

## Similarity Analysis of Physical Properties of Red Soils Formed from Quaternary and Tertiary Volcanic Parent Materials

Eka Widiawati Wijaya Kusuma<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Kalimantan Barat, Indonesia;

### Article History

Received : November 14<sup>th</sup>, 2025

Revised : November 27<sup>th</sup>, 2025

Accepted : November 30<sup>th</sup>, 2025

\*Corresponding Author: **Eka Widiawati Wijaya Kusuma**,  
Program Studi Ilmu Tanah,  
Fakultas Pertanian, Universitas  
Tanjungpura, Pontianak,  
Kalimantan Barat, Indonesia;  
Email:  
[eka.wwk@faperta.untan.ac.id](mailto:eka.wwk@faperta.untan.ac.id)

**Abstract:** Indonesia hosts numerous active and inactive volcanoes that have produced a wide range of volcanic rocks, giving rise to diverse soil types, including red soils that are predominant in humid tropical regions. This study aimed to investigate the physical characteristics of two red soil pedons developed from Quaternary and Tertiary volcanic parent materials. Soil sampling was conducted at the Quaternary volcanic red soil pedon located in Tugu Village, Jumantono Sub-district, Karanganyar Regency, Central Java, and the Tertiary volcanic red soil pedon located in Nglanggeran Village, Patuk Sub-district, Gunungkidul Regency, Yogyakarta Special Region. Soil profile selection was conducted purposively based on morphological uniformity and representativeness. The analyzed soil physical properties included soil color, ten particle-size fractions, particle density, bulk density, and porosity. The highest degree of soil redness was observed in the Tertiary volcanic red soil pedon at Nglanggeran. This pedon comprises five horizons that mostly exhibit very low or uncertain degrees of similarity. In contrast, the Quaternary volcanic red soil pedon at Tugu consists of several horizons with comparable physical characteristics. Overall, the comparison between the Tertiary and Quaternary red soil pedons indicates substantial similarity, suggesting that the physical properties of mineral soils developed from volcanic materials are generally comparable despite differences in parent material age.

**Keywords:** Andesite, classification, pedogenesis, redness rating.

### Pendahuluan

Indonesia memiliki banyak gunungapi aktif dan tidak aktif, material yang dihasilkan adalah berbagai jenis batuan induk yang akan membentuk berbagai jenis tanah, salah satunya tanah berwarna merah yang sangat dominan di wilayah tropika basah (Anindita et al, 2023; Prasetyo, 2009). Warna tanah dapat sebagai indikator perkembangan tanah (Sirisathitkul and Sirisathitkul, 2025). Warna tanah juga sangat dipengaruhi oleh komposisi mineral dan bahan organik serta tingkat oksidasi lingkungan pembentukannya (Mainka et al, 2025). Tanah merah dikenal sebagai mineral lempung kemerahan yang sebagian besar tersusun besi (hidro) oksida yang melapisi partikel tanah (Fontes, 2024). Jenis tanah ini cenderung terbentuk di daerah beriklim hangat, sedang, lembab, dan di daerah yang tertutup hutan gugur atau hutan campuran (Hardjowigeno, 2016).

Bentang alam tanah khusus ini adalah yang utama tersebar di seluruh wilayah tropis dan subtropis, khususnya di Asia Tenggara, Oseania, Afrika, Amerika Selatan, dan bagian selatan Amerika Utara (Yu et al, 2016). Tanah merupakan hasil interaksi faktor pembentuk tanah, di mana bahan induk memiliki peranan penting dalam menentukan sifat fisik maupun kimia tanah (Buol et al, 2011; Jenny, 1941). Tanah merah yang berkembang dari bahan induk vulkanik di Indonesia umumnya menunjukkan karakteristik fisik yang khas, seperti tekstur halus, porositas tinggi, serta stabilitas agregat yang baik, sehingga berimplikasi pada kesesuaian lahan untuk pertanian dan konservasi (Shoji et al, 1993). Bahan induk vulkanik Kuartar yang relatif muda cenderung menghasilkan tanah dengan sifat fisik lebih baik, misalnya bulk density rendah dan kapasitas menahan air tinggi (Dahlgren et al, 2004). Sebaliknya, tanah yang berkembang dari bahan induk vulkanik.

Tersier yang lebih tua menunjukkan tingkat pelapukan lanjut, dengan kemungkinan perubahan sifat fisik akibat transformasi mineral liat primer menjadi mineral liat sekunder beraktivitas rendah (Vitousek and Chadwick, 2013). Namun, kajian komparatif mengenai kemiripan sifat fisik tanah merah yang berasal dari dua periode geologi vulkanik berbeda masih terbatas. Kajian tersebut penting untuk memperjelas hubungan antara dua pedon tanah yang berkembang dari batuan andesit pada dua periode geologis bahan induk yang berbeda dengan sifat fisik tanah, sekaligus sebagai dasar pengelolaan lahan pertanian dan konservasi pada ekosistem tropis vulkanik.

Meskipun prinsip umum bahwa umur bahan induk memengaruhi sifat fisik tanah telah terpetakan, pemahaman mendalam mengenai dinamika komparatif sifat fisik dua pedon tanah merah yang spesifik dan berdekatan—yang berasal dari batuan andesit pada periode geologis Kuarter dan Tersier—masih sangat terbatas. Keterbatasan kajian komparatif ini menimbulkan celah pengetahuan yang signifikan, terutama dalam ekosistem vulkanik tropis yang sensitif. Tanpa perbandingan langsung dan terperinci, sulit untuk mengidentifikasi ambang batas dan pola perubahan sifat fisik (seperti penurunan porositas, peningkatan kepadatan massa, atau perubahan stabilitas agregat) yang spesifik akibat perbedaan waktu geologis. Hal ini menghambat perumusan strategi pengelolaan lahan yang akurat. Oleh karena itu, perlu adanya klarifikasi empiris mengenai hubungan antara umur bahan induk vulkanik (Kuarter vs. Tersier) dengan tingkat perkembangan profil dan sifat fisik tanah, yang menjadi permasalahan utama dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Kebaruan (State of the art) dari penelitian ini adalah melakukan analisis komparatif pedon-spesifik untuk mengukur dan membandingkan secara kuantitatif sifat-sifat fisik kunci pada dua pedon tanah merah yang berkembang dari bahan induk vulkanik andesit dengan kontras umur geologis yang ekstrem (Kuarter dan Tersier). Pendekatan ini akan memberikan bukti empiris yang kuat untuk menjelaskan hubungan antara umur geologis bahan induk dan perkembangan profil tanah. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis dua pedon tanah merah yang berkembang dari bahan induk vulkanik berumur Kuarter dan Tersier guna mengetahui tingkat perkembangan profil tanah berdasarkan sifat

fisiknya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik sifat fisik dua profil tanah merah yang berasal dari bahan induk vulkanik Kuarter dan Tersier, dan secara agronomi dapat memberi informasi tentang konservasi tanah, serta dapat digunakan sebagai informasi dasar untuk penelitian selanjutnya.

