

ANALISIS DINAMIKA *VAPOR PRESSURE DEFICIT* PADA LINGKUNGAN MIKROKLIMAT PADI SAWAH TERBUKA BERBASIS *SMART AUTOMATIC WEATHER STATION* TIPE ULTRASONIK

Analysis of Vapor Pressure Deficit Dynamics in the Open-Field Paddy Rice Microclimate Based on a Smart Ultrasonic Automatic Weather Station

Ardan Wiratmoko^{1,*}, Andri Prima Nugroho¹, Saifuddin Afif¹, Fahmi Arsyad¹, Mutiara Alifia Ramadhanty¹, Lilik Sutiarso¹

¹ Smart Agriculture Research Center, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

* Email: ardan.w@ugm.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2025.6.2.19697>

Naskah ini diterima pada 15 Juni 2025; revisi pada 10 Agustus 2025; disetujui untuk dipublikasikan pada 03 Desember 2025

ABSTRAK

Produksi padi sawah terbuka dipengaruhi dinamika mikroklimat yang mengatur transpirasi, keseimbangan energi–air kanopi, dan efisiensi penggunaan air, sehingga analisis *Vapor Pressure Deficit* (VPD) menjadi komponen penting dalam irigasi presisi berbasis data. Meskipun teknologi *Automatic Weather Station* telah berkembang, integrasi pengukuran resolusi temporal tinggi dengan analisis dinamika, hubungan antarvariabel, distribusi harian, serta klasifikasi atmosfer berbasis *clustering* VPD pada sistem padi sawah terbuka masih terbatas. Penelitian ini menganalisis dinamika VPD menggunakan *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik melalui karakterisasi mikroklimat, analisis temporal, korelasi linier, visualisasi heatmap, dan pengelompokan kondisi atmosfer. Hasil menunjukkan mikroklimat lembap dengan suhu rata-rata 27,19 °C, kelembaban relatif 88,81%, dan VPD rata-rata 0,46 kPa (0,01–1,79 kPa) yang didominasi defisit rendah hingga sedang. VPD dikendalikan kuat oleh suhu ($r \approx 0,96$) dan kelembaban relatif ($r \approx -1,00$), serta meningkat pada periode radiasi maksimum harian. *Clustering* mengidentifikasi dominasi defisit rendah (53,67%), diikuti tinggi (28,32%) dan sedang (18,01%). Integrasi pemantauan mikroklimat dan analisis VPD memberikan indikator operasional untuk mendukung irigasi presisi dan mitigasi stres atmosfer pada budidaya padi tropis.

Kata kunci: *vapor pressure deficit*, mikroklimat, *smart automatic weather station*, *clustering* VPD, padi sawah.

ABSTRACT

Open-field rice production is influenced by microclimate dynamics that regulate transpiration, canopy energy–water balance, and water-use efficiency, making Vapor Pressure Deficit (VPD) analysis an important component of data-driven precision irrigation. Although Automatic Weather Station technology has advanced, the integration of high temporal resolution measurements with dynamic analysis, intervariable relationships, daily distribution, and VPD clustering-based atmospheric classification in open-field rice systems remains limited. This study analyzes VPD dynamics using a Smart Automatic Weather Station of the ultrasonic type through microclimate characterization, temporal analysis, linear correlation, heatmap visualization, and atmospheric condition clustering. The results show a humid microclimate with an average temperature of 27.19 °C, relative humidity of 88.81%, and an average VPD of 0.46 kPa (0.01–1.79 kPa), dominated by low to moderate vapor deficit conditions. VPD is strongly controlled by temperature ($r \approx 0.96$) and relative humidity ($r \approx -1.00$), and increases during periods of

maximum daily radiation. Clustering identifies the dominance of low deficit (53.67%), followed by high (28.32%) and moderate (18.01%). The integration of microclimate monitoring and VPD analysis provides an operational indicator to support precision irrigation and atmospheric stress mitigation in tropical rice cultivation.

Keywords: *vapor pressure deficit, microclimate, smart automatic weather station, VPD clustering, paddy rice.*

PENDAHULUAN

Produksi padi sawah terbuka sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan mikroklimat yang mengendalikan proses fisiologis tanaman, termasuk transpirasi, pembukaan stomata, serta keseimbangan energi–air pada kanopi. Variasi suhu udara, kelembaban relatif, radiasi, dan dinamika atmosfer terbukti menentukan respons pertumbuhan serta produktivitas tanaman padi pada berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mikroklimat menjadi komponen penting dalam pengelolaan budidaya padi yang adaptif terhadap variabilitas iklim (Novick dkk., 2024; Stuerz & Asch, 2021; Y. Zhang dkk., 2025).

Salah satu parameter kunci yang merepresentasikan keterkaitan antara suhu udara dan kelembaban relatif adalah *Vapor Pressure Deficit* (VPD). VPD Adalah selisih antara tekanan uap jenuh dan tekanan uap aktual di atmosfer (Dzaky dkk., 2024). Nilai VPD berperan langsung dalam mengendalikan laju transpirasi, efisiensi penggunaan air tanaman, serta potensi terjadinya stres atmosfer pada sistem budidaya. Dengan demikian, dinamika VPD pada skala mikroklimat menjadi indikator penting dalam mendukung pengelolaan irigasi presisi dan peningkatan produktivitas padi, khususnya pada ekosistem sawah terbuka di wilayah tropis yang memiliki fluktuasi cuaca harian tinggi (He dkk., 2025; López-Cruz dkk., 2025).

Perkembangan teknologi pemantauan lingkungan berbasis sensor, khususnya *Automatic Weather Station* (AWS), memungkinkan pengamatan parameter mikroklimat secara kontinu dengan resolusi temporal tinggi (Nugroho dkk., 2023). Integrasi pencatatan suhu, kelembaban relatif, radiasi, angin, dan curah hujan secara *real time* memberikan peluang analisis dinamika atmosfer yang lebih komprehensif untuk mendukung manajemen air berbasis data (Azevedo dkk., 2025). Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada karakterisasi meteorologi umum atau estimasi evapotranspirasi, sementara kajian yang secara spesifik mengevaluasi dinamika, hubungan antarvariabel, distribusi temporal, serta klasifikasi kondisi atmosfer berbasis VPD pada lingkungan padi sawah terbuka masih terbatas (Botygin dkk., 2021; Wolfert dkk., 2017).

Selain itu, analisis VPD tidak hanya relevan pada nilai rata-rata, tetapi juga pada pola temporal harian, interaksi antarvariabel mikroklimat, serta pengelompokan kondisi atmosfer yang berhubungan langsung dengan respons fisiologis tanaman. Pendekatan statistik, korelasi, visualisasi distribusi temporal, dan metode *clustering* memungkinkan interpretasi yang lebih komprehensif terhadap dinamika VPD sebagai parameter integratif lingkungan tanaman (Fu dkk., 2025; Nugroho dkk., 2025). Informasi tersebut berpotensi menjadi dasar pengembangan sistem irigasi presisi serta strategi *smart farming* yang adaptif terhadap perubahan kondisi iklim di lahan sawah terbuka (Ghanem dkk., 2020; Růžicková dkk., 2025).

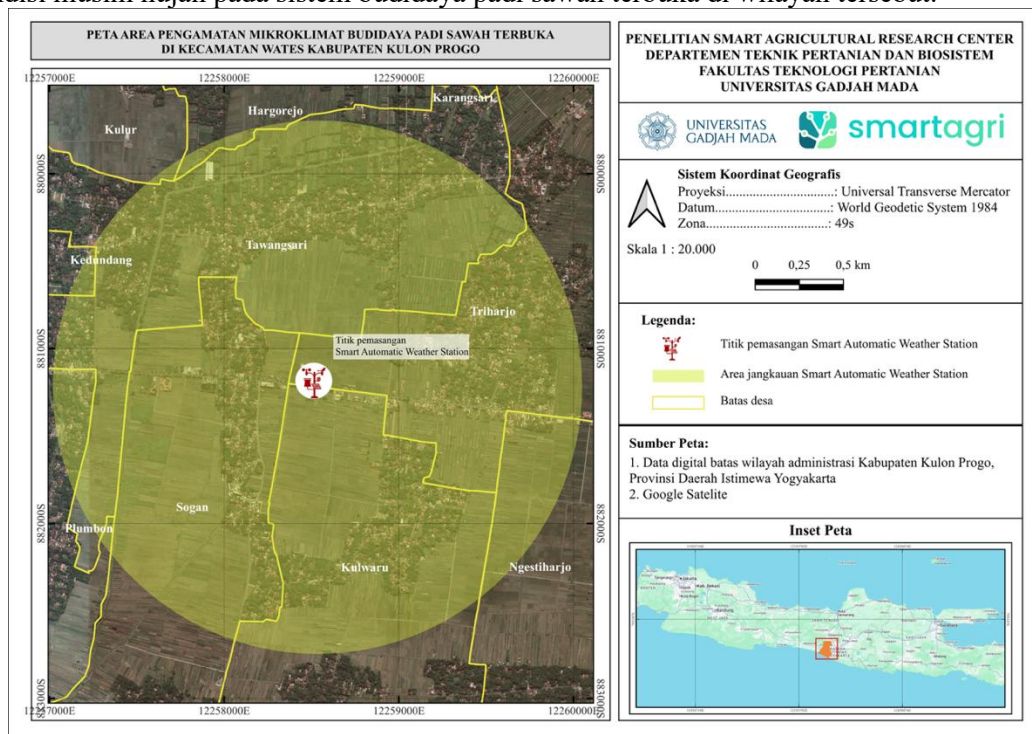
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika *Vapor Pressure Deficit* pada lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka menggunakan *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik. Analisis meliputi karakterisasi parameter mikroklimat, evaluasi dinamika temporal suhu udara, kelembaban relatif, dan VPD, analisis hubungan antarvariabel mikroklimat terhadap VPD, identifikasi distribusi harian VPD, serta pengelompokan kondisi atmosfer melalui pendekatan *clustering*. Hasil penelitian ini diharapkan memperkuat pemahaman interaksi mikroklimat–tanaman sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem pemantauan dan manajemen air presisi berbasis teknologi *smart sensing* pada budidaya padi sawah terbuka (Afif dkk., 2025; Wiratmoko dkk., 2023).

