

The Potential Application of IoT and Multispectral UAV Soil Sensor Technology in Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Cultivation in Dry Land in Pujut District, Central Lombok Regency

Ardi Yoga Pramesthi^{1*}, Auliya Safitri¹, Misbahuddin¹, Muhammad Husni Idris¹

¹Program Studi Pertanian Lahan Kering, Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

Article History

Received: March 16th, 2026

Revised : March 24th, 2026

Accepted : April 19th, 2026

*Corresponding Author: **Ardi Yoga Pramesthi**, Program Studi Pertanian Lahan Kering, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;
Email: newsurvivalist007@gmail.com

Abstract: Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is a drought-tolerant crop with significant potential for dryland cultivation in Pujut District, Central Lombok Regency, Indonesia. This study reviews the potential application of *Internet of Things* (IoT) and multispectral Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technologies for precision sorghum cultivation in dryland ecosystems. A qualitative descriptive literature review was conducted, synthesizing 13 peer-reviewed studies on IoT sensor networks, UAV-based remote sensing, *machine learning* algorithms, and their integration in precision agriculture. The results indicate that IoT soil sensors can continuously monitor soil moisture, temperature, pH, and nutrient levels in Vertisol soils, while multispectral UAVs capture vegetation indices (NDVI, NDRE, CWSI) for biomass estimation, drought stress assessment, and yield prediction. The integration of both technologies, combined with *machine learning* approaches including *ensemble learning* and *transfer learning*, produces comprehensive crop health maps and site-specific management recommendations. The dryland characteristics of Pujut District, with Vertisol soils (pH 6.5–8.4) and limited water availability, are highly suitable for sorghum cultivation and would benefit substantially from precision agriculture interventions. A five-stage implementation framework is proposed, encompassing baseline survey, monitoring, analytics, precision management, and evaluation. Despite challenges including initial investment costs and technical capacity requirements, the long-term benefits of improved productivity and resource efficiency make IoT-UAV integration a viable strategy for sustainable dryland sorghum farming.

Keywords: Dryland farming; IoT; machine learning; NDVI; UAV multispectral; sorghum; precision agriculture.

Pendahuluan

Sorghum (*Sorghum spp.*) memiliki potensi besar sebagai tanaman serbaguna yang tahan kekeringan, adaptif di lahan marginal, dan sumber pangan fungsional (bebas gluten, tinggi serat) serta bahan pakan/industri (bioetanol). Dengan produktivitas tinggi dan kemampuan *ratoon* (panen 3x/tanam), sorgum merupakan alternatif strategis untuk ketahanan pangan dan substitusi gandum di Indonesia (DPMPTSP Buleleng, 2023). Tanaman sorgum memiliki potensi untuk dikembangkan karena beberapa hal

yaitu sumber karbohidrat, serat, vitamin B, dan antioksidan (3-deoksi antosianin) yang tinggi, serta sehat untuk pencernaan dan pengatur gula darah. Selain itu, (DPMPTSP Buleleng, 2023) menambahkan bahwa secara ekonomi dan produktivitas, tanaman ini dapat dipanen hingga tiga kali dalam sekali tanam (*ratoon*), dengan produktivitas mencapai 4-6 ton/hektar.

Bidang industri seluruh bagian tanaman sorgum dapat dimanfaatkan, seperti biji diolah menjadi makanan olahan, bagian batang dapat diolah menjadi bioetanol (1.800 – 3.880 liter/Ha). dan daunnya untuk pakan ternak.

Sorgum juga dapat menjadi campuran tepung terigu (hingga 15%) untuk mengurangi ketergantungan impor gandum. Di Indonesia sendiri terdapat beberapa varietas sorgum unggul nasional seperti UPCA, Keris, Mandau, Numbu, dan Kawali (DPMPTSP Buleleng, 2023).

Diantara tanaman pokok utama di Indonesia seperti beras dan jagung, biji sorgum memiliki nilai gizi yang tidak kalah bahkan beberapa kandungan gizi dapat melebihi beras dan jagung. Nilai gizi seperti protein (10-11 g), serat (6.3 g) dan zat besi (4.4 mg), shorgum memiliki kandungan sedikit lebih tinggi. Sedangkan kandungan gizi utama seperti karbohidrat, perbedaannya tidak berbeda jauh (75 g). Sehingga tanaman sorgum memiliki potensi yang cukup baik untuk dibudidayakan di lahan kering, khususnya di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah.

Secara persyaratan tumbuh, sorgum adalah tanaman yang sangat adaptif, mampu tumbuh subur pada tanah marginal (kurang subur), lahan kering, masam (pH 5,0 – 8,5), bahkan tanah berpasir. Kondisi tanah terbaik adalah tanah lempung berpasir dengan drainase yang baik, tidak tergenang, serta memiliki suhu minimal 15°C. Tanaman ini tahan kekeringan dan salinitas (Pa *et al.*, 2023). Hal ini sesuai dengan kondisi tanah pertanian lahan kering di Kec. Pujut sebagaimana Dewi *et al.*, (2024) menyatakan bahwa pH tanah pertanian di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah cenderung netral hingga agak basa dengan kisaran antara 6,5 – 8,4. Hal ini dipengaruhi oleh bahan induk batuan kapur (*calcareous*) yang kaya kalsium. Sedangkan Sulas, *et al.*, (2023) menjelaskan bahwa tanah di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah memiliki tekstur liat dengan jenis tanah Vertisol, suatu rentang pH yang dapat ditanami sorgum.

Berdasarkan karakteristik tanah dan iklim seperti di atas, maka sistem pertanian presisi menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan hasil panen dan efisiensi penggunaan air. Pertanian presisi memberikan manfaat utama berupa peningkatan hasil panen, efisiensi penggunaan sumber daya (air, pupuk, pestisida), dan penghematan biaya operasional melalui manajemen berbasis data (Faridatunnissa, 2024). Teknologi ini memungkinkan petani memantau kesehatan tanaman secara *real-time*, mengurangi dampak lingkungan, dan mengotomatisasi pekerjaan untuk produktivitas yang lebih tinggi.

