



Analisis Perilaku Air Di Perkebunan Kelapa Sawit Pada Tanah Spodosol dan Ultisol Menggunakan *Soil Moisture Content Monitoring System* (SMCMS)

Analysis of Water Behavior in Oil Palm Plantations on Spodosol and Ultisol Using Soil Moisture Content Monitoring System (SMCMS)

Suardi^{1,3}, Lilik Sutiarto^{1*}, Herry Wirianata², Andri Prima Nugroho¹, Sukarman³, Septa Primananda³,
Muhdan Syarovy, Iput Pradiko, dan Nuzul Hijri Darlan

Abstrak Ketersediaan air merupakan aspek yang sangat penting agar kelapa sawit dapat tumbuh dan berproduksi secara optimal. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku air melalui monitoring dinamika kelembaban dan suhu tanah menggunakan *Soil Moisture Content Monitoring System* (SMCMS). SMCMS terdiri atas sensor yang dipasang di lapangan dan sistem monitoring berbasis internet. SMCMS dipasang di perkebunan kelapa sawit pada tanah Ultisol (A), Spodosol dengan perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* (B), dan Spodosol tanpa perlakuan (C). Sensor kelembaban dan suhu tanah dipasang pada tiga kedalaman yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa SMCMS dapat beroperasi secara otomatis dan *real-time* dalam mengukur perilaku air. Berdasarkan hasil monitoring dan pengukuran, dapat diketahui bahwa kelembaban tanah tertinggi terdapat pada lokasi A dengan rerata 46,91%, kemudian diikuti lokasi B 38,40%, dan C yaitu 29,49%. Spodosol dengan perlakuan (B) memiliki suhu tanah terendah dengan rerata 27,36°C, kemudian diikuti Ultisol (A) 27,58°C, dan Spodosol kontrol (C) 28,40°C. Lebih lanjut, kelembaban tanah berkorelasi lemah dengan suhu tanah. Suhu tanah memiliki korelasi yang lemah dengan suhu udara.

Sementara itu, kedua perilaku air tanah tersebut memiliki korelasi yang sangat lemah dengan variabel lingkungan, khususnya curah hujan.

Kata kunci: kelapa sawit, kelembaban tanah, suhu tanah, *mounding*, *hardpan*

Abstract The availability of water is a crucial aspect for optimal growth and productivity of oil palm. This research analyzes soil water behavior by monitoring soil moisture and temperature dynamics using the *Soil Moisture Content Monitoring System* (SMCMS). SMCMS consists of sensors installed in the field and an internet-based monitoring system. SMCMS was installed in oil palm plantations on Ultisol (A), Spodosol with *hardpan* breaking and *mounding* treatment (B), and Spodosol without treatment (C). Soil moisture and temperature sensors were installed at three different depths. The results show that SMCMS can operate automatically and in real-time in measuring water behavior. Based on monitoring and measurement results, it can be seen that the highest soil moisture is at location A, with an average of 46.91%, followed by location B at 38.40%, and C at 29.49%. Spodosol with treatment (B) had the lowest soil temperature with an average of 27.36°C, followed by Ultisol (A) at 27.58°C and control Spodosol (C) at 28.40°C. Furthermore, soil moisture is weakly correlated with soil temperature. Soil temperature has a weak correlation with air temperature. Meanwhile, these two soil water behaviors correlate very weakly with environmental variables, especially rainfall.

Keywords: oil palm, soil moisture, soil temperature, *mounding*, *hardpan*

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Lilik Sutiarto^{1*} (✉)

¹Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada. Jalan Flora No.1 Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Institut Pertanian Stiper (Instiper), Yogyakarta, Indonesia

³Wilmar International Plantation, Central Kalimantan Region, Indonesia.

Email: lilik-soetiarso@ugm.ac.id

PENDAHULUAN

Ketersediaan air tanah yang optimal merupakan aspek krusial dalam menjamin kelangsungan produksi kelapa sawit dengan tingkat produktivitas yang tinggi (Filho *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2020; Tezara *et al.*, 2021). Tanaman kelapa sawit sangat tergantung dengan ketersediaan air, sehingga pemahaman yang mendalam terhadap perilaku air tanah di lahan perkebunan menjadi suatu keharusan (Ariyanti *et al.*, 2016; Hatfield & Dold, 2019; Saha *et al.*, 2020). Perkebunan kelapa sawit selama ini dikembangkan pada berbagai jenis tanah, tidak terkecuali pada dua jenis tanah yang dominan di Kalimantan Tengah yaitu Spodosol dan Ultisol (Primananda & Irfani, 2022). Ultisol memiliki ciri tekstur tanah dengan kandungan liat tinggi, sementara Spodosol memiliki kandungan pasir yang lebih tinggi dibandingkan kandungan liat dan lempung serta memiliki lapisan spodik (Sukarman *et al.*, 2022). Perbedaan ini menciptakan variasi yang signifikan dalam kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air yang berdampak pada ketersediaan air untuk tanaman kelapa sawit (Suwardi *et al.*, 2023).

Ketersediaan air di dalam tanah dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara berbagai faktor (Gavrilescu, 2021; Turner & Kodali, 2020; Yu *et al.*, 2018). Faktor-faktor ini mencakup dinamika iklim setempat yang dapat mempengaruhi pola curah hujan dan evaporasi, karakteristik fisik dan kimia tanah yang membentuk sifat hidrologisnya, irigasi, serta kebijakan pengelolaan air yang dapat mempengaruhi tata kelola sumber daya air di wilayah tersebut (Gomboš *et al.*, 2019; Nelson & Huber, 2015; Thakur *et al.*, 2018). Dengan pemahaman yang lebih baik terkait perilaku air pada tiap jenis tanah, maka akan dapat dirancang pendekatan pengelolaan air yang lebih efektif dan efisien sehingga dapat mengoptimalkan pertumbuhan dan produksi tanaman (Graham *et al.*, 2019; Minhas *et al.*, 2020; Novák & Hlaváčiková, 2019). Pemahaman mengenai perilaku air tanah menjadi landasan penting guna memastikan bahwa kebutuhan air tanaman kelapa sawit terpenuhi secara optimal sambil terus menjaga kelestarian air tanah (Darras *et al.*, 2019; Kristanto *et al.*, 2022).

Pemahaman perilaku air tanah perlu didukung dengan pengukuran dinamika perilaku air dalam tanah. Perilaku air di dalam tanah meliputi fluktuasi kelembaban atau lengas dan suhu tanah. Selama ini,

yang umum dilakukan adalah pengukuran kandungan air tanah yang dilakukan secara manual menggunakan metode konvensional (Baharuddin *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2016; Yagiura *et al.*, 2018). Pengukuran ini memerlukan proses pengambilan sampel tanah yang dilakukan secara periodik, terutama pada lokasi-lokasi yang dianggap representatif (Eulenstein *et al.*, 2016), menilai kandungan dan potensi air tanah (Cooper, 2016), dan pemetaan jika diperlukan (Suthersan *et al.*, 2015). Namun demikian, pendekatan ini memiliki beberapa kendala, terutama ketika menangani tanah Spodosol yang memiliki karakteristik unik dengan keberadaan lapisan hardpan yang dapat membatasi infiltrasi air dan pergerakan air tanah (Jačka *et al.*, 2018; Leslie *et al.*, 2015). Hasil dari pengukuran kadar air tanah secara manual sering kali menunjukkan variasi yang signifikan (Ganiyu *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2015; Ziogas & Kaleris, 2019). Sementara itu, pengukuran suhu tanah masih belum banyak dilakukan.

Faktor-faktor seperti variasi topografi, vegetasi, dan struktur tanah yang kompleks dapat memberikan dampak yang cukup besar terhadap akurasi dan konsistensi dari data perilaku air yang diperoleh (Alexander *et al.*, 2016; Metzen *et al.*, 2019; Reddy, 2018; Zolfaghari *et al.* (2015). Yang *et al.*, (2015) menambahkan bahwa faktor topografi berkorelasi positif dengan kelembaban tanah di dekat permukaan, tetapi berkorelasi negatif dengan kelembaban tanah pada kedalaman di bawah 2 m. Penelitian Salinas-Melgoza *et al.* (2018) juga menjelaskan bahwa variabel topografi seperti elevasi, kemiringan, indeks kelembaban topografi, dan kelengkungan tangensial dapat menjelaskan hingga 21% variasi biomassa di atas tanah dalam lanskap pedesaan. Hu *et al.* (2017) menjelaskan juga bahwa terdapat 86% variasi dinamika air tanah di zona akar dijelaskan oleh tiga struktur spasial yang signifikan yaitu kandungan pasir, biomassa di atas tanah, dan ketinggian tempat.

Berkaitan dengan penjelasan di atas, maka perlu upaya meningkatkan keakuratan dan konsistensi pengukuran perilaku air tanah dibandingkan dengan metode manual. Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan inovatif dengan menggunakan alat *Soil Moisture Content Monitoring System* (SMCMS) yang memungkinkan pengukuran kontinu dan *real-time* tanpa perlu mengambil sampel tanah secara manual (Nugroho *et al.*, 2023). Penelitian ini bertujuan untuk

menganalisis perilaku air melalui monitoring dinamika kelembaban dan suhu tanah menggunakan *Soil Moisture Content Monitoring System* (SMCMS). Penggunaan SMCMS diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap dan akurat terkait dinamika perilaku air tanah pada berbagai jenis tanah, terutama pada tanah Ultisol serta tanah Spodosol.

BAHAN DAN METODE

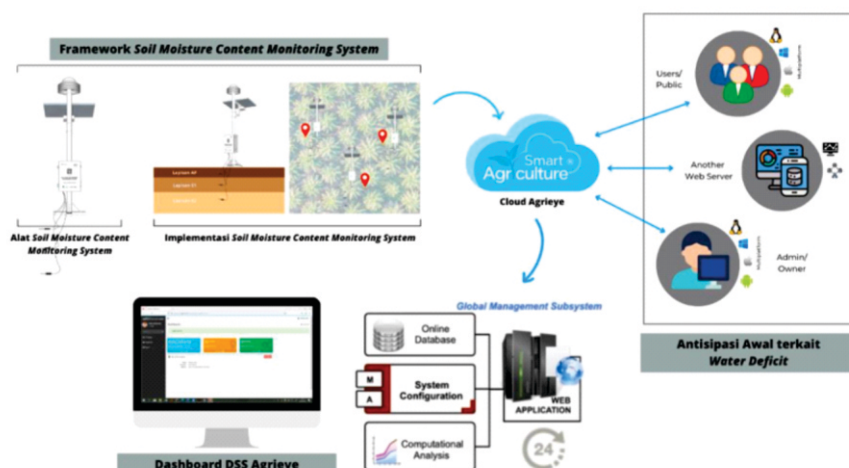
Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Februari – September 2023 di perkebunan kelapa sawit yang terletak di Kabupaten Seruyan, Provinsi Kalimantan Tengah. Secara topografis, lokasi penelitian ini terletak pada daerah yang datar hingga sedikit bergelombang, dengan ketinggian (elevasi) berkisar antara 5-32 m dpl. Curah hujan di lokasi kajian berkisar antara 2.000-4.000 mm/tahun, dengan puncak hujan umumnya terjadi Oktober hingga Desember dan musim kemarau Juli hingga September.

Penelitian ini menggunakan SMCMS yang telah diuji pada penelitian sebelumnya (Nugroho *et al.*, 2023). SMCMS ini berfungsi sebagai alat yang membantu dalam mengoptimalkan pengelolaan perkebunan kelapa sawit dengan memantau dan mengelola kelembaban air di tanah secara efektif. SMCMS dirancang dari sensor kelembaban dan suhu tanah yang ditanam pada tiga kedalaman berbeda

pada tiga lokasi dengan waktu dan interval pengukuran yang sama (Tabel 1). Ketiga lokasi memiliki tanaman kelapa sawit dengan tahun tanam yang sama, yaitu 2007 dengan kerapatan tanam 131 pohon per ha. Pada masing-masing lokasi, SMCMS dilengkapi dengan sensor kelembaban tanah SMC 1 (kedalaman 0-30 cm), SMC 2 (30-60 cm), dan SMC 3 (60-90 cm). Selain itu, SMCMS juga dilengkapi dengan sensor suhu tanah T1 (0-30 cm), T2 (30-60 cm), dan T3 (60-90 cm).