Penelitian ini mengintegrasikan pemantauan mikroklimat beresolusi temporal tinggi berbasis *Smart Automatic Weather Station* ultrasonik dengan analisis komprehensif dinamika *Vapor Pressure Deficit* pada ekosistem padi sawah terbuka. Pendekatan yang diterapkan tidak hanya mengevaluasi nilai rata-rata VPD, tetapi juga menganalisis pola temporal harian, hubungan kuantitatif antarvariabel mikroklimat, distribusi waktu kejadian, serta klasifikasi kondisi atmosfer menggunakan metode *clustering* yang relevan secara fisiologis bagi tanaman. Integrasi analisis dinamis dan klasifikasi operasional berbasis VPD ini menghasilkan kerangka interpretasi baru untuk mengidentifikasi periode kritis kebutuhan air tanaman serta respons atmosfer pada sistem budidaya padi tropis. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan indikator mikroklimat berbasis VPD yang dapat diterapkan secara langsung dalam irigasi presisi, mitigasi stres atmosfer, dan pengembangan *smart farming* berbasis data pada lahan sawah terbuka.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

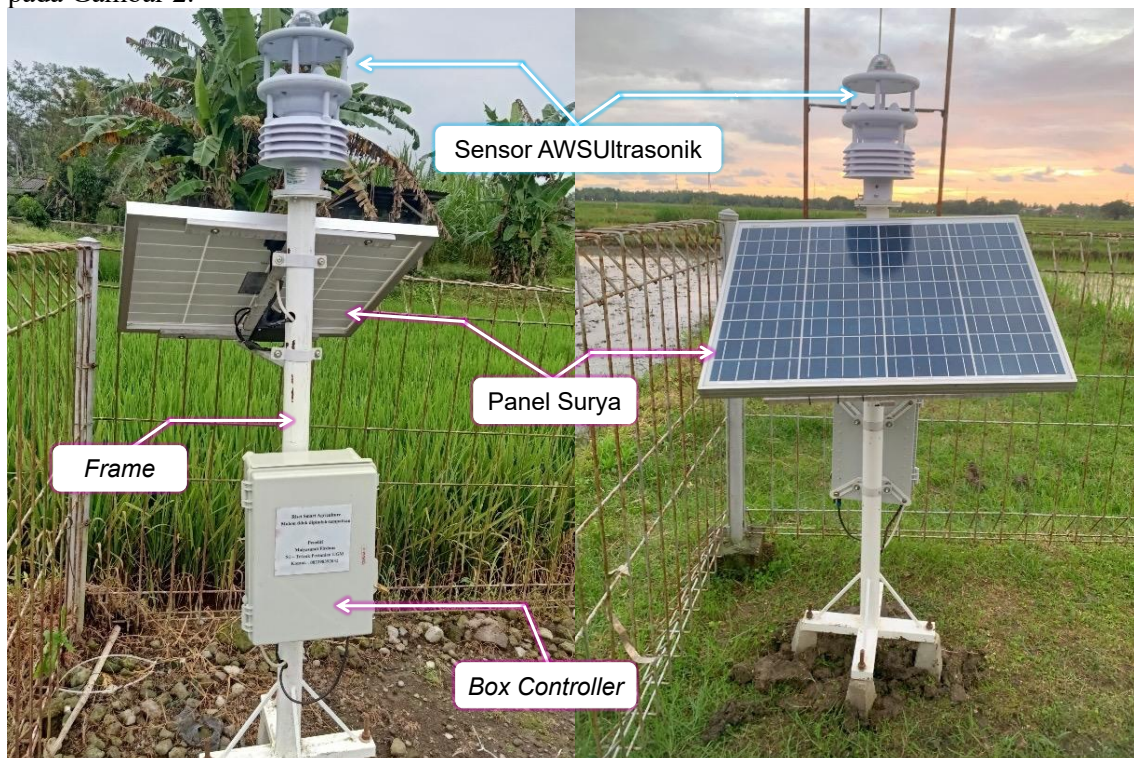
Penelitian ini dilaksanakan pada lahan padi sawah terbuka yang berlokasi disekitar Balai Penyuluhan Pertanian Wates Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta seperti pada Gambar 1. Lokasi penelitian berada pada 7°53'22" LS; 110°07'06" BT dengan ketinggian sekitar 18 m di atas permukaan laut. Lokasi penelitian berada pada wilayah pertanian bertanah pasir yang dipengaruhi kondisi iklim pesisir selatan. Pada bagian selatan lahan terdapat vegetasi pepohonan yang berfungsi sebagai sekat alami terhadap pengaruh angin laut. Secara klimatologis, suhu udara siang hari dapat mencapai sekitar 32 °C sedangkan suhu malam hari berkisar 24 °C, dengan karakteristik musim hujan yang ditandai oleh kejadian hujan berintensitas tinggi, yang secara umum merepresentasikan dinamika mikroklimat tropis pada sistem budidaya padi sawah terbuka (Shrestha dkk., 2019; Silva dkk., 2021; Sreeni & Vasudevan, 2024; Xin dkk., 2018). Pengamatan mikroklimat dilakukan selama 03 – 11 Desember 2024, yang merepresentasikan kondisi musim hujan pada sistem budidaya padi sawah terbuka di wilayah tersebut.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian di Persawahan di sekitar Balai Penyuluhan Pertanian Wates, Kab. Kulonprogo, D.I.Yogyakarta

Alat dan Bahan

Pengukuran parameter mikroklimat dilakukan menggunakan *Smart Automatic Weather Station* (AWS) tipe ultrasonik yang dirancang untuk pemantauan lingkungan secara kontinu dan *real time*. Sistem ini terdiri atas sensor suhu dan kelembaban udara dengan pelindung radiasi (*radiation shield*), sensor kecepatan dan arah angin ultrasonik tanpa komponen mekanis bergerak, sensor curah hujan, sensor intensitas cahaya matahari, panel surya sebagai sumber daya utama, baterai penyimpan energi, *box controller*. Seluruh komponen dipasang pada *frame* dengan konfigurasi pengukuran yang merepresentasikan kondisi atmosfer di sekitar kanopi tanaman padi. Pendekatan pemantauan lingkungan berbasis sensor terintegrasi dan konektivitas jarak jauh ini telah banyak digunakan dalam sistem pertanian cerdas dan monitoring agroklimat secara *real time* (Abraham dkk., 2017; Eze dkk., 2025; Kumar dkk., 2024; Mahmood dkk., 2026; Nugroho dkk., 2016; Wolfert dkk., 2017). Visualisasi perangkat *Smart Automatic Weather Station* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peralatan *Smart Automatic Weather Station* (AWS) Tipe Ultrasonik: (a) Tampak depan, (b) Tampak samping

Desain dan Prosedur Pengamatan

Prosedur penelitian ini dilaksanakan dengan metode pengamatan otomatis menggunakan *Smart Automatic Weather Station*. Pengamatan mikroklimat dilakukan dengan interval pencatatan waktu setiap 10 menit sehingga menghasilkan deret waktu parameter iklim yang meliputi suhu udara, kelembaban relatif, tekanan udara, kecepatan angin, arah mata angin, curah hujan, serta intensitas cahaya matahari. Pendekatan observasi kontinu beresolusi temporal tinggi merupakan karakteristik utama sistem pemantauan agroklimat modern untuk mendukung analisis dinamika lingkungan tanaman dan pengambilan keputusan berbasis data (Y.-C. Lin dkk., 2025; Nugroho dkk., 2016; Zhai dkk., 2020). Data yang terekam kemudian disimpan dalam *cloud system* untuk proses analisis lebih lanjut.

Penempatan AWS dilakukan pada area representatif lahan sawah terbuka tanpa hambatan langsung terhadap radiasi matahari dan aliran udara horizontal. Sensor AWS dipasang pada ketinggian $\pm 1,5$ m di atas permukaan tanah untuk merepresentasikan kondisi atmosfer pada zona pertukaran energi–uap air kanopi tanaman. Penentuan ketinggian ini mengacu pada praktik

pengamatan mikroklimat pertanian untuk analisis fisiologi tanaman dan dinamika defisit tekanan uap (Ali dkk., 2025). Selama periode pengamatan, sistem bekerja secara mandiri menggunakan suplai energi panel surya dan baterai sehingga kontinuitas data tetap terjaga meskipun terjadi perubahan kondisi cuaca, seperti yang diterapkan pada berbagai sistem monitoring lingkungan pertanian berbasis energi mandiri dan konektivitas jarak jauh (Hidayat dkk., 2019; Nugroho dkk., 2020, 2023).

Analisis *Vapor Pressure Deficit* (VPD)

Nilai *Vapor Pressure Deficit* (VPD) dihitung berdasarkan hubungan antara suhu udara dan kelembaban relatif menggunakan pendekatan tekanan uap jenuh (Dzaky dkk., 2024). Pendekatan ini umum digunakan dalam kajian fisiologi tanaman, evapotranspirasi, serta analisis mikroklimat pertanian karena merepresentasikan gradien tekanan uap antara permukaan daun dan atmosfer yang mengendalikan laju transpirasi (Bukhari dkk., 2019; Jiao dkk., 2018). Tekanan uap jenuh (*saturation vapor pressure*, e_s) dihitung dengan Persamaan 1 (Dzaky dkk., 2024).

$$e_s = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (1)$$

dengan T adalah suhu udara ($^{\circ}\text{C}$) dan e_s dalam satuan kPa. Tekanan uap aktual (*actual vapor pressure*, e_a) diperoleh dari Persamaan 2 (He dkk., 2025)

$$e_a = e_s \times \frac{RH}{100} \quad (2)$$

dimana RH adalah kelembaban relatif (%). Nilai VPD kemudian dihitung sebagai selisih antara tekanan uap jenuh dan tekanan uap aktual seperti pada Persamaan 3 (He dkk., 2025)

$$VPD = e_s - e_a \quad (3)$$

Perhitungan ini menghasilkan parameter integratif yang merepresentasikan gradien tekanan uap antara permukaan daun dan atmosfer, yang berkaitan langsung dengan proses transpirasi tanaman dan respons fisiologis terhadap kondisi lingkungan (Dzaky dkk., 2024; Fahad dkk., 2018; Mayanja dkk., 2024; Yanqing dkk., 2026).

