

Research Article

Interaksi Bahan Induk Vulkanik dan Ketinggian Tempat Terhadap Beberapa Sifat Fisika Tanah Andisol di Sumatera Utara

Basyaruddin^{1*}¹Fakultas Pertanian, Agroteknologi, Universitas Islam Sumatera Utara, Medan,

* Corresponding author (✉basyaruddin1959@gmail.com)

ABSTRAK

Tanah Andisol di Sumatera Utara berkembang pada berbagai ketinggian tempat dan bahan induk vulkanik, yang berpotensi menimbulkan variasi sifat fisik tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh bahan induk vulkanik (formasi Qvbs dan Qvbj) dan ketinggian tempat terhadap sifat fisik tanah Andisol serta hubungan antar sifat fisik tersebut. Penelitian dilakukan pada 12 profil tanah yang mewakili dua formasi geologi dengan kisaran ketinggian ± 40 –1300 m dpl. Analisis sifat fisik tanah meliputi distribusi ukuran partikel, bobot isi, kekerasan tanah, kadar air tanah, dan kandungan air pada tekanan 15 bar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat fisik tanah Andisol dipengaruhi oleh interaksi antara bahan induk dan ketinggian tempat. Tanah pada formasi Qvbs umumnya menunjukkan tingkat pelapukan lebih lanjut, bobot isi dan kekerasan tanah yang lebih rendah, serta kapasitas menahan air yang lebih tinggi dibandingkan Qvbj, meskipun masih mencerminkan pengaruh bahan induk vulkanik muda. Peningkatan ketinggian tempat berasosiasi dengan perbaikan kualitas fisik tanah melalui peningkatan bahan organik dan pembentukan struktur tanah yang lebih stabil. Analisis korelasi dan regresi menunjukkan bahwa bahan organik dan mineral amorf (alofan dan ferihidrit) berperan dominan dalam mengendalikan bobot isi, kekerasan tanah, serta kadar dan kapasitas menahan air, sedangkan peran fraksi liat relatif kecil. Pada dataran rendah dengan pengelolaan intensif, pemadatan tanah meningkatkan bobot isi dan kekerasan hingga melampaui ambang kritis bagi pertumbuhan akar. Penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan tanah konservatif dan pemeliharaan bahan organik untuk menjaga kualitas fisik dan keberlanjutan pemanfaatan tanah Andisol.

Kata Kunci: Andisol; bahan induk vulkanik; ketinggian tempat; sifat fisik tanah; bahan organik; mineral amorf

PENDAHULUAN

Tanah Andisol merupakan salah satu tanah vulkanik yang memiliki karakteristik fisika dan kimia yang sangat khas, terutama karena berkembang dari material abu vulkanik kaya mineral amorf. Di daerah tropika basah, tanah ini dikenal memiliki bobot isi rendah, porositas tinggi, kapasitas menahan air besar, serta stabilitas agregat yang baik, sehingga berpotensi tinggi untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan apabila dikelola secara tepat (Shoji *et al.*, 1993; Dahlgren *et al.*, 2004). Di Sumatera Utara, tanah Andisol berkembang pada rentang ketinggian yang sangat luas, mulai dari dataran rendah sekitar 40 m dpl hingga dataran tinggi mencapai ± 1300 m dpl. Variasi ketinggian tempat tersebut berimplikasi langsung terhadap perbedaan unsur-unsur iklim, seperti suhu udara, kelembapan, dan curah hujan.

Edited by:

Yenni Asbur

UISU

Received:

10 Agustus 2025

Accepted:

7 November 2025

Published online:

1 Desember 2025

Citation:

Basyaruddin. (2025).
Interaksi Bahan Induk
Vulkanik dan Ketinggian
Tempat Terhadap
Beberapa Sifat Fisika
Tanah Andisol di
Sumatera Utara.

AGRILAND Jurnal Ilmu
Pertanian, 13(2), 70-78

Perubahan kondisi iklim mikro sepanjang gradien ketinggian ini menciptakan lingkungan pembentukan tanah yang berbeda, sehingga memengaruhi laju pelapukan, akumulasi bahan organik, serta perkembangan struktur tanah. Akibatnya, sifat-sifat tanah, termasuk sifat fisika tanah Andisol, menunjukkan variasi yang nyata sebagai respons terhadap perbedaan ketinggian melalui pengaruh iklim (Jenny, 1941; Minasny *et al.*, 2020). Secara geologis, tanah Andisol di wilayah ini umumnya berkembang dari abu vulkanik bersifat dasitik-andesitik. Bahan induk tersebut menghasilkan fraksi liat yang didominasi oleh mineral amorf, khususnya alofan, yang berperan besar dalam menentukan sifat fisika tanah. Keberadaan alofan menyebabkan tanah Andisol memiliki tekstur yang cenderung berdebu, bobot isi relatif ringan, kapasitas menahan air yang sangat tinggi, kemampuan dispersi yang rendah, sifat tiksotropik, serta kandungan bahan organik yang relatif tinggi. Sifat-sifat ini membedakan Andisol secara nyata dari tanah mineral lainnya (Shoji *et al.*, 1993; Nanzyo, 2021).

