungan yang kita hadapi saat ini termasuk kesehatan masyarakat. Sebagai cabang ilmu atau kajian yang relatif baru dalam bi- dang pertanian, riset pengembangan dan promosi penerapan agrogeologi ke depan perlu dilakukan lebih intensif.

DAFTAR PUSTAKA Ali, A., Shahzad, M. A., Basra, S. H., et al. 2012. Salt Stress Alleviation in Field Crops through Nutritional Supplementation of Silicon. Pakistan J. Nutr., 11 (8): 637-655. Allen, B.L. & Hajek, B.F. 1989. Mineral Occurance in Soil Environment. In: Dixon, B.J. & Weed, S.B. (Eds.). Mineral in Soil Environemnt. 2nd ed. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin. Amrhein, C. & Suarez, D.L. 1988. The Use of a Surface Complexion Model to Describe the Kinetics of Ligand-Promoted Dissolution of Anorthite. Geochim. Cosmochim. Acta 52, 2785 -2793. Anggria, L., Husnain, Kuniaki, S. et al. 2017. Release of Silicon from Silicate Materials and Its Uptake by Rice Plant. Indonesian J. Agr. Sci. 18: 69 – 76. Appleton, J.D. 1990. Rock and Mineral Fertilizers. Appropriate Tech. 17: 25 – 27. Appleton, J.D. 1994. Direct-Application Fertilizer and Soil Amendments – Appropriate Technology for Developing? In: Howart, R.W., Stewart, J.W.B. & Ivanov, M.V. (eds.). Sulphur Cycling on the Continents: Wetlands, Tereestrial Ecosystems, and Associated Water Bodies. SCOPE 48., Wiley & Sons. NY. pp. 27 – 61. Artyszak, A. 2018. Effect of Silicon Fertilization on Crop Yield Quantity and Quality-A Literature Review in Europe. Plants 7(54): 1 – 17. Barańskia, M., Rempelosa, L., Iversenb, P.O. et al. 2017. Effects of organic food consumption on human health; the jury is still out!. Food & Nutr. Res., 61(1):1–5. Barman, A.K., Varadachari, C. & Ghosh, K. 1992. Weathering of Silicate Minerals by Organic Acids. I. Nature of Cation Solubilisation. Geoderma 53: 45 – 63. Barak, P., Chen, Y. & Singer, A. 1983. Ground Basalt and Tuff as Iron Fertilizers for Calcareous Soils. Plant and Soil 73: 155 – 158. Bakken, A.K., Gautneb, H. & Myhr, K. 1997. The Potential of Crushed Rocks and Mine Tailings as Slow-Releasing K Fertilizers Assessed by Intensive Cropping with Italian ryegrass in Different Soil Types. Nutrient Cycling in Agroecosystems 47: 41 – 48. Bakken, A.K., Gautneb, H., Sveistrup, T. et al. 2000. Crushed Rocks and Mine Tailings Applied as K Fertilizers on Grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems 56: 53 – 57. Barański, M., Tober, D. S., Volakakis, N. et al., 2014. Higher antioxidant and lower cadmium concen- trations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a syste- matic literature review and meta-analyses. British J.Nutr. 112(05): 794 - 811. Badgley, C. Moghtader, J., Quintero, E. et al. 2007. Organic Agriculture and the Global Food Supply. Renew. Agr. Food Syst. 22: 86 –108. Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P. et al. 2018. Farming with Crops and Rocks to Address Global Climate, Food and Soil Security. Nature Plants 4: 138–147. Beerling, D.J,. Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et.al. 2020. Potential for Large-Scale CO2 Removal via Enhanced Rock Weathering with Croplands. Nature, 583: 242 – 248. Bennett, P.C. 1991. Quartz Dissolution in Organic- Rich Aqueous Systems. Geochim. Cosmochim. Acta 55: 1781-1791. Bennett, W.F. 1993. Plant Nutrient Utilization and Diagnostic Plant Symptoms. In: Benett, W.F. (Ed.). Nutrient Deficiencies & Toxicities in Crop Plants. APS Press, The American Phytopathological Society, St Paul Minnesota. pp. 1 – 7. Binett, W. 2021. New UC Davis Center Paves the Way for Rock Dust Research. An Online News in Remineralize the Earth (February 14, 2021). https://www.remineralize.org/2021/02/univers ity-of-california-researches-large-scale- remineralization/ (downloaded: June 9, 2021) Blake, R.E. & Walter, L.M. 1999. Kinetics of Feldspar and Quartz Dissolution at 70 - 80o C and Near- Neutral pH: Effects of Organic Acids and NaCl. Geochim. Cosmochim. Acta 63: 2043 – 2059. Bloom, P.R. & Erich, M.S. 1987. Effect of Solution Composition on the Rate and Mechanism of Gibbsite Dissolution in Acid Solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1131 – 1136. Bolland, M.D.A. & Baker, M.J. 2000. Powdered Granite is Not an Effective Fertilizer for Clover and Wheat in Sandy Soils from Western Australia. Nutrient Cycling in Agroecosystems 56: 59 – 68. Bohn, H.B, McNeal, B. & O'Connor, G. 1985. Soil Chemistry. 2nd edition. Wiley-Interscience, Chechester. Bhatt, D & Sharma, G. 2018. Role of Silicon in Counteracting Abiotic and Biotic Plant Stresses. Int. J. Chem. Studies. 