## **Bahan dan Metode**

### **Waktu dan tempat penelitian**

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2024. Tempat pelaksanaan di Desa Tugu, Kecamatan Jumantono, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah dan di Desa Nglanggeran, Kecamatan Patuk, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

### **Survei dan Pengambilan Sampel Tanah**

Pengambilan sampel tanah (Gambar 1) dilakukan pada dua lokasi pedon yang berkembang dari bahan induk vulkanik. Lokasi profil pertama berada di Desa Tugu, Kecamatan Jumantono, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah, yang berasal dari batuan vulkanik berumur Kuarter, dengan koordinat UTM 49M X: 494531 dan Y: 9153819. Lokasi profil kedua berada di Desa Nglanggeran, Kecamatan Patuk, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang berasal dari batuan vulkanik berumur Tersier, dengan koordinat UTM 49M X: 446059 dan Y: 9131290.

Menentukan lokasi profil tanah dengan kriteria:

- a. Profil tanah pertama memiliki hue 10 R berdasarkan buku Munsell Soil Colour Chart yang berkembang di atas batuan induk vulkanik berumur Tersier dengan didahului oleh huruf T di depan simbol geologi pada Peta Geologi Indonesia (Gambar 2). Lokasi yang sesuai kriteria yaitu di Desa Nglanggeran, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta (Tabel 1)
- b. Profil tanah kedua memiliki hue 2,5 YR berdasarkan buku Munsell Soil Colour Chart yang berkembang di atas batuan induk vulkanik berumur Kuarter dengan didahului oleh huruf Q di depan simbol geologi pada Peta Geologi Indonesia (Gambar 3). Lokasi yang sesuai kriteria yaitu di Desa Tugu, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah (Tabel 2).

## Uji Sifat Fisik Tanah

Analisis sifat fisik tanah dalam penelitian ini meliputi pengukuran berat volume (BV), berat jenis (BJ), dan porositas tanah di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta. Sementara analisis tekstur tanah (10 fraksi) di Laboratorium Fisika Tanah Balai Penelitian Tanah Bogor. Jumlah sampel yang diambil sebanyak 5 sampel tanah yang mewakili setiap horison profil tanah yang berkembang dari batuan vulkanik berumur Tersier dan 4 sampel tanah yang mewakili setiap horison profil tanah yang berkembang dari batuan vulkanik berumur Kuarter. Setiap sampel tanah diambil 3 ulangan untuk dilakukan analisis sifat-sifat fisik tanah. Pengukuran berat volume dilakukan menggunakan metode bongkah (VanRemortel and Shields, 1993). Berat jenis tanah ditentukan menggunakan metode piknometer (Blake and Hartge, 1986). Nilai porositas tanah dihitung secara tidak langsung berdasarkan hubungan antara BV dan BJ. Sementara itu, tekstur tanah ditentukan dengan metode hidrometer dan pipet (Day 1965; Gee and Bauder 1986).

## Redness Rating

Redness rating (Buntley and Westin 1965) dimodifikasi (Cordova 2000) dalam (Lucke 2015):

$$RR_{BW} = H \times C$$

Semakin besar nilai Redness Rating (RR), maka warna merah semakin kuat.

Keterangan:

C = Chroma,  
H = Hue (10R = 7 | 2,5YR = 6 | 5YR = 5 | 7,5YR = 4 | 10YR = 3 | 2,5Y = 2 | 5Y = 1)

Redness rating (Hurst 1977) dalam (Lucke 2015):

$$RR_H = H \times \frac{V}{C}$$

Semakin kecil nilai Redness Rating (RR), maka warna merah semakin kuat.

Keterangan:

C = Chroma,  
V = Value,  
H = Hue (5R = 5 | 7,5R = 7,5 | 10R = 10 | 2,5YR = 12,5 | 5YR = 15 | 7,5YR = 17,5 | 10YR = 20)

Redness rating menurut (Torrent 1980) dalam (Lucke 2015):

$$RR_{T2} = (10 - H) \times \frac{C}{V}$$

Semakin besar nilai Redness Rating (RR), maka warna merah semakin kuat.

Keterangan:

C = Chroma,  
V = Value, dan  
H = Hue (7,5R = 12,5 | 10R = 10 | 2,5YR = 7,5 | 5YR = 5 | 7,5YR = 2,5 | 10YR = 0).

Redness rating menurut (Torrent 1983) dalam (Lucke 2015):

$$RR_{T2} = (10 - H) \times \frac{C}{V}$$

Semakin besar nilai Redness Rating (RR), maka warna merah semakin kuat.

Keterangan:

C = Chroma,  
V = Value, dan  
H = Hue didahului YR dalam Munsell, dengan 10 R = 0.

## Indeks Kemiripan

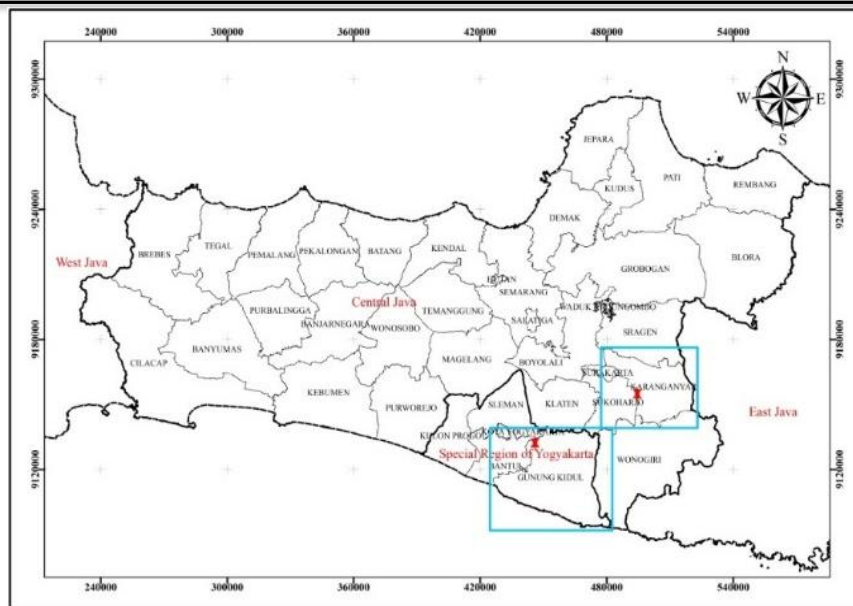
Rumus Indeks Kemiripan (Buol et al, 2011):

