

TANAH DAN IKLIM

Indonesian Soil and Climate Journal

Nomor 35, Juli 2012

Pengembangan Model Tanah-Lanskap untuk Menaksir Sifat Tanah di Pulau Jawa

Y. Sulaeman, A. Sutandi, B. Barus, dan D.A. Rachiem

Komposisi Mineral dan Sifat-Sifat Tanah yang Berkembang dari Deposit Tephra Gunung Talang pada Dataran Aluvial di Sentra Produksi Beras Solok, Sumatera Barat

E. Suryani, Sudarsono, Iskandar, dan D. Subardja

Prediction of the Water Content at Field Capacity from Disturbed Soil Samples

Budiman Minasny

Kajian Tingkat Bahaya Erosi dan Arah Konservasi pada Penggunaan Lahan Pertanian di Daerah Tangkapan Air Rawa Pening (Studi Kasus di DAS Galeh)

Forita D. Arianti, Suratman, Edhy Martono, dan Slamet Suprayogi

Identifikasi Tren Perubahan Iklim dan Dampaknya pada Sumber Daya Air: Studi Kasus di DAS Cicatih-Cimandiri Kabupaten Sukabumi Jawa Barat

Popi Rejekiningrum dan Budi I. Setiawan

Serapan Karbon dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Berbagai Sistem Pengelolaan Tanaman Padi

Rina Kartikawati

Variabilitas Cadangan Karbon pada Berbagai Penggunaan Lahan Gambut di Kabupaten Kubu Raya dan Pontianak, Kalimantan Barat

Ai Dariah, Fahmuddin Agus, Erni Susanti, dan Elsa Surmaini



Jurnal
Tanah dan Iklim

Indonesian Soil and Climate Journal
Nomor 35, Juli 2012

ISSN 1410-7244

Dari Redaksi

Terakreditasi berdasarkan Keputusan
Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan
Indonesia No. 816/D/2009

Ketua pengarah :

Kepala Balai Besar Penelitian dan
Pengembangan Sumberdaya Lahan
Pertanian

Ketua penyunting :

Le Istiqlal Amien

Anggota penyunting :

Abdurachman Adimihardja
Diah Setyorini
D. Subardja
Kasdi Subagyono
Kusumo Nugroho
Santun R.P. Sitorus
Sudarsono

Penyunting pelaksana :

Widhya Adhy
Karmini Gandasmita
Rizatus Shofiyati
Yiyi Sulaeman

Mitra bestari :

Supiandi Sabiham
A.M. Fagi
Suyamto Hardjosuwirjo

Penerbit :

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan
Sumberdaya Lahan Pertanian

Alamat redaksi :

Jl. Tentara Pelajar No. 12 Bogor 16114
Telp. (0251) 8323012
Fax (0251) 8311256
e-mail : csar@indosat.net.id
<http://bbsdlp.litbang.deptan.go.id>

Frekuensi terbit :

Setahun dua kali

Pembaca yang budiman, Jurnal Tanah dan Iklim No. 35 tahun 2012 menyajikan tujuh tulisan yang membahas pengembangan model tanah-lanskap, komposisi mineral dan sifat-sifat tanah, karakterisasi retensi air tanah, konservasi tanah, indentifikasi tren perubahan iklim, serapan karbon, dan variabilitas cadangan karbon.

Redaksi mengucapkan terima kasih dan selamat kepada para penulis yang telah memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan ilmu dan teknologi di bidang ilmu tanah dan iklim. Redaksi juga mengucapkan banyak terima kasih kepada para pakar (*team reviewer*) yang telah meluangkan waktunya untuk menilai artikel yang dimuat pada edisi ini.

Jurnal Tanah dan Iklim ini terbit dua kali setahun, pada bulan Juli dan Desember. Redaksi mengundang para praktisi, akademisi, dan peneliti di bidang ilmu tanah dan iklim untuk mempublikasikan hasil penelitiannya maupun ide-ide atau gagasan baru yang orisinal. Kontribusi dari para pembaca dengan mengirimkan tulisan, komentar, dan saran sangat kami harapkan.

Sebagai media komunikasi ilmiah dalam bidang ilmu tanah dan iklim, jurnal ini sangat bermanfaat dalam menyebarkan hasil penelitian dan dapat meningkatkan pemahaman masyarakat tentang sumberdaya yang sangat diperlukan ini sehingga dapat dipergunakan dengan lebih bijaksana. Akhirnya redaksi berharap semoga artikel-artikel ilmiah yang termuat dalam jurnal ini dapat memberikan inspirasi bagi para pembaca untuk berperan aktif dalam rangka pengembangan ilmu dan teknologi terutama di bidang ilmu tanah dan iklim.

Bogor, Juli 2012

Redaksi

Jurnal Tanah dan Iklim
Indonesian Soil and Climate Journal
Nomor 35, Juli 2012

DAFTAR ISI

	Halaman
Pengembangan Model Tanah-Lanskap untuk Menaksir Sifat Tanah di Pulau Jawa <i>Yiyi Sulaeman, A. Sutandi, B. Barus, dan D.A. Rachiem</i>	1
Komposisi Mineral dan Sifat-Sifat Tanah yang Berkembang dari Deposit Tephra Gunung Talang pada Dataran Aluvial di Sentra Produksi Beras Solok, Sumatera Barat <i>Erna Suryani, Sudarsono, Iskandar, dan D. Subardja</i>	19
Prediction of the Water Content at Field Capacity from Disturbed Soil Samples <i>Budiman Minasny</i>	31
Kajian Tingkat Bahaya Erosi dan Arah Konservasi pada Penggunaan Lahan Pertanian di Daerah Tangkapan Air Rawa Pening (Studi Kasus di DAS Galeh) <i>Forita D. Arianti, Suratman, Edhy Martono, dan Slamet Suprayogi</i>	39
Identifikasi Tren Perubahan Iklim dan Dampaknya pada Sumber Daya Air: Studi Kasus di DAS Cicitih-Cimandiri Kabupaten Sukabumi Jawa Barat <i>Popi Rejekiningrum dan Budi I. Setiawan</i>	51
Serapan Karbon dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Berbagai Sistem Pengelolaan Tanaman Padi <i>Rina Kartikawati</i>	67
Variabilitas Cadangan Karbon pada Berbagai Penggunaan Lahan Gambut di Kabupaten Kubu Raya dan Pontianak, Kalimantan Barat <i>Ai Dariah, Fahmuddin Agus, Erni Susanti, dan Elsa Surmaini</i>	74

PETUNJUK PENULISAN ARTIKEL UNTUK JURNAL TANAH DAN IKLIM

Jurnal Tanah dan Iklim terbit dua kali dalam setahun dan memuat hasil-hasil penelitian dalam bidang tanah dan iklim. Artikel di dalam Jurnal Tanah dan Iklim tersusun atas bagian-bagian Judul, Abstrak, Pendahuluan, Bahan dan Metode, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, dan Daftar Pustaka.

Judul :

Judul harus singkat (maksimum 15 kata), tetapi cukup memberikan identitas subyek, indikasi tujuan dan memuat kata-kata kunci, ditulis dalam bahasa Indonesia dan Inggris.

Abstrak :

Abstrak mewakili seluruh materi tulisan dan implikasinya, ditulis secara singkat (sekitar 200 kata) dalam bahasa Indonesia dan Inggris dengan isi yang sama, dan tidak ada singkatan.

Pendahuluan :

Menyajikan alasan diadakannya penelitian atau hipotesis yang mendasari, ringkasan tinjauan pustaka yang berhubungan dengan masalah yang diteliti, dan pendekatan yang digunakan.

Bahan dan Metode :

Memuat penjelasan mengenai bahan-bahan penelitian, lokasi, dan waktu pelaksanaan. Metode yang digunakan ditulis dengan jelas dan sistematis, sehingga peneliti lain yang akan meneliti ulang dapat melakukan dengan cara yang sama.

Hasil dan Pembahasan :

Hasil yang disajikan secara singkat dapat dibantu dengan tabel, grafik, ilustrasi, dan foto-foto. Masing-masing data disajikan satu kali pada naskah, tabel, atau grafik. Judul tabel dan gambar, serta keterangannya, ditulis dalam bahasa Indonesia dan Inggris. Pembahasan merupakan tinjauan terhadap hasil penelitian secara singkat tetapi cukup luas. Pustaka yang diacu diutamakan publikasi primer.

Kesimpulan :

Menyajikan hasil penelitian yang dianggap penting untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Daftar Pustaka :

Mencantumkan semua pustaka yang digunakan dengan menyebutkan nama penulis, tahun penerbitan, judul, penerbit, kota, volume, nomor, dan halamannya, serta pustaka dari *website*. Penulisan daftar pustaka sesuai dengan cara yang ada di dalam jurnal ini.

Keterangan :

1. Nama (-nama) penulis disertai catatan kaki tentang profesi dan instansi tempat bekerja.
2. Kata-kata kunci sesuai dengan isi artikel, berpedoman pada Agrovoc, dan ditulis setelah abstrak.
3. Setiap nama organisme yang disebut pertama kali dalam abstrak atau tulisan pokok disertai nama ilmiahnya.
4. Makalah dapat ditulis dalam bahasa Indonesia maupun bahasa Inggris.
5. Nama kimiawi yang disebut untuk pertama kali dalam abstrak atau tulisan pokok supaya ditulis penuh, tidak boleh menyebutkan nama dagang (merk).
6. Angka desimal dalam bahasa Indonesia ditandai dengan koma dan dalam bahasa Inggris ditandai dengan titik.
7. Naskah diketik dua spasi kurang lebih 20 halaman kuarto, dalam format Microsoft Word.
8. Gambar, grafik, dan foto hitam putih harus kontras dan jelas.
9. Tabel tanpa garis pemisah vertikal.
10. Makalah dalam bentuk *soft copy* dan 2 *hard copy*, diserahkan/dikirimkan kepada Redaksi Pelaksana Jurnal Tanah dan Iklim.

Jurnal Tanah dan Iklim adalah penerbitan berkala yang memuat hasil-hasil penelitian dalam bidang tanah dan iklim dari para peneliti baik di dalam maupun di luar Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Redaksi dapat menyesuaikan istilah atau mengubah kalimat dalam naskah yang akan diterbitkan tanpa mengubah isi naskah. Penerbitan ini juga memuat berita singkat yang berisi tulisan mengenai teknik dan peralatan baru, serta hasil sementara penelitian tanah dan iklim. Surat pembaca dapat dimuat setelah disetujui Dewan Redaksi. Dewan Redaksi tidak dapat menerima makalah yang telah dipublikasikan atau dalam waktu yang sama dimuat dalam publikasi lain. Pembaca yang berminat untuk berlangganan atau pertukaran publikasi harap berhubungan dengan Redaksi Pelaksana Jurnal Tanah dan Iklim.

