

Membuat Peta Tanah dengan Teknik Disagregasi Spasial

Creating Soil Maps Using Spatial Disaggregation Techniques

Yiyi Sulaeman*, Husnain

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Jalan Tentara Pelajar No. 12, Cimanggu, Bogor 16124, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail: yiyisulaeman@pertanian.go.id

Diterima 16 April 2020, Direview 19 Mei 2020, Disetujui dimuat 10 Agustus 2021, Direview oleh Kusumo Nugroho dan M Hikmat

Abstrak. Peta tanah merupakan informasi spasial dasar untuk perencanaan dan praktek pengelolaan lahan dan lingkungan. Informasi spasial tanah yang detail, terkini, dan kontekstual diperlukan dalam waktu yang tepat yang dapat disediakan melalui penerapan pendekatan *digital soil mapping* (DSM) berdasarkan data tanah warisan. Pemanfaatan teknologi DSM perlu disesuaikan dengan kondisi infrastruktur data setempat. DSM merupakan sub disiplin ilmu tanah yang paling aktif menghasilkan produk riset. Salah satu teknik DSM yang diterapkan di berbagai tempat adalah teknik Disagregasi Spasial. Tulisan ini membahas tentang teknik disagregasi spasial untuk membuat peta tanah dan mengevaluasi tantangan penerapannya di Indonesia. Teknik ini bekerja di wilayah yang mempunyai peta tanah baik meliputi seluruh wilayah atau sebagiannya dan memisahkan sub-sub poligon suatu satuan peta tanah menjadi bagian-bagian yang lebih detail. Aneka algoritma disagregasi spasial sudah banyak dikembangkan dan digunakan di Indonesia khususnya untuk pendetilan, penyelerasan batas, dan pembuatan peta di wilayah baru menggunakan hubungan tanah-lanskap dari wilayah lain. Aneka alat bantu yang dikembangkan dapat mempercepat dan mempermudah implementasi disagregasi spasial di lapangan. Kasus-kasus terpilih juga disajikan dan didiskusikan. Dengan meningkatkan kapasitas dan penelitian, implementasi teknik ini akan menyediakan algoritma yang lebih jitu yang pada saat bersamaan menambah informasi spasial tanah.

Kata kunci: Digital soil mapping / Disagregasi spasial / Peta tanah

Abstract. Soil map is a basic spatial information for planning and practicing land and environment management. Detailed, up-to-date and contextual spatial soil information is rapidly required and provided by implementing digital soil mapping (DSM) based on soil legacy data. The implementation of DSM technologies should be tailored to local data infrastructure. DSM is a subdiscipline of soil sciences that actively results in research products. One of DSM technologies is spatial disaggregation. This paper aims to discuss the spatial disaggregation to create soil map and to assess challenges in implementing this technique in Indonesia. This technique works in the regions having soil maps either fully or partially covered. The technique segregates sub-sub polygons of a soil mapping unit into more detail polygons. Various algorithms have been being developed and can be potentially implemented in Indonesia especially for creating more detail maps based on information in the existing map, edge matching, and creating new map in other area within location of study. Various developed tools can accelerate and simplify the implementation of spatial disaggregation in the field. Selected cases are presented and discussed. By building capacity and conducting research, the implementation of spatial disaggregation technique will provide robust algorithms and enrich spatial information in the respective regions.

Key words: Digital soil mapping / Spatial disaggregation / Soil map

PENDAHULUAN

Peta tanah adalah suatu sajian grafis untuk mengantarkan informasi tentang sebaran spasial dari atribut tanah kepada pengguna. Peta tanah di Indonesia sudah dihasilkan sejak tahun 1900 di tanah Deli Sumatera Bagian Utara oleh van Biljert (Sukarman *et al.* 2013). Atribut tanah dapat berupa nama tanah menurut klasifikasi tertentu, karakteristik fisika, kimia, mineralogi, dan biologi

tanah, dan kualitas tanah serta ancaman-ancaman terhadap keberadaan tanah. Peta tanah menyajikan sejumlah kurva poligon berwarna dan sejumlah simbol-simbol, yang seringkali dilengkapi oleh sebaran spasial jaringan jalan, jaringan hidrologi, dan nama-nama suatu wilayah. Keterangan dari warna poligon dan simbol disajikan di bagian legenda peta. Pada peta tanah yang diterbitkan oleh Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDL), setiap simbol menjelaskan tipe landform,

bahan induk, bentuk wilayah dan kelas kemiringan lereng, jenis tanah dan proporsinya serta luasan total dan proporsinya terhadap seluruh wilayah yang dipetakan (Wahyunto *et al.* 2016).

Peta tanah merupakan salah satu produk dari suatu kegiatan survei dan pemetaan tanah yang pelaksanaannya memerlukan banyak waktu dan tenaga. Pemetaan tanah secara harfiah adalah proses pembuatan peta, termasuk survei tanah merupakan salah satu bagian penting di dalamnya. Survei tanah memiliki kegiatan-kegiatan yang khas dibandingkan dengan survei-survei tematik lain, seperti: survei sosial ekonomi, survei topografi, atau survei tutupan lahan. Survei tanah ini dilakukan oleh suatu tim berkemampuan khusus yang disebut tim surveyor tanah. Tahapan-tahapan kegiatan ini dijelaskan dalam buku pedoman survei dan pemetaan tanah seperti yang disusun oleh Puslittanak (1994); Hikmatullah *et al.* (2014); Wahyunto *et al.* (2016) dan buku-buku teks seperti yang ditulis oleh Dent dan Young (1981) dan Hardjowigeno (1995).

Tim surveyor tanah mengunjungi lapangan untuk melakukan deskripsi dan mencatat kenampakan-kenampakan yang terdapat dalam penampang profil tanah per lapisan/horizon. Prosedur dan teknik pengamatan tanah mengikuti standar seperti yang dijelaskan oleh FAO (2006) dan Sukarman *et al.* (2017). Tim juga mencatat kondisi permukaan di sekitar profil tanah tersebut, seperti: kemiringan lereng, penggunaan lahan, tipe vegetasi, dan lain-lain. Selanjutnya, contoh tanah diambil untuk dianalisis di laboratorium guna mengetahui kandungan unsur-unsur dalam tanah tersebut, seperti: kandungan karbon, total nitrogen, pH, dan untuk klasifikasi (memberi nama tanah). Dalam survei tanah, seorang surveyor tidak sembarang menetapkan lokasi pengamatan kecuali setelah mempertimbangkan keragaman lingkungannya. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa lokasi pengamatan cukup mewakili keragaman wilayah. Jadi, survei tanah bukan mengambil contoh tanah, tetapi melakukan serangkaian kegiatan yang memerlukan keahlian khusus.

Kegiatan survei dan pemetaan tanah telah memberikan kontribusi yang besar terhadap pembangunan pertanian melalui penyediaan peta tanah sebagai informasi dasar bagi perencanaan pemanfaatan dan pengelolaan lahan. Sementara itu, teknologi informasi dan pemrosesan data juga berkembang secara revolusioner, yang pada akhirnya bersentuhan dengan

kegiatan survei dan pemetaan tanah. Kegiatan survei dan pemetaan tanah memerlukan proses dan penanganan data yang banyak secara lebih cepat. Persentuhan ini merupakan langkah awal untuk mengintegrasikan teknologi-teknologi di luar ilmu tanah untuk optimasi dan percepatan kegiatan pemetaan tanah.

Pemetaan tanah digital atau *digital soil mapping* (DSM) merupakan suatu paradigma baru dalam kegiatan pemetaan tanah dimana teknologi informasi dan pemrosesan data diintegrasikan. DSM menyediakan teknik-teknik pemetaan yang aplikasinya ditentukan oleh data yang tersedia, terutama peta tanah dan titik-titik pengamatan. Dalam DSM, salah satu teknik yang jitu untuk membuat peta tanah adalah teknik disagregasi spasial (*spatial disaggregation*) yang dapat diterapkan untuk mendetilkkan peta tanah di suatu wilayah dari peta tanah yang tersedia, baik dilengkapi oleh titik pengamatan maupun tidak. Penerapan teknik ini di suatu wilayah memerlukan pengetahuan tentang kondisi data untuk memilih prosedur dan algoritma pemodelan yang akan digunakan. Namun, aplikasi teknik ini masih jarang di Indonesia.

Tulisan ini membahas disagregasi spasial, sebagai suatu teknik DSM, dimulai dengan uraian tentang konsep dasar disagregasi spasial, dilanjutkan dengan bagian penting yaitu ragam teknik yang digunakan serta manfaat dan penggunaan ke depan. Tulisan ini diharapkan dapat menginspirasi para peneliti di tanah air untuk menggunakan kemajuan teknologi sesuai dengan keperluan dan bidang penelitiannya.