Aplikasi yang berpotensi baik digunakan pada pertanian sorgum lahan kering adalah penerapan *Internet of Things* (IoT) yang berupa jaringan objek fisik (sensor), perangkat lunak, mesin yang terhubung ke internet untuk bertukar data secara *real-time*, dan UAV multispektral teknologi utama dalam pertanian presisi yang menggunakan sensor khusus untuk menangkap cahaya (RGB, NIR, *Red Edge*) (Aziza, 2021). Sedangkan IoT memungkinkan otomatisasi dan kontrol jarak jauh tanpa intervensi manusia langsung, meningkatkan efisiensi di berbagai sektor, termasuk rumah pintar, industri, dan kesehatan. Komponen utamanya meliputi perangkat sensor, konektivitas, pengolahan data, dan antarmuka pengguna (Amazon, 2026).

Urgensi dalam penelitian ini belum adanya karakteristik lahan kering di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah yang berpotensi untuk pengembangan sorgum sebagai upaya diversifikasi pangan dan ketahanan pangan daerah. Selain itu, perlu diketahui lebih lanjut mekanisme ilmiah teknologi pertanian presisi dari unit IoT dan UAV multispektral dalam peningkatan efisiensi sumberdaya dalam budidaya sorgum sekaligus peningkatan hasil produksinya. Serta, teknik penerapan IoT dan UAV multispektral pada budidaya tanaman sorgum di lahan kering.

Kajian ini pun memiliki beberapa tujuan dalam pembahasannya antara lain: 1) Mengkaji potensi budidaya sorgum di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah berdasarkan karakteristik lahan kering setempat; 2) menganalisis mekanisme ilmiah teknologi pertanian presisi dari unit IoT dan UAV multispektral dalam peningkatan efisiensi sumberdaya dalam budidaya sorgum sekaligus peningkatan hasil produksinya; 3) mengkaji teknik penerapan IoT dan UAV multispektral pada budidaya tanaman sorgum di lahan kering, sehingga penerapannya bisa secara optimal tepat guna dan agronomis.

Bahan dan Metode

Analisis dan kajian ini menggunakan metode review dari berbagai literatur dengan mengkaitkan berbagai disiplin ilmu terkait penerapan IoT dan UAV multispektral baik secara umum maupun dalam budidaya pertanian lahan kering, khususnya dalam budidaya

tanaman sorgum. Beberapa disiplin ilmu penunjang yang dapat menjadi kesatuan pembahasan secara terperinci berdasarkan kajian tersebut. Untuk selanjutnya pembahasan dilakukan secara deskriptif kualitatif.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, diperoleh beberapa temuan utama terkait potensi penerapan teknologi IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di lahan kering. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi kedua teknologi tersebut mampu memberikan data spasial dan temporal secara *real-time* yang akurat untuk mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen budidaya sorgum.

Pertama, dari aspek pemantauan tanah, sensor IoT yang tertanam di lahan kering mampu mengukur parameter kelembaban tanah, suhu, pH, dan kandungan nutrisi secara kontinu. Schwambach *et al.* (2023) melaporkan bahwa sensor kelembaban tanah berbasis IoT dengan biaya rendah dapat memberikan data yang cukup akurat untuk pengelolaan irigasi, meskipun terdapat kompromi antara biaya dan presisi pengukuran. Thingujam *et al.* (2025) menambahkan bahwa perkembangan teknologi sensor tanah telah berevolusi dari sistem pengukuran titik tunggal menjadi sistem cerdas yang terintegrasi, memungkinkan pemantauan kesehatan tanah secara komprehensif dan berkelanjutan.

Kedua, dari aspek pemantauan tanaman menggunakan UAV multispektral, beberapa penelitian menunjukkan kemampuan teknologi ini dalam mengestimasi biomassa dan memprediksi hasil panen sorgum. Masjedi *et al.* (2020) menemukan bahwa pemodelan prediktif multi-temporal menggunakan data hiperspektral dan LiDAR dari UAV mampu mengestimasi biomassa sorgum dengan tingkat akurasi yang tinggi. Sejalan dengan temuan tersebut, Li *et al.* (2022) menunjukkan bahwa data penginderaan jauh multimodal dari UAV efektif digunakan untuk memprediksi biomassa dan menilai toleransi kekeringan pada sorgum bioenergi.

Ketiga, integrasi IoT dan UAV multispektral dalam satu sistem pertanian presisi terbukti memberikan hasil yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan salah

satu teknologi secara terpisah. Shafi *et al.* (2020) mendemonstrasikan bahwa pendekatan multimodal yang menggabungkan penginderaan jauh ketinggian rendah, IoT, dan *machine learning* mampu menghasilkan peta kesehatan tanaman yang akurat. Chamara *et al.* (2022) menegaskan bahwa Ag-IoT telah mengalami perkembangan signifikan dari sekadar pemantauan lingkungan menjadi sistem pengambilan keputusan yang cerdas untuk pengelolaan tanaman dan lingkungan pertanian.

Keempat, terkait prediksi hasil panen sorgum, Deng *et al.* (2025) menunjukkan bahwa pencitraan multispektral UAV yang dikombinasikan dengan metode *stacking ensemble learning* mampu memprediksi hasil panen sorgum di wilayah kering dengan akurasi yang memadai. Varela *et al.* (2021) juga menemukan bahwa citra UAV resolusi temporal tinggi yang dianalisis dengan algoritma *machine learning* dapat membantu memahami dinamika pertumbuhan dan memprediksi hasil panen sorgum secara efektif. Selain itu, Wang *et al.* (2023) memperkenalkan kerangka *transfer learning* yang menggabungkan data penginderaan jauh UAV dengan penanda genetik untuk meningkatkan akurasi prediksi biomassa sorgum.

Kelima, dari aspek pengelolaan nutrisi dan status air tanaman, Cerasola *et al.* (2025) menunjukkan bahwa pencitraan hiperspektral dapat digunakan untuk estimasi kebutuhan nitrogen secara presisi, sehingga pemupukan dapat dilakukan secara efisien dan tepat sasaran. Ndlovu *et al.* (2024) melaporkan bahwa penginderaan jauh termal berbasis UAV efektif untuk menilai dan memantau status air tanaman pada sistem pertanian, sebuah temuan yang sangat relevan dengan kondisi lahan kering di Kec. Pujut.

