

Distribusi Spasial Dekat Waktu Nyata Draft Spesifik Pengolahan Tanah Perkebunan Tebu Belum Diolah Berbasis Citra SENTINEL-1

Harry Imantho¹³, Kudang Boro Seminar¹, Wawan Hermawan¹, Satyanto Krido Saptomo²

¹ Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University, Indonesia

² Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Indonesia

³ Earth Observatory and Change Section, SEAMEO BIOTROP, Indonesia

*email korespondensi: harry_2509@apps.ipb.ac.id

Info Artikel

Diajukan: 8 Juli 2022

Diterima: 2 September 2022

Diterbitkan: 23 September 2022

Keyword:

precision agriculture, Sentinel-1, soil water content, soil penetration resistance, tillage specific draft

Kata Kunci:

Pertanian presisi, Sentinel-1, kadar air tanah, tahanan penetrasi tanah, draft spesifik pengolahan tanah

Abstract

Spatial variability is very important in the management of large-scale agriculture such as plantations. Information on the spatial variability of agricultural land is needed to ensure the effectiveness and efficiency of the operation of tillage machineries. This study proposes a model to determine the near-real-time and high-resolution spatial distribution of specific draft of tillage based on Sentinel-1A radar images. The research shows that the dynamics of spatial soil water content in near real time together with the fraction of silt and clay in the tillage layer affect the mechanical properties of the soil penetration resistance. The Dubois model has been applied to calculate the spatial soil water content based on Sentinel-1A. A mathematical model for calculating soil penetration resistance was developed from the proposed method using a multiple regression approach based on sample data collected from sugarcane plantations in the districts of Kediri and Sidoarjo, East Java, Indonesia. The performance of model has been calculated and shows good performance with RMSE, MAPE and accuracy values of 0.235, 18.32% and 81.68%, respectively. The spatial distribution of soil penetration resistance generated by the model becomes an important input in the calculation of the specific draft of tillage based on the Kisu approach. The distribution of the penetration resistance and the specific draft of tillage can be calculated and visualized using a spatial map. The distribution map of specific draft of tillage shows that the force per cross-sectional area of worked soil varies in the sugarcane plantation area. The future contribution of this research is to develop a decision support system in the selection of appropriate agricultural machinery for tillage operations in sugarcane plantations based on the principles of precision agriculture.

Abstrak

Variabilitas spasial sangat penting dalam pengelolaan pertanian skala besar seperti perkebunan. Informasi tentang variabilitas spasial lahan pertanian diperlukan untuk memastikan efektivitas dan efisiensi pengoperasian mesin pengolahan tanah. Studi ini mengusulkan sebuah model untuk menentukan distribusi spasial mendekati waktu nyata dan resolusi tinggi dari draft spesifik pengolahan tanah berdasarkan citra radar Sentinel-1A. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dinamika spasial kadar air tanah dekat waktu nyata dengan fraksi debu dan liat pada lapisan olah tanah mempengaruhi sifat mekanik tahanan penetrasi tanah. Model Dubois telah diterapkan untuk menghitung kadar air tanah spasial berdasarkan Sentinel-1A. Model matematika untuk menghitung tahanan penetrasi tanah dikembangkan dari metode yang diusulkan menggunakan pendekatan regresi berganda berdasarkan data sampel yang dikumpulkan dari perkebunan tebu di kabupaten Kediri dan Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia. Kinerja model telah dihitung dan menunjukkan kinerja yang baik dengan nilai RMSE, MAPE dan akurasi masing-masing sebesar 0,235, 18,32% dan 81,68%. Distribusi spasial tahanan penetrasi tanah yang dihasilkan oleh model menjadi masukan penting dalam perhitungan draft spesifik pengolahan tanah berdasarkan pendekatan Kisu. Distribusi tahanan penetrasi dan draft spesifik pengolahan tanah dapat dihitung dan divisualisasikan menggunakan peta spasial. Peta sebaran draft spesifik pengolahan tanah membuktikan bahwa gaya yang bekerja per luas penampang tanah yang akan diolah bervariasi di seluruh area perkebunan tebu. Kontribusi masa depan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem pendukung keputusan dalam pemilihan mesin pertanian yang tepat untuk operasi pengolahan tanah di perkebunan tebu berdasarkan prinsip-prinsip pertanian presisi.

Doi: <https://doi.org/10.19028/jtep.010.2.172-185>

1. Latar Belakang

Performa/kinerja alat traksi menjadi salah satu indikator dari efektifitas dan efisiensi dari kegiatan budidaya pertanian untuk menghasilkan output yang optimal. (Diserens, 2017) menyatakan bahwa kinerja alat traksi ditentukan oleh parameter yang terkait dengan desain mesin/alat traksi, komponen (implemen) yang dipasangkan dan karakteristik tanah (lahan). Peran dari karakteristik tanah (lahan) ini dipertegas melalui hasil penelitian (Yandun et al., 2016) yang menemukan bahwa performa mesin pertanian sangat dipengaruhi oleh bentang lahan/kondisi medan yang diklasifikasi berdasar tekstur permukaan tanah pertanian untuk memilih mesin pertanian yang memiliki daya jelajah yang sesuai dengan bentang lahan/kondisi medan (*spatial variability*).

Interaksi tanah dan alat mesin pertanian menentukan kinerja alat traksi yang dinyatakan dengan indikator slip, ketenggelaman roda (*sinkage*), kemampuan alat traksi untuk menarik beban (*drawbar pull*), koefisien traksi, efisiensi traksi dan tahanan gelinding (Gee-Clough et al., 1978; Gharibkhani et al., 2012; Kisu, 1979; Muro, 1993). Kinerja alat traksi sangat dipengaruhi oleh tingkat kekerasan/kepadatan tanah yang dinyatakan dengan nilai cone index (CI), yang nilainya dipengaruhi oleh tekstur dan kadar air tanah (Macmillan, 2002).

CI bervariasi pada kedalaman tanah, parameter tekstur, kerapatan limbak (*bulk density*, BD), dan kadar air. Penelitian (Kumar, Chen, et al., 2012), menunjukkan bahwa untuk lahan tanpa olah tanah dan lahan konvensional, nilai CI menurun dengan peningkatan fraksi liat, dan meningkat dengan peningkatan fraksi pasir dan lumpur tanah. Nilai CI berkorelasi positif dengan kemampuan kerja alat traksi dan kemampuannya untuk menarik beban, sehingga Kisu (Kisu, 1972) menghubungkan draft spesifik pengolahan tanah, sebagai gaya normal yang melawan arah pergerakan traksi, dengan kondisi tanah sebagai fungsi dari CI dan indeks plastisitas (IP).