KONSEP DASAR DSM

Digital soil mapping didefinisikan sebagai “the creation and population of spatial soil information systems by the use of field and laboratory observational methods coupled with spatial and non-spatial soil inference systems” (Lagacherie dan McBratney 2007). Sementara, Minasny dan McBratney (2015) menjelaskan bahwa DSM meliputi tiga komponen yang saling berhubungan, yaitu: input, proses, dan output.

Komponen input ini berbentuk metode-metode pengamatan lapangan dan laboratorium, termasuk penggunaan data pengamatan tanah warisan atau peta tanah warisan, dan pengambilan contoh-contoh tanah yang baru menggunakan teknik sampling statistika. Komponen Input ini bisa berupa data historis atau data

baru, baik data tanah (peta tanah, karakter tanah) atau data lingkungan yang mewakili factor pembentuk tanah (Jenny 1941), yaitu: iklim, relief, bahan induk, organisme, dan umur.

Data-data yang telah tersusun dalam suatu basisdata spasial yang baik sangat mendukung penyediaan input yang baik untuk aplikasi DSM. Jika basisdata ini belum tersedia, proses penyiapan data input ini biasanya memerlukan waktu dan tenaga yang banyak terutama untuk standarisasi dan harmonisasi data dan informasi. Sulaeman *et al.* (2013) menjelaskan lima tahapan dalam penyiapan input untuk DSM, yaitu: identifikasi dan pengumpulan data yang tersedia, pemilihan data, pembuatan basisdata dan pengkayaannya, harmonisasi dan penyajian data, serta integrasi data.

Komponen proses merupakan inti dari DSM ini. Proses ini menghubungkan input ke sistem inferensi dan menghasilkan output. Keberadaan sistem inferensi ini adalah kunci utama karena di dalamnya meliputi: pengembangan model-model yang dibedakan atas pembuatan, validasi dan uji daya transfer untuk menyusun suatu basis model. Sistem inferensi dapat berupa sistem inferensi spasial maupun sistem inferensi non spasial. Model-model statistika dan matematika yang menghubungkan target sifat tanah dengan faktor penduga yang mewakili SCORPAN sebagai singkatan dari *Soil, Climate, Organisme, Relief, Parent material, Age, dan Location*. Komponen output dalam bentuk sistem informasi tanah spasial, termasuk dalam bentuk peta berbasis raster-raster yang menyajikan nilai taksiran dan nilai ketidakpastian penaksiran. Output ini dapat diperbaharui jika informasi baru tersedia.

Selembarnya peta yang dipindai (*discan*) bukan tergolong peta digital. Dalam DSM itu bukan peta digital karena tidak dapat dijelaskan inputnya dan prosesnya. DSM tidak sama dengan digitalisasi peta hardcopy menjadi *softcopy* dalam format elektronik yang disajikan dalam format raster atau digitasi peta *hardcopy* menjadi *softcopy* dalam format *vector*. Untuk dinyatakan sebagai peta digital dalam sistem DSM, maka harus diidentifikasi input dan sistem inferensi yang digunakan. Konversi format melalui pemindaian (*scanning*) dan digitasi (*digitizing*) merupakan salah satu kegiatan komponen input dalam DSM.

Komponen legenda peta yang kemudian dibuat petanya juga bukan termasuk dipetakan termasuk digital. Misalkan peta tanah mempunyai informasi dari legenda, nama tanah, relief dan bahan induk.

Kemudian dari peta tanah itu dibuat menjadi peta bahan induk. Pembuatan peta ini bukan pendekatan DSM melainkan hanya operasi basis data spasial biasa. Tidak ada komponen proses yang melibatkan sistem inferensi dan komponen input dalam pendekatan ini.

Sistem inferensi tanah adalah suatu sistem yang mampu menaksir sifat-sifat tanah dari parameter yang mewakili SCORPAN (*Soil, Climate, Organisme, Relief, Parent material, Age, Space*) seperti dijelaskan oleh McBratney *et al.* (2003), menggunakan aneka model (yakni model persamaan matematik, model pohon, atau model aturan *if-then-else*) baik model spasial (seperti model tanah-lanskap) maupun non-spasial (seperti fungsi pedotransfer).

Scull *et al.* (2003) menyatakan empat pilar dalam aplikasi DSM, yaitu: (i) model data geografis dari keragaman tanah dan pemetaan tanah, (ii) data *digital terrain model (DTM)*, yang dikuantifikasi dengan analisis terrain, (iii) data penginderaan jauh, dan (iv) Logika fuzzy-konsep kebenaran sebagian (*partial truth*) sebagai logika *Boolean*. Dari keempat ini, yang terakhir masuk ke dalam komponen proses dan sisanya termasuk komponen input.

Bui (2007) menjelaskan tiga prasyarat agar teknologi DSM dapat diterapkan dalam program survei tanah, yaitu: (i) adanya tim survei yang mempunyai kemampuan-kemampuan yang baru, seperti piawai mengoperasikan perangkat sistem informasi geografis (SIG) dan lain-lain; (ii) tersedianya perangkat lunak dan perangkat keras yang relatif mahal karena spesifikasi khusus seperti *Random Acces Memory (RAM)* yang tinggi, display yang cukup dan kapasitas penyimpanan data yang tinggi, serta (iii) adanya pergeseran paradigma ke konsep dan prinsip DSM.

Sementara itu, penerapan teknologi DSM dapat berjalan secara efektif dan efisien jika kondisi lingkungan terpenuhi, meliputi: (i) adanya SIG, (ii) adanya sistem analisis spasial untuk menurunkan data guna menduga faktor-faktor pembentukan tanah, (iii) adanya basisdata relasional untuk mengelola data, dan (iv) adanya metode berbasis komputer untuk menaksir sebaran tanah pada suatu lanskap (seperti: geostatistik, *Artificial Neural Network, Rule Induction*, dan sebagainya).

Minasny dan McBratney (2016) menyatakan bahwa DSM adalah suatu subdisiplin ilmu tanah yang aktif menghasilkan output riset. Mereka menjelaskan 6 faktor pendorongnya, yaitu: (i) meningkatnya ketersediaan data spasial (seperti *digital elevation model*

(DEM) dan citra satelit), (ii) tersedianya perangkat dengan kemampuan komputasi yang canggih untuk pemrosesan data, (iii) adanya pengembangan *tool* (alat bantu) untuk melakukan *data mining* dan aneka operasi dalam lingkungan SIG, (iv) tersedianya aneka aplikasi selain geostatistika, (v) meningkatnya permintaan global tentang data spasial termasuk penilaian ketidakpastiannya, dan, (vi) terjadinya peremajaan banyak pusat universitas dan pusat survei tanah yang membantu dalam menyebarluaskan teknologi dan pengetahuan tentang DSM.

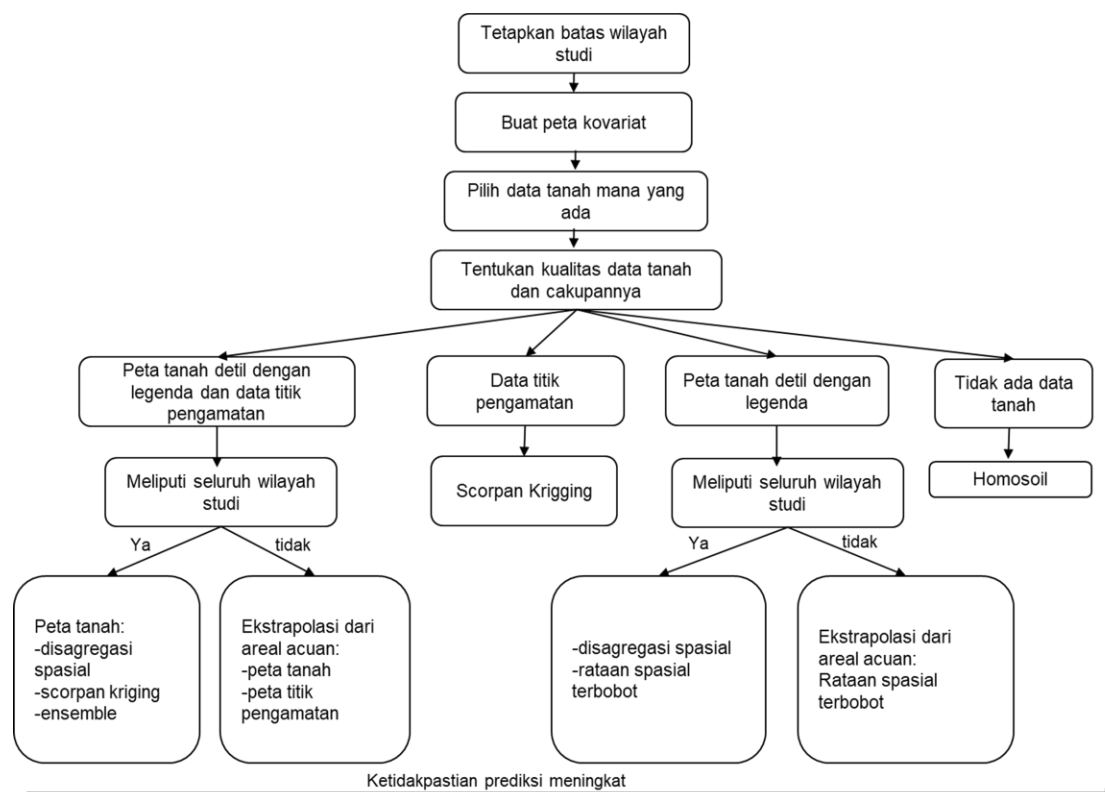
DSM menawarkan metode pemetaan yang disesuaikan dengan ketersediaan data peta, dan atau data titik pengamatan. Gambar 1 menunjukkan pohon pengambilan keputusan pemilihan metode tersebut. Disagregasi spasial merupakan metode DSM yang bisa dipergunakan jika peta tanah, legenda, dan atau titik pengamatan tanah tersedia.