Perbedaan lingkungan dari satu tempat ke tempat lain akibat variasi ketinggian tidak hanya memengaruhi sifat tanah secara langsung melalui iklim, tetapi juga secara tidak langsung melalui dinamika bahan organik, aktivitas biologi tanah, dan stabilitas agregat. Penelitian-penelitian mutakhir menunjukkan bahwa pada tanah vulkanik, interaksi antara bahan induk dan faktor iklim yang direpresentasikan oleh ketinggian tempat sangat menentukan variasi sifat fisika tanah, terutama porositas, distribusi pori, dan retensi air tanah (Minasny *et al.*, 2020; Takahashi & Dahlgren, 2021).

Dalam kerangka faktor pembentuk tanah, sifat tanah dipahami sebagai hasil interaksi kompleks antara bahan induk, iklim, organisme, topografi, dan waktu (Jenny, 1941). Oleh karena itu, variasi sifat fisika tanah Andisol di Sumatera Utara tidak dapat dijelaskan hanya oleh perbedaan bahan induk vulkanik atau ketinggian tempat secara terpisah, melainkan merupakan hasil dari interaksi kedua faktor tersebut yang bekerja secara simultan selama proses pedogenesis. Pemahaman mengenai interaksi ini menjadi sangat penting, mengingat sifat fisika tanah berhubungan erat dengan kualitas sumber daya tanah, daya dukung lahan, serta efisiensi pengelolaan air dan hara.

Meskipun tanah Andisol merupakan sumber daya tanah yang sangat potensial dan memiliki keunikan tersendiri, terutama karena keberadaannya di dataran rendah vulkanik yang jarang dijumpai di wilayah lain, penelitian mengenai karakteristik fisika tanah Andisol pada berbagai ketinggian di Sumatera Utara masih relatif terbatas dalam publikasi ilmiah, khususnya yang mengkaji pengaruh interaksi bahan induk vulkanik dan ketinggian tempat secara terpadu. Padahal, informasi tersebut sangat diperlukan sebagai dasar ilmiah dalam perencanaan penggunaan lahan, pengelolaan pertanian, dan konservasi tanah secara rasional dan berkelanjutan (Bünemann *et al.*, 2018; Kome *et al.*, 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh dan interaksi bahan induk vulkanik dan ketinggian tempat terhadap sifat fisika tanah Andisol di Sumatera Utara, serta mengkaji variasi sifat fisika tanah Andisol yang berkembang pada berbagai kombinasi kondisi lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pedologi, khususnya pemahaman mengenai pedogenesis dan karakteristik fisika Andisol di daerah tropika basah, serta menjadi landasan ilmiah dalam pengelolaan tanah Andisol yang produktif dan berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanah Andisol yang berkembang pada dua formasi geologi vulkanik di Provinsi Sumatera Utara, yaitu formasi Qybs yang berasal dari bahan induk andesitik relatif lebih tua, dan formasi Qybj yang berasal dari bahan induk dasitik-andesitik relatif lebih muda. Kedua formasi tersebut dijumpai pada berbagai kelas ketinggian tempat, yang merepresentasikan perbedaan kondisi lingkungan pembentukan tanah sebagaimana diuraikan dalam Pendahuluan.

Sebanyak 12 profil tanah diamati pada masing-masing kombinasi formasi geologi dan ketinggian tempat. Dari seluruh profil tersebut, dikumpulkan 90 contoh tanah yang mewakili berbagai horizon genetis untuk dianalisis sifat fisiknya.

Pengambilan Contoh Tanah

Contoh tanah diambil dari setiap horizon secara terganggu dan tidak terganggu, tergantung pada jenis analisis yang dilakukan. Contoh tanah tidak terganggu diambil menggunakan ring sample untuk analisis bobot isi, sedangkan contoh tanah terganggu digunakan untuk analisis sifat fisika lainnya.