Nilai CI salah satu faktor mekanik tanah yang terbukti menentukan draft spesifik pengolahan tanah. Draft spesifik pengolahan tanah menjadi tolak ukur empiris dalam menentukan daya alat traksi yang diperlukan dalam pengolahan lahan. Kedua peubah tersebut akan bervariasi dalam bentang lahan yang luas dan sangat penting dalam penerapan pertanian presisi pada pengolahan lahan perkebunan tebu. Meskipun variabilitas CI dan draft spesifik pengolahan tanah pada bentang lahan yang luas sulit untuk diketahui langsung, namun merujuk pada penelitian (Kumar, Chen, et al., 2012), bahwa nilai CI pada lahan yang belum diolah dapat dihubungkan dengan fraksi dan kadar air tanah. Penelitian membuktikan bahwa variabilitas kadar air tanah pada bentang lahan yang luas, seperti perkebunan tebu setelah dipanen dan akan diolah sangat memungkinkan dideteksi dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model empiris untuk menghitung dan memetakan distribusi spasial draft spesifik pengolahan tanah pada lahan perkebunan tebu berdasarkan Sentinel-1A (radar), mendukung implementasi prinsip pertanian presisi pada pengolahan tanah di area perkebunan.

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan dan Alat

Kegiatan pengambilan sample tanah menggunakan ring sample untuk analisa kadar air tanah di laboratorium. *Cone penetrometer* merk Eijkelkamp Penetrograph digunakan untuk mengukur tahanan penetrasi tanah. Analisis data citra satelit menggunakan perangkat lunak Sentinel Application Platform (SNAP), aplikasi *open-source* yang dikembangkan European Space Agency (ESA) yang dapat digunakan untuk mengolah data Sentinel 1, 2 dan 3. Perangkat lunak ArcGIS Desktop dengan ijin penggunaan melalui *IPB-ESRI Software Licence Agreement*, digunakan pada analisis dan komputasi spasial data vektor maupun raster.

Data radar yang digunakan pada penelitian adalah Sentinel-1A level-1, tipe produk GRD (*Ground Range Detected*), HR (*High Resolution*) memiliki resolusi piksel 10 x 10-meter dan resolusi temporal 10 hari, dan dual polarisasi VV+VH.

2.2 Lokasi dan Periode Studi

Lokasi penelitian di perkebunan tebu PTPN X di Kediri dan Sidoarjo, Jawa Timur. Perkebunan Kediri berada pada ketinggian 200 meter di atas permukaan laut dan curah hujan sekitar 1925 mm/tahun, sedangkan perkebunan Sidoarjo pada ketinggian 7 meter di atas permukaan laut dan curah hujan sekitar 1.479 mm/tahun. Studi dilakukan pada bulan Juni - Oktober 2019.

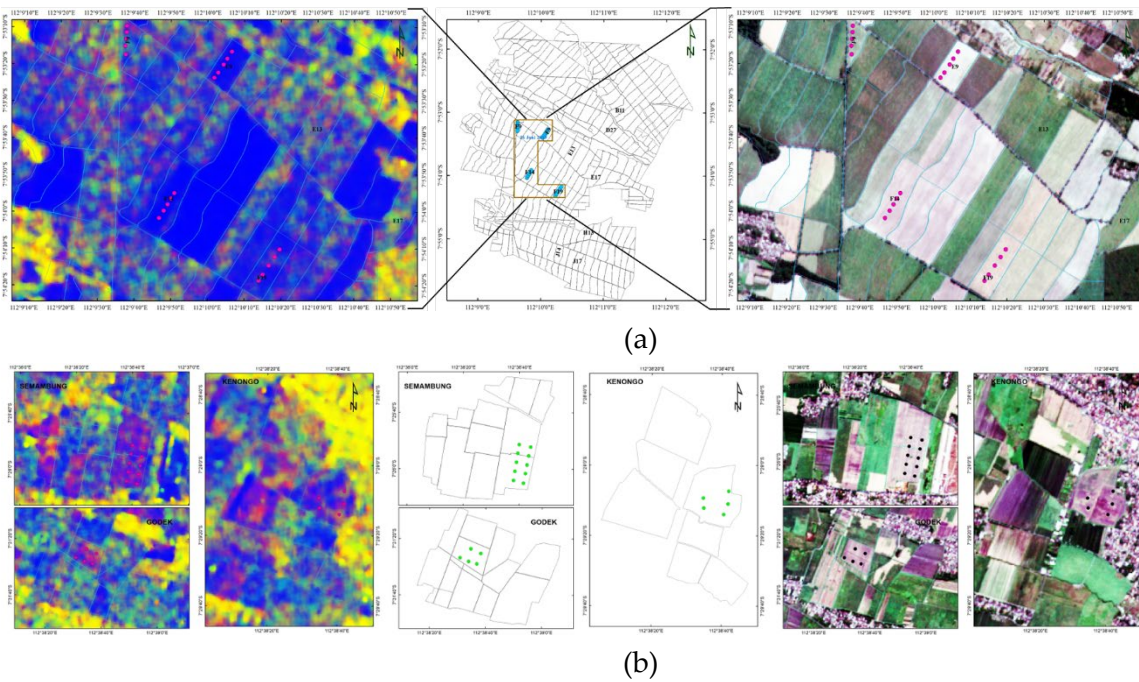
2.3 Metode

2.3.1 Akuisisi Data Citra Radar Sentinel-1A

Akuisisi data radar Sentinel-1A dilakukan 3 kali setiap bulan selama periode penelitian Juni hingga Oktober 2019. Data citra diunduh melalui website *Sentinel Data Hub* pada alamat: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Waktu akuisisi data Sentinel-1A menjadi acuan dalam pengambilan sampel tanah.

2.3.2 Pengambilan Sample Tanah

Pengukuran dan pengambilan sampel dilakukan pada blok perkebunan tebu yang belum ditanami atau telah dipanen dengan jarak pengambilan antar sampel 100 m. Selama periode penelitian (Juni – Oktober 2019), sejumlah 120 sampel tanah diambil dari 11 blok dari perkebunan tebu di Kediri dengan luas total blok sampel adalah 111.25 hektar, dan dari perkebunan tebu Sidoarjo diperoleh sejumlah 40 sampel tanah dari 4 blok dengan luas total blok sampel 60.07 hektar. Gambar 1 menunjukkan situasi lokasi pada saat pengambilan sampel tanah di kedua lokasi penelitian, disajikan pada citra komposit radar Sentinel-1A (kiri) dan citra RGB Sentinel-2A (kanan).



