

EVALUASI METODE INSTALASI SENSOR KAPASITIF BERBIAYA RENDAH UNTUK
PEMANTAUAN KADAR AIR TANAH PADA LERENG BERBASIS IoT

*EVALUATION OF LOW-COST CAPACITIVE SENSOR INSTALLATION METHODS FOR IoT-BASED
SOIL MOISTURE MONITORING ON SLOPES*

Muhammad Azhar ^{*1}

¹Dosen, Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Jurusan Rekayasa dan Industri,
Politeknik Negeri Tanah Laut
Korespondensi: azhar@politala.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh metode instalasi sensor kapasitif berbiaya rendah terhadap performa pengukuran kadar air tanah di lapangan. Sebanyak enam sensor diuji menggunakan dua metode instalasi, yaitu *side mount* dan *bottom mount*, pada tiga variasi kedalaman (0.2 m, 0.5 m, dan 1 m). Sistem pemantauan dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan platform cloud Firebase untuk akuisisi data secara real-time, ditenagai oleh panel surya. Pengujian dilaksanakan di lapangan dari 10 Maret hingga 16 April 2026, dengan data curah hujan satelit GPM sebagai parameter pendukung. Hasil kalibrasi menunjukkan hubungan linier yang kuat antara tegangan keluaran sensor dan kadar air volumetrik dengan $R^2 > 0.9$ untuk seluruh sensor. Metode *bottom mount* menghasilkan pembacaan yang valid sejak awal pengujian dengan respons yang baik terhadap kejadian hujan pada seluruh kedalaman. Sebaliknya, metode *side mount* mengalami keterlambatan pembentukan kontak sensor–tanah yang menyebabkan data tidak valid pada fase awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas kontak fisik antara sensor dan tanah merupakan salah satu faktor penentu keandalan pembacaan, dan metode *bottom mount* lebih efektif untuk pemantauan kadar air tanah jangka panjang di lapangan.

Kata Kunci: Sensor Kapasitif, Kadar Air Tanah, Metode Instalasi, Kestabilan Lereng, IoT

ABSTRACT

This study evaluates the effect of installation methods of low-cost capacitive soil moisture sensors on field measurement performance. Six sensors were tested using two installation methods, namely side mount and bottom mount, at three depth variations (0.2 m, 0.5 m, and 1 m). A monitoring system was developed using an ESP32 microcontroller integrated with the Firebase cloud platform for real-time data acquisition, powered by a solar panel. Field testing was conducted from March 10 to April 16, 2026, with GPM satellite rainfall data used as a supporting parameter. Calibration results showed a strong linear relationship between sensor output voltage and volumetric water content with $R^2 > 0.9$ for all sensors. The bottom mount method produced valid readings from the beginning of the testing period with good response to rainfall events at all depths. In contrast, the side mount method experienced a delay in sensor–soil contact formation, resulting in invalid data during the early phase. The findings indicate that the quality of physical contact between the sensor and soil is a key factor in reading reliability, and the bottom mount method is more effective for long-term field soil moisture monitoring.

Keywords: Capacitive Sensor, Soil Moisture, Installation Method, Slope Stability, IoT

PENDAHULUAN

Kadar air adalah salah satu parameter penting dalam kestabilan lereng. Kadar air yang meningkat dapat menaikkan tekanan air pori pada tanah sehingga menurunkan kuat geser tanah hingga akhirnya menyebabkan ketidakstabilan lereng (Bogaard and Greco, 2016; Peranić, Čeh and Arbanas, 2022). Peningkatan kadar air tanah ini umumnya dipicu oleh curah hujan, yang menjadi salah satu penyebab utama kelongsoran lereng, terutama di Indonesia (Silalahi, Arifianti and Hidayat, 2019; Muntohar *et al.*, 2022; Zhang and Shen, 2024). Oleh karena itu, pemantauan perubahan kadar air pada lereng rentan sangat diperlukan sebagai upaya deteksi dini ketidakstabilan lereng.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengukur kadar air tanah, di antaranya dengan tensiometer (Filho and Fernandes, 2019), TDR (Time Domain Reflectometry) (Stangl, Buchan and Loiskandl, 2009) dan FDR (Frequency Domain Reflectometry) (Zhu *et al.*, 2019). Metode-metode tersebut telah terbukti memberikan hasil yang akurat dan telah banyak digunakan baik skala laboratorium maupun di lapangan (Abdulraheem *et al.*, 2023; Yao, Fan and Li, 2025). Namun demikian, metode tersebut umumnya menggunakan perangkat yang memiliki harga tinggi dan memerlukan instalasi yang kompleks, sehingga penggunaan secara luas menjadi terbatas. Hal ini menjadi tantangan dalam penerapan sistem pemantauan pada lereng-lereng terutama di daerah dengan keterbatasan alat dan biaya seperti di Indonesia. Oleh karena itu, sensor berbiaya rendah (low-cost sensor) menjadi alternatif untuk pemantauan kadar air tanah di lapangan.

Salah satu alternatif adalah sensor kapasitif berbiaya rendah (*low-cost capacitive moisture sensor*) yang dapat mengukur kadar air tanah berdasarkan prinsip pengukuran kapasitansi pada media tanah (Abdelmoneim *et al.*, 2025). Sensor ini relatif mudah dirakit, sistemnya sederhana, dan harganya jauh lebih terjangkau dibandingkan instrumen konvensional. Pengoperasiannya umumnya menggunakan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Beberapa studi menunjukkan bahwa sensor ini mampu mengukur kadar air dengan baik apabila dilakukan kalibrasi secara individual dan sensor dilindungi dari kelembaban berlebih (Nagahage, Nagahage and Fujino, 2019; Adla *et al.*, 2020). Namun demikian, penggunaannya dalam literatur masih terbatas pada skala laboratorium atau lahan pertanian untuk kebutuhan irigasi dan pertanian presisi (Abdelmoneim *et al.*, 2025; Mane *et al.*, 2025),

dan belum banyak yang menguji penerapannya untuk pemantauan keamanan lereng di lapangan.

