Vol 8 No 2 Tahun 2026 E-ISSN: 2715-9469

ANALISIS PERMUKAAN DANGKAL BERDASARKAN METODE TRANSIENT SOIL THERMAL DI KAWASAN UNIVERSITAS SAMUDRA

Shanti Fadilah[1], Afrahun Naziah[2], Radhiyullah Armi[3]
[1,2]Fisika, Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
[3]Geofisika, Sains Dan Teknologi, Universitas Samudra
(Received: Agustus 2026 / Revised: September 2026 / Accepted: Oktober 2026)
*Email : shantifadilah733@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis variasi konduktivitas termal tanah pada lapisan dangkal di kawasan Laboratorium Dasar Universitas Samudra menggunakan metode transient. Pengukuran dilakukan pada 16 titik yang terbagi menjadi dua lintasan dengan menggunakan instrumen MAE Ground Soil Thermal TCR24. Data respons temperatur terhadap waktu diolah menggunakan Google Colab untuk memperoleh kemiringan kurva dan menghitung konduktivitas termal pada setiap titik pengamatan. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal berkisar antara 0,7264 hingga 3,7507 W/(m·K), dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,98695–0,99977. Nilai tertinggi ditemukan pada titik T5 L1, sedangkan nilai terendah ditemukan pada titik T4 L1. Variasi tersebut mengindikasikan adanya heterogenitas sifat termal tanah di lokasi penelitian. Namun, penentuan jenis material berdasarkan nilai konduktivitas termal perlu diperlakukan sebagai interpretasi awal karena belum didukung oleh pengujian langsung terhadap komposisi mineral, tekstur, porositas, dan kadar air. Hasil penelitian ini memberikan gambaran awal mengenai variasi sifat termal lapisan dangkal di kawasan Universitas Samudra.
Kata Kunci: *Konduktivitas Termal Tanah, MAE TCR24, Tanah, Transient,*

1. PENDAHULUAN

Sumber daya yang utama bagi kehidupan di bumi adalah tanah. Nutrisi, air, dan udara yang dibutuhkan oleh tanaman dan organisme tanah lainnya terdapat dalam tanah [1]. Mineral, bahan organik, air, udara yanag membentuk tanah bekerja sama untuk mempertahankan kehidupan. Selain menjadi media pertumbuhan vegetasi, tanah juga menyimpan air dan nutrisi yang di butuhkan tanaman [2]. Sebagai substansi yang terjadi secara alami, tanah selalu mengalami perubahan. Hal ini disebabkan oleh proses pelapukan yang berlangsung terus-menerus, yang membuat tanah menjadi semakin tua seiring waktu [3]. Pertumbuhan dan perkembangan tanaman sangat dipengaruhi oleh tanah yang kaya nutrisi dan mengandung cukup bahan organik, sehingga tanaman dapat mencapai potensi maksimalnya [4].

Proses sifat fisik yang terjadi di dalam tanah serta pertukaran massa dan energi dengan atmosfer, termasuk evaporasi dan aerasi, sangat dipengaruhi oleh suhu. Akibatnya suhu mempengaruhi seberapa baik perbedaan potensial permukaan tanah berfungsi [5]. suhu tanah merupakan suatu konsep yang bersifat luas, karena dapat digunakan untuk mengklasifikasikan karakteristik termal suatu sistem. Suhu tanah adalah suatu sifat fisik tanah yang sangat penting secara langsung mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan juga terhadap kelembapan, struktur, aktivitas mikrobial dan enzimatik, sisa tanaman, dan ketersediaan hara-hara tanaman [6].

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh [7], kepadatan volume tanah, permeabilitas, porositas, dan warna adalah beberapa sifat fisik tanah yang berkaitan dengan kondisi awalnya. suhu tanah juga dipengaruhi oleh tekstur, struktur, dan komposisi kimia tanah. Berbeda dengan tanah yang bertekstur kasar, tanah yang bertekstur halus umumnya memiliki kapasitas yang lebih tinggi untuk menahan air, yang memungkinkan tanah mempertahankan suhu yang lebih konsisten [8]

Penelitian konduktivitas termal dilakukan untuk mengetahui seberapa baik tanah mengantarkan panas. Penelitian ini dilakukan di kawasan Laboratorium Terpadu Universitas Samudra dengan tujuan untuk menganalisis nilai konduktivitas termal permukaan dangkal dengan menggunakan metode transient, yang didasarkan pada pengamatan kenaikan temperatur tanah.