Gambar 1. Lokasi pengambilan sample tanah di: (a) perkebunan tebu Kediri; dan (b) perkebunan tebu Sidoarjo

2.3.3 Pengukuran Kadar Air Tanah

Kegiatan pengukuran kadar air tanah menggunakan metode gravimetri. Sample tanah diambil menggunakan ring sample pada ± 2 jam dari waktu perekaman lokasi oleh satelit Sentinel-1A. Koordinat lokasi sample direkam menggunakan GPS. Dengan metode gravimetri, kadar air tanah dihitung menggunakan persamaan SNI 1965:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019):

$$K_{AT} (\%) = \frac{(m_b - m_k)}{(m_k - m_r)} \times 100 \tag{1}$$

dimana,

- K_{AT} : kadar air tanah (%)
- m_b : massa basah tanah + massa ring sample (gram)
- m_k : massa kering tanah + massa ring sample (gram)
- m_r : mass ring sample (gram)

Bulk density dihitung berbasis masa kering tanah, dengan persamaan sebagai berikut:

$$BD = \frac{m}{v} \tag{2}$$

dimana,

- BD : *bulk density* ($g\ cm^{-3}$)
- m : massa kering tanah (gram)
- v : volume *ring sample* (cm^3)

Nilai *bulk density* (BD) digunakan untuk mengkonversi kadar air tanah dari satuan persen berat (%m) menjadi persen volume/volumetrik (%v).

2.3.4 Perhitungan Kadar Air Tanah Berbasis Citra Sentinel-1A

Model semi-empiris Dubois (Baghdadi et al., 2016b) digunakan untuk menghitung kadar air tanah pada lahan terbuka berdasarkan konstanta dielektrik tanah. Model semi-empiris Dubois menghitung nilai hamburan balik data radar *co-polarization* HH dan VV sebagai fungsi koefisien dielektrik, kekasaran permukaan dan karakteristik data radar sudut datang dan panjang gelombang. Data radar Sentinel-1A mengandung data *cross-polarization*, yakni memiliki nilai hamburan balik VV dan VH. Modifikasi pada model semi-empiris Dubois telah dilakukan untuk menghitung nilai hamburan balik Sentinel-1A sebagai fungsi kadar air tanah dan kekasaran permukaan yang dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Baghdadi et al., 2016a):

$$\sigma_{VV}^o = 10^{-1.138} (\cos \theta)^{1.528} (10^{0.008 \cotan(\theta) mv}) (kh_{rms})^{0.71 \sin(\theta)} \tag{3}$$

$$\sigma_{VH}^o = 10^{-2.325} (\cos \theta)^{-0.01} (10^{0.011 \cotan(\theta) KAT}) (kh_{rms})^{0.44 \sin(\theta)} \tag{4}$$

dimana,

θ : sudut datang (radian)

KAT : kadar air tanah (%vol)

σ_{VV}^o dan σ_{VH}^o : nilai hamburan Sentinel-1A dalam satuan dB

k : $2\pi/\lambda$, λ adalah panjang gelombang dari Sentinel-1A (5.404 GHz)

h_{rms} : parameter kekasaran permukaan yang dihitung sebagai berikut:

$$h_{rms} = 4.27 + 0.22(\sigma_{VH}^o - \sigma_{VV}^o) \text{ (Srivastava et al., 2008)}$$

Transformasi dari model di atas, untuk memperoleh nilai kadar air tanah berdasarkan nilai hamburan VV adalah sebagai berikut:

$$K_{AT} = \left(\frac{\log \sigma_{VV}^o - \log (AB)}{C} \right) \tag{5}$$

dimana,

$$A = 10^{-1.138} (\cos \theta)^{1.528} \quad B = (kh_{rms})^{0.71 \sin(\theta)} \quad C = 0.008 \cotan(\theta)$$

2.3.5 Pengukuran Tahanan Penetrasi

Tahanan penetrasi tanah dipengaruhi oleh sifat fisik dan mekanis tanah. Tahanan penetrasi bervariasi pada kedalaman tanah, parameter tekstur, *bulk density*, dan kadar air. Tahanan penetrasi diukur menggunakan *cone penetrometer*. Besaran tahanan penetrasi tanah dinyatakan dengan *Cone Index* (CI). CI merupakan ukuran kekuatan dan deformabilitas tanah, dan berkorelasi dengan gaya yang bekerja di atasnya. Nilai CI dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$CI = \frac{F}{A} \tag{6}$$

dimana,

CI : Cone index (MPa = 10^6 N m⁻²)

F : Gaya yang diberikan untuk mendorong cone (Newtons)

A : Luas area dasar dari cone (kerucut) pada penetrometer (m²), yang dihitung sebagai berikut: $A = \frac{\pi D^2}{4}$; D adalah diameter alas kerucut penetrometer (m).

Waktu pengukuran tahanan penetrasi disesuaikan dengan waktu pengukuran kadar air tanah. Pengukuran tahanan penetrasi dilakukan pada kedalaman 0 – 25 cm, dengan menggunakan *Eijkelkamp*

Penetrograph tipe mekanik. *Penetrograph* yang digunakan memiliki akurasi $\pm 4\%$ dan rentang pengukuran 0 - 5000 kNm⁻² (0 - 5 MPa). Meskipun tahanan penetrasi diukur sampai kedalaman 25 cm, namun agar dapat diperbandingkan, nilai tahanan penetrasi yang digunakan pada analisis selanjutnya disesuaikan dengan pengukuran kadar air tanah, yaitu nilai pada kedalaman 15 cm.

2.3.6 Analisis Hubungan Data Kadar Air Tanah dengan Nilai Cone Index (CI)

Analisis hubungan kadar air tanah dan nilai *cone index* (CI) digunakan untuk menentukan tingkat tahanan tanah pada setiap level kadar air tanah. Penelitian Kumar *et al.* (2012) menunjukkan bahwa nilai CI dipengaruhi oleh kadar air tanah dan fraksi tanah, dan dinyatakan ke dalam model regresi linier berganda:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \tag{7}$$

dimana,

Y adalah CI sebagai variabel terikat, β_i ($i= 0,1,\dots,n$) menunjukkan koefisien regresi yang diduga dengan metode perhitungan kuadrat terkecil, dan X_i ($i= 0,1,\dots,n$) menunjukkan variabel bebas. Meskipun model regresi linier berganda hanya didasarkan pada hubungan linier dan aditif di antara variabel penjelas, namun model ini terbukti telah banyak digunakan dengan hasil yang memuaskan (Sousa *et al.*, 2007). Distribusi spasial kadar air tanah berbasis Sentinel-1A menjadi salah satu input dalam model, sehingga distribusi spasial dekat waktu nyata CI pada lahan perkebunan tebu dapat dihitung dan dipetakan.