Secara keseluruhan, hasil kajian literatur ini mengonfirmasi bahwa teknologi IoT dan UAV multispektral telah terbukti efektif dalam berbagai aspek budidaya tanaman, khususnya sorgum. Guebsi *et al.* (2024) dalam tinjauan komprehensifnya menyatakan bahwa drone telah menjadi komponen integral dalam pertanian presisi dengan berbagai aplikasi, teknologi, dan tantangan yang terus berkembang. Kumar *et al.* (2025) menegaskan bahwa implementasi sistem berbasis IoT dalam pertanian presisi merupakan

langkah strategis menuju pertanian berkelanjutan di masa depan.

Tabel 2. Ringkasan Kajian Literatur Penerapan IoT dan UAV Multispektral pada Budidaya Sorgum

No.	Penulis (Tahun)	Teknologi	Temuan Utama	Relevansi dengan Sorgum Lahan Kering
1	Masjedi <i>et al.</i> (2020)	UAV Hiperspektral + LiDAR	Model prediktif multi-temporal mampu mengestimasi biomassa sorgum dengan akurasi tinggi	Pemantauan biomassa sorgum sepanjang siklus pertumbuhan
2	Li <i>et al.</i> (2022)	UAV Multimodal	Data multimodal efektif untuk prediksi biomassa dan penilaian toleransi kekeringan	Penilaian toleransi kekeringan sorgum di lahan kering
3	Chamara <i>et al.</i> (2022)	Ag-IoT	Evolusi Ag-IoT dari pemantauan pasif menuju sistem keputusan cerdas	Pemantauan kondisi tanah lahan kering secara kontinu
4	Guebsi <i>et al.</i> (2024)	Drone/UAV	Drone menjadi komponen integral pertanian presisi dengan berbagai aplikasi	Pemetaan lahan sorgum skala luas di Kec. Pujut
5	Shafi <i>et al.</i> (2020)	IoT + Penginderaan Jauh + ML	Pendekatan multimodal menghasilkan peta kesehatan tanaman yang akurat	Peta kesehatan sorgum untuk manajemen spesifik lokasi
6	Schwamback <i>et al.</i> (2023)	Sensor Kelembaban IoT	Sensor berbiaya rendah memberikan data akurat dengan kompromi biaya-presisi	Pemantauan kelembaban tanah Vertisol di lahan kering
7	Ndlovu <i>et al.</i> (2024)	UAV Termal	Penginderaan jauh termal efektif menilai status air tanaman	Deteksi stres kekeringan pada sorgum
8	Kumar <i>et al.</i> (2025)	Sistem IoT	Implementasi IoT merupakan langkah strategis menuju pertanian berkelanjutan	Otomatisasi irigasi dan pemupukan sorgum
9	Deng <i>et al.</i> (2025)	UAV Multispektral + Ensemble Learning	Prediksi hasil panen sorgum di wilayah kering dengan akurasi tinggi	Estimasi produktivitas sorgum di Kec. Pujut
10	Varela <i>et al.</i> (2021)	UAV Temporal + ML	Citra temporal tinggi memahami dinamika pertumbuhan sorgum	Pemantauan fase vegetatif-generatif sorgum
11	Cerasola <i>et al.</i> (2025)	Pencitraan Hiperspektral	Estimasi kebutuhan nitrogen secara presisi pada tanaman	Manajemen pemupukan presisi pada sorgum
12	Thingujam <i>et al.</i> (2025)	Sensor Tanah Cerdas	Evolusi sensor dari titik tunggal ke sistem terintegrasi	Pemantauan multi-parameter tanah Vertisol
13	Wang <i>et al.</i> (2023)	Transfer Learning + UAV + Genetik	Prediksi biomassa lintas varietas dan musim tanam	Aplikasi lintas varietas sorgum lokal

Sumber: Sintesis data sekunder dari berbagai jurnal ilmiah, 2026

Tabel 2 merangkum secara sistematis temuan-temuan dari 13 kajian literatur yang telah dianalisis. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diidentifikasi bahwa teknologi yang digunakan mencakup tiga kategori utama, yaitu sensor IoT untuk pemantauan tanah, UAV multispektral untuk pemantauan tanaman dari udara, serta integrasi keduanya dengan algoritma *machine learning* untuk pengambilan keputusan. Masing-masing teknologi memiliki relevansi spesifik terhadap budidaya sorgum di lahan kering, mulai dari pemantauan kelembaban tanah Vertisol hingga prediksi hasil panen secara spasial.

Pembahasan

Temuan-temuan dari kajian literatur di atas menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di lahan kering memiliki prospek yang sangat menjanjikan, khususnya untuk kondisi agroekosistem di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah. Pembahasan ini akan menguraikan secara mendalam mekanisme kerja kedua teknologi tersebut, relevansinya dengan

karakteristik lahan kering setempat, serta implikasi praktis penerapannya.

Sistem IoT dalam konteks pertanian sorgum di lahan kering berfungsi sebagai jaringan pemantauan lingkungan mikro yang beroperasi secara kontinu. Sensor-sensor yang tertanam di lahan, seperti sensor kelembaban tanah, sensor suhu, dan sensor pH, mengirimkan data secara berkala melalui protokol komunikasi nirkabel ke *gateway* pusat yang kemudian meneruskan informasi ke platform *cloud* untuk dianalisis. Chamara *et al.* (2022) menjelaskan bahwa evolusi Ag-IoT telah mencakup tiga fase utama, yaitu fase pemantauan pasif, fase otomatisasi, dan fase pengambilan keputusan cerdas berbasis kecerdasan buatan. Dalam konteks budidaya sorgum di Kec. Pujut, penerapan IoT dapat dimulai dari fase pemantauan untuk mengumpulkan data dasar mengenai kondisi lahan, kemudian secara

bertahap ditingkatkan menuju otomatisasi irigasi dan pemupukan.

Pemilihan sensor yang tepat merupakan aspek kritis dalam implementasi IoT di lahan kering. Schwambach *et al.* (2023) dalam penelitiannya mengenai sensor kelembaban tanah otomatis berbiaya rendah menemukan bahwa terdapat *trade-off* antara biaya dan akurasi sensor. Untuk aplikasi pada budidaya sorgum di lahan kering dengan skala menengah, sensor kapasitif berbasis dielektrik tanah dapat menjadi pilihan yang optimal karena menawarkan keseimbangan antara keterjangkauan harga dan presisi pengukuran yang memadai. Thingujam *et al.* (2025) menambahkan bahwa teknologi sensor tanah terkini telah berkembang dari pendekatan pengukuran titik tunggal menjadi sistem terintegrasi yang mampu memantau berbagai parameter tanah secara simultan, termasuk kelembaban, suhu, konduktivitas listrik, dan kandungan nutrisi.