Analisis Beberapa Sifat Fisika Tanah

Analisis sifat fisika tanah dilakukan di laboratorium dengan metode baku. Parameter fisika tanah yang dianalisis meliputi: (1) Sebaran ukuran butir tanah, dianalisis menggunakan kombinasi metode pipet (12 fraksi) dan penyaringan, sesuai prosedur USDA (1972) (2) Bobot isi tanah pada kondisi kadar air setara 1/3 bar, ditentukan menggunakan ring sample, mengikuti metode USDA (1972). (3) Kekerasan tanah lapangan, diukur secara in situ menggunakan penetrometer. (4) Kadar air tanah lembab lapangan dan kering udara, ditentukan secara gravimetrik dengan pengeringan pada suhu 70 °C. (5) Kandungan air tanah pada tekanan 15 bar, ditentukan menggunakan Pressure Membrane Apparatus, sebagai indikator kemampuan tanah menahan air pada kondisi kering.

Parameter-parameter tersebut dipilih karena merepresentasikan sifat fisika utama tanah Andisol yang berhubungan dengan fungsi hidrologi dan kualitas fisik tanah.

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap sesuai dengan tujuan penelitian. Pencirian sifat fisika tanah Andisol dilakukan melalui analisis deskriptif dan komparatif untuk menggambarkan variasi sifat tanah antar bahan induk vulkanik dan kelas ketinggian tempat. Untuk mengevaluasi hubungan antar sifat fisika tanah, dilakukan analisis korelasi, sedangkan untuk mengkaji hubungan fungsional antara beberapa sifat fisika tanah digunakan analisis regresi berganda. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola hubungan antar sifat fisika tanah serta peran relatif faktor pembentuk tanah, khususnya bahan induk vulkanik dan ketinggian tempat, dalam mengendalikan variasi sifat fisika tanah Andisol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran ukuran butir tanah Andisol pada kedua formasi geologi (Tabel 1) menunjukkan variasi yang erat kaitannya dengan umur dan sifat bahan induk, ketinggian tempat, serta posisi topografi.

Tanah Andisol pada formasi Qvbj umumnya didominasi oleh fraksi pasir pada hampir seluruh pedon, baik di dataran rendah maupun dataran lebih tinggi, dengan perbedaan antar ketinggian yang relatif tidak tegas. Namun demikian, terdapat kecenderungan peningkatan fraksi debu dan penurunan fraksi liat pada pedon di ketinggian menengah–tinggi (Tanjung Gunung), sedangkan pedon dataran rendah (Sei Mencirim) memperlihatkan kandungan pasir dan liat yang relatif lebih tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa pada formasi Qvbj pengaruh bahan induk masih dominan, sementara proses pelapukan dan diferensiasi fraksi halus belum berlangsung secara intensif.

Sebaliknya, pada formasi Qvbs, khususnya pada pedon dataran rendah Pancur Batu, dijumpai kandungan liat yang lebih tinggi dan pasir yang lebih rendah dibandingkan pedon dataran rendah formasi Qvbj. Kondisi ini mencerminkan tingkat pelapukan yang lebih lanjut dan peran iklim yang lebih kuat. Perbedaan tersebut selaras dengan sifat bahan induk Qvbs yang berumur lebih tua dan tersusun atas tuf vulkanik yang lebih porous, sehingga lebih mudah melapuk dibandingkan endapan lahar yang relatif masif pada formasi Qvbj. Pola serupa juga dilaporkan pada Andisol di berbagai wilayah vulkanik, di mana bahan abu berpori menunjukkan perkembangan fraksi halus yang lebih cepat (Shoji *et al.*, 1993; Dahlgren *et al.*, 2004; Takahashi & Dahlgren, 2021).

Tabel 1. Sebaran besar butir pedon perwakilan dataran rendah dan dataran tinggi formasi Qvbs dan Qvbj.

Pedon	Horizon	Pasir, %	Debu, %	Liat, %	Fraksi > 2 mm %
Formasi Qvbj					
SM (40m dml)	Ap	43,79	34,35	21,86	0,23
	A12	46,45	33,47	20,08	0,18
	B1	28,41	35,79	35,79	1,10
	B2	33,16	28,64	38,19	1,43
	B3	27,54	45,63	26,84	1,65
	BC	74,51	10,92	15,57	-
TG1 (550 m dml)*	A1	22,48	58,14	19,38	0,01
	AB	19,79	44,56	35,65	0,00
	BC	45,16	39,88	19,96	5,80
Formasi Qvbs PB (60 m dml)	Ap	32,83	23,36	43,81	0,00
	AB	22,48	26,83	50,69	0,00
	Bt1	19,51	19,32	61,17	0,00
	Bt2	38,00	24,80	37,20	0,00
KG4(1300 m dml)	Bw	48,55	28,94	22,51	0,23
	A11	46,55	34,01	19,44	0,00
	AB	37,68	38,35	23,97	0,00
	Bw	32,38	46,26	21,35	0,33
	BC	54,72	26,42	18,87	0,70