Sistem ini bertujuan untuk mengamati perubahan dinamis kelembaban tanah dan suhu tanah selama proses produksi perkebunan. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan sensor lingkungan, termasuk suhu udara, kelembaban udara, dan intensitas cahaya matahari. Modul sensor kelembaban dan suhu tanah yang digunakan dalam perancangan SMCMS ini adalah MS10. Sedangkan untuk modul sensor kondisi lingkungan, digunakan SEN0438 (sensor suhu dan kelembaban udara) dan GY-49 (sensor intensitas matahari). Sensor suhu dan kelembaban udara, serta sensor intensitas cahaya matahari ditempatkan dalam *Stevenson Screen*. Implementasi SMCMS dilakukan di tiga lokasi sesuai Tabel 1. Data hasil pemantauan diakses melalui aplikasi berbasis *web* dan disimpan di-*cloud server* *Agrieye*. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengakses data dan mengambil tindakan awal terkait kekurangan air. Ilustrasi sistem kerja SMCMS disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi konsep kerja SMCMS
Figure 1. Illustration of SMCMS framework concept

Tabel 1. Lokasi pemasangan SMCMS
Table 1. Locations for SMCMS installation

No	Nama Alat	Koordinat	Jenis Tanah
1	SMCMS site A	S 02° 43'30.1" E 112° 30'13.0"	Ultisol
2	SMCMS site B	S 02° 43'27.9" E 112° 30'28.1"	Spodosol yang telah dilakukan perlakuan pecah <i>hardpan</i> dan <i>mounding</i> . Tanah di gawangan mati digali dan <i>hardpan</i> -nya dipecah dengan alat berat (dimensi galian dengan panjang x lebar x dalam adalah 300 cm x 100 cm x 50 cm). Tanah hasil galian kemudian dibungkukan pada piringan tanaman. Pemecahan <i>hardpan</i> diharapkan dapat meningkatkan ruang perakaran, sedangkan <i>mounding</i> diharapkan dapat menambah ruang perakaran dan bidang tanah yang menahan air. Lihat detail perlakuan pecah <i>hardpan</i> dan <i>mounding</i> di Suwardi et al. (2022)
3	SMCMS site C	S 02° 43'49.0" E 112° 28'14.8"	Spodosol tanpa perlakuan

Prosedur Penelitian dan Analisis Data

SMCMS mengumpulkan data perilaku air berdasarkan sensor kelembaban dan suhu dalam tanah. Pemasangan sensor dilakukan pada tiga tingkat kedalaman yang berbeda yaitu 0-30 cm, 30-60 cm, dan 60-90 cm. Khusus untuk variabel kelembaban tanah, dilakukan juga analisis laju kelembaban tanah (% per 10 menit). Kegiatan ini dilakukan pada saat kondisi lapangan tidak ada hujan (musim kering).

Dalam penelitian ini, beberapa metode analisis data yang digunakan mencakup analisis deskriptif, uji korelasi dan analisis perubahan laju lengas tanah untuk variabel kelembaban air tanah. Seluruh analisis dilakukan menggunakan Python 3.10.12 dengan pustaka Pandas, Matplotlib, Seaborn, Numpy dan Scikit-learn.

a. Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif merangkum karakteristik dasar dari satu atau lebih variabel dalam dataset. Langkah-langkahnya melibatkan pemilihan

variabel, perhitungan statistik dasar seperti mean, median, nilai minimum, nilai maksimum, visualisasi data dengan grafik, dan penyajian hasil dalam tabel. Analisis deskriptif dilakukan terhadap data yang diperoleh pada kurun pemasangan SMCMS (Februari-September 2023). Analisis ini memberikan gambaran yang mendalam tentang variabel-variabel yang diamati dalam penelitian ini.

b. Uji Korelasi

Uji korelasi yang digunakan merupakan korelasi pearson yang digunakan untuk mengevaluasi hubungan linear antara dua variabel dalam populasi berdasarkan sampel data yang diuji. Koefisien korelasi Pearson memiliki rentang dari -1 hingga 1, dimana nilai mendekati 1 menunjukkan hubungan positif sempurna, nilai mendekati -1 menunjukkan hubungan negatif sempurna, dan nilai mendekati 0 menunjukkan tidak adanya hubungan linear.

c Uji Perubahan Laju Lengas Tanah

Laju lengas tanah merupakan diferensial dari perubahan persentase kadar lengas tanah terhadap waktu. Uji perubahan laju lengas tanah digunakan untuk mengukur pergerakan air dalam tanah, dinyatakan dalam persentase per jam (% per jam). Persamaan uji perubahan laju lengas tanah dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$v_{\text{Lengas Tanah}} = \frac{d\theta v}{dt} = \frac{\theta v_2 - \theta v_1}{t_2 - t_1} \quad \dots\dots(1)$$

Keterangan:

θv = Lengas tanah volumetrik (%)

t = Waktu (jam)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dinamika Kelembaban Tanah

Pada tanah Ultisol (SMCMS site A), nilai

kelembaban tanah dari pembacaan sensor kelembaban tanah (SMC) 1 hingga SMC 3 cukup variatif, dengan nilai minimum sekitar 40,22% dan maksimum mencapai 53,42%. Di sisi lain, pada tanah Spodosol dengan perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* (SMCMS site B), kelembaban tanah memiliki kisaran 28,30% hingga 47,32%. Selanjutnya, pada SMCMS site C, yaitu tanah Spodosol tanpa perlakuan, terdapat variasi kelembaban tanah yang cukup besar, 16,27% hingga 48,81%. Nilai *median* dan *mean* dari hasil pengukuran kelembaban tanah pada semua kedalaman tanah lebih tinggi pada Ultisol dibandingkan dengan Spodosol *Mounding* dan Spodosol. Dengan demikian, terdapat perbedaan yang mencolok dalam nilai-nilai kelembaban tanah yang mencerminkan karakteristik masing-masing jenis tanah terkait dengan kapasitas retensi dan ketersediaan air dalam tanah. Nilai minimum, maksimum, median, dan mean kelembaban tanah pada masing-masing jenis tanah berdasarkan monitoring menggunakan SMCMS ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai minimum, maksimum, median, dan mean kelembaban tanah pada masing-masing kedalaman di setiap jenis tanah.

Table 2. Minimum, maximum, median and mean values of soil moisture at each depth in each soil type.

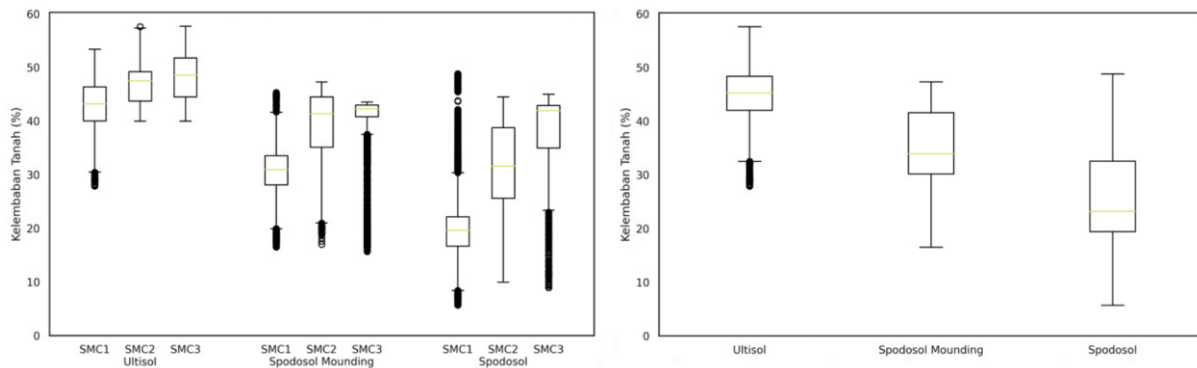
Jenis Tanah	Kedalaman Tanah	Kelembaban Tanah (%)			
		Minimum	Maksimum	Median	Mean
Ultisol	0-30 cm	40,22	50,09	45,15	45,34
	30-60 cm	44,00	50,62	48,54	48,48
	60-90 cm	44,96	53,42	50,66	50,30
Spodosol Mounding	0-30 cm	28,30	45,37	32,84	33,27
	30-60 cm	35,87	47,32	44,06	43,53
	60-90 cm	41,76	43,56	42,90	42,85
Spodosol	0-30 cm	16,27	48,81	21,01	22,46
	30-60 cm	21,22	44,53	37,16	36,52
	60-90 cm	28,75	44,36	42,66	41,96

Keterangan: Data diperoleh dari periode pengukuran Februari-September 2023. Lihat Gambar 3 untuk melihat hasil pengukuran secara lebih detail

Note: Data obtained from the measurement period February-September 2023. See Figure 3 to see the measurement results in more detail

Visualisasi data menggunakan boxplot menunjukkan perbedaan yang cukup jelas baik pada setiap kedalaman maupun setiap jenis tanah (Gambar 2). Berdasarkan tingkat kedalaman, semakin dalam sensor menunjukkan pola semakin tinggi tingkat kelembaban pada seluruh jenis tanah. Hal ini

menunjukkan bahwa tanah pada kedalaman 0-30 cm memiliki tingkat evaporasi tertinggi, khususnya pada siang hari. Berdasarkan jenis tanah, Ultisol memiliki *range* data tingkat kelembaban tanah tertinggi, sedangkan Spodosol tanpa perlakuan memiliki *range* data terendah.



Gambar 2. Boxplot perbandingan kelembaban tanah pada berbagai kedalaman (kiri) dan jenis serta perlakuan tanah yang berbeda (kanan)

Figure 2. Boxplot of comparison of soil moisture at various depths (left) and different soil types and treatments (right)

Gambar 3 menggambarkan deret waktu perbandingan kelembaban tanah antar jenis tanah dan tipe perlakuan pada kedalaman tanah yang sama, mulai dari awal hingga akhir pengamatan. Pada SMC 1 (kedalaman 0-30 cm), terdapat perbedaan atau kesenjangan yang cukup besar di antara ketiga jenis tanah. Tanah Ultisol memiliki kelembaban tertinggi, yang hampir tidak pernah beririsan dengan jenis tanah Spodosol mounding maupun tanpa perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa tanah Ultisol memiliki kemampuan menyimpan air jauh lebih baik dibandingkan dengan tanah Spodosol. Namun demikian, Spodosol *mounding* memiliki kelembaban tanah yang lebih baik dibandingkan tanpa perlakuan. Penambahan lapisan tanah pada perlakuan *mounding* dapat memberikan ruang perakaran baru dan juga sebagai lapisan tambahan untuk mencegah hilangnya air akibat evaporasi dibandingkan tanpa perlakuan.

