

การประเมินสมรรถนะในระดับห้องปฏิบัติการของเซนเซอร์วัดความชื้นดินชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำสำหรับดินเนื้อละเอียดและดินเนื้อปานกลาง

Laboratory performance evaluation of a low-cost capacitive soil moisture sensor for fine- and medium-textured soils

ณัฐพล เลาววัฒนารัสมิ¹ พงศกร หีบแก้ว¹ วชรชัย ใจน้ำ¹

นภัสกร ชูลี¹ และ ชูพันธ์ ชมภูจันทร^{1*}

Natthapol Laowatthanarassamee¹, Pongsakorn Heepkaew¹, Watcharachai Jainam¹,

Napassakorn Chulee¹ and Chuphan Chompuchan^{1*}

บทคัดย่อ

เซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ IoT โดยเฉพาะชนิดคาปาซิทีฟเป็นเครื่องมือสำคัญที่นิยมใช้งานในงานด้านการชลประทานแม่นยำ เนื่องจากมีราคาถูกและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำส่วนมากจำเป็นต้องได้รับการเทียบมาตรฐานที่ถูกต้องให้เป็นค่าความชื้นในดิน ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงต่อเนื้อดินในพื้นที่เกษตรกรรม งานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์ Soil Stick ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ทำการเทียบมาตรฐานกับดินเนื้อละเอียดและดินเนื้อปานกลางจากพื้นที่เกษตรกรรมในจังหวัดเพชรบุรี โดยสมการเทียบมาตรฐานจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด NodeMCU ESP32 กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร ผลการวิจัยพบว่า สมการเทียบมาตรฐานอยู่ในรูปสมการพหุนามดีกรีที่ 3 โดยมีค่า RMSE เท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ จากนั้นประเมินสมรรถนะการตรวจวัดความชื้นในดินด้วยเซนเซอร์ Soil Stick ที่เทียบมาตรฐานแล้ว เปรียบเทียบกับเซนเซอร์ SM100 ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ได้รับการเทียบมาตรฐานในเนื้อดินหลายกลุ่มจากโรงงานผลิต พบว่า ค่า RMSE ของเซนเซอร์ Soil Stick เท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ซึ่งต่ำกว่ากับเซนเซอร์ SM100 ที่มีค่า RMSE เท่ากับ $0.08 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ นอกจากนี้ จากค่าดัชนีความเชื่อมั่นของการตรวจวัดพบว่า เซนเซอร์ Soil Stick มีค่า 0.78 แปลผลได้ว่ามีสมรรถนะในการตรวจวัดอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ในขณะที่เซนเซอร์ SM100 มีค่าดัชนีความเชื่อมั่นของการตรวจวัด 0.66 แปลผลได้ว่ามีสมรรถนะในการตรวจวัดอยู่ในเกณฑ์ดี ผลจากการปรับเทียบมาตรฐานทำให้เซนเซอร์มีความแม่นยำในการตรวจวัดความชื้นดินและสามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานเพื่อควบคุมปริมาณการให้น้ำชลประทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เซนเซอร์วัดความชื้นดินชนิดคาปาซิทีฟ ความชื้นในดินโดยปริมาตร การประเมินสมรรถนะในระดับห้องปฏิบัติการ

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹ Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus

* Corresponding author. E-mail: Chuphan.c@ku.ac.th

Abstract

IoT soil moisture sensors, especially capacitive types, play a vital role in precision irrigation due to offering cost-effective and rapid soil moisture monitoring. However, low-cost capacitive sensors often require accurate calibration specific to agricultural soil textures. This study focuses on calibrating Soil Stick sensors, commercially available in Thailand, using fine and medium-textured soils from agricultural areas in Phetchaburi Province. The calibration process establishes an equation relating the sensor's output voltage, connected to the NodeMCU ESP32 microcontroller board, to volumetric water content. The calibration results revealed a third-degree polynomial equation with an RMSE value of $0.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. The performance evaluation was conducted using the calibrated Soil Stick sensor compared to the SM100 sensor, a factory-calibrated for various soil types. The Soil Stick sensor exhibited a lower RMSE value of $0.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, whereas the SM100 sensor had an RMSE value of $0.08 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Furthermore, the confidence index of measurement (CI) demonstrated that the Soil Stick sensor achieved a value of 0.78, indicating a very good measurement performance, while the SM100 sensor yielded a CI of 0.66, denoting good measurement performance. The sensor's accuracy in soil moisture measurement was enhanced through calibration, enabling efficient control in irrigation applications.