*) jumlah fragmen batuan > 2 mm mencapai lebih dari 75%; PB:Pancur Batu; BB:Bandar Baru; KG:Kuta Gadung; SM:Sei Mencirim; SP:Simpang Sipirok; TG:Tanjung Gunung

Perbedaan tingkat pelapukan tersebut tercermin pada susunan dan diferensiasi horizon tanah. Pada formasi Qvbj, susunan horizon umumnya masih sederhana (A–B–BC atau A–AB–BC) dan pada beberapa pedon di ketinggian menengah–tinggi dijumpai fragmen kasar dalam jumlah besar hingga mencapai kelas fragmental, yang menunjukkan bahwa pelapukan mineral primer masih terbatas dan pengaruh bahan induk tetap kuat. Sebaliknya, pada formasi Qvbs, terutama di dataran rendah, perkembangan horizon lebih lanjut dengan kehadiran horizon peralihan seperti Bt dan Bw, yang mengindikasikan intensitas pelapukan dan transformasi bahan tanah yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa interaksi antara formasi geologi dan ketinggian tempat mengendalikan variasi sifat fisika dan tingkat perkembangan tanah Andisol di Sumatera Utara, sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian Andisol di kawasan tropika basah lainnya (Minasny *et al.*, 2020; Nanzyo, 2021).

Bobot Isi

Bobot isi tanah menunjukkan pola yang konsisten dengan gradien ketinggian tempat. Pedon-pedon di dataran rendah pada formasi Qvbs (Pancur Batu) dan Qvbj (Sei Mencirim) umumnya memiliki bobot isi >0,9 g/cm³, kecuali pedon SM5, sedangkan pedon-pedon di dataran tinggi menunjukkan bobot isi <0,9 g/cm³. Pola ini mengindikasikan bahwa faktor iklim yang terkait dengan ketinggian berperan lebih kuat dibandingkan bahan induk dalam mengendalikan bobot isi tanah Andisol. Kondisi iklim di dataran tinggi yang lebih sejuk dan lembap mendukung akumulasi bahan organik serta pembentukan struktur tanah yang lebih remah, sehingga menurunkan bobot isi tanah.

Hasil analisis korelasi (Tabel 2 dan Tabel 3) memperlihatkan bahwa bobot isi berkorelasi negatif nyata dengan C-organik, alofan, ferihidrit, serta fraksi pasir tertentu, dan berkorelasi positif nyata dengan liat dan kekerasan tanah. Korelasi negatif menunjukkan bahwa peningkatan kandungan bahan organik dan mineral amorf menurunkan bobot isi melalui pembentukan agregat stabil dan peningkatan porositas tanah. Sebaliknya, peningkatan fraksi liat dan kekerasan tanah berkontribusi terhadap kenaikan bobot isi. Oleh karena itu, tingginya bobot isi pada pedon dataran rendah Pancur Batu (Qvbs) terutama disebabkan oleh kandungan liat yang tinggi dan rendahnya bahan organik serta mineral amorf, sedangkan pada pedon SM1–SM4 (Qvbj) tingginya bobot isi lebih berkaitan dengan rendahnya alofan, bahan organik, $\text{Alo} + \frac{1}{2}\text{Feo}$, serta tingginya kekerasan tanah. Perbedaan bobot isi antara pedon SM5 dan pedon SM1–SM4 dapat

dijelaskan oleh kandungan bahan organik dan alofan yang relatif lebih tinggi, serta liat dan kekerasan tanah yang lebih rendah pada pedon SM5.

Tabel 2. Koefisien korelasi antara bobot isi dengan beberapa sifat tanah.