Tantangan penggunaan sensor kapasitif berbiaya rendah di lapangan tidak hanya terletak pada akurasi, tetapi juga pada metode instalasinya. Kualitas kontak fisik antara sensor dan tanah merupakan faktor kritis yang menentukan keandalan data yang diperoleh. Hingga saat ini, belum ada studi yang membandingkan metode instalasi yang berbeda, dan menganalisis bagaimana setiap metode tersebut mempengaruhi kualitas pembacaan, stabilitas data, serta efektivitas sensor dalam mendeteksi perubahan kadar air tanah di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan membandingkan dua metode instalasi sensor kapasitif berbiaya rendah, yaitu side mount dan bottom mount, pada berbagai variasi kedalaman. Kurva kalibrasi dikembangkan untuk setiap sensor untuk memastikan akurasi pembacaan sensor. Sistem pemantauan kadar air tanah secara *real-time* kemudian dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan *platform cloud Firebase*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan dalam pemilihan metode instalasi sensor untuk pemantauan kadar air pada lereng, serta menjadi dasar pengembangan sistem pemantauan ketidakstabilan lereng berbasis IoT berbiaya rendah di lapangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Ketidakstabilan Lereng

Kestabilan lereng merupakan salah satu isu kritis dalam geoteknik, terutama di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi seperti Indonesia. Kadar air tanah memainkan peran sentral dalam menentukan perilaku mekanis tanah pada lereng. Peningkatan kadar air akan meningkatkan tekanan air pori positif yang secara langsung mengurangi tegangan efektif dan kuat geser tanah (Zhao, Lu and Zhang, 2022).

Pada kondisi tidak jenuh, tanah memiliki kuat geser tambahan akibat adanya *matric suction*. Vanapalli *et al.*, (1996) mengusulkan persamaan untuk memprediksi kuat geser tanah tidak jenuh sebagai berikut:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \quad (1)$$

di mana c' adalah kohesi efektif, $(\sigma_n - u_a)$ adalah tegangan normal neto, $(u_a - u_w)$ adalah matric suction, θ_w adalah kadar air volumetrik aktual, θ_r dan θ_s masing-masing adalah kadar air volumetrik sisa dan

jenuh, serta ϕ' adalah sudut geser dalam efektif. Persamaan ini menunjukkan bahwa kuat geser tanah tidak jenuh bergantung langsung pada nilai VWC. Semakin tinggi kadar air, semakin kecil kontribusi *matric suction* terhadap kuat geser, hingga pada kondisi jenuh penuh kontribusi tersebut menghilang sepenuhnya. Oleh karena itu, pemantauan VWC sangat penting untuk mengestimasi perubahan kuat geser dan mengidentifikasi kondisi kritis pada lereng.

Di Indonesia, kelongsoran lereng yang dipicu hujan merupakan bencana yang sering terjadi dan menyebabkan kerugian besar baik jiwa maupun harta benda (Silalahi, Arifianti and Hidayat, 2019; Muntohar *et al.*, 2022). Muntohar *et al.* (2022) mencatat bahwa tanah residual vulkanik di Indonesia memiliki permeabilitas rendah hingga sedang dan sensitivitas tinggi terhadap perubahan kadar air, sehingga rentan terhadap kelongsoran selama musim hujan. Studi pemetaan kerentanan oleh Silalahi, Arifianti and Hidayat (2019) di Bogor, Jawa Barat, mengonfirmasi bahwa curah hujan adalah faktor pemicu dominan untuk longsoran. Zhang and Shen (2024) juga menekankan pentingnya model prediksi dan pemantauan lapangan yang andal sebagai langkah mitigasi risiko kelongsoran berbasis hujan.

Pengukuran Kadar Air Tanah

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengukur kadar air tanah secara *in-situ*. Tensiometer mengukur *matric suction* tanah tidak jenuh dan banyak digunakan dalam studi kestabilan lereng karena kemampuannya mendeteksi perubahan tekanan air pori negatif secara langsung (Filho and Fernandes, 2019). TDR (*Time Domain Reflectometry*) mengukur konstanta dielektrik tanah melalui rambatan pulsa elektromagnetik dan terbukti memberikan akurasi tinggi dalam pengukuran VWC (Stangl, Buchan and Loiskandl, 2009). FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) bekerja dengan prinsip serupa menggunakan frekuensi osilasi tertentu untuk mengukur kapasitansi tanah, dan telah diuji pada berbagai jenis tekstur tanah dengan hasil yang memuaskan (Zhu *et al.*, 2019). Metode-metode ini merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk pemantauan kadar air skala lapangan karena tingkat akurasi dan keandalannya (Yao, Fan and Li, 2025). Meskipun demikian, sebagian besar perangkat pengukuran konvensional ini memiliki harga yang relatif tinggi dan memerlukan prosedur instalasi serta kalibrasi yang kompleks, sehingga penerapannya pada skala luas terutama di negara berkembang menjadi terbatas.