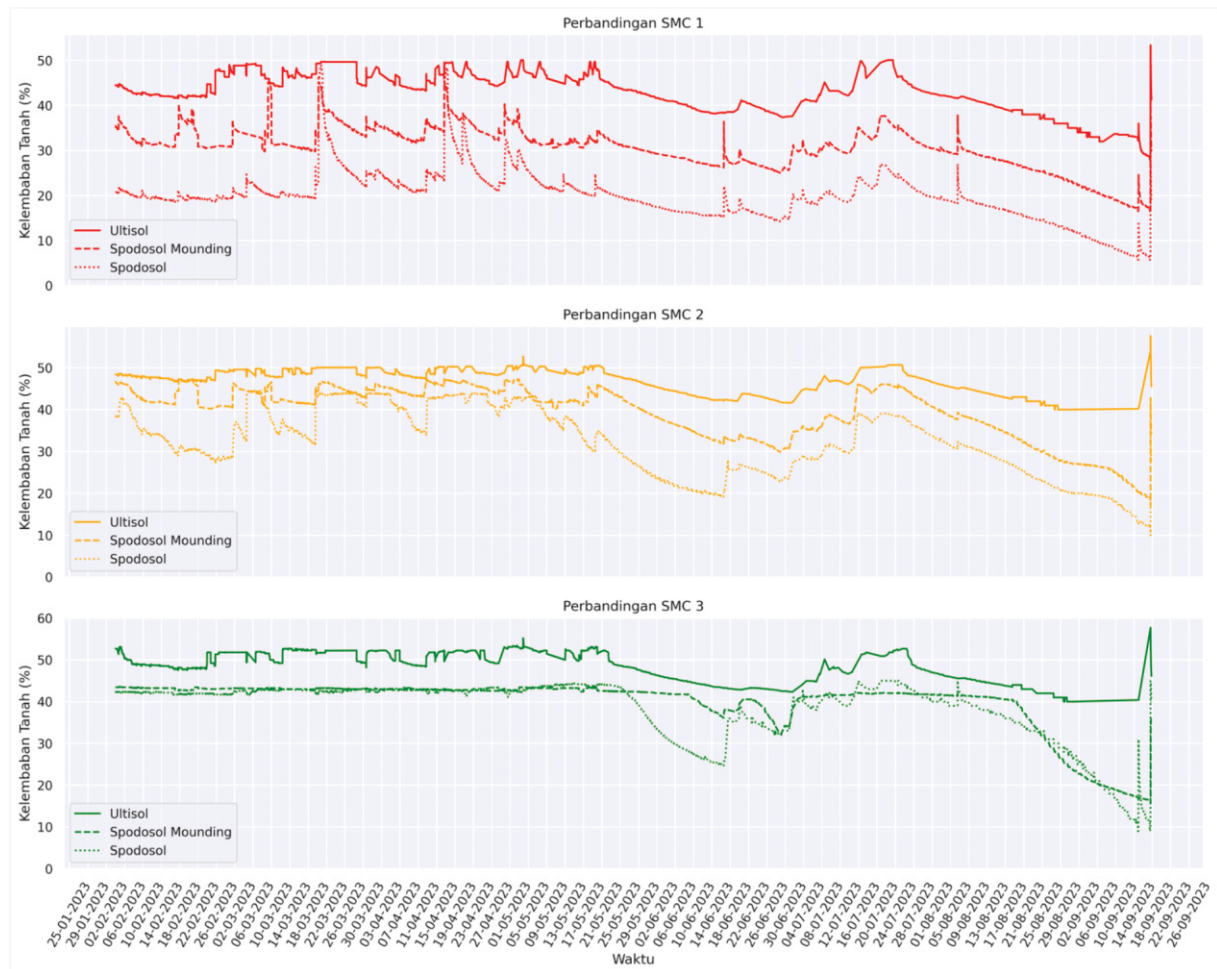
Pada SMC 2 (kedalaman 30-60 cm), tanah Ultisol juga menunjukkan kelembaban tertinggi, yang tidak pernah beririsan dengan jenis tanah Spodosol *mounding* maupun tanah tanpa perlakuan. Sementara itu, pada Spodosol, tanpa perlakuan memiliki pola kelembaban tanah cenderung lebih

rendah dan mengalami fluktuasi naik-turun dibandingkan dengan tanah spodosol perlakuan *mounding*. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan *mounding* dapat mempertahankan kelembaban tanah dan memperlambat laju evaporasi yang terjadi pada tanah Spodosol.

Pada SMC 3 (kedalaman 60-90 cm), tanah Ultisol memiliki kelembaban tanah tertinggi dibandingkan tanah Spodosol. Namun demikian, antara Spodosol *mounding* dan tanpa perlakuan menunjukkan kelembaban tanah dengan nilai yang hampir mirip hanya saja pada tanpa perlakuan kelembaban tanah yang lebih fluktuatif. Hal ini disebabkan karena adanya lapisan *hardpan* yang mengakibatkan air tertahan pada kedalaman 60-90 cm. Pada tanah Spodosol tanpa perlakuan, adanya *hardpan* dapat membatasi pergerakan akar sehingga apabila terjadi cekaman baik kelebihan maupun kekurangan air, tanaman akan mengalami dampak cekaman yang signifikan. Pada perlakuan *mounding*, ruang perakaran dimodifikasi dengan menambahkan lapisan tanah tambahan di sekitar tanaman. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kedalaman efektif tanah yang dapat diakses oleh akar tanaman.

Dengan demikian, tanah Spodosol yang mendapatkan perlakuan pemecahan hardpan dan mounding memiliki kemampuan lebih baik dalam

menyerap dan memanfaatkan air dan hara serta mengurangi risiko cekaman akibat kekurangan air yang mungkin terjadi pada tanah Spodosol.



Gambar 3. Perbandingan kelembaban tanah antar jenis tanah dan tipe perlakuan pada kedalaman tanah yang sama
 Figure 3. Comparison of soil moisture between different soil types and treatment types at the same soil depth

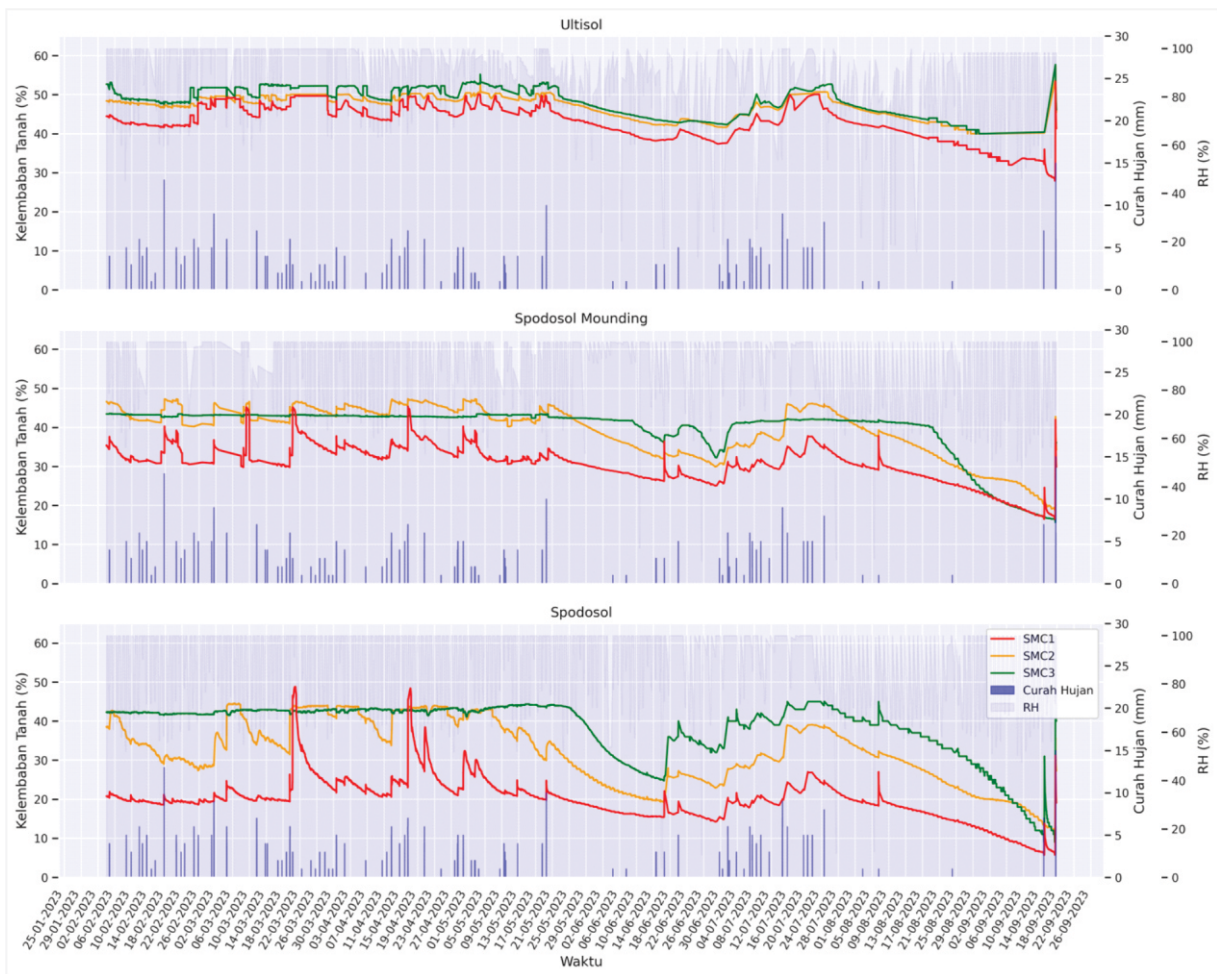
Berdasarkan jenis tanah pada setiap SMC atau kedalaman tanah yang ditunjukkan pada Gambar 4, tanah Ultisol cenderung memiliki perbedaan atau kesenjangan yang kecil jika dibandingkan dengan tanah Spodosol. Hal ini menunjukkan bahwa tanah Ultisol memiliki kemampuan mempertahankan air tanah lebih baik dibandingkan tanah Spodosol. Namun demikian, jika dibandingkan dengan antar perlakuan di tanah Spodosol, perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* cenderung memiliki perbedaan kesenjangan yang lebih kecil antar setiap kedalaman

dibandingkan dengan tanpa perlakuan. Hal ini mempertegas bahwa perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* merupakan kegiatan kultur teknis yang dapat juga membantu mencegah kehilangan air akibat penguapan tanah atau evaporasi.

Gambar 4 juga menunjukkan pola curah hujan dan kelembaban udara yang disandingkan dengan pola perubahan pada kelembaban tanah di setiap tanah. Terdapat pola kenaikan atau penurunan kelembaban tanah setiap ada atau tidaknya hujan maupun kelembaban udara. Berdasarkan analisis diatas,

Ultisol memiliki kemampuan mempertahankan kelembaban tanah yang paling baik dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. Sementara itu, Spodosol dengan perlakuan pemecahan *hardpan* dan *mounding* menunjukkan kemampuan yang baik dalam menahan air dibandingkan dengan Spodosol tanpa perlakuan. Hal tersebut karena perlakuan *mounding* membantu meningkatkan kemampuan tanah untuk mempertahankan air dan mengurangi penguapan air

dari tanah. Rye & Smettem (2017) menambahkan bahwa adanya perbaikan dalam menjaga kelembaban tanah dapat mengurangi evaporasi secara signifikan sehingga dapat menjaga ketersediaan air lebih lama. An *et al.* (2018) menambahkan bahwa kadar air terus berkurang seiring berjalannya waktu, namun rasio penguapan aktual terhadap potensial umumnya tetap stabil sehingga menyebabkan ketersediaan air dalam tanah semakin cepat menurun.