Tabel 3. Spesifikasi Komponen Sistem IoT untuk Pemantauan Budidaya Sorgum di Lahan Kering

No.	Komponen IoT	Fungsi	Parameter yang Diukur	Referensi
1	Sensor Kelembaban Tanah	Mengukur kadar air volumetrik tanah	Kelembaban tanah (%)	Schwambach <i>et al.</i> (2023)
2	Sensor Suhu Tanah	Memantau suhu zona perakaran	Suhu tanah (°C)	Thingujam <i>et al.</i> (2025)
3	Sensor pH Tanah	Mengukur tingkat keasaman tanah	pH tanah (0–14)	Thingujam <i>et al.</i> (2025)
4	Sensor EC (Konduktivitas Listrik)	Mengukur salinitas dan kandungan ion tanah	EC (dS/m)	Chamara <i>et al.</i> (2022)
5	Sensor Nutrisi (NPK)	Mendeteksi ketersediaan nitrogen, fosfor, kalium	N, P, K (mg/kg)	Kumar <i>et al.</i> (2025)
6	<i>Gateway</i> /Mikrokontroler	Mengumpulkan dan mengirim data sensor ke <i>cloud</i>	Transmisi data nirkabel	Chamara <i>et al.</i> (2022)
7	Platform <i>Cloud</i>	Menyimpan, memproses, dan menganalisis data	Penyimpanan dan analitik data	Kumar <i>et al.</i> (2025)
8	Antarmuka Pengguna (<i>Dashboard</i>)	Menampilkan data dan rekomendasi ke petani	Visualisasi dan notifikasi	Shafi <i>et al.</i> (2020)

Sumber: Sintesis data dari Schwambach *et al.* (2023); Chamara *et al.* (2022); Kumar *et al.* (2025); Thingujam *et al.* (2025)

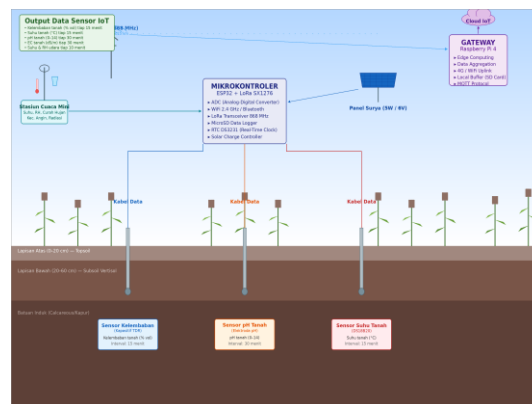
Tabel 3 menyajikan komponen-komponen sistem IoT yang diperlukan untuk pemantauan budidaya sorgum di lahan kering. Sistem ini terdiri dari delapan komponen utama yang bekerja secara terintegrasi, mulai dari sensor di lapangan hingga antarmuka pengguna yang menampilkan rekomendasi pengelolaan. Untuk kondisi tanah Vertisol di Kec. Pujut yang

bertekstur liat dengan pH netral hingga agak basa, kalibrasi sensor kelembaban dan pH perlu dilakukan secara spesifik untuk memastikan akurasi pengukuran. Schwambach *et al.* (2023) menekankan pentingnya kalibrasi sensor terhadap jenis tanah lokal karena sifat dielektrik tanah bervariasi menurut tekstur dan kandungan mineral.

Gambar 1 mengilustrasikan skema unit IoT sensor node yang dirancang untuk pemantauan lahan sorgum di lahan kering. Sistem ini terdiri dari tiga sensor utama yang tertanam di dalam tanah (sensor kelembaban kapasitif TDR, sensor pH elektroda, dan sensor suhu DS18B20), stasiun cuaca permukaan, mikrokontroler ESP32 dengan modul LoRa SX1276, panel surya sebagai sumber daya mandiri, serta *gateway* Raspberry Pi yang menerima data melalui protokol LoRaWAN dan meneruskannya ke platform *cloud* IoT. Konfigurasi ini memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara kontinu dan mandiri energi, yang sangat penting untuk lahan kering terpencil di Kec. Pujut.

Perspektif pemantauan tanaman melalui UAV multispektral, mekanisme kerjanya didasarkan pada prinsip reflektansi spektral vegetasi. Tanaman sorgum yang sehat memiliki pola reflektansi yang khas pada panjang gelombang tertentu, khususnya pada saluran *near-infrared* (NIR) dan *red edge*. Masjedi *et al.* (2020) mendemonstrasikan bahwa kombinasi data hiperspektral dan LiDAR dari UAV dapat menghasilkan model prediktif biomassa sorgum

yang lebih akurat dibandingkan penggunaan satu jenis sensor saja. Pendekatan multi-temporal yang digunakan memungkinkan pemantauan pertumbuhan tanaman sepanjang siklus hidup, dari fase vegetatif hingga fase generatif, sehingga anomali pertumbuhan dapat dideteksi secara dini.



Gambar 1. Skema Unit IoT Sensor Node untuk Pemantauan Lahan Sorgum di Lahan Kering (Sumber: *Ilustrasi original diadaptasi dari Schwambach et al., 2023; Chamara et al., 2022; Thingujam et al., 2025*)

Tabel 4. Indeks Vegetasi UAV Multispektral yang Relevan untuk Pemantauan Budidaya Sorgum