6(2): 1434 – 1442. Brandt, K. & Mølgaard, J. P. 2001. Organic Agricul- ture: Does It Enhance or Reduce the Nutritional Value of Plant Foods? J. Sci. Food Agr. 81: 924– 931. Campe, J. 1991. Remineralize the Earth. A Network Newsletter. https://www.Remine-ralize.org Campe, J. 2013. The Potential of Remineralization as a Global Movement: History, current develop- ments and potential future directions to address ecological and social challenges on a regional and global scale. Presentation in the Second Brazilian "Rochagem" Conference. https://www. remineralize.org/2013/10/high-lights-from-the- 2013-ii-brazilian-rochagem-conference Chandini, Kumar, R., Kumar, R., et al. 2019. The Impact of Chemical Fertilizers on Our Environ- ment and Ecosystem. In: Sherma, P. (Ed.). Research Trends in Environmental Sciences, Chapter 5: 69 – 85. Chesworth, W. 1982. Late Cenozoic Geology and the Second Oldest Profession. Geoscience Canada 9: 54 – 61. Chesworth, W., Vasquez, F. M., Acqueye, D. et al. 1983. Agricultural Alchemy: Stone into Bread. Episodes 1: 3 – 7. Chesworth, W., van Strateen, P., Semoka, J. et al. 1985. Agrogeology in Tanzania. Episodes 8: 257 – 258. Chesworth, W., van Strateen, P., Smith, P. et al. 1987. Solubility of Apatite in Clay and Zeolite Bearing Systems: Application to Agriculture. Appl. Clay Sci. 2: 291 – 297. Chesworth, W. 1993. The First Twenty-Nine Days: Prospects for Agrogeology. In: Pride, C. & van Strateen, P (Eds.). Agrogeology and Small- Scale Mining. Small Mining International, Bulletin 5 – 6: 2–3. Coventry, R.J., Gillman, G.P., Burton, M.E., et al. 2001. Rejuvenating Soils with MinplusTM, a Rock Dust and Soil Conditioner to Improve the Productivity of Acidic, Highly Weathered Soils'. (A Report for RIRDC: Townsville, Qld). Coroneos, C., Hinsinger, P. & Gilkes, R.J. 1996. Granite Powder as a Source of Potassium for Plants: A Glasshouse Bioassay Comparing Two Pasture Species. Fert. Res. 45: 143 – 152. Driscoll, C.T., van Breemen, N. & Mulder, J. 1985. Aluminum Chemistry in a Forested Spodosol. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 437-444. de Villiers, O.H. 1961. Soil Rejuvenation with Crushed Basalt in Mauritius. Int. Sugar. J. 63, 363 – 364. De Ponti, T., Rijk, B. & van Ittersum, M. K. 2012. The Crop Yield Gap Between Organic and Conventional Agriculture. Agr. Syst. 108: 1–9. Eick, M.J., Grossl, P.R., Golden, D.C. et al. 1996. Dissolution of a Lunar Basalt Simulant as Affected by pH and Organic Anions. Geoderma 74: 139 – 160. Epstein, E. 1999. Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50: 641 – 664. FAO. 1989. The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of UN. Rome. FAO - Committee on Agriculture (COAG). 1999. Based on Organic agriculture. Rome on 25-26 January 1999 Farooq, M.A. & K.J. Dietz. 2015. Silicon as Versatile Player in Plant and Human Biology: Overlooked and Poorly Understood. Frontier in Plant Sci., 6: 1 – 14. Feigenbaum, S., Edelstein, R. & Shainberg, I. 1981. Release Rate of Potassium and Structural Micas to Ion Exchangers in Dilute Solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 501 – 506. FiBL & IFOAM, 2020. Forword from FiBL and IFOAM. In: Willer, H., Schlatter, B., Trávíček, Kemper, L. & Lernoud, J. (Eds.). The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2020. Fyfe, W.S., Kronberg, B.I., Leonardos, O.H., & Olorunfemi, N. 1983. Global Tectonics and Agriculture: A Geochemical Perspective. Agr. Ecosyst. Env. 9: 383 – 399. Fyfe, W.S. 1987. Sustainable Food Production and Agrogeology. In. Pride, C. & van Strateen, P. (eds.), Agrogeology and Small Scale Mining. Small Mining Intern, Bull. 5-6: 4 – 5. Fyfe, W.S. 1989. Soil and Global Change. Episodes 12: 249 – 254. Fyfe, W.S. 2000. Truly Sustainable Development for a Positive Future: the Role of the Earth Sciences. Trends in Geochemistry 1: 125 – 132. Garcia, F.G., Abrio, M.T.R. & Rodziguez, M.G. 1991. Effects of Dry Grinding on Two Kaolins of Different Degree of Crystallinity. Clay Min. 26: 549 – 565. Gillman, G.P. 1980. The Effect of Crushed Basalt Scoria on the Cation Exchange Properties of a Highly Weathered Soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 465 – 468. Gillman, G.P., Burkett, D.C. & Coventry, R.J. 2001. A Laboratory Study of Application of Basalt Dust to Highly Weathered Soils: Effect on Soil Cation Chemistry. Aust. J. Soil Res. 39: 799 – 811. Gillman, G.P., Burkett, D.C. & Coventry, R.J. 2002. Amending Highly Weathered Soils with Finely Ground Basalt Rock. Applied Geochem. 17: 987 – 1001. Gopalakrishnan, R. 2019. Advantages and Nutritional Value of Organic Food on Human Health. IJTSRD, 3(4): 2456 - 6470. Harley, A.D. & Gilkes, R.J. 2000. Factors Influencing the Release of Nutrient Elements from Silicate Rock Powders: a