Gambar 4. Kelembaban tanah, curah hujan dan kelembaban udara pada berbagai kedalaman pada masing-masing jenis tanah dan perlakuan

Figure 4. Soil moisture, rainfall and air humidity at various depths for each type of soil and treatment

Hasil monitoring dengan SMCMS pada Spodosol tanpa perlakuan menunjukkan rata-rata nilai terendah dan *range* nilai yang cukup jauh. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa perlakuan untuk memperbaiki sifat fisik tanah, kelembaban tanah Spodosol tidak stabil dan

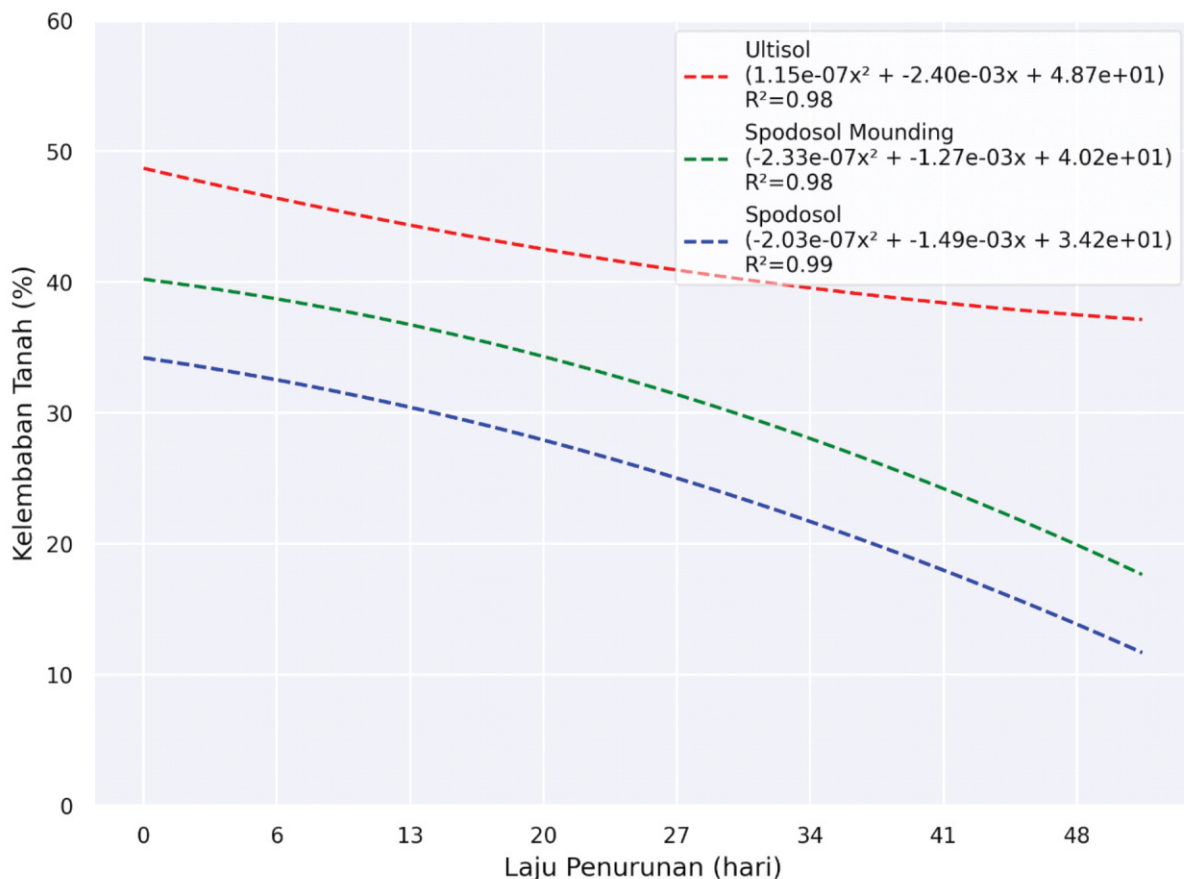
lebih rendah dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. An *et al.* (2019) menyatakan proporsi campuran pasir dan porositas tanah yang lebih tinggi memungkinkan laju penguapan yang lebih tinggi. Hal ini yang menjelaskan bahwa perlakuan *mounding* dapat

memperbaiki sifat fisika tanah Spodosol. Perbaikan tersebut menyebabkan kelembaban tanah pada Spodosol dengan perlakuan lebih tinggi dibandingkan tanpa perlakuan apapun.

Lebih lanjut, Gambar 5 menunjukkan perbandingan penurunan kelembaban tanah pada tiga jenis dan perlakuan tanah. Pengukuran tersebut dilakukan pada saat kondisi lapangan tidak ada hujan (musim kering) pada Juli hingga September 2023. Berdasarkan kondisi tersebut didapatkan persamaan kuadrat untuk ultisol $y = 1.15e-07x^2 - 2.4e-03x + 48,7$; Spodosol *Mounding* $y = -2,33e-07x^2 - 1,27e-03x + 40,2$; dan Spodosol $y = -2,03e-07x^2 - 1,49e-03x + 34,1$. Ultisol menunjukkan penurunan kelembaban yang tidak sebesar yang terjadi pada Spodosol dengan perlakuan *mounding* dan Spodosol tanpa perlakuan. Nilai terendah kelembaban tanah Ultisol pada kurun waktu pengamatan tersebut adalah

40,22%. Hal ini tidak berbeda jauh dengan penelitian Hassan *et al.* (2022) yang menyatakan kadar air di tanah liat merah bervariasi antara 37-46%, dengan kadar air optimal 35,5%.

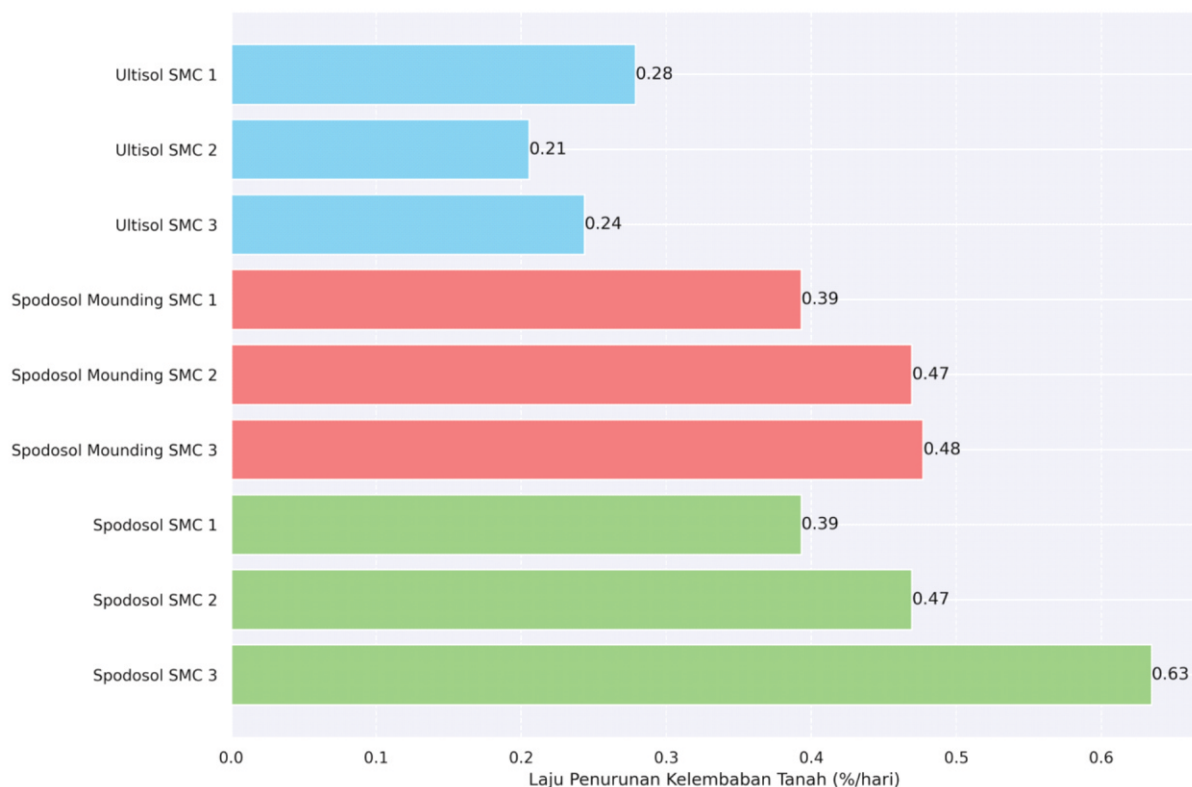
Pada tanah Spodosol baik *mounding* maupun tanpa perlakuan mengalami penurunan kelembaban tanah yang lebih besar dibandingkan dengan tanah Ultisol. Hal ini karena tanah Spodosol memiliki porositas lebih tinggi, sehingga apabila terjadi cekaman kekeringan akan cepat mengalami penurunan lengas tanah (Rout & Arulmozhiselvan, 2019). Yang *et al.* (2019) juga melaporkan bahwa dengan pengurangan stabilitas agregat tanah secara signifikan dapat menurunkan kadar air tanah. Siebielec *et al.* (2020) menambahkan bahwa stres kekeringan di tanah dengan tekstur pasir yang lebih tinggi, seperti Spodosol, dapat menyebabkan penurunan kelembaban tanah yang cepat.



Gambar 5. Perbandingan laju penurunan kelembaban tanah berdasarkan jenis tanah
 Figure 5. Comparison of the rate of decrease in soil moisture based on soil type

Gambar 6 menunjukkan laju penurunan kelembaban tanah per hari pada tiga jenis tanah yaitu Ultisol, Spodosol *Mounding*, dan Spodosol yang dihitung menggunakan persamaan 1. Berdasarkan perhitungan tersebut, Ultisol menunjukkan penurunan kelembaban yang tidak sebesar yang terjadi pada Spodosol *Mounding* dan Spodosol. Jika ditinjau lebih lanjut, laju penurunan lengas tanah terendah terjadi pada tanah Ultisol yaitu berkisar antara 0,21-0,28%

per hari, sedangkan tertinggi pada Spodosol tanpa perlakuan yaitu mencapai 0,39-0,63% per hari (Gambar 7). Spodosol dengan perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* memiliki laju penurunan lengas tanah yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan Spodosol tanpa perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan pecah *hardpan* dan *mounding* sudah cukup baik dalam memperlambat laju penurunan lengas tanah.



Gambar 6. Perbandingan laju penurunan kelembaban tanah pada berbagai kedalaman dan jenis serta perlakuan tanah

Figure 6. Comparison of the rate of decrease in soil moisture at various heights and types as well as soil treatments

Grafik tersebut menunjukkan bahwa kelembaban tanah pada ketiga jenis tanah tersebut semakin kecil seiring dengan bertambahnya waktu pengamatan. Hal ini sesuai dengan pendapat Pham *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa kelembaban tanah semakin berkurang seiring berjalannya waktu akibat penguapan dan transpirasi. Hal ini disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu evaporasi dan transpirasi (Skrzypek *et al.*, 2019). Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan tanah dan badan air. Proses ini terjadi

karena adanya perbedaan tekanan uap air antara permukaan tanah dengan udara (Kamai & Assouline, 2018). Semakin tinggi suhu udara, semakin tinggi pula tekanan uap air di udara. Hal ini menyebabkan air dari tanah akan menguap lebih cepat (Tsytkin, 2017). Selain suhu udara, kelembaban udara juga dapat mempengaruhi laju evaporasi. Kelembaban udara yang tinggi akan menyebabkan tekanan uap air di udara menjadi lebih tinggi. Hal ini menyebabkan air dari tanah akan menguap lebih lambat (Shao *et al.*,