Keywords: capacitive soil moisture sensor, volumetric water content, laboratory performance evaluation

บทนำ

การชลประทานแม่นยำ (precision irrigation) คือเทคนิคการให้น้ำพืชโดยใช้วิธีที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับการตอบสนองต่อความต้องการน้ำของพืชแต่ละชนิด ในเวลาที่พืชต้องการได้อย่างเหมาะสม ปริมาณเพียงพอและสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ รวมทั้งลดผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรน้ำให้น้อยที่สุด (Shah, & Das, 2012; Liang, Liu, Xiong, & Xiao, 2020) ซึ่งการชลประทานแม่นยำจำเป็นต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความต้องการน้ำของพืชโดยเฉพาะความชื้นในดิน ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยี internet of things (IoTs) มาประยุกต์ใช้ในภาคเกษตรกรรมมากขึ้น มีการพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดินเพื่อใช้ในการควบคุมการให้น้ำพืชอย่างแม่นยำ โดยตรวจวัดความชื้นในเขตรากพืชและจัดทำกำหนดการให้น้ำชลประทานที่เหมาะสมกับ

ชนิดดินและพืชที่ปลูกได้ (Songara, & Patel, 2022) ทั้งนี้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะเป็นแบบไดอิเล็กทริก (dielectric sensor) แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิด time-domain reflectometry (TDR) ที่ใช้คลื่นความถี่สูงในการตรวจวัดความชื้นในดิน ซึ่งมีความแม่นยำในการตรวจวัดสูงมากแต่มีราคาที่สูงมาก และเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิด frequency-domain reflectometry (FDR) ที่ใช้คลื่นความถี่ต่ำกว่าชนิด TDR แม้ว่าจะมีความแม่นยำน้อยกว่าแต่มีราคาถูกกว่าชนิด TDR (Chen, Chen, Zhang, Ma, & Chen, 2021) โดยเซนเซอร์ชนิด FDR สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดความต้านทาน (resistance soil moisture sensor) ซึ่งใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานของดินระหว่างอิเล็กโทรด และเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดคาปาซิทีฟ (capacitive soil moisture sensor) ซึ่งใช้วิธีการวัดผลต่างระหว่างค่าคงที่

ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของอากาศและน้ำในดินหรือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในดิน (soil permittivity) ปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟได้รับความนิยมในการนำมาใช้ควบคุมการให้น้ำพืช เนื่องจากมีราคาถูก ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินได้รวดเร็ว รวมทั้งติดตั้งและบำรุงรักษาง่าย (Yu et al., 2021)

อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำส่วนมากที่มีจำหน่ายในประเทศไทยยังขาดการเทียบมาตรฐานให้เซนเซอร์สามารถวัดค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร (volumetric water content: VWC) ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้คำนวณปริมาณความต้องการน้ำชลประทานที่ต้องให้แก่พืชอย่างแม่นยำได้ นอกจากนี้การเทียบมาตรฐานควรใช้เนื้อดินที่หลากหลายเพื่อให้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดความชื้นในดินสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมที่มีเนื้อดินแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเทียบมาตรฐานเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำและประเมินสมรรถนะของการตรวจวัดความชื้นในดินในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเลือกยี่ห้อที่มีจำหน่าย

ในประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อให้เซนเซอร์วัดความชื้นชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้งานกำหนดการให้น้ำชลประทานและควบคุมการให้น้ำพืชได้อย่างแม่นยำต่อไป ผลจากงานวิจัยนี้คาดว่าจะนำไปสู่การใช้งานเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพในราคาที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยยกระดับงานด้านการชลประทานแม่นยำ ทำให้เกษตรกรสามารถประหยัดน้ำ ลดต้นทุนและแรงงานในการให้น้ำพืช รวมทั้งเพิ่มผลผลิตการใช้น้ำ (water productivity) ในระบบการผลิตพืชให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุดได้ (Togneri et al., 2019)

วิธีการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน 2) การเทียบมาตรฐานเซนเซอร์และการตรวจสอบความสมเหตุสมผล และ 3) การประเมินสมรรถนะเซนเซอร์ วิธีการศึกษาสามารถสรุปเป็นไดอะแกรม ดัง (Figure 1) โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