Variabilitas Cadangan Karbon pada Berbagai Penggunaan Lahan Gambut di Kabupaten Kuburaya dan Pontianak, Kalimantan Barat

Ai Dariah, Fahmuddin Agus, Erni Susanti, dan Elsa Surmaini

Serapan Karbon dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Berbagai Sistem Pengelolaan Tanaman Padi

Rina Kartikawati

Kajian Tingkat Bahaya Erosi dan Arahan Konservasi pada Penggunaan Lahan Pertanian di Daerah Tangkapan Air Rawa Pening (Studi Kasus di DAS Galeh)

Forita D. Arianti, Suratman, Edhy Martono, dan Slamet Suprayogi

Identifikasi Tren Perubahan Iklim dan Dampaknya pada Sumber Daya Air: Studi Kasus di DAS Cicatih-Cimandiri Kabupaten Sukabumi Jawa Barat

Popi Rejekiingrum dan Budi I. Setiawan

Prediction of the Water Content at Field Capacity from Disturbed Soil Samples

Budiman Minasny

Pengembangan Model Tanah-Lanskap untuk Menaksir Sifat Tanah di Pulau Jawa

Y. Sulaeman, A. Sutandi, B. Barus, dan D.A. Rachiem

Komposisi Mineral dan Sifat-Sifat Tanah yang Berkembang dari Deposit Tephra Gunung Talang pada Dataran Aluvial di Sentra Produksi Beras Solok, Sumatera Barat

E. Suryani, Sudarsono, Iskandar, dan D. Subardja

Pengembangan Model Tanah-Lanskap untuk Menaksir Sifat Tanah di Pulau Jawa

Developing Soil-landscape Models to Predict Soil Properties in Java Island

YIYI SULAEMAN¹, A. SUTANDI², B. BARUS², DAN D.A. RACHIEM²

ABSTRAK

Data tanah dan terain adalah bahan masukan bagi pemodelan ekologi dan lingkungan, sehingga data ini harus selalu tersedia dalam format yang sesuai dan akurasi yang diterima. Biasanya data ini diperoleh dari kegiatan survei tanah dan analisis contoh tanah di laboratorium, namun memerlukan waktu lama, banyak tenaga dan relatif mahal. Pendekatan *digital soil mapping* menawarkan cara lain penyediaan data yang lebih cepat dan murah dalam akurasi yang bisa diterima. Pendekatan ini memanfaatkan data tanah yang ada dan mengintegrasikan teknologi pemodelan. Agar pendekatan ini efektif dan efisien, aneka model tanah-lanskap perlu dikembangkan. Penelitian ini bertujuan untuk: (i) mengidentifikasi peubah-peubah lingkungan yang bisa digunakan untuk menaksir sifat tanah di Pulau Jawa, (ii) mengembangkan model tanah-lanskap dari data tanah warisan (*legacy data*), (iii) menguji daya taksir model yang dikembangkan menggunakan teknik validasi silang. Dataset yang digunakan mencakup dataset 12 sifat tanah sebagai peubah respons yang diekstrak dari 301 profil tanah hasil survei tanah di Pulau Jawa dan dataset 21 kovariat yang mewakili topografi sebagai peubah penaksir yang diturunkan dari SRTM DEM. Seleksi penaksir menggunakan teknik *stepwise* dan pembuatan model menggunakan teknik regresi linear. Hasil penelitian adalah 30 model regresi untuk menaksir sifat-sifat tanah, yakni: kedalaman tanah, ketebalan horizon A, kedalaman horizon B, persentase fraksi pasir, persentase fraksi liat, bahan organik tanah, karbon organik tanah, nitrogen total, pH, Retensi P, Kejenuhan basa, dan KTK tanah. Hasil validasi menunjukkan bahwa model bisa digunakan untuk menaksir sifat tanah di tempat lain. Penelitian dan model ini adalah *benchmark* bagi pemodelan tanah-lanskap di daerah tropika khususnya Indonesia.

Kata kunci : Model tanah-lanskap, Stepwise, Regresi linear, Digital soil mapping

ABSTRACT

Soil and terrain data are basic input for any environmental and ecological modeling, so these data must be available in appropriate format and accepted accuracy. Usually these data are collected during soil survey and soil laboratory analysis although in fact these activities consume much time, labor intensive, and expensive. The digital soil mapping approach offers quicker, cheaper techniques to provide data in accepted accuracy. This approach makes use available soil data and modeling technology. To be effective and efficient, this approach must be supported by soil-landscape models. This research aims to (i) identify environmental variables that can be used to predict soil properties in Java, (ii) develop soil-landscape models using legacy data, (iii) evaluate the predictive capability of developed model using cross-validation technique. The used dataset covered 12 soil properties as response variable extracted from 301 soil profile data from

previous soil survey in Java and 21 covariates as predictor variable represented topography derived from SRTM DEM. Predictor selection used stepwise and model building used linear regression. The results are 30 soil-landscape regression models to predict soil properties i.e. soil depth, thick of A- horizon, depth to B horizon, clay percentage, sand percentage, soil organic matter, soil organic carbon, total nitrogen, pH, P retention, base saturation, and cation exchange capacity. Model validation indicates that these models can be used to predict soil properties in other sites. The research and resulted models may be used as benchmark for further soil-landscape modeling in tropical region especially in Indonesia.

Keywords : Soil-landscape model, Stepwise, Linear regression, Digital soil mapping

PENDAHULUAN

Data tanah dan terrain serta sebarannya di suatu lanskap adalah bahan masukan dalam berbagai pemodelan ekologi dan lingkungan, seperti: Century (Parton *et al.*, 1987), WOFOST (Hijmans *et al.* 1994), dan sebagainya. Karena itu, data ini harus selalu tersedia dalam format yang sesuai dan pada tingkat akurasi yang diinginkan oleh para calon pengguna. Biasanya data tanah ini diperoleh melalui kegiatan survei tanah dan pengambilan contoh tanah di lapangan serta analisis contoh tanah itu di laboratorium tanah. Cara ini pada kenyataannya menyita waktu yang lama dan tenaga yang banyak sehingga menjadi mahal (Cole and Boettinger, 2007; Bui, 2007; Grundwald, 2010).

Pendekatan dan teknik penyediaan data tanah yang lebih cepat dan murah menjadi perhatian beberapa ahli tanah satu dekade terakhir ini. Salah satunya adalah pemetaan tanah digital (*digital soil mapping*) yang banyak dikaji karena dapat

1. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Jl. Tentara Pelajar No 12, Cimanggu, Bogor 16114.
2. Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Jl. Raya Dramaga, Bogor.

menyediakan informasi tanah dan sebarannya secara kuantitatif (Lagachery dan McBratney, 2007). Pada dasarnya pendekatan ini adalah operasionalisasi berbasis komputer dari ide menaksir penyebaran sifat tanah dalam suatu lanskap (Bui, 2007). Teknik ini juga merevitalisasi data yang ada dan mengadopsi berbagai teknik pemodelan tanah-lanskap. Tinjauan tentang pendekatan ini dikemukakan oleh beberapa peneliti antara lain oleh McBratney *et al.* (2003), Lagacherie (2008), Minasny *et al.* (2008), dan Grundwald (2010).

Model tanah-lanskap adalah suatu model yang menghubungkan parameter lanskap dengan sifat tanah atau tipe tanah. Model ini direpresentasikan sebagai persamaan matematika, rule *jika...maka*, atau pohon keputusan (*decision tree*). Parameter lanskap, yang disebut juga kovariat, adalah peubah lingkungan yang mewakili faktor-faktor pembentuk tanah (Jenny, 1941), yakni: iklim, bahan induk, relief, organisme dan waktu. Model ini telah banyak dikembangkan terutama di daerah *temperate* seperti Amerika Serikat, Australia, Perancis, dan Jerman (*lihat* McBratney *et al.*, 2003). Teknik pemodelan yang digunakan beragam yaitu teknik pemodelan linear (*linear modelling*), pemodelan generalisasi aditif (*generalized additive modelling*), pemodelan generalisasi linear (*generalised linear modelling*), pemodelan klasifikasi dan regresi pohon (*classification and regression tree modelling*) dan pemodelan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network modelling*). Di Indonesia, pemodelan tanah-lanskap masih jarang dilakukan karena memerlukan data tanah yang banyak yang terorganisasi dengan baik.

Kegiatan penelitian dan survei tanah di Pulau Jawa telah dilakukan sejak tahun 1935, yang menghasilkan laporan-laporan teknik yang kebanyakan dilengkapi oleh deskripsi profil tanah serta data kimia tanah. Dataset lapisan atas tanah Indonesia termasuk Pulau Jawa telah dibuat oleh Lindert (2010) dari laporan survei tanah hingga tahun 1990-an. Dataset Jawa selanjutnya dikembangkan dan digunakan untuk mengkaji perubahan spatio-temporal karbon organik tanah di

Pulau Jawa (*lihat* Sulaeman *et al.*, 2010; Minasny *et al.*, 2010; Minasny *et al.*, 2011). Pengembangan dataset selanjutnya difokuskan pada memetakan ulang lokasi pengamatan profil tanah, mengharmoniskan dan standarisasi data profil dari hasil kegiatan survei tanah mulai tahun 1987. Dataset ini bermanfaat antara lain untuk membuat model tanah-lanskap dalam rangka kerja pemetaan tanah digital.

Dari kelima faktor pembentuk tanah (Jenny, 1941), faktor relief sering digunakan dalam pemodelan tanah-lanskap. Dari kompilasi McBratney *et al.* (2003) tentang artikel pemodelan tanah-lanskap, sebanyak 57 artikel dari 67 artikel yang terdaftar menggunakan faktor relief sebagai peubah penaksir. Ini dimungkinkan karena relief lebih mudah diparameterisasi dibandingkan faktor pembentuk tanah lainnya. Keberadaan *digital elevation model* (DEM) yang murah dan meliputi seluruh wilayah teresterial mendorong relief digunakan sebagai penaksir utama keragaman sifat tanah di suatu hamparan lahan.

Penelitian ini bertujuan untuk: (i) mengidentifikasi peubah-peubah lingkungan yang dapat digunakan untuk menaksir sifat tanah, (ii) mengembangkan model tanah-lanskap dari data tanah warisan (*legacy data*) dari Pulau Jawa, (iii) menguji daya taksir model yang dikembangkan dengan teknik validasi silang (*cross validation*). Calon penaksir adalah 21 parameter relief yang diturunkan dari DEM dan respon adalah 12 sifat tanah yang penting untuk pengelolaan lahan dan lingkungan. Ketigapuluh model regresi tanah-lanskap yang dihasilkan merupakan acuan model (*benchmark*) untuk pengembangan model serupa di daerah tropika, khususnya Indonesia. Model yang dihasilkan juga dapat mendukung berbagai aplikasi dan penelitian berbasis tanah di Indonesia.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan di Unit Basisdata, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDL), Badan Penelitian dan

Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian di Bogor. Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei sampai Juli 2011.