Kajian konduktivitas termal tanah penting untuk memahami kemampuan material bawah permukaan dalam menghantarkan panas. Meskipun sifat termal tanah dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti komposisi mineral, porositas, kepadatan, dan kadar air, karakteristik tersebut dapat bervariasi secara spasial meskipun titik pengukuran berada pada kedalaman yang relatif sama. Oleh karena itu, pengukuran pada beberapa titik diperlukan untuk menggambarkan variasi lokal sifat termal tanah. Penelitian ini berfokus pada pemetaan awal variasi konduktivitas termal di kawasan Laboratorium Dasar Universitas Samudra melalui 16 titik pengamatan pada dua lintasan menggunakan metode transient. Kontribusi penelitian terletak pada penyajian data konduktivitas termal antartitik dan evaluasi awal heterogenitas sifat termal pada lokasi tersebut. Hasilnya diharapkan dapat menjadi data dasar bagi penelitian lanjutan yang menghubungkan sifat termal dengan karakteristik fisik dan mineralogi tanah.

2. METODE PENELITIAN

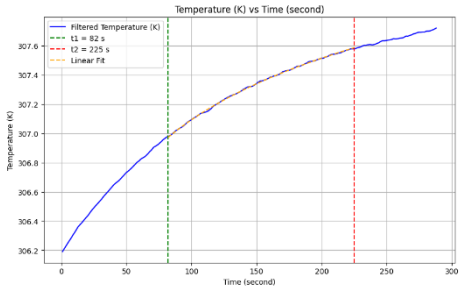
Penelitian ini dilakukan secara bertahap mulai dari kajian pustaka, survei pendahuluan, desain akuisisi, akuisisi data, pengolahan data, hingga interpretasi. Pada tahap kajian pustaka, penelitian mengumpulkan refrensi dari jurnal dan buku untuk memperkuat landasan teori. Survei pendahuluan dilakukan di lapangan untuk menentukan lokasi, menyiapkan peralatan, melakukan kalibrasi, serta memastikan titik pengukuran. Selanjutnya, desain akuisisi data menggunakan sistem grid agar distribusi titik merata dengan total 16 titik pengamatan. Tahap akuisisi data dilakukan dengan mengukur konduktivitas termal tanah menggunakan alat MAE Ground soil thermal TCR24 pada kedalaman 40 cm yang merupakan kedalaman pemasangan aktual probe dengan panjang maksimal probe 120 cm, lubang di buat di tanah menggunakan bor , kemudian probe dimasukkan kedalam lubang dengan menekan sedikit, ujung probe difiksasi dalam tanah sekitar 40 cm. kemudian menekan tombol, yang dikelola secara otomatis oleh instrumen dan berlangsung beberapa detik. Pengukuran pada setiap titik berlangsung selama 5 menit atau 300 detik, pengukuran di ulang sebanyak 3 kali pada setiap titik.

Pengukuran dilakukan pada 16 titik pengamatan yang dibagi menjadi dua lintasan, yaitu L1 dan L2, dengan masing-masing lintasan terdiri atas delapan titik. Pada setiap titik, pengukuran dilakukan menggunakan instrumen MAE Ground Soil Thermal TCR24 dengan durasi pengamatan 300 detik dan tiga kali pengulangan sebagaimana prosedur akuisisi yang diterapkan dalam penelitian ini. Data temperatur terhadap waktu selanjutnya diolah untuk memperoleh hubungan antara perubahan temperatur dan logaritma waktu. Bagian kurva yang memenuhi kecenderungan linear digunakan untuk menentukan kemiringan regresi. Nilai kemiringan tersebut menjadi parameter dalam perhitungan konduktivitas termal berdasarkan pendekatan sumber panas garis sebagaimana digunakan pada metode transient. Nilai konduktivitas dari setiap titik kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi variasi sifat termal di sepanjang kedua lintasan.