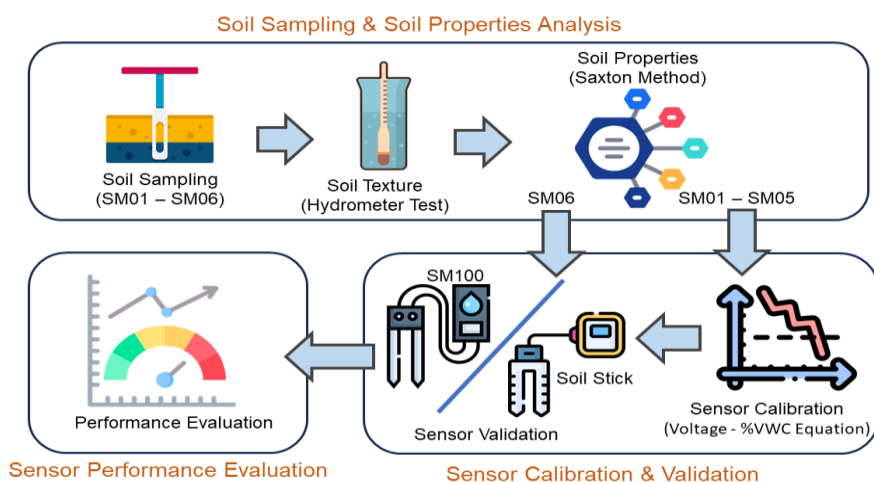


Figure 1 Diagram of methodology.

1. การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรม ในอำเภอชะอำ อำเภอท่ายาง และอำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี จำนวน 6 ตัวอย่าง นำดินตัวอย่างไปจำแนกประเภทอนุภาคเม็ดดิน โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงกลโดยไฮโดรมิเตอร์ (ASTM 152H) และจำแนกชนิดเนื้อดินตามระบบ USDA (Burt, 2011) สามารถจำแนกชนิดเนื้อดินได้ดัง (Figure 2) พบว่า ดินตัวอย่างที่ SM01, SM03 และ SM05 เป็นกลุ่มดินเนื้อละเอียด ส่วนดินตัวอย่างที่ SM02, SM04 และ SM06 เป็นกลุ่มดินเนื้อปานกลาง จากนั้นทำการประมาณค่าความชื้นโดยปริมาตรที่ค่าความชื้นจุดอิ่มตัว (θ_{SAT}) ค่าความจุความชื้นสนาม (θ_{FC}) ค่าความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวร (θ_{PWP}) และความหนาแน่นรวมของดิน (ρ_p) โดยวิธีของ Saxton, Rawls, Romberger, & Papendick (1986) ผลการวิเคราะห์ดินตัวอย่าง ดัง (Table 1) พบว่าตัวอย่างดินมีค่าความ

หนาแน่นรวมของดินระหว่าง $1.22-1.47 \text{ g.cm}^{-3}$ มีค่าความชื้นจุดอิ่มตัวระหว่าง $0.45-0.54 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ความชื้นที่ความจุความชื้นสนามระหว่าง $0.22-0.46 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ และความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวรระหว่าง $0.12-0.32 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$

2. การเทียบมาตรฐานเซนเซอร์และการตรวจสอบความสมเหตุสมผล

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดคาปาซิทีฟ ดัง (Figure 3) ได้แก่ ยี่ห้อ Soil Stick (บริษัทคูอินไทย จำกัด) ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำที่มีจำหน่ายในประเทศไทยโดยยังไม่มี การเทียบมาตรฐาน (calibration) ให้สามารถอ่านค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร และเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน WaterScout SM100 (Spectrum Technologies, USA) ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟที่ได้รับการเทียบมาตรฐานจากโรงงานผลิตด้วยเนื้อดินหลากหลายชนิด ข้อมูลจำเพาะของเซนเซอร์ทั้งสองยี่ห้อ ดัง (Table 2)