Analisis dan Pengolahan Data

Data mikroklimat yang diperoleh dianalisis secara komputasional menggunakan bahasa pemrograman Python melalui lingkungan komputasi berbasis cloud Google Colaboratory untuk menjamin reproduisibilitas dan transparansi proses analisis (Rupnik dkk., 2019; Wolfert dkk., 2017; Zhai dkk., 2020). Tahapan pengolahan data meliputi statistik deskriptif, analisis temporal, korelasi antarvariabel, visualisasi distribusi harian berbasis *heatmap*, serta *clustering Vapor Pressure Deficit* (VPD) guna mengidentifikasi pola kondisi iklim (Htun dkk., 2022; Y.-C. Lin dkk., 2025; Mahmood dkk., 2026). Statistik deskriptif dihitung menggunakan pustaka NumPy dan pandas untuk memperoleh nilai rata-rata, simpangan baku, minimum, dan maksimum setiap parameter, sedangkan analisis temporal dilakukan melalui agregasi deret waktu guna mengevaluasi dinamika harian suhu udara, kelembaban relatif, dan VPD.

Hubungan antarvariabel dianalisis menggunakan korelasi linier Pearson yang diimplementasikan melalui pustaka pandas dan SciPy untuk menentukan faktor dominan pengendali VPD. Distribusi harian divisualisasikan dalam bentuk *heatmap* waktu-tanggal menggunakan Matplotlib dan Seaborn sehingga periode kritis VPD tinggi maupun rendah dapat

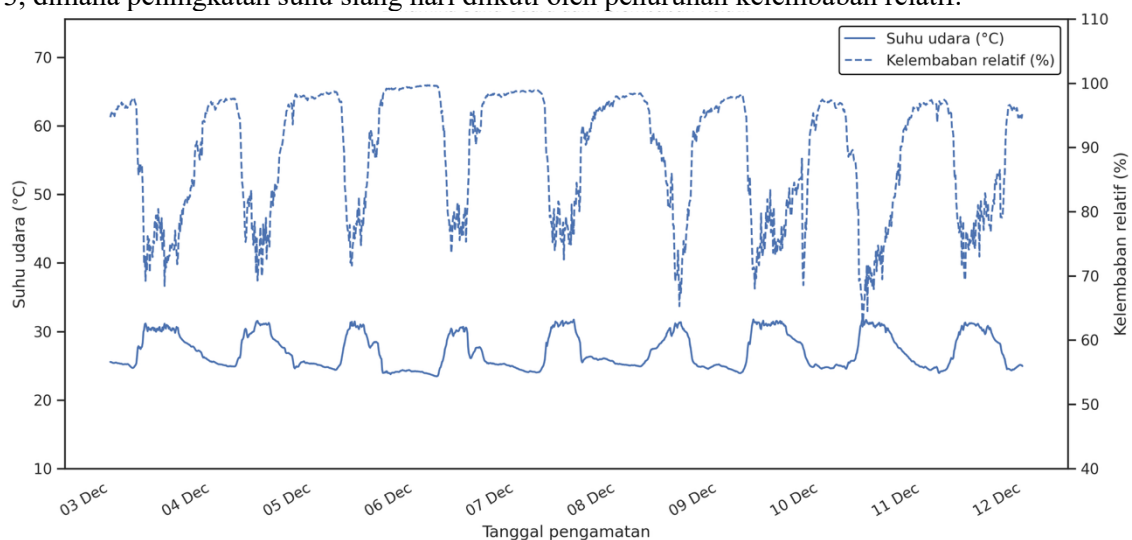
diidentifikasi secara visual. Selanjutnya, pendekatan *clustering* diterapkan menggunakan algoritma K-means dari pustaka scikit-learn untuk mengelompokkan kondisi atmosfer berdasarkan tingkat defisit tekanan uap menjadi kategori operasional yang relevan bagi interpretasi fisiologi tanaman dan pengelolaan air irigasi (Y.-C. Lin dkk., 2025; Rupnik dkk., 2019). Seluruh proses analisis dilakukan dalam satu alur komputasi terintegrasi berbasis skrip Python sehingga prosedur penelitian dapat direplikasi secara sistematis oleh peneliti lain pada kondisi agroekosistem yang berbeda, sekaligus mendukung prinsip open, transparent, and reproducible research dalam kajian mikroklimat pertanian berbasis data (Wolfert dkk., 2017; Zhai dkk., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Mikroklimat Lahan Padi Sawah Terbuka

Karakteristik mikroklimat pada lahan padi sawah terbuka merupakan faktor lingkungan utama yang mempengaruhi dinamika proses fisiologis tanaman, khususnya transpirasi, pembukaan stomata, serta pembentukan *Vapor Pressure Deficit* (VPD) (Koehler dkk., 2023; Sancho-Knapik dkk., 2022; Xue dkk., 2021). Berdasarkan hasil pengamatan kontinu menggunakan *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik, diperoleh pola variabilitas parameter atmosfer yang menunjukkan fluktuasi harian yang konsisten, namun tetap dipengaruhi oleh kejadian cuaca episodik seperti hujan dan perubahan tutupan awan (Chamara dkk., 2022).

Secara umum, suhu udara rata-rata selama periode pengamatan tercatat sebesar 27,19 °C dengan standar deviasi sebesar 2,55 °C, menunjukkan kondisi termal yang relatif stabil dan berada dalam kisaran optimum pertumbuhan padi tropis. Nilai minimum 23,45 °C umumnya terjadi pada malam hingga dini hari, sedangkan suhu maksimum 31,86 °C muncul pada siang hari ketika radiasi matahari mencapai puncaknya. Pola fluktuasi harian ini terlihat jelas pada Gambar 3, dimana peningkatan suhu siang hari diikuti oleh penurunan kelembaban relatif.



Gambar 3. Dinamika suhu udara dan kelembaban relatif pada lahan padi sawah terbuka selama periode pengamatan.

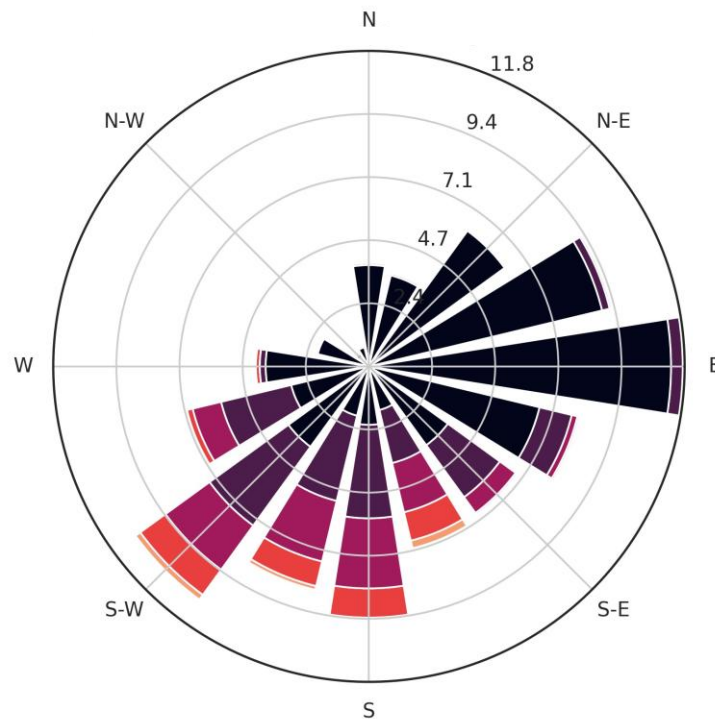
Kelembaban relatif rata-rata tercatat sebesar 88,81 % dengan standar deviasi sebesar 9,66 %, yang merepresentasikan kondisi atmosfer sangat lembab khas ekosistem sawah tergenang. Nilai maksimum mendekati kondisi jenuh (99,69 %) sering terjadi pada malam hingga pagi hari akibat tidak ada matahari dan akumulasi uap air di sekitar kanopi tanaman. Sebaliknya, nilai

minimum 62,10 % terjadi pada siang hari bersamaan dengan peningkatan suhu dan radiasi. Hubungan terbalik antara suhu dan kelembaban ini menjadi mekanisme utama pembentukan gradien tekanan uap yang selanjutnya menentukan dinamika VPD (Grossiord dkk., 2020; Novick dkk., 2024).