2.3.7 Perhitungan Draft Spesifik Pengolahan Tanah

Kisu menyatakan perhitungan draft spesifik yang dimodifikasi dengan indeks plastisitas dirumuskan sebagai berikut (Kisu, 1972):

$$D_{st} = D \left(1 - \frac{I_p^{+4.5}}{80}\right), \text{ atau} \\ D = 98066.5 \times \frac{80 D_{st}}{75.5 - IP} \tag{8}$$

dimana,

- D_{st} : draft spesifik yang dimodifikasi dengan indeks plastisitas tanah (MPa)
- D : draft spesifik pengolahan tanah (MPa)
- IP : indeks plastisitas (%)

Indek plastisitas (*IP*) tanah dipengaruhi prosentase fraksi kandungan liat (*clay*), dinyatakan sebagai:

$$IP = 0.8(c) - 4.5, \tag{9}$$

dimana,

- IP : indeks plastisitas (%)
- c : kandungan liat (*clay*) pada sample tanah yang diamati (%)

Selanjutnya menurut (Kisu 1972) hubungan draft spesifik yang dimodifikasi dengan indeks plastisitas tanah (D_{st}) dengan tahanan penetrasi tanah (*CI*) dinyatakan sebagai berikut:

$$D_{st} = \frac{CI^2}{600} + \frac{1}{CI} \tag{10} \text{ dimana,}$$

- CI : tahanan penetrasi tanah (MPa)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengukuran Kadar Air Tanah pada Dua Lokasi Penelitian

Hasil analisis kadar air tanah permukaan berdasarkan sample yang diambil menunjukkan bahwa kadar air tanah pada area perkebunan tebu di Kediri selalu lebih rendah dari perkebunan tebu Sidoarjo selama periode pengamatan dan sepanjang musim (Tabel 1). Perbedaan signifikan pada kadar air tanah ini disebabkan oleh perbedaan tekstur tanah pada kedua perkebunan. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa tanah di perkebunan Kediri diklasifikasikan ke dalam tanah pasir berlempung (klasifikasi tanah USDA) dengan komposisi sebagai berikut: pasir 75,10%, debu 17,92% dan liat 6,98%. Komposisi tanah perkebunan Sidoarjo terdiri dari 29,5% pasir, 22,2% debu dan 48,3% liat, dan digolongkan ke dalam jenis tanah lempung berliat (Tabel 2). Dominansi fraksi pasir di perkebunan tebu Kediri menyebabkan rendahnya kemampuan tanah untuk menyimpan air.

Tabel 1. Deskripsi statistik data kadar air tanah (%v) hasil pengukuran selama pengamatan Juni – Oktober 2019) pada dua lokasi penelitian.

	Maksimum	Minimum	Standar deviasi
Kediri	21.74	3.50	4.201
Sidoarjo	60.91	24.47	8.706

Tabel 2. Analisis laboratorium fraksi tanah terhadap sampel dari perkebunan Kediri dan Sidoarjo

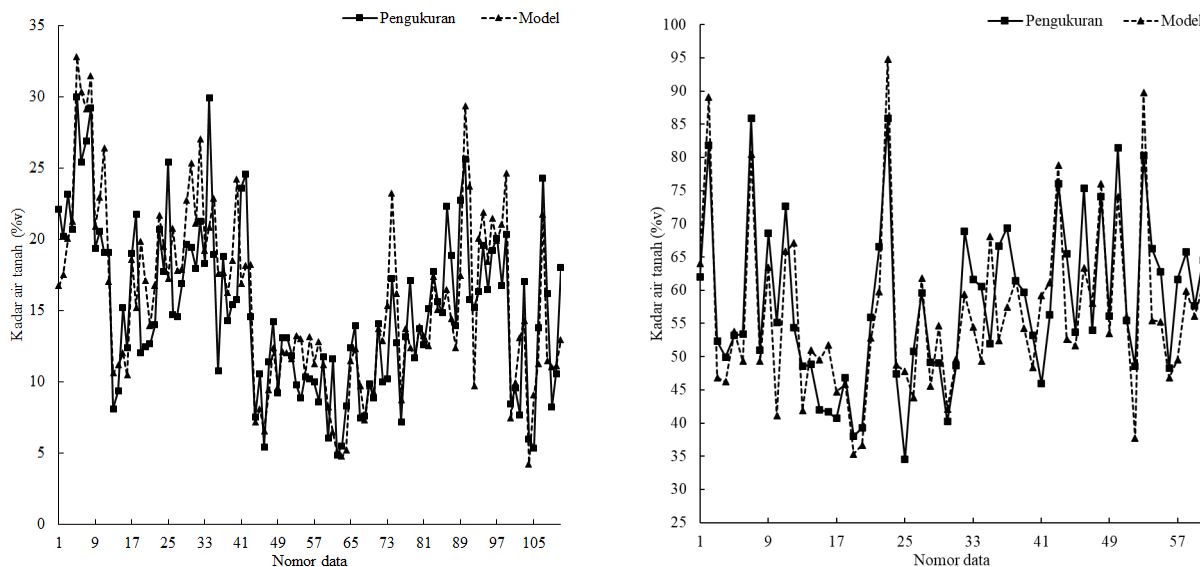
Lokasi	Kode Lokasi	C-org (%)	Fraksi Tanah (%)		
			Pasir	Debu	Liat
Kediri	E09	1.04	75.17	17.37	7.46
	F13	1.24	73.95	19.80	6.25
	F18	1.33	76.17	16.59	7.24
Sidoarjo	Godek	0.78	22.30	25.14	52.56
	Semambung	0.69	31.46	22.69	45.85
	Kenongo	1.06	34.60	18.79	46.61

Pengujian dilakukan di Laboratorium Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB (2019)