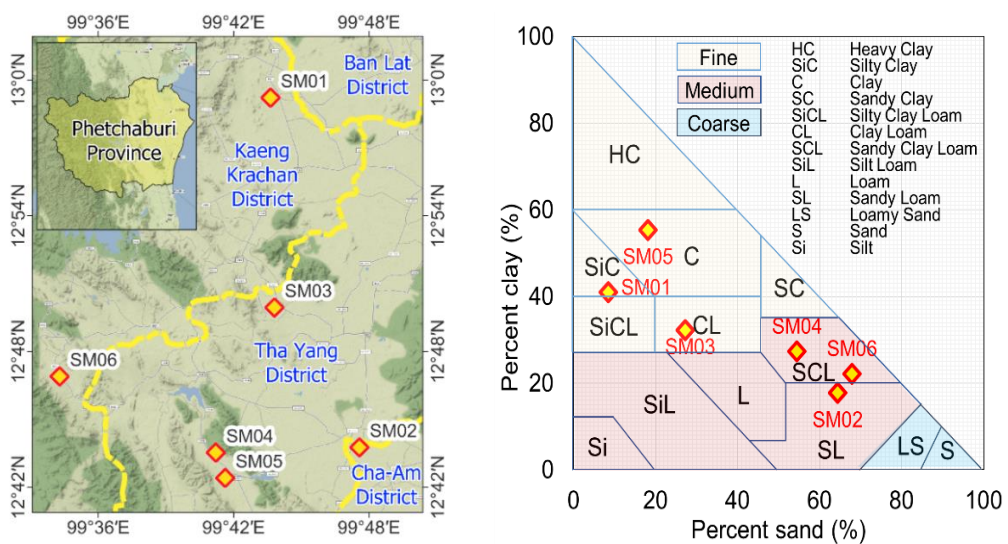


Figure 2 Location of soil samples and soil texture (USDA classification system).

Table 1 Properties of soil samples.

soil sample	land use	soil texture	soil bulk density (ρ_b) g.cm ⁻³	volumetric water content (cm ³ .cm ⁻³)		
				saturation	field capacity	permanent wilting point
				θ_{SAT}	θ_{FC}	θ_{PWP}
SM01	mixed crop	silty clay	1.24	0.53	0.40	0.23
SM02	pineapple	sandy loam	1.47	0.45	0.22	0.12
SM03	durian	clay loam	1.31	0.51	0.33	0.18
SM04	mixed crop	sandy clay loam	1.39	0.54	0.46	0.32
SM05	durian	cay	1.22	0.45	0.23	0.14
SM06	mixed crop	sandy clay loam	1.45	0.48	0.26	0.16

การเทียบมาตรฐานเซนเซอร์ Soil Stick ใช้ดินจากพื้นที่เกษตรกรรมในจังหวัดเพชรบุรีมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) จากเซนเซอร์กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร (θ_v) โดยใช้ตัวอย่างดิน SM01 ถึง SM05 ซึ่งมีเนื้อดินหลากหลายชนิด จากนั้นจึงประเมินสมรรถนะโดยใช้สมการเทียบมาตรฐานมาทำการตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validation) โดยใช้ดินตัวอย่าง SM06 ซึ่งเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ทำการตรวจวัดความชื้นในดินเทียบกับเซนเซอร์ WaterScout SM100

Table 2 Soil moisture sensors specification.

specification	Soil Stick	SM100
supply voltage	3.30-6 V	3-5 V
oscillator frequency	1.31 MHz	80 MHz
output	voltage	voltage, %WVC
output range (voltage)	0-3 (V)	0 - V_{input} (V)
output range (%WVC)	-	0% - saturation (typical 50%)
accuracy	N/A	±3% WVC
operating temperature	0-70 °C	0.50-80 °C

สำหรับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรใช้วิธีการคำนวณค่าความชื้นในดินโดยตรง (direct measurement) ดังสมการ (1)

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{\rho_b}{\rho_w} \times \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

โดย θ_v = ความชื้นในดินโดยปริมาตร (cm³.cm⁻³)

θ_b = ความหนาแน่นรวมของดิน (g.cm⁻³)

θ_w = ความหนาแน่นรวมของน้ำ (g.cm⁻³)

**Figure 3** Capacitive soil moisture sensor (a) WaterScout SM100 and (b) Soil Stick.

V_w = ปริมาตรของน้ำในดิน (cm^3)

V_t = ปริมาตรรวมของดิน (cm^3)

m_w = มวลของน้ำในดิน (g)

m_s = มวลของดินแห้ง (g)