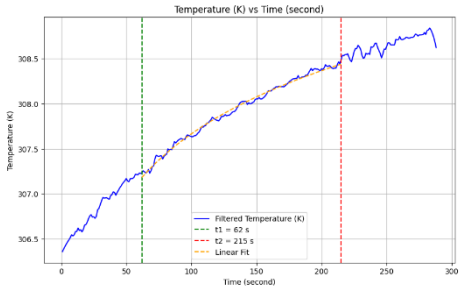
Data hasil pengukuran kemudian diproses menggunakan google colab untuk menghasilkan kurva temperatur terhadap waktu serta perhitungan nilai konduktivitas termal. Tahap terakhir berupa interpretasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap teori, untuk melihat variasi nilai konduktivitas yang di pengaruhi oleh kondisi lingkungan.

3. HASIL dan PEMBAHASAN

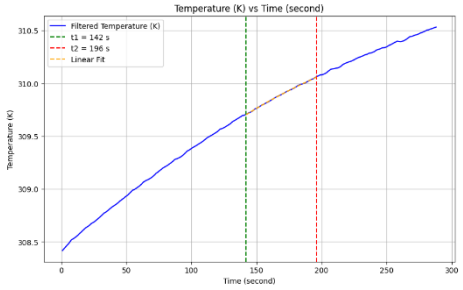
Pada penelitian ini dilakukan pengujian konduktivitas termal tanah dangkal pada kawasan Universitas Samudra dengan menggunakan metode transient. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan nilai konduktivitas termal berdasarkan perubahan temperatur terhadap waktu. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 yang memperlihakan kurva hubungan temperatur (K) terhadap waktu (s).