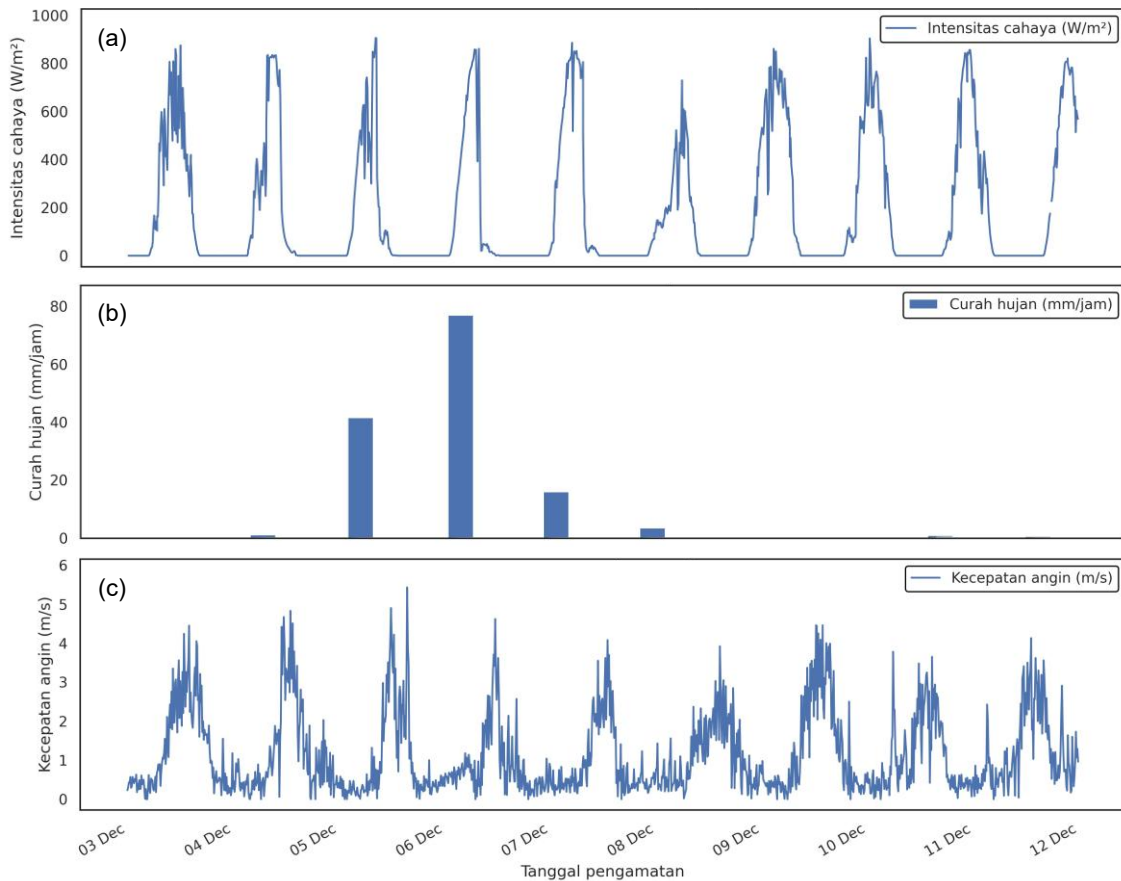
Parameter pengamatan yang lain yaitu tekanan udara. Tekanan udara menunjukkan variasi yang sangat kecil dengan rata-rata 1007,08 mbar dan simpangan baku 1,28 mbar, menandakan kondisi atmosfer regional yang relatif stabil sepanjang periode pengamatan. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa perubahan VPD pada skala harian lebih dominan dikontrol oleh suhu dan kelembaban dibandingkan oleh fluktuasi tekanan atmosfer (Grossiord dkk., 2020).

Parameter angin menunjukkan karakteristik yang lebih dinamis. Kecepatan angin rata-rata $1,13 \text{ m s}^{-1}$ dengan nilai maksimum $5,43 \text{ m s}^{-1}$ menunjukkan dominasi angin lemah hingga sedang yang umum pada lanskap persawahan terbuka. Variabilitas ini berperan dalam proses pertukaran massa uap air antara kanopi dan atmosfer bebas, sehingga turut memengaruhi perubahan VPD sesaat (Novick dkk., 2024). Distribusi arah mata angin yang tersebar luas, dengan rata-rata $149,18^\circ$ dan simpangan baku $79,99^\circ$, menunjukkan pola aliran udara yang tidak seragam akibat pengaruh topografi lokal dan dinamika konveksi harian seperti pada Gambar 4.

Curah hujan memiliki simpangan baku tinggi ($19,94 \text{ mm jam}^{-1}$) dengan maksimum mencapai $77,00 \text{ mm jam}^{-1}$, menandakan adanya kejadian hujan berintensitas tinggi yang bersifat episodik (Zhou dkk., 2026). Peristiwa hujan ini secara langsung meningkatkan kelembaban udara dan menurunkan suhu permukaan, sehingga menyebabkan penurunan tajam VPD dalam waktu singkat. Variasi temporal curah hujan serta parameter meteorologi lainnya dapat diamati pada Gambar 5.



Gambar 4. Variasi temporal harian arah mata angin selama periode pengamatan



Gambar 5. Variasi temporal harian: (a) intensitas cahaya, (b) curah hujan, dan (c) kecepatan angin pada sistem mikroklimat sawah terbuka

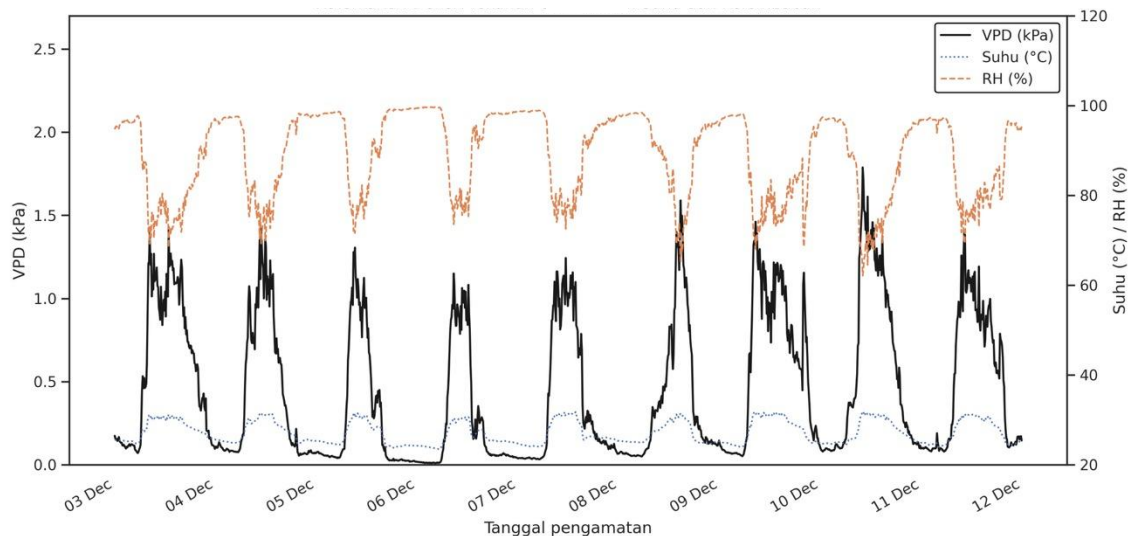
Intensitas cahaya menunjukkan fluktuasi paling kontras dengan rata-rata $187,97 \text{ W m}^{-2}$ dan maksimum $906,00 \text{ W m}^{-2}$, serta nilai mendekati nol pada malam hari. Siklus radiasi harian yang jelas ini berperan sebagai penggerak utama dinamika energi-air di sistem mikroklimat sawah terbuka (Flores-Velazquez dkk., 2022). Peningkatan radiasi siang hari berkorelasi langsung dengan kenaikan suhu dan penurunan kelembaban relatif, sehingga memperkuat pembentukan VPD, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.

Nilai rata-rata VPD sebesar $0,46 \text{ kPa}$ dengan rentang $0,01\text{--}1,79 \text{ kPa}$ menunjukkan bahwa kondisi atmosfer selama periode pengamatan didominasi oleh defisit tekanan uap rendah hingga sedang. Kisaran ini masih berada dalam batas yang mendukung proses transpirasi tanpa menimbulkan stres hidrik berlebih pada tanaman padi (Novick dkk., 2024). Namun demikian, kemunculan nilai mendekati $1,8 \text{ kPa}$ pada periode tertentu mengindikasikan potensi peningkatan kebutuhan air tanaman ketika suhu tinggi, radiasi maksimum, dan kelembaban rendah terjadi secara simultan.

Dinamika Temporal Suhu, Kelembaban Relatif, dan VPD

Dinamika temporal suhu udara, kelembaban relatif, dan *Vapor Pressure Deficit* (VPD) pada lahan padi sawah terbuka menunjukkan pola fluktuasi harian yang konsisten serta merepresentasikan interaksi erat antara proses radiasi, pertukaran energi permukaan, dan keseimbangan uap air atmosfer (Fu dkk., 2025; Hatfield & Prueger, 2015). Variasi ketiga parameter tersebut selama periode pengamatan menunjukkan siklus harian berulang, dimana peningkatan suhu udara pada siang hari diikuti oleh penurunan kelembaban relatif dan peningkatan nilai VPD, sedangkan pada malam hingga dini hari terjadi kondisi sebaliknya. Nilai rata-rata harian menunjukkan bahwa suhu udara harian berkisar antara $26,29\text{--}27,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan

kelembaban relatif 84,86–93,05% dan VPD rata-rata 0,28–0,63 kPa. Variasi ini menunjukkan bahwa meskipun kondisi mikroklimat relatif stabil, perubahan kecil pada suhu dan kelembaban mampu menghasilkan perbedaan nyata pada besaran VPD sebagai parameter integratif atmosfer tanaman (Shih dkk., 2025).



Gambar 6. Dinamika temporal suhu udara, kelembaban relatif, dan *Vapor Pressure Deficit* pada lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka selama periode pengamatan

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, suhu udara mulai meningkat secara bertahap sejak pagi hari dan mencapai puncaknya pada periode siang hingga awal sore. Peningkatan suhu ini berasosiasi langsung dengan penurunan kelembaban relatif akibat meningkatnya kapasitas udara dalam menahan uap air. Penurunan kelembaban relatif yang terjadi secara simultan dengan peningkatan suhu menghasilkan gradien tekanan uap yang lebih besar antara permukaan daun dan atmosfer, sehingga menyebabkan kenaikan VPD secara signifikan pada periode siang hari (Grossiord dkk., 2020; Novick dkk., 2024).

Nilai VPD minimum umumnya terjadi pada malam hingga dini hari ketika suhu udara rendah dan kelembaban relatif mendekati kondisi jenuh (Shih dkk., 2025). Pada kondisi tersebut, perbedaan tekanan uap antara ruang interseluler daun dan atmosfer menjadi sangat kecil sehingga laju transpirasi tanaman cenderung menurun (Sancho-Knapik dkk., 2022). Sebaliknya, nilai VPD maksimum muncul pada periode siang hari ketika kombinasi suhu tinggi dan kelembaban rendah terjadi secara bersamaan (Grossiord dkk., 2020). Puncak VPD yang mencapai kisaran lebih dari 1,5 kPa mengindikasikan peningkatan potensi kehilangan air melalui transpirasi serta meningkatnya kebutuhan air tanaman pada periode tersebut (Novick dkk., 2024; Yao dkk., 2023; Zhou dkk., 2026).