Sensor Kapasitif Berbiaya Rendah

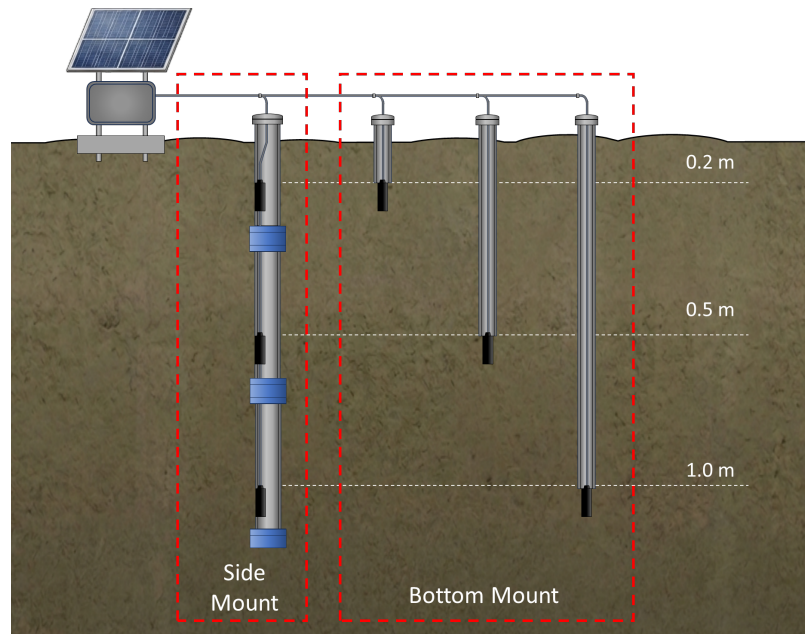
Sensor kapasitif berbiaya rendah (*low-cost capacitive moisture sensor*) merupakan alternatif yang semakin banyak dikaji untuk pemantauan kadar air tanah yang lebih terjangkau. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip perubahan konstanta dielektrik tanah yang meningkat seiring bertambahnya kandungan air (Nagahage, Nagahage and Fujino, 2019). Berbeda dengan sensor resistif yang rentan terhadap degradasi akibat korosi elektrolisis, sensor kapasitif tidak memiliki kontak langsung antara elektroda logam dan tanah sehingga lebih tahan terhadap kondisi lembab dalam jangka panjang (Songara and Patel, 2022). Pengoperasiannya umumnya menggunakan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, dengan biaya sistem yang jauh lebih rendah dibandingkan instrumen konvensional.

Sejumlah penelitian telah mengevaluasi performa sensor (Nagahage, Nagahage and Fujino, 2019; Songara and Patel, 2022; Abdulraheem *et al.*, 2023). Sensor kapasitif berbiaya rendah mampu menghasilkan pembacaan yang cukup akurat apabila dilakukan kalibrasi individual terhadap jenis tanah yang spesifik (Songara and Patel, 2022; Abdulraheem *et al.*, 2023).

Sistem Pemantauan IoT Berbasis ESP32

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang baru dalam pemantauan kondisi lereng secara *real-time*. ESP32 merupakan salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan dalam aplikasi IoT karena dilengkapi modul *WiFi* dan *Bluetooth* terintegrasi, prosesor *dual-core* hingga 240 MHz, serta berbagai antarmuka komunikasi seperti ADC, UART, SPI, dan I2C (Hercog *et al.*, 2023). Kemampuan komunikasi nirkabel yang terintegrasi memungkinkan ESP32 mengirimkan data sensor langsung ke platform *cloud* seperti *Firebase*, *Google Sheets*, atau *ThingSpeak*, sehingga data dapat dipantau dari jarak jauh tanpa infrastruktur tambahan yang mahal (Hura and Monastyrskii, 2023; Patel, Koradia and Sharma, 2025).

ESP32 telah banyak digunakan sebagai platform akuisisi data pada berbagai sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT, termasuk pemantauan kualitas air, suhu tanah, dan kelembaban udara (Suhaimi *et al.*, 2021; Babić *et al.*, 2022; Pramono *et al.*, 2023). Namun penerapannya untuk pemantauan kadar air tanah pada lereng untuk pemantauan kejadian longsor masih terbatas. Kombinasi sensor kapasitif berbiaya rendah dan ESP32 memungkinkan pengembangan sistem pemantauan yang portabel dan berpotensi



Gambar 1. Skema konfigurasi instalasi sensor kapasitif berbiaya rendah di lapangan dengan metode *side mount* (kiri) dan metode *bottom mount* (kanan) dengan sensor dipasang pada sisi pipa PVC pada kedalaman 0.2 m, 0.5 m, dan 1 m dari permukaan tanah.

Sumber: Hasil Analisis (2026)

dioperasikan menggunakan panel surya, sehingga cocok untuk lereng terpencil dengan keterbatasan infrastruktur. Integrasi dengan basis data cloud secara real-time memungkinkan analisis pola perubahan kadar air terhadap kejadian hujan, yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengembangan sistem peringatan dini kelongsoran berbasis data lapangan.

METODE

Alat dan Bahan

Capacitive Moisture Sensors

Sensor kadar air yang digunakan dalam penelitian ini adalah *capacitive soil moisture sensor*. Sensor ini beroperasi pada tegangan 3.3 V hingga 5.5 V dan menghasilkan keluaran berupa sinyal analog yang dibaca melalui pin ADC mikrokontroler ESP32. Sensor dipilih karena harganya yang terjangkau, ketahanannya terhadap korosi untuk penggunaan jangka panjang di lapangan, serta kompatibilitasnya langsung dengan ESP32 tanpa rangkaian tambahan. Sebelum digunakan, setiap unit sensor dikalibrasi secara individual menggunakan metode gravimetri untuk menghasilkan kurva kalibrasi $V_{out}-VWC$ yang spesifik terhadap jenis tanah yang diuji.