การหาค่าความชื้นในดินใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก

ตามแนวทางของ FAO (FAO, 2023) และตามมาตรฐาน ASTM D2216-19 โดยทำการชั่งน้ำหนักของดินตัวอย่างแต่ละชุดที่ผ่านการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบรรจุดินในภาชนะแก้วใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 เซนติเมตร ความสูง 13 เซนติเมตร จากนั้นตวงน้ำกลั่นและชั่งน้ำหนักของน้ำกลั่นด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม แล้วผสมดินและน้ำให้เข้ากันจนความชื้นกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่างดิน ในการวัดค่าความชื้นแต่ละค่าในขั้นตอนการเทียบมาตรฐานจะใช้ภาชนะบรรจุดินที่มีค่าความชื้นเดียวกัน จำนวน 3 ชุด ดัง (Figure 4) โดยดินตัวอย่างแต่ละชนิดได้ทำการตรวจวัดความชื้นในช่วงระหว่างจุดเที่ยงถาวร (θ_{wp}) จนถึงจุดอิ่มตัว (θ_{sat}) นอกจากนี้ในช่วงการทดลองเทียบมาตรฐานและการตรวจสอบความสมเหตุสมผลจะถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ในระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของดินที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้การอ่านค่าตรวจวัดจากเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟมีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ (Schwartz, Sakaki, Moradi, & Smits, 2019)

การตรวจวัดค่าความชื้นในดินโดยนำเซนเซอร์ Soil Stick เชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด NodeMCU ESP32 ใช้แรงดันไฟฟ้า 3.30 โวลต์ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ Soil Stick มีวงจรเรกูเลเตอร์

เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) ให้คงที่ที่ 3 โวลต์ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) ซึ่งจะสัมพันธ์กับความชื้นในดินในภาชนะบรรจุดิน จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและความชื้นในดินไปสร้างสมการความสัมพันธ์



Figure 4 Measurement of soil moisture using soil stick sensors.

3. การประเมินสมรรถนะของเซนเซอร์

การประเมินสมรรถนะของเซนเซอร์ในการตรวจวัดความชื้นในดิน ได้เลือกใช้เครื่องมือประเมิน ได้แก่ coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), correlation coefficient (r), index of agreement (d) และ confidence index (CI) (Jiménez et al., 2019; Dong, Miller, & Kelley, 2020) ดังสมการ (2-7) ตามลำดับ สำหรับค่า CI สามารถแปลผลในเชิงสมรรถนะตามเกณฑ์ดัง (Table 3)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (6)$$

$$CI = r \times d \quad (7)$$

โดย n = จำนวนข้อมูล

P_i = ค่าความชื้นในดินที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์

$\bar{P}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าความชื้นในดินที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์

O_i = ค่าความชื้นในดินที่ตรวจวัดโดยตรง

$\bar{O}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าความชื้นในดินที่ตรวจวัดได้โดยตรง

Table 3 Criteria of performance evaluation based on the confidence index (CI) (Jiménez et al., 2019).

CI	performance
>0.85	excellent
0.76-0.85	very good
0.66-0.75	good
0.61-0.65	regular
0.51-0.60	unsatisfactory
0.41-0.50	bad
<0.41	awful

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการเทียบมาตรฐานเซนเซอร์ Soil Stick ด้วยดินตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ดัง (Figure 5) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินโดยปริมาตร (θ_v)

และแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์ (V_{out}) อยู่ในรูปแบบสมการพหุนามดีกรีที่ 3 (3rd order polynomial) ดังสมการ (8) โดยสามารถใช้เป็นฟังก์ชันเทียบมาตรฐานที่จำเพาะเจาะจงต่อเนื้อดิน (soil-specific calibration function) ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.70 และ RMSE เท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ทั้งนี้ ช่วงแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) ของเซนเซอร์ Soil Stick ที่สามารถแปลผลเป็นค่าความชื้นโดยปริมาตรได้ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.78-1.95 โวลต์ เมื่อพิจารณาขอบเขต ดังสมการ (8) พบว่า เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 1.78 โวลต์ ค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ $0.56 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ และที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 1.95 โวลต์ จะมีค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรต่ำสุดอยู่ที่ $0.13 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ หากเซนเซอร์ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 1.78 โวลต์ จะถือว่าความชื้นในดินอยู่ในระดับความชื้นอิ่มตัว (saturation) ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 1.95 โวลต์ จะถือว่าความชื้นในดินอยู่ในระดับความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point)

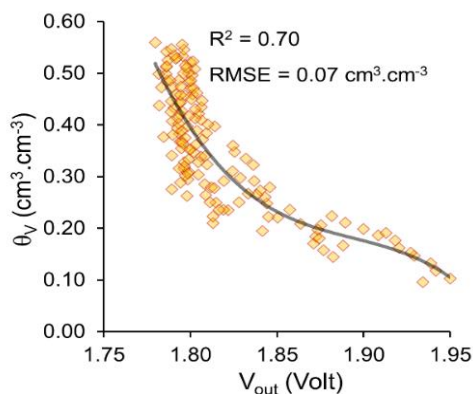


Figure 5 A calibration curve of Soil Stick sensor.