KONSEP DASAR DISAGREGASI SPASIAL

Disagregasi spasial adalah teknik pembuatan suatu peta dari peta yang tersedia dengan cara

memposisikan kembali komponen-komponen peta dari satuan-satuan peta tersebut. Peta sumber bisa mempunyai skala yang lebih kecil atau sama dengan skala peta yang dihasilkan. Misalnya, kalau peta yang dihasilkan adalah peta 1:50.000, peta sumber bisa mempunyai skala 1:250.000, skala 1:100.000 atau skala 1:50.000. Istilah lain untuk disagregasi spasial ini sebagai disagregasi poligon.

Aplikasi disagregasi spasial bekerja dengan peta, dimana peta sendiri merupakan perwujudan model mental surveyor tanah tentang hubungan tanah-lanskap, yang dikembangkan oleh surveyor tersebut selama kegiatan survei dan pemetaan tanah. Pada saat melaksanakan kegiatan pemetaan, surveyor mempelajari jenis dan sebaran masing-masing komponen lanskap. Yang biasa dipelajari adalah tipe batuan dan sebarannya serta bentuk wilayah dan kemiringan lereng dan distribusinya, dan informasi curah hujan di daerah yang dipetakan. Kemudian, saat ke lapangan surveyor mengamati tanah dan verifikasi kebenaran dari lingkungan itu. Pengamatan dilakukan di beberapa tempat sehingga diperoleh pengetahuan hubungan antara tanah dengan komponen lanskap



Gambar 1. Pohon keputusan untuk memilih metode DSM. Sumber: Minasny dan McBratney (2010)

Figure 1. Decision tree to select DSM method. Source: Minasny and McBratney (2010)

tersebut. Pengetahuan itu disebut model mental dari hubungan tanah lanskap.

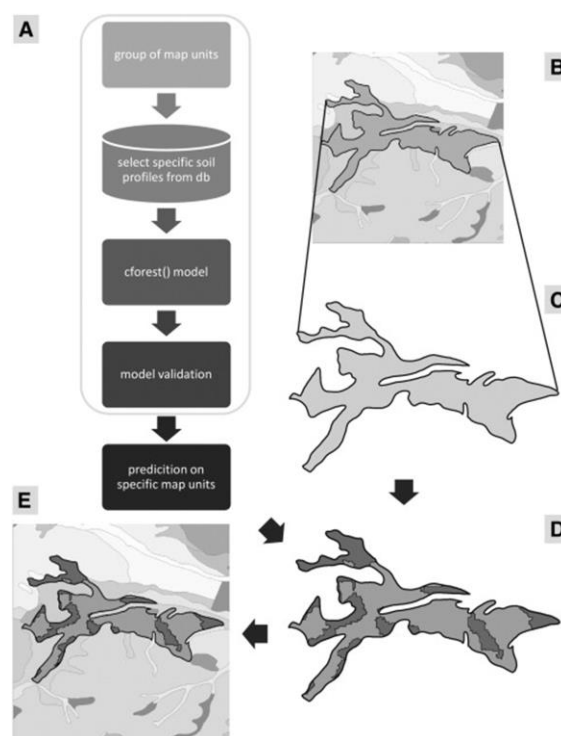
Model ini selanjutnya digunakan untuk menyatakan tentang kelas-kelas tanah dan sebaran spasialnya (Hewit 1993). Kelas tanah disini dapat berupa tingkat kategori dari suatu sistem klasifikasi tanah. Di Indonesia, sistem taksonomi tanah digunakan sejak 1983 dan sistem klasifikasi nasional digunakan kembali mulai 2016. Pada peta tinjau level grup digunakan sedangkan pada peta tanah semi detil level subgroup digunakan.

Seperti dijelaskan Hudson (1992), model tanah-lanskap merupakan paradigma operasional untuk survei tanah. Uraian satuan peta tanah menjelaskan, dalam kata-kata, hubungan-hubungan tanah-lanskap. Kadang-kadang, model tanah-lanskap untuk setiap satuan peta disajikan dalam blok diagram 3 dimensi, seperti pada Booklet Peta *Land Resource Evaluation Project Part 1* (LREP 1) di Sumatera atau Peta Tanah Tinjau di Kalimantan Selatan. Deskripsi satuan peta tanah dan blok diagram merupakan suatu pemberitahuan model mental surveyor tentang sebaran jenis tanah kepada orang lain. Gambar 2 menyajikan contoh diagram alur implementasi teknik disagregasi spasial.

Disagregasi spasial telah banyak diaplikasikan di berbagai daerah. Pembelajaran dari penerapan ini dapat menjadi pertimbangan dalam penerapan teknologi ini di Indonesia. Tabel 1 menunjukan penelitian dan publikasi tentang aplikasi teknik disagregasi spasial. Bui dan Moran (2001) menggunakan teknik ini untuk membuat peta tanah dari skala yang lebih kecil di lanskap Australia. Kebutuhan informasi tanah yang lebih besar diperlukan namun upaya untuk membuat peta tanah baru terbatas waktu. Nauman dan Thomson (2014) menyatakan bahwa teknik ini diperlukan ketika: peta tanah tua tersedia tetapi informasi tanah yang lebih detil diperlukan, dan sedikit pengamatan untuk membuat interpolasi dengan teknik geostatistika.

APLIKASI TEKNIK DISAGREGASI SPASIAL

Disagregasi spasial diterapkan menggunakan salah satu dari dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah pendekatan penyederhanaan (*de-convolution*) paradigma tanah-lanskap yang dijelaskan selama survei tanah.



Gambar 2. Diagram alur dan ilustrasi implementasi disagregasi spasial (Sumber: Häring *et al.* 2012)

Figure 2. Flow diagram and illustration of implementing spatial disaggregation (Source: Häring *et al.* 2012)

Table 1. Daftar artikel ilmiah yang berkaitan dengan aplikasi disagregasi spasial periode 2000-2020 yang diperoleh dari google scholar

Table 1. List of scientific articles related to spatial disaggregation in 2000-2020 from google scholar