$$= \frac{2W}{A + B} \times 100$$

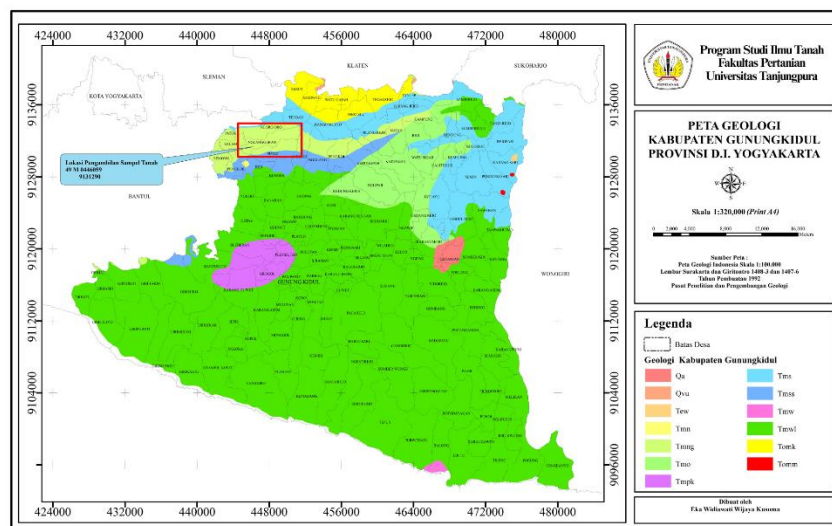
Jika nilai I > 80, maka kedua horison yang dibandingkan mirip; Jika 50 < I < 79, maka kedua horison yang dibandingkan diragukan; Dan jika I < 50, maka kedua horison yang dibandingkan tidak mirip.

Keterangan:

I = Indeks kemiripan  
W = Jumlah nisbi nilai terkecil antara dua parameter horison yang dibandingkan  
A + B = Jumlah nisbi tanah A dan tanah B



Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Sampel Tanah

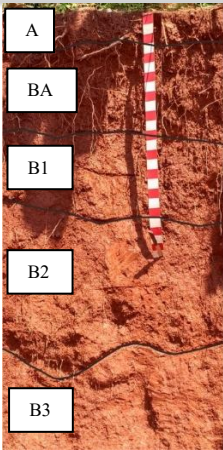


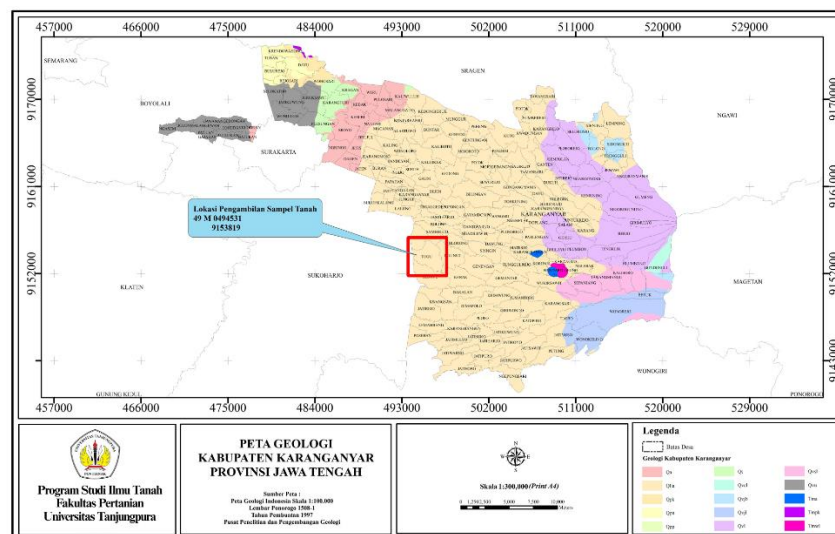
Gambar 2. Peta Geologi Kabupaten Gunungkidul

Tabel 1. Morfologi Profil Tanah Desa Nggalangeran Kabupaten Gunungkidul

|                   |                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elevasi           | : 234 mdpl                                                                                                                                                                                                                            |
| Koordinat         | : UTM 49 M, 446059, 9131290                                                                                                                                                                                                           |
| Fisiografi        | : Sistem Vulkanik                                                                                                                                                                                                                     |
| Kemiringan Lereng | : 40%                                                                                                                                                                                                                                 |
| Bentuk Topografi  | : Bergelombang                                                                                                                                                                                                                        |
| Kiblat Lereng     | : Barat                                                                                                                                                                                                                               |
| Vegetasi          | : Akasia, Pisang, Jati                                                                                                                                                                                                                |
| <hr/>             |                                                                                                                                                                                                                                       |
| A                 | 0 – 20/15<br>Warna 10 R 3/3 <i>Dusky Red</i> (merah kehitaman), tekstur lempung, struktur granuler halus, konsistensi basah agak lekat, konsistensi kering lepas, perakaran sangat banyak, batas antar horison baur dan bergelombang. |
| BA                | 20/15 – 70/72<br>Warna 10 R 4/8 <i>Red</i> (merah), tekstur lempung, struktur gumpal membulat halus, konsistensi basah lekat, konsistensi kering agak keras, perakaran sangat banyak, batas antar horison baur dan rata miring.       |
| B1                | 70/72 – 123/125<br>Warna 10 R 4/6 <i>Red</i> (merah), tekstur lempung, struktur gumpal bersudut halus, konsistensi basah sangat lekat,                                                                                                |



|                                                                                   |    |                         |                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |    |                         | konsistensi kering agak keras, perakaran cukup banyak, batas antar horison baur dan rata miring.                                                                                                                      |
|                                                                                   | B2 | 123/125<br>–<br>187/181 | Warna 10 R 4/8 <i>Red</i> (merah), tekstur lempung, struktur gumpal bersudut halus, konsistensi basah sangat lekat, konsistensi kering agak keras, perakaran sedikit, batas antar horison berangsur dan bergelombang. |
|                                                                                   | B3 | 187/181<br>– 350        | Warna 10 R 4/6 <i>Red</i> (merah), tekstur lempung debuan, struktur bongkah halus, tidak ada perakaran, konsistensi basah agak lekat, dan konsistensi kering agak keras.                                              |
|                                                                                   |    |                         |                                                                                                                                                                                                                       |



**Gambar 3.** Peta Geologi Kabupaten Karanganyar

**Tabel 2.** Morfologi Profil Tanah Desa Tugu Kabupaten Karanganyar

Elevasi

: 175 mdpl

Koordinat

: UTM 49 M, 494531, 9153819

Fisiografi

: Sistem Vulkanik

Kemiringan Lereng

: 11,25 %

Bentuk Topografi

: Teras

Kiblat Lereng

: Utara

Vegetasi

: Tebu, Jati, Cabai, Semak Belukar

A

B1

B2

BC

A

0 – 23/25

Warna 2,5 YR 4/4 *Reddish Brown* (coklat kemerahan), tekstur lempung, struktur granuler halus, konsistensi basah agak lekat, konsistensi kering lunak, perakaran sangat banyak, batas antar horison baur dan rata miring.