$$\theta_v = 1,118.05 - 1,769.36V + 933.96V^2 - 164.41V^3 \text{ เมื่อ } 1.78 \leq V \leq 1.95 \quad (8)$$

โดย θ_v = ความชื้นในดินโดยปริมาตร ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

V = แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) ของเซนเซอร์ Soil Stick (volt)

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบสมการกับงานวิจัยอื่น ๆ ดัง (Table 4) พบว่าเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำ ยี่ห้ออื่น ๆ มีสมการเทียบมาตรฐานอยู่ในรูปแบบสมการ non-linear และเทียบมาตรฐานแยกตามเนื้อดินเพียง ชนิดเดียว อาทิ ในงานวิจัยของ Kulmány et al. (2022); Pahuja (2022) ใช้สมการเทียบมาตรฐานในรูปแบบสมการ 3rd order polynomial งานวิจัยของ Pramanik et al. (2022) ใช้สมการเทียบมาตรฐานในรูปแบบสมการ exponential ในขณะที่งานวิจัยของ Bitella, Rossi, Bochicchio, Perniola, & Amato (2014) เทียบมาตรฐานจากเนื้อดิน 3 ชนิดเฉลี่ยกันและได้สมการเทียบมาตรฐานในรูปแบบ สมการ sigmoidal growth

ผลการตรวจสอบความสมเหตุสมผลโดยใช้เซนเซอร์

Soil Stick และสมการเทียบมาตรฐานมาทำการตรวจวัด ความชื้นในดินตัวอย่าง SM06 เปรียบเทียบกับการใช้ เซนเซอร์ SM100 ดัง (Figure 6) พบว่า การตรวจวัด ความชื้นในดินด้วยเซนเซอร์ Soil Stick มีค่า R^2 เท่ากับ 0.73 และ RMSE เท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ ผลการเทียบมาตรฐาน ในขณะที่เซนเซอร์ SM100 ตรวจวัด ความชื้นในดิน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.65 และ RMSE เท่ากับ $0.08 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ นอกจากนี้ หากพิจารณาจากกราฟของ เซนเซอร์ SM100 เทียบกับเส้นกราฟ 1:1 พบว่าเซนเซอร์ SM100 มีแนวโน้มของกราฟเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นกราฟ 1:1 และมีค่าคงที่ความลาดชันของกราฟเท่ากับ 1.47 แสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์ SM100 มีความคลาดเคลื่อน ในการตรวจวัดสูงกว่าเซนเซอร์ Soil Stick

Table 4 Comparison of calibration equations from other researches.

researcher	sensor	soil texture	equations	R^2
Kulmány et al. (2022)	SKU: SEN0193	clay loam	$\theta_v = -45.89 + 0.6351F - 0.0017F^2 + (1.32 \times 10^{-6})F^3$	0.89
		sandy loam	$\theta_v = 26.40 + 0.1154F - 0.0006F^2 + (5.41 \times 10^{-7})F^3$	0.81
		silt loam	$\theta_v = 59.23 - 0.0823F - 0.0002F^2 + (3.20 \times 10^{-7})F^3$	0.85
Pramanik et al. (2022)	SKU: SEN0193	loam	$\theta_v = 118.98e^{-0.003F}$	0.83
Pahuja (2022)	SoilWatch10	loamy sandy	$\theta_v = 0.724 + 10.946V - 11.245V^2 + 6.030V^3$	0.99
Bitella, Rossi, Bochicchio, Perniola, & Amato, (2014)	Vegetronix	sandy	$\theta_v = \frac{28.034}{1 + e^{\left(\frac{(1.762-V)}{0.268}\right)}}$	0.89
	VH400	clay loam		
		sandy loam		
this research	Soil Stick	silty clay	$\theta_v = 1,118.05 - 1,769.36V + 933.96V^2 - 164.41V^3$	0.70
		silt loam		
		clay loam		
		sandy clay		
		loam clay		

F = sensor output frequency, V = sensor output voltage.

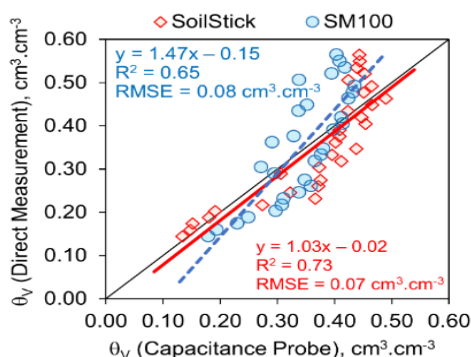


Figure 6 Validation of Soil Stick and SM100 soil moisture sensor.