3.2 Model Perhitungan Kadar Air Tanah Permukaan dan Perbandingan dengan Data Pengukuran

Penelitian (Dubois et al., 1995) menghasilkan model semi empiris perhitungan hamburan balik sebagai fungsi dari parameter radar sudut datang, panjang gelombang, frekuensi dan parameter permukaan dari kekasaran dan konstanta dielektrik. Model yang dihasilkan ini dikategorikan sebagai model semi empiris karena model perhitungan hamburan balik (HH dan VV) diturunkan dari hasil percobaan menggunakan *ground based scatterometer* POLARSCAT yang merekam pantulan dari transmisi signal radar pada permukaan tanah kosong (gundul). Model semi empiris Dubois (Dubois et al., 1995) telah dimodifikasi oleh (Baghdadi et al., 2016b) digunakan pada penelitian untuk menghitung kadar air tanah permukaan berdasarkan nilai hamburan balik Sentinel-1A. Model ini menghubungkan kadar air tanah dan nilai hamburan balik VV atau VH serta memperhitungkan

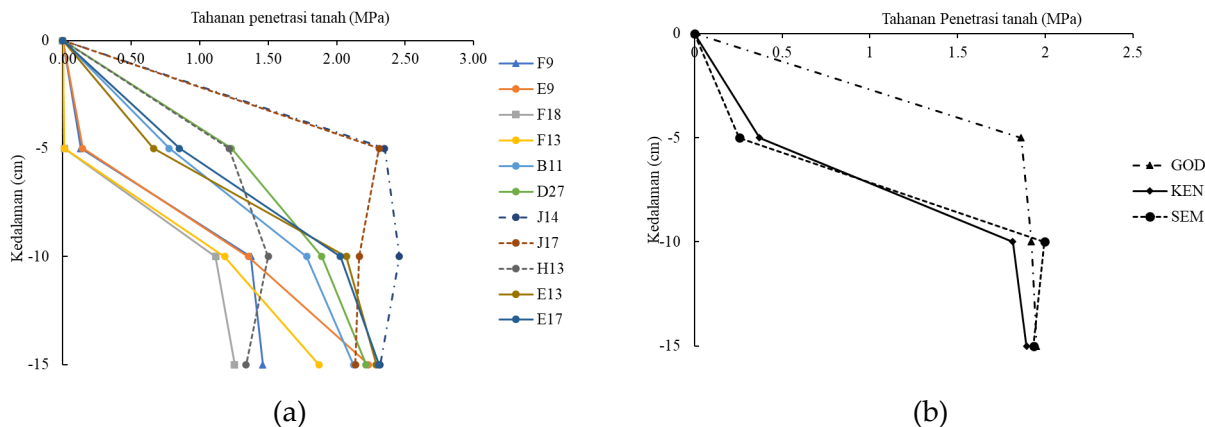
pengaruh dari faktor kekasaran permukaan dan sudut datang dari tranmisi signal yang jatuh dipermukaan objek (dalam hal ini lahan perkebunan tebu yang belum ditanami/telah dipanen). Gambar 2 menunjukkan sandingan kadar air tanah (%v) pengukuran dan keluaran model pada kedua lokasi penelitian.



Gambar 2. Kadar air tanah pengukuran dan keluaran model di perkebunan Kediri (kiri) dan perkebunan Sidoarjo (kanan)

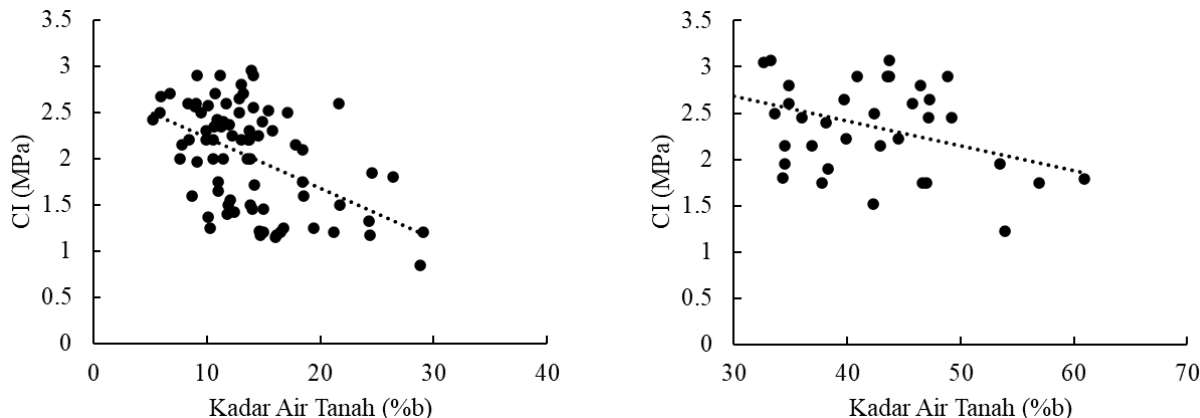
3.3 Penyusunan model tahanan penetrasi dan Draft Spesifik Pengolahan Tanah

Profil nilai tahanan penetrasi tanah (CI) pada kedalaman 0 – 15 cm pada dua lokasi penelitian disajikan pada Gambar 3. Nilai CI pada sebagian besar blok pengambilan sample di perkebunan tebu Kediri menunjukkan kemiripan karakteristik mekanis, yakni pada interval kedalaman 5 – 10 cm tingkat kepadatan tanah lebih tinggi di banding kedalaman interval 10 – 15 cm, kecuali untuk blok sample J14, J17 dan H13. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh dua blok sample di perkebunan tebu Sidoarjo, yakni blok Kenongo (KEN) dan blok Semambung (SEM).