Sifat tanah	Koefisien korelasi, r
C-organik	-0,65**
Alofan	-0,56**
Ferihidrit	-0,40**
Pasir total	-0,01
Pasir sangat kasar	-0,16
Pasir kasar	-0,34
Pasir sedang	-0,38**
Pasir halus	-0,01
Pasir sangat halus	-0,28
Debu	-0,11
Liat	0,37**
Kekerasan tanah	0,51**
Kadar air kering udara	-0,78**
Kandungan air 15 bar ku	-0,62**
Kandungan air 15 bar lb	-0,75**
Alo+1/2Feo	-0,33**

*:nyata pada taraf 0,05; **:nyata pada taraf 0,01

Hubungan fungsional antara bobot isi tanah dan beberapa sifat tanah dinyatakan dalam persamaan regresi berganda: $Y_{bi} = 1,15 - 0,0270(\text{C-organik}) - 0,0231(\text{alofan}) - 0,0077(\text{ferihidrit}) + 0,0014(\text{liat})$ dengan $R^2 = 0,54$. Persamaan ini menunjukkan bahwa bahan organik merupakan faktor paling dominan dalam mengendalikan bobot isi tanah *Andisol*, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi tertinggi ($r = -0,65^{**}$) dan koefisien regresi terbesar secara absolut. Temuan ini menegaskan bahwa variasi bobot isi tanah *Andisol* di Sumatera Utara merupakan hasil interaksi antara kondisi iklim (ketinggian) dan sifat internal tanah, khususnya kandungan bahan organik dan mineral amorf, yang secara bersama-sama menentukan kualitas fisik dan tingkat perkembangan tanah.

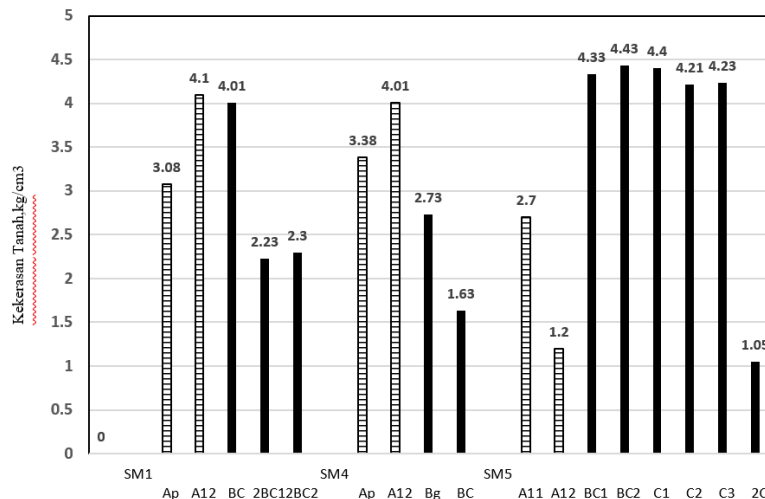
Tabel 3. Koefisien korelasi bahan organik dan alofan dengan kandungan air tanah.

Kandungan air	Bahan organik	Alofan
Lembab lapang (alami)	0,60**	0,69**
Kering udara	0,69**	0,65**
Lembab 15 bar	0,75**	0,77**
Kering udara 15 bar	0,76**	0,67**

** : nyata pada taraf 0,01

Kekerasan Tanah

Kekerasan tanah, yang dinyatakan sebagai kemampuan tanah menahan beban (kg/cm^3), merupakan indikator penting kondisi fisik tanah karena berkaitan langsung dengan kemudahan penetrasi akar, tingkat pemadatan tanah, dan kemantapan struktur tanah. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tingkat kekerasan tanah bervariasi antar horizon dalam satu pedon, dengan kecenderungan umum lebih rendah pada horizon horizon A dan meningkat pada horizon bawah (horizon B) (Gambar 1). Namun, pola ini tidak dijumpai pada pedon-pedon di Sei Mencirim (SM1 dan SM4), di mana horizon permukaan justru menunjukkan kekerasan tanah relatif tinggi ($\pm 3,0-4,4 \text{ kg cm}^{-3}$) dan menurun ke horizon bawah. Kondisi ini berasosiasi dengan jumlah akar yang semakin berkurang ke arah bawah, menunjukkan bahwa kekerasan tanah berperan sebagai faktor pembatas perkembangan sistem perakaran.



Gambar 1. Tingkat kekerasan tanah menurut horizaon pada pedon-pedon di Sei Mencirim

Perbedaan pola vertikal kekerasan tanah antara pedon SM1–SM4 dan SM5 menunjukkan pengaruh kuat aktivitas pengelolaan lahan. Pedon SM1–SM4 terletak pada areal perkebunan yang telah mengalami pengolahan tanah intensif dan mekanisasi berat dalam jangka waktu lama, sejak budidaya tembakau Deli hingga konversi menjadi perkebunan tebu. Perlakuan tersebut menyebabkan pemadatan tanah pada lapisan olah, pencampuran horizon permukaan dan bawah, serta terganggunya batas antar horizon. Sebaliknya, pedon SM5 yang berada di luar areal perkebunan menunjukkan kekerasan tanah horizon permukaan yang lebih rendah dan peningkatan kekerasan secara normal ke horizon bawah, mencerminkan kondisi tanah yang relatif tidak terganggu. Temuan ini konsisten dengan konsep bahwa penggunaan alat berat dapat menimbulkan pemadatan subsoil akibat tekanan mekanik, terutama di bawah lapisan olah (Hillel, 1980).