ESP32 WROOM-32 (Microcontroller)

Mikrokontroler yang digunakan dalam

penelitian ini adalah ESP32 WROOM-32. Perangkat ini beroperasi pada tegangan 3,3 V dan dilengkapi modul WiFi terintegrasi yang digunakan untuk pengiriman data ke *platform cloud*. Pada penelitian ini, ESP32 diprogram menggunakan Arduino IDE untuk mengakuisisi data dari sensor kadar air yang dihubungkan ke pin ADC GPIO 34, 35, dan 36. Data yang diperoleh diproses oleh mikrokontroler dan dikirimkan melalui jaringan WiFi ke *Firestore* untuk keperluan pemantauan dan analisis *real-time*.

Metode

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh metode instalasi *side mount* dan *bottom mount* terhadap performa sensor kadar air tanah pada beberapa variasi kedalaman, yaitu 0.2 m, 0.5 m, dan 1.0 m dari permukaan tanah. Pengujian dilakukan dalam kondisi lapangan untuk menganalisis stabilitas dan akurasi pembacaan masing-masing metode instalasi.

Kalibrasi Sensor Capacitive Moisture Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan di laboratorium untuk memperoleh hubungan antara tegangan keluaran sensor dan kadar air tanah. Tanah disiapkan pada beberapa variasi kadar air, kemudian dipadatkan menggunakan mold pemadatan standar untuk memastikan kondisi yang seragam. Sensor

ditempatkan pada bagian tengah mold dan pembacaan dilakukan hingga nilai sensor mencapai kondisi stabil.

Akuisisi data menggunakan ESP32 dengan konfigurasi perkabelan yang sama seperti pada pengujian lapangan. Keluaran sensor berupa nilai ADC dengan rentang 0–4095, yang kemudian dikonversi menjadi tegangan keluaran (V_{out}) menggunakan Persamaan (2), di mana V_{out} adalah tegangan keluaran sensor, ADC adalah nilai pembacaan analog, dan V_{ref} adalah tegangan referensi mikrokontroler. Nilai V_{out} yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan kadar air volumetrik (VWC) untuk membentuk kurva kalibrasi sensor.

$$V_{out} = \frac{ADC}{4095} \times V_{ref} \quad (2)$$

Konfigurasi dan Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan di area lapangan Politeknik Negeri Tanah Laut. Secara umum, konfigurasi penempatan sensor di lapangan ditunjukkan pada Gambar 1. Pada metode *side mount*, sensor dipasang pada sisi pipa PVC melalui lubang yang dibuat pada dinding pipa, disusun secara vertikal dengan panjang segmen 0.5 m. Setiap segmen dihubungkan melalui sambungan modular sehingga kedalaman pengukuran dapat disesuaikan, yaitu pada 0.2 m, 0.5 m, dan 1.0 m dari permukaan tanah. Pada metode *bottom mount*, satu sensor ditempatkan pada bagian dasar masing-masing pipa PVC sehingga memiliki kontak langsung dengan tanah di dasar lubang. Tiga pipa digunakan dengan kedalaman masing-masing 0.2 m, 0.5 m, dan 1.0 m dari permukaan tanah. Seluruh sensor pada kedua metode dihubungkan ke satu unit ESP32 yang ditempatkan di permukaan untuk akuisisi dan pengiriman data.

Sistem ditenagai oleh panel surya berkapasitas 30 WP dengan baterai 12 V 5 Ah, sehingga dapat beroperasi secara mandiri selama periode pengujian. Pengujian berlangsung dari 10 Maret hingga 16 April 2026 dengan interval akuisisi data setiap 10 menit. Pada setiap siklus, sensor melakukan 10 kali pembacaan yang dirata-ratakan sebelum dikirimkan melalui WiFi ke *Firestore Realtime Database*. Data selanjutnya dapat dipantau melalui antarmuka web berbasis *Firestore Hosting*. Kondisi lingkungan selama pengujian tidak dikontrol untuk merepresentasikan kondisi lapangan yang sebenarnya. Data curah hujan dikumpulkan dari satelit *Global Precipitation Measurement (GPM)* sebagai parameter pendukung untuk menganalisis respons sensor terhadap kejadian hujan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi Sensor

Gambar 2 menunjukkan hasil kalibrasi seluruh sensor yang digunakan dalam penelitian ini pada rentang VWC $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ hingga $0,70 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Peningkatan kadar air tanah secara konsisten diikuti oleh penurunan tegangan keluaran (V_{out}), yang sesuai dengan karakteristik sensor kapasitif.

Seluruh sensor menunjukkan hubungan linier antara V_{out} dan VWC dengan koefisien determinasi (R^2) lebih besar dari 0.9, mengindikasikan bahwa model kalibrasi yang diperoleh mampu merepresentasikan hubungan tersebut dengan baik. Kurva kalibrasi ini selanjutnya digunakan untuk mengkonversi data keluaran sensor pada pengujian lapangan. Rincian parameter kalibrasi masing-masing sensor disajikan pada Tabel 1.