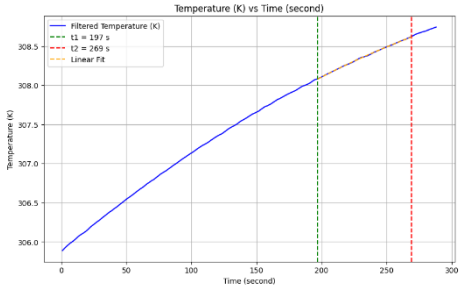
Titik 1 line 1



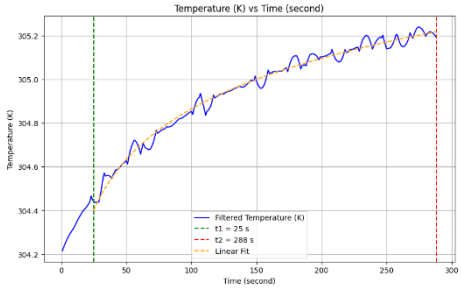
Titik 2 line 1



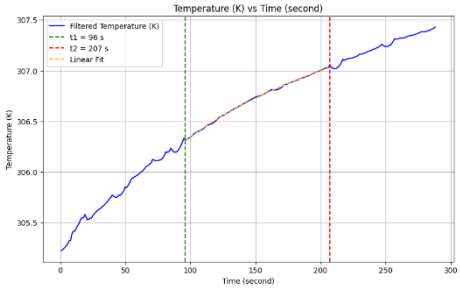
Titik 3 line 1



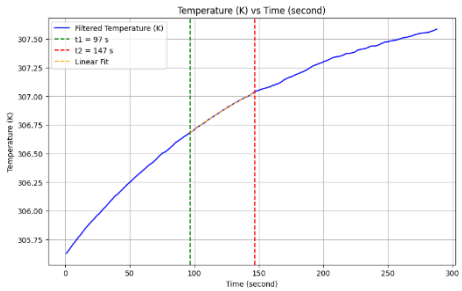
Titik 4 line 1



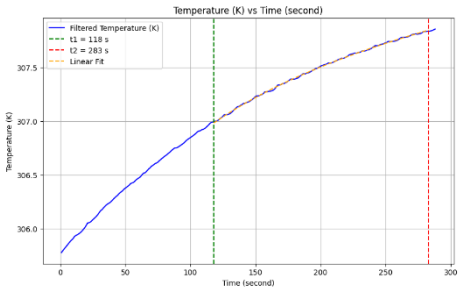
Titik 5 line 1



Titik 6 line 1



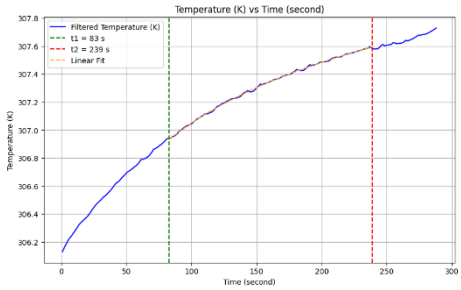
Titik 7 line 1



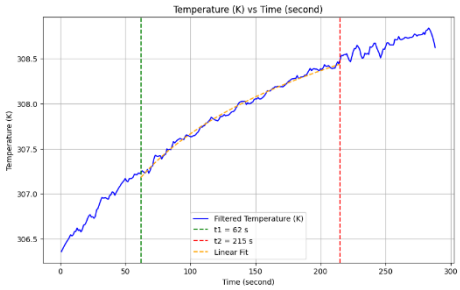
Titik 8 line 1

Gambar 1. Kurva Temperatur Terhadap Waktu Line 1

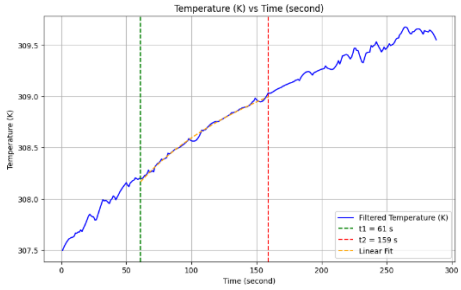
Berdasarkan Gambar 1. Pada titik 1 hingga titik 8, terlihat bahwa setiap kurva memiliki kecenderungan peningkatan temperatur yang berbeda-beda, dipengaruhi oleh kondisi tanah pada masing-masing titik. Beberapa kurva memperlihatkan kenaikan yang stabil, sementara pada titik lain terdapat sedikit fluktuasi akibat variasi porositas tanah dan kandungan air. Meskipun demikian, secara keseluruhan kurva mendekati linieritas pada rentang t1 dan t2, sehingga metode transient dapat diapliksikan dengan baik dalam menggambarkan sifat termal tanah.