B1

23/25 – 53/58

Warna 2,5 YR 5/6 *Red* (merah), tekstur lempung, struktur gumpal bersudut halus, konsistensi basah agak lekat, konsistensi kering lepas, perakaran sangat banyak, batas antar horison baur dan rata miring.

B2

53/58 – 118/113

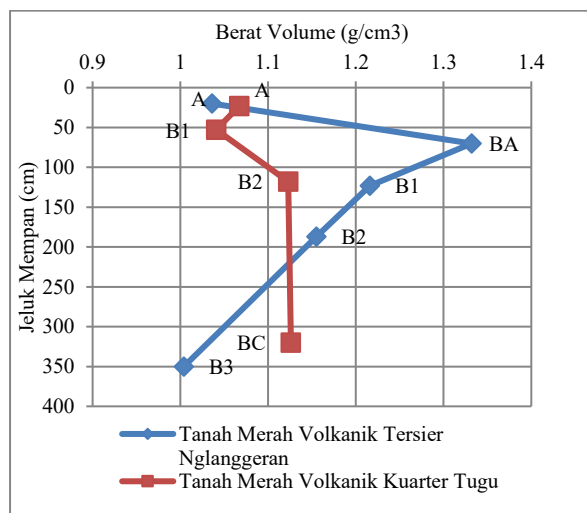
Warna 2,5 YR 5/8 *Red* (merah), tekstur lempung, struktur gumpal bersudut halus, konsistensi basah agak lekat, konsistensi kering agak keras, perakaran cukup banyak, batas antar horison berangsur dan bergelombang.

|    |         |                                                                                                                                                                    |
|----|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BC | 118/113 | Warna 2,5 YR 5/6 Red (merah), tekstur lempung, struktur gumpal membulat halus, perakaran sedikit, konsistensi basah agak lekat, dan konsistensi kering agak keras. |
|    | - 320   |                                                                                                                                                                    |

## Hasil dan Pembahasan

### Berat Volume (BV)

BV pada pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran sebesar 1,004 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 1,332 g/cm<sup>3</sup> sedangkan BV pada pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu sebesar 1,041 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 1,126 g/cm<sup>3</sup> (Gambar 4). Berat volum tanah permukaan dengan tekstur lempung, geluh lempungan, dan geluh debu normalnya berkisar 1,00 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 1,60 g/cm<sup>3</sup> tergantung kondisi lingkungan (Brady, 1974). Pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran pada horison BA memiliki BV tertinggi karena pengaruh adanya pelindian (leaching) fraksi lempung dari horison atas ke horison di bawahnya dan terjadi pelimpahan lempung di horison bawahnya, sementara pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu pada horison BC memiliki BV tertinggi karena pengaruh adanya pelimpahan bahan mineral dari horison C hasil pelapukan geokimia dari bahan induk di bawahnya menyebabkan horison tersebut menjadi lebih padat (Beckford et al, 2023; Brady and Weil, 2017; Buol et al, 2011).



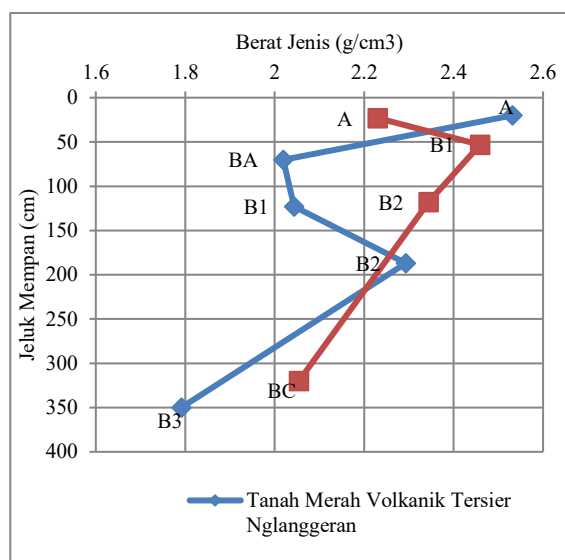
Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.

**Gambar 4.** Pola Agihan Cacak Berat Volume Tanah

### Berat Jenis (BJ)

BJ pada pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran sebesar 1,791 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,531 g/cm<sup>3</sup> sementara BJ pada pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu sebesar

2,054 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,459 g/cm<sup>3</sup> (Gambar 5). Pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran pada horison A memiliki nilai BJ tertinggi, profil tanah hutan dan tegalan dengan bahan induk breksi andesit memiliki horison A dengan BJ yang tinggi dibandingkan horison bawahnya (Minangkabau et al, 2023). Sementara pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu pada horison B1 juga memiliki nilai BJ tertinggi. Tanah merah yang telah mengalami pelapukan lanjut biasanya memiliki tekstur halus, kandungan mineral pasir tahan lapuk, dan mineral liat dominan seperti kaolinit, oksida besi, dan lain lain yang berimplikasi terhadap berat jenis dan densitas karena struktur dan mineralogi tanahnya (Hong et al, 2024; Prasetyo et al, 2006).

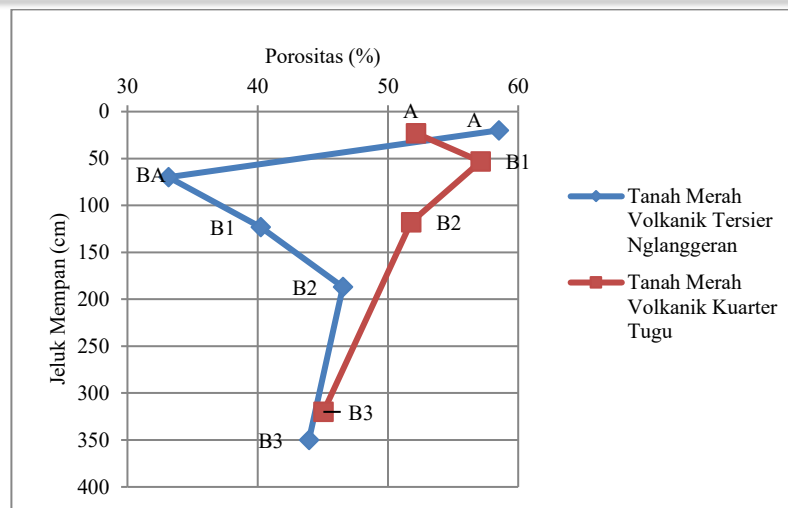


Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.