Penelitian menggunakan 301 dataset, yang setiap dataset terdiri atas 12 sifat tanah dan 21 peubah lingkungan (kovariat). Data sifat tanah dibangun dari deskripsi profil tanah hasil kegiatan survei dan pemetaan tanah di Pulau Jawa tahun 1987 hingga 2001 (Gambar 1). Sementara itu, data kovariat diturunkan dari SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) DEM versi 4.1 (Jervis, 2008)

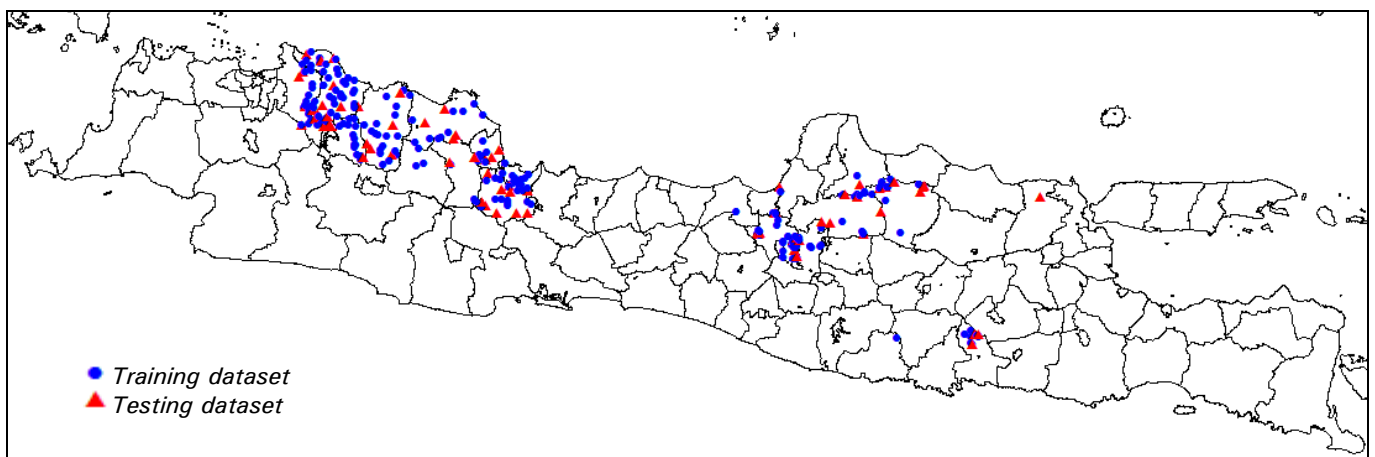
Sifat tanah yang dijadikan sebagai respon dalam pemodelan meliputi: kedalaman tanah (*Soildepth*), ketebalan horizon A (*Athick*), kedalaman horizon B (*DepthtoB*), persentase fraksi pasir (Sand), persentase fraksi liat (*Clay*), kadar bahan organik tanah (SOM), kadar karbon organik tanah (SOC), Nitrogen total (Ntot), pH, retensi P (RetP), kejenuhan basa (BS), dan kapasitas tukar kation (CEC). Kecuali ketiga pertama, sifat tanah lainnya dibedakan atas kisaran kedalaman yaitu kedalaman 0-30 cm, kedalaman 30-50 cm, dan kedalaman 50-100 cm. Nilai sifat tanah untuk setiap kisaran kedalaman dihitung menggunakan *spline function* (Erh, 1972) dengan teknik *equal area spline* hasil modifikasi Ponce-Hernandez *et al.* (1982) dan Bishop *et al.* (1999).

Kovariat yang diturunkan dari DEM (Tabel 1) merupakan parameter dari (i) ketinggian tempat yang

menentukan kondisi iklim mikro dan energi potensial gravitasi, (ii) elemen lereng dan posisi lereng yang menjelaskan permukaan geomorfik baik permukaan erosi maupun permukaan deposisi, (iii) karakteristik aliran dan arus yang mempengaruhi *runoff*, infiltrasi dan erosi, (iv) sifat lereng yang mengatur intensitas energi kinetik air dan energi gravitasi, dan (v) sifat *catchment* yang menentukan jumlah air yang diterima dan gravitasi. Kecuali indeks posisi topografi (TPI) yang dibuat di ArcView GIS 3.1 (ESRI, 1998) menggunakan algoritma dari Jenness (2006), kovariat lainnya diturunkan oleh SAGA GIS.

Pembuatan dan validasi model

Dari 301 dataset tersebut, sebanyak 225 digunakan sebagai *training dataset* untuk membuat model dan sisanya, 77 dataset, digunakan sebagai *testing dataset* untuk menguji model. Semua tahapan pemodelan dibantu oleh perangkat lunak statistik JMP 9 (SAS Institute Inc., 2010). Seleksi peubah penaksir menggunakan teknik *forward stepwise*, dengan peluang masuk 0,25 dan peluang keluar 0,10 (Bendel dan Afifi, 1973). Evaluasi calon model dilakukan untuk melihat kecukupan calon model meliputi indikator R^2 (Pasaribu, 1983), dan nilai C_p (Mallows, 1973). Masing-masing indikator dihitung menggunakan rumus berikut:



Gambar 1. Sebaran 301 profil tanah untuk pengembangan model

Figure 1. The distribution of 301 soil profiles as dataset for modeling

Tabel 1. Deskripsi singkat kovariat yang merepresentasikan kondisi topografi

Table 1. Brief description of covariate representing topographical condition

No.	Kode	Deskripsi singkat	Acuan*
A. Parameterisasi ketinggian tempat			
1	ZC	Ketinggian di atas saluran (<i>altitude above channel</i>) merupakan ketinggian di atas saluran drainase, seperti anak sungai. Satuan meter	1
2	Elev	Ketinggian tempat di atas permukaan laut (elevasi). Satuan meter	1
B. Parameterisasi posisi dan elemen lereng			
3	TPI	Indeks posisi topografi (<i>topographic position index</i>) merupakan indeks untuk karakterisasi posisi <i>site</i> di lereng	2
4	MrVBF	Indeks kerataan dasar lembah (<i>multiresolution valley bottom flatness</i>)	3
5	MrRTF	Indeks kerataan puncak igir (<i>multiresolution ridge top flatness</i>)	3
6	KP	<i>Profile (vertical) curvature</i> , menjelaskan mekanisme akumulasi	1,4
7	KC	<i>Contour (tangential) curvature</i> , menjelaskan mekanisme akumulasi	1,4
8	CU	<i>Curvature</i> , menjelaskan mekanisme akumulasi	1
C. Parameterisasi sifat aliran dan erosi			
9	SP	Indeks kekuatan arus (<i>stream power</i>) merupakan indeks kekuatan arus versi SAGA GIS yang menjelaskan aliran erosi potensial	1,5
10	FW	<i>Flow width</i> adalah panjang kontur efektif yang tegak lurus aliran. Satuan meter	1,5
11	FPL	<i>Flow path length</i> , merupakan total panjang aliran dari semua aliran lereng bagian atas dari site. Satuan meter	1,4
12	FA	<i>Flow accumulation</i> , merupakan areal planar bukan areal permukaan yang menjelaskan luas areal pengumpul seperti terlihat dari angkasa. Istilah lainnya adalah <i>basin area</i> , <i>upslope area</i> . Satuan m ²	1,5
13	CI	<i>Convergence Index</i> , merupakan indeks yang menunjukkan sifat aliran yang menyebar atau menyatu dari suatu sel.	1,5, 6
14	WI	SAGA <i>wetness index</i> merupakan parameter yang menjelaskan kecenderungan suatu sel untuk akumulasi air	1,5
D. Parameter sifat lereng			
15	SL	<i>Slope length</i> , merupakan panjang maksimum aliran hingga sel target dimana kemiringan berakhir. Satuan meter	1,4
16	SG	<i>Slope gradient</i> (kemiringan lereng), menjelaskan laju aliran. Satuan derajat	1,4
17	LSF	Faktor pajang dan kemiringan lereng (<i>LS factor</i>)	1
18	AZ	Aspek. Menjelaskan arah garis aliran. Satuan derajat	1,4
E. Karakteristik watershed			
19	CA	<i>Catchment area</i> , menjelaskan besaran aliran. Satuan m ² .	1,4
20	MCA	<i>Modified catchment area</i> , merupakan modifikasi SAGA untuk <i>catchment area</i>). Satuan m ²	1
21	CS	<i>Catchment slope</i> mencerminkan kemiringan rata-rata dari lereng bagian atas (<i>upslope</i>), indikator kecepatan dan energi aliran	1, 4

*) 1 = Olaya (2004), 2 = Jenness (2006), 3 = Gallant dan Dowling (2003), 4 = Olaya (2009), 5 = Gruber dan Peckham (2009), 6 = Olaya dan Conrad (2009)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$Cp = \frac{SSEp}{\hat{\sigma}^2} - n + 2p$$

$$SSEp = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2$$

dimana:

- Y_i = nilai pengamatan sifat tanah contoh ke- i
- Y'_i = nilai taksiran sifat tanah contoh ke-i
- \bar{Y} = rata-rata sifat tanah dari contoh yang diamati
- SSEp = jumlah galat kuadrat
- n = jumlah data untuk validasi
- p = jumlah parameter model termasuk *intercepts*
- $\hat{\sigma}^2, \hat{\sigma}^2$ = nilai dugaan untuk σ^2 .

Dari penaksir yang diperoleh dibuat model regresi linear menggunakan teknik kuadrat terkecil. Analisis ragam model dengan uji F dilakukan untuk melihat kontribusi model terhadap keragaman respons sedangkan analisis *lack of fit* (LOF) untuk mengetahui keragaman galat dari model. Model memuaskan bila uji F nyata dan uji LOF tidak nyata pada taraf uji 0,05.

Pada tahapan validasi model, model yang dihasilkan digunakan untuk menaksir sifat tanah dari *testing dataset*. Berdasarkan nilai hasil taksiran dan nilai sebenarnya kemudian dihitung *mean error* (ME) dan *root mean square error* (RMSE) dengan rumus (Tsai *et al.* 2001):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)}{n}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{n} \right]^{1/2}$$

dimana:

- Y_i = nilai pengamatan sifat tanah pada site ke- i
- Y'_i = nilai taksiran sifat tanah pada site ke-i
- n = jumlah site untuk validasi