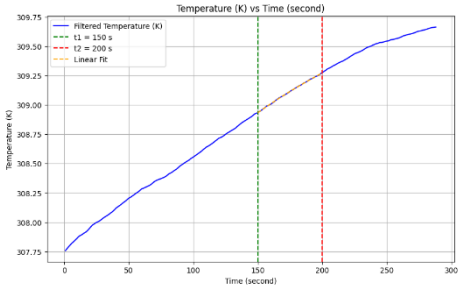
Titik 1 line 2



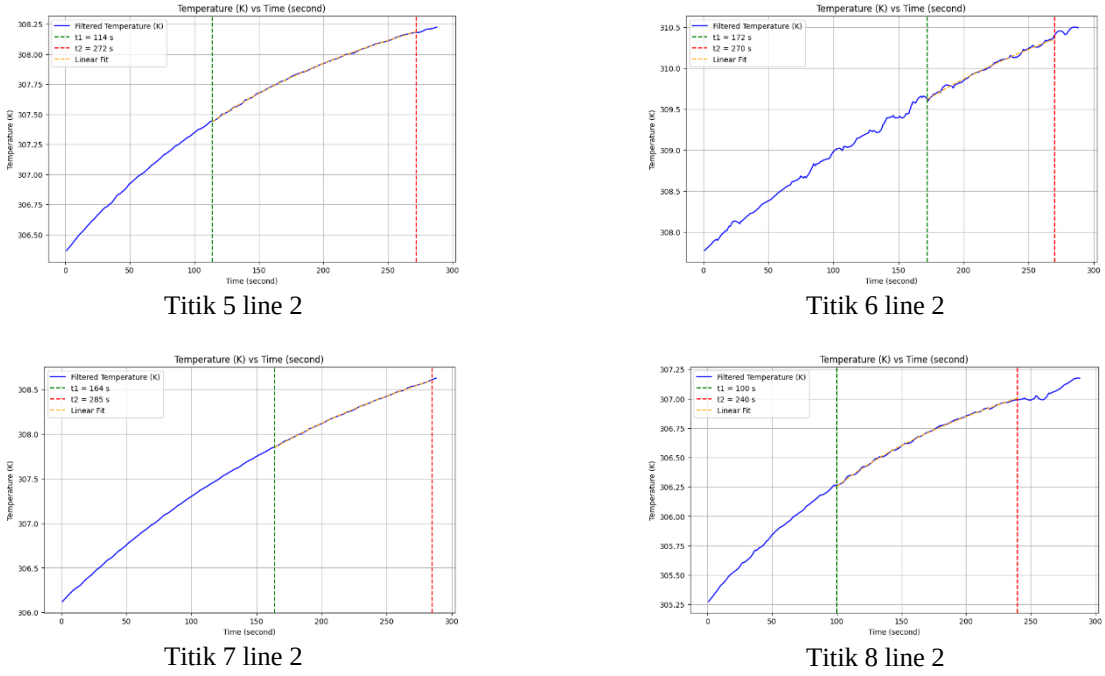
Titik 2 line 2



Titik 3 line 2



Titik 4 line 2



Gambar 2. Kurva Temeperatur Terhadap Waktu Line 2

Berdasarkan Gambar 2. Kurva pada line 2 menunjukkan variasi nilai konduktivitas termal tanah dan batuan di lokasi penelitian. Setiap titik memiliki pola kurva yang berbeda, yang menunjukkan perbedaan kondisi material bawah permukaan. Secara umum, hasil pada line 2 konsisiten dengan line 1, di mana beberapa titik menunjukkan nilai konduktivitas yang tinggi, sementara titik lainnya lebih rendah. Perbedaan ini menggambarkan adanya variasi jenis batuan maupun sifat fiisk tanah pada kedalaman yang sama di sepanjang garis pengukuran

Kurva temperatur terhadap waktu pada kedua lintasan menunjukkan respons termal yang berbeda antartitik pengamatan. Perbedaan pola kurva tersebut tercermin pada variasi kemiringan regresi dan nilai konduktivitas termal yang dihitung. Dalam analisis metode transient, kemiringan hubungan temperatur terhadap logaritma waktu menjadi parameter penting untuk menghitung kemampuan material menghantarkan panas. Nilai R^2 yang relatif tinggi pada data penelitian menunjukkan bahwa hubungan pada interval regresi yang digunakan mendekati linear. Meskipun demikian, nilai R^2 yang tinggi tidak dengan sendirinya membuktikan akurasi nilai konduktivitas termal, karena hasil perhitungan juga dipengaruhi oleh pemilihan interval regresi, kondisi kontak probe dengan tanah, kestabilan pengukuran, dan parameter pemanasan instrumen.

Hasil perhitungan konduktivitas termal tanah pada setiap titik pengamatan ditampilkan pada Tabel 1. Data ini diperoleh dari analisis kurva temperatur terhadap waktu menggunakan metode transient pada dua jalur pengukuran, yaitu line 1 dan line 2.