**Gambar 5.** Pola Agihan Cacak Berat Jenis Tanah

### Porositas

Porositas pada pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran sebesar 33,154 % sampai dengan 58,499 % sementara porositas pada pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu sebesar 45,044 % sampai dengan 57,113 % (Gambar 6), yang sesuai dengan kisaran porositas tanah mineral pada umumnya, yaitu 30–60% (Brady and Weil, 2017; Hersepuny et al, 2023; Hillel, 1998; Mokodompis et al, 2021).



Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.

**Gambar 6.** Pola Agihan Cacak Porositas Tanah

### Tekstur

Berdasarkan klasifikasi United States Department of Agriculture (Soil Survey Staff, 2022), pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran pada horison A, BA, B1, dan B2 memiliki tekstur lempung sedangkan horison B3 memiliki tekstur lempung debuan. Penimbunan fraksi lempung atau iluviasi ditemukan pada horison B1 dan B2 karena faktor iklim tropis dengan curah hujan tinggi membawa lempung dari horison atas mengalami pelindian (leaching) ke horison di bawahnya secara intensif, namun horison ini belum memenuhi syarat sebagai

horison argilik (Pratamaningsih *et al.*, 2024). Sementara pada pedon tanah merah vulkanik Kuarter Tugu memiliki tekstur lempung di seluruh horison yaitu horison A, B1, B2, dan BC, hal ini juga menunjukkan terjadinya perkembangan tanah lanjut. Tanah yang berkembang lanjut dari bahan induk andesit umumnya memiliki tekstur lempung hingga lempung debuan, sejalan dengan laporan yang menyebutkan dominasi fraksi halus (liat dan debu) pada tanah hasil pelapukan batuan andesitik (Imran and Sumbangan 2018; Prasetyo *et al.* 2006).

**Tabel 4.** Hasil Analisis Tekstur Tanah 10 Fraksi

| Profil                                   |    | Tekstur 10 Fraksi (%) |       |         |         |          |       |      |      |       |      | Tekstur 3 Fraksi (%) |      |       | Tekstur USDA |
|------------------------------------------|----|-----------------------|-------|---------|---------|----------|-------|------|------|-------|------|----------------------|------|-------|--------------|
|                                          |    | PSK                   | PK    | PS      | PH      | PSH      | DK    | DS   | DH   | LK    | LH   | P                    | D    | L     |              |
|                                          |    | 2-1                   | 1-0,5 | 0,5-0,2 | 0,2-0,1 | 0,1-0,05 | 50-20 | 20-5 | 5-2  | 2-0,2 | <0,2 | 2-0,05               | 50-2 | 2-0,2 |              |
|                                          |    | mm                    |       |         |         |          | µm    |      |      |       |      | mm                   | µm   | µm    |              |
| Tanah Merah Vulkanik Tersier Nglanggeran | A  | 0,5                   | 1,0   | 2,1     | 4,3     | 0,1      | 10,6  | 16,6 | 5,7  | 25,9  | 33,2 | 7,5                  | 32,9 | 59,1  | Lempung      |
|                                          | BA | 0,2                   | 0,2   | 0,5     | 1,2     | 0,1      | 15,5  | 15,5 | 8,5  | 31,7  | 26,6 | 2,2                  | 39,5 | 58,3  | Lempung      |
|                                          | B1 | 0,1                   | 0,4   | 0,6     | 1,5     | 0,1      | 6,8   | 23,6 | 1,7  | 37,1  | 28,1 | 2,7                  | 32,1 | 65,2  | Lempung      |
|                                          | B2 | 0,1                   | 0,3   | 0,5     | 1,2     | 0,1      | 3,2   | 27,2 | 1,9  | 36,2  | 29,3 | 2,2                  | 32,3 | 65,5  | Lempung      |
|                                          | B3 | 0,5                   | 0,6   | 1,3     | 3,5     | 0,1      | 10,7  | 29,0 | 2,1  | 18,4  | 33,8 | 6                    | 41,8 | 52,2  | Lempung Debu |
| Tanah Merah Vulkanik Kuarter Tugu        | A  | 0,5                   | 0,8   | 1,5     | 1,8     | 0,1      | 12,2  | 3,1  | 13,3 | 11,9  | 54,8 | 4,7                  | 28,6 | 66,7  | Lempung      |
|                                          | B1 | 0,3                   | 0,4   | 1,0     | 1,4     | 0,1      | 7,8   | 18,4 | 6,4  | 16,5  | 47,7 | 3,2                  | 32,6 | 64,2  | Lempung      |
|                                          | B2 | 0,4                   | 0,5   | 1,1     | 1,4     | 0,1      | 11,7  | 10,6 | 13,6 | 15,6  | 45,0 | 3,5                  | 35,9 | 60,6  | Lempung      |
|                                          | BC | 7,4                   | 0,4   | 0,8     | 1,2     | 0,1      | 3,9   | 15,9 | 12,3 | 15,2  | 42,8 | 2,9                  | 32,1 | 58    | Lempung      |

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Fisika Tanah Balai Penelitian Tanah Bogor.

Keterangan:

PSK : Pasir Sangat : D : Debu P : Pasir  
PK : Pasir Kasar K Kasar D : Debu

|     |                      |             |             |
|-----|----------------------|-------------|-------------|
| PS  | : Pasir Kasar        | D : Debu    | L : Lempung |
| PH  | : Pasir Sedang       | S Sedang    |             |
| PSH | : Pasir Halus        | D : Debu    |             |
|     | : Pasir Sangat Halus | H Halus     |             |
|     |                      | L : Lempung |             |
|     |                      | K Kasar     |             |
|     |                      | L : Lempung |             |
|     |                      | H Halus     |             |

Perkembangan tanah lebih besar terjadi pada pedon tanah merah vulkanik Kuartir Tugu sehingga memiliki jumlah lempung yang lebih besar dibandingkan dengan tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran (Tabel 4), hal ini sejalan dengan bentuk bahan induk kedua pedon yang berbeda, tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran terletak di formasi Nglanggeran yang secara geomorfologi tersusun atas breksi volkan andesitik, lava, aglomerat, breksi polimiks, dan batupasir tufaan, formasi ini diendapkan pada kala Oligomiosen–Miosen Tengah (Pratiknyo 2008) sedangkan bahan induk tanah merah vulkanik Kuartir Tugu dari lahar Lawu yang tersusun atas komponen andesit, basal, dan sedikit batupung beragam ukuran dan bercampur dengan pasir gunungapi dan batuan gunung api Lawu terutama terdiri dari tuf dan breksi vulkanik bersisipan dengan lava (Prawiradisastra, 2008), sehingga bahan induk tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran yang terbentuk lebih kompak dan lebih sulit lapuk daripada tanah merah vulkanik Kuartir Tugu. Faktor umur bahan induk vulkanik tidak mempengaruhi jumlah lempung karena bentuk bahan induk serta iklim memiliki pengaruh lebih besar terhadap proses pelapukan (Wagai et al, 2020). Tekstur dengan dominan fraksi lempung memiliki pengaruh besar terhadap sifat kimia maupun sifat fisiknya (Tan, 2014).