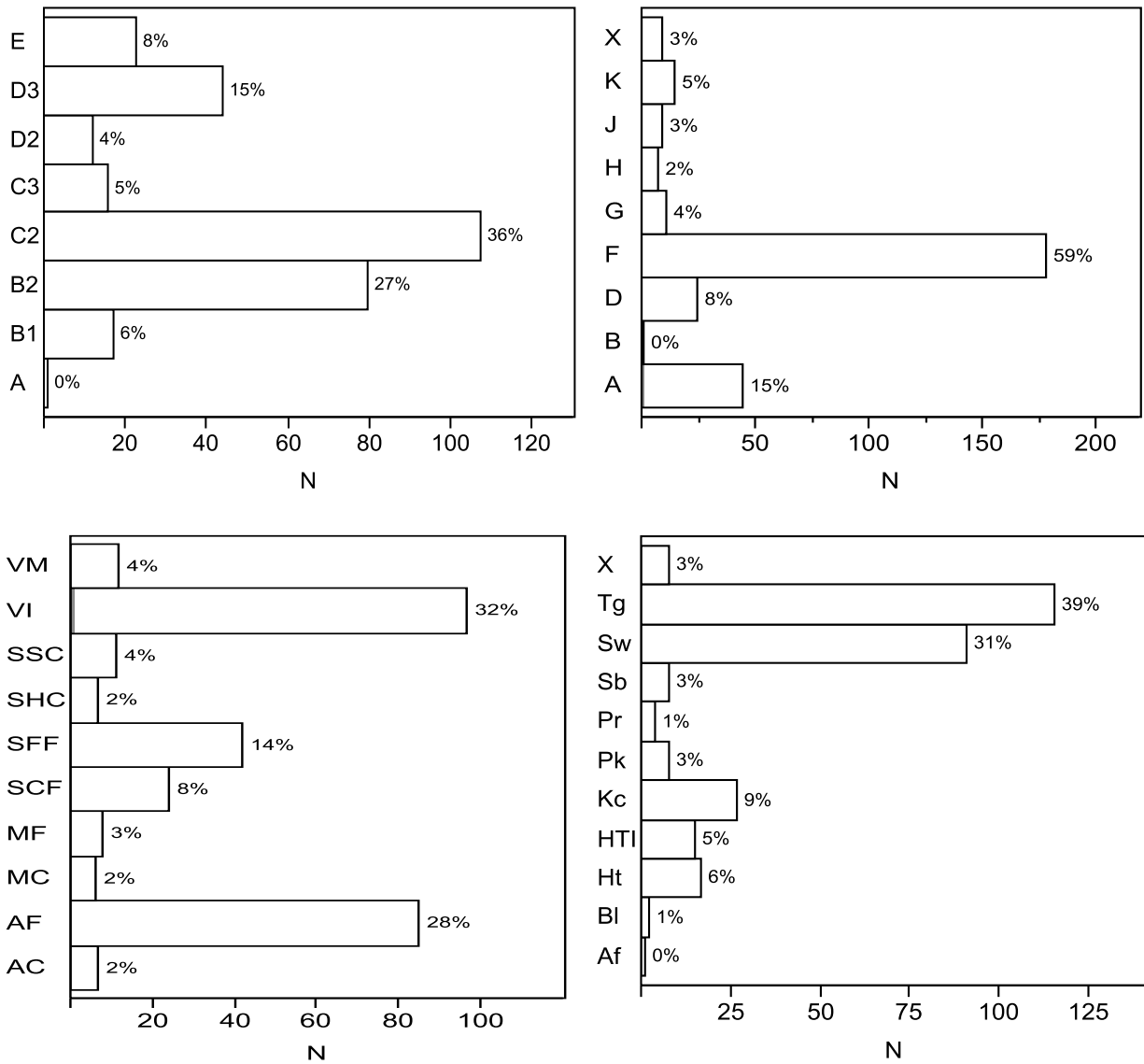
Nilai ME yang mendekati nol menunjukkan model tidak bias, semakin tinggi daya taksir model tersebut. Semakin kecil nilai RMSE semakin tepat taksiran model, semakin tinggi daya taksir model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dataset, keragaman sifat tanah, dan kovariat

Dalam pengembangan model tanah-lanskap, tahap persiapan dataset menyita banyak waktu. Penelitian ini hanya menggunakan laporan-laporan survei tanah di Pulau Jawa yang dilaksanakan Tim BBSDLP dan Tim Institut Pertanian Bogor (IPB) antara tahun 1987 dan 2001. Laporan ini semuanya melampirkan deskripsi profil dan hasil analisis kimia. Posisi koordinat dari lokasi pengamatan profil tanah umumnya tersedia pada deskripsi profil tanah tersebut, namun beberapa survei menyajikan dalam peta pengamatan tanah. Untuk yang terakhir, beberapa tahapan perlu dilakukan guna mengetahui posisi koordinat yaitu penyediaan peta, registrasi peta elektronik ke sistem referensi geografi (Lat/Lon) menggunakan datum WGS 1984. Lokasi pengamatan profil ini penting tidak saja dalam pemodelan tanah-landskap untuk memperoleh kovariate yang meyakinkan. Gambar 1 menyajikan sebaran lokasi 301 profil tanah di Pulau Jawa.

Profil tanah diamati pada ketinggian antara 0 m hingga 1.443 m dpl, dimana 98% darinya berada pada ketinggian antara 0-1000 m dpl, pada lahan yang dominan berumur Holosin. Sebaran profil berdasarkan zone agroklimate, ordo tanah, litologi, dan penggunaan lahan disajikan pada Gambar 2. Data persen menunjukkan persentasi dari total profil. Profil ini terutama dijumpai pada zone agroklimat C2 (36%) dan B2 (27%), dan dikelompokkan terutama pada suborder yaitu Inceptisols (59%). Tanah-tanah pada profil ini berkembang terutama dari batuan vulkan intermedier (32%) dan Aluvial halus (28%). Tanah ini dipergunakan terutama untuk tegalan (39%) dan sawah (31%). Jadi, profil tanah menyebar pada kondisi lingkungan yang relatif homogen kalau dilihat dari aspek litologi, umur lahan, dan iklim.



Ordo tanah : A = Alfisols, B = Andisols, D = Entisols, F = Inceptisols, G = Mollisols, H = Oxisols, J = Ultisols, K = Vertisols, X = *no data*

Lithologi : VM = volkan basa, VI = volkan intermedier, SSC = kalkareous lunak, SHC = kalkareous keras, SFF = batuan sedimen halus masam, SCF = batuan sedimen kasar masam, MF = sedimen marin halus, MC = sedimen marin kasar, AF = aluvial halus, AC = aluvial kasar

Penggunaan lahan : X = pemukiman, Tg = tegalan, Sw = sawah, Sb = semak belukar, Pr = padang rumput, Pk = perkebunan, Kc = kebun campuran, HTI = hutan tanaman, Ht = hutan, Bl = belukar, Af = agroforestri

Gambar 2. Distribusi profil tanah berdasarkan zone agroklimat, ordo tanah, litologi, dan *landuse* (N=jumlah profil)

Figure 2. The distribution of soil profiles based on agroclimate, soil order, lithology, and landuse (N=number of profile)

Sementara itu, ringkasan statistik sifat tanah yang ditaksir disajikan pada Tabel 2. Keragaman sifat tanah umumnya tergolong tinggi ($CV > 35\%$) kecuali ketebalan horizon A, dan pH yang tergolong sedang (CV antara 15% dan 35%) menurut pengharkatan Wilding dan Dress (1983). Nilai tertinggi kejenuhan basa lebih dari 100% mengindikasikan terhitungnya kation-kation yang ada dalam larutan tanah.

Ringkasan statistik kovariat yang digunakan disajikan pada Tabel 3. Secara umum, tingkat

keragaman masing-masing kovariat tergolong tinggi kecuali indeks kebasahan (WI) yang tergolong sedang dan lebar aliran (FW) yang tergolong rendah ($< 10\%$). Hal ini beralasan karena profil tanah diambil dari ketinggian dengan kisaran yang lebar yaitu antara 0 hingga 1.443 m dpl.

Salah satu aspek yang perlu dihindari dalam pemodelan adalah *multicollinearity*, yakni adanya hubungan linear yang kuat antara penaksir yang digunakan. Tabel 4 menyajikan koefisien korelasi linear sederhana pasangan kovariat. Secara umum

Tabel 2. Ringkasan statistik sifat tanah

Table 2. Brief statistical summary of soil properties

Sifat tanah	Jumlah profil	Rata-rata	Nilai tengah	Minimum	Maksimum	Simpangan baku	CV(%)*
Kedalaman tanah (cm)	223	103,48	110,00	11,00	200,00	46,03	44,49
Ketebalan horizon A (cm)	223	17,67	17,00	6,00	31,00	4,94	27,94
Kedalaman horizon B (cm)	199	21,40	18,00	7,00	55,00	9,32	43,58
Fraksi pasir 0-30 (%)	223	18,76	12,00	0,00	97,00	20,09	107,10
Fraksi pasir 30-50 (%)	207	17,27	10,00	0,00	95,00	18,68	108,16
Fraksi pasir 50-100 (%)	194	19,80	11,50	0,00	90,00	21,11	106,58
Fraksi liat 0-30 (%)	223	54,82	60,00	2,00	90,00	20,63	37,63
Fraksi liat 30-50 (%)	208	56,53	58,00	2,00	90,00	20,51	36,28
Fraksi liat 50-100 (%)	190	55,75	58,00	3,00	91,00	20,61	36,97
BO tanah 0-30 (%)	224	2,23	1,79	0,39	14,67	1,87	83,63
BO tanah 30-50 (%)	222	1,38	1,03	0,08	15,03	1,50	108,72
BO tanah 50-100 (%)	215	0,97	0,80	0,12	11,01	0,99	102,39
C organik 0-30 (%)	224	1,29	1,04	0,23	8,51	1,08	83,67
C organik 30-50 (%)	222	0,80	0,60	0,05	8,72	0,87	108,70
C organik 50-100 (%)	215	0,56	0,46	0,07	6,39	0,58	102,39
Total N 0-30 (%)	224	0,13	0,11	0,03	0,65	0,09	69,63
Total N 30-50 (%)	207	0,09	0,07	0,02	0,75	0,08	85,31
Total N 50-100 (%)	182	0,07	0,06	0,01	0,32	0,05	67,48
pH 0-30	207	6,00	5,80	0,70	8,30	1,06	17,71
pH 30-50	185	6,10	6,00	4,60	8,30	0,97	15,82
pH 50-100	172	6,17	6,10	4,50	8,40	0,99	16,00
Retensi P 0-30 (%)	25	43,28	42,60	5,70	86,20	20,34	46,98
Retensi P 30-50 (%)	21	39,75	41,40	0,60	83,40	23,23	58,44
Retensi P 50-100 (%)	16	39,53	38,20	1,00	87,80	25,78	65,22
Kejenuhan basa 0-30 (%)	200	72,57	79,00	2,00	162,00	27,53	37,94
Kejenuhan basa 30-50 (%)	180	71,37	79,50	1,00	118,00	29,65	41,54
Kejenuhan basa 50-100 (%)	169	73,20	84,00	1,00	122,00	29,58	40,41
KTK 0-30 (cmol kg ⁻¹)	204	32,47	31,50	3,00	100,00	16,22	49,97
KTK 30-50 (cmol kg ⁻¹)	186	32,47	31,00	5,00	98,00	16,67	51,33
KTK 50-100 (cmol kg ⁻¹)	167	31,41	30,00	6,00	95,00	16,36	52,07

* CV = koefisien keragaman; rendah jika $CV < 15\%$, sedang jika $15\% < CV < 35\%$, tinggi jika $CV > 35\%$ (Wilding and Dress, 1983).