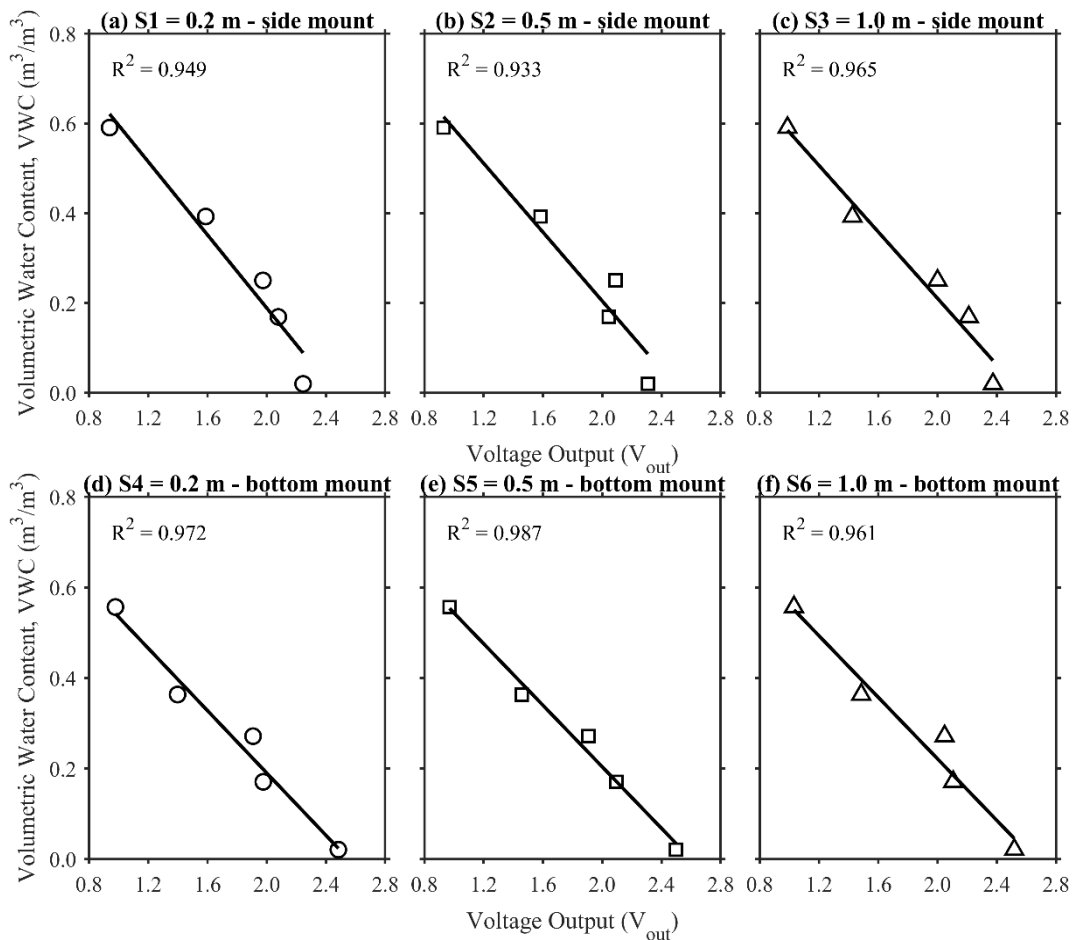
Hasil Pemantauan Lapangan

Gambar 3 memperlihatkan hasil pengujian lapangan metode *side mount* dari 10 Maret hingga 16 April 2026. Kejadian hujan diberi penomoran untuk memudahkan identifikasi. Grafik menampilkan dua sumbu vertikal: sumbu Y pertama menunjukkan nilai VWC hasil pembacaan sensor, dan sumbu Y kedua menunjukkan curah hujan (mm) dari data satelit.

Pada awal periode pengujian, sebagian besar sensor tidak menghasilkan pembacaan yang valid meskipun sistem dalam kondisi aktif. Nilai keluaran yang terbaca cenderung konstan mendekati nol, mengindikasikan bahwa sensor belum mampu mendeteksi kondisi kadar air tanah secara efektif meskipun terdapat kejadian hujan No. 1 dan No. 2 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3 (b). Data tidak valid mendominasi fase awal ini, menunjukkan bahwa kualitas kontak antara sensor dan tanah belum terbentuk dengan baik setelah instalasi.

Respons sensor mulai muncul secara bertahap pada setiap kedalaman. Sensor pada kedalaman 0.2 m mulai menunjukkan pembacaan pada 13 Maret, diikuti kedalaman 0.5 m pada 27 Maret, dan kedalaman 1.0 m pada 11 April. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pembentukan kontak antara sensor dan tanah berlangsung secara gradual, dipengaruhi oleh pemadatan alami dan infiltrasi air ke dalam tanah.

Sensor pada kedalaman 0.2 m mulai merespons perubahan kondisi lingkungan pada hujan No. 3 (Gambar 3 (b)), ditandai dengan peningkatan nilai VWC beberapa jam setelah kejadian hujan dengan waktu tunda sekitar 6–7 jam yang relatif konsisten pada hujan No. 3–22. Nilai VWC juga menunjukkan penurunan bertahap pada periode tanpa hujan,



Gambar 2. Kurva kalibrasi hubungan antara tegangan keluaran sensor (V_{out}) dan kadar air volumetrik (VWC) untuk sensor side mount pada kedalaman (a) 0.2 m, (b) 0.5 m, dan (c) 1.0 m; serta sensor bottom mount pada kedalaman (d) 0.2 m, (e) 0.5 m, dan (f) 1.0 m.