Tabel 1. Nilai Konduktivitas Termal

No	Nama titik	T1(s)	T2(s)	R2	q	Slope Δt VS ln(t)	K (W/m.K)
1	T1 L1	82	225	0.99958	15.7352	0.608180	2.0589
2	T2 L1	62	215	0.99308	15.7352	1.101132	1.2382
3	T3 L1	142	196	0.99964	15.7352	1.10040	1..1379
4	T4 L1	197	269	0.99966	15.7352	1.72389	0.7264
5	T5 L1	25	288	0.98695	15.7352	0.333849	3.7507
6	T6 L1	96	207	0.99914	15.7352	0.943872	1.3266
7	T7 L1	97	147	0.99977	15.7352	0.847819	1.4769
8	T8 L1	118	283	0.99938	15.7352	0.985730	1.2703
9	T9 L2	83	239	0.99927	15.7352	0.625705	2.0012
10	T10 L2	62	215	0.99308	15.7352	1.01132	1.2382
11	T11 L2	61	159	0.99507	15.7352	0.864399	1.4486
12	T12 L2	150	200	0.99968	15.7352	1.18104	1.0602
13	T13 L2	114	272	0.99976	15.7352	0.862296	1.4521
14	T14 L2	172	270	0.99342	15.7352	1.63309	0.7667
15	T15 L2	164	285	0.99975	15.7352	1.36383	0.9181
16	T16 L2	100	240	0.99902	15.7352	0.8581285	1.4592

Kolom T1 dan T2 pada Tabel 1 merepresentasikan batas waktu pengamatan yang digunakan dalam penentuan kemiringan regresi. Agar perhitungan dapat direproduksi, nilai tersebut perlu dinyatakan secara eksplisit beserta satuannya dan aturan pemilihan intervalnya. Kolom slope menunjukkan kemiringan regresi temperatur terhadap logaritma waktu pada interval yang digunakan, sedangkan R^2 menunjukkan tingkat kesesuaian data terhadap regresi linier. Nilai q yang digunakan dalam perhitungan juga perlu disertai satuan, cara penentuan, serta keterangan apakah nilainya merupakan parameter tetap dari instrumen atau hasil pengukuran. Informasi ini diperlukan agar pembaca dapat menelusuri hubungan antara data temperatur, kemiringan regresi, dan nilai konduktivitas termal yang dilaporkan.

Berdasarkan Tabel 1, konduktivitas termal pada 16 titik pengamatan berada pada rentang 0,7264–3,7507 W/(m·K). Nilai tertinggi diperoleh pada T5 L1 sebesar 3,7507 W/(m·K), yang kemungkinan dipengaruhi oleh temperatur bahan saat pengukuran. Karena semakin tinggi panas dalam bumi makan akan menghasilkan nilai konduktivitas termal yang semakin tinggi [9]. Sebaliknya nilai terendah pada T4 L1 yaitu 0.7264 W/m.K, kemungkinan ini disebabkan air meresap kedalam tanah dan masuk ke ruang pori-pori tanah. Hal ini dapat menyebabkan melemahnya atau mengendurnya ikatan partikel tanah. Akibatnya tanah menjadi lebih longgar atau kurang padat [10]. Rentang tersebut menunjukkan adanya variasi respons termal yang cukup besar di lokasi penelitian. Secara fisik, konduktivitas termal tanah dapat dipengaruhi oleh komposisi mineral, kepadatan, porositas, kadar air, serta kualitas kontak antara probe dan material di sekitarnya. Namun, faktor-faktor tersebut belum dapat ditetapkan sebagai penyebab langsung perbedaan nilai pada setiap titik karena karakteristik fisik tanah tidak dilaporkan secara kuantitatif dalam penelitian ini. Oleh sebab itu, variasi yang terukur lebih tepat ditafsirkan sebagai perbedaan sifat termal lokal yang memerlukan pengujian lanjutan untuk menentukan faktor pengontrolnya.

Perhitungan konduktivitas termal dapat dinyatakan dalam standar ASTM D5334-14.

$$k = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{t2}{t1}\right) \quad \text{(Pers.1)}$$

Dimana k adalah konduktivitas termal (W/m.K), q merupakan daya pemanas (W/m), π adalah konstanta, Δt merupakan perubahan suhu (K), $\frac{t1}{t2}$ adalah waktu pengamatan (s).