Tabel 3. Ringkasan statistik kovariat untuk menaksir sifat tanah

Table 3. The brief statistical summary of covariates to predict soil properties

Kode kovariat**	Jumlah grid	Rata-rata	Nilai tengah	Minimum	Maksimum	Simpangan baku	CV(%)*
ZC (m dpl)	224	29,25	9,18	0,00	428,84	57,20	195,58
WI	224	18,41	18,40	10,28	24,88	4,08	22,16
TPI	220	1,70	0,00	-27,00	49,00	9,12	536,40
SP	224	6,5E+03	1,3E+03	8,1E+00	2,2E+05	2,1E+04	3,2E+02
SL (m)	224	194,23	90,00	0,00	2194,63	334,19	172,06
SG (deg)	224	2,06	0,26	0,00	27,65	4,43	214,76
MRVBF	224	4,44	4,85	0,00	8,92	2,83	63,72
MRRTF	224	4,05	3,54	0,00	8,96	3,35	82,63
MCA (m ²)	224	1,2E+08	5,6E+06	1,4E+04	1,2E+09	2,0E+08	1,8E+02
LSF	224	26,29	9,05	0,01	248,71	40,22	152,98
KP (rad m ⁻¹)	224	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2760,94
KC (rad m ⁻¹)	224	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	941,41
FW (m)	224	114,36	117,59	90,00	127,28	11,08	9,69
FPL (m)	224	951,41	649,32	0,00	6834,74	991,92	104,26
FA (m ²)	224	9,3E+04	4,9E+04	8,1E+03	7,8E+05	1,3E+05	1,3E+02
Elev (m dpl)	224	202,67	96,65	-0,91	1443,19	254,29	125,47
CU (rad m ⁻¹)	224	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1247,49
CS (deg)	224	0,07	0,05	0,00	0,43	0,08	109,15
CI	224	2,48	0,06	-57,43	76,04	26,17	1056,73
CA (m ²)	224	8,6E+05	2,7E+04	8,1E+03	1,3E+08	8,7E+06	1,0E+03
AZ (deg)	224	180,17	180,54	3,50	360,00	116,64	64,74

*) CV = koefisien keragaman; rendah jika CV < 15%; sedang jika 15% < CV < 35%; tinggi jika CV > 35% (Wilding and Dress, 1983)

***) ZC = tinggi tempat di atas saluran; WI = indeks kebasahan versi SAGA; TPI = indeks posisi topografi; SP = kekuatan arus; SL = panjang lereng; SG = kemiringan lereng; MRVBF = indeks kerataan dasar lembah; MRRTF = indeks kerataan puncak igir; MCA = luas *catchment* veri SAGA; LSF = faktor LS; KP = *profile curvature*; KC = *contour curvature*; FW = lebar aliran; FPL = panjang jalur aliran; FA = akumulasi aliran; Elev = tinggi tempat di atas permukaan laut; CU = *curvature*; CS = kemiringan rata-rata *catchment*; CI = indeks konvergensi; CA = luas *catchment*; AZ = aspek lereng

korelasi linear antara kovariat tidak nyata (< 0.7), kecuali tinggi tempat diatas saluran (ZC), indeks kebasahan (WI), indeks posisi topografu (TPI), kekuatan arus (SP), panjang lereng (SL), kemiringan lereng (SG), faktor LS (LSF), *profile curvature* (KP), dan *contour curvature* (KC). Indeks kebasahan (WI) berkorelasi linear dengan empat kovariat lain yakni *modified catchment area* (MCA), faktor LS (LSF), tinggi tempat di atas permukaan laut (Elev) dan kemiringan rata-rata *catchment* (CS). Indeks posisi topografi (TPI) dan kemiringan lereng (SG) masing-masing berkorelasi dengan dua kovariat lainnya.

Jika dalam model terdapat kovariat yang berkorelasi maka dipilih salah satu kovariat. Namun

demikian pasangan kovariat itu yang nyata berkorelasi linier masih bisa digunakan sebagai penaksir jika prosesnya berbeda. Contohnya, ketinggian tempat di permukaan laut (Elev) dan ketinggian tempat di atas saluran (ZC) nampak berkorelasi linier namun keduanya merepresentasikan proses yang berbeda. Elev mempengaruhi iklim mikro sedangkan ZC menentukan energi potensial. Selain itu nilai ZC tidak dapat diduga oleh nilai Elevasi. Seleksi kovariat yang akan digunakan sebagai penaksir harus mempertimbangkan hasil analisis korelasi dan arti penting pedologis dari kovariat itu.

Tabel 4. Koefisien korelasi Pearson antara kovariat

Table 4. Pearson correlation among covariates

	ZC	WI	TPI	SP	SL	SG	MR VBF	MR RTF	MCA	LSF	KP	KC	FW	FPL	FA	Elev	CU	CS	CI	CA	AZ
ZC	1,0																				
WI	-0,6	1,0																			
TPI	0,5	-0,3	1,0																		
SP	0,1	-0,1	-0,2	1,0																	
SL	0,1	-0,1	-0,3	0,2	1,0																
SG	0,6	-0,4	0,3	0,1	0,1	1,0															
MRVBF	-0,3	0,4	-0,2	0,0	0,0	-0,6	1,0														
MRRTF	-0,1	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,5	0,5	1,0													
MCA	-0,3	0,7	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,4	-0,2	1,0												
LSF	0,6	-0,7	0,1	0,3	0,3	0,7	-0,3	0,0	-0,3	1,0											
KP	0,3	-0,1	0,8	-0,1	-0,2	0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	1,0										
KC	0,2	-0,1	0,6	-0,1	-0,4	0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,5	1,0									
FW	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	1,0								
FPL	0,2	-0,2	0,0	0,2	0,3	0,2	-0,2	0,0	-0,2	0,3	0,0	0,0	0,1	1,0							
FA	0,0	0,0	-0,3	0,2	0,8	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,1	-0,2	-0,4	0,0	0,3	1,0						
Elev	0,7	-0,7	0,4	0,1	0,1	0,4	-0,4	0,1	-0,4	0,6	0,3	0,2	0,0	0,5	0,1	1,0					
CU	0,3	-0,1	0,8	-0,2	-0,3	0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,9	0,8	0,0	0,0	-0,3	0,3	1,0				
CS	0,6	-0,7	0,1	0,2	0,2	0,7	-0,4	-0,1	-0,4	0,9	-0,1	0,1	-0,1	0,3	0,1	0,6	0,0	1,0			
CI	0,1	-0,1	0,5	-0,2	-0,4	0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,4	0,5	0,1	-0,1	-0,5	0,1	0,6	0,0	1,0		
CA	0,0	0,1	-0,1	0,7	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	1,0	
AZ	-0,1	0,2	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	1,0

Keterangan : ZC = tinggi tempat di atas saluran; WI = indeks kebasahan versi SAGA; TPI = indeks posisi topografi; SP = kekuatan arus; SL = panjang lereng; SG = kemiringan lereng; MRVBF = indeks kerataan dasar lembah; MRRTF = indeks kerataan puncak igir; MCA = luas *catchment* veri SAGA; LSF = faktor LS; KP = *profile curvature*; KC = *contour curvature*; FW = lebar aliran; FPL = panjang jalur aliran; FA = akumulasi aliran; Elev = tinggi tempat di atas permukaan laut; CU = *curvature*; CS = kemiringana rata-rata *catchment*; CI = indeks konvergensi; CA = luas *catchment*; AZ = aspek lereng

Seleksi penaksir terbaik

Pembuatan model pada dasarnya melakukan estimasi koefisien regresi dan ragamnya (*variance*). Pada penelitian ini, peubah penaksir yang dipilih adalah subset penaksir terbaik, yang ditetapkan menggunakan prosedur *stepwise forward selection*. Peubah yang memberikan keragaman paling tinggi dimasukan pertama kali ke model, kemudian dievaluasi apakah nyata mempengaruhi keragaman dari keseluruhan model. Tahap ini dilakukan terus sehingga total keragaman yang diinginkan tercapai. Hasilnya adalah subset terbaik untuk pemodelan.

Hal yang kritikal dalam prosedur ini adalah pemilihan nilai probabilitas *to enter* dan nilai probabilitas *to leave*, yaitu nilai yang menentukan

apakah kovariat harus dipertahankan dalam subset terbaik atau tidak. Besaran nilai ini masih diperdebatkan oleh para ahli statistik. Pada penelitian ini probabilitas *to enter* adalah 0,25 dan probabilitas *to leave* dipilih 0,1, mengikuti saran dari Bendel dan Afifi (1977).

Hasil *stepwise* secara *default* adalah subset yang mempunyai RMSE minimum dan umumnya nilai *Cp* mendekati jumlah parameter (P). Namun demikian, cara ini seringkali *over* parameterisasi dan terjadi *multicollinearity*. Model yang dibuat menjadi tidak efisien karena terlalu banyak data yang perlu dipersiapkan. Model dengan jumlah penaksir 3 atau 5 biasanya sudah mencukupi. Kerena itu, peubah penaksir hasil *stepwise* perlu diseleksi lagi menggunakan pendekatan *Cp* plot (Mallow, 1973),

yang membandingkan nilai C_p dan P . *Subset* terbaik dipilih jika model menunjukkan nilai C_p sama dengan atau mendekati P . Tabel 5 menunjukkan 19 dari 30 model mempunyai nilai C_p yang mendekati P .

Model yang nilai C_p -nya menyimpang jauh dari nilai P adalah kedalaman tanah, persentase liat 0-30 cm, persentase liat 50-100 cm, bahan organik 50-100 cm, pH 0-30 cm, dan pH 50-100 cm. Pada model ini, nilai C_p nampaknya tidak efektif sebagai indikator untuk memilih jumlah penaksir. Hal ini sering terjadi jika koefisien regresi penaksir nyata tidak sama dengan nol, artinya nyata mengurangi jumlah galat kuadrat. Untuk model seperti ini, indikator lain yaitu nilai RMSE bisa digunakan, dimana subset terbaik diperoleh jika model menunjukkan nilai RMSE paling kecil.

Model regresi tanah-lanskap

Tabel 5 juga menunjukkan model regresi menggunakan peubah penaksir berkisar dari 3 hingga 7 penaksir. Sebanyak 10 model penaksir menunjukkan jumlah penaksir yang paling sedikit yakni model penaksir kadar pasir semua lapisan kedalaman, kejenuhan basa kedalaman 30-50 cm, bahan organik kedalaman 30-50 cm, karbon organik kedalaman 30-50 cm, pH kedalaman 0-20 cm, pH kedalaman 30-100 cm dan retensi P kedalaman 30-50 cm. Ini mengindikasikan bahwa faktor lingkungan tersebut dominan mempengaruhi keragaman nilai sifat tanah. Selain itu, ini juga mengindikasikan bahwa model tersebut paling efisien karena jumlah penaksir berasosiasi dengan waktu dan biaya untuk mempersiapkan data peubah penaksir tersebut.

Model yang disajikan pada Tabel 5 hanyalah salah satu bentuk representasi dari model untuk menaksir sifat tanah. Jika diberikan 20 peubah calon penaksir, maka minimal 20 model akan tersedia jika setiap model mempunyai satu peubah saja. Untuk menguji kecukupan model analisis sidik ragam dan analisis kekurangan (*lack of fit*) dilakukan. Umumnya model sudah mencukupi untuk menaksir

sifat tanah seperti diindikasikan oleh nilai probabilitas anova kurang dari 0.05, kecuali model penaksir retensi P .

Andil kovariat pada keragaman nilai sifat tanah

Teknik regresi dapat mendeteksi arti penting setiap penaksir terhadap keragaman sifat tanah. Nilai mutlak dari *t ratio* (nilai T), yaitu rasio antara koefisien regresi penaksir dengan galat bakunya adalah indikator untuk perbandingan andil tersebut. Biasanya nilai T merupakan statistik untuk menguji apakah koefisien regresi berbeda dengan nol atau tidak. Jika tidak nyata pada taraf uji tertentu maka koefisien regresinya sama dengan nol yang berarti bahwa penaksir tersebut tidak berkontribusi secara nyata pada keragaman nilai taksiran. Nilai T yang tinggi mengindikasikan bahwa nilai koefisien regresi penaksir lebih tinggi daripada galatnya.