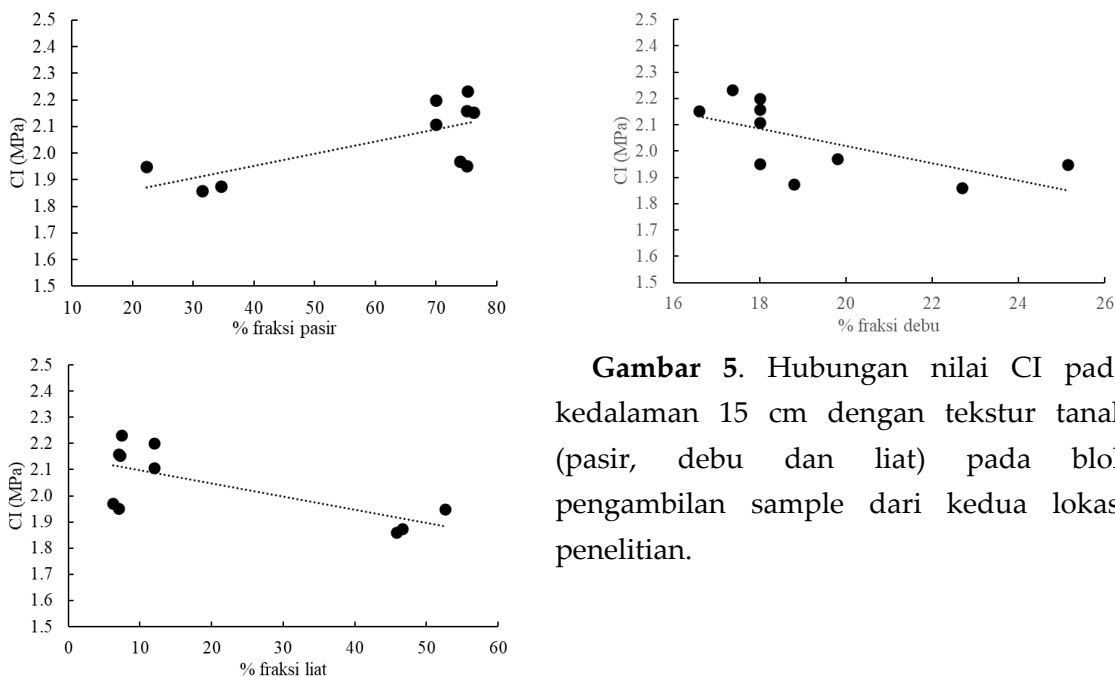


Gambar 3. Profil tahanan penetrasi tanah (0-15 cm) pada blok pengambilan sample perkebunan tebu: (a) Kediri dan (b) Sidoarjo

Hubungan nilai CI dengan kadar air tanah menunjukkan interaksi antara sifat fisik dan mekanis tanah. Gambar 4 membuktikan bahwa hubungan nilai CI dengan kadar air tanah bersifat berbanding terbalik, nilai CI turun seiring dengan peningkatan kadar air tanah. Hasil ini sejalan dengan pernyataan (Busscher et al., 1997; Jabro et al., 2021; Miller et al., 2018) bahwa nilai CI dipengaruhi oleh dinamika kadar air tanah, *bulk density* dan tekstur tanah.



Gambar 4. Hubungan nilai CI pada kedalaman 15 cm dengan kadar air tanah pada blok pengambilan sample di kedua lokasi penelitian



Gambar 5. Hubungan nilai CI pada kedalaman 15 cm dengan tekstur tanah (pasir, debu dan liat) pada blok pengambilan sample dari kedua lokasi penelitian.

Tren positif ditunjukkan oleh hubungan nilai CI dengan fraksi pasir (Gambar 5). Menurut (Kumar, Chen Ying, et al., 2012), koefisien gesek pada partikel pasir yang relatif lebih tinggi daripada partikel debu dan liat menjelaskan tren peningkatan nilai CI seiring peningkatan fraksi pasir. Hubungan nilai CI dengan fraksi debu dan liat memiliki tren negatif. Hal ini dapat dihubungkan dengan kemampuan tanah dalam menahan air. Komposisi fraksi tanah menentukan porositas dan kemampuannya dalam menahan air. Semakin tinggi fraksi debu dan liat dalam tanah maka kemampuan memegang air akan semakin tinggi. Tingginya kadar air tanah akan menurunkan nilai CI. Gambar 4 dan 5 juga

menjelaskan bahwa sensitivitas nilai CI yang lebih besar terhadap kadar air tanah, sehingga pengaruh sejumlah kadar air tanah yang mampu dipegang oleh partikel debu dan liat menyebabkan hubungan fraksi debu dan liat memiliki tren negatif.

Variable terikat nilai CI disandingkan dengan variabel bebas kadar air tanah dan fraksi tanah. Analisis statistik regresi berganda hubungan pengukuran nilai CI dengan pengukuran kadar air tanah dan fraksi tanah pada kedalaman 15 cm, sebagai berikut:

$$CI = 2.11 - 0.013KAT + 0.0096f_d + 0.011f_l \tag{11} \text{ dimana,}$$

CI : tahanan penetrasi (MPa)

KAT : kadar air tanah (%b)

f_d : fraksi debu (%)

f_l : fraksi liat (%)

Keragaan model perhitungan CI telah diuji terhadap data testing yang telah diambil dari populasi sampel dan tidak disertakan dalam penurunan model dengan nilai RMSE, MAPE dan akurasi terhadap data testing masing-masing 0.235, 18.32% dan 81.68%. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rangkuman statistik kinerja model perhitungan nilai CI

	Model			Testing		
	RMSE	MAPE (%)	Akurasi (100 – MAPE)	RMSE	MAPE (%)	Akurasi (100 – MAPE)
Model regresi (persamaan 11)	0.164	13.05	86.95	0.235	18.32	81.68

Catatan: model yang baik ditunjukkan dengan RMSE <= 0.5

Perhitungan draft spesifik pengolahan tanah dengan formula (Kisu, 1972) memperhitungkan nilai tahanan penetrasi yang dimodifikasi dengan indek plastisitas. Indek plastisitas rata-rata di perkebunan Sidoarjo berdasarkan analisis laboratorium dan formula Kisu adalah masing-masing 33.91% dan 34.17% (Tabel 4). Indek plastisitas dengan formula Kisu terbukti dapat digunakan dalam penelitian ini. Dominansi fraksi pasir pada tanah perkebunan Kediri menyebabkan indek plastisitas tidak terdefinisikan karena di luar kemampuan uji peralatan laboratorium yang tersedia.