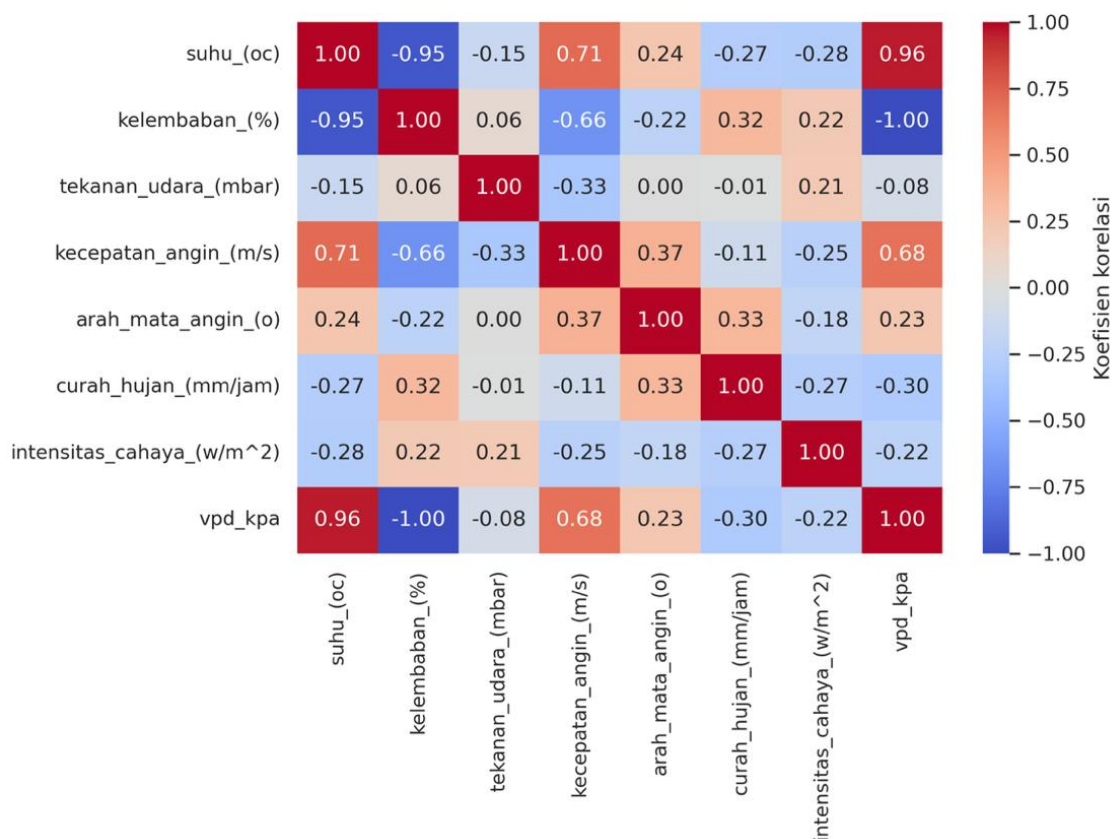
Pola fluktuasi yang relatif seragam dari hari ke hari menunjukkan bahwa dinamika VPD pada ekosistem sawah terbuka lebih dikendalikan oleh proses radiasi harian dibandingkan oleh perubahan kondisi atmosfer regional. Meskipun demikian, variasi amplitudo VPD antarmhari tetap terlihat, yang kemungkinan berkaitan dengan perubahan tutupan awan, kejadian hujan, serta dinamika kecepatan angin yang memengaruhi proses pertukaran uap air di sekitar kanopi tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa VPD merupakan parameter integratif yang merepresentasikan respons gabungan berbagai komponen mikroklimat (Fu dkk., 2025; Ghanem dkk., 2020).

Secara fisiologis, kisaran VPD yang teramati selama periode pengamatan masih berada dalam batas yang mendukung aktivitas transpirasi normal tanaman padi tanpa menunjukkan indikasi stres hidrik ekstrem. Namun demikian, kemunculan periode dengan VPD relatif tinggi pada siang hari menandakan adanya fase waktu kritis yang berpotensi memengaruhi efisiensi penggunaan air tanaman, sehingga informasi dinamika temporal ini menjadi penting dalam

mendukung strategi pengelolaan air berbasis pemantauan mikroklimat secara real time (P. Zhang dkk., 2022; Y. Zhang dkk., 2025).

Hubungan Antarvariabel Mikroklimat terhadap VPD

Analisis hubungan antarvariabel mikroklimat terhadap *Vapor Pressure Deficit* (VPD) memberikan pemahaman kuantitatif mengenai faktor dominan yang mengendalikan dinamika defisit tekanan uap pada lingkungan padi sawah terbuka (M. Wang dkk., 2025). Korelasi antarparameter dihitung menggunakan pendekatan statistik linier untuk mengidentifikasi kekuatan dan arah hubungan antara suhu udara, kelembaban relatif, tekanan udara, kecepatan angin, arah mata angin, curah hujan, serta intensitas cahaya terhadap variasi VPD (Grossiord dkk., 2020; Koehler dkk., 2023; Sancho-Knapik dkk., 2022).



Gambar 7. *Heatmap* matriks korelasi antarvariabel mikroklimat dan keterkaitannya terhadap *Vapor Pressure Deficit* pada lingkungan padi sawah terbuka

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, VPD memiliki korelasi positif yang sangat kuat dengan suhu udara ($r \approx 0,96$) dan korelasi negatif yang sangat kuat dengan kelembaban relatif ($r \approx -1,00$). Hubungan ini secara fisik konsisten dengan konsep dasar tekanan uap jenuh, di mana peningkatan suhu udara meningkatkan kapasitas udara menahan uap air, sedangkan peningkatan kelembaban relatif menurunkan gradien tekanan uap antara permukaan daun dan atmosfer (Ghanem dkk., 2020; Li dkk., 2021; Shih dkk., 2025; P. Zhang dkk., 2022; Y. Zhang dkk., 2025). Oleh karena itu, kombinasi suhu tinggi dan kelembaban rendah menjadi pengendali utama peningkatan VPD pada siang hari di lahan sawah terbuka (Fu dkk., 2025; Novick dkk., 2024; Zhou dkk., 2026).

Selain dua variabel utama tersebut, kecepatan angin menunjukkan korelasi positif sedang terhadap VPD ($r \approx 0,68$). Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan turbulensi udara di sekitar kanopi tanaman mempercepat difusi uap air dari permukaan daun ke atmosfer, sehingga

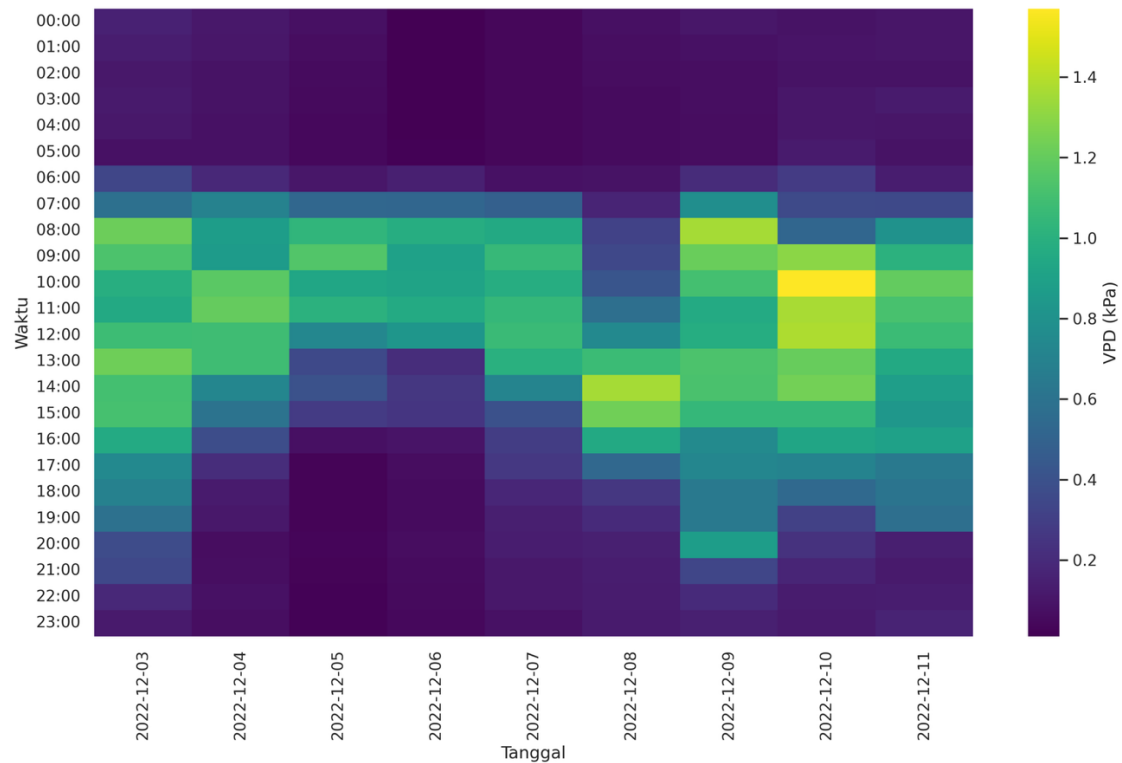
memperbesar defisit tekanan uap (Babić dkk., 2016; Sancho-Knapik dkk., 2022). Sebaliknya, tekanan udara menunjukkan korelasi yang sangat lemah terhadap VPD ($|r| < 0,1$), menandakan bahwa fluktuasi tekanan atmosfer pada skala pengamatan mikroklimat tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika defisit tekanan uap.