Geochemical Overview. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems 56: 37 – 44. Harley, A.D. 2002. Evaluation and Improvement of Silicate Mineral Fertilizers. (Ph.D thesis: The University of Western Australia). Hensel, J. 1884. Bread from Stone: A New Rational System of Land Fertilization and Physical Regeneration. Reprint: Soil and Health Library (2009), TRI-STATE PRESS, Long Creek, South Carolina, USA. Hinsinger, P., Elsass, F., Jaillard, B. et al. 1993. Root- Induced Irreversible Transformation of a Trioctahedral Mica in the Rhizosphere of Rape. J. Soil Sci. 44: 535 – 545. Hinsinger, P., Bolland, M.D.A. & Gilkes, R.J. 1996. Silicate Rock Powder: Effect on Selected Chemical Properties of a Range of Soils from Western Australia and on Plant Growth as Assessed in a Glasshouse Experiment. Fert. Res. 45: 69 – 79. Horton, P., Long, S.P., Smith, P. et al. 2021. Technologies to Deliver Food and Climate Security through Agriculture. Nat. Plants 7: 250–255. Huang, W.H. & Keller, W.D. 1970. Dissolution of Rock-Forming Silicate Minerals in Organic Acids: Simulated First-Stage Weathering of Fresh Mineral Surfaces. Am. Mineralogist 55: 2076 – 2094. Huang, W.H. & Kiang, W.C. 1972. Laboratory Dissolution of Plagioclase Feldspars in Water and Organic Acids at Room Temperature. Am. Mineralogist 57: 1849 – 1859. Huber, D.H. &Haneklaus, S. 2007. Managing Nutrition to Control Plant Disease. Landbaufor-schung Völkenrode, 4(57): 313 - 322 Hossain, K.A., Horiuci, T. & Miyagawa, S. 2001. Effects of Silicate Materials on Growth and Grain Yield of Rice Plants Grown in Clay Loam and Sandy Loam Soils. J. Plant Nutr. 24(1): 1 – 13 IFOAM, 2008. IFOAM Approved Principles of Organic Agriculture. https://www.ifoam.bio/principles- organic-agriculture-brochure IFOAM. 2008. Definision of Organic Agriclture. https://www.ifoam.bio/why-organic/organic- landmarks/definition-organic IFOAM.- IFOAM Standard. https://www. ifoam.bio/ our-work/how/standards-certification/organic- guarantee-system/ifoam-standard Jenny, H. 1941. Faktors of Soil Formation, A System of Quantitaive Pedology. Dover Publ. Inc., New York Jones, D.L. 1998. Organic Acids in the Rhizosphere – A Critical Review. Plant and Soil 205: 25 – 44. Kelland, M.E., Wade, P.W., Lewis, A.L. et al. 2020. Increased Yield and CO2 Sequestration Potential with the C4 Cereal Sorghum Bicolor Cultivated in Basaltic Rock Dust-Amended Agricultural Soil. Global Change Biol. 26: 3658 – 3676. Keller, W.D. 1948. Native Rocks and Minerals as Fertilizers. Science Monthly 66: 122 – 130. Keller, W.D., Balgord, W.D. & Reesman, A.L. 1963. Disolved Producs of Artificially Pulverized Silicate Minerals and Rocks. J. Sediment Petrol. 3: 191 – 204. Klein, C. & Philotts, A.R. 2013. Earth Materials: Introduction to Mineralogy and Petrology. Cambridge Univ. Press. Krzic, M., Zabek, L., C.E. Bulmer, C.E. et al. 2009. Soil Properties and Lodgepole Pine Growth on Forest Landings Rehabilitated by Tillage and Fertilizer Application. Can. J. Soil Sci. - Special issue on Forest Soil Disturbance 89:25 - 34. Lernaud, J & Willer, H. 2019. Organic Agriculture Worldwide: Key Results from the FiBL Survey on Organic Agriculture Worldwide 2019. Research Institute of Organic Agriculture (FIBL), Part 2: Land Use and Key Crops in Organic Agriculture 2017. Leonardos, O.H., Fyfe, W.S. & Kronberg, B.I. 1987. The Use of Ground Rocks in Laterite Systems: An Improvement to the Use of Conventional Fertilizers? Chem. Geol. 60, 361 – 370. Leonardos, O.H., Theodoro, S.H. & Assad, M.L. 2000. Remineralization for Sustainable Agriculture: A Tropical Perspective from a Brazilian Viewpoint. Nutrient Cycling in Agroecosystems 56: 3 – 9. Lim, H.H., Gilkes, R.J. & McCormick, P. 2003. Beneficiation of Rock Phosphate Fertilizers by Mechano-Milling. Nutrient Cycling in Agro- ecosystems 67: 177 – 186. Ludwig, C., Devidal, J.L. & Casey, W.H. 1996. The Effect of Different Functional Groups on the Ligand-Promoted Dissolution of NiO and Other Oxide Minerals. Geochim. Cosmochim. Acta 60: 213 – 224. Lundström, V. &Öhman, L.O. 1990. Dissolution of Feldspars in the Present of Natural Organic Solutes. J. Soil Sci 41: 35 – 50. Ma, J.F. & Takahashi, E. 