Tabel 2. Summary Of Thermal Properties Of Common Components In Soils

Materials	**Density (kg/m3)**	**Heat capacity (KJ kh -1K-1)**	**Thermal conductivity (W m-1K-1)**
Air (10	1.25	1.00	0.026
Water (25	999.87	4.20	0.59
Water vapor (1 atm, 400 K)	-	1.9	0.016
Ice (0	917	2.04	2.25
Quartz	26660	0.73	8.4
Granite	2750	0.89	1.70-4.00
Gypsum	1000	1.09	0.51
Limestone	2300	0.90	1.26-1.33
Marbel	2600	0.81	2.80
Mica	2883	0.88	0.75
Clay	1450	0.880	1.28
Sandstone	2270	0.71	1.60-2.10

Sumber : [11]

Pada Tabel 2.disajikan berdasarkan hasil penelitian yang memaparkan nilai konduktivitas termal dari berbagai material, seperti, air, es, kuarsa, granit, batu kapur, marmer, mika, lempung, dan batu pasir yang digunakan sebagai acuan dalam pembahasan hasil penelitian ini.

Tabel 3. Jenis-jenis batuan berdasarkan hasil perhitungan konduktivitas termal.

No	Konduktivitas termal (W/mK)	Keterangan
Titik 1	2.0589	Batu Pasir
Titik 2	1.2382	Batu Kapur
Titik 3	1.1379	Batu Kapur
Titik 4	0.7264	Air
Titik 5	3.7507	Granit
Titik 6	1.3266	Batu Kapur
Titik 7	1.4769	Batu Pasir
Titik 8	1.2703	Batu Kapur

Titik 9	2.0012	Batu Pasir
Titik 10	1.2382	Batu Kapur
Titik 11	1.4486	Batu Pasir
Titik 12	1.0602	Lempung
Titik 13	1.4521	Batu Pasir
Titik 14	0.7667	Mika
Titik 15	0.9181	Air
Titik 16	1.4592	Batu Pasir

Perbandingan nilai konduktivitas termal hasil pengukuran dengan nilai acuan pada Tabel 2 memberikan indikasi awal mengenai kemungkinan karakteristik material pada setiap titik. T5 L1 menunjukkan nilai konduktivitas termal tertinggi, yaitu 3,7507 W/(m·K), sedangkan T4 L1 menunjukkan nilai terendah sebesar 0,7264 W/(m·K). Meskipun nilai-nilai tersebut dapat dibandingkan dengan rentang konduktivitas termal berbagai material, kesesuaian nilai tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menetapkan jenis batuan atau mineral penyusun tanah. Nilai konduktivitas termal dapat berubah akibat kandungan air, porositas, kepadatan, temperatur, dan kondisi kontak pengukuran. Oleh karena itu, klasifikasi material pada Tabel 3 perlu dipahami sebagai interpretasi awal berdasarkan perbandingan nilai acuan, bukan identifikasi litologi yang telah terkonfirmasi. Verifikasi lebih lanjut memerlukan pengamatan geologi lapangan serta karakterisasi sampel tanah atau batuan secara langsung.

Perbedaan nilai konduktivitas termal antartitik menunjukkan bahwa sifat termal lapisan dangkal di lokasi penelitian tidak seragam. Variasi ini memberikan indikasi heterogenitas lokal pada material yang diukur di sepanjang dua lintasan. Akan tetapi, karena hasil yang disajikan berupa nilai pada titik-titik pengamatan, pola distribusi spasial secara kontinu belum dapat dipastikan hanya dari tabel. Pemetaan spasial yang lebih kuat memerlukan koordinat setiap titik, visualisasi nilai konduktivitas termal pada peta, serta informasi pendukung mengenai kondisi permukaan dan karakteristik tanah. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan lokasi pengukuran lanjutan dan merancang pengujian yang menghubungkan sifat termal dengan kondisi fisik tanah secara lebih terukur.