Curah hujan dan intensitas cahaya menunjukkan hubungan negatif lemah hingga sedang terhadap VPD. Penurunan VPD setelah kejadian hujan berkaitan dengan peningkatan kelembaban udara dan penurunan suhu akibat pendinginan evaporatif, sedangkan radiasi berperan dalam pengaturan keseimbangan energi dan evapotranspirasi permukaan (Flores-Velazquez dkk., 2022; Xue dkk., 2021). Sementara itu, hubungan negatif antara intensitas cahaya dan VPD pada hasil korelasi keseluruhan kemungkinan merepresentasikan dominasi periode malam hari dengan nilai cahaya nol yang berasosiasi dengan VPD rendah, sehingga menurunkan nilai korelasi linier secara agregat. Fenomena ini menunjukkan pentingnya interpretasi korelasi dalam konteks dinamika temporal harian.

Hubungan antarvariabel yang teridentifikasi menunjukkan bahwa VPD adalah parameter integratif yang merangkum interaksi simultan antara proses radiasi, kondisi termal atmosfer, serta dinamika pertukaran massa udara di sekitar tajuk tanaman (Grossiord dkk., 2020; Novick dkk., 2024). Dengan demikian, pemantauan VPD menggunakan *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik tidak hanya menyediakan indikator tunggal kondisi atmosfer, tetapi juga merepresentasikan respons gabungan berbagai komponen mikroklimat yang relevan terkait fisiologi tanaman padi dan pengelolaan air irigasi (Azevedo dkk., 2025; Chamara dkk., 2022). Hal ini sangat sesuai untuk menuju pertanian Indonesia yang maju dan berkelanjutan.

Distribusi Harian *Vapor Pressure Deficit*

Distribusi temporal *Vapor Pressure Deficit* (VPD) pada skala harian memberikan gambaran rinci mengenai dinamika defisit tekanan uap yang dialami lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka sepanjang siklus 24 jam. Visualisasi berbasis heatmap memungkinkan identifikasi pola waktu kejadian VPD tinggi maupun rendah secara simultan antarahari pengamatan, sehingga interpretasi tidak hanya bergantung pada nilai rata-rata harian, tetapi juga pada struktur variabilitas harian (M. Wang dkk., 2025). Pendekatan analisis temporal resolusi tinggi ini juga telah digunakan dalam berbagai studi mikroklimat tanaman untuk memahami keterkaitan antara dinamika iklim harian dan respons fisiologis tanaman terhadap perubahan VPD (Fu dkk., 2025; Novick dkk., 2024).



Gambar 8. *Heatmap* distribusi harian *Vapor Pressure Deficit* pada lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka berdasarkan interval waktu pengamatan

Berdasarkan Gambar 8, nilai VPD terendah secara konsisten terjadi pada periode malam hingga dini hari (sekitar pukul 00.00 – 06.00 WIB), yang ditandai oleh dominasi warna gelap pada peta distribusi. Kondisi ini berkaitan erat dengan suhu udara yang relatif rendah serta kelembaban relatif yang mendekati kondisi jenuh, sehingga gradien tekanan uap antara atmosfer dan permukaan daun menjadi minimal. Secara fisiologis, fase ini berasosiasi dengan penurunan laju transpirasi tanaman dan dominasi proses respirasi (Grossiord dkk., 2020; Jalakas dkk., 2021).

Memasuki periode pagi hingga siang hari (sekitar pukul 08.00 – 14.00 WIB), terlihat peningkatan VPD yang signifikan dan berulang pada hampir seluruh hari pengamatan. Zona warna terang pada rentang waktu tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara yang dipicu oleh radiasi matahari, bersamaan dengan penurunan kelembaban relatif, menghasilkan gradien tekanan uap yang lebih besar. Kondisi ini merepresentasikan fase atmosfer dengan potensi transpirasi maksimum, yang berimplikasi langsung terhadap kebutuhan air tanaman serta efisiensi penyerapan nutrisi melalui aliran massa (Koehler dkk., 2023; Yao dkk., 2023; Zhou dkk., 2026).

Variabilitas antarhari juga tampak jelas, di mana beberapa tanggal menunjukkan intensitas VPD puncak yang lebih tinggi dibandingkan hari lainnya. Perbedaan ini mengindikasikan pengaruh fluktuasi cuaca harian seperti tutupan awan, kejadian hujan, maupun perubahan dinamika angin terhadap keseimbangan energi dan uap air di sekitar kanopi tanaman. Dengan demikian, distribusi harian VPD tidak bersifat statis, melainkan merepresentasikan respons sistem mikroklimat terhadap forcing atmosfer harian (Novick dkk., 2024; Xue dkk., 2021).

Menjelang sore hingga malam (sekitar pukul 16.00 – 23.00 WIB), VPD kembali menurun secara bertahap seiring berkurangnya radiasi matahari dan meningkatnya kelembaban udara. Pola penurunan ini menunjukkan siklus harian yang relatif konsisten, menunjukkan bahwa dinamika VPD pada lahan padi sawah terbuka terutama dikendalikan oleh interaksi antara radiasi matahari, suhu udara, dan kelembaban relatif yang berubah secara periodik. Hasil penelitian ini sejalan dengan studi keseimbangan energi dan evapotranspirasi pada ekosistem padi yang menunjukkan

dominasi kontrol radiasi terhadap fluktuasi defisit tekanan uap harian (Flores-Velazquez dkk., 2022).

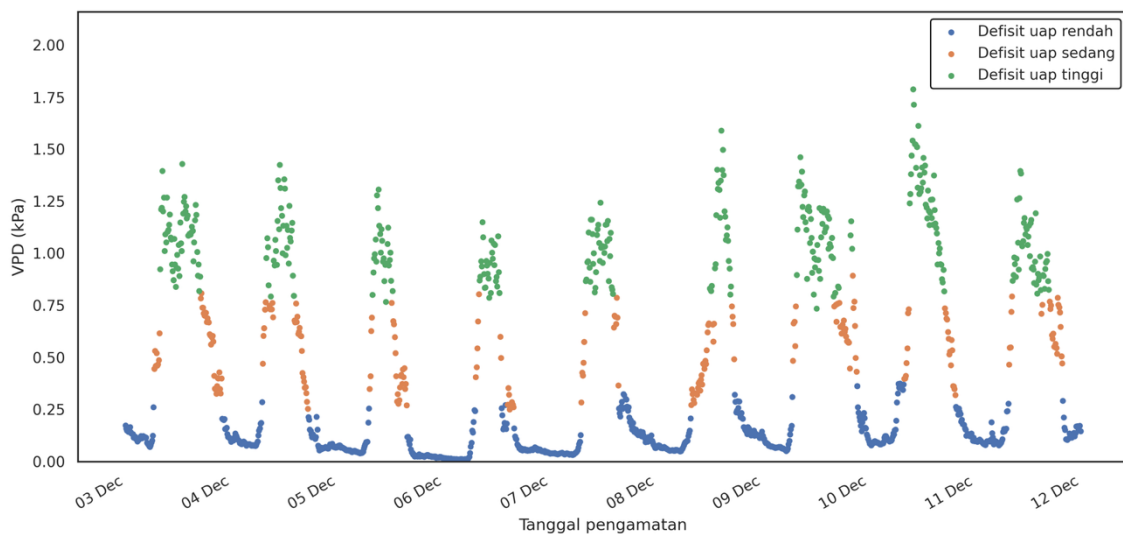
Clustering *Vapor Pressure Deficit* dan Implikasinya pada Lingkungan Budidaya Padi

Pendekatan clustering *Vapor Pressure Deficit* (VPD) digunakan untuk mengelompokkan kondisi atmosfer mikroklimat berdasarkan tingkat defisit tekanan uap yang dialami tanaman padi selama periode pengamatan. Metode ini memungkinkan identifikasi pola lingkungan yang memiliki karakteristik serupa secara kuantitatif, sehingga interpretasi kondisi tumbuh tidak hanya bergantung pada nilai kontinu VPD, tetapi juga pada kategori fungsional yang merepresentasikan tingkat tekanan atmosfer terhadap proses fisiologis tanaman (Kaboré dkk., 2025; S. Lin dkk., 2026). Pendekatan klasifikasi berbasis data tersebut semakin banyak digunakan dalam sistem pertanian presisi untuk mendukung pengambilan keputusan adaptif terhadap variabilitas kondisi lingkungan tanaman (Chamara dkk., 2022).

Tabel 1. Hasil *clustering Vapor Pressure Deficit* berdasarkan jumlah kejadian dan persentase kemunculan pada lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka selama periode pengamatan

VPD Clustering	Jumlah kejadian	Persentase (%)
Defisit uap rendah	739	53.67
Defisit uap tinggi	390	28.32
Defisit uap sedang	248	18.01

Secara kuantitatif, distribusi kejadian masing-masing kelompok clustering disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa kondisi defisit uap rendah mendominasi periode pengamatan dengan proporsi sekitar 53,67%, diikuti oleh defisit uap tinggi sebesar 28,32% dan defisit uap sedang sebesar 18,01%. Proporsi ini mengindikasikan bahwa lingkungan mikroklimat sawah terbuka lebih sering berada pada kondisi atmosfer lembap dengan tekanan transpirasi relatif rendah, namun tetap mengalami fase tekanan atmosfer tinggi dalam durasi yang signifikan secara agronomis. Pola dominasi kondisi defisit rendah pada sistem padi tergenang juga dilaporkan pada studi hidrologi dan pengelolaan air sawah yang menekankan peran kelembapan tinggi dalam menekan gradien tekanan uap atmosfer (Bwire dkk., 2024; Xue dkk., 2021).



Gambar 9. Hasil *clustering Vapor Pressure Deficit* yang menunjukkan pengelompokan kondisi defisit uap rendah, sedang, dan tinggi pada lingkungan mikroklimat padi sawah terbuka

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, hasil *clustering* memisahkan dinamika VPD menjadi tiga kelompok utama, yaitu defisit uap rendah, defisit uap sedang, dan defisit uap tinggi. Kelompok defisit uap rendah didominasi oleh nilai VPD mendekati nol yang umumnya terjadi pada malam hingga pagi hari. Kondisi ini merepresentasikan atmosfer dengan kelembaban relatif tinggi dan suhu udara rendah, sehingga gradien tekanan uap antara daun dan udara menjadi kecil. Dalam konteks fisiologi tanaman, fase ini berkaitan dengan laju transpirasi yang minimal serta dominasi proses respirasi dibandingkan fotosintesis (Grossiord dkk., 2020; Jalakas dkk., 2021).