Tabel 6 menyajikan nilai T untuk penaksir yang ada dalam model terpilih. Tingkat kepentingan penaksir dapat diurut berdasarkan urutan nilai T . Contohnya, Elevasi merupakan penaksir paling penting untuk kadar bahan organik tanah pada kedalaman 0-30 cm karena nilai T -nya paling besar (5,65) dibandingkan nilai T dari penaksir lainnya. Penaksir berikutnya adalah MrRTF, kemudian kemiringan rata-rata *catchment* (CS) dan akumulasi aliran (FA). Jadi, berdasarkan andilnya terhadap keragaman sifat tanahnya, penaksir bahan organik pada kedalaman 0-30 cm dapat diurut sebagai Elev>MrRTF>CS>FA. Cara yang sama juga bisa diterapkan pada penaksir dan model lainnya.

Elevasi merupakan penaksir paling penting untuk ketiga sifat tanah yaitu bahan organik tanah, karbon organik tanah, dan total nitrogen. Elevasi di Pulau Jawa berkaitan erat dengan iklim mikro, dimana iklim mikro ini (temperatur dan kelembaban) mempengaruhi dinamika populasi mikroba. Mikroba ini berperan dalam menentukan laju dekomposisi bahan organik yang pada akhirnya akan mempengaruhi status bahan organik di dalam tanah.

Tabel 5. Model regresi tanah-lanskap untuk menaksir sifat tanah di Jawa

Table 5. Soil-landscape regression models to predict soil properties in Java

Respon	Model	Cp	P	RMSE	R ²	N	Nilai P	
							Anova	LOF
Kedalaman tanah	112,18-0,000245 SP + 0,012 SL-1,585 MRRTF -53,531CS + 0,353CI	-0,49	6	44,77	0,08	223	0,0043	0,89
Ketebalan horizon A	9,03 + 0,252MRVBF + 0,069FW + 0,0031Elev -12,906CS	4,70	5	4,78	0,08	223	0,001	0,34
Kedalaman horizon B	20,33 -0,048ZC + 0,420SG-0,262MRRTF + 0,000000097MCA + 0,0076Elev	7,64	6	8,96	0,10	199	0,001	0,19
Liat 0-30	68,59-1,310MRVBF-0,000018FA -0,0129Elev-49,474CS	-0,33	5	19,74	0,10	223	0,0001	0,59
Liat 30-50	70,01-1,355MRVBF-0,000019FA-0,0157Elev-37,37CS	4,24	5	19,66	0,10	208	0,0003	0,48
Liat 50-100	70,46-1,540 MRVBF + 0,143LSF-6209,73KP + 3978,70KC-0,000033FA-122,045CS	-2,33	7	19,56	0,13	190	0,0003	0,48
Pasir 0-30	4,59 + 1,453MRVBF + 0,000023FA + 76,457CS	5,46	4	19,03	0,12	223	<0,0001	0,47
Pasir 30-50	38,33-1,575WI + 1,213MRVBF + 0,000029FA	5,25	4	17,41	0,14	207	<0,0001	0,40
Pasir 50-100	11,04 + 0,00027SP + 1,106MRRTF + 0,00003FA	10,90	4	19,93	0,12	194	<0,0001	0,33
Kej. basa 0-30	52,91 + 2,639MRVBF + 2,938MRRTF-0,0382Elev + 40,285CS	5,27	5	21,54	0,40	200	<0,0001	0,35
Kej. basa 30-50	56,41 + 2,184MRVBF + 3,036MRRT-0,0358Elev	4,11	4	23,99	0,36	180	<0,0001	0,14
Kej. basa 50-100	56,34 + 1,0897SG + 2,651MRVBF + 3,268MRRTF-0,056Elev	-3,29	5	22,97	0,41	169	<0,0001	0,22
KTK 0-30	37,20-0,797MRVBF + 0,00000021MCA-0,0082Elev-0,0119AZ	5,08	5	15,59	0,10	204	0,0005	0,21
KTK 30-50	63,68-0,00041SP-0,780MRVBF + 0,000000021MCA-5916,06KC-0,224FW-0,013AZ	6,47	7	15,69	0,14	186	<0,0001	0,27
KTK 50-100	62,70-0,00041SP-0,812MRVBF + 0,00000002MCA-4171,28KC-0,222FW-0,015AZ	3,46	7	15,48	0,14	167	0,0006	nd
BO 0-30	2,3 -0,126MRRTF + 0,0000015FA + 0,0034Elev-5,172CS	4,27	5	1,72	0,17	224	<0,0001	0,39
BO 30-50	1,42-0,074MRRTF + 0,003Elev-4,829CS	3,84	4	1,38	0,17	222	<0,0001	0,92
BO 50-100	0,89-0,042MRRTF-0,0065LSF + 0,002Elev	7,75	4	0,90	0,19	215	<0,0001	0,53
C org. 0-30	1,34-0,073MRRTF + 0,00000087FA + 0,0019Elev-3,001CS	4,24	5	0,10	0,17	224	<0,0001	0,39
C org. 30-50	0,82-0,043MRRTF + 0,0018Elev-2,800CS	3,82	4	0,80	0,17	222	<0,0001	0,92
C org. 50-100	0,30-0,0024ZC + 0,0532MRVBF -0,0507MRRTF + 0,00149Elev	5,00	5	0,52	0,20	215	<0,0001	0,54
Total N 0-30	0,23-0,00027ZC-0,0079MRRTF + 24,175KC-0,0009FW + 0,00000013FA + 0,0002Elev-0,238CS	9,93	8	0,08	0,28	224	<0,0001	0,48
Total N 30-50	0,17-0,00032ZC + 0,005MRVBF-0,0069MRRTF-0,00084FW + 0,00022Elev-0,1907CS	5,51	7	0,07	0,24	207	<0,0001	0,96
Total N 50-100	0,07-0,0011TPI + 0,0039MRVBF-0,0067MRRTF + 20,795KC + 0,00012Elev-0,1514CS	7,17	7	0,04	0,27	181	<0,0001	nd
pH 0-30	5,68 + 0,111MRRTF-0,00068Elev-0,0053CI	-2,23	4	0,98	0,15	207	<0,0001	0,38
pH 30-50	5,77 + 0,00027SL + 0,097MRRTF-0,001Elev + 1,4106CS	-4,72	5	0,90	0,15	185	<0,0001	nd
pH 50-100	5,94 + 0,089MRRTF-0,0014Elev + 2,1910CS	-9,76	4	0,92	0,14	172	<0,0001	nd
Retensi P 0-30	56,54-0,0009SP-55,719SG-16361,158KC	-5,53	5	17,11	0,38	25	0,0163	nd
Retensi P 30-50	-0,55-0,0013SP + 6,276MRRTF-0,5577CI	nd	4	21,99	0,24	21	0,1903	nd
Retensi P 50-100	-25,49-0,0017SP + 8,601MRRTF + 0,0108FPL-1,0951CI	nd	5	16,18	0,71	16	0,0053	nd

P = jumlah parameter dimana subset terbaik diperoleh jika nilai Cp mendekati P, N = jumlah contoh, RMSE = *root mean square error*, Anova = uji sidik ragam model, LOF = uji ketidaktepatan model

Tabel 6. Keragaman nilai T sebagai ukuran arti penting penaksir terhadap keragaman nilai taksiran

Table 6. The variation of T value as a measure for the significance of predictor to total variation of response

Respon	SP	SL	MrRTF	MrVBF	CS	CI	FW	FPL	FA	Elev	ZC	SG	MCA	LSF	KP	KC	AZ	TPI	WI
Kedalaman tanah (cm)	1,64	1,21	1,76		1,36	2,75													
Ketebalan hor. A (cm)				1,95	2,43		2,35			1,86									
Kedalaman hor. B (cm)			1,08							2,2	2,52	1,87	2,79						
Fraksi liat ₀₋₃₀ (%)				2,45	2,26				1,72	1,87									
Fraksi liat ₃₀₋₅₀ (%)				2,45	1,65				1,65	2,24									
Fraksi liat ₅₀₋₁₀₀ (%)				2,69	2,99				2,76					1,85	2,32	1,23			
Fraksi pasir ₀₋₃₀ (%)				2,91	4,32				2,22										
Fraksi pasir ₃₀₋₅₀ (%)				2,57					2,93										4,82
Fraksi pasir ₅₀₋₁₀₀ (%)	3,25		2,55						2,60										
Kej. basa ₀₋₃₀ (%)			4,81	3,31	1,59					4,31									
Kej. basa ₃₀₋₅₀ (%)			4,22	2,37						4,19									
Kej. basa ₅₀₋₁₀₀ (%)			3,99	2,84						5,44		1,92							
KTK ₀₋₃₀ (cmol kg ⁻¹)				1,78						1,64			3,53						1,25
KTK ₃₀₋₅₀ (cmol kg ⁻¹)	2,68			1,71			2,13						3,44			2,36			1,29
KTK ₅₀₋₁₀₀ (cmol kg ⁻¹)	2,63			1,73			1,99						3,26			1,65			1,40
BO tanah ₀₋₃₀ (%)			3,60		2,74				1,60	5,65									
BO tanah ₃₀₋₅₀ (%)			2,60		3,18					6,37									
BO tanah ₅₀₋₁₀₀ (%)			2,23							6,81				3,4					
C organik ₀₋₃₀ (%)			3,60		2,74				1,60	5,65									
C organik ₃₀₋₅₀ (%)			2,60		3,18					6,37									
C organik ₅₀₋₁₀₀ (%)			3,62	2,94						6,93	2,86								
Total N ₀₋₃₀ (%)			5,00		2,69		1,95		2,82	7,00	2,15								2,23
Total N ₃₀₋₅₀ (%)			3,67	2,05	2,31		1,90			7,31	2,74								
Total N ₅₀₋₁₀₀ (%)			5,58	2,47	3,00					6,37							2,77		2,31
pH ₀₋₃₀			5,26			2,03				2,47									
pH ₃₀₋₅₀	1,39		4,64		1,30					3,13									
pH ₅₀₋₁₀₀			3,97		1,97					3,93									
Retensi P ₀₋₃₀ (%)	1,64											3,09							2,14
Retensi P ₃₀₋₅₀ (%)	1,27		2,22		1,56														
Retensi P ₅₀₋₁₀₀ (%)	1,94		3,62		3,09		3,00												
Jumlah	8	1	20	15	16	4	5	1	9	20	4	3	4	2	1	6	2	1	1

Angka yang dipertebal menandakan nyata pada uji T pada taraf 0,01

Nilai T juga mengindikasikan frekwensi penaksir dalam pemodelan sifat tanah. Elevasi, MrRTF, CS, dan MrVBF adalah penaksir yang paling sering digunakan (digunakan untuk menaksir oleh 15-20 sifat tanah) dalam penelitian ini. Iklim mikro yang diwakili elevasi, tipe permukaan geomorfik (permukaan erosi atau permukaan deposisi) yang diwakili MrRTF dan MrVBF, serta kemiringan rata-rata *catchment* merupakan faktor pengendali keragaman sifat tanah tropika. Ketiga komponen ini

nampaknya mengendalikan kesetimbangan pedogenesis di Pulau Jawa.