### Redness Rating

Tingkat kemerahan tanah paling kuat dimiliki oleh pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran (Tabel 5) dengan nilai RRBW tertinggi 56, nilai RRH terendah 5, nilai RRT1 tertinggi 20 dan nilai RRT2 tertinggi 20. Hal ini diduga karena adanya faktor waktu dimana bahan induk vulkanik Tersier lebih lama mengalami pelapukan dibandingkan dengan bahan induk vulkanik Kuartir, sehingga pencucian SiO<sub>2</sub> lebih tinggi dan meninggalkan senyawa-senyawa Fe yang menimbulkan warna merah (Trájer, 2023). Peningkatan konsentrasi besi pada kondisi oksidatif memfasilitasi pembentukan dan pengendapan fase-fase Fe (III) (ferrihidrit, goetit, hematit) serta presipitasi/sementasi oksida-besi berkrystal yang memberikan rona kuning–merah pada profil tanah, proporsi relatif hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) terhadap goetit (FeOOH) dan tingkat kristalinitasnya sangat menentukan intensitas warna merah yang tampak (Basinski et al, 2024; Meng et al, 2023). Sementara warna horison permukaan yang lebih gelap pada umumnya disebabkan oleh akumulasi bahan organik dari serasah dan sisa-sisa vegetasi, karena materi organik (humus) sebagai pigmen yang menurunkan nilai kecerahan (value) dan mengubah hue/chroma permukaan tanah (Łachacz and Załuski, 2023).

**Tabel 5.** Hasil Pengamatan dan Perhitungan Redness Rating Tanah

| Profil                                   |    | Warna<br>(dalam keadaan kering) |                      | Redness Rating   |                 |                  |                  |
|------------------------------------------|----|---------------------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
|                                          |    |                                 |                      | RR <sub>BW</sub> | RR <sub>H</sub> | RR <sub>T1</sub> | RR <sub>T2</sub> |
| Tanah Merah Vulkanik Tersier Nglanggeran | A  | 10 R 3/3                        | <i>Dusky Red</i>     | 21               | 10              | 10               | 10               |
|                                          | BA | 10 R 4/8                        | <i>Red</i>           | 56               | 5               | 20               | 20               |
|                                          | B1 | 10 R 4/6                        | <i>Red</i>           | 42               | 6,6             | 15               | 15               |
|                                          | B2 | 10 R 4/8                        | <i>Red</i>           | 56               | 5               | 20               | 20               |
|                                          | B3 | 10 R 4/6                        | <i>Red</i>           | 42               | 6,6             | 15               | 15               |
| Tanah Merah Vulkanik Kuartir Tugu        | A  | 2,5 YR 4/4                      | <i>Reddish Brown</i> | 24               | 12,5            | 7,5              | 7,5              |
|                                          | B1 | 2,5 YR 5/6                      | <i>Red</i>           | 36               | 10,4            | 9                | 9                |
|                                          | B2 | 2,5 YR 5/8                      | <i>Red</i>           | 48               | 7,8             | 12               | 12               |
|                                          | BC | 2,5 YR 5/6                      | <i>Red</i>           | 36               | 10,4            | 9                | 9                |



Sumber: Hasil Analisis Lapangan di Desa Nglanggeran, Patuk, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Desa Tugu, Jumantono, Karanganyar, Jawa Tengah

Keterangan:

$RR_{BW}$ ,  $RR_{T1}$ ,  $RR_{T2}$  : Semakin besar nilai indeks, maka warna merah semakin kuat.  
 $RR_H$  : Semakin kecil nilai indeks, maka warna merah semakin kuat.

### Indeks Kemiripan

Indeks kemiripan dihitung berdasarkan hasil analisis sifat fisik tanah seperti berat jenis, berat volume, porositas, dan tekstur tanah. Pedon tanah merah vulkanik Tersier di Nglanggeran (Tabel 6) memiliki lima horison yang hampir seluruhnya menunjukkan tingkat kemiripan sangat rendah atau diragukan, karena pedon tanah sudah berkembang sangat lanjut yang menyebabkan eluviasi fraksi lempung mempengaruhi sifat fisik tanah. Sementara horison B1 dan horison B2 memiliki sifat yang sangat mirip karena horison B1 adalah alihrupa dari B2. Antarhorison pada tanah merah yang berkembang dari bahan induk andesit umumnya tidak memiliki kemiripan sifat fisik, karena perbedaan intensitas pelapukan dan akumulasi liat pada setiap horison, sehingga tekstur, porositas, dan berat jenis tanah bervariasi secara vertikal (Imran and Sumbangan, 2018; Prasetyo et al, 2006). Pedon tanah dari tuf vulkanik andesit menunjukkan struktur tanah yang berbeda antar horison, termasuk konsistensi (friable - sangat friable), struktur partikel dan konsistensi yang bervariasi, mendukung bahwa sifat fisik berubah vertikal antar horison (Yatno and Zaayah, 2012). Meskipun bahan induknya basaltik andesit, sifat fisik seperti warna dan tektur berbeda antar pedon dan horison di lokasi yang berbeda (Muslim et al, 2020). Pedon tanah merah

vulkanik Kuarter di Tugu (Tabel 6) memiliki banyak horison dengan sifat-sifat yang saling mirip, karena kandungan fraksi lempung yang tidak berbeda jauh di seluruh horison sehingga mempengaruhi sifat fisiknya. Antarhorison tanah merah yang berkembang dari andesit berumur Kuarter cenderung memiliki kemiripan sifat fisik, karena proses pedogenesisnya masih relatif muda sehingga diferensiasi horison belum berkembang tajam, ditunjukkan oleh tekstur, struktur, dan konsistensi tanah yang relatif seragam pada kedalaman berbeda (Devnita et al. 2024; Muslim et al. 2020).