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Tabel 1. Persamaan kalibrasi dan koefisien determinasi (R²) sensor kapasitif berbiaya rendah untuk

No Sensor	Konfigurasi Sensor	Kalibrasi	R ²
S1	Side Mount	$VWC = -0.4076 V + 1.0037$	0.949
S2	Side Mount	$VWC = -0.3834 V + 0.9712$	0.933
S3	Side Mount	$VWC = -0.3703 V + 0.9507$	0.965
S4	Bottom Mount	$VWC = -0.3446 V + 0.8790$	0.972
S5	Bottom Mount	$VWC = -0.3398 V + 0.8834$	0.987
S6	Bottom Mount	$VWC = -0.3400 V + 0.9011$	0.961

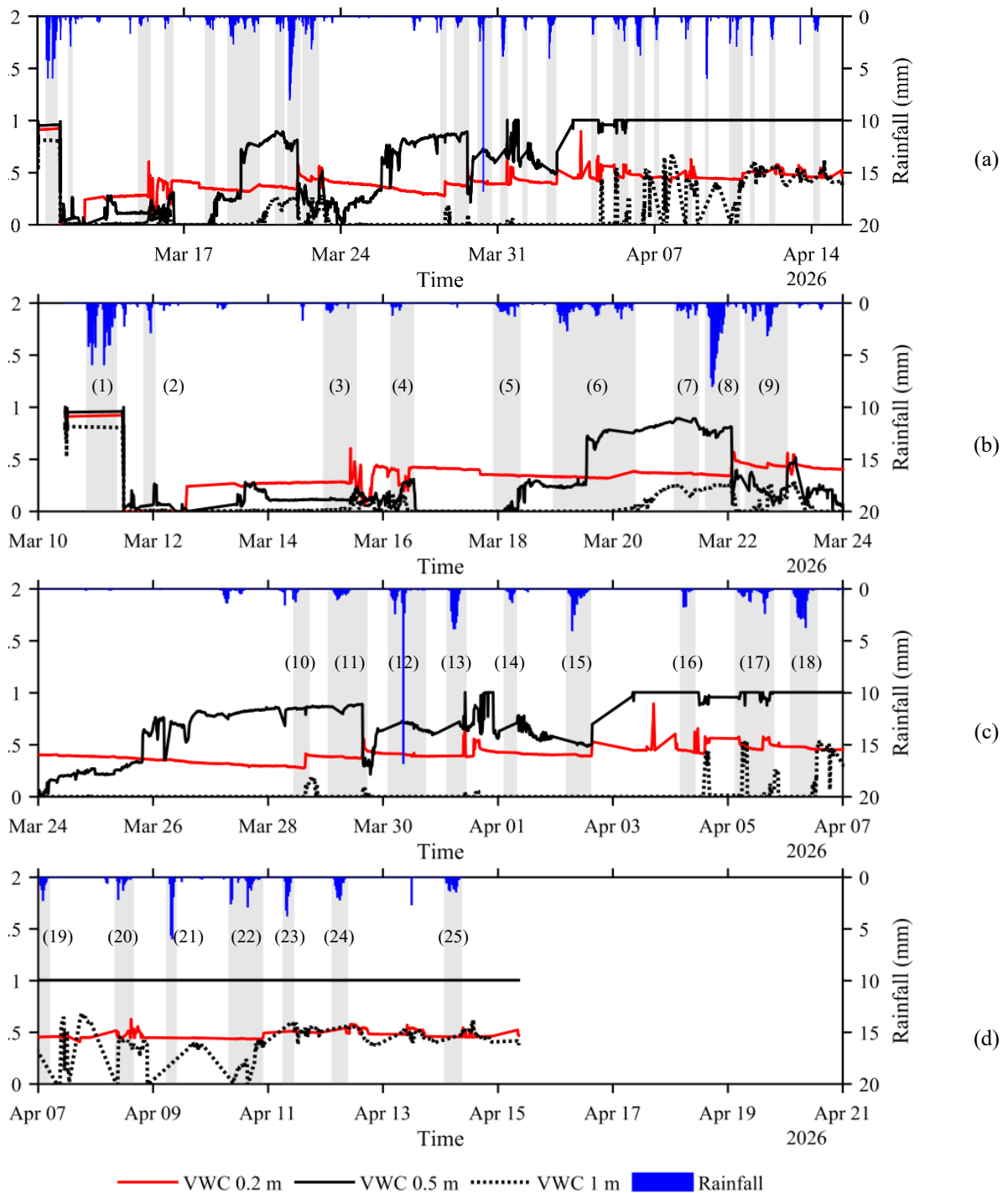
* VWC = volumetric water content

* V = output pembacaan sensor

Sumber: Hasil Analisis (2026)

misalnya antara hujan No. 9 dan No. 10 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3 (b) dan (c), mengindikasikan bahwa dinamika perubahan kadar air tanah berhasil terdeteksi. Namun demikian, tidak semua kejadian hujan menghasilkan respons yang signifikan, terutama pada hujan berdurasi pendek atau intensitas rendah, yang kemungkinan berkaitan dengan keterbatasan resolusi data curah hujan berbasis satelit serta karakteristik infiltrasi tanah.