Selain itu, akumulasi aliran (FA), kekuatan arus (SP), *contour curvature* (KC), dan lebar aliran (FW) digunakan oleh 5 sampai 10 model. Kelima kovariat ini mengkarakterisasi intensitas erosi tanah. Erosi merupakan faktor yang menentukan tingkat stabilitas perkembangan tanah, yang dipengaruhi dan dikondisikan oleh elevasi, MrRTF, CS, dan MrVBF.

Tabel 7. Keragaman nilai ME dan RMSE sebagai indikator daya taksir model

Table 7. The variation of mean error (ME) and root mean square error (RMSE) as an indicator for the predictive power of models

Respon	Jumlah contoh	ME	RMSE
Kedalaman tanah (cm)	76	-1,24	48,63
Ketebalan hor. A (cm)	76	-0,18	4,45
Kedalaman hor. B (cm)	70	1,20	9,70
Fraksi liat ₀₋₃₀ (%)	76	1,53	20,48
Fraksi liat ₃₀₋₅₀ (%)	72	3,41	19,24
Fraksi liat ₅₀₋₁₀₀ (%)	65	1,85	19,70
Fraksi pasir ₀₋₃₀ (%)	76	-2,88	16,71
Fraksi pasir ₃₀₋₅₀ (%)	71	-3,87	13,39
Fraksi pasir ₅₀₋₁₀₀ (%)	65	-4,51	18,84
C organik ₀₋₃₀ (%)	76	-0,019	1,27
C organik ₃₀₋₅₀ (%)	73	-0,019	0,59
C organik ₅₀₋₁₀₀ (%)	68	0,058	0,84
BO tanah ₀₋₃₀ (%)	76	-0,033	2,18
BO tanah ₃₀₋₅₀ (%)	73	-0,033	1,01
BO tanah ₅₀₋₁₀₀ (%)	68	0,156	1,45
Total N ₀₋₃₀ (%)	76	-0,005	0,085
Total N ₃₀₋₅₀ (%)	70	-0,007	0,048
Total N ₅₀₋₁₀₀ (%)	63	-0,007	0,037
pH ₀₋₃₀	68	0,019	0,99
pH ₃₀₋₅₀	63	0,105	0,99
pH ₅₀₋₁₀₀	55	0,079	1,05
Kej. basa ₀₋₃₀ (%)	62	1,81	22,35
Kej. basa ₃₀₋₅₀ (%)	58	2,85	28,05
Kej. basa ₅₀₋₁₀₀ (%)	52	3,93	27,96
KTK ₀₋₃₀ (cmol kg ⁻¹)	63	0,77	16,13
KTK ₃₀₋₅₀ (cmol kg ⁻¹)	60	2,52	20,39
KTK ₅₀₋₁₀₀ (cmol kg ⁻¹)	56	2,83	19,96

Validasi model

Pengujian model dilakukan untuk mengetahui galat taksiran dari model, sehingga daya taksir model bisa diketahui. Pengujian dilakukan dengan menggunakan model untuk menaksir suatu sifat tanah tertentu, kemudian membandingkan nilai hasil taksiran dengan nilai sebenarnya. Galat adalah istilah untuk menunjukkan selisih antara kedua nilai tersebut. Pada penelitian ini validasi dilakukan menggunakan validasi silang (*cross validation*) yaitu

menggunakan sebagian dataset sebagai dataset pengujian yang dipilih secara acak dari total dataset. Cara ini sering dilakukan dalam pemodelan tanah-lanskap karena pengadaan dataset baru memerlukan biaya yang relatif besar (Bishop and Minasny, 2006).

Hasil analisis galat pada pengujian model disajikan pada Tabel 7. Validasi tidak bisa dilakukan untuk model penaksir retensi P karena contoh yang sedikit (< 5 contoh). Nilai ME dan RMSE tergolong rendah dan dapat diterima. Contohnya, nilai ME yang rendah (< 5%) ditunjukkan oleh model penaksir persentasi pasir, persentasi liat dan bahan organik. Nilai ME yang rendah (< 5 cm) juga ditunjukkan oleh model penaksir kedalaman tanah, ketebalan horizon A, dan kedalaman ke horizon B. Hasil ini mengindikasikan bahwa suatu model regresi dapat menaksir secara sukses sifat tanah meskipun hanya mempunyai informasi tentang parameter topografi. Hasil ini juga menunjukkan bahwa model-model yang dikembangkan mempunyai daya taksir yang relatif tinggi. Namun demikian, hal ini hanya berlaku jika faktor pembentuk tanah lainnya cukup homogen.

Implikasi praktis

Hasil validasi mengindikasikan bahwa sifat tanah dapat ditaksir menggunakan model dengan penaksir berupa aneka parameter topografi. Ini bisa terjadi karena dataset menyebar pada kondisi litologi, umur, dan iklim yang relatif seragam. Nilai taksiran dan peta taksiran ini merupakan informasi awal yang berharga sebelum pengecekan lapangan dan pengambilan contoh dilakukan.

Model-model ini dapat membantu dalam pembuatan peta sifat-sifat tanah yang bersifat kontinyu. Saat ini sifat-sifat tanah disajikan dalam bentuk kategorik rendah, sedang atau tinggi atau dalam bentuk angka kisaran. Penyajian sifat tanah secara kontinyu lebih menguntungkan terutama bagi pemodelan lingkungan yang menghendaki data kuantitatif. Keperluan data sifat tanah kuantitatif ini diperkirakan akan semakin meningkat di masa mendatang. Pada saat itu, berbagai aplikasi sistem pakar dan berbagai sistem penunjang pengambilan

keputusan akan banyak dikembangkan khususnya di bidang ekologi, lingkungan dan pertanian. Penelitian inovatif untuk memperoleh kovariat baru dan eksplorasi teknik pemodelan juga akan semakin diperlukan di masa yang akan datang.

Penelitian ini menggunakan SRTM DEM yang beresolusi 90 meter dan memiliki akurasi vertikal 16 m dan horizontal 20 m. Namun, DEM yang resolusinya lebih rendah tersedia seperti ASTER DEM beresolusi 30 m dengan akurasi vertikal 7-50 m dan horizontal 7-50 m dan SPOT DEM beresolusi 30 m dengan akurasi vertikal 10 m dan horizontal 50 m. Berbeda dari SRTM DEM yang bisa diunduh secara gratis, DEM yang resolusi rendah ini relatif mahal (Nelson *et al.*, 2009). Pada dasarnya, kovariat yang digunakan dalam penelitian ini dapat diturunkan dari DEM tanpa memperhatikan resolusinya. Penelitian ke depan bisa diarahkan untuk mengkaji pengaruh resolusi DEM terhadap daya taksir model.

Selain itu, penelitian ini membahas pendekatan pemetaan tanah digital. Kelebihan pendekatan ini dibandingkan pendekatan konvensional adalah bahwa data nilai sifat tanah dan sebarannya dilengkapi oleh informasi reliabilitas dari nilai tersebut. Informasi ini bisa diperoleh melalui validasi model di lokasi yang baru antara lain melalui *groundcheck* di lapangan. Dengan demikian, tingkat penyimpangan data taksiran dari data pengamatan dapat diketahui.

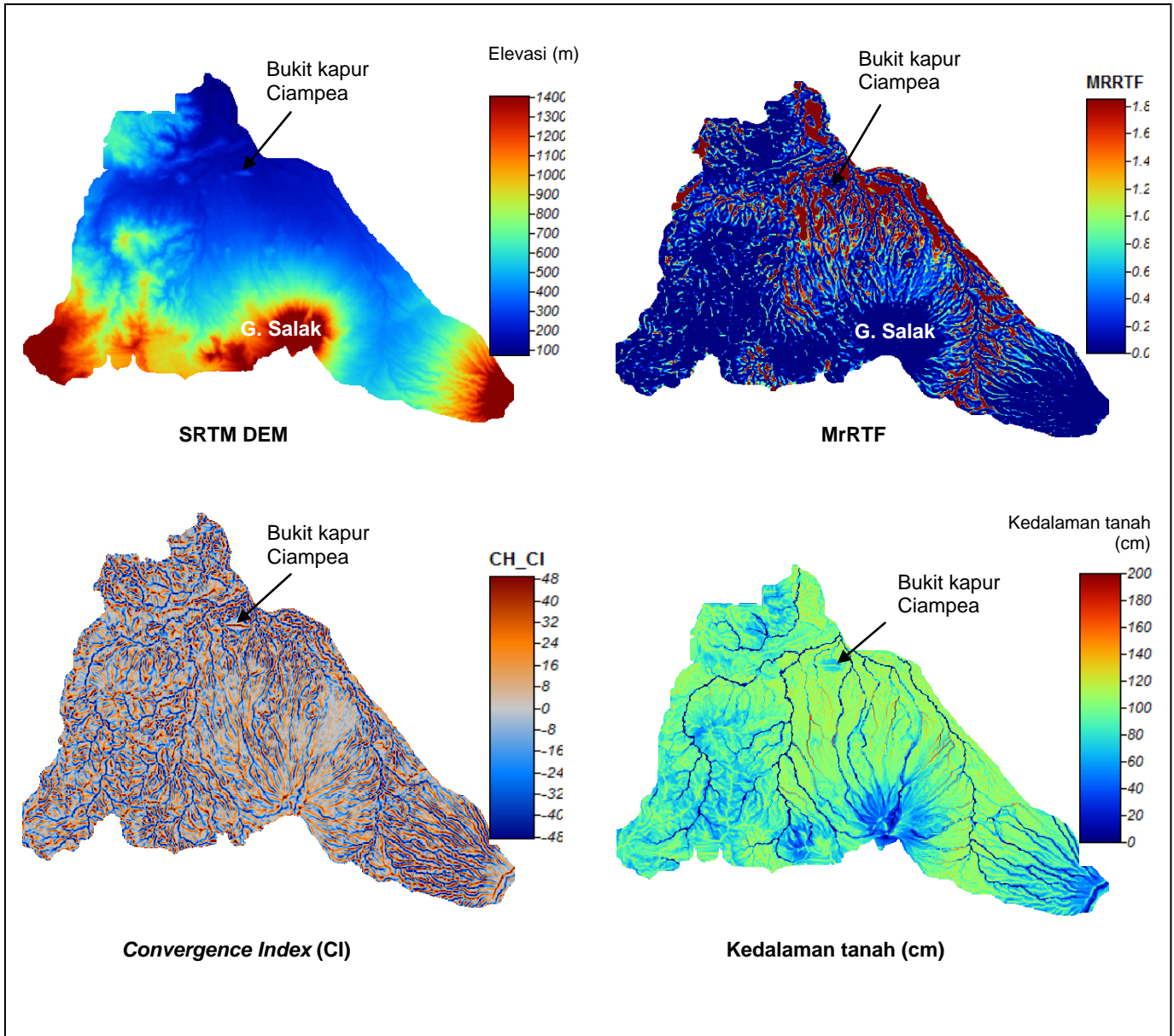
Informasi akurasi ini penting dalam berbagai aplikasi untuk memperkirakan resiko kesalahan yang akan diperoleh dari output yang dihasilkan.