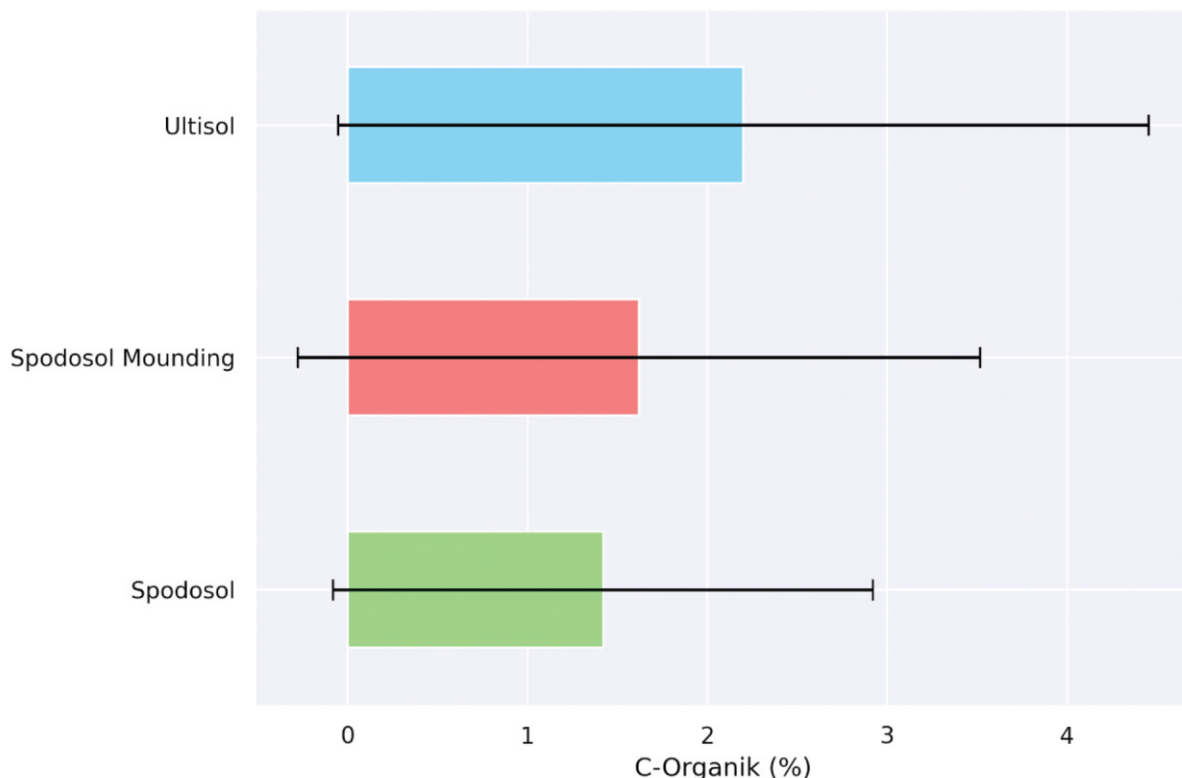
2018).

Laju penurunan kelembaban tanah juga dipengaruhi oleh transpirasi pada tanaman kelapa sawit. Transpirasi merupakan proses penguapan air dari tanaman. Proses ini terjadi karena adanya perbedaan tekanan uap air antara daun dan udara. Semakin tinggi suhu udara, semakin tinggi pula tekanan uap air di udara (Paul-Limoges *et al.*, 2020). Hal ini menyebabkan air dari daun akan menguap lebih cepat. Suhu udara yang lebih tinggi menyebabkan air menguap dari daun kelapa sawit lebih cepat, mempengaruhi pengurangan kelembaban tanah (Hatfield & Dold, 2019). Akar tanaman juga merespon kejadian tersebut dengan mengambil air dari lapisan tanah yang dalam dan lembab seiring waktu menurunnya kelembaban tanah pada lapisan tanah atas (Momii *et al.*, 2021).

Selain suhu udara, transpirasi juga dipengaruhi oleh faktor-faktor lain, seperti kelembaban udara, kecepatan angin, dan jenis tanaman. Kelembaban udara yang rendah akan menyebabkan tekanan uap

air di udara menjadi lebih rendah. Hal ini menyebabkan air dari daun akan menguap lebih cepat. Angin yang kencang dapat membantu membawa uap air dari daun ke udara yang menyebabkan laju transpirasi menjadi lebih tinggi (Seo *et al.*, 2016). Kitaya (2016) menyatakan bahwa kecepatan angin yang meningkat dari 0,01 hingga 0,3 m s⁻¹ menyebabkan laju transpirasi daun 2 kali lipat.

Rasio transpirasi vegetasi terhadap evaporasi umumnya meningkat di lahan bervegetasi dibandingkan padang rumput dan lahan pertanian (Li *et al.*, 2022). Vegetasi dan *cover crop* memiliki efek paling kuat dalam mengurangi tingkat penguapan, dengan pengurangan sebanyak 6,4 kali lipat dibandingkan dengan tanah terbuka di hutan kering dan padang rumput (Magliano *et al.*, 2017). Pada wilayah yang lembab, terdapat korelasi kuat antara transpirasi, evapotranspirasi aktual, dan evapotranspirasi potensial dengan presipitasi memiliki peran yang relatif minor (Zhang *et al.*, 2017).



Gambar 7. Perbandingan C-Organik pada berbagai jenis serta perlakuan tanah
Figure 7. Comparison of C-Organic in various types and soil treatments

Gambar 7 menunjukkan perbandingan C-organik pada berbagai jenis serta perlakuan tanah. Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa tanah Ultisol memiliki C-organik tertinggi sedangkan spodosol tanpa perlakuan memiliki C-Organik terendah. Namun demikian, jika dibandingkan antar tanah Spodosol, Spodosol *mounding* cenderung lebih baik dibandingkan Spodosol tanpa perlakuan. Hal ini juga sesuai dengan tren yang tergambar pada grafik perubahan laju kelembaban tanah yang menunjukkan kesamaan pola. Tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi akan memiliki laju penurunan kelembaban tanah yang lebih lambat karena kemampuannya untuk menyerap dan menahan air (Querejeta, 2017). Bahan organik dapat membentuk agregat tanah yang lebih stabil (Šimanský & Bajčan, 2014). Agregat tanah yang stabil dapat membantu menahan air dan mencegahnya dari terbawa oleh air hujan atau angin. Selain itu, bahan organik dapat meningkatkan porositas tanah (Buchmann & Schaumann, 2018). Porositas tanah yang tinggi dapat membantu tanah menyimpan air. Oleh karena itu, tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi akan memiliki laju penurunan kelembaban tanah yang lebih lambat (Kane *et al.*, 2021).

Dinamika Suhu Tanah

Data suhu tanah untuk tiga jenis tanah yang diamati dalam penelitian ini memberikan wawasan yang penting tentang variabilitas termal di dalam profil tanah. Ultisol pada T1 menunjukkan suhu tanah bervariasi antara 25,49-31,75°C. Pada T2, suhu tanah berkisar 25,88-30,69°C. Sensor T3 menunjukkan suhu tanah berkisar 26,19-30,68°C. Pada Spodosol dengan perlakuan *mounding*, suhu tanah T1 berkisar 25,71-30,68°C. Pada T2, suhu tanah memiliki rentang 24,26-29,27°C. T3 menunjukkan suhu tanah berkisar 26,29-28,12°C. Pada jenis tanah Spodosol tanpa perlakuan, T1 menunjukkan suhu tanah bervariasi antara 24,89-33,11°C. Pada T2, suhu tanah memiliki rentang 26,55-30,08°C. Adapun T3 menunjukkan suhu tanah berkisar 27,37-29,31°C.

Berbeda dengan kelembaban tanah, perbedaan suhu tanah antar jenis tanah tidak begitu jelas. Meskipun demikian, terdapat

perbedaan yang cukup mencolok pada T1, dimana tanah Spodosol tanpa perlakuan menunjukkan fluktuasi suhu yang lebih signifikan dibandingkan dengan jenis tanah lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu tanah pada kedalaman 0-30 cm dipengaruhi secara langsung oleh perubahan suhu di permukaan. Nilai T1 dari masing-masing jenis tanah juga memberikan gambaran yang menarik. Ultisol memiliki suhu tanah antara 25,49-31,75°C, median 27,49°C, dan mean 27,58°C. Spodosol dengan *mounding* memiliki suhu tanah antara 24,26-30,68°C, median 27,29°C, dan mean 27,36°C. Spodosol tanpa perlakuan memiliki suhu tanah antara 24,89-33,11°C, median 28,20°C, dan mean 28,40°C. Data ini menggambarkan perbedaan dalam respons terhadap fluktuasi suhu di permukaan tanah. Nilai minimum, maksimum, median, dan mean suhu tanah pada masing-masing kedalaman di setiap jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.

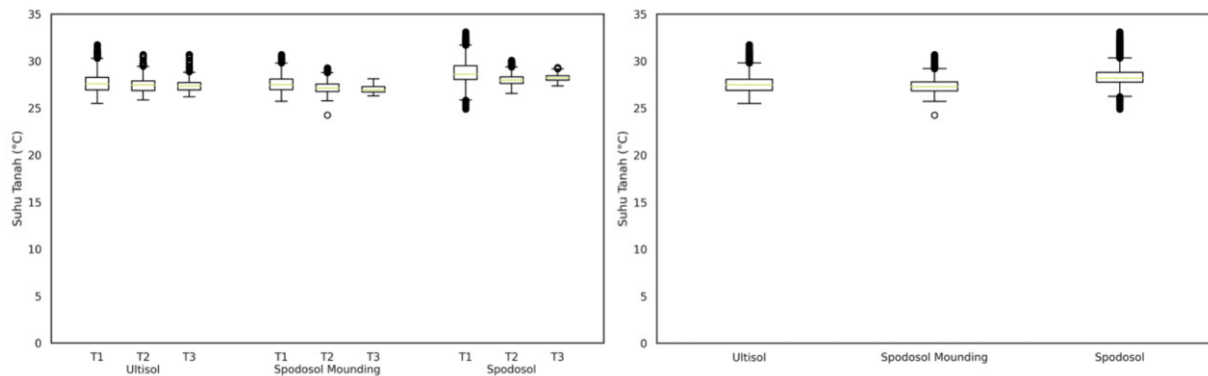
Berdasarkan visualisasi boxplot pada Gambar 7 dapat diketahui lebih jelas bahwa Ultisol memiliki suhu tanah yang paling rendah, diikuti oleh Spodosol dengan *mounding*, dan Spodosol tanpa perlakuan. T1 memiliki suhu tanah yang paling tinggi, diikuti oleh T2, dan T3. Rentang fluktuasi suhu T1 pada Spodosol dengan *mounding* lebih sempit dibandingkan jenis tanah lain. Sementara itu, suhu tanah pada Spodosol tanpa perlakuan memiliki rerata tertinggi dan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan dengan Ultisol dan Spodosol dengan *mounding*.

Perbedaan suhu tanah pada ketiga jenis tanah tersebut dapat dijelaskan oleh dua faktor utama, yaitu kandungan bahan organik dan kedalaman tanah. Ultisol memiliki kandungan bahan organik yang lebih tinggi daripada Spodosol dan Spodosol dengan perlakuan *mounding*. Bahan organik dapat membantu menahan air dan menyerap panas. Oleh karena itu, tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi akan memiliki suhu tanah yang lebih rendah. T1 memiliki kedalaman yang lebih dangkal daripada T2 dan T3. Tanah yang lebih dangkal akan lebih mudah terkena panas dari radiasi matahari. Oleh karena itu, tanah dengan kedalaman yang lebih dangkal akan memiliki suhu tanah yang lebih tinggi.

Tabel 3. Nilai minimum, maksimum, median, dan rerata suhu tanah pada masing-masing kedalaman di setiap jenis tanah.

Table 3. Minimum, maximum, median and mean values of soil temperature at each depth in each soil type.