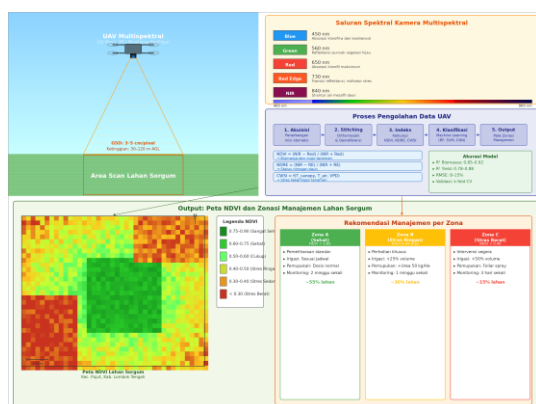
No.	Indeks Vegetasi	Formula/Saluran Spektral	Fungsi pada Sorgum	Referensi
1	NDVI	$(NIR - Red) / (NIR + Red)$	Estimasi biomassa dan vigor tanaman	Masjedi <i>et al.</i> (2020)
2	NDRE	$(NIR - Red\ Edge) / (NIR + Red\ Edge)$	Deteksi stres nitrogen dan kesehatan kanopi	Cerasola <i>et al.</i> (2025)
3	GNDVI	$(NIR - Green) / (NIR + Green)$	Estimasi kandungan klorofil	Li <i>et al.</i> (2022)
4	CWSI	Berbasis suhu kanopi termal	Penilaian status air dan stres kekeringan	Ndlovu <i>et al.</i> (2024)
5	EVI	$2.5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6Red - 7.5Blue + 1)$	Koreksi pengaruh tanah dan atmosfer	Varela <i>et al.</i> (2021)
6	SAVI	$(NIR - Red) / (NIR + Red + L) \times (1 + L)$	Estimasi biomassa pada kanopi jarang	Deng <i>et al.</i> (2025)

Sumber: Sintesis data dari Masjedi *et al.* (2020); Cerasola *et al.* (2025); Li *et al.* (2022); Ndlovu *et al.* (2024); Varela *et al.* (2021); Deng *et al.* (2025)

Tabel 4 menyajikan enam indeks vegetasi utama yang dapat diturunkan dari data UAV multispektral untuk pemantauan budidaya sorgum. Masing-masing indeks memiliki fungsi spesifik yang saling melengkapi dalam memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi tanaman. NDVI sebagai indeks yang paling umum digunakan memberikan estimasi biomassa dan vigor tanaman secara umum, sementara NDRE lebih sensitif terhadap variasi

kandungan nitrogen pada daun (Cerasola *et al.*, 2025). CWSI yang diturunkan dari data termal sangat relevan untuk kondisi lahan kering karena mampu mendeteksi stres kekeringan sebelum gejala visual terlihat (Ndlovu *et al.*, 2024). SAVI dan EVI memberikan koreksi terhadap pengaruh tanah dan atmosfer, sehingga lebih akurat untuk vegetasi dengan kanopi jarang seperti sorgum pada fase vegetatif awal.

Gambar 2 menunjukkan mekanisme kerja UAV multispektral dalam pemetaan lahan sorgum, mulai dari proses akuisisi citra menggunakan kamera 5-band (Blue, Green, Red, Red Edge, NIR), pengolahan data melalui tahapan orthomosaik dan kalkulasi indeks vegetasi, hingga output berupa peta NDVI yang menampilkan variasi kesehatan tanaman secara spasial. Peta NDVI kemudian diklasifikasikan menjadi tiga zona manajemen (Zona A: sehat, Zona B: stres ringan, Zona C: stres berat) dengan rekomendasi pengelolaan yang spesifik untuk masing-masing zona, termasuk penyesuaian volume irigasi, dosis pemupukan, dan frekuensi monitoring.



Gambar 2. Mekanisme Pemetaan UAV Multispektral dan Output Peta NDVI Lahan Sorgum (Sumber: *Ilustrasi original diadaptasi dari Masjedi et al., 2020; Ndlovu et al., 2024; Deng et al., 2025*)

Relevansi penerapan UAV multispektral untuk budidaya sorgum di lahan kering semakin

diperkuat oleh temuan Li *et al.* (2022) yang menunjukkan bahwa data penginderaan jauh multimodal dari UAV tidak hanya efektif untuk prediksi biomassa, tetapi juga untuk penilaian toleransi kekeringan. Hal ini sangat relevan mengingat kondisi lahan kering di Kec. Pujut yang memiliki ketersediaan air terbatas. Dengan kemampuan mendeteksi tingkat stres kekeringan pada tanaman sorgum secara spasial, petani dapat melakukan intervensi irigasi yang tepat waktu dan tepat lokasi. Ndlovu *et al.* (2024) dalam tinjauan sistematis mereka mengonfirmasi bahwa penginderaan jauh termal berbasis UAV merupakan pendekatan yang efektif untuk menilai status air tanaman, sehingga pengelolaan irigasi pada lahan kering dapat dioptimalkan.

Integrasi IoT dan UAV multispektral dalam satu ekosistem pertanian presisi memberikan sinergi yang signifikan. Data dari sensor tanah IoT menyediakan informasi kondisi bawah permukaan (kelembaban, nutrisi, pH), sementara UAV multispektral memberikan informasi kondisi permukaan dan kanopi tanaman (indeks vegetasi, biomassa, status kesehatan). Shafi *et al.* (2020) membuktikan bahwa pendekatan multimodal ini, ketika dikombinasikan dengan algoritma *machine learning*, mampu menghasilkan peta kesehatan tanaman yang komprehensif. Peta tersebut dapat menjadi dasar untuk penerapan manajemen spesifik lokasi, di mana setiap zona lahan mendapatkan perlakuan (irigasi, pemupukan, pengendalian hama) sesuai dengan kebutuhannya masing-masing.

Tabel 5. Perbandingan Metode Prediksi Hasil Panen dan Biomassa Sorgum Berbasis UAV

No.	Penulis (Tahun)	Metode/Algoritma	Sumber Data	Variabel Prediksi	Keunggulan
1	Masjedi <i>et al.</i> (2020)	Regresi multi-temporal	Hiperspektral + LiDAR UAV	Biomassa	Akurasi tinggi multi-fase
2	Li <i>et al.</i> (2022)	<i>Random Forest</i> , SVR	Multimodal UAV	Biomassa + Toleransi Kekeringan	Dual prediksi
3	Deng <i>et al.</i> (2025)	<i>Stacking Ensemble Learning</i>	Multispektral UAV	Hasil Panen	Robust di wilayah kering
4	Varela <i>et al.</i> (2021)	ML + <i>Time Series</i>	Citra UAV temporal tinggi	Hasil Panen + Dinamika	Resolusi temporal tinggi
5	Wang <i>et al.</i> (2023)	<i>Transfer Learning</i>	UAV + Penanda Genetik	Biomassa	Lintas varietas/musim
6	Shafi <i>et al.</i> (2020)	ML Multimodal	IoT + Penginderaan Jauh	Kesehatan Tanaman	Integrasi data multi-sumber