No	Judul	Tahun	Wilayah	Input peta tanah	Teknik	Acuan
1.	Improved disaggregation of conventional soil maps	2019	Denmark (43.000 km ²)	1:1.000.000, 1:2.000.000	Decision tree: DSMART, Random Forest	Møller <i>et al.</i> (2019)
2.	Disaggregation of conventional soil map by generating multi realizations of soil class distribution (case study: Saadat Shahr plain, Iran)	2019	Fars, Iran (16.500 ha)	n.d	DSMART	Jamshidi <i>et al.</i> (2019)
3.	Disaggregating and updating a legacy soil map using DSMART, fuzzy c-means and k-means clustering algorithms in Central Iran	2019	Iran	n.d	DSMART, fuzzy c-means and k-means clustering	Zeraatpisheh <i>et al.</i> (2019)
4.	Comparing algorithms to disaggregate complex soil polygons in contrasting environments	2019	South Africa KwaZulu-Natal Province, Eastern Cape Province	n.d	n.d	Flynn <i>et al.</i> (2019)
5.	Individualization of soil classes by disaggregation of physiographic map polygons	2019	Santa Catarina, Brazil, (27,7 km ²)	1:25.000	disaggregation rules based on formal knowledge about soil-landscape relationships	Costa <i>et al.</i> (2019)
6.	Spatial disaggregation of complex Soil Map Units at the regional scale based on soil-landscape relationships	2018	Britany, France (27.376 km ²)	1:250.000	decision-tree, expert knowledge, DSMART	Vincent <i>et al.</i> (2018)
7.	Spatial disaggregation of multi-component soil map units using legacy data and a tree-based algorithm in Southern Brazil	2018	Rio Grande do Sul, Brazil (49.668 ha)	1:50.000	Soil-landscape rule	Machado <i>et al.</i> (2018)
8.	Disaggregation of legacy soil maps to produce a digital soil attribute map for the Okanagan Basin, British Columbia, Canada	2016	British Columbia, Kanada (8.000 km ²)	1: 20.000-1:126.720	Fuzzy membership	Smith <i>et al.</i> (2016)
9.	Soil polygon disaggregation through similarity-based prediction with legacy pedons	2016	Manitoba, Kanada (70.000 km ²)	1:1.000.000.	Similarity-based method	Liu <i>et al.</i> (2016)
10.	Derivation of soil-attribute estimations from legacy soil maps	2015	Western Australia, South Australia	1:20.000–1:150.000; 1:250.000–1:500.000; 1:3.000.000; 1:50.000-1:100.000	DSMART	Odgers <i>et al.</i> (2015)
11.	Large-area spatial disaggregation of a mosaic of conventional soil maps: evaluation over Western Australia	2015	Western Australia, Australia (2.500.000 km ²)	1:20.000-1:150.000; 1:250.000-1:500.000; 1:2.000.000	DSMART	Holmes <i>et al.</i> (2015)
12.	Disaggregation of component soil series on an Ohio Country soil survey map using possibilistic decision trees	2014	USA (117.419 ha)	1:250.000	C4.5 decision trees, decision trees and clustering	Subburayalu <i>et al.</i> (2014)
13.	Semi-automated disaggregation of conventional soil mapping using knowledge driven data mining and classification trees	2014	West Virginia, USA (3.877 km ²)	1:250.000	Expert knowledge, classification tree	Nauman dan Thompson (2014)
14.	Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees	2014	Quensland, Australia (68.000 km ²)	1:250,000	DSMART	Odgers <i>et al.</i> (2014)
15.	Semi-automated disaggregation of a conventional soil map using knowledge driven data mining and random forests in the Sonoran Desert, USA	2014	Arizona, USA	1:250.000	Decision tree	Nauman <i>et al.</i> (2014)

Table 1. (Lanjutan)

Table 1. (Continued)

No	Judul	Tahun	Wilayah	Input peta tanah	Teknik	Acuan
16.	Spatial disaggregation of soil map polygons to estimate continuous soil property values at a resolution of 90 m for a pilot study area in Manitoba, Canada	2014	Manitoba, Kanada	1:20.000-1:40.000	Expert knowledge, heuristic rule	Lelyk <i>et al.</i> (2014)
17.	Spatial disaggregation of conventional soil mapping across Western Australia using DSMART	2014	Western Australia, Australia (2.500.000 km ²)	1:20.000-1:3.000.000	DSMART C 4.5	Holmes <i>et al.</i> (2014)
18.	Disaggregation of land types using terrain analysis, expert knowledge and GIS methods	2013	South Africa (6.865 ha)	n.d	Decision rule	van Zijl <i>et al.</i> (2013)
19.	Soil series mapping by knowledge discovery from an Ohio county soil map	2013	Ohio, USA	1:250.000	Random Forest	Subburayalu dan Slater (2013)
20.	Use of weights of evidence statistics to define inference rules to disaggregate soil survey maps	2012	British Columbia, Kanada	1:50.000, 1:125.000	Fuzzy membership	Smith <i>et al.</i> (2012)
21.	Fuzzy disaggregation of conventional soil maps using database knowledge extraction to produce soil property maps	2012	West Virginia, USA (388.000 ha)	1:250.000	Fuzzy membership	Nauman <i>et al.</i> (2012)
22.	Spatial disaggregation of complex soil map units: a decision-tree based approach in Bavarian forest soils	2012	Bavarian, Germany	1:250.000	Decision tree, random forest	Häring <i>et al.</i> (2012)
23.	Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale	2012	Northern Ireland	1:250.000	AtoP kriging	Kerry <i>et al.</i> (2012)
24.	Disaggregation of landform components within land systems of the Victorian Mallee using a Digital Elevation Model	2010	Victoria, Australia	1:250.000	Expert knowledge, spatial model	Hopley dan Robinson (2010)
25.	Digital soil mapping at multiple scales in British Columbia, Canada	2010	British Columbia, Kanada (8.200 km ²)	1:20.000 - 1:125.000; 1:1.000.000	Fuzzy membership, expert pedological knowledge	Smith <i>et al.</i> (2010)
26.	Regional approach to soil property mapping using legacy data and spatial disaggregation techniques	2010	Northeastern USA (50.370 km ²)	1:250.000	Soil-landscape model	Hempel dan Perry (2010)
27.	Inductively mapping expert-derived soil-landscape units within dambo wetland catenae using multispectral and topographic data	2009	Uganda (2.214 km ²)	n.d	Expert knowledge landscape model	Hansen <i>et al.</i> (2009)
28.	Disaggregation of polygons of surficial geology and soil maps using spatial modeling and legacy data	2001	NSW, Australia	1:250.000	restructuring element, statistical clustering, decision tree	Bui dan Moran (2001)

n.d=no data

Uraian satuan peta tanah dan blok diagram dalam suatu laporan survei tanah memberikan penjelasan secara rinci tentang hubungan tanah-lanskap atau toposekuen tanah. Keduanya dapat digunakan sebagai bahan untuk men-disagregasi satuan-satuan peta menjadi satuan-satuan yang lebih rinci dengan komponen-komponen dari elemen lanskap sebagai faktor pembeda dalam setiap satuan tanah. Toposekuen tanah saat ini dapat disajikan secara visual dalam komputer dengan menggabungkan peta-peta tanah dengan data elevasi digital (DEM). Disagregasi dilakukan dengan teknik *expert knowledge* atau statistik,

yang mana keduanya telah diterapkan oleh Bui (2007) di lanskap Australia.

Pendekatan kedua adalah pendekatan data mining. Pada ini model rule hubungan tanah-lanskap diketahui melalui teknik pencarian pengetahuan dan pencarian pola data dari suatu dataset yang besar. Pendekatan kedua ini lebih mengedepankan pendekatan *machine learning*. Hanya sedikit pengetahuan ahli terlibat dalam pemodelan. Di Amerika Serikat, Nauman and Thompson (2014) dan Subburayalu *et al.* (2014) memanfaatkan basisdata

spasial tanah untuk membuat hubungan seri tanah dengan komponen lanskap.

Kedua pendekatan ini merupakan konsep operasional dari tiga teknik disagregasi spasial yang diuraikan berikut ini. Hasil penelitian (Bui dan Moran 2001) digunakan sebagai ilustrasi untuk memperjelas bagaimana teknik ini bekerja.

Teknik Kesatu-Membuat Ulang Struktur dari Unsur Lanskap (A Restructuring Element)

Teknik pertama ini telah digunakan oleh Bui dan Moran (2001) untuk disagregasi Peta Land Systems of Western New South Wales skala 1:250.000. Satuan peta terdiri dari: tipe landform, tipe vegetasi, dan tipe tanah. Satuan peta dibagi menjadi beberapa facet lahan, dan hubungan timbal balik antar facet digambarkan dalam blok diagram. Proporsi setiap facet dalam setiap satuan peta ditetapkan dengan penaksiran. Setiap facet menjelaskan: kemiringan lereng, mikro relief, dan tipe tanah di setiap facet.

Disagregasi peta dan memetakan ulang peta ke dalam facet-facet dilakukan dengan cara tumpangtengap satuan peta tersebut dengan kelas relief, dimana kelas relief diturunkan dari DEM. Baik satuan peta dan facet dibuat grid dengan resolusi 250 m x 250 m. Relief ini berfungsi sebagai unsur pembeda guna menyusun kembali struktur morfologi lahan, seperti yang dijelaskan dalam blok diagram dan laporan. Ukuran window yang digunakan adalah 5 x 5, yang ditetapkan setelah *trial and error*, sehingga disagregasi satuan peta yang dihasilkan berkoresponden dengan: proporsi areal, kemiringan lereng, dan mikro relief dari setiap facet (Tabel 2). Tipe tanah dominan untuk setiap facet ditetapkan berdasarkan informasi dari laporan.

