

Estimasi Tingkat Kesuburan Tanah dalam Jangkauan *Ring of Fire* menggunakan Pendekatan Citra Satelit (Studi Kasus: Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta)

Sindu Dinar Bangun Leksono (222112370, 4SI3)

Dosen Pembimbing: Robert Kurniawan, SST, M.Si

Ringkasan— Sejak awal tahun 2024, gunung Merapi sudah berada pada fase Siaga, namun masyarakat masih tinggal di Kecamatan Pakem yang mana berada pada kawasan rawan bencana merapi. Hal ini disebabkan karena kebutuhan hidup dan mayoritas masyarakat yang merupakan petani. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengukur tingkat kesuburan tanah pada Kecamatan Pakem, dan diharapkan agar pihak yang berkepentingan dapat menggunakan data yang dihasilkan untuk memperkuat argumen untuk melakukan relokasi warga yang berada pada kawasan rawan tingkat III sampai Merapi kembali ke fase Normal. Penelitian ini akan menggunakan Landsat 8-9 untuk citra satelit dan data yang diambil dari SoilGrid untuk mendapatkan data yang akan digunakan untuk melakukan estimasi tingkat kesuburan tanah.

Kata Kunci— Gunung Merapi, Kesuburan Tanah, Citra Satelit.

I. LATAR BELAKANG

Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) merupakan runtutan gunung berapi dan aktivitas tektonik yang sangat aktif yang mengelilingi Samudra Pasifik [1]. *Ring of Fire* (RoF) ini dimulai dari pesisir bagian barat Amerika Selatan dan Utara, lalu melewati Alaska dan menuju ke pesisir timur Asia sampai Selandia Baru dan akhirnya berhenti pada pesisir utara Antartika. Indonesia juga dilalui oleh Cincin Api Pasifik ini, dimana mayoritas gunungapi di Indonesia berada pada Cincin Api Pasifik ini, termasuk gunung Merapi.

Gunung Merapi merupakan gunung yang terletak di Provinsi Jawa Tengah dengan posisi geografis $110^{\circ} 26' 30''$ BT dan $7^{\circ} 32' 30''$ LS. Gunung Merapi merupakan gunungapi tipe strato yang paling aktif di Indonesia. Sejak tahun 1672 hingga 2010, tercatat lebih dari 80 kali letusan telah terjadi, dengan jeda rata-rata diantara letusan 4 tahun [2]. Untuk memudahkan dalam melakukan evakuasi, daerah di sekitar gunung Merapi dibagi menjadi 3 kawasan rawan bencana Merapi, yaitu Tingkat I, II, dan III, dimana Tingkat III merupakan daerah yang tidak boleh dihuni secara tetap karena sering terlanda awan panas, aliran lava, guguran batu, dan hujan abu lebat. Salah satu kabupaten yang berada pada Kawasan rawan bencana Merapi adalah kabupaten Sleman.

Kabupaten Sleman berada pada Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Beberapa kecamatan dalam kabupaten ini berada pada kawasan rawan bencana Merapi I, II, dan III [3]. Meski beberapa kecamatan termasuk dalam kawasan rawan bencana Merapi, kabupaten Sleman masih memiliki jumlah penduduk yang tidak sedikit. Tercatat, penduduk Sleman berjumlah 1.157.292 pada tahun 2023 [4]. Kabupaten Sleman merupakan salah satu kabupaten paling subur di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dikarenakan kandungan andosol yang berasal dari abu vulkanik yang mana baik untuk tanaman [5]. Kabupaten

Sleman memiliki produksi jagung terbesar di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, yang mana sebesar 41.619 ton, lalu produksi padi yang cukup besar juga, yaitu 115.162,23 ton [6].