Kelompok defisit uap sedang muncul terutama pada periode transisi pagi menuju siang atau sore menuju malam. Nilai VPD pada rentang ini menunjukkan kondisi atmosfer yang mulai meningkatkan potensi kehilangan air melalui transpirasi, namun belum mencapai tingkat tekanan atmosfer maksimum (Devi & Reddy, 2018). Secara agronomis, fase ini dapat dianggap sebagai kondisi lingkungan yang relatif stabil bagi pertumbuhan vegetatif, karena keseimbangan antara suplai air tanah dan kehilangan air melalui daun masih terjaga (Broughton & Conaty, 2022; Koehler dkk., 2023; Sancho-Knapik dkk., 2022).

Sementara itu, kelompok defisit uap tinggi teridentifikasi dominan pada periode siang hari ketika suhu udara meningkat dan kelembaban relatif menurun. Kondisi ini menghasilkan gradien tekanan uap yang besar antara jaringan tanaman dan atmosfer, sehingga mendorong laju transpirasi yang tinggi (Medina dkk., 2019). Implikasi langsungnya adalah meningkatnya kebutuhan air tanaman serta potensi terjadinya stres atmosfer apabila suplai air tidak mencukupi. Oleh karena itu, keberadaan fase VPD tinggi memiliki relevansi penting dalam strategi pengelolaan irigasi, terutama pada sistem budidaya padi sawah terbuka yang sangat dipengaruhi oleh variabilitas cuaca harian (Bwire dkk., 2024; Dzaky dkk., 2024; Novick dkk., 2024).

Distribusi temporal ketiga kelompok VPD pada Gambar 9 menunjukkan pola berulang yang mengikuti siklus harian radiasi matahari. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika VPD merupakan refleksi langsung dari interaksi energi radiasi, suhu udara, dan kelembaban atmosfer di sekitar kanopi tanaman (J. Wang & Wen, 2022). Oleh karena itu, *clustering* memberikan nilai tambah analitis karena mampu menerjemahkan fluktuasi mikroklimat yang kompleks menjadi kategori operasional yang lebih mudah digunakan dalam pengambilan keputusan budidaya (Chamara dkk., 2022; S. Lin dkk., 2026).

Secara keseluruhan, hasil *clustering Vapor Pressure Deficit* menunjukkan bahwa variasi kondisi atmosfer di lahan padi sawah terbuka berlangsung secara sistematis mengikuti siklus harian. Informasi ini penting dalam pengembangan sistem pemantauan mikroklimat berbasis *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik untuk mendukung manajemen air presisi dan mitigasi stres lingkungan tanaman. Integrasi klasifikasi VPD dengan sistem pengambilan keputusan otomatis juga berpotensi menjadi fondasi penerapan smart farming adaptif berbasis data pada budidaya padi modern (Chamara dkk., 2022; Sukarman dkk., 2024).

KESIMPULAN

Dinamika *Vapor Pressure Deficit* (VPD) pada lingkungan padi sawah terbuka terutama dikendalikan oleh interaksi suhu udara dan kelembaban relatif yang mengikuti siklus radiasi harian. Nilai VPD meningkat secara konsisten pada siang hari dan menurun pada malam hari, menunjukkan adanya periode kritis yang berkaitan langsung dengan kebutuhan air dan potensi stres atmosfer tanaman. Analisis korelasi menunjukkan bahwa suhu dan kelembaban relatif merupakan faktor dominan pengendali VPD, sedangkan kecepatan angin berperan sebagai faktor pendukung dalam pertukaran uap air antara kanopi dan atmosfer. Pendekatan *clustering* mampu mengelompokkan kondisi atmosfer ke dalam kategori operasional yang merepresentasikan tingkat tekanan transpirasi secara fungsional. Integrasi pemantauan mikroklimat beresolusi tinggi menggunakan *Smart Automatic Weather Station* tipe ultrasonik dengan analisis dinamika dan klasifikasi VPD menghasilkan indikator berbasis data yang relevan untuk mendukung irigasi

presisi, mitigasi stres atmosfer, serta pengembangan manajemen air adaptif pada budidaya padi sawah terbuka.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PUAPT UGM (Pusat Unggulan Antar Perguruan Tinggi Universitas Gadjah Mada) atas dukungan fasilitas sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Smart Agriculture Research Center, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, atas bantuan teknis serta dukungan selama proses pengembangan sistem, pelaksanaan penelitian, pengumpulan data, hingga tahap analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, S., Beard, J., & Manijacob, R. (2017). Remote environmental monitoring using Internet of Things (IoT). *2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2017.8239335>
- Afif, S., Wiratmoko, A., Nugroho, A. P., Okayasu, T., & Sutiarso, L. (2025). Design of Smart Plant Electrical Signal Monitoring System for Indoor Farming. *BIO Web of Conferences*, 167, 05004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516705004>
- Ali, M., Karim, M. R., Kabir, M. S., Haque, M. A., Lee, K.-H., & Chung, S.-O. (2025). Recognition of pepper plant and ridge characteristics using an ultrasonic sensor for smart upland crop production. *Journal of Agricultural Engineering*, 56(3). <https://doi.org/10.4081/jae.2025.1881>
- Azevedo, A. T., Coelho, R. D., Carnevskis, E. L., de Almeida, A. M., & Tabile, R. A. (2025). Development of an Automatic Weather Station for Irrigation Management via IoT. *Agricultural Research*, 14(3), 529–538. <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00786-8>
- Babić, K., Rotach, M. W., & Klaić, Z. B. (2016). Evaluation of local similarity theory in the wintertime nocturnal boundary layer over heterogeneous surface. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 164–179. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.002>
- Botygin, I. A., Volkov, Y., Proskurov, V., Sherstnev, V., & Sherstneva, A. (2021). Correlation-regression analysis of meteorological data from ultrasonic weather stations. Dalam O. A. Romanovskii & G. G. Matvienko (Ed.), *27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics* (hlm. 130). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2602981>
- Broughton, K. J., & Conaty, W. C. (2022). Understanding and Exploiting Transpiration Response to Vapor Pressure Deficit for Water Limited Environments. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.893994>
- Bukhari, S. A. H., Peerzada, A. M., Javed, M. H., Dawood, M., Hussain, N., & Ahmad, S. (2019). Growth and Development Dynamics in Agronomic Crops Under Environmental Stress. Dalam *Agronomic Crops* (hlm. 83–114). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9151-5_6
- Bwire, D., Saito, H., Sidle, R. C., & Nishiwaki, J. (2024). Water Management and Hydrological Characteristics of Paddy-Rice Fields under Alternate Wetting and Drying Irrigation Practice as Climate Smart Practice: A Review. *Agronomy*, 14(7), 1421. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071421>
- Chamara, N., Islam, M. D., Bai, G. (Frank), Shi, Y., & Ge, Y. (2022). Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural Systems*, 203, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103497>

- Devi, M. J., & Reddy, V. R. (2018). Transpiration Response of Cotton to Vapor Pressure Deficit and Its Relationship With Stomatal Traits. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01572>
- Dzaky, M. A. F., Nugroho, A. P., Prasetyatama, Y. D., Sutiarto, L., Falah, M. A. F., & Okayasu, T. (2024). Control of vapor pressure deficit (VPD) in micro-plant factory (McPF) to enhanced spinach microgreens growth. *Scientia Horticulturae*, 332, 113229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113229>
- Eze, V. H. U., Eze, E. C., Alaneme, G. U., BUBU, P. E., Nnadi, E. O. E., & Okon, M. Ben. (2025). Integrating IoT sensors and machine learning for sustainable precision agroecology: enhancing crop resilience and resource efficiency through data-driven strategies, challenges, and future prospects. *Discover Agriculture*, 3(1), 83. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00247-y>
- Fahad, S., Ihsan, M. Z., Khaliq, A., Daur, I., Saud, S., Alzamanan, S., Nasim, W., Abdullah, M., Khan, I. A., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2018). Consequences of high temperature under changing climate optima for rice pollen characteristics-concepts and perspectives. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(11), 1473–1488. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1443213>
- Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Villagrán, E. (2022). The Role of Radiation in the Modelling of Crop Evapotranspiration from Open Field to Indoor Crops. *Agronomy*, 12(11), 2593. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112593>
- Fu, W., Liang, J., Yang, L., Zhou, B., Meng, S., Gu, W., & Zhou, T. (2025). Agricultural Drought Early Warning in Hunan Province Based on VPD Spatiotemporal Characteristics and BEAST Detection. *Agriculture*, 15(24), 2581. <https://doi.org/10.3390/agriculture15242581>
- Ghanem, M. E., Kehel, Z., Marrou, H., & Sinclair, T. R. (2020). Seasonal and climatic variation of weighted VPD for transpiration estimation. *European Journal of Agronomy*, 113, 125966. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125966>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- He, Q., Williams, A. P., Johnston, M. R., Juang, C. S., & Wang, B. (2025). Influence of Time-Averaging of Climate Data on Estimates of Atmospheric Vapor Pressure Deficit and Inferred Relationships With Wildfire Area in the Western United States. *Geophysical Research Letters*, 52(7). <https://doi.org/10.1029/2024GL113708>
- Hidayat, M. S., Nugroho, A. P., Sutiarto, L., & Okayasu, T. (2019). Development of environmental monitoring systems based on LoRa with cloud integration for rural area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012010>
- Htun, N.-N., Rojo, D., Ooge, J., De Croon, R., Kasimati, A., & Verbert, K. (2022). Developing Visual-Assisted Decision Support Systems across Diverse Agricultural Use Cases. *Agriculture*, 12(7), 1027. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071027>
- Jalakas, P., Takahashi, Y., Waadt, R., Schroeder, J. I., & Merilo, E. (2021). Molecular mechanisms of stomatal closure in response to rising vapour pressure deficit. *New Phytologist*, 232(2), 468–475. <https://doi.org/10.1111/nph.17592>
- Jiao, L., Ding, R., Kang, S., Du, T., Tong, L., & Li, S. (2018). A comparison of energy partitioning and evapotranspiration over closed maize and sparse grapevine canopies in northwest China. *Agricultural Water Management*, 203, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.019>
- Kaboré, S., Nikiéma, D., Bazié, H. R., Kihindo, A. P., Sinaré, Y. I., Sawadogo, N., & Zombré, G. (2025). Effect of irrigation patterns on agro-physiological responses of rice varieties in