Perbandingan antar horison pada pedon tanah merah vulkanik Tersier dan pedon tanah merah vulkanik Kuarter terdapat banyak kemiripan, hal ini menunjukkan bahwa sifat fisik tanah mineral secara umum tidak jauh berbeda. Kemiripan ini berkaitan dengan karakteristik bahan induk andesitik yang umumnya kaya akan mineral plagioklas, piroksen, dan hornblende, yang mengalami pelapukan membentuk fraksi liat berjenis smektit dan kaolinit serupa pada kedua pedon (Watanabe et al, 2020). Selain itu, kondisi iklim tropis basah mempercepat proses pelapukan mineral primer andesit menjadi mineral sekunder yang mirip, sehingga menghasilkan tekstur, struktur, dan warna tanah yang relatif mirip.

**Tabel 6.** Indeks Kemiripan Sifat Fisik Tanah

| Tanah Merah Vulkanik Tersier Nglanggeran |     |       |       |       |       | Tanah Merah Vulkanik Kuarter Tugu |       |       |       |
|------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | A   | BA    | B1    | B2    | B3    | A                                 | B1    | B2    | BC    |
| A                                        | 100 | 35,32 | 48,53 | 56,75 | 48,75 | 67,19                             | 80,87 | 73,58 | 59,20 |
|                                          | BA  | 100   | 67,10 | 66,57 | 45,29 | 28,06                             | 36,36 | 56,17 | 51,69 |
| Tanah Merah Vulkanik Tersier Nglanggeran |     | B1    | 100   | 81,35 | 42,24 | 58,83                             | 62,54 | 68,05 | 71,47 |
|                                          |     | B2    | 100   | 39,52 | 64,92 | 70,13                             | 74,90 | 66,29 |       |
|                                          |     | B3    | 100   | 31,20 | 33,76 | 50,07                             | 38,81 |       |       |
| Tanah Merah Vulkanik Kuarter Tugu        | A   | 100   | 77,16 | 71,17 | 60,49 |                                   |       |       |       |
|                                          | B1  | 100   | 79,80 | 67,27 |       |                                   |       |       |       |
|                                          | B2  | 100   | 73,89 |       |       |                                   |       |       |       |
|                                          |     | BC    | 100   |       |       |                                   |       |       |       |

**Keterangan :**

|                                                                                   |       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------|
|  | < 50  | : Tidak mirip         |
|  | 50-70 | : Kemiripan diragukan |
|  | 70-80 | : Mirip               |
|  | >80   | : Sangat mirip        |

**Kesimpulan**

Tingkat kemerahan tanah paling kuat dimiliki oleh pedon tanah merah vulkanik Tersier Nglanggeran. Pedon tanah merah vulkanik Tersier di Nglanggeran memiliki lima horison yang hampir seluruhnya menunjukkan tingkat kemiripan sangat rendah atau diragukan. Sementara pedon tanah merah vulkanik Kuarter di Tugu memiliki banyak horison dengan sifat-sifat yang saling mirip. Perbandingan antar horison pada pedon tanah merah Tersier dan pedon tanah merah Kuarter terdapat banyak kemiripan, hal ini menunjukkan bahwa sifat fisik tanah mineral secara umum tidak jauh berbeda.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak-pihak yang terlibat dalam penelitian ini.

**Referensi**

- Anindita, S., P. Finke, and S. Sleutel. 2023. "Tropical Andosol Organic Carbon Quality and Degradability in Relation to Soil Geochemistry as Affected by Land Use." *SOIL* 9:443–459. doi: <https://doi.org/10.5194/soil-9-443-2023>.
- Basinski, J. J., S. E. Bone, A. .. Klein, and Et Al. 2024. "Unraveling Iron Oxides as Abiotic Catalysts of Organic Matter Transformations and Their Broader Role in Soil Biogeochemistry." *Nature Communications* 15:47931. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47931-z>.
- Beckford, H. O., C. Chang, and H. Ji. 2023. "Elemental Behavior during Weathering and Pedogenesis of Clay-Rich Red Soils Developed in Different Lithologies in Java–Madura and Sulawesi, Indonesia." *Sustainability* 15(6):493. doi: <https://doi.org/10.3390/su15064936>.
- Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. "Bulk Density and Particle Density." Pp. 363–375 in *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, edited by A. Klute. American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2e.d.ch15>.
- Brady, N. C. 1974. *The Nature and Properties of Soils*. 8th ed. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson.
- Buntley, G., and F. Westin. 1965. "A Comparative Study of Developmental Color in a Chestnut-Chernozem-Brunizem Soil Climosequence." *Soil Science of America Proceedings* 29:579–582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.036159951965002900050025x>.
- Buol, S. W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2011. *Soil Genesis and Classification*. 6th ed. Wiley-Blackwell.
- Cordova, Carlos. 2000. "Geomorphological Evidence of Intense Prehistoric Soil Erosion in the Highlands of Central Jordan." *Physical Geography* 21(6):538–567. <https://doi.org/10.1080/02723646.2000.10642735>.
- Dahlgren, R. A., M. Saigusa, and F. C. Ugolini. 2004. "The Nature, Properties, and Management of Volcanic Soils." *Advances in Agronomy* 82:113–182. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5).
- Day, P. R. 1965. "Particle Fractionation and Particle-Size Analysis." Pp. 545–567 in *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*, edited by C. A. Black. American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.1.ch33>.
- Devnita, R., M. Arifin, and A. Sandrawati. 2024. "Investigation of Lithologic Discontinuities Phenomenon in Andisols Derived from Mt. Patuha." *Soilrens* 22(1).