Namun, meskipun terlihat bahwa kondisi geologi di Kabupaten Sleman terlihat aman dan menguntungkan, ada beberapa kekurangan tinggal di Kabupaten Sleman, khususnya pada kawasan rawan bencana Merapi. Gunung Merapi yang merupakan gunungapi tipe strato yang paling aktif di Indonesia menyebabkan keselamatan penduduk tidak terjamin. Berdasarkan Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, sepanjang tahun 2024 ini, gunung Merapi sudah berada di Tingkat III, yaitu Tingkat Siaga, yang dimana hanya dibawah tingkat IV (Awat) [7]. Tidak hanya hal tersebut, letusan gunung Merapi pada tahun 2010 juga sudah melampaui Peta Kawasan Rawan Bencana yang diterbitkan pada tahun 2002 oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi [2]. Meski sudah ada revisi Peta Kawasan Rawan Bencana setelah kejadian letusan gunung Merapi pada tahun 2010, hal ini juga tidak menutup kemungkinan hal yang sama tidak akan terulang.

Meski dengan adanya bahaya yang siap saja menerpa, Masyarakat masih tinggal di Kabupaten Sleman, Hal ini dikarenakan banyaknya Masyarakat yang memiliki pekerjaan dalam bidang pertanian yang mana mengandalkan Tingkat kesuburan tanah yang berada di wilayah tersebut. Berdasarkan Tingkat pekerjaan di Pakembinangun, Kecamatan Pakem, Kabupaten Sleman, Petani menempati urutan ke-6 dalam pekerjaan yang paling banyak dilakukan oleh warga disana, setelah Pelajar, Belum/Tidak Bekerja, Karyawan Swasta, mengurus rumah tangga, dan Wiraswasta [8].

Adanya limitasi dalam data *real-time* terkait kondisi vegetasi dan kesuburan tanah di Yogyakarta juga membuat warga tetap tinggal di daerah tersebut [9]. Untuk mengatasi hal ini, penggunaan citra satelit dapat menjadi jawabannya. Data citra satelit dapat menjadi potensi untuk mengatasi limitasi terkait data yang tersedia dalam jangka Panjang [10].

Penelitian dapat menggunakan *Machine learning* yang mana dapat digunakan untuk mengestimasi komposisi tanah maupun kualitas tanah. Penelitian Laamrani et.al. menggunakan *Partial Least Squares*, *Random Forest*, dan *Support Vector Machine* untuk mendapatkan estimasi kandungan karbon organik dalam tanah [11]. Penelitian Jia et.al. menggunakan *Partial Least Squares*, *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Convolutional Neural Network* untuk mendapatkan nilai Indeks Kesuburan Tanah [12].

Indikator yang digunakan oleh Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian untuk mengukur Tingkat kesuburan tanah adalah Kapasitas Tukar Kation, Kejenuhan Basa, C-organik, kadar

P205 tersedia, N total tanah dan pH tanah [13]. Lalu, untuk melakukan pemetaan terkait hasil estimasi Tingkat kesuburan tanah, dapat menggunakan *Inverse Distance Weighted* karena dinilai dapat memetakan data *Soil Organic Carbon* lebih baik dibanding dengan Kriging [14].

Berdasarkan permasalahan terkait keselamatan warga yang tetap tinggal di kawasan rawan bencana Merapi ketika kondisi Merapi sedang berada pada Tingkat Siaga, dikarenakan masalah pekerjaan dan kelangsungan hidup, yang mana banyak merupakan petani. Penelitian ini akan mencoba untuk melakukan estimasi Tingkat kesuburan tanah di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Harapannya setelah dilakukan penelitian ini, pihak yang berkepentingan dapat menggunakan data yang dihasilkan untuk memperkuat argument untuk melakukan relokasi terhadap warga yang masih tinggal di kawasan rawan bencana Merapi, terkhususnya yang tinggal di kawasan Tingkat III dan II sampai kondisi Merapi Kembali ke fase Normal.

II. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Implementasi metode *Machine Learning (Partial Least Square, Random Forest, Support Vector Machine, and Convolutional Neural Network)* dan mendapatkan metode yang paling optimal untuk menentukan Indeks Kesuburan Tanah.
2. Mendapatkan nilai estimasi Indeks Kesuburan Tanah di Yogyakarta pada tahun 2020.