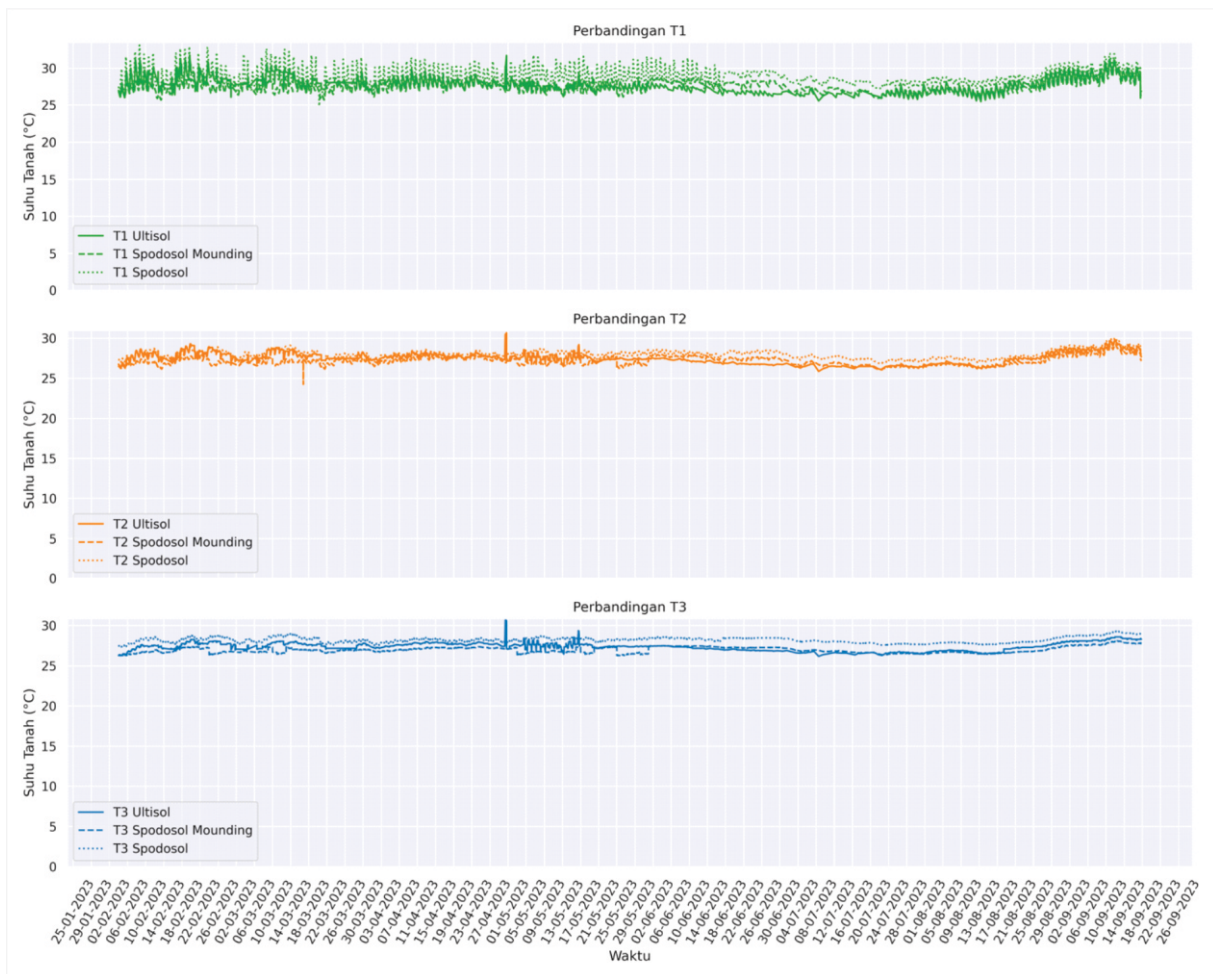
Jenis Tanah	Kedalaman Tanah	Suhu Tanah (°C)			
		Minimum	Maksimum	Median	Mean
Ultisol	0-30 cm	25,49	31,75	27,59	27,70
	30-60 cm	25,88	30,69	27,47	27,46
	60-90 cm	26,19	30,68	27,37	27,35
Spodosol Mounding	0-30 cm	25,71	30,68	27,49	27,54
	30-60 cm	24,26	29,27	27,13	27,18
	60-90 cm	26,29	28,12	26,91	26,98
Spodosol	0-30 cm	24,89	33,11	28,59	28,81
	30-60 cm	26,55	30,08	27,69	27,99
	60-90 cm	27,37	29,31	28,23	28,22



Gambar 7. Perbandingan suhu tanah antar kedalaman tanah (kiri) dan antar jenis tanah (kanan)
Figure 7. Comparison of soil temperature between soil depths (left) and between soil types (right)

Gambar 8 menggambarkan deret waktu perbandingan suhu tanah antar jenis tanah dan tipe perlakuan pada kedalaman tanah yang sama, mulai dari awal hingga akhir pengamatan. Suhu tanah pada T1 merupakan suhu tanah yang paling banyak berfluktuasi karena posisinya yang paling dekat dengan permukaan tanah. Permukaan tanah adalah lapisan tanah yang paling banyak menerima panas dari sinar matahari. Oleh karena itu, suhu tanah pada T1 akan lebih mudah berfluktuasi daripada lapisan tanah yang lebih dalam. Hasil ini sesuai

dengan penelitian Kader *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa suhu tanah pada lapisan atas lebih fluktuatif dibandingkan lapisan yang lebih dalam karena kedekatan permukaan tanah dengan area penerima sinar matahari. Chalhoub *et al.* (2017) menambahkan bahwa hal tersebut terjadi karena interaksi antara proses permukaan tanah dan dinamika panas dan kelembaban. Hasil penelitian tersebut juga sesuai dengan penelitian Hu *et al.* (2015); Huang *et al.* (2020); Li *et al.* (2022); dan Liu & Pu, (2019).



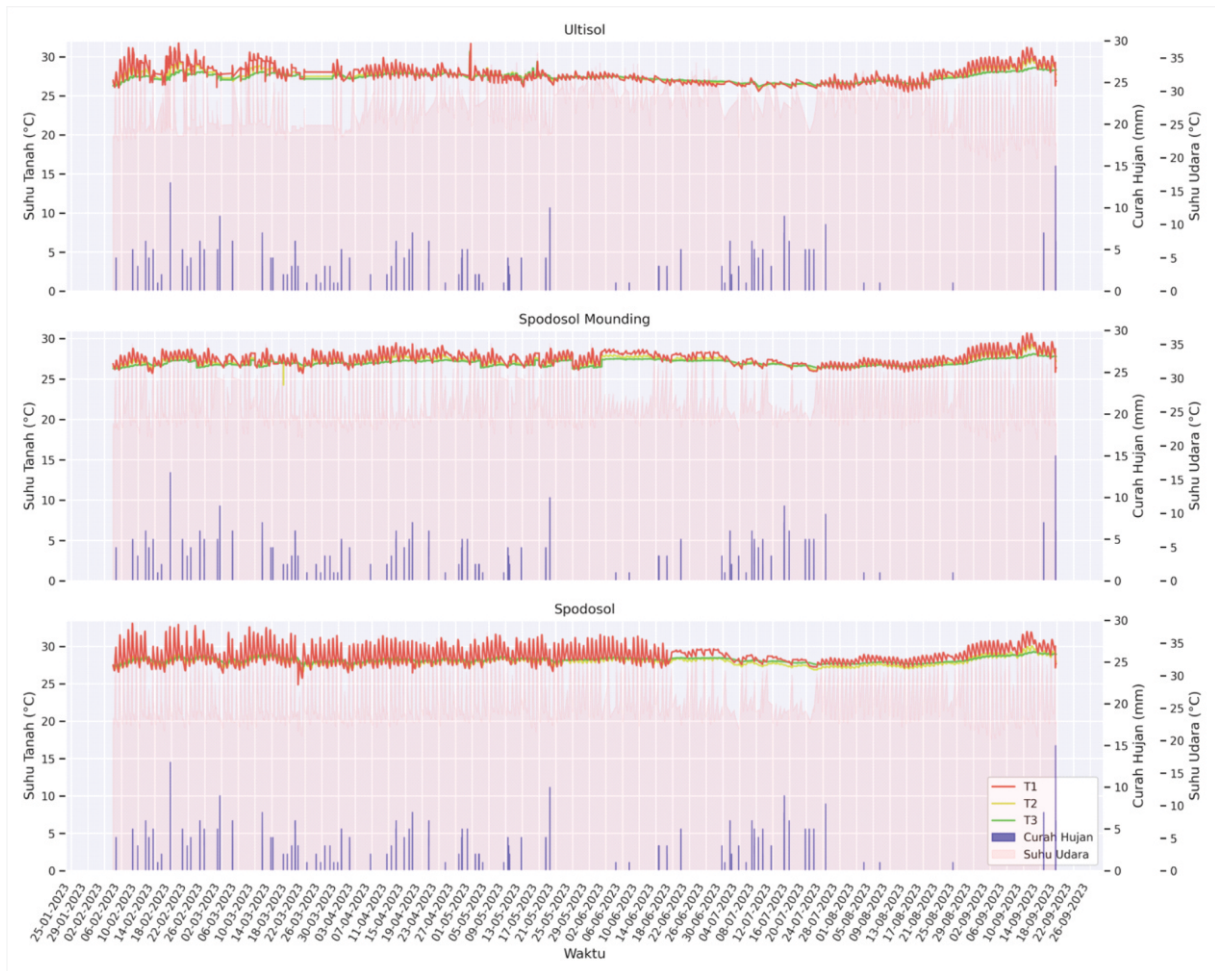
Gambar 8. Perbandingan suhu tanah pada beberapa jenis tanah dengan kedalaman yang sama
 Figure 8. Comparison of soil temperature at different soil types with same soil depth

Gambar 9 juga menunjukkan bahwa tanah Spodosol tanpa perlakuan lebih dipengaruhi oleh fluktuasi suhu udara dibandingkan jenis tanah lainnya. Hal tersebut karena Spodosol memiliki kandungan bahan organik yang rendah dan agregat tanah yang lebih rendah dibandingkan Ultisol dan Spodosol dengan perlakuan mounding. Bahan organik dapat membantu menahan air dan menyerap panas (Buchmann & Schaumann, 2018). Oleh karena itu, tanah dengan kandungan bahan organik yang rendah akan lebih mudah berfluktuasi suhunya. Penelitian sebelumnya juga menyatakan bahwa Spodosol dipengaruhi signifikan oleh fluktuasi suhu udara karena kandungan bahan organiknya yang rendah dan teksturnya berpori (Caplan *et al.*, 2016; Hartati *et al.*, 2021; Saha *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022).

Hal ini menyebabkan Spodosol lebih mudah menyerap dan melepaskan panas (Leslie *et al.*, 2015).

Korelasi Antar Kondisi Lingkungan dengan Perilaku Air Dalam Tanah

Berdasarkan analisis korelasi antar parameter pada tiap jenis tanah sesuai Gambar 10, ditemukan beberapa hubungan antara berbagai parameter lingkungan. Pertama, terdapat hubungan yang kuat antara suhu tanah dan tingkat kedalaman pemasangan sensor, yang mengindikasikan bahwa suhu tanah dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada kedalaman tanah. Selanjutnya, kelembaban tanah juga memiliki hubungan yang kuat dengan tingkat kedalaman pemasangan sensor,



Gambar 9. Seri data curah hujan, suhu udara, dan suhu tanah pada setiap jenis tanah
 Figure 9. Data series for rainfall, air temperature, and soil temperature for each type of soil

menunjukkan bahwa kadar air di dalam tanah bervariasi tergantung pada kedalaman tanah. Namun demikian, terdapat hubungan yang lemah antara suhu tanah dan kelembaban tanah, kecuali pada Spodosol *mounding* dimana terdapat hubungan kuat antara T2 dan SMC3 (dengan nilai korelasi $r = -0,88$), menunjukkan bahwa suhu tanah dan kelembaban tanah di daerah tersebut memiliki hubungan *invers*.

Korelasi antara curah hujan dengan parameter lainnya menunjukkan nilai yang rendah. Korelasi ini dihasilkan dari data deret waktu yang dianalisis secara bersamaan, sehingga diperlukan analisis *lag* (waktu jeda) lebih lanjut untuk menentukan waktu dimana terdapat korelasi tertinggi antara curah hujan dengan parameter lainnya. Analisis waktu jeda

antara curah hujan dan kelembaban tanah dengan basis data 15 menit yang dilakukan oleh Pradiko *et al.* (2020) menunjukkan bahwa curah hujan berkorelasi positif dengan kelembaban tanah. Untuk menunjukkan contoh kompleksnya korelasi antar variabel atau parameter, dilakukan plotting data curah hujan, suhu udara, dan suhu tanah (Gambar 10). Hasil plotting ini memberikan pemahaman yang baik tentang interaksi kompleks antara berbagai parameter lingkungan dalam studi ini.