Respons yang lebih baik pada kedalaman 0.2 m berkaitan dengan kondisi kontak sensor dengan tanah yang lebih optimal, akibat pemadatan tanah yang lebih baik saat instalasi serta infiltrasi air hujan yang membantu mengisi celah di sekitar sensor. Hal ini sejalan dengan karakteristik tanah di lokasi penelitian yang didominasi fraksi halus (>50%), di mana proses infiltrasi dan redistribusi air berlangsung secara

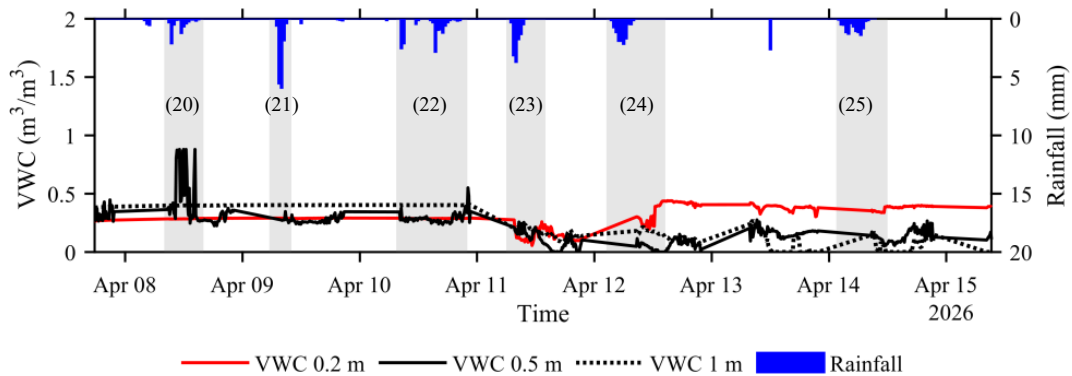


Gambar 3. Hasil pengujian lapangan metode side mount dari 10 Maret hingga 16 April 2026: (a) keseluruhan periode pengujian, (b) periode 10–24 Maret 2026, (c) periode 24 Maret–7 April 2026, dan (d) periode 7–16 April 2026.
 Sumber: Hasil Analisis (2026)

bertahap sehingga menghasilkan waktu tunda sebelum perubahan kadar air terdeteksi.

Sebaliknya, sensor pada kedalaman lainnya masih menunjukkan pembacaan yang tidak stabil atau lambat dalam merespons perubahan kondisi

lingkungan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kualitas kontak antara sensor dan tanah pada metode side mount tidak seragam pada setiap kedalaman. Salah satu penyebab utama diduga berasal dari desain instalasi, di mana sambungan pada pipa yang lebih



Gambar 4. Hasil pengujian lapangan metode *bottom mount* dari 7 April hingga 16 April 2026. Sumber: Hasil Analisis (2026)

menonjol dibandingkan permukaan sensor berpotensi menimbulkan celah antara sensor dan tanah, sehingga menghambat interaksi langsung antara sensor dan media tanah.

Hasil ini menunjukkan bahwa metode *side mount* tidak menjamin kontak langsung antara sensor dan tanah, sehingga sangat sensitif terhadap kondisi mekanis di sekitar sensor. Kualitas pembacaan tidak hanya ditentukan oleh karakteristik sensor, tetapi juga oleh desain instalasi dan kualitas kontak dengan media tanah (Loconsole *et al.*, 2025). Faktor lingkungan di sekitar sensor, khususnya konduktivitas listrik tanah, terbukti dapat mempengaruhi akurasi pembacaan sensor kapasitif secara signifikan (Deng *et al.*, 2020), sehingga perbaikan pada aspek instalasi dan kondisi tanah di sekitar sensor menjadi faktor kunci dalam meningkatkan performa sensor di lapangan.

Gambar 4 memperlihatkan hasil pengujian lapangan metode *bottom mount* pada 7 April – 16 April 2026. Seluruh sensor pada metode ini menghasilkan pembacaan yang valid sejak awal periode pengujian, menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan baik sejak instalasi. Fluktuasi sesaat yang terjadi pada sensor kedalaman 0.5 m bersifat sementara dan tidak mempengaruhi kualitas data secara keseluruhan.

Respons sensor terhadap kejadian hujan mulai terlihat pada hujan No. 23. Sensor pada kedalaman 0.2 m menunjukkan peningkatan VWC dengan waktu tunda sekitar 6–7 jam setelah kejadian hujan, sedangkan sensor pada kedalaman 0.5 m dan 1 m merespons lebih lambat, masing-masing dengan waktu tunda sekitar 12 jam dan 15 jam. Pola ini konsisten pada kejadian hujan berikutnya, khususnya hujan No. 24 dan 25. Konsistensi respons antar kedalaman mengindikasikan bahwa perubahan kadar air terdeteksi secara bertahap sesuai dengan

kedalaman, sesuai dengan mekanisme infiltrasi dan redistribusi air yang berlangsung secara gradual pada tanah berfraksi halus.

Dibandingkan dengan metode *side mount*, metode *bottom mount* menghasilkan pembacaan yang lebih stabil dan konsisten sejak awal. Kondisi ini berkaitan dengan konfigurasi instalasi yang menempatkan sensor langsung pada dasar pipa, sehingga kontak antara sensor dan tanah lebih optimal dan merata. Dengan demikian, metode *bottom mount* mampu meminimalkan celah antara sensor dan media tanah yang menjadi kendala utama pada metode *side mount*.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh metode instalasi *side mount* dan *bottom mount* terhadap performa sensor kapasitif berbiaya rendah dalam memantau kadar air tanah di lapangan pada kedalaman 0.2 m, 0.5 m, dan 1 m. Sistem pemantauan dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan platform cloud Firebase untuk akuisisi dan transmisi data secara *real-time*.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa seluruh sensor memiliki hubungan linier yang kuat antara tegangan keluaran V_{out} dan kadar air volumetrik (VWC) dengan $R^2 > 0.9$, yang menunjukkan bahwa kurva kalibrasi yang diperoleh memadai untuk diterapkan pada pengujian lapangan.