III. PENELITIAN TERKAIT

TABEL I
TABEL LITERATUR

No	Judul	Penulis, Publikasi	Tertulis	Komentar
1	Development of a Spatial Model for Soil Quality Assessment under Arid and Semi-Arid Conditions	Mohamed S. Shokr, Mostafa. A. Abdellatif, Ahmed A. El Baroudy, Abdelrazek Elnashar, Esmat F. Ali, Abdelaziz A. Belal, Wael. Attia, Mukhtar Ahmed, Ali A. Aldosari, Zoltan Szantoi, Mohamed E. Jalhoum and Ahmed M. S. Kheir; 2021 Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	Penelitian ini membahas terkait pengukuran kualitas tanah dalam kondisi tandus dan semi tandus, berdasarkan fisika, biologi, dan kimia dari tanah tersebut [15].	Relevansi paper ini adalah terkait metode yang digunakan untuk mengukur kualitas tanah yang mana untuk validasi dilakukan secara langsung dengan mengambil sampel tanah.
2	Integrating Sentinel 2 Imagery with High-Resolution	Jessica T. Heath, Liam Grimmett, Tharani Gopalakrishnan, Rachael F.	Penelitian ini membahas terkait penggabungan gambar yang	Relevansi paper ini adalah penggunaan sentinel-2

	Elevation Data for Automated Inundation Monitoring in Vegetated Floodplain Wetlands	Thomas and Joanne Lenehan; 2024 Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	didapat dari Sentinel-2 dengan Digital Elevation Model yang ada untuk mendapatkan data yang digunakan untuk monitoring vegetasi [16].	yang digabung dengan DEM untuk mendapatkan peta elevasi suatu daerah
3	Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia	Veena Shashikant, Abdul Rashid Mohamed Shariff, Aimrun Wayayok, Md Rowshon Kamal, Yang Ping Lee and Wataru Takeuchi; 2021 Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	Penelitian ini membahas terkait penggunaan Tingkat kekeringan tanaman dan juga index kadar air untuk mengukur kekeringan tanaman di daerah Chuping, Malaysia [17].	Relevansi paper ini adalah penggunaan indeks NVDI untuk melakukan pengindraan citra satelit terhadap vegetasi.
4	Improving the drought monitoring capability of VHI at the global scale via ensemble indices for various vegetation types from 2001 to 2018	Zeng, J., Zhang, R., Qu, Y., Bento, V. A., Zhou, T., Lin, Y. C., Wu, X., Qi, J., Shui, W., & Wang, Q. (2022). Weather and Climate Extremes.	Penelitian ini membahas terkait cara untuk melakukan prediksi untuk datangnya kekeringan, dimana dengan meningkatkan performa indeks VHI yang akan dibandingkan dengan performa sebelumnya [18].	Relevansi paper ini berdasarkan bahwa indikator SMCi yang merupakan Indeks kondisi kelembapan tanah dapat digunakan sebagai indikator kesuburan tanah.
5	Soil quality – A critical review	Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). <i>Soil Biology and Biochemistry</i> , 120	Membahas terkait literatur review yang terkait dengan kualitas tanah [19].	Paper ini mendukung metode yang dilakukan dalam penelitian ini, lebih tepatnya pada bagian uji laboratorium dimana indikator yang digunakan sesuai dengan paper ini.
6	Remote sensing data	Galaś, A., Lewinska, P.,	Penelitian ini membahas	Relevansi paper ini

	applied to the reconstruction of volcanic activity in the Valley of the Volcanoes, Central Volcanic Zone, Peru	Aguilar, R., & Nowak, L. (2023). Journal of Geodynamics	terkait penggunaan remote sensing untuk memantau aktifitas volkaik di Peru [20].	adalah penggunaan remote sensing untuk melakukan monitoring daerah gunungapi
7	Soil quality degradation under horticulture practices in volcanic slope soil, East Java – Indonesia	S Kurniawan, M P Agustina, R A Wiwaha, A Y Wijaya and A D Fitria. (2021). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Penelitian ini membahas terkait degradasi yang terjadi pada tanah yang berada di lereng gunung dikarenakan oleh penggunaan tanah untuk holtikultura [21].	Relevansi paper ini adalah penelitian terkait tanah yang berada di gunung, dimana untuk kasus paper ini lebih berfokus pada efek degradasi dari penggunaan tanah.