Tabel 2 ini menjelaskan kode satuan peta yang ada di sistem lahan di New South Wales bagian barat, yang telah diinterseksikan dengan relief. Sistem lahan ini mempunyai 10 kode satuan peta dari mulai Cz hingga bz yang masing-masing mempunyai kode landform, kode vegetasi dan tanah dominan yang khas. Tabel ini diperoleh dari interseksi satuan peta dengan kelas relief (beda tinggi). Sebagai contoh, satuan peta Cz dapat terdiri 58% relief <9 m, 40% relief 9-30 m, dan 2% 30-90 m. Kode profil Gn2.13 adalah merupakan profil perwakilan untuk relief <9 m, dan Gn2.12 merupakan profil perwakilan relief 9-30 m.

Teknik pertama ini berhasil pada peta tanah yang dilengkapi oleh uraian satuan peta dan blok diagram. Blok diagram adalah diagram yang menunjukkan hubungan antara satu elemen lanskap dengan elemen lainnya. Di Indonesia, peta tanah yang memenuhi syarat ini adalah Peta Satuan Lahan dan Tanah Tinjau skala 1:250.000 dari kegiatan LREP I seluruh Sumatera berbasis nomor lembar peta, dan Peta Tanah Tinjau skala 1:250.000 Provinsi Kalimantan Selatan. Untuk Pulau Sumatera, Buurman dan Balsem (1990) menunjukkan 10 contoh blok diagram di Sumatera, yaitu: grup alluvial, grup marin, grup perbukitan, grup dataran dan dataran tuf masam, grup teras marin, grup tuf masam toba, dan grup vulkanik. Untuk Peta Tanah Tinjau Kalimantan Selatan, blok diagram dijelaskan dalam uraian satuan peta tanah.

Teknik Kedua-Pengelompokan (Clustering) secara Statistika

Teknik kedua diterapkan Bui dan Moran (2001) untuk men-disagregasi *Soil Maps for Manilla and Soil Map of Narrabi*, yang mana keduanya mempunyai skala 1:250.000. Citra Landsat MSS (4 bands) dan posisi

Tabel 2. Sistem lahan di New South Wales bagian barat yang diinterseksikan dengan relief (Bui dan Moran 2001)

Table 2. Land system of western New South Wales intersected with relief (Bui and Moran 2001)

Map unit	<9 m (% area)	PPF	9-30 m (% area)	PPF	30-90 m (% area)	PPF
Cz	58	Gn2.13	40	Gn2.12	0	Um1.43
Ne	92	Gn1.22	8	Uc5.11	0	
Mn	84	Gc1.12	16	Gc1.12	0	
Bm	84	Gc1.12	16	Uc5.11	0	
Ov	85	Gc1.12	15	Uc5.11	0	
Hf	94	Gc1.12	6	Uc1.22	0	
Ir	68	Gn2.13	32	Gn2.12	0	
Nl	97	Ug5.28	3	Ug5.24	0	
La	78	Gn2.12	22	Um1.43	0	
bz	0		40	Uc1.43	60	Uc1.23

*PPF (*principal profil form*) merupakan kode profil perwakilan

slope (yang diturunkan dari DEM), pertama dikelompokkan (*clustering*) menggunakan algoritma *k-means*. Jumlah target dari cluster ditentukan berdasarkan jumlah asosiasi tanah dari legenda peta. Meskipun peta dibuat oleh orang yang sama pada waktu yang sama, legenda kedua peta tersebut berbeda dan tidak ada batas yang jelas antara keduanya.

Legenda peta disajikan dalam kombinasi tanah, yang sekaligus sebagai satuan petanya (Table 3). Misalnya untuk lembar Manila, satuan peta ada 5, yaitu: *Alluvial black earth*, *Black earth-Euchrozem association*, *Siliceous sands-yellow solodic soil association*, dan *Red brown earth association*. Masing-masing satuan peta menyediakan informasi tanah dominan, kode profil dominan, dan kode profil utama.

Tahap kedua adalah mencari posisi tipe tanah dominan dalam satuan peta tanah. Dari legenda peta dan tipe tanah pada setiap asosiasi, beberapa grup tanah dapat dicari posisinya di dalam satuan peta. Nomor cluster dari kombinasi Landsat MSS dan posisi lereng tadi telah digunakan untuk menaksir posisi grup tanah tersebut dalam satuan peta. Asumsinya adalah kelompok Landsat MSS mencerminkan kelompok vegetasi asli, dimana vegetasi asli ini berkorelasi dengan sebaran grup tanah di Australia. Sementara itu posisi lereng membantu dalam menjelaskan hubungan karena tanah sehingga dapat menggali daya taksir dari asosiasi tipe tanah dan vegetasi. Jadi, grup tanah ditaksir menggunakan data citra landsat dan posisi lereng.

Teknik kedua ini diterapkan karena blok diagram yang menjelaskan toposekuen tanah tidak tersedia. Karena itu, pendekatan ini nampaknya dapat

diterapkan pada peta tanah dimana satuan peta memuat asosiasi tanah-tanah dan setiap tanah dalam asosiasi ini dapat dipisahkan berdasarkan posisi lereng. Teknik ini nampaknya dapat digunakan dalam membuat peta skala 1:50.000 menggunakan Peta Tanah Tinjau skala 1:250.000 di Kalimantan, Sulawesi, Jawa, dan Nusa Tenggara.

Teknik Ketiga- Induksi Rule (*Rule Induction*)/ Pohon Keputusan (*Decision Tree*)

Rule adalah suatu aturan jika-maka. Rule “jika maka” mengisyaratkan bahwa jika kondisi 1 diperoleh maka kondisi 2 akan diperoleh. Rule ini dapat diturunkan dari dataset yang banyak menggunakan seperangkat *software* tertentu. Tampilan ini merupakan tampilan yang biasa dipergunakan untuk *script* pembuatan program. Selain rule Jika-maka, rule *Decision tree* (pohon keputusan) juga dapat digunakan dimana rule disajikan dalam bentuk grafik dendrogram.

Rule dibuat dari data yang diambil *training area* dengan skala peta detail. *Rule* yang dihasilkan kemudian digunakan untuk mengekstrapolasi ke areal dimana peta detail tidak tersedia. Teknik ketiga ini melakukan pembuatan *decision tree* dua tingkat; pada tingkat pertama, metode pohon keputusan digunakan untuk memperoleh aturan pemetaan di *training area* dan pada level kedua, rule itu digunakan untuk membatasi domain pada nama aturan itu dapat diekstrapolasi.

Teknik ketiga menerapkan teknik *machine learning* menggunakan induksi berbasis *rule*. *Decision tree* merupakan algoritma induksi *rule* yang telah dikembangkan untuk mengelompokkan data atau untuk

Tabel 3. Tanah-lanskap di Manilla, Australia: contoh asosiasi tanah yang dapat dibedakan ke dalam *cluster* (Bui dan Moran 2001)

Table 3. Soil-landscape of Manila, Australia: an example of soil association differentiated into clusters (Bui and Moran 2001)

Tanah-lanskap	Grup Tanah dominan	Kode Profil perwakilan dominan	Kode Profil perwakilan utama	Jumlah clusters
1. Alluvial black earth	Black Earth	Ug5.15	Ug5.15, Ug5.16	1
2. Black earth-Euchrozem association	Euchrozem	Gn3.12	Gn3.12, Gn3.13	2
	Black Earth	Ug5.1	Ug5.12, Ug5.13, Ug5.14, Ug5.15	
3. Black earth association	Black earth, red brown clays, euchrozem	Ug5.15	Ug5.11, Ug5.12, Uf6.31, Uf6.32, Gn4.12	3
4. Siliceous sands-yellow solodic soil association	Yellow solodic		Dy2.22, Dy3.42	2
	Siliceous sands		Uc1.22, Uc1.41, Uc2.21, uc4.1	
5. Red brown earth association	Red brown earth	Dr2.23	Gn4.13, Dr2.13, Dr2.22, Dr2.23	2

mengungkap struktur data. *Decision tree* bisa menggunakan peubah kuantitatif dan peubah kategorik dalam dataset, keduanya sebagai perubah penjelas atau peubah respon. Membuat *decision tree* merupakan suatu masalah pemilihan peubah dimana interaksi antara peubah ditangani secara otomatis. Algoritma yang digunakan untuk membagi dua dalam pohon atau node berbeda antar perangkat lunak. Membangun *tree* selalu membagi dua dataset yang paling homogen dan subset terakhir disebut daun (*leaf*). *Decision tree* menyerupai proses mental yang dikembangkan oleh surveyor tanah dan dengan demikian membuat ulang peta tanah yang eksisting dari rule-rule menggunakan peubah lingkungan, seperti: elevasi, kemiringan lereng, litologi, jarak dari anak sungai, dan lain-lain. Software C5.0, digunakan untuk membangun *decision tree model*.