Analisis korelasi (Tabel 5) memperkuat interpretasi tersebut, di mana kandungan bahan organik berkorelasi negatif nyata dengan tingkat kekerasan tanah, baik pada formasi Qvbj ($r = -0,58^{**}$) maupun Qvbs ($r = -0,42^{**}$), sedangkan fraksi pasir berkorelasi positif dan liat tidak menunjukkan hubungan yang nyata. Rendahnya kandungan bahan organik, yang dipercepat oleh pengolahan tanah intensif dan kondisi iklim panas–basah, menyebabkan berkurangnya stabilitas agregat dan meningkatnya kekerasan tanah. Fakta bahwa kandungan liat tidak berkorelasi nyata dengan kekerasan tanah menunjukkan bahwa pemadatan mekanis, bukan tekstur atau proses iluviasi liat, merupakan penyebab utama tingginya kekerasan tanah pada pedon SM1–SM4. Dengan nilai kekerasan tanah yang telah berada pada kisaran $>3,0 \text{ kg cm}^{-3}$, tanah-tanah tersebut dapat dikategorikan mulai mengalami degradasi fisik, karena nilai ini telah melampaui ambang kritis bagi pertumbuhan akar normal ($\leq 2,5 \text{ kg cm}^{-3}$). Tanpa upaya konservasi dan perbaikan pengelolaan, tingkat degradasi fisik tanah diperkirakan akan terus meningkat.

Tabel 5. Hubungan kekerasan tanah dan beberapa sifat tanah

Sifat tanah	Koefisien korelasi
C-organik	-0,58**
Pasir total	0,33**
Pasir sangat kasar	0,35**
Pasir kasar	0,35**
Pasir sedang	0,36**
Pasir halus	0,29**
Debu	-0,36**
Ferihidrit	-0,36**
Liat	-0,06

** : nyata pada taraf 0,01

Kadar Air Tanah Lembab Lapang dan Kering Udara

Kadar air tanah pada kondisi lembab lapang dan kering udara (Tabel 6) menunjukkan variasi yang jelas antar pedon, baik antara dataran tinggi dan dataran rendah, bahan induk formasi Qvbs dan Qvbj, maupun posisi topografi punggung bukit dan cekungan.

Tabel 6. Kandungan air tanah alami horizon A dan B pada pedon yang diteliti (%)

Pedon	Tanah Lembab Lapangan		Tanah Kering Udara	
	Horizon A	Horizon B	Horizon A	Horizon B
Formasi Qvbs				
PB/pb/60m dml	42,32	47,13	10,24	13,83
BB1/kl/800m dml	152,80	174,36	51,72	61,59
BB2 /tl	121,57	165,62	28,23	46,73
BB3/pb	111,72	133,26	37,20	39,45
KG1/kl ₁ /1300 m dml	68,26	91,62	14,80	19,33
KG2/tl	62,43	131,38	14,61	29,55
KG3/kl ₂	64,79	110,66	14,63	20,27
KG4/pb	55,52	110,91	26,12	52,42
KJ/tl/1100 m dml	61,95	96,57	26,50	47,66
Formasi Qvbj				
SM1/pb/40 m dml	36,92	38,31	9,15	8,17
SM2/tl	36,84	38,03	8,43	11,70
SM3/kl	30,08	50,75	9,55	16,11
SM4/tl	22,40	31,58	5,32	6,38
SM5/pb	37,13	43,13	17,61	21,94
NT1/100 m dml	87,78	102,71	20,43	22,18
NT2	100,18	148,59	20,72	33,50
SP/pb/200 m dml	95,86	84,09	39,71	20,90
TG3/kl/400 m dml	78,14	195,61	24,20	53,61
TG2/pb	125,45	151,32	71,38	56,59
TG1/pb/550 m dml	113,26	136,66	58,73	58,26

pb:punggung bukit; kl:kaki lereng; tl:tengah lereng

Pedon-pedon di dataran tinggi umumnya memiliki kadar air yang lebih tinggi dibandingkan pedon dataran rendah, yang mencerminkan pengaruh kondisi iklim yang lebih sejuk dan lembap serta akumulasi bahan organik yang lebih besar. Kadar air tanah lembab lapang tidak hanya mencerminkan status kelembapan tanah, tetapi juga berperan dalam menentukan kondisi aerasi, keseimbangan reduksi-oksidasi, serta intensitas pelapukan mineral dan pembentukan mineral liat amorf dalam tanah *Andisol*.