				Informat ion
Clay Conte nt	g/kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion
Sand Conte nt	g/kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion
Silt Conte nt	g/kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion

IV. METODE PENELITIAN

A. Wilayah Studi

Penelitian ini berfokus pada estimasi kesuburan tanah pada Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

B. Sumber Data

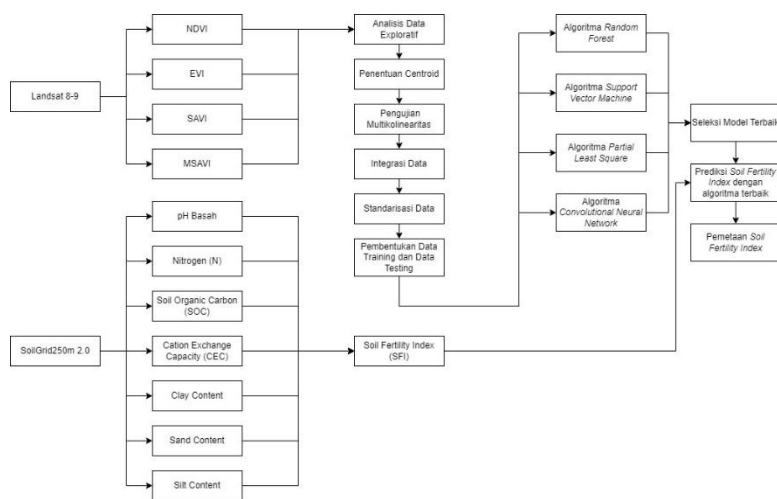
Berikut merupakan data yang akan digunakan dalam penelitian ini:

TABEL II
TABEL SUMBER DATA

Data	Satuan	Sumber	Waktu Pembaharuan	Referensi
Lands at 8-9 OLI TIRS/C2 L1	-	USGS Earth Explorer Website: https://earthexplorer.usgs.gov/	1 Januari 2024 – 30 September 2024	USGS – United States Geological Survey
Cation exchange capacity (at pH 7)	mmol(c) /kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion
Soil Organic Carbon	dg/kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion
pH Water	pH*10	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil Informat ion
Nitrogen	cg/kg	SoilGrids250m 2.0 Website: https://soilgrids.org/	Mei 2020	ISRIC – World Soil

C. Metode Penelitian

Untuk memenuhi tujuan yang dicantumkan, maka perlu dilakukan beberapa hal, yang mana dicantumkan dalam diagram alir berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

1. Mengambil data citra satelit

Peneliti akan mengambil data yang diperlukan untuk mendapatkan nilai NDVI, SAVI [22], EVI, dan MSAVI dari Landsat 8-9 OLI TIRS/C2 L1. Untuk perhitungannya di Landsat 8-9, didapatkan melalui rumus berikut:

TABEL III

TABEL RUMUS INDEX LANDSAT 8-9

Index	Rumus
NDVI [23]	$\frac{\text{Band 5} - \text{Band 4}}{\text{Band 5} + \text{Band 4}}$
EVI [24]	$2,5 * \frac{\text{Band 5} - \text{Band 4}}{\text{Band 5} + 6 * \text{Band 4} - 7,5 * \text{Band 2} + 1}$
SAVI [25]	$1,5 * \frac{\text{Band 5} - \text{Band 4}}{\text{Band 5} + \text{Band 4} + 0,5}$
MSAVI [26]	$\frac{2 * \text{Band 5} + 1 - \sqrt{(2 * \text{Band 5} + 1)^2 - 8 * (\text{Band 5} - \text{Band 4})}}{2}$

2. Pembentukan nilai Indeks Fertilitas Tanah (SFI)

Soil Fertility Index dapat didapatkan melalui nilai pH basa, Nitrogen total, Kandungan Karbon dalam tanah, *Cation Exchange Capacity*, jumlah lempung, jumlah pasir, dan jumlah tanah. Untuk rumus pencarian Indeks Kesuburan Tanah, menggunakan step-step berikut berikut [12]:

a. Pemilihan variabel yang akan digunakan menggunakan korelasi Pearson

b. Menentukan kombinasi koefisien linear dengan menggunakan rumus (i).