Dalam disagregasi ini, daun dari *tree* adalah faset fluvial di dua training area, yaitu satuan peta faset Nyngan-Walgett and Satuan peta Goondiwindi-Inverell. Litologi digital, elevasi digital, relief, energy trasfort, landsat MSS 4 band digunakan sebagai peubah penjelas. Semua data ini dibuat grid dengan ukuran 250 m x 250 m, kemudian sistem referensinya disamakan dengan referensi dari DEM.

Sebagai *training area* adalah Peta Geologi lembar Nyngan-Walgett and Peta Geologi lembar Goondiwindi-Inverell, keduanya mempunyai skala 1:250.000. Dengan kata lain, *training area* adalah bentangan lahan yang di batasi oleh batas lembar kedua peta itu. Masing *training area* disampel secara acak untuk memperoleh suatu dataset. Sebanyak 25% dari training area disampel secara acak dengan jumlah sampel per kelas dibobotkan oleh total area yang ditempati oleh kelas peta. Asumsinya adalah semakin banyak kelas dilibatkan semakin banyak keragaman spasial dicek. Dataset ini ini digunakan untuk membangun suatu *decision tree* dari distribusi faset. Dengan kata lain sebagai respond dan target adalah sebaran faset lahan.

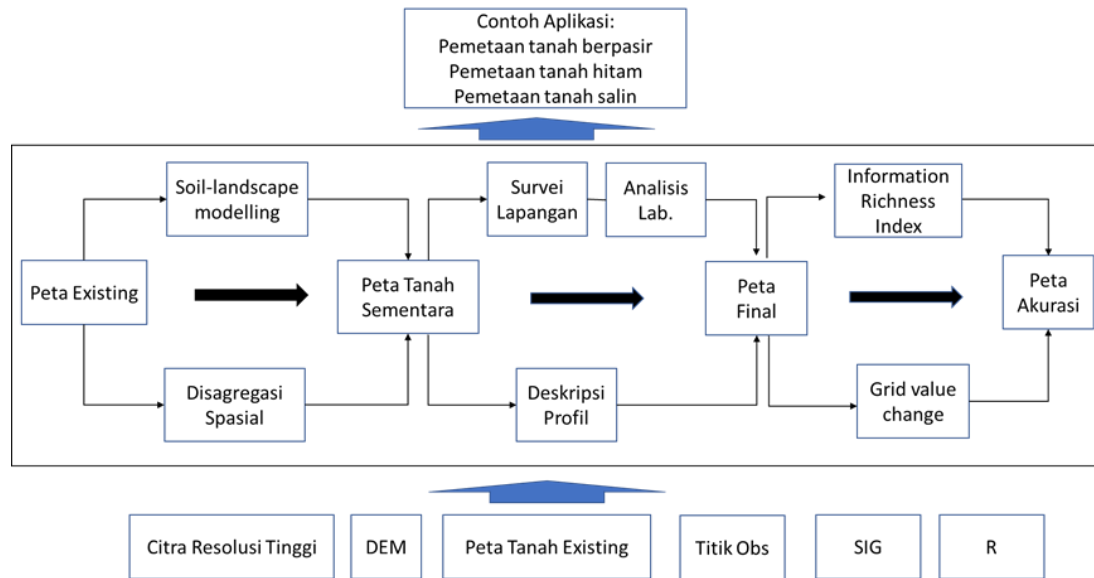
Nilai peubah penaksir di daerah sampel dikompilasi ke dalam suatu tabel, selanjutnya dikirimkan ke suatu perangkat lunak. Faset (*facet*) menjadi peubah target untuk penaksiran menggunakan peubah lingkungan. Untuk membuat model yang banyak *training area* disampel 10 kali menggunakan angka acak yang berbeda, sehingga diperoleh 10 model pohon (*tree model*). Prediksi dibuat untuk setiap piksel di

training area menggunakan setiap model. Akhirnya, setiap piksel dinamai oleh nilai modal yang diprediksi oleh 10 pohon. Dengan demikian, model akhir dari *training area* dibuat berdasarkan kemiripan dari model pohon yang dibuat. Kualitas model dievaluasi dengan membandingkan peta taksiran dengan peta asli dan mengevaluasi persen area yang ditaksir secara benar menggunakan *statistic kappa*. Karena dua *training area* tersedia, adalah penting untuk menentukan model *training area* yang mana harus diterapkan.

POTENSI DAN KENDALA PENERAPAN TEKNIK DISAGREGASI SPASIAL DI INDONESIA

Disagregasi spasial merupakan salah satu teknik pemetaan tanah digital alternative untuk membuat peta tanah yang lebih detil dari peta tanah sebelumnya. Kajiannya telah dimulai sejak tahun 2000'an khususnya dengan penggunaan otomatisasi. Tabel 1 adalah daftar artikel yang menunjukan aplikasi disagregasi spasial di beberapa daerah untuk berbagai keperluan. Publikasi ini memberikan pelajaran yang berharga tentang bagaimana metode ini dimodifikasi disesuaikan dengan kondisi data yang ada, termasuk strategi-strategi operasionalisasinya. Gambar 3 menyajikan posisi teknologi disagregasi spasial dalam rangka kerja penyajian informasi spasial tanah di Indonesia.

Di Indonesia, permintaan peta sumberdaya tanah skala 1:50.000 cenderung meningkat. Peta ini merupakan dasar bagi penyusunan peta AEZ (Agro Ecological Zone) di tingkat kabupaten pada skala yang sama. Dengan metode konvensional saat ini, pemetaan semi detil ini menyita banyak tenaga dan biaya. Sementara itu, peta tanah tinjau dan peta-peta detil lainnya sudah tersedia dan beberapa titik pengamatan tanah di dalam lokasi areal yang akan dipetakan maupun sekitar areal itu pun sudah tersedia. Tabel 4 menyajikan informasi lokasi yang telah dipetakan saat Land Resource Evaluation Planning Project Part II (LREPP II) yang menyediakan peta tanah dan titik observasi lebih lengkap. Yang masih menjadi pertanyaan adalah bagaimana data ini bisa didayagunakan. Teknik disagregasi spasial dapat digunakan untuk membantu menurunkan peta semi detil dari peta tinjau ini. Cara ini merupakan cara top down dengan pendetilan dan pengkayaan informasi.



Gambar 3. Diagram alur pemetaan berbasis DSM dimana disagregasi spasial digunakan.

Figure 3. DSM-based mapping flowchart where spatial disaggregation is used

Pendekatan *topdown* berlaku jika areal yang dipetakan sudah mempunyai peta meskipun skalanya lebih kecil. Kejadian terjadi apabila peta semidetil telah ada di sekitar areal yang akan dipetakan. Teknik disagregasi spasial dapat membantu dalam membuat peta semidetil menggunakan model yang dibuat dari wilayah yang mempunyai peta skala 1:50.000. Teknik *decision tree* sangat membantu dalam tujuan ini. Gambar 3 menyediakan contoh aplikasi disagregasi spasial kondisi sebelumnya dan sesudahnya.

Edgematching adalah penyelarasan batas dan isi satuan peta yang berbatasan dengan satuan peta lainnya. Sebagai contoh, penyelerasan antara satuan peta tanah di perbatasan antara Kabupaten Kotawaringin Barat dan Kabupaten Ketapang. Dua pertanyaan biasanya muncul dalam *edgematching* peta yang berada di perbatasan peta yang bersisian. Penyatuan batas peta yang bersisian seringkali menjadi masalah. Batas satuan yang tidak nyambung juga uraian satuan peta yang tidak sama. Hal ini terjadi meskipun peta dibuat oleh orang yang sama. Disagregasi spasial terbukti telah membantu dalam penyatuan batas ini. *Clustering* sangat berperan dalam pembuatan peta tersebut menjadi satu kesatuan. Teknik ini telah ditunjukkan dengan baik oleh Odgers *et al.* (2014b)

Dalam pelaksanaannya, dua kendala utama dijumpai yang berkaitan dengan kesiapan data, dan

sumberdaya manusia. Sumberdaya manusia adalah kunci utama dalam penerapan Teknik ini. Peneliti, teknisi, dan lainnya yang ingin menerapkan perlu mengetahui tentang konsep umum pemetaan tanah digital, bahasa pemrograman R dan atau Phyton, serta kemampuan operasionalisasi perangkat lunak pendukung. Pelatihan-pelatihan terkait topik akan membantu menyediakan sumberdaya manusia yang handal untuk operasionalisasi teknik ini.