- Burkina Faso. *Discover Agriculture*, 3(1), 100. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00273-w>
- Koehler, T., Wankmüller, F. J. P., Sadok, W., & Carminati, A. (2023). Transpiration response to soil drying versus increasing vapor pressure deficit in crops: physical and physiological mechanisms and key plant traits. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), 4789–4807. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad221>
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100487. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>
- Li, M., Yao, J., Guan, J., & Zheng, J. (2021). Observed changes in vapor pressure deficit suggest a systematic drying of the atmosphere in Xinjiang of China. *Atmospheric Research*, 248, 105199. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105199>
- Lin, S., Lai, J., Yin, G., Fang, J., Liu, X., Zhang, X., Yang, H., Yang, P., & Xiao, Q. (2026). Linking the diurnal and seasonal dynamic of photochemical reflectance index and photosynthesis in a paddy rice field. *Smart Agricultural Technology*, 13, 101775. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101775>
- Lin, Y.-C., Wu, T.-Y., Wang, C.-F., Ou, J.-Y., Hsu, T.-C., Lyu, S., Cheng, L., Lin, Y.-X., & Taniar, D. (2025). An intelligent plant watering decision support system for drought monitoring & analysis based on AIoT and an LSTM time-series framework. *Internet of Things*, 32, 101617. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101617>
- López-Cruz, I. L., Fitz-Rodríguez, E., Salazar-Moreno, R., & Rojano-Aguilar, A. (2025). Development and performance of a greenhouse climate model for optimal control based on vapor pressure deficit. *Acta Horticulturae*, (1437), 85–94. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2025.1437.12>
- Mahmood, G. G., Sacco, P., Carabin, G., & Mazzetto, F. (2026). Farm-Level Operational Monitoring in Smart Agriculture: Review and Classification Framework. *Sustainability*, 18(1), 419. <https://doi.org/10.3390/su18010419>
- Mayanja, I. K., Diepenbrock, C. H., Vadez, V., Lei, T., & Bailey, B. N. (2024). Practical Considerations and Limitations of Using Leaf and Canopy Temperature Measurements as a Stomatal Conductance Proxy: Sensitivity across Environmental Conditions, Scale, and Sample Size. *Plant Phenomics*, 6, 0169. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0169>
- Medina, S., Vicente, R., Nieto-Taladriz, M. T., Aparicio, N., Chairi, F., Vergara-Díaz, O., & Araus, J. L. (2019). The Plant-Transpiration Response to Vapor Pressure Deficit (VPD) in Durum Wheat Is Associated With Differential Yield Performance and Specific Expression of Genes Involved in Primary Metabolism and Water Transport. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01994>
- Novick, K. A., Ficklin, D. L., Grossiord, C., Konings, A. G., Martínez-Vilalta, J., Sadok, W., Trugman, A. T., Williams, A. P., Wright, A. J., Abatzoglou, J. T., Dannenberg, M. P., Gentine, P., Guan, K., Johnston, M. R., Lowman, L. E. L., Moore, D. J. P., & McDowell, N. G. (2024). The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems. *Plant, Cell & Environment*, 47(9), 3561–3589. <https://doi.org/10.1111/pce.14846>
- Nugroho, A. P., Kusumawati, N. B., Murtiningrum, Wiratmoko, A., Haryadi, I. M., Pradana, F. A., Suwardi, Sukarman, Pramananda, S., & Sutiarso, 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>
- Nugroho, A. P., Okayasu, T., Hoshi, T., Inoue, E., Hirai, Y., Mitsuoka, M., & Sutiarso, L. (2016). Development of a remote environmental monitoring and control framework for tropical horticulture and verification of its validity under unstable network connection in rural area. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 325–339. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.025>

- Nugroho, A. P., Purba, S., Pratomo, Y. B., Hadi, S., Suputa, & Utami, S. S. (2020). Development of cloud-based bioacoustics monitoring system for supporting Integrated Pest Management in agriculture production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 449(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/449/1/012032>
- Nugroho, A. P., Wiratmoko, A., Nugraha, D., Markumningsih, S., Sutiarso, L., Falah, M. A. F., & Okayasu, T. (2025). Development of a low-cost thermal imaging system for water stress monitoring in indoor farming. *Smart Agricultural Technology*, 11, 101048. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101048>
- Rupnik, R., Kukar, M., Vračar, P., Košir, D., Pevec, D., & Bosnić, Z. (2019). AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.001>
- Růžicková, A., Man, M., Macek, M., Wild, J., & Kopecký, M. (2025). Temperature-driven vapor pressure deficit structures forest bryophyte communities across the landscape. *Biogeosciences*, 22(21), 6291–6307. <https://doi.org/10.5194/bg-22-6291-2025>
- Sancho-Knapik, D., Mendoza-Herrer, Ó., Alonso-Forn, D., Saz, M. Á., Martín-Sánchez, R., dos Santos Silva, J. V., Ogee, J., Peguero-Pina, J. J., Gil-Pelegrín, E., & Ferrio, J. P. (2022). Vapor pressure deficit constrains transpiration and photosynthesis in holm oak: A comparison of three methods during summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109218>
- Shih, C.-H., Jang, Y.-S., Yang, T.-Y., Huang, C.-Y., Juang, J.-Y., & Lo, M.-H. (2025). Impact of diurnal temperature and relative humidity hysteresis on atmospheric dryness in changing climates. *Science Advances*, 11(26). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adu5713>
- Shrestha, A. K., Thapa, A., & Gautam, H. (2019). Solar Radiation, Air Temperature, Relative Humidity, and Dew Point Study: Damak, Jhapa, Nepal. *International Journal of Photoenergy*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/8369231>
- Silva, A. G. da, Costa, E., Zoz, T., & Binotti, F. F. da S. (2021). MICROMETEOROLOGICAL CHARACTERIZATION OF PROTECTED ENVIRONMENTS FOR PLANT PRODUCTION. *REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL*, 8(4), 6177. <https://doi.org/10.32404/rean.v8i4.6177>
- Sreeni, K. R., & Vasudevan, N. (2024). Impact of Climate Fluctuations on Paddy Yield: A Case Study in Kollengode Village, India. *E3S Web of Conferences*, 559, 01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455901015>
- Stuerz, S., & Asch, F. (2021). Responses of Rice Growth to Day and Night Temperature and Relative Air Humidity—Leaf Elongation and Assimilation. *Plants*, 10(1), 134. <https://doi.org/10.3390/plants10010134>
- Sukarman, S., Sutiarso, L., Nugroho, A. P., Wiratmoko, A., Okayasu, T., Suwardi, S., Primananda, S., Hasanuddin, A., & Wirianata, H. (2024). A Comprehensive Assessment of Composition and Nutrient Content in Various Commercial Fertilisers Used in Indonesian Oil Palm Plantations. *Journal of Oil Palm Research*. <https://doi.org/10.21894/jopr.2024.0043>
- Wang, J., & Wen, X. (2022). Excess radiation exacerbates drought stress impacts on canopy conductance along aridity gradients. *Biogeosciences*, 19(17), 4197–4208. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4197-2022>
- Wang, M., Hu, Z., Liu, X., & Hou, W. (2025). Vapor pressure deficit (VPD) downscaling based on multi-source remote sensing, in-situ observation, and machine learning in China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102192. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102192>
- Wiratmoko, A., Nugroho, A. P., Muna, M. S., Syarovy, M., Suwardi, Sukarman, & Sutiarso, L. (2023). Development of Cloud-Based Decision Support System for Fertilizer Management - A Case Study in Wilmar 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_69
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

- Xin, Y.-F., Chen, F., Zhao, P., Barlage, M., Blanken, P., Chen, Y.-L., Chen, B., & Wang, Y.-J. (2018). Surface energy balance closure at ten sites over the Tibetan plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.007>
- Xue, W., Jeong, S., Ko, J., & Yeom, J.-M. (2021). Contribution of Biophysical Factors to Regional Variations of Evapotranspiration and Seasonal Cooling Effects in Paddy Rice in South Korea. *Remote Sensing*, 13(19), 3992. <https://doi.org/10.3390/rs13193992>
- Yanqing, W., Jiao, L., Lu, Z., Hao, W., Yiming, Z., Irshad, A., & Guisheng, Z. (2026). Abiotic stress responses in crop plants: A multi-scale approach. *Journal of Integrative Agriculture*, 25(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.003>
- Yao, Y., Liao, X., Xiao, J., He, Q., & Shi, W. (2023). The sensitivity of maize evapotranspiration to vapor pressure deficit and soil moisture with lagged effects under extreme drought in Southwest China. *Agricultural Water Management*, 277, 108101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108101>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zhang, P., Yang, X., Manevski, K., Li, S., Wei, Z., Andersen, M. N., & Liu, F. (2022). Physiological and Growth Responses of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) to Air Temperature and Relative Humidity under Soil Water Deficits. *Plants*, 11(9), 1126. <https://doi.org/10.3390/plants11091126>
- Zhang, Y., Wu, J., Xu, Y., Zhou, Y., Xu, S., & Feng, Z. (2025). Effects of elevated ozone on evapotranspiration and energy allocation of rice ecosystem under fully open-air field conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 362, 110363. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110363>
- Zhou, F., Tang, G., Wang, C., Qin, Y., Fu, B., & Fu, J. (2026). Pre-rainfall vapor pressure deficit stress and sunshine reduction govern sub-seasonal rainfall effects on China's rice yield. *European Journal of Agronomy*, 174, 127954. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127954>