Berdasarkan Gambar 10 diketahui bahwa fluktuasi suhu tanah sejalan dengan fluktuasi suhu udara. Onwuka (2018) menyatakan bahwa selain suhu udara, faktor penyebab fluktuasi suhu tanah adalah sinar matahari, evaporasi, dan transpirasi

tanaman. Sinar matahari merupakan sumber panas utama yang mempengaruhi suhu tanah (Haghighi & Or, 2015; Kidron & Kronenfeld, 2015). Yakubu *et al.* (2022) menambahkan fluktuasi suhu tanah sesuai dengan fluktuasi suhu udara, dengan waktu respons 2 hingga 3 jam karena perbedaan konduktivitas termal dan kapasitas panasnya. Air yang menguap (evaporasi) dari permukaan tanah juga akan membawa panas dari tanah. Air yang terserap oleh

tumbuhan dalam proses fotosintesis juga akan membawa panas dari tanah. Suhu udara juga dipengaruhi oleh ketiga faktor tersebut, sehingga fluktuasi suhu tanah akan sejalan dengan fluktuasi suhu udara (Voiku, 2019). Yu & Flerchinger (2015) menambahkan bahwa fluktuasi suhu tanah sejalan dengan fluktuasi suhu udara karena interaksi radiasi matahari, transfer air di dalam kanopi tanaman, dan fotosintesis.



Gambar 10. Korelasi parsial antar variabel penelitian pada tiap jenis tanah
 Figure 10. Partial correlation between variables for each type of soil

Curah hujan seharusnya juga berkorelasi dengan suhu tanah karena kelembaban tanah dipengaruhi oleh input air ke sistem tanah dari curah hujan. Akan tetapi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai waktu yang dibutuhkan oleh curah hujan untuk secara signifikan mempengaruhi kelembaban tanah di lokasi kajian.

KESIMPULAN

Soil Moisture Content Monitoring System (SMCMS) dapat beroperasi secara otomatis dan real-time dalam memonitor perilaku air pada tanah Ultisol serta Spodosol dengan dan tanpa perlakuan. Berdasarkan hasil monitoring dan analisis, dapat diketahui bahwa kadar kelembaban tanah pada lapisan bawah lebih tinggi dibandingkan lapisan atas, sementara suhu tanah pada lapisan bawah lebih rendah dibandingkan lapisan atas. Ultisol memiliki kemampuan mempertahankan kelembaban tanah yang paling baik. Sementara itu, Spodosol dengan perlakuan pemecahan hardpan dan *mounding* lebih mampu menahan air dibandingkan dengan

Spodosol tanpa perlakuan. Laju penurunan kelembaban tanah pada Spodosol tanpa perlakuan lebih besar dibandingkan Spodosol dengan perlakuan. Laju penurunan kelembaban terbesar dimiliki tanah Spodosol tanpa perlakuan.

Terdapat kecenderungan bahwa suhu tanah Spodosol dengan perlakuan lebih rendah dibandingkan jenis tanah lainnya. Sementara itu, suhu tanah pada Ultisol rendah dibandingkan Spodosol tanpa perlakuan. Lebih lanjut, suhu tanah di lapisan paling atas lebih tinggi dibandingkan lapisan yang lebih dalam pada semua jenis dan perlakuan tanah.

Adapun kelembaban tanah berkorelasi lemah dengan suhu tanah. Perilaku air khususnya suhu tanah memiliki korelasi yang lemah dengan suhu udara, sedangkan kelembaban tanah korelasinya sangat lemah dengan suhu udara. Korelasi kedua perilaku air tanah tersebut memiliki korelasi yang sangat lemah dengan curah hujan. Kondisi ini perlu dikaji lebih lanjut dengan melibatkan analisis *time-lag* dengan data lebih detail (10 menit).

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, C., Deák, B., & Heilmeier, H. (2016). Microtopography driven vegetation patterns in open mosaic landscapes. *Ecological Indicators*, 60, 906–920. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.030>
- An, N., Tang, C.-S., Xu, S.-K., Gong, X.-P., Shi, B., & Inyang, H. I. (2018). Effects of Soil Characteristics on Moisture Evaporation. *Engineering Geology*, 239, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.028>
- An, N., Tang, C.-S., Xu, S.-K., Gong, X.-P., Shi, B., & Inyang, H. I. (2019). Experimental Study of Moisture Evaporation Process with Different Soil Characteristics. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 7(2), 78–83. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v07.011>
- Ariyanti, M., Yahya, S., Murtlaksono, K., Suwanto, & Siregar, H. H. (2016). Water Balance in Oil Palm Plantation with Ridge Terrace and Nephrolepis Water Balance in Oil Palm Plantation with Ridge Terrace and Nephrolepis biserrata as Cover Crop. *Journal of Tropical Crop Science*, 3(2), 35–55. www.j-tropical-crops.com
- Baharuddin, M. F. T., Hazreek, Z. A. M., Azman, M. A. A., & Madun, A. (2018). Prediction of Groundwater Level at Slope Areas using Electrical Resistivity Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 995, 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012084>
- Buchmann, C., & Schaumann, G. E. (2018). The Contribution of Various Organic Matter Fractions to Soilwater Interactions and Structural Stability of an Agriculturally Cultivated Soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(4), 586–599. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700437>
- Caplan, J. S., Giménez, D., Subroy, V., Heck, R. J., Prior, S. A., Runion, G. B., & Torbert, H. A. (2016). Nitrogen-Mediated Effects of Elevated CO₂ on Intra-Aggregate Soil Pore Structure. *Global Change Biology*, 23(4), 1585–1597. <https://doi.org/10.1111/gcb.13496>
- Chalhoub, M., Bernier, M., Coquet, Y., & Philippe, M. (2017). A Simple Heat and Moisture Transfer Model to Predict Ground Temperature for Shallow Ground Heat Exchangers. *Renewable Energy*, 103, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.027>
- Cooper, J. D. (2016). *Soil Water Measurement*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119106043>
- Darras, K. F. A., Corre, M. D., Formaglio, G., Tjoa, A., Potapov, A., Brambach, F., Sibhatu, K. T., Grass, I., Rubiano, A. A., Buchori, D., Drescher, J., Fardiansah, R., Hölscher, D., Irawan, B., Kneib, T., Krashevskaya, V., Krause, A., Kreft, H., Li, K., ... Veldkamp, E. (2019). Reducing Fertilizer and Avoiding Herbicides in Oil Palm Plantations—Ecological and Economic Valuations. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00065>
- Eulenstein, F., Tauschke, M., Schindler, U., Müller, L., Lana, M. A., Schindler, R., Mayer, W. H., Drechsler, H., & Cremer, N. (2016). Agricultural Land Use Systems and Groundwater Quality: Impact Assessment Using Nutrient Balances for Evaluation, Monitoring and Conservation of Natural Resources. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 11, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.12.009>
- Filho, W. R. L. L., Rodrigues, F. H. S., Ferreira, I. V. L., Correa, L. O., Cunha, R. L., & Pinheiro, H. A. (2021). Physiological responses of young oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plants to repetitive water deficit events. *Industrial Crops and Products*, 172, 114052. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.114052>
- Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Olurin, O. T., & Ojekunle, Z. O. (2018). Evaluation of seasonal variation of water quality using multivariate statistical analysis and irrigation parameter indices in Ajakanga area, Ibadan, Nigeria. *Applied Water Science*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0677-y>
- Gavrilescu, M. (2021). Water, Soil, and Plants Interactions in a Threatened Environment. *Water*, 13(19), 2746. <https://doi.org/10.3390/w13192746>
- Gomboš, M., Kandra, B., Tall, A., & Pavelková, D. (2019). Analysis of Non-Rainfall Periods and Their Impacts on the Soil Water Regime. In *Hydrology - The Science of Water*. IntechOpen.

- <https://doi.org/10.5772/intechopen.82399>
- Graham, S. L., Laubach, J., Hunt, J. E., Eger, A., Carrick, S., & Whitehead, D. (2019). Predicting soil water balance for irrigated and non-irrigated lucerne on stony, alluvial soils. *Agricultural Water Management*, 226, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105790>
- H, J. L. C., Nicolodelli, G., Senesi, G. S., Montes, C. R., Perruci, N. A. F., Bezzon, V. D. N., Balogh, D. T., & Milori, D. M. B. P. (2020). Organo-Mineral Associations in A Spodosol from Northern Brazil. *Geoderma Regional*, 22, e00303. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00303>
- Haghighi, E., & Or, D. (2015). Turbulence-induced Thermal Signatures Over Evaporating Bare Soil Surfaces. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5325–5336. <https://doi.org/10.1002/2015gl064354>
- Hassan, S. A., Shitote, S. M., & Thuo, J. N. (2022). Investigation of the Impact of Tropical Red Clay Soils' Mineralogical Composition on their Physical and Mechanical Properties— a Case Study Ruaka – Kenya. *The Open Civil Engineering Journal*, 16(1). <https://doi.org/10.2174/18741495-v16-e2209260>
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hu, G., Zhao, L., Wu, X., Li, R., Wu, T., Xie, C., Qiao, Y., Shi, J., & Cheng, G. (2015). An Analytical Model for Estimating Soil Temperature Profiles on the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 8(2), 232–240. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0058-4>
- Hu, W., Chau, H. W., Qiu, W., & Si, B. (2017). Environmental controls on the spatial variability of soil water dynamics in a small watershed. *Journal of Hydrology*, 551, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.054>
- Huang, R., Huang, J., Zhang, C., Ma, H., Zhuo, W., Chen, Y., Zhu, D., Wu, Q., & Mansary, L. R. (2020). Soil Temperature Estimation at Different Depths, Using Remotely-Sensed Data. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1), 277–290. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(19\)62657-2](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62657-2)
- Jačka, L., Pavlásek, J., Kalibová, J., Bašta, P., Kovář, M., & Kuráž, V. (2018). The layering of a mountain podzol can strongly affect the distribution of infiltrated water in the soil profile. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(3), 348–356. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0014>
- Kader, M. A., Nakamura, K., Senge, M., Mojid, M. A., & Kawashima, S. (2020). Effects of Coloured Plastic Mulch on Soil Hydrothermal Characteristics, Growth and Water Productivity of Rainfed Soybean. *Irrigation and Drainage*, 69(3), 483–494. <https://doi.org/10.1002/ird.2431>
- Kamai, T., & Assouline, S. (2018). Evaporation From Deep Aquifers in Arid Regions: Analytical Model for Combined Liquid and Vapor Water Fluxes. *Water Resources Research*, 54(7), 4805–4822. <https://doi.org/10.1029/2018wr023030>
- Kane, D. A., Bradford, M. A., Fuller, E., Oldfield, E. E., & Wood, S. A. (2021). Soil Organic Matter Protects US Maize Yields and Lowers Crop Insurance Payouts Under Drought. *Environmental Research Letters*, 16(4), 44018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe492>
- Kidron, G. J., & Kronenfeld, R. (2015). Temperature Rise Severely Affects Pan and Soil Evaporation in the Negev Desert. *Ecohydrology*, 9(6), 1130–1138. <https://doi.org/10.1002/eco.1701>
- Kitaya, Y. (2016). Air Current Around Single Leaves and Plant Canopies and Its Effect on Transpiration, Photosynthesis, and Plant Organ Temperatures. In *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 177–187). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_13
- Kristanto, Y., Tarigan, S., June, T., Wahjunie, E. D., & Sulistyantara, B. (2022). Water Regulation Ecosystem Services of Multifunctional Landscape Dominated by Monoculture Plantations. *Land*, 11(6), 818. <https://doi.org/10.3390/land11060818>
- Leslie, D. M., Gangaiya, P., & Morrison, R. J. (2015). Two Lowland Tropical Spodosols from the Fiji Islands: First Report from Small Islands. *Pacific Science*, 69(3), 399–409. <https://doi.org/10.2984/69.3.8>