Sumber: Sintesis data dari Masjedi *et al.* (2020); Li *et al.* (2022); Deng *et al.* (2025); Varela *et al.* (2021); Wang *et al.* (2023); Shafi *et al.* (2020)

Konteks prediksi hasil panen, penggabungan data IoT dan UAV multispektral menawarkan keunggulan substansial. Deng *et al.* (2025) menunjukkan bahwa pencitraan multispektral UAV yang diproses dengan metode *stacking ensemble learning* dapat memprediksi hasil panen sorgum di wilayah kering dengan tingkat akurasi yang tinggi. Varela *et al.* (2021) melengkapi temuan ini dengan mendemonstrasikan bahwa citra UAV dengan resolusi temporal tinggi, yang diambil secara berkala selama musim tanam, dapat memberikan pemahaman yang mendalam mengenai dinamika pertumbuhan sorgum. Pendekatan *transfer learning* yang dikembangkan oleh Wang *et al.* (2023) menambah dimensi baru dengan mengintegrasikan data penginderaan jauh UAV dan penanda genetik, sehingga prediksi biomassa dapat dilakukan lintas varietas dan lintas musim tanam.

Tabel 5 menunjukkan perbandingan enam pendekatan metodologis yang telah digunakan dalam prediksi hasil panen dan biomassa sorgum. Setiap metode memiliki keunggulan spesifik

yang menjadikannya lebih sesuai untuk konteks tertentu. Untuk kondisi lahan kering di Kec. Pujut, metode *stacking ensemble learning* (Deng *et al.*, 2025) dan pendekatan multimodal IoT-penginderaan jauh (Shafi *et al.*, 2020) merupakan kombinasi yang paling relevan karena mampu menangani variabilitas spasial tinggi dan keterbatasan ketersediaan air yang menjadi karakteristik utama lahan kering.

Aspek manajemen nutrisi presisi juga menjadi salah satu keunggulan utama penerapan teknologi ini. Cerasola *et al.* (2025) menunjukkan bahwa pencitraan hiperspektral dapat digunakan untuk mengestimasi kebutuhan nitrogen secara akurat pada tanaman, sehingga pemupukan dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual tanaman di setiap zona lahan. Penerapan prinsip ini pada budidaya sorgum di Kec. Pujut akan memungkinkan penggunaan pupuk yang lebih efisien, mengurangi pemborosan, dan meminimalkan dampak lingkungan berupa pencemaran tanah dan air akibat kelebihan pupuk.

Tabel 6. Kesesuaian Karakteristik Lahan Kering Kec. Pujut dengan Persyaratan Tumbuh Sorgum

No.	Parameter Lahan	Kondisi di Kec. Pujut	Syarat Tumbuh Sorgum	Kesesuaian
1	Jenis Tanah	Vertisol bertekstur liat	Lempung berpasir hingga liat	Sesuai
2	pH Tanah	6,5 – 8,4 (netral-agak basa)	5,0 – 8,5	Sangat Sesuai
3	Drainase	Sedang (tanah liat, kadang tergenang musim hujan)	Baik, tidak tergenang	Cukup Sesuai
4	Suhu Rata-rata	25 – 32°C	Minimal 15°C, optimal 25–30°C	Sangat Sesuai
5	Curah Hujan	800 – 1.500 mm/tahun (musiman)	400 – 600 mm minimum	Sesuai
6	Ketinggian	0 – 300 mdpl	0 – 1.500 mdpl	Sangat Sesuai
7	Salinitas	Rendah hingga sedang	Toleran salinitas sedang	Sesuai
8	Ketersediaan Air	Terbatas (musim kemarau panjang)	Tahan kekeringan	Sesuai

Sumber: Sintesis data dari Dewi *et al.* (2024); Sulas *et al.* (2023); Pa *et al.* (2023); DPMPSTP Buleleng (2023), 2026

Tabel 6 menunjukkan bahwa dari delapan parameter lahan yang dikaji, kondisi lahan kering di Kec. Pujut secara umum memenuhi persyaratan tumbuh sorgum dengan tingkat kesesuaian yang baik. Parameter pH tanah, suhu rata-rata, dan ketinggian menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi, sementara drainase tanah Vertisol yang bertekstur liat memerlukan perhatian khusus terutama pada musim hujan. Analisis kesesuaian ini

menegaskan bahwa sorgum merupakan komoditas yang tepat untuk dikembangkan di wilayah tersebut, dan penerapan teknologi IoT untuk pemantauan kelembaban tanah menjadi sangat penting untuk mengelola kondisi drainase yang kurang optimal pada musim hujan serta ketersediaan air yang terbatas pada musim kemarau.

Guebsi *et al.* (2024) dalam tinjauan komprehensifnya menyoroti bahwa meskipun

drone telah menjadi instrumen yang semakin vital dalam pertanian presisi, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, antara lain keterbatasan daya tahan baterai, regulasi penerbangan, kebutuhan keahlian teknis operator, dan biaya investasi awal yang relatif tinggi. Namun demikian, Kumar *et al.* (2025) berpendapat bahwa tren penurunan biaya perangkat IoT dan UAV, serta peningkatan ketersediaan infrastruktur konektivitas internet di wilayah pedesaan, akan mempercepat adopsi teknologi pertanian presisi di negara-negara berkembang, termasuk Indonesia.

Untuk kondisi spesifik di Kec. Pujut, penerapan IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum perlu disesuaikan dengan kondisi lokal. Tanah Vertisol dengan tekstur liat dan pH netral hingga agak basa (6,5–8,4) sebagaimana dilaporkan oleh Dewi *et al.* (2024) dan Sulas *et al.* (2023) memerlukan konfigurasi sensor IoT yang dikalibrasi secara khusus untuk tipe tanah tersebut. Pemilihan indeks vegetasi

yang tepat pada UAV multispektral juga perlu mempertimbangkan karakteristik spektral spesifik sorgum pada kondisi lahan kering berkapur. Dengan pendekatan yang kontekstual dan adaptif, integrasi IoT dan UAV multispektral dapat menjadi solusi pertanian presisi yang efektif untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi budidaya sorgum di lahan kering Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah.