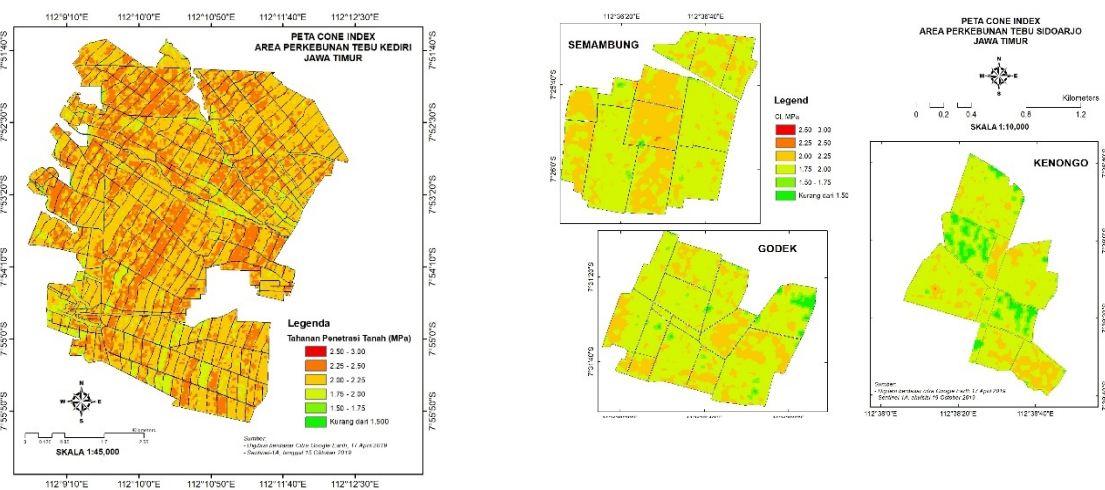
Untuk mendemonstrasikan fungsionalitas model yang telah dihasilkan, distribusi spasial tahanan penetrasi di perkebunan Kediri dan Sidoarjo, masing-masing pada tanggal 15 Oktober 2019 dan 19 Oktober 2019 telah dihitung dan disajikan secara visual pada Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada tanggal 15 Oktober 2019, nilai CI dominan pada lahan perkebunan Kediri adalah 2.00 – 2.50 MPa, sedangkan untuk ketiga blok perkebunan Sidoarjo pada 19 Oktober 2019, nilai CI dominan 1.75 – 2.00 MPa. Nilai CI yang lebih tinggi di Kediri disebabkan oleh koefisien gesek pada partikel pasir yang relatif lebih tinggi, yang terkandung dominan pada tanah perkebunan Kediri.

Tabel 4. Analisis laboratorium plastisitas tanah terhadap sampel dari perkebunan Kediri dan Sidoarjo dan perbandingan nilai indek plastisitas (IP) hasil analisis laboratorium dan perhitungan dengan formula (Kisu, 1972)

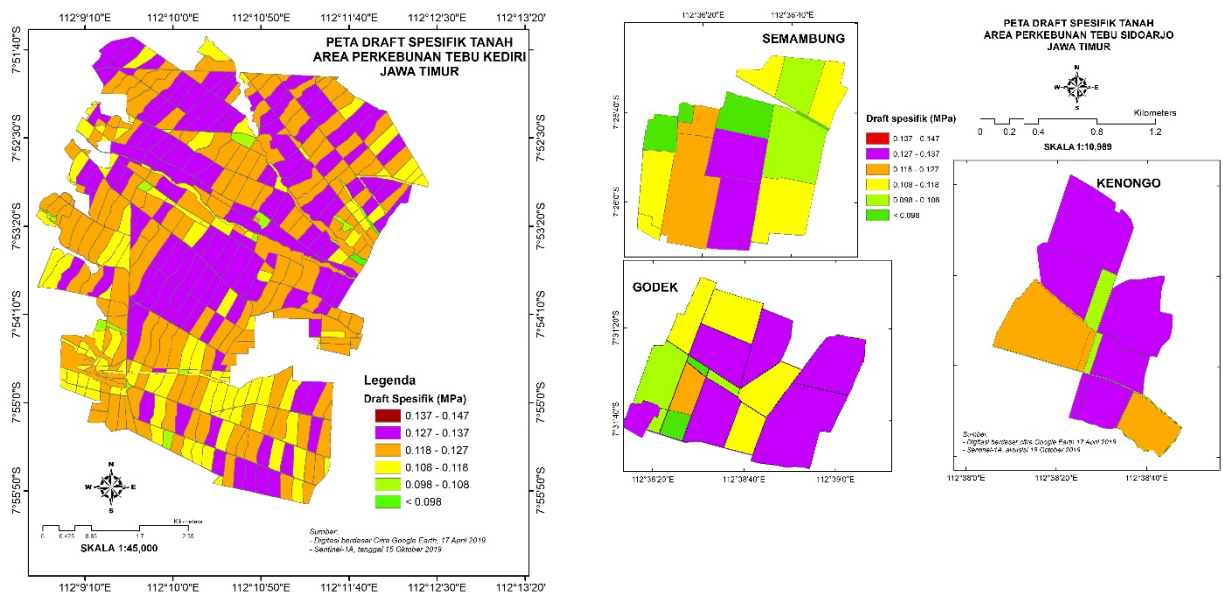
Lokasi	Kode	Batas Cair	Batas Plastis	IP (lab)	%fraksi liat	IP (Kisu, 1972)
Sidoarjo	GOD 150719	68.92	29.2	39.72	52.56	37.55
	SMB 150719	55.76	21.65	34.11	45.85	32.18
	KEN 150719	51.98	24.07	27.91	46.61	32.79
	Rata-rata	58.89	24.97	33.91	48.34	34.17
Kediri	JE 9240619	ttd	ttd	ttd	7.46	1.47
	JF 13240619	ttd	ttd	ttd	6.25	0.50
	JF 18240619	ttd	ttd	ttd	7.24	1.29
	Rata-rata	ttd	ttd	ttd	6.98	1.09

Pengujian plastisitas tanah dilakukan di Laboratorium Fisika Tanah Balai Besar Sumber Daya Lahan, Kementerian Pertanian (2019)



Gambar 6. Distribusi spasial CI perkebunan Kediri (kiri) dan Sidoarjo (kanan), masing-masing pada tanggal 15 Oktober 2022 dan 19 Oktober 2022

Draft spesifik pengolahan tanah (D) dihitung menggunakan formula 8 hingga 10. Nilai CI yang telah dihitung dan disajikan pada Gambar 6 menjadi input dalam perhitungan draft spesifik yang dimodifikasi dengan indek plastisitas tanah (D_{st}). Hasil perhitungan distribusi spasial draft spesifik pengolahan tanah di perkebunan tebu Kediri dan Sidoarjo disajikan dalam bentuk peta pada Gambar 7. Analisis *zonal statistic* menunjukkan bahwa di perkebunan tebu Kediri pada tanggal 15 Oktober 2019, sebagian besar area perkebunan memiliki nilai draft spesifik tanah 0.108 – 0.137 MPa. Nilai draft spesifik tanah pada area perkebunan tebu Sidoarjo, pada tanggal 19 Oktober 2019 merentang pada nilai 0.098 – 0.137 MPa.