Dalam kaitannya dengan teknologi pemetaan dan pengembangan data spasial, penelitian ini telah menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan data sifat tanah dapat ditaksir secara cepat. Bahkan beberapa kovariat bisa dipergunakan untuk menduga dan atau membantu deliniasi beberapa parameter lahan.

Indeks kebasahan (WI) bisa membantu dalam identifikasi drainase tanah; MrBVF bisa membantu dalam identifikasi areal pelembaran dan areal deposisional; kemiringan lereng (SG) dapat digunakan untuk membantu deliniasi bentuk wilayah; indeks posisi topografik dapat membantu dalam menentukan kelas landform. Jadi, teknologi yang digunakan dalam pemetaan ini dapat membantu mempercepat dan meningkatkan akurasi identifikasi parameter lahan yang biasa diidentifikasi oleh teknologi pemetaan saat ini. Selain itu, keragaman sifat tanah di lokasi survei yang akan dituju bisa diantisipasi lebih dini sehingga survei lapangan bisa lebih efisien dan lebih cepat.

Model yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat digunakan untuk menaksir sifat tanah di suatu wilayah. Gambar 3 menyajikan DEM, contoh kovariat dan peta kedalaman tanah sementara hasil taksiran model di daerah aliran sungai Cisadane bagian hulu. Pada MrRTF, daerah kemerahan adalah daerah lembah yang mengindikasikan daerah deposisional. Pada CI, warna kebiruan adalah daerah cekung yang menunjukkan daerah akumulasi (*convergence*) aliran.

Peta tanah taksiran menunjukkan bahwa kedalaman tanah antara 100 hingga 160 cm nampak mendominasi wilayah Ciomas, Ciampea dan Leuwiliang. Sementara itu, kedalaman tanah di sekitar puncak Gunung Salak berwarna kebiruan yang mengindikasikan kedalaman kurang dari 80 cm. Peta ini penting terutama untuk mendeteksi tingkat bahaya erosi di wilayah ini. Tingkat bahaya erosi ditetapkan berdasarkan data besaran erosi dan kedalaman tanah. Lebih jauh, validasi terhadap peta ini perlu dilakukan untuk menduga galat taksiran maupun untuk memperbaiki model yang digunakan.



Gambar 3. Contoh kovariat yang diturunkan dari DEM dan peta kedalaman tanah taksiran di DAS Cisadane Hulu

Figure 3. The example of covariates derived from DEM and provisional soil depth map in Cisadane Hulu watershed

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Peubah lingkungan yang dapat digunakan untuk menaksir sifat tanah di Jawa adalah kekuatan arus (SP), panjang lereng (SL), index kerataan puncak igir (MrRTF), indeks kerataan dasar lembah (MrVBF), kemiringan *catchment* rata-rata (CS), indeks konvergensi (CI), lebar aliran (FW), panjang jalur aliran (FPL), akumulasi aliran (FA), ketinggian tempat di atas permukaan laut (Elev), ketinggian tempat di atas saluran (ZC), kemiringan lereng (SG), luas *catchment* (MCA), Faktor LS (LSF), *profile curvature* (KP), *contour curvature* (KC), aspek lereng (AZ), indeks posisi topografi (TPI), dan indeks kebasahan (WI) dimana arti penting setiap kovariat itu berbeda-beda antara sifat tanah.
2. Tiga puluh model penaksir sifat tanah yang dikembangkan tergolong memuaskan berdasarkan hasil analisis ragam dan analisis *lack of fit*, kecuali model penaksir retensi P pada kedalaman 30-50 cm.
3. Hasil validasi mengindikasikan bahwa model dapat digunakan untuk menaksir sifat tanah menggunakan kovariat yang ada dengan galat yang masih bisa diterima.
4. Kovariat dan model tanah-lanskap memperkaya alat bantu untuk mempercepat pemetaan tanah baik dalam membantu delineasi kondisi lahan seperti relief dan drainase maupun dalam menduga keragaman sifat tanah di lapangan.
5. Sifat tanah hasil taksiran model yang disajikan secara kuantitatif menawarkan alternatif penyajian data yang diperlukan untuk pemodelan lingkungan dalam pengembangan data dan informasi spasial.

Saran

1. Perlu dilakukan pengujian model menggunakan DEM yang resolusinya lebih rendah dari SRTM DEM.

2. Perlu dievaluasi daya transport model pada wilayah dengan domain kovariat yang relatif sama.
3. Khusus untuk peta kedalaman tanah di DAS Cisadane Hulu, perlu dilakukan penelitian lapangan untuk melihat galat taksiran dari model yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari disertasi penulis pertama yang dibiayai oleh Badan Litbang Pertanian. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Muhrizal Sarwani, Kepala Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian atas izinnya untuk menggunakan data-data hasil survei tanah di Pulau Jawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Beckett, P.H.T. and R. Webster. 1971.** Soil variability: a review. *Soils and Fertilizers* 34: 1-15.
- Bendel, R.B. and A.A. Afifi. 1977.** Comparison of stopping rule in forward "stepwise" regression. *Journal of American Statistical Association* 77 (357):46-53.
- Bishop, T.F.A., A.B. McBratney, and G.M. Laslett. 1999.** Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma* 91:27-45.
- Bishop, T.F.A. and B. Minasny. 2006.** Digital soil-terrain modelling: the predictive potential and uncertainty. Pp.185-214. *In* S. Grudwald (Ed.) *Environmental Soil-Landscape Modelling: Geographic Information Technologies and Pedometrics*. Boca Raton: CRC Press.
- Bui, E. 2007.** A review of digital soil mapping in Australia. *In* P. Lagacherie, A.B. McBratney, and M. Voltz (Eds.) *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science*, 31:25-37. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Chen, J., J.W. Hopmans, and M.E. Grismer. 1999.** Parameter estimation of two fluid capillary

pressure-saturation and permeability functions. *Adv. Water Resour.* 22:479-493.

- Cole, N.J. and J.L. Boettinger. 2007.** Pedogenic understanding raster classification methodology for mapping soils, Powder River Basin, Wyoming, USA. *In* P. Lagacherie, A.B. McBratney, and M. Voltz (Eds.) *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science* 31:377-389. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Erh, K.T. 1972.** Application of the spline function to soil science. *Soil Science* 114(5):333-338.
- Gallant, J.C. and T.I. Dowling. 2003.** A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resour. Res.* 39(12):1347. doi:10.1029/2002WR001426.
- Gruber, S. and S. Peckham. 2009.** Land-surface parameters and objects in hydrology. *In* T. Hengl and H.I. Reuter (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33:171-194. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Grunwald, S. 2010.** Current state of digital soil mapping and what is next. *In* J.L. Boettinger *et al.* (Eds.) *Digital Soil Mapping*. *Progress in Soil Science* 2:3-12. Springer Science + Business Media B.V.
- Hastie, T., R. Tibshirani, and J. Friedman. 2009.** *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Second Edition. New York: Springer.
- Hijmans, R.J., I.M. Guiking-Lens, and C.A. van Diepen. 1994.** WOFOST 6.0: User's Guide for the WOFOST 6.0 Crop Growth Simulation Model. Technical Document 12. ISSN 0928-0944.
- Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, and E. Guevara. 2008.** Hole-filled SRTM for globe version 4. Available from CGIAR-CSI SRTM 90 m Database (<http://srtm.sci.cgiar.org>).
- Jenness, J. 2006.** Topographic position index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
- Jenny, H. 1941.** *Factors of Soil Formation: a system of quantitative pedology*. New York: McGraw-Hill Co.
- Lagacherie, P. and A.B. McBratney. 2007.** Spatial soil information systems and spatial. *In* P. Lagacherie P, A.B. McBratney, and M. Voltz (Eds.) *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science* 31:3-22. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Lagacherie, P. 2008.** Digital soil mapping: a state of the art. *In* A.E. Hartemink *et al.* (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Science + Business Media B.V. pp 3-14.
- Lindert, P.H. 2000.** *Shifting Ground, The Changing Agricultural Soils of China and Indonesia*. MIT Press, Cambridge.
- Mallows, C.L. 1973.** Some comments on Cp. *Technometrics* 15:661-675.
- McBratney, A.B., M.L. Mendonca-Santos, and B. Minasny. 2003.** On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52.
- Minasny, B., A.B. McBratney, and F. Carré. 2008.** Digital soil mapping. Pp. 1-5. *In* R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* 1. London: Taylor & Francis.
- Minasny, B., Y. Sulaeman, and A.B. McBratney. 2011.** Is soil carbon disappearing? The dynamics of soil organic carbon in Java. *Global Change Biology* 17(5):1917-1924.
- Minasny, B, A.B. McBratney, B. Malone, and Y. Sulaeman. 2010.** Digital Mapping of Soil Carbon. 19th World Congress of Soil Science, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Nelson, A., H.I. Reuter, and P. Gessler. 2009.** DEM production methods and sources. *In* T. Hengl and H.I. Reuter (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Olaya, V. and O. Conrad. 2009.** Geomorphometry in SAGA. *In* Hengl H., Hanes I., Reuter (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33:293-308. Amsterdam: Elsevier B.V.
- Olaya, V. 2009.** Basic land-surface parameters. *In* T. Hengl and H.I. Reuter (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33:141-169. Amsterdam: Elsevier B.V.

- Olaya, V. 2004.** A gentle introduction to SAGA GIS. The SAGA User Group e.V., Gottingen, Germany. P 208.
- Parton, W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole, and D.S. Ojima. 1987.** Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-1179.
- Pasaribu, A. 1983.** Pengantar Statistik. Jakarta. Ghalia Indonesia.
- Ponce-Hernandez, R., F.H.C Marriott, and H.T. Beckett. 1986.** An improved method for reconstructing a soil profil from analyses of a small number of samples. *Journal of Soil Science* 37:455-467.
- SAS Institute Inc. 2010.** Using JMP 9. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sulaeman, Y., B. Minasny, and A.B. McBratney. 2010.** Monitoring spatio-temporal changes of soil carbon in Java using legacy soil data. Pp 103-113. *In Proc. of Int. Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Countries.* Bogor, Indonesia, September 28-29, 2010.
- Sulaeman, Y. and B. Minasny. 2010.** Using legacy data to detect spatio-temporal changes of soil carbon in Indonesia. 4th Global Workshop on Digital Soil Mapping. Rome, May 24-26, 2010.
- Tsai, C.C., Z.S. Chen, C.T. Duh, and F.W. Horng. 2001.** Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: a case study on forest soils in Southern Taiwan. *In Proc. Natl. Sci. Council. ROC(B)* 25(1):34-39.
- Wilding, L.P. and L.R. Dress. 1983.** Spatial variability and pedology. Pp. 83-116. *In L.P. Wilding, N.E. Smeck, and G.F. Hall (Eds.) Pedogenesis and Soil Taxonomy I: Concepts and Interaction.* Amsterdam: Elsevier.