Hasil analisis korelasi dan regresi linier menunjukkan bahwa kandungan C-organik (X_1), alofan (X_2), dan liat (X_3) berhubungan sangat nyata dengan kadar air tanah, baik pada kondisi lembab lapang (tlb) $R^2 = 0,47^{**}$ maupun kering udara (tku) $R^2 = 0,46^{**}$.

$$Y_{tlb} = 14,06 + 5,94 (X_1) + 3,14 (X_2) + 0,19 (X_3) \quad R^2 : 0,47^{**}$$

$$Y_{tku} = -2,17 + 2,14 (X_1) + 1,19 (X_2) + 0,14 (X_3) \quad R^2 : 0,46^{**}$$

Persamaan regresi menunjukkan bahwa bahan organik merupakan faktor paling dominan dalam mengendalikan kadar air tanah, diikuti oleh alofan, sedangkan kontribusi liat relatif lebih kecil. Hal ini menegaskan bahwa pada tanah *Andisol*, mineral amorf dan bahan organik memiliki peran utama dalam meningkatkan kemampuan tanah menahan air, sementara fraksi liat berperan sekunder. Temuan ini konsisten dengan karakteristik *Andisol* di daerah vulkanik tropika basah, di mana tingginya kandungan bahan organik dan alofan menjadi pengontrol utama sifat hidrofisika tanah.

Kandungan Air Tanah 15 bar

Kandungan air tanah pada tekanan 15 bar (1500 kPa) merupakan sifat penting dalam pencirian dan klasifikasi tanah *Andisol*, sekaligus indikator *irreversibilitas* sifat tanah akibat pengeringan.

Hasil pengukuran menunjukkan adanya keragaman kandungan air 15 bar antar formasi Qvbj dan Qvbs serta antar horizon tanah. Nilai kandungan air 15 bar pada kondisi tanah lembab dan kering udara memperlihatkan keterkaitan yang kuat dengan sifat-sifat tanah yang mencerminkan perbedaan komposisi bahan tanah dan tingkat perkembangan pedogenetik.

Analisis korelasi (Tabel 7) menunjukkan bahwa kandungan air 15 bar berkorelasi positif sangat nyata dengan C-organik, alofan, ferihidrit, serta berbagai bentuk Fe dan Al aktif, dan berkorelasi negatif dengan fraksi pasir. Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan bahan organik dan mineral amorf secara signifikan meningkatkan kapasitas tanah menahan air pada tekanan tinggi, sedangkan dominasi fraksi kasar menurunkannya. Fraksi debu juga berkontribusi besar terhadap kapasitas menahan air, diduga karena

sifatnya yang porous dan kemampuannya membentuk mikroagregat stabil dengan liat amorf. Sebaliknya, fraksi liat tidak menunjukkan korelasi nyata, yang mengindikasikan bahwa jumlah liat tidak selalu mencerminkan kapasitas menahan air pada Andisol akibat heterogenitas mineral dan kesulitan dispersi.

Tabel 7. Koefisien korelasi kandungan air tanah 15 bar dengan beberapa sifat tanah

Sifat tanah	Tanah kering udara	Tanah lembab
C-organik	0,75**	0,76**
Alofan	0,67**	0,77**
Liat	0,24	0,21
Debu	0,48*	0,43**
Pasir total	-0,46**	-0,40**
Pasir sangat kasar	-0,42**	-0,39**
Pasir kasar	-0,47**	-0,44**
Pasir sedang	-0,50**	-0,46**
Pasir halus	-0,43**	-0,35**
Pasir sangat halus	0,03	0,09
Ferihidrit	0,70**	0,66**
Alo+1/2Feo	0,76**	0,71**
Alo	0,71**	0,67**
Feo	0,66**	0,66**
Fep	0,64**	0,60**
Alp	0,44*	0,40**