2002. Soil, Fertilizers, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier, Amsterdam, Netherland. Ma, J.F., Yamaji, N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. Cell. Mol. Life Sci. 65: 3049– 3057. Marschner, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press: London. Martin, K.R. 2013. Silicon: The Health Benefits of a Metalloid. Met. Ions Life Sci. 13: 451–473. Mathers, S.J. 1994. Industrial Mineral Potensial in Uganda. In: Mathers, S.J. & Notholt, A.J.G. (Eds.). Industrial Minerals in Developing Countries. AGID Geosci. in Intern. Dev. 18: 144 – 166. Mie, A., Andersen, H.R., Gunnarsson, S. et al. 2017. Human Health Implications of Organic Food and Organic Agriculture: A Comprehensive Review. Env. Health 16: 1 - 22. Mei, A. & Wivstad, M. 2015. Organic Food - Food Quality and Potential Health Effects, a Review of Current Knowledge, and A Discussion of Uncertainties. SLU, EPOK – Centre for Organic Food & Farming. Sweden. Oelkers, E.H. & Gislason, S.R. 2001. The Mechanism, Rates and Consequences of Basaltic Glass Dissolution: I. An Experimental Study of the Dissolution Rates of Basaltic Glass as a Function of Aqueous Al, Si and Oxalic Acid Concentration at 25o C and pH = 3 and 11. Geochim. Cosmochim. Acta 65: 3671-3681. Oklima, A.M. 2008. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Cair terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung dan Kacang Tanah di Lahan Kering Pasiran Lombok Utara, NTB (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram). Pidwiny, 2007. Composition of Rocks. http://www. physicalgeography.net/fundamentals/10d.html Ponisio, L.C., M'Gonigle, L.K., Mace, K.C. et al. 2015. Diversification practices reduce organic to con- ventionnal yield gap. Proc. Royal Soc. B 282: 20141396.http://dx.doi.org/10.1098/rspb.201 4.1396. Price, C. T., Koval, K.J. & Langford, J.R. 2013. Silicon: A Review of Its Potential Role in the Prevention and Treatment of Postmenopausal Osteoporosis. Int. J. Endocrinology: 1 – 6. Prijatna, S., Priyono, J. & Gunarsa, I.G.E., 2007. Faktor Determinan Sifat Tanah dalam Reaksi Pelarutan Unsur Hara dari Pupuk Batuan Silikat. Lap. Pen. Fundamental. Dirjen DIKTI. Priyono, J. 1991. Micronutrient Content and Release, Mineralogy and Chemical Properties of Some Residual Soils and Rocks in Alabama. (M.Sc. Thesis: Auburn University, Alabama, USA). Priyono, J. 2005a. The Effect of High Energy Milling on the Performance of Silicate Rock Fertilizers. (Ph.D. Thesis: The University of Western Australia). Priyono, J. 2005b. Kimia Tanah. Mataram Univ. Press., Mataram NTB. Priyono, J., Sutriono, R. & Arifin, Z. 2007. Penggunaan SROF (Silicate Rock-Organic Fertilizer) Sebagai Sumber Hara Tanaman dalam Rangka Pengem- bangan Pertanian Berkelanjutan and Ramah Lingkungan: Evaluasi Potensi Beberapa Jenis Batuan Silikat di Indonesia sebagai Sumber Hara Tanaman dan Pembenah Tanah. Lap. Pen. HB. Dirjen DIKTI. Priyono, J., 2008. Effect of Ball Milling under Various Conditions on Several Physicochemical Proper- ties of Rock Phosphate Fertilizer. J. Soil and Chlimate (J. Tanah dan Iklim) 25: 37 – 44. Priyono, J., Rahardjo, C.K., & Rahmiana, A. 2010. Remediating the Degraded Land Due to Mining of Pumice Stone in the Northern Part of Lombok Island by Applying Silicate Rock-Organic Fertili- zer. Proceeding of ICSAFA Int. Conf. Bandung. Priyono, J., Gilkes, R.J. & McCormick, P. 2002. The Use of High-Energy Milling with Reactive Additives to Improve the Release of Nutrients from Silicate Rock Fertilizers. Proceeding of 17th WCSS, Bangkok. Priyono, J. &Gilkes, R.J. 2004. Dissolution of Milled- Silicate Fertilizers in Soil. Australian J. Soil Res. 42: 441 – 448. Priyono, J. & Gilkes, R.J. 2008a. Dissolution Kinetics of Milled-Silicate Fertilizers in Organic Acid. J. Tropical Soil. 13: 1 – 10. Priyono, J. & Gilkes, R.J. 2008b. Organic Matter Improve the Effectiveness of Rock Fertilizers: a Glasshouse Asessment. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 39: 358 – 369. Priyono, J., Sutriono, R. & Arifin, Z. 2009. Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from Four Volcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant. J. Tropical Soils 14: 1- 8. Priyono, J. & Arifin, Z. 2012. Adding Organic Matter Enhanced the Effectiveness of Silicate Rock Fertilizer for Food Crops Grown on Nutritionally Disorder Soils: A Glasshouse Assessment. J. Tropical Soils 7: 97-104. Priyono, J. & Muthahanas, I. 2010. Pengembangan Biopesticidal Fertilizer Berbasis Sumber daya Alam Lokal untuk Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan. Lap. Penel. HB. I, LPPM Unram., Mataram, NTB. Priyono, J. & Muthahanas, I. 2011. Pengembangan Biopesticidal Fertilizer Berbasis Sumber daya Alam Lokal untuk Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan. Lap. Penel. HB. II, LPPM Unram., Mataram, NTB. Priyono, J. 2017. Kompilasi Hasil Uji Efektivitas Pupuk Orrin pada Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan Tahun 2014 – 2017. (data tidak dipublikasikan). Priyono, J., Tanaya, I.G.M.P, & Ningsih, M. 2020. Foliar Application of Liquid-Silicate Rock Fertilizer Reduced Pest and Disease Attacks and Improved Bean Production of Cocoa. J. Agr. Crops 6(5): 68-72. Priyono, J. & Sudharmawan, A.A.K. 2020. Seed Coating with Organomineral Fertilizer, an Alternative Method to Improve the Efficiency of Farming. Asian Res. Agr. J. 12(1): 12 – 17. Priyono, J., Djajadi, Hidayati, N.S., et al. 2020. Silicate Rock-Based Fertilizers Improved the Production of Sugarcane Grown on Udipsamments Kediri, East Java, Indonesia. Int. J. App. Agr. Sci. 6(2): 16 – 20. Rahmi, 2009. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Granular dan Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan dan Hasil Jagung (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram). Reganold, J.P. & Wachter, J.M. 2016. Organic Agriculture in the Twenty-First Century. Natural Plant 2: 1 – 8. Rehm, G., Munter, R. Rosen, C. & Schmitt, M. 2002. Lime Needs in Minnesota. Publ. FO-05956-GO. University of Minnesota Extension Service. Ross, S. 1989. Soil Processes, a Systematic Approach. Routledge, London. Sahnun, 2012. Pertumbuhan dan Produksi Kacang Tanah dari Benih Berlapis Pupuk Organo- mineral (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram). Sanyu, F.K. & Azuba, M.S. 1996. Indegenous Farming in Uganda. Book of Abstracts. 11th IFOAM Scientific Conference,11-15 August 1996. Copenhagen, Denmark Sanz-Scovino, J.I. & Rowell, D.L. 1988. The use of feldspars as potassium fertilizers in the savannah of Columbia. Fert. Res. 17: 71 – 83. Seufert, V., Ramankutty, N. & Foley, J. A. 2012. Comparing the Yields of Organic and Conventional Agriculture. Nature 485: 229–232. Shotyk, W. & Nesbitt, H.W. 1992. Incongruent and Congruent Dissolution of Plagioclase Feldspar: Effect of Feldspar Composition and Ligand Complexation. Geoderma 55: 55-78. Sofyan. 2008. Pengaruh Bubuk Batuan Silikat terhadap pH dan KTK Tanah Masam. (Skripsi S- 1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram) Soil Survey Staffs. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th edition. USDA, NRCS. Stanhill, G. 1990. The Comparative Productivity of Organic Agriculture. Agr. Ecosyst. Environ. 30: 1–26. Stevenson, F.J. 1967. Nitrogen: Elemant and Geo- chemistry. In: Fairbridge, R.W. (Ed.). The Encyclovedia of Geochemistry and Enviromental Sciences. Vol IVA. Dowden. Stevenson, F. J., and M. S. Arkadani. 1972. Organic Matter Reactions Involving Micronutrients in Soils. In: Mortvedt et.al. (Eds.). Micronutrients in Agriculture, SSSA, Madison, Wisconsin. Strömberg, B. & Banwart, S.A. 1999. Experimental Study of Acidity-Consuming Processes in Mining Waste Rock: Some Influences of Mineralogy and Particle Size. App. Geochem. 14: 1 – 16. Stumm, W. & Furrer, G. 1987. The Dissolution of Oxides and Aluminum Silicates: Examples of Surface Coordination-Controlled Kinetics. In: Stumm, W. (ed.). Aquatic Surface Chemistry. Wiley-Interscience, New York. Sugiyama, K., Filio, J.M., Saito, F & Waseda, Y. 1994. Structural Change of Kaolinite and Pyrophyllite Induced by Dry Grinding. Mineralogical J. 17: 28 – 41. Sumarlin, 2008. Evaluasi Efektivitas Bubuk Batuan Basalt Sebagai Amelioran Tanah Garaman. (Skripsi S-1: Jurusan Ilmu Tanah. Fakultas Pertanian Universitas Mataram). Suraj, G., Iyer, C.S.P., Rugmini, S. & Lalithambika, M. 1997. The Effect of Micronization on Kaolinites and Their Sorption Behaviour. App. Clay Sci. 12: 111 – 130. TAC-CGIAR. 