$$LCC_{nm} = \frac{CL_{nm}}{\sqrt{q_m}} \dots\dots\dots(i)$$

c. Menentukan nilai koefisien komprehensif dengan menggunakan rumus (ii).

$$CSC_n = \frac{\sum_m LCC_{nm} * PVE_m}{CP} \dots\dots\dots(ii)$$

d. Menghitung bobot yang didapat dengan melakukan normalisasi pada nilai koefisien komprehensif

e. Merubah nilai yang didapat dalam jangka 0 sampai 1.

3. Analisis Data Eksploratif

Melihat pola persebaran dari variabel yang didapatkan, dan juga membuat peta persebarannya.

4. Pembentukan Centroid

Menentukan titik centroid dari peta yang didapatkan menggunakan QGIS.

5. Pengujian Multikolinearitas

Menentukan apakah ada multikolinearitas antar variabel yang akan diuji. Jika ada korelasi antar variabel yang memiliki nilai $>0,8$, maka terdapat multikolinearitas, dan perlu diperbaiki.

6. Integrasi Data

Data yang telah didapatkan dilakukan integrasi untuk dilakukan tahap pengujian algoritma.

7. Standarisasi data

Data yang telah digabungkan masih memiliki satuan masing-masing. Oleh karena itu akan dilakukan standarisasi agar dapat dilakukan operasi.

8. Pembentukan Data Training dan Data Testing

Setelah data distandarisasi, data akan dipisah dengan rasio 80:20 sebagai Data Training dan Data Testing.

9. Pengujian Algoritma Machine Learning

Data training yang telah didapatkan akan diuji menggunakan algoritma *Partial Least Squares*, *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Convolutional Neural Network*.

10. Pemilihan Algoritma Optimal

Setelah dilakukan pengujian, maka akan dipilih algoritma optimal. Algoritma optimal didapat dari nilai MSE, RSE, dan R-squared. Akan dipilih yang memiliki nilai MSE dan RSE terkecil dan R-squared terbesar.

11. Prediksi nilai SFI dengan Algoritma Optimal

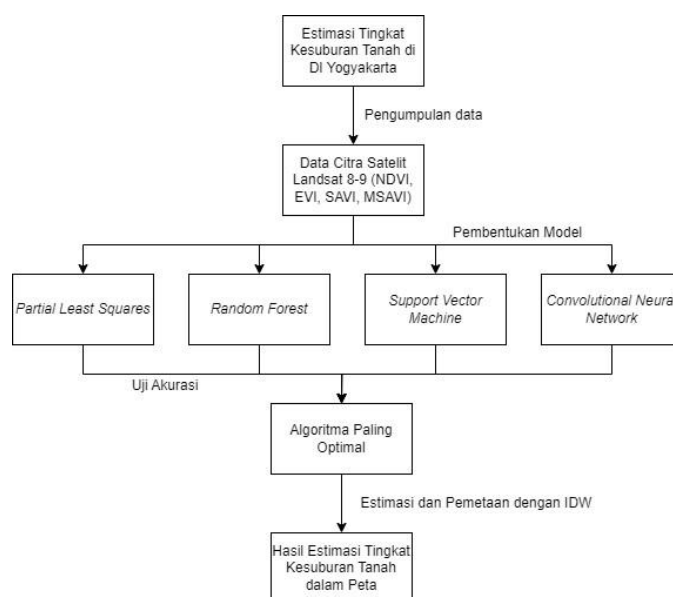
Setelah didapatkan algoritma optimal, maka akan dilakukan estimasi nilai SFI dengan menggunakan algoritma tersebut.