*: nyata pada taraf 0,05; **: nyata pada taraf 0,01

Hasil analisis regresi mempertegas bahwa bahan organik dan alofan merupakan pengendali utama kandungan air 15 bar, sedangkan peran liat relatif kecil. Hubungan fungsional antara kandungan air tanah pada tekanan 15 bar dengan beberapa sifat tanah dinyatakan oleh persamaan regresi:

$$Y_{15}(\text{lembab}) = 3,64 + 4,13(\text{C-organik}) + 3,35(\text{alofan}) + 0,35(\text{liat}) \text{ dengan } R^2 = 0,59$$

$$Y_{15}(\text{kering udara}) = 4,21 + 3,69(\text{C-organik}) + 1,68(\text{alofan}) + 0,25(\text{liat}) \text{ dengan } R^2 = 0,45.$$

Penurunan nilai koefisien regresi pada contoh tanah kering udara dibandingkan tanah lembab menunjukkan adanya sifat tidak dapat balik (*irreversible*) akibat pengeringan, yang mengurangi kemampuan tanah menyerap dan menahan air. Temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan kelembapan tanah untuk mencegah kekeringan berlebihan dan mempertahankan fungsi hidrofisika tanah *Andisol* secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Sifat fisik tanah *Andisol* di Sumatera Utara dikendalikan oleh interaksi antara bahan induk vulkanik dan ketinggian tempat. Tanah yang berkembang pada formasi Qvbs (andesitik lebih tua dan berpori) menunjukkan bobot isi dan kekerasan tanah lebih rendah, kapasitas menahan air lebih tinggi, serta diferensiasi horizon yang lebih berkembang dibandingkan tanah pada formasi Qvbj (dasitik-andesitik lebih muda dan relatif masif), yang masih memperlihatkan dominasi pengaruh bahan induk. Peningkatan ketinggian tempat berasosiasi dengan perbaikan kualitas fisik tanah melalui iklim yang lebih sejuk dan lembap, yang mendukung akumulasi bahan organik dan pembentukan struktur tanah yang lebih stabil. Hubungan antar sifat tanah menegaskan peran dominan bahan organik dan mineral amorf (alofan dan ferihidrit): keduanya berkorelasi negatif dengan bobot isi dan kekerasan tanah serta positif dengan kadar dan kapasitas menahan air (termasuk 15 bar), sementara peran fraksi liat relatif kecil. Pengelolaan lahan memodifikasi hubungan alami ini; pada dataran rendah formasi Qvbj, pengolahan intensif dan mekanisasi meningkatkan pemadatan, sehingga bobot isi dan kekerasan tanah melampaui ambang kritis bagi pertumbuhan akar.

Pengelolaan *Andisol* perlu dibedakan menurut bahan induk dan ketinggian. Pada formasi Qvbj dataran rendah, diterapkan olah tanah minimum/konservasi dan pembatasan alat berat untuk mencegah pemadatan. Pelestarian dan peningkatan bahan organik (residu, mulsa) harus menjadi prioritas utama untuk memperbaiki struktur, menurunkan bobot isi dan kekerasan, serta meningkatkan retensi air. Manajemen

kelembapan tanah penting untuk mencegah pengeringan berlebihan mengingat sifat Andisol yang cenderung irreversibel. Penelitian lanjutan disarankan mengintegrasikan sifat fisik dengan dinamika karbon dan stabilitas agregat guna memperkuat rekomendasi pengelolaan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bradford, J. M. (1986). Penetrability. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1*. ASA-SSSA, Madison, WI.
- Cameron, N. R., Clarke, M. C. G., Aldiss, D. T., Aspden, J. A., & Djunuddin, A. (1982). *The Geological Evolution of Northern Sumatra*. Geological Research and Development Centre, Bandung.
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy*, 82, 113–182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- Dane, J. H., & Topp, G. C. (2002). *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 635–662). ASA-SSSA, Madison, WI.
- Kome, G. K., Enang, R. K., Tabi, F. O., & Yerima, B. P. K. (2021). Influence of altitude on soil properties and classification. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 12(2), 29–41. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2021.0746>
- Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., & Wheeler, I. (2020). Soil properties and the environment. *Geoderma*, 366, 114214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114214>
- Nanzyo, M. (2021). Unique properties of Andisols and their management. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(2), 115–125. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1873186>
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. A. (1993). *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization*. Elsevier, Amsterdam.
- Soil Survey Staff (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). USDA-NRCS, Washington, DC.
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1997). *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York.
- Takahashi, T., & Dahlgren, R. A. (2021). Climate and parent material controls on volcanic soil properties. *Catena*, 201, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105208>
- USDA (1972). *Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples*. Soil Survey Investigations Report No. 1. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.