1988. Sustainable Agricultural Produc- tion: Implications for International Agricultural Research. CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) Meeting, Berlin, Germany. van Strateen, P&Pride, C. 1993. Agrogeological Resources for Small Scale Mining. In: Pride, C. & van Stateen, P (eds). Agrogeology and Small Scale Mining. Small Mining Intern. Bull. 5-6: 5 – 9. van Strateen, P., 2007. Agrogeology: The Use of Rock for Crops. Enviroquest Ltd., Cambridge, Ontario, Canada. Volk, R.J., Kahn, R.P. & Weintraub, R.L. 1958. Silicon Content of the Rice Plant as a Factor Influencing Its Resistance to Infection by Blast Fungus, Piricularia Oryzae. Phytophatology 48: 179 – 659. Welch, S.S. & Ullman, W.J. 1996. Feldspar Dissolution in Acidic and Organic Solutions: Compositional and pH Dependence of Dissolution Rate. Geochim. Cosmochim. Acta 60: 2939 - 2948. Weerasuriya, T.J., Pushpakumara, S. & Cooray, P.I. 1993. Acidulated Pegmatic Mica: A Promising New Multi-Nutrient Mineral Fertilizer. Fert. Res. 34: 67 – 77. Wieland, E., Wehrli, B. & Stumm, W. 1988. The Coordination Chemistry of Weathering: III. A Generalization on the Dissolution Rates of Minerals. Geochim. Cosmochim. Acta 52: 1969- 1981. Worthington, V. 1998. Effect of Agricultural Methods on Nutritional Quality: A Comparison of Organic with Conventional Crops. Alter. Theraphy Health Med. 4(1): 58 – 69. Worthington, V. 2001. Nutritional Quality of Organic versus Conventional Fruits, Vegeta-bles, and Grains. J. Alter. Complem. Med. 7: 161–173. Yulianti, 2009. Pengaruh Pupuk Batuan Silikat Granular dan Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan dan Hasil Padi (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram). Zhang, H. & Bloom, P.R. 1999. Dissolution Kinetics of Hornblende in Organic Acid Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 815 - 822. Zukron, 2012. Pertumbuhan dan Produksi Jagung dari Benih Berlapis Pupuk Organomineral (Skripsi S-1, Jur. Ilmu Tanah, Faperta Unram). Agrogeologi,
Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi,
Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi,
Pemanfaatan Batuan … Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan
Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko
Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko
Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko
Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko
Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono
Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … ii Joko Priyono iv Joko Priyono vi Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … vii viii Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … ix Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … xi xii Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … xiii Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … xv Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … xvii Joko Priyono 4 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 5 6 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 7 8 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 9 12 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 13 14 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 15 16 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 17 18 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 19 20 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 21 22 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 23 24 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 25 26 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 27 28 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 29 30 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 31 32 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 33 34 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 35 36 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 37 38 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 39 40 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 41 42 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 43 44 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 45 46 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 47 48 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 49 50 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 51 52 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 53 54 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 55 56 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 57 58 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 59 60 Joko Priyono 62 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 63 64 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 65 66 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 67 68 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 69 70 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 71 72 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 73 74 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 75 76 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 77 