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap temuan-temuan literatur dan kesesuaian kondisi lokal, implementasi IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di Kec. Pujut sebaiknya dilakukan melalui pendekatan bertahap yang mempertimbangkan ketersediaan sumber daya, kapasitas teknis, dan kebutuhan petani setempat. Pendekatan bertahap ini memungkinkan evaluasi dan penyesuaian di setiap fase sebelum melangkah ke tahap berikutnya, sehingga risiko kegagalan implementasi dapat diminimalkan.

Tabel 7. Rekomendasi Tahapan Implementasi IoT dan UAV Multispektral pada Budidaya Sorgum di Lahan Kering Kec. Pujut

No.	Tahap	Aktivitas	Teknologi yang Digunakan	Luaran
1	Tahap I (Baseline)	Survei dan karakterisasi lahan; instalasi sensor IoT dasar	Sensor kelembaban, suhu, pH tanah; <i>gateway</i> LoRaWAN	Peta baseline kondisi tanah lahan kering
2	Tahap II (Monitoring)	Penerbangan UAV multispektral berkala; pengumpulan data IoT kontinu	UAV dengan kamera multispektral (5 band); platform <i>cloud</i> IoT	Data spasio-temporal pertumbuhan sorgum
3	Tahap III (Analitik)	Pengembangan model prediksi biomassa dan hasil panen	<i>Machine learning</i> (ensemble, <i>transfer learning</i>); integrasi data IoT-UAV	Model prediksi hasil panen spesifik lokasi
4	Tahap IV (Presisi)	Penerapan manajemen spesifik zona; otomatisasi irigasi dan pemupukan	Sistem rekomendasi otomatis; aktuator irigasi IoT	Peta rekomendasi pemupukan dan irigasi per zona
5	Tahap V (Evaluasi)	Monitoring hasil panen aktual; kalibrasi ulang model	Analisis komparatif prediksi vs aktual; refinement algoritma	Peningkatan akurasi model dan efisiensi budidaya

Sumber: Sintesis data dari Chamara *et al.* (2022); Kumar *et al.* (2025); Guebsi *et al.* (2024); Shafi *et al.* (2020), 2026

Tabel 7 menyajikan lima tahapan implementasi yang direkomendasikan untuk penerapan teknologi IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di Kec. Pujut. Tahap pertama berfokus pada pengumpulan data baseline melalui survei lahan dan instalasi sensor IoT dasar, yang akan menjadi fondasi bagi tahap-tahap selanjutnya. Tahap kedua melibatkan pemantauan reguler menggunakan UAV multispektral yang dikombinasikan dengan data

IoT untuk menghasilkan dataset yang komprehensif. Tahap ketiga merupakan fase kritis di mana algoritma *machine learning* digunakan untuk membangun model prediksi yang spesifik untuk kondisi lokal. Tahap keempat mengimplementasikan manajemen presisi berbasis rekomendasi otomatis, dan tahap kelima melakukan evaluasi serta penyempurnaan model berdasarkan data hasil panen aktual.

Kumar *et al.* (2025) menekankan bahwa

keberhasilan implementasi teknologi pertanian presisi di negara berkembang sangat bergantung pada pendekatan yang partisipatif dan inklusif, di mana petani tidak hanya berperan sebagai pengguna teknologi tetapi juga sebagai kontributor data dan pengetahuan lokal. Dalam konteks Kec. Pujut, kolaborasi antara institusi penelitian (Universitas Mataram), pemerintah daerah (Dinas Pertanian), dan komunitas petani lokal menjadi kunci keberhasilan adopsi teknologi. Pelatihan dan pendampingan teknis bagi petani mengenai penggunaan *dashboard* IoT dan interpretasi data UAV perlu dilakukan secara berkelanjutan agar teknologi ini dapat dimanfaatkan secara optimal dan memberikan dampak nyata terhadap peningkatan produktivitas dan kesejahteraan petani sorgum di lahan kering.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menunjukkan bahwa penerapan IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di lahan kering Kec. Pujut memiliki landasan ilmiah yang kuat dan kelayakan teknis yang memadai. Meskipun terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, potensi manfaat teknologi ini dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi sumber daya, dan keberlanjutan pertanian sorgum sangat signifikan. Dengan pendekatan implementasi yang bertahap, kolaboratif, dan kontekstual, teknologi pertanian presisi berbasis IoT dan UAV multispektral dapat menjadi katalisator transformasi pertanian lahan kering di Nusa Tenggara Barat, khususnya dalam mendukung program diversifikasi pangan dan ketahanan pangan melalui pengembangan komoditas sorgum.

Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut. Pertama, lahan kering di Kec. Pujut, Kab. Lombok Tengah dengan karakteristik tanah Vertisol bertekstur liat, pH netral hingga agak basa (6,5–8,4), dan kondisi iklim kering memiliki potensi yang baik untuk pengembangan budidaya sorgum sebagai upaya diversifikasi dan ketahanan pangan daerah. Sorgum sebagai tanaman yang toleran terhadap kekeringan dan mampu tumbuh pada tanah marginal sangat sesuai dengan kondisi agroekosistem setempat.

Kedua, mekanisme ilmiah teknologi IoT

dalam budidaya sorgum beroperasi melalui jaringan sensor tanah yang memantau kelembaban, suhu, pH, dan nutrisi secara kontinu, kemudian mengirimkan data ke platform *cloud* untuk dianalisis. Sementara itu, UAV multispektral bekerja berdasarkan prinsip reflektansi spektral vegetasi pada saluran NIR, *red edge*, dan RGB untuk mengestimasi biomassa, menilai status kesehatan tanaman, serta memprediksi hasil panen melalui algoritma *machine learning*. Integrasi kedua teknologi ini memberikan sinergi dalam bentuk pemantauan komprehensif dari bawah permukaan tanah hingga kanopi tanaman, sehingga efisiensi penggunaan air, pupuk, dan pestisida dapat ditingkatkan secara signifikan.