12. Pemetaan hasil estimasi dengan IDW

Hasil estimasi yang didapat akan dipetakan menggunakan metode IDW dengan alat QGIS

V. KERANGKA BERPIKIR

Berikut disajikan diagram alir kerangka berpikir dalam penelitian yang dilakukan:



Gambar 2. Diagram Alir Kerangka Berpikir

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan estimasi terkait nilai Indeks Fertilitas Tanah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Penelitian akan dimulai dengan mengumpulkan data citra satelit daerah Yogyakarta. Lalu dilakukan analisis data eksploratif yang mana hasilnya akan digunakan untuk pemodelan dengan pendekatan *Partial Least Squares*, *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Convolutional Neural Network*. Setelah dilakukan pemodelan, maka akan dipilih model yang optimal. Lalu, digunakan untuk mengestimasi nilai *Soil Fertilization Index* (SFI). Setelah didapatkan hasil estimasi, dipetakan menggunakan pendekatan *Inverse Distance Weighted* (IDW).

VI. RANCANGAN JADWAL PENELITIAN

Berikut disajikan rancangan jadwal penelitian yang akan dilakukan.

TABEL IV
RANCANGAN JADWAL PENELITIAN

Kegiatan	Tanggal Mulai	Tanggal Selesai
Mencari studi literatur terkait	7 Oktober 2024	28 Februari 2025
Penyusunan proposal	7 Oktober 2024	25 Oktober 2025

Deadline proposal di Sipadu	5 Desember 2024	6 Desember 2024
Penyusunan Bab I	1 November 2024	30 November 2024
Penyusunan Bab II	1 Desember 2024	31 Desember 2024
Pengambilan Sampel	23 Desember 2024	3 Januari 2025
Penyusunan Bab III	1 Januari 2025	31 Januari 2025
Penyusunan Bab IV & Bab V	1 Februari 2025	28 Februari 2025
Penyusunan makalah seminar & Artifak (Dashboard)	1 Maret 2025	29 April 2025
Penyerahan makalah seminar	30 April 2025	30 April 2025
Seminar skripsi	5 Mei 2025	23 Mei 2025
Revisi hasil seminar	24 Mei 2025	22 Juli 2025
Penyerahan makalah dan buku sidang	23 Juli 2025	23 Juli 2025
Ujian skripsi	28 Juli 2025	15 Agustus 2025
Penyelesaian buku skripsi	21 Agustus 2025	21 Agustus 2025
Pengumpulan buku skripsi dan <i>executive summary</i>	25 Agustus 2025	25 Agustus 2025