ในการประเมินสมรรถนะของเซนเซอร์ จากงานวิจัยของ Dong, Miller, & Kelley (2020) ได้เสนอเกณฑ์ของดัชนีความสอดคล้อง (d) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 จะบ่งชี้ถึงความสอดคล้องที่ดีระหว่างค่าจากการวัดโดยตรงและค่าที่ตรวจวัดจากเซนเซอร์ รวมทั้งเสนอเกณฑ์ของค่า MBE ควรไม่เกิน $\pm 0.02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ และ RMSE ควรน้อยกว่า $0.04 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ซึ่งจากผลการประเมินสมรรถนะ ดัง (Table 5) พบว่าค่า d และ MBE ของเซนเซอร์ Soil Stick มีค่าเท่ากับ 1.00 และ $0.00 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ในขั้นตอนการเทียบมาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 0.91 และ $-0.01 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ในขั้นตอนการตรวจสอบความสมเหตุสมผล ส่วนเซนเซอร์ SM100 มีค่าเท่ากับ 0.81 และ $0.01 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ แสดงให้เห็นว่าทั้งเซนเซอร์ Soil Stick และ SM100 มีสมรรถนะที่ดีตามเกณฑ์ดังกล่าวอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากค่า RMSE พบว่า เซนเซอร์ Soil Stick มีค่าเท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ส่วนเซนเซอร์ SM100 มีค่า $0.08 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่า สมการเทียบมาตรฐานของเซนเซอร์

Soil Stick ที่พัฒนาขึ้นและสมการเทียบมาตรฐานที่เซนเซอร์ SM100 ใช้งานอยู่อาจจะยังมีความคลาดเคลื่อนในการวัดความชื้นค่อนข้างสูง ทั้งนี้ ความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ SM100 อาจเกิดจากการเทียบมาตรฐานด้วยเนื้อดินต่างชนิดจากในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเนื้อดินจะมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินโดยปริมาตรและค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในดิน ดังนั้น การเทียบมาตรฐานเซนเซอร์จึงมีความเฉพาะเจาะจงต่อชนิดเนื้อดินนั้น ๆ (González-Teruel et al., 2019) ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ได้โดยทดลองหาสมการปรับแก้ (Dong, Miller, & Kelley, 2020) สำหรับค่าดัชนีความเชื่อมั่นของการตรวจวัด (CI) ของเซนเซอร์ Soil Stick มีค่าเท่ากับ 0.83 ในขั้นตอนการเทียบมาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 0.78 ในขั้นตอนการตรวจสอบความสมเหตุสมผล แปลผลได้ว่ามีสมรรถนะอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ในขณะที่เซนเซอร์ SM100 มีค่า CI เท่ากับ 0.66 แปลผลได้ว่ามีสมรรถนะอยู่ในเกณฑ์ดี

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ เซนเซอร์ Soil Stick ยังไม่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดความชื้นในดินที่มีสัดส่วนอนุภาคดินเหนียวมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มเนื้อดิน high clay) และดินเหนียวที่มีสัดส่วนอนุภาคดินทรายสูง (กลุ่มเนื้อดิน sand และ loamy sand) เนื่องจากสมการเทียบมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงชนิดเนื้อดินดังกล่าว นอกจากนี้การทดลองเทียบมาตรฐานและการประเมินสมรรถนะของเซนเซอร์ยังถูกควบคุมอยู่ภายใต้อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเมื่อนำเซนเซอร์ดังกล่าวไปใช้งานในสนามที่มีความผันแปร

ของอุณหภูมิสูง จึงควรทำการพัฒนาสมการหรือเทคนิค เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุณหภูมิ (temperature compensation) ในสนามด้วย

Table 5 Comparison of statistical analysis results.

performance	calibration		validation
evaluation	Soil Stick	Soil Stick	SM100
R^2	0.70	0.73	0.65
RMSE	0.07	0.07	0.08
MBE	0.00	-0.01	0.01
r	0.84	0.86	0.81
d	1.00	0.91	0.81
CI	0.83	0.78	0.66