Pada metode *side mount*, sebagian besar sensor tidak menghasilkan pembacaan yang valid pada fase awal pengujian, yang mengindikasikan bahwa kualitas kontak antara sensor dan tanah belum terbentuk dengan baik setelah instalasi. Respons terhadap kejadian hujan baru terlihat secara bertahap, dengan waktu tunda pembentukan kontak yang berbeda pada setiap kedalaman. Kondisi ini diduga berkaitan dengan desain instalasi, di mana sambungan

pada pipa yang lebih menonjol dibandingkan permukaan sensor berpotensi menimbulkan celah antara sensor dan tanah.

Sebaliknya, metode *bottom mount* menghasilkan pembacaan yang valid sejak awal periode pengujian pada seluruh kedalaman. Respons sensor terhadap kejadian hujan terdeteksi secara konsisten dengan waktu tunda yang sesuai dengan kedalaman, yaitu sekitar 6–7 jam pada kedalaman 0.2 m, 12 jam pada kedalaman 0.5 m, dan 15 jam pada kedalaman 1 m. Pola ini sejalan dengan mekanisme infiltrasi dan redistribusi air yang berlangsung secara gradual pada tanah berfraksi halus.

Secara keseluruhan, metode *bottom mount* menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan *side mount* dalam hal stabilitas dan konsistensi pembacaan di lapangan. Kualitas kontak fisik antara sensor dan tanah terbukti menjadi faktor penentu keandalan data, di luar karakteristik sensor itu sendiri. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis dalam pemilihan metode instalasi sensor kapasitif berbiaya rendah untuk aplikasi pemantauan kadar air tanah pada lereng, serta menjadi dasar pengembangan sistem peringatan dini kelongsoran berbasis IoT yang dapat diterapkan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmoneim, A.A. *et al.* (2025) 'Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications', *Sensors*, 25(2), p. 343.
- Abdulraheem, M.I. *et al.* (2023) 'Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: A comprehensive review', *Sustainability*, 15(21), p. 15444.
- Adla, S. *et al.* (2020) 'Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors', *Sensors*, 20(2), p. 363.
- Babić, D. *et al.* (2022) 'An internet of things system for environmental monitoring based on ESP32 and Blynk', in *2022 26th International Conference on Information Technology (IT)*. IEEE, pp. 1–5.
- Bogaard, T.A. and Greco, R. (2016) 'Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), pp. 439–459.
- Deng, X. *et al.* (2020) 'A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance', *Measurement*, 150, p. 107052.
- Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107052>.
- Filho, O.A. and Fernandes, M.A. (2019) 'Landslide analysis of unsaturated soil slopes based on rainfall and matric suction data', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), pp. 4167–4185.
- Hercog, D. *et al.* (2023) 'Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices', *Sensors*, p. 6739. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23156739>.
- Hura, V. and Monastyrskii, L. (2023) 'IoT-based solution for detection of air quality using ESP32', *Artificial Intelligence*, 28(3), pp. 86–93.
- Loconsole, D. *et al.* (2025) 'Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture', *Agronomy*, p. 2788. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy15122788>.
- Mane, S. *et al.* (2025) 'Development of low-cost handheld soil moisture sensor for farmers and citizen scientists', *Frontiers in Environmental Science*, 13, p. 1590662.
- Muntohar, A.S. *et al.* (2022) 'Rainfall infiltration-induced slope instability of the unsaturated volcanic residual soils during wet seasons in Indonesia', *Indonesian Journal on Geoscience*, 9(1), pp. 71–85.
- Nagahage, E.A., Nagahage, I.S. and Fujino, T. (2019) 'Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System', *Agriculture*, p. 141. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture9070141>.
- Patel, D., Koradia, K. and Sharma, P. (2025) 'IoT-Based Water Quality Monitoring System using ESP32', in *2025 7th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICEPE65965.2025.11139802>.
- Peranić, J., Čeh, N. and Arbanas, Ž. (2022) 'The use of soil moisture and pore-water pressure sensors for the interpretation of landslide behavior in small-scale physical models', *Sensors*, 22(19), p. 7337.
- Pramono, N.A. *et al.* (2023) 'Development a prototype of river water level monitoring system using ESP32 based on internet of things for flood mitigation', in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, p. 12039.
- Silalahi, F.E.S., Arifianti, Y. and Hidayat, F. (2019) 'Landslide susceptibility assessment using

- frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia', *Geoscience Letters*, 6(1), p. 10.
- Songara, J.C. and Patel, J.N. (2022) 'Calibration and comparison of various sensors for soil moisture measurement', *Measurement*, 197, p. 111301. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111301>.
- Stangl, R., Buchan, G.D. and Loiskandl, W. (2009) 'Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria', *Geoderma*, 150(1–2), pp. 23–31.
- Suhaimi, A.F. *et al.* (2021) 'IoT based smart agriculture monitoring, automation and intrusion detection system', in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, p. 12016.
- Vanapalli, S.K. *et al.* (1996) 'Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction', *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp. 379–392. Available at: <https://doi.org/10.1139/t96-060>.
- Yao, Y., Fan, J. and Li, J. (2025) 'A review of advanced soil moisture monitoring techniques for slope stability assessment', *Water*, 17(3), p. 390.
- Zhang, Q. and Shen, D. (2024) 'Rainfall-induced landslides: influencing, modelling and hazard assessment', *Water*. MDPI, p. 3384.
- Zhao, N., Lu, H. and Zhang, R. (2022) 'The Coupling Effect of Pore Water Pressure and Pore Water Gravity in Unsaturated Soils under Rainfall Condition and Its Influence on Slope Stability', *Geofluids*, 2022(1), p. 9492514. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/9492514>.
- Zhu, Y. *et al.* (2019) 'Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine- and coarse-textured soils', *Applied Engineering in Agriculture*, 35(2), pp. 117–134.