4. KESIMPULAN

Pengukuran konduktivitas termal tanah dangkal di kawasan Laboratorium Dasar Universitas Samudra telah dilakukan pada 16 titik pengamatan yang terbagi menjadi dua lintasan menggunakan instrumen MAE Ground Soil Thermal TCR24 dan metode transient. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa konduktivitas termal berada pada rentang 0,7264–3,7507 W/(m·K). Nilai tertinggi ditemukan pada T5 L1, yaitu 3,7507 W/(m·K), sedangkan nilai terendah ditemukan pada T4 L1, yaitu 0,7264 W/(m·K). Variasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan sifat termal lokal pada titik-titik pengamatan. Nilai R^2 yang relatif tinggi menunjukkan kecenderungan linear pada interval regresi yang digunakan, tetapi belum cukup untuk memastikan akurasi pengukuran secara keseluruhan. Perbandingan dengan nilai acuan material memberikan indikasi awal mengenai kemungkinan karakteristik termal bawah permukaan, tetapi belum dapat digunakan untuk menetapkan jenis batuan atau mineral secara definitif. Penelitian selanjutnya perlu dilengkapi dengan pengujian kadar air, porositas, kepadatan, karakterisasi sampel, serta pemetaan spasial berbasis koordinat untuk memperkuat interpretasi faktor-faktor yang memengaruhi variasi konduktivitas termal tanah.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] P. D. dkk Prof. Ir. Muhajir Utomo, M.Sc., *Ilmu Tanah Dasar-Dasar dan Pengelolaan*. Kencana, 2016.
[2] B. Y. T. W. Goodwin, "The Nature and Distribution," no. May, hal. 467–473, 2016.
[3] F. MIkhsan, Farid, L. Handayani, P. Studi Fisika, P. K. Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi Jl Jambi-Ma Bulian, dan M. Darat Jambi, "Penentuan Struktur Tanah Sebagai Dasar Uji," vol. 15, no. 02, hal. 139–145, 2018, [Daring]. Tersedia pada: http://ejournal.unri.ac.id./index.php/JKFI
[4] G. Santoso, S. Hani, dan R. Prasetiyo, "Sistem Monitoring Kualitas Tanah Tanaman Padi dengan Parameter Suhu dan Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things (IoT)," *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 5, no. 2502, hal. 146–155, 2020, doi: 10.22236/teknoka.v5i.297.
[5] D. V. Sari, A. Surtono, dan Warsito, "Sistem Pengukuran Suhu Tanah Menggunakan Sensor DS18B20 dan Perhitungan Resistivitas Tanah Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 04, no. 01, hal. 83–90, 2016.
[6] Lutfiyana, N. Hudallah, dan A. Suryanto, "Rancang Bangun Alat Ukur Suhu Tanah , Kelembaban Tanah, dan Resistansi," *Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, hal. 80–86, 2017.
[7] U. A. R. Delsiyanti, DanangWidjajanto, "Sifat Fisik Tanah Pada Beberapa Penggunaan Lahan," *e-J. Agrotekbis*, vol. 4, no. 3, hal. 227–234, 2016, [Daring]. Tersedia pada: http://jurnal.untad.ac.id/jurnal/index.php/agrotekbis/index
[8] J. F. Manullang, S. E. Pakasi, J. M. Supit, dan J. V. Porong, "Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Sawah di Kecamatan Kotamobagu Utara," *In Cocos*, vol. 2, no. 3, hal. 1–9, 2020.
[9] R. Endovani dan A. Putra, "Analisis Konduktivitas Termal dan Porositas Sinter Silika Sumber," *J. Fis. Unand*, vol. 5, no. 1, hal. 65–72, 2016.

[10] S. Rasimeng, "Characterization Of Soil Thermal Properties For Design Of Underground Cable Routes At The Wind Farm Power Plant Area, Panyipatan And Pelaihari Sub-District, South Kalimantan," vol. 4, no. 1, 2020.
[11] N. Zhang dan Z. Wang, "Review of soil thermal conductivity and predictive models," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 117, hal. 172–183, 2017, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013.
[12] V. Saltas, D. Pentari, dan F. Vallianatos, "Complex electrical conductivity of biotite and muscovite micas at elevated temperatures: A comparative study," *Materials (Basel).*, vol. 13, no. 16, 2020, doi: 10.3390/MA13163513.