- Li, B., Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (2015). Groundwater variability across temporal and spatial scales in the central and northeastern U.S. *Journal of Hydrology*, 525, 769–780. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.033>
- Li, G., Zhao, H., Feng, F., Wu, Q., & Wei, B. (2022). Measurement and Analysis of Soil Temperature Field Based on Fiber Bragg Grating Sensor Array. *IEEE Access*, 10, 124705–124714. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3225199>
- Li, M., Wu, P., Ma, Z., Pan, Z., Lv, M., Yang, Q., & Duan, Y. (2022). The Increasing Role of Vegetation Transpiration in Soil Moisture Loss across China under Global Warming. *Journal of Hydrometeorology*, 23(2), 253–274. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-21-0132.1>
- Liu, J., & Pu, Z. (2019). Does Soil Moisture Have an Influence on Near-Surface Temperature? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12), 6444–6466. <https://doi.org/10.1029/2018jd029750>
- Ma, Y., Qu, L., Wang, W., Yang, X., & Lei, T. (2016). Measuring soil water content through volume/mass replacement using a constant volume container. *Geoderma*, 271, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.003>
- Magliano, P. N., Giménez, R., Houspanossian, J., Páez, R. A., Nosetto, M. D., Fernández, R. J., & Jobbágy, E. G. (2017). Litter is More Effective Than Forest Canopy Reducing Soil Evaporation in Dry Chaco Rangelands. *Ecohydrology*, 10(7). <https://doi.org/10.1002/eco.1879>
- Metzen, D., Sheridan, G. J., Benyon, R. G., Bolstad, P. V., Griebel, A., & Lane, P. N. J. (2019). Spatio-temporal transpiration patterns reflect vegetation structure in complex upland terrain. *Science of The Total Environment*, 694, 133551. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.357>
- Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A., & Pereira, L. S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>
- Momii, K., Hiyama, H., & Takeuchi, S. (2021). Field Sugarcane Transpiration Based on Sap Flow Measurements and Root Water Uptake Simulations: Case Study on Tanegashima Island, Japan. *Agricultural Water Management*, 250, 106836. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106836>
- Nelson, D. W., & Huber, D. M. (2015). *Performance of Nitrification Inhibitors in the Midwest (east)* (pp. 75–88). <https://doi.org/10.2134/asaspecpub38.c6>
- Novák, V., & Hlaváčiková, H. (2019). *Water and Energy Balance in the Field and Soil-Water Regimen* (pp. 243–251). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01806-1_15
- Nugroho, A. P., Kusumawati, N. B., Murtiningrum, Wiratmoko, A., Haryadi, I. M., Pradana, F. A., Suwardi, Sukarman, Primananda, S., & Sutiarto, L. (2023). Development of Soil Moisture Content Monitoring System for Precision Measurement of Soil Moisture in Sub-Optimal Land for Palm Oil Plantation. *BIO Web of Conferences*, 69, 05003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236905003>
- Oliveira, I. V. de, Aguiar, R. O., Lima, C. C., Cunha, R. L., Cruz, W. P. da, Silva, C. R. da, Silva, V. F. A., Silva, J. P. da, Carvalho, F. I. M., Martins, L. H. da S., Silva, P. A., & Pinheiro, H. A. (2020). Diurnal Variations in Water Potential and Gas Exchanges in Two-Hybrid Oil Palms Under Water Deficit. *Journal of Agricultural Science*, 12(12), 75. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n12p75>
- Onwuka, B. (2018). Effects of Soil Temperature on Some Soil Properties and Plant Growth. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(1). <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00288>
- Paul-Limoges, E., Wolf, S., Schneider, F. D., Longo, M., Moorcroft, P., Gharun, M., & Damm, A. (2020). Partitioning Evapotranspiration with Concurrent Eddy Covariance Measurements in A Mixed Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107786. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107786>
- Pham, M. T., Vernieuwe, H., Baets, B. De, Willems, P., & Verhoest, N. E. C. (2015). Stochastic Simulation of Precipitation-Consistent Daily Reference Evapotranspiration Using Vine Copulas. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(8), 2197–2214.

- <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1181-7>
- Pradiko, I., Farrasati, R., Rahutomo, S., Ginting, E. N., Candra, D. A. A., Krissetya, Y. A., & Mahendra, Y. S. (2020). Pengaruh iklim terhadap dinamika kelembaban tanah di piringan pohon tanaman kelapa sawit. *Warta PPKS*, 25(1), 39–51.
- Primananda, S., & Irfani, N. (2022). *Soil Fertility Assesment of Wilmar International Plantation Central Kalimantan Project Area Final Report 2022*.
- Querejeta, J. I. (2017). Soil Water Retention and Availability as Influenced by Mycorrhizal Symbiosis. In *Mycorrhizal Mediation of Soil* (pp. 299–317). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804312-7.00017-6>
- Reddy, G. P. O. (2018). *Remote Sensing and GIS in Digital Terrain Modeling* (pp. 201–222). https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_11
- Rout, P. P., & Arulmozhiselvan, K. (2019). Effect of Soil Texture on Drying Pattern of Soil Moisture after Saturation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(03), 697–704. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.086>
- Rye, C. F., & Smettem, K. R. J. (2017). The Effect of Water Repellent Soil Surface Layers on Preferential Flow and Bare Soil Evaporation. *Geoderma*, 289, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.032>
- Saha, A., Rattan, B., Sekharan, S., & Manna, U. (2020). Quantifying the Interactive Effect of Water Absorbing Polymer (WAP)-Soil Texture on Plant Available Water Content and Irrigation Frequency. *Geoderma*, 368, 114310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114310>
- Salinas-Melgoza, M. A., Skutsch, M., & Lovett, J. C. (2018). Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes. *Ecosphere*, 9(1). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2063>
- Seo, M., Park, D.-H., Lee, C. W., Jaworski, J., & Kim, J.-M. (2016). Fluorometric Measurement of Individual Stomata Activity and Transpiration via a Brush-on, Water-Responsive Polymer. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep32394>
- Shao, W., Coenders-Gerrits, M., Judge, J., Zeng, Y., & Su, Y. (2018). The impact of Non-Isothermal Soil Moisture Transport on Evaporation Fluxes in A Maize Cropland. *Journal of Hydrology*, 561, 833–847. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.033>
- Siebielec, S., Siebielec, G., Klimkowicz-Pawlas, A., Gałazka, A., Grządziel, J., & Stuczyński, T. (2020). Impact of Water Stress on Microbial Community and Activity in Sandy and Loamy Soils. *Agronomy*, 10(9), 1429. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091429>
- Šimansky, V., & Bajcan, D. (2014). Stability of Soil Aggregates and Their Ability of Carbon Sequestration. *Soil and Water Research*, 9(3), 111–118. <https://doi.org/10.17221/106/2013-sw>
- Skrzypek, G., Dogramaci, S., Page, G. F. M., Rouillard, A., & Grierson, P. F. (2019). Unique Stable Isotope Signatures of Large Cyclonic Events as a Tracer of Soil Moisture Dynamics in the Semiarid Subtropics. *Journal of Hydrology*, 578, 124124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124124>
- Sukarman, Saidy, A. R., Rusmayadi, G., Adriani, D. E., Primananda, S., Suwardi, Wirianata, H., & Fitriana, C. D. A. (2022). Effect of water deficit of Ultisols, Entisols, Spodosols, and Histosols on oil palm productivity in Central Kalimantan. *Sains Tanah*, 19(2), 180–191. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v19i2.65455>
- Suthersan, S., Quinnan, J., & Welty, N. (2015). The New Return on Investigations by Utilizing Characterization Methods. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 35(3), 25–33. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12118>
- Suwardi, Sutiarso, L., Wirianata, H., Nugroho, A. P., Pradiko, I., Ginting, E. N., Darlan, N. H., Syarovy, M., Primananda, S., & Sukarman. (2022). Mounding technique improves physiological performance and yield of oil palm on Spodosols. *Sains Tanah*, 19(2), 221–229. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v19i2.65460>
- Suwardi, Sutiarso, L., Wirianata, H., Nugroho, A. P., Sukarman, & Primananda, S. (2023). Substantial Changes in Physical and Chemical

- Properties of Spodosols Soil by Hardpan Breaking and Mounding in Oil Palm Plantation. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)*, 26. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_20
- Tezara, W., Domínguez, T. S. T., Loyaga, D. W., Ortiz, R. N., Chila, V. H. R., & Ortega, M. J. B. (2021). Photosynthetic activity of oil palm (*Elaeis guineensis*) and interspecific hybrid genotypes (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*), and response of hybrids to water deficit. *Scientia Horticulturae*, 287, 110263. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110263>
- Thakur, S., Hardaha, M. K., & Srivastava, P. (2018). Impact of Land Use/Cover Change on Hydrologic Characteristics: A Study on Upper Narmada Basin (MP), India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(2), 1206–1210. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.148>
- Tsytkin, G. G. (2017). Stability of the Evaporation and Condensation Surfaces in A Porous Medium. *Fluid Dynamics*, 52(6), 777–785. <https://doi.org/10.1134/s0015462817060118>
- Turner, B. L., & Kodali, S. (2020). Soil system dynamics for learning about complex, feedback-driven agricultural resource problems: model development, evaluation, and sensitivity analysis of biophysical feedbacks. *Ecological Modelling*, 428, 109050. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109050>
- Voiku, I. P. (2019). Trends and Prospects of Soil Heating Under Conditions of Protected Ground. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315, 22031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/2/022031>
- Yagiura, Y., Chiba, H., Takemasa, M., Nomura, H., Akasaka, Y., & Kuga, S. (2018). Groundwater Level Measurement through the Earth Resistance Variation. *Japanese Geotechnical Journal*, 13(4), 423–430. <https://doi.org/10.3208/jgs.13.423>
- Yakubu, J. A., Onyeodi, U. A., Daniyan, L. O., Shuaibu, A., & Abangwu, U. J. (2022). Space-earth Coupling with Relation to Earths Thermal Capacity: A case study for Nsukka Region, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.5897/ijps2021.4964>
- Yang, L., Chen, L., & Wei, W. (2015). Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. *CATENA*, 124, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.014>
- Yang, Y. J., Liu, S. R., Wang, H., Chen, L., Lu, L. H., & Cai, D. X. (2019). Reduction in throughfall reduces soil aggregate stability in two subtropical plantations. *European Journal of Soil Science*, 70(2), 301–310. <https://doi.org/10.1111/ejss.12734>
- Yu, Q., & Flerchinger, G. N. (2015). Extending the Simultaneous Heat and Water (SHAW) Model to Simulate Carbon Dioxide and Water Fluxes over Wheat Canopy. In *Response of Crops to Limited Water* (pp. 191–214). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel1.c7>
- Yu, X., Huang, Y., Li, E., Li, X., & Guo, W. (2018). Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, northwest China. *CATENA*, 161, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.023>
- Zhang, Y., Chiew, F. H. S., Peña-Arancibia, J., Sun, F., Li, H., & Leuning, R. (2017). Global Variation of Transpiration and Soil Evaporation and the Role of Their Major Climate Drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6868–6881. <https://doi.org/10.1002/2017jd027025>
- Ziogas, A. I., & Kaleris, V. K. (2019). Establishing and Calibrating the Model of a Coastal Aquifer with Limited Data for Assessing the Safety of the Groundwater Exploitation. *Water Resources Management*, 33(8), 2693–2709. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02237-4>
- Zolfaghari, Z., Mosaddeghi, M. R., & Ayoubi, S. (2015). Based pedotransfer and soil spatial prediction functions for predicting Atterberg consistency limits and indices from easily available properties at the watershed scale in western Iran. *Soil Use and Management*, 31(1), 142–154. <https://doi.org/10.1111/sum.12167>