- <https://doi.org/10.24198/soilrens.v22i1.48839>
- Fontes, M. P. F. 2024. "Iron Oxide–Clay Mineral Association in Brazilian Oxisols: A Magnetic Separation Study." *Clays and Clay Minerals*. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1992.0400206>.
- Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. "Particle-Size Analysis." Pp. 383–411 in *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, edited by A. Klute. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2e.d.ch16>.
- Hardjowigeno, S. 2016. *Klasifikasi Tanah Dan Pedogenesis*. 2nd ed. Bekasi: Akademika Pressindo.
- Hersepuny, Y., A. R. Rangkuti, and H. Irianto. 2023. "Analisis Porositas Tanah Dan Hubungan Dengan Ketersediaan Air Pada Lahan Pertanian Padi Di Desa Meler." *Jurnal Ilmu Pertanian* 6(2):45–52. <https://doi.org/10.37058/jip.v6i2.7937>.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press.
- Hong, H., J. Wang, C. Wang, and Et Al. 2024. "Clay and Fe (Oxyhydr)Oxide Mineralogy in the Basalt Weathering Profile in Hainan (Southern China): Implications for Pedogenesis Process." *Clays and Clay Minerals* 72. <https://doi.org/10.1017/ccm.2024.14>.
- Hurst, V. J. 1977. "Visual Estimation of Iron in Saprolite." *Geological Society of America Bulletin* 88:174–176. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<174:VEOIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<174:VEOIS>2.0.CO;2)
- Imran, and B. Sumbangan. 2018. "Soil Classification at Family Categories from Tertiary Volcanic Rock Formation with Different Type of Lithology: A Case Study of Indonesia." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 145. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/145/1/012097>.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill.
- Łachacz, A., and Dariusz Załuski. 2023. "He Usefulness of the Munsell Colour Indices for Drained Soils: Relationships with Soil Organic Matter and Implications for Rapid Assessment." *He Usefulness of the Munsell Colour Indices for Drained Soils: Relationships with Soil Organic Matter and Implications for Rapid Assessment* 23:4017–4031. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03604-w>.
- Lucke, B; T. Sprafke. 2015. "Correlation of Soil Color, Redness Ratings, and Weathering Indices of Terrae Calcis along a Precipitation Gradient in Northern Jordan." Pp. 53–58 in *Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics*. Vol. 1. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11536-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11536-7_4)
- Mainka, Moritz, Laura Summerauer, Daniel Wasner, Gina Garland, Marco Griepentrog, Asmeret Asefaw Berhe, and Sebastian Doetterl. 2025. "Soil Geochemistry as a Driver of Soil Organic Matter Composition: Insights from a Soil Chronosequence." *Biogeosciences* 19:1675–1690. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-19-1675-2022>.
- Meng, Xianqiang, Gen K. Li, Xiaoyong Long, Shilei Li, and Junfeng Ji. 2023. "Quantifying Soil Goethite/Hematite Ratios: A New Method for Distinguishing Climatic and Pedogenic Controls on Iron Oxide Formation." *Geophysical Research Letters* 50(2). doi: <https://doi.org/10.1029/2022GL102280>.
- Minangkabau, M., F. N. Kusuma, and R. Yanti. 2023. "Morfologi Dan Klasifikasi Tanah Pada Formasi Waturanda Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah." *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan* 10(2):903–15. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.20>
- Mokodompis, Y., J. Mantiri, and C. Pakasi. 2021. "Porositas Dan Kadar Air Tersedia Tanah Di Bawah Tegakan Jati (Tectona Grandis L.f) Di Kelurahan Lawanga Tawongan." *AgroPet: Jurnal Ilmu Pertanian* 18(2):77–85. <https://doi.org/10.35791/agropet.v18i2.35513>
- Muslim, R. Q., M. M. Kricella, P., Pratamaningsih, S. Purwanto, E. Suryani, and S. Ritung. 2020. "Characteristics of Inceptisols Derived from Basaltic Andesite from Several Locations in Volcanic Landform." *Sains Tanah - Journal of Soil Science and Agroclimatology* 17(2). doi: <https://doi.org/10.20961/stjssa.v17i2.38221>.

- Nations, Food and Agriculture Organization of the United. 2006. Guidelines for Soil Description. edited by 4th.
- Prasetyo, B. H. 2009. "Red Soils From Various Parent Materials in Indonesia: The Prospect and Their Management Strategic." *Jurnal Sumberdaya Lahan* 3(1):47–60. doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v3n1.2009.47-60>.
- Prasetyo, B. H., Suriadikarta, D. A., Subardja, D., and Hikmatullah. 2006. "Tanah Merah Dari Berbagai Bahan Induk Di Indonesia: Prospek Dan Strategi Pengelolaannya." *Prosiding Lokakarya Nasional Tanah Merah* 1–21.
- Pratamaningsih, Mira Media, E. Erwinda, and S. Purwanto. 2024. "Soil Characteristics and Management of Ultisols Derived from Claystones of Sumatra." *J Trop Soils* 29(3):115–125. <https://doi.org/10.5400/jts.2024.v29i3.115-125>.
- Prawiradisastra, S. 2008. "Analisis Morfologi Dan Geologi Bencana Tanah Longsor Di Desa Ledoksari Kabupaten Karanganyar." *Jurnal Sains Dan Teknologi Indonesia* 10(2):84–89. <https://doi.org/10.29122>.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993. "Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization." *Developments in Soil Science*, Elsevier 21. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70007-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70007-7).
- Sirisathitkul, Y. Sirisathitkul, C. 2025. "Decoding Soil Color: Origins, Influences, and Methods of Analysis." *AgriEngineering* 7(3):58. doi: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030058>.
- Staff, Soil Survey. 2022. Keys to Soil Taxonomy USDA. 13th ed. Natural Resources Conservation Service.
- Tan, K. H. 2014. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*. 2nd ed. CRC Press.
- Torrent, Jose and Schwertmann. 1980. "Iron Oxide Mineralogy of Some Soils of Two River River Terrace Sequences in Spain." *Geoderma* 23:191–298. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(80\)90001-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(80)90001-X).
- Torrent, Jose and Schwertmann. 1983. "Quantitative Relationships between Soil Color and Hematite Content." *Soil Science* 136(6):354–358. <https://doi.org/10.1097/00010694-198312000-00004>.
- Träjer, A. J. 2023. "Characterization of Palaeoenvironmental Conditions in Relation to Intensified Weathering during the Tertiary." *Journal of Structural Geology* 112:1361–87. doi: <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02302-9>.
- Van Remortel, R. D., and D. A. Shields. 1993. "Soil Bulk Density Determination in Forest Soils." Pp. 2585–2594 in *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol. 24. <https://doi.org/10.1080/00103629309368940>.
- Vitousek, P. M., and O. A. Chadwick. 2013. "Pedogenic Thresholds and Soil Process Domains in Basalt-Derived Soils." *Ecosystems* 16(8):1379–1395. doi: <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9690-z>.
- Wagai, R., K. Kitayama, T. Satomura, K. Fujii, and T. Balser. 2020. "Mineral–Organic Associations in Volcanic Soils: Implications for Soil Carbon Dynamics and Weathering." *Geoderma* 366:114236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114236>.
- Watanabe, T., S. Shoji, and T. Takahashi. 2020. "Weathering Processes and Clay Mineral Formation in Andesitic Soils under Humid Tropical Conditions." *Geoderma* 370:114363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114363>.
- Yatno, E., and S. Zauyah. 2012. *Mineralogical, Physical, and Chemical Properties of Soils from Andesitic Volcanic Tuff of Mt. Burangrang, West Java*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Yu, J., C. Zhan, Y. Li, D. Zhou, Y. Fu, and X. Chu. 2016. "Distribution of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Coastal Wetland Soil Related to Land Use in the Modern Yellow River Delta." *Scientific Reports* 6. doi: <https://doi.org/10.1038/srep37940>.