Kendala kedua adalah aspek kesiapan data untuk diolah menggunakan teknik ini. Sistem informasi dan sistem inferensi belum banyak tersedia, padahal ini kedua sistem ini menyediakan data siap oleh dan model siap pakai. Inti dari kedua sistem ini adalah basisdata dan basismodel. Sebagai akibatnya, penyiapan data yang siap pakai memerlukan tahapan dan waktu yang lebih banyak dibandingkan aplikasi terkniknya. Sulaeman *et al.* (2013) memberikan gambaran tahapan dan permasalahan yang dihadapi saat penyiapan data tersebut.

Tabel 4. Daftar lokasi survei LREPP II
 Table 4. List of survey areas of LREPP II

No.	Provinsi	Lokasi	Luas (10 ³ ha)	Tujuan	Tahun
1.	D.I. Yogyakarta	Sleman, Bantul, Wonosari, Kodya Yogya	260	Pengembangan pertanian lahan kering, konservasi hutan	1993/1994
2.	Bali	Nusadua-Padangbai	160	Turisme dan pemukiman	1993/1994
3.	Sulawesi Selatan	DAS Sadang/Mamasa	200	Penghutanan kembali, wanatani (<i>agroforestry</i>), tanaman perkebunan, agroturisme	1993/1994
4.	Sulawesi Tenggara	Wilayah V (P. Muna)	50	Transmigrasi (rumput ternak/pasture, hewan ternak, wanatani, tembakau, pertanian komersial) Turisme	1993/1994
		Wilayah IV (P. Wangi- wangi dan Kaledupa)	75	Transmigrasi (peternakan, tanaman pohon, wanatani, hutan konservasi)	1993/1994
		Wilayah III (Poleang)	98		1993/1994
5.	Sulawesi Tengah	Lore Utara/Wuanga Mori Atas dan Bungku	36 162	Tanaman pertanian/perkebunan Karet, kopi, kakao	1993/1994 1993/1994
6.	Sulawesi Utara	Danau Tondano Danau Limboto Marisa, Papayato Paguyaman	50 44 33 62	Penyediaan air dan PLTA (<i>Hydropower</i>) Pengendalian Banjir Pengembangan irigasi Pengembangan irigasi, tebu	1994/1995 1994/1995 1994/1995 1994/1995
7.	NTT	Timor Flores Sumba	600	Tanaman perkebunan, industri, perikanan, tanaman pangan, hutan dan turisme	1994/1995
8.	NTB	Lombok Tenggara (Sunut)	22	Turisme dan tanaman sayur-sayuran Tebu dan kapas	1993/1994
		Lombok Timur Laut (Pringgabaya)	41		1993/1994
		Pantai Tambora, Sumbawa	64	Peternakan (<i>ranch</i>) dan transmigrasi Turisme	1993/1994
		Pantai Dompu, Sumbawa Besar	58		1993/1994
9.	Kalimantan Tengah	Pangkalanbun	200	Karet, kelapa sawit, lada, kakao	1995/1996
10.	Kalimantan Timur	Sekitar Samarinda	400	Evaluasi kerusakan dan dampak kebakaran hutan dari api bawah tanah terhadap lingkungan	1993/1994
11.	Kalimantan Barat	Sanggau	190	Kelapa sawit, pertambangan (batubara, bauksit, uranium)	1995/1996
12.	Kalimantan Selatan	Batulicin	200	Industrial estate	1994/1995
13.	Maluku	Wahai	100	Perkebunan, irigasi, transmigrasi	1994/1994
14.	Jawa Timur	DAS Grindule (Pacitan)	72	Rehabilitasi dan konservasi DAS, pengembangan sumberdaya alam (pertambangan feldspar dan kuarsa) Pengembangan industri, konservasi lahan	1994/1995
		Daerah pantai timur laut (Tuban-Gresik)	160		1994/1995
15.	Jawa Tengah	Sekitar Semarang	123	Pengendalian Banjir	1994/1995
16.	Jawa Barat	DAS Citarum Bawah	275	Rehabilitasi, konservasi, penghutanan kembali DAS, pengembangan industry	1992/1993
17.	Irian Jaya	Asologaima, Kelila, Mahki	135	Konservasi dan pengembangan daerah lembah dataran tinggi yang padat penduduk	1995/1996

DUKUNGAN APLIKASI

Beberapa teknik otomatisasi sudah disusun dalam berabagi modul dan paket. Setiap tahapan telah dibuat programnya, dan teknik pemodelannya juga diterapkan disesuaikan dengan kemajuan teknologinya. Salah satu paket yang baik adalah Paket Agregation di R dan dapat diunduh dari website CRAN. Paket ini ditulis dalam bahasa R, dan operasionalnya dibahas oleh (Nandi *et al.* 2020).

Aplikasi lainnya adalah DSMART (Odgers *et al.* 2014a). Pemilihan algoritma ditentukan oleh dua faktor: akurasi, dan efisiensi komputasi. Dalam penelitiannya, Møller *et al.* (2019) membandingkan antara DSMART dan Random Forest (RF), yang berkesimpulan bahwa RF menurunkan akurasi tetapi lebih efisien dalam komputasi. Mereka juga menyimpulkan bahwa akurasi ditentukan oleh kedetilan geografi dan peta input, ketika membandingkan peta skala 1:1.000.000 dengan skala 1:2.000.000.

KESIMPULAN

Permintaan informasi spasial tanah yang semakin meningkat dan cepat memerlukan alternatif teknologi yang sesuai dengan kondisi infrastruktur data setempat dan memanfaatkan secara optimal teknologi informasi, penginderaan jauh, pemodelan, dan basisdata. Pendekatan DSM telah lama dikembangkan dan penerapannya semakin meningkat seiring dengan banyaknya software dan aplikasi dan tersedianya data citra, DEM yang semakin detail.

Disagregasi spasial merupakan salah satu teknologi DSM dengan input utamanya peta tanah. Teknik ini telah diterapkan di banyak tempat, ragam skala peta, ragam algoritma, dan ragam target output. Rangka kerja disagregasi spasial dapat diadaptasi dengan kondisi Indonesia dan teknologi ini dapat diterapkan antara lain dalam pendetilan peta tanah, penyesuaian batas peta, dan membuat peta baru berdasarkan informasi dari peta yang tersedia dengan memanfaatkan dukungan aplikasi yang semakin maju.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada *Asian Food and Agriculture Cooperation Initiative* (AFACI) yang telah membiayai penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada kedua reviewer dan editor yang telah memberikan masukan dan perbaikan terhadap

tulisan ini. Yiyi Sulaeman adalah kontributor utama, sedangkan Husnain adalah kontributor anggota.

DAFTAR PUSTAKA

- Bui EN, Moran CJ. 2001. Disaggregation of polygons of surficial geology and soil maps using spatial modelling and legacy data. *Geoderma*, 103: 9–94. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00070-2).
- Bui EN. 2007. A review of digital soil mapping in Australia. Pp 25-37. In Lagacherie P, McBratney AB, Volts M (Eds): *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. Developments in Soil Science, Volume 31. Elsevier B. V. Amsterdam.
- Buurman P, Balsem T. 1990. Land Unit Classification for the Reconnaissance Soil Survey of Sumatera. Technical Report Number 3. Land Resource Evaluation and Planning Project. Centre for Soil and Agroclimate Research. Bogor
- Costa JJF, Giasson E, da Silva EB, Campos AR, Machado IR, Bonfatti BR, Bacic ILZ. 2019. Individualization of soil classes by disaggregation of physiographic map polygons. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 54. Doi: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00290.
- Dent D, Young A. 1981. *Soil Survey and Land Evaluation*. George Allen and Unwin, London.
- FAO. 2006. *Guidelines for Soil Profile Description*. Fourth Edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 97 p.
- Flynn TT, van Zijl G, van Tol J, Botha C, Rozanov A, Warr B, Clarke C. 2019. Comparing algorithms to disaggregate complex soil polygons in contrasting environments. *Geoderma*, 352:171–180. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.013>.
- Hansen MK, Brown DJ, Dennison DJ, Graves SA, Brickley RS. 2009. Inductively mapping expert-derived soil-landscape units within dambo wetland catena using multispectral and topographic data. *Geoderma*, 150: 72-84. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.013>.
- Hardjowigeno S. 1995. *Ilmu Tanah*. Akademika Presindo. Jakarta.
- Häring T, Dietz E, Osenstetter S, Koschitzki T, Schröder B. 2012. Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian forest soils. *Geoderma*, 185:37-47. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.001>.
- Hempel FSWW, Perry CH. 2010. Regional approach to soil property mapping using legacy data and spatial disaggregation techniques, in: 19th World Congress of Soil Science.