Ketiga, teknik penerapan IoT dan UAV multispektral pada budidaya sorgum di lahan kering Kec. Pujut perlu dilakukan secara bertahap dan kontekstual, dimulai dari instalasi sensor IoT yang dikalibrasi untuk tanah Vertisol setempat, diikuti dengan penerbangan UAV multispektral secara berkala untuk pemantauan pertumbuhan tanaman. Data dari kedua sumber tersebut diintegrasikan melalui platform analitik berbasis *cloud* yang menggunakan algoritma *machine learning* untuk menghasilkan rekomendasi manajemen budidaya yang spesifik lokasi. Meskipun terdapat tantangan berupa biaya investasi awal, kebutuhan keahlian teknis, dan keterbatasan infrastruktur konektivitas, potensi manfaat jangka panjang berupa peningkatan produktivitas, efisiensi sumber daya, dan keberlanjutan pertanian menjadikan penerapan teknologi ini layak untuk dikembangkan sebagai model pertanian presisi di lahan kering Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada Program Magister Pertanian lahan kering Universitas Mataram atas dukungan fasilitas. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pengampuh Mata Kuliah Pertanian Presisi yang selama ini mengarahkan dalam penulisan jurnal ini. Tidak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih pada *Jurnal Biologi Tropis* yang membantu dalam memfasilitasi account dan review jurnal ini.

Referensi

- Amazon. (2026). Apa itu IoT (Internet untuk Segala). AWS Amazon. <https://aws.amazon.com>.
- Aziza, M. (2021). Aplikasi Utama Pemetaan Multispectral untuk Pertanian. Halo Robotics. <https://halorobotics.com/kamera-multispectral-drone-pemetaan-pertanian>.
- Dewi, R. A. S., Sukartono, S., Bakti, L. A. A., Selvia, S. I., & Iemaaniah, Z. M. (2024). Aplikasi biochar terhadap ketersediaan hara nitrogen dan fosfat di tanah Vertisol Lombok. *Agroteksos: Jurnal Ilmiah Budidaya Tanaman*, 34(2), 367–376.
- DPMPTSP Buleleng. (2023). Potensi Sorgum Desa Kubutambahan II DPMPTSP Kab. Buleleng. Dinas Penanaman Modal Dan Pelayanan Satu Pintu Kab. Buleleng, Prov. Bali. Video Youtube. <https://dpmptsp.bulelengkab.go.id/video>.
- Faridatunnissa. (2024). Pertanian Presisi di Indonesia. Mertani. <https://www.mertani.co.id>.
- Kementerian Kesehatan RI. (2019). Data komposisi pangan Indonesia. Direktorat Jenderal Kesehatan Masyarakat, Direktorat Gizi Masyarakat. <https://www.panganku.org>.
- Pa, S. K., Jawang, U. P., & Ndapamuri, M. H. (2023). Analisis Status Kesuburan Tanah Pada Lahan di PT. Sumba Moelti Agruculture. *Sandalwood Journal*. 01(1).
- Cerasola, V. A., Orsini, F., Pennisi, G., Moretti, G., Bona, S., Mirone, F., Verrelst, J., Berger, K., & Gianquinto, G. (2025). Hyperspectral imaging for precision nitrogen management: A comparative exploration of two methodological approaches to estimate optimal nitrogen rate in processing tomato. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100802>
- Chamara, N., Islam, M. D., Bai, G., 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>
- Deng, L., Li, Y., Liu, X., Zhang, Z., Mu, J., Jia, S., Yan, Y., & Zhang, W. (2025). Sorghum yield prediction using UAV multispectral imaging and *stacking ensemble learning* in arid regions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1636015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1636015>
- Guebsi, R., Mami, S., & Chokmani, K. (2024). Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*, 8(11), 686. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- Kumar, S. N., Suriyan, K., Jacob, A. T., Varghese, A., & Francis, E. (2025). *Smart farming* for a sustainable future: Implementing IoT-based systems in precision agriculture. *Bulletin of the National Research Centre*, 49, 71. <https://doi.org/10.1186/s42269-025-01366-8>
- Li, J., Schachtman, D. P., Creech, C. F., Wang, L., Ge, Y., & Shi, Y. (2022). Evaluation of UAV-derived multimodal remote sensing data for biomass prediction and drought tolerance assessment in bioenergy sorghum. *The Crop Journal*, 10, 1363–1375. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.04.005>
- Masjedi, A., Crawford, M. M., Carpenter, N. R., & Tuinstra, M. R. (2020). Multi-temporal predictive modelling of sorghum biomass using UAV-based hyperspectral and LiDAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3587. <https://doi.org/10.3390/rs12213587>
- Ndlovu, H. S., Odindi, J., Sibanda, M., & Mutanga, O. (2024). A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and

- monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*, 45(15), 4923–4960. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2368933>
- Schwamback, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated low-cost soil moisture sensors: *Trade-off* between cost and accuracy. *Sensors*, 23(5), 2451. <https://doi.org/10.3390/s23052451>
- Shafi, U., Mumtaz, R., Iqbal, N., Zaidi, S. M. H., Zaidi, S. A. R., Hussain, I., & Mahmood, Z. (2020). A multi-modal approach for crop health mapping using low altitude remote sensing, *Internet of Things (IoT) and machine learning. IEEE Access*, 8, 112708–112721. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002948>
- Thingujam, U., Prabha, D., Ghosh Bag, A., Thingujam, V., Darshan, N. P., Dutta, S., & Gorain, S. (2025). From point sensing to intelligent systems: A comprehensive review on advanced sensor technologies for soil health monitoring. *Discover Sensors*, 1, 27. <https://doi.org/10.1007/s44397-025-00028-8>
- Varela, S., Pederson, T., Bernacchi, C. J., & Leakey, A. D. B. (2021). Understanding growth dynamics and yield prediction of sorghum using high temporal resolution UAV imagery *time series* and *machine learning*. *Remote Sensing*, 13(9), 1763. <https://doi.org/10.3390/rs13091763>
- Wang, T., Crawford, M. M., & Tuinstra, M. R. (2023). A novel *transfer learning* framework for sorghum biomass prediction using UAV-based remote sensing data and genetic markers. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138479. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138479>
- Sulas, S., Kusnarta, I. G. M., & Sukartono, S. (2023). Dynamic of change in soil physical properties and soybean growth through the application of biochar on Lombok Vertisols. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(1), 237–245. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i1.4590>