DAFTAR PUSTAKA

- Masum, M., & Akbar, M. A. (2019). The Pacific Ring of Fire is Working as a Home Country of Geothermal Resources in the World. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 249, 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012020>
- D.S. Sayudi, Nurnaning A., Juliani Dj., and M. Muzani. (2010). Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Merapi, Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta 2010. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2020, 11). Identifikasi Posisi Terhadap KRB Gunung Merapi, Gunakan Cekposisi. [Online]. Available: https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1x_yr195HxNUSN_yQLTYIhEvErT2V4TXv&hl=en&ll=7.63861232658951%2C110.44000564044987&z=12
- BPS Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, "Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dalam Angka 2024," Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dalam Angka, vol. 46, Daerah Istimewa Yogyakarta: BPS-Statistics of Daerah Istimewa Yogyakarta Province, 2024, pp. 94.
- T. Ban-Nai and Y. Muramatsu, "Transfer Factors of Radioiodine from Volcanic-ash Soil (Andosol) to Crops," Journal of Radiation Research, vol. 44, no. 1, pp. 23-30, Mar. 2003. DOI: 10.1269/jrr.44.23.
- BPS Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, "Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dalam Angka 2024," Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dalam Angka, vol. 46, Daerah Istimewa Yogyakarta: BPS-Statistics of Daerah Istimewa Yogyakarta Province, 2024, pp. 327-328.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024, 1). Laporan Aktivitas Gunung Api (Volcanic Activity Report). [Online]. Available: <https://magma.esdm.go.id/v1/gunung-api/laporan/search/q?code=MER&start=2024-01-01&end=2024-01-06&page=3>
- Pemerintah Kalurahan Pakembinangun. (2023). Statistik Berdasar Pekerjaan. [Online]. Available: <https://pakembinangunsid.slemankab.go.id/first/statistik/pekerjaan/0>
- Dinas Pertanian dan Pangan. (2017). Rencana Strategis Perangkat Daerah Tahun 2017-2022. [Online]. Available: https://simplaporan.jogjakota.go.id/upload/rpjmd/2020_03_02_02_52_17_RENSTRADA_DPP_2017-2022.pdf
- Das, A. C., Shahriar, S. A., Chowdhury, M. A., Hossain, L., Mahmud, S., Tusar, M. K., Ahmed, R., & Salam, M. A. (2023d). Assessment of remote sensing-based indices for drought monitoring in the north-western region of Bangladesh. Heliyon, 9(2), e13016. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13016>
- A. Laamrani, A.A. Berg, P. Voroney, H. Feilhauer, L. Blackburn, M. March, P.D. Dao, Y. He, R.C. Martin Ensemble identification of spectral bands related to soil organic carbon levels over an agricultural field in southern Ontario, Canada Remote Sens., 11 (11) (2019), p. 1298, 10.3390/rs11111298
- Jia, X.; Fang, Y.; Hu, B.; Yu, B.; Zhou, Y. Development of Soil Fertility Index Using Machine Learning and Visible-Near-Infrared Spectroscopy. Land 2023, 12, 2155. <https://doi.org/10.3390/land12122155>
- Balai Penelitian Tanah Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian. (2005). Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- J. G. Kalambukattu, S. Kumar, and Y. S. Ghotekar, "Spatial variability analysis of soil quality parameters in a watershed of Sub-Himalayan Landscape - A case study," Eurasian J. Soil Sci., vol. 7, no. 3, pp. 240, May 2018, doi:10.18393/ejss.427189.
- Shokr, M. S., Abdellatif, M. A., El Baroudy, A. A., Elnashar, A., Ali, E. F., Belal, A. A., Attia, W., Ahmed, M., Aldosari, A. A., Szantoi, Z., et al. (2021). Development of a Spatial Model for Soil Quality Assessment under Arid and Semi-Arid Conditions. Sustainability, 13(5), 2893. <https://doi.org/10.3390/su13052893>
- Heath, J. T., Grimmer, L., Gopalakrishnan, T., Thomas, R. F., & Lenehan, J. (2024). Integrating Sentinel 2 Imagery with High-Resolution Elevation Data for Automated Inundation Monitoring in Vegetated Floodplain Wetlands. Remote Sensing, 16(12), 2434. <https://doi.org/10.3390/rs16122434>
- Shashikant, V., Shariff, A. R. M., Wayayok, A., Kamal, M. R., Lee, Y. P., & Takeuchi, W. (2021). Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia. Agronomy, 11(6), 1243. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061243>
- Zeng, J., Zhang, R., Qu, Y., Bento, V. A., Zhou, T., Lin, Y. C., Wu, X., Qi, J., Shui, W., & Wang, Q. (2022). Improving the drought monitoring capability of VHI at the global scale via ensemble indices for various vegetation types from 2001 to 2018. Weather and Climate Extremes, 35, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100412>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Galaš, A., Lewinska, P., Aguilar, R., & Nowak, Ł. (2023). Remote sensing data applied to the reconstruction of volcanic activity in the Valley of the Volcanoes, Central Volcanic Zone, Peru. Journal of Geodynamics, 156, 101972. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101972>
- S Kurniawan et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 648 012062
- Sashikkumar, M.C., Selvam, S., Karthikeyan, N., Ramanamurthy, J., Venkatramanan, S., & Singaraja, C. (2017). Remote Sensing for Recognition and Monitoring of Vegetation Affected by Soil Properties. Journal Geological Society of India, 90(November), 609-615.
- United States Geological Survey. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>

- [24] United States Geological Survey. Landsat Enhanced Vegetation Index. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index>
- [25] United States Geological Survey. Landsat Soil Adjusted Vegetation Index. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>
- [26] United States Geological Survey. Landsat Modified Soil Adjusted Vegetation Index. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-modified-soil-adjusted-vegetation-index>