- Hewit AE. 1993. Predictive modelling in soil survey. *Soil and Fertilizer*, 56: 305-314.
- Hikmatullah, Suparto, Tafakresnanto C, Sukarman, Suratman, Nugroho K. 2014. Petunjuk Teknis Survei dan Pemetaan Sumberdaya Tanah Tingkat Semi Detail Skala 1:50.000. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 34 Hlm.
- Holmes K, Griffin E, Odgers N. 2015. Large-area spatial disaggregation of a mosaic of conventional soil maps: evaluation over Western Australia. *Soil Res.*, 53:865–880. Doi: <https://doi.org/10.1071/SR14270>.
- Holmes K, Odgers N, Griffin E, van Gool D. 2014. Spatial disaggregation of conventional soil mapping across Western Australia using DSMART. *Glob. Basis Glob. Spat. Soil Inf. Syst.*, 273–279. Doi: 10.1201/b16500-51.
- Hopley AJ, Robinson BN. 2010. Disaggregation of landform components within land systems of the Victorian Mallee using a Digital Elevation Model, in: 19th World Congress of Soil Science.
- Hudson BD. 1992. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:836-841. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030027x>.
- Jamshidi M, Delavar M, Taghizadehe-Mehrjerdi R, Brungard C. 2019. Disaggregation of conventional soil map by generating multi realizations of soil class distribution (case study: Saadat Shahr plain, Iran). *Environ. Monit. Assess.* 191, 769. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08984-5>.
- Jenny H. 1941. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill. New York.
- Kerry R, Goovaerts P, Rawlins BG, Merchant BP. 2012. Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale. *Geoderma*, 170:347-358. Doi : 10.1016/j.geoderma.2011.10.007.
- Lagacherie P, McBratney AB. 2007. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. pp 3-22. In Lagacherie P, McBratney AB, Voltz M (Eds): Digital Soil Mapping: an Introductory Perspective. Developments in Soil Science, volume 31. Elsevier B. V. Amsterdam.
- Lelyk G, MacMillan RA, Smith S, Daneshfar B. 2014. Spatial disaggregation of soil map polygons to estimate continuous soil property values at a resolution of 90 m for a pilot study area in Manitoba, Canada. *Glob. Basis Glob. Spat. Soil Inf. Syst.* 201.
- Liu F, Geng X, Fraser W, Song X, Zhang G, others, 2016. Soil polygon disaggregation through similarity-based prediction with legacy pedons. *J. Arid Land*, 8: 760–772. Doi : <https://doi.org/10.1007/s40333-016-0087-7>.
- Machado IR, Giasson E, Campos AR, Costa JJF, da Silva EB, Bonfatti BR. 2018. Spatial disaggregation of multi-component soil map units using legacy data and a tree-based algorithm in Southern Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 42. Doi: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170193>.
- McBratney AB, Mendonça-Santos ML, Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117:3-52. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- Minasny B, McBratney AB. 2010. Methodologies for global soil mapping. pp 429-436. In Boettinger JL, Howel DW, Moore AC, Hartemink AE, Koenast-Brown S (Eds): Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation. Progress in Soil Science 2, Springer Science+Business Media B.V.
- Minasny B, McBratney AB. 2016. Digital soil mapping: a brief history and some lessons. *Geoderma*, 264:301-311. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
- Møller AB, Malone B, Odgers NP, Beucher A, Iversen BV, Greve MH, Minasny B. 2019. Improved disaggregation of conventional soil maps. *Geoderma*, 341:148–160. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.038>.
- Nandi AK, Lucas TC, Arambepola R, Gething P, Weiss DJ. 2020. Disaggregation: An R Package for Bayesian Spatial Disaggregation Modelling. ArXiv Prepr. ArXiv200104847.
- Nauman TW, Thompson JA, Odgers N, Libohova Z. 2012. Fuzzy disaggregation of conventional soil maps using database knowledge extraction to produce soil property maps. pp. 203–208. In Minasny B, Malone B, McBratney AB (Eds): Digital Soil Assessments and Beyond. Taylors & Francis Group. London.
- Nauman TW, Thompson JA, Rasmussen C. 2014. Semi-automated disaggregation of a conventional soil map using knowledge driven data mining and random forests in the Sonoran Desert, USA. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 80: 353–366. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.024>.
- Nauman TW, Thompson JA. 2014. Semi-automated disaggregation of conventional soil maps using knowledge driven data mining and classification trees. *Geoderma*, 213:385-399. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.024>.
- Odgers NP, Holmes KW, Griffin T, Liddicoat C. 2015. Derivation of soil-attribute estimations from

- legacy soil maps. *Soil Res.*, 53: 881–894. Doi: <https://doi.org/10.1071/SR14274>.
- Odgers NP, McBratney A, Minasny B, Sun W, Clifford D. 2014a. DSMART: An algorithm to spatially disaggregate soil map units. *Glob. Basis Glob. Spat. Soil Inf. Syst.* 261–266.
- Odgers NP, Sun W, McBratney AB, Minasny B, Clifford D. 2014b. Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees. *Geoderma*, 214: 91–100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.024>.
- Puslittanak. 1994. Panduan Survei Tanah. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor. 115 Hlm.
- Scul P, Franklina J, Chadwick OA, McArthur D. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress In physical geography*, 27 (2) : 171-197. Doi: <https://doi.org/10.1191/0309133303pp366ra>.
- Smith CAS, Daneshfar B, Frank G, Flager E, Bulmer C. 2012. Use of weights of evidence statistics to define inference rules to disaggregate soil survey maps. Pp 215-220. *In* Minasny B, Malone B, McBratney AB (Eds): *Digital Soil Assessments and Beyond*. Taylors & Francis Group. London.
- Smith S, Bulmer C, Flager E, Frank G, Filatow D, 2010. Digital soil mapping at multiple scales in British Columbia, Canada, in: Program and Abstracts, 4th Global Workshop on Digital Soil Mapping Rome, Italy.
- Smith S, Neilsen D, Frank G, Flager E, Daneshfar B, Lelyk G, Kenney E, Bulmer C, Filatow D. 2016. Disaggregation of legacy soil maps to produce a digital soil attribute map for the Okanagan Basin, British Columbia, Canada. pp. 305–317. *In* Zhang GL, Brus D, Liu F, Song XD, Lagacherie (Eds): *Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries*. Springer.
- Subburayalu SK, Jenhani I, Slater BK. 2014. Disaggregation of component soil series on an Ohio Country soil survey map using possibilistic decision trees. *Geoderma*, 213:334-345. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.018>.
- Subburayalu SK, Slater BK. 2013. Soil series mapping by knowledge discovery from an Ohio Country Soil Map. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (4): 1254-1268. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0321>.
- Sukarman, Nugroho K, Sulaeman Y. 2013. Perkembangan dan permasalahan sistem klasifikasi tanah di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 7(2): 97-112. Doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v7n2.2013.%25p>.
- Sukarman, Ritung S, Anda M, Suryani E. 2017. *Pedoman Pengamatan Tanah di Lapangan*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. IAARD Press. Jakarta. 136 Hlm.
- Sulaeman Y, Minasny B, McBratney AB, Sarwani M, Sutandi A. 2013. Harmonizing legacy soil data for digital soil mapping in Indonesia. *Geoderma*, 192:77–85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.005>.
- Van Zijl GM, Le Roux PA, Turner DP. 2013. Disaggregation of land types using terrain analysis, expert knowledge and GIS methods. *South Afr. J. Plant Soil*, 30: 123–129. Doi: <https://doi.org/10.1080/02571862.2013.806679>.
- Vincent S, Lemerrier B, Berthier L, Walter C. 2018. Spatial disaggregation of complex Soil Map Units at the regional scale based on soil-landscape relationships. *Geoderma*, 311:130–142. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.006>.
- Wahyunto, Hikmatullah, Suryani E, Tafakresnanto C, Ritung S, Mulyani A, Sukarman, Nugroho K, Sulaeman Y, Suparto, Subandiono RE, Sutriadi T, Nursyamsi D. 2016. *Pedoman Survey dan Pemetaan Tanah Tingkat Semi Detail skala 1:50.000*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor. 44 hal.
- Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Brungard CW, Finke P. 2019. Disaggregating and updating a legacy soil map using DSMART, fuzzy c-means and k-means clustering algorithms in Central Iran. *Geoderma*, 340: 249–258. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.005>.