Gambar 7 Peta distribusi draft spesifik tanah tanggal 15 Oktober 2019 di perkebunan tebu Kediri

4. Kesimpulan

Penelitian menunjukkan bahwa model Dubois dapat digunakan pada penentuan distribusi kadar air tanah spasial di Perkebunan Kediri dan Sidoarjo. Analisis statistik menunjukkan bahwa kadar air tanah, prosentase fraksi debu dan liat signifikan terhadap penentuan distribusi tahanan penetrasi (CI) di perkebunan tebu Kediri dan Sidoarjo. Pengujian model CI yang dihasilkan terhadap data testing menunjukkan model memiliki performa yang baik, dengan nilai RMSE, MAPE dan akurasi masing-masing 0.235, 18.32% dan 81.68%. Hasil perhitungan distribusi spasial kadar air tanah pada perkebunan Kediri dan Sidoarjo, data prosentase fraksi debu dan liat menjadi masukan dalam perhitungan dan pemetaan tahanan penetrasi (CI) pada dua lokasi penelitian. Distribusi spasial CI menjadi input penting dalam menghitung draft spesifik yang dimodifikasi dengan indek plastisitas berdasarkan formula Kisu, sehingga draft spesifik lahan perkebunan Kediri dan Sidoarjo dapat dihitung dan disajikan secara spasial. Hasil perhitungan menunjukkan pada tanggal 15 Oktober 2019, perkebunan Kediri memiliki nilai draft spesifik tanah dominan sebesar 0.118 – 0.137 MPa. Nilai draft spesifik tanah pada area perkebunan tebu Sidoarjo, pada tanggal 19 Oktober 2019 merentang pada nilai 0.088 – 0.137 MPa.

Distribusi spasial draft pengolahan tanah menjadi factor penting untuk menentukan kapasitas/daya alat traksi yang dapat dioperasikan pada pengolah lahan perkebunan. Dengan demikian, hubungan spesifik tersebut dapat dimanfaatkan untuk membantu praktek-praktek prinsip pertanian presisi pada pengolahan primer lahan perkebunan tebu.

Model yang dihasilkan pada penelitian ini berdasarkan data-data sampel dan pengukuran dari dua lokasi perkebunan, yaitu Kediri dan Sidoarjo. Penelitian lebih lanjut diperlukan pada lokasi perkebunan dengan karakteristik tanah dan lingkungan yang berbeda agar model dapat direplikasi dan digunakan lebih luas.

Penghargaan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Tebu, PTPN X

Kediri, Indonesia yang telah menyediakan peralatan pengukuran lapangan, fasilitas laboratorium, logistik dan dukungan operasional. Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia melalui Program *SEAMEO BIOTROP PhD Grant* tahun anggaran 2019, dengan nomor hibah 039.1/PSRP/SC/SPK-PNLT/II/2019.

Kontribusi Penulis

Harry Imantho, Kudang Boro Seminar, Wawan Hermawan dan Satyanto Krido Saptomo merancang penelitian, mengembangkan metodologi, melakukan analisis dan menulis naskah. Kurasi data, investigasi, analisis formal dan visualisasi oleh Harry Imantho; metodologi, supervisi, dan validasi oleh Kudang Boro Seminar, Wawan Hermawan dan Satyanto Krido Saptomo; penulisan review & editing oleh Harry Imantho, Kudang Boro Seminar, Wawan Hermawan dan Satyanto Krido Saptomo.

5. Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1965:2019 Metode uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan di laboratorium.
- Baghdadi, N., Choker, M., Zribi, M., Hajj, M. el, Paloscia, S., Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016a). A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces. *Remote Sensing*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/rs8110920>
- Baghdadi, N., Choker, M., Zribi, M., Hajj, M. E., Paloscia, S., Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016b). A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces. In *Remote Sensing* (Vol. 8, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/rs8110920>
- Busscher, W. J., Bauer, P. J., Camp, C. R., & Sojka, R. E. (1997). Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil and Tillage Research*, 43(3), 205–217. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00015-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00015-9)
- Diserens, A. B. A.-A. B. A.-E. (2017). Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. *Soil & Tillage Research*, v. 166, 18-32–2017 v.166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.005>
- Dubois, P. C., Zyl, J. van, & Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915–926. <https://doi.org/10.1109/36.406677>
- Gee-Clough, D., McAllister, M., Pearson, G., & Evernden, D. W. (1978). The empirical prediction of tractor-implement field performance. *Journal of Terramechanics*, 15(2), 81–94. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(78\)90026-5](https://doi.org/10.1016/0022-4898(78)90026-5)
- Gharibkhani, M., Mardani, A., & Vesali, F. (2012). Determination of wheel-soil rolling resistance of agricultural tire. *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 3(1), 6–11.
- Jabro, J. D., Stevens, W. B., Iversen, W. M., Sainju, U. M., & Allen, B. L. (2021). Soil cone index and bulk density of a sandy loam under no-till and conventional tillage in a corn-soybean rotation. *Soil and Tillage Research*, 206, 104842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104842>
- Kisu, M. (1972). Soil physical properties and machine performances. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 151–154.

- Kisu, M. (1979). Performance of Four Wheel Drive Tractor. *JARQ*, 13(2), 106–109.
- Kumar, A., Chen, Y., Sadek, M. A.-A., & Rahman, S. (2012). Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Gric Eng Int: CIGR Journal*, 14(1), 26–36.
- Kumar, A., Chen Ying, Al-Amin Sadek Mohammad, & Rahman Shafiqur. (2012). Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *CIGR Journal*, 14(1), 26–37.
- Macmillan, R. H. (2002). *The mechanics of tractor-implement performance: theory and worked examples: a textbook for students and engineers*. RH Macmillan.
- Miller, G. A., Tan, N. K., Collins, R. W., & Muraleetharan, K. K. (2018). Cone penetration testing in unsaturated soils. *Transportation Geotechnics*, 17, 85–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.008>
- Muro, T. (1993). Tractive performance of a driven rigid wheel on soft ground based on the analysis of soil-wheel interaction. *Journal of Terramechanics*, 30(5), 351–369. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(93\)90011-L](https://doi.org/10.1016/0022-4898(93)90011-L)
- Srivastava, H. S., Patel, P., Navalgund, R. R., & Sharma, Y. (2008). Retrieval of surface roughness using multi-polarized Envisat-1 ASAR data. *Geocarto International*, 23(1), 67–77. <https://doi.org/10.1080/10106040701538157>
- Yandun, F. J., Gregorio, E., Zúñiga, M., Escolá, A., Rosell-Polo, J. R., & Auat Cheein, F. A. (2016). Classifying Agricultural Terrain for Machinery Traversability Purposes**This work was supported by the Chilean National Commission for Scientific and Technological Research under grant CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2015-21150694, FONDECYT Grant 1140575,. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 457–462. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.083>