78 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 79 80 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 81 82 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 83 84 Joko Priyono 86 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 87 88 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 89 90 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 91 92 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 93 94 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 95 96 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 97 98 Joko Priyono 100 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 101 102 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 103 104 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 105 106 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 107 108 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 109 110 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 111 112 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 113 114 Joko Priyono 116 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 117 118 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 119 120 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 121 122 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 123 124 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 125 126 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 127 128 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 129 130 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 131 132 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 133 134 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 135 136 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 137 138 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 139 140 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 141 142 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 143 144 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 145 146 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 147 148 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 149 150 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 151 152 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 153 154 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 155 156 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 157 158 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 159 160 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 161 162 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 163 164 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 165 166 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 167 168 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 169 170 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 171 172 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 173 174 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 175 176 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 177 178 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 179 180 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 181 182 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 183 184 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 185 186 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 187 188 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 189 190 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 191 192 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 193 194 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 195 196 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 197 198 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 199 200 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 201 202 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 203 204 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 205 206 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 207 208 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 209 210 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 211 212 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 213 214 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 215 216 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 217 218 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 219 220 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 221 222 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 223 224 Joko Priyono Agrogeologi, Pemanfaatan Batuan … 225 226 Joko Priyono Agrogeologi,

Pemanfaatan Batuan ... 227 228 Joko Priyono