สรุป

จากการเทียบมาตรฐานเซนเซอร์ Soil Stick ในเนื้อดินละเอียดและปานกลาง จำนวน 5 ชนิด พบว่า สมการเทียบมาตรฐานระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความชื้นในดินโดยปริมาตรอยู่ในรูปสมการพหุนาม ดีกรีที่ 3 มีช่วงพิสัยการตรวจวัดค่าความชื้นในดิน โดยปริมาตรตั้งแต่ $0.13-0.56 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นช่วงความชื้นในดินที่ใช้งานได้ในพื้นที่เกษตรกรรมทั่วไป และจากการประเมินสมรรถนะของเซนเซอร์ Soil Stick โดยเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ WaterScout SM100 ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ใช้สมการเทียบมาตรฐานจากโรงงานผลิต พบว่า ค่า RMSE ของเซนเซอร์ Soil Stick มีค่าเท่ากับ $0.07 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ซึ่งต่ำกว่าเซนเซอร์ WaterScout SM100 ที่มีค่า RMSE เท่ากับ $0.08 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ นอกจากนี้ จากการประเมินค่าดัชนีความเชื่อมั่นของเซนเซอร์ Soil Stick อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานระดับดีมาก ทำให้ Soil Stick ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟต้นทุนต่ำมีความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดความชื้นในดิน และ

สามารถนำมาใช้ในงานเพื่อควบคุมปริมาณน้ำชลประทาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สำหรับเซนเซอร์ WaterScout SM100 ควรมีการทดลองหาสมการ ปรับแก้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการนำมาใช้งาน กับดินในพื้นที่เกษตรกรรมของไทย

สำหรับข้อเสนอแนะเพิ่มเติม งานวิจัยนี้ ควรทำการเทียบมาตรฐานและประเมินสมรรถนะเพิ่มเติมในเนื้อดินที่มีสัดส่วนอนุภาคดินเหนียวและ ดินทรายสูงเพิ่มเติม รวมทั้งควรหาแนวทางการพัฒนา สมการเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก อุณหภูมิต่อไปเพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และขอขอบคุณ คุณจุลมินทร์ วงศ์นิกร และคุณพรพล รวงรอง จากบริษัทคูอินไทย จำกัด ผู้ผลิตและจำหน่ายเซนเซอร์ความชื้นดิน Soil Stick เกษตรไทย IoT ที่อนุญาตให้นำเซนเซอร์มาใช้ ในการศึกษาวิจัยนี้ ผู้เขียนขอประกาศว่างานวิจัยนี้ไม่มี ความขัดแย้งทางผลประโยชน์ (conflict of interest)

เอกสารอ้างอิง

- Bitella, G., Rossi, R., Bochicchio, R., Perniola, M., & Amato, M. (2014). A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. *Sensors*, 14(10), 19639-19659.
- Burt, R. (2011). *Soil survey laboratory information manual: Soil survey investigations report No. 45, Version 2.0*. Lincoln: United States Department

- of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Chen, D., Chen, N., Zhang, X., Ma, H., & Chen, Z. (2021). Next-generation soil moisture sensor web: High-density in situ observation over NB-IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(17), 13367-13383.
- Dong, Y., Miller, S., & Kelley, L. (2020). Performance evaluation of soil moisture sensors in coarse- and fine-textured Michigan agricultural soils. *Agriculture*, 10(12), 598.
- FAO. (2023). *Standard operating procedure for soil moisture content by gravimetric method*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., & Soto-Valles, F. (2019). Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*, 19(3), 491.
- Jiménez, A. Á. C., Almeida, C. D. G. C. de, Santos Júnior, J. A., Morais, J. E. F. de, Almeida, B. G. de, & Andrade, F. H. N. de. (2019). Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 195, 104413.
- Kulmány, I. M., Bede-Fazekas, Á., Beslin, A., Giczi, Z., Milics, G., Kovács, B., Kovács, M., Ambrus, B., Bede, L., & Vona, V. (2022). Calibration of an Arduino-based low-cost capacitive soil moisture sensor for smart agriculture. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(3), 330-340.
- Liang, Z., Liu, X., Xiong, J., & Xiao, J. (2020). Water allocation and integrative management of precision irrigation: A systematic review. *Water*, 12(11), 3135.
- Pahuja, R. (2022). Development of semi-automatic recalibration system and curve-fit models for smart soil moisture sensor. *Measurement*, 203, 111907.
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D. K., Sudhishri, S., Bhatia, A., & Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032.
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), 1031-1036.
- Shah, N. G., & Das, I. (2012). Precision irrigation: Sensor network based irrigation. In M. Kumar (Ed.), *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management* (pp. 217-232). Rijeka: IntechOpen.
- Songara, J. C., & Patel, J. N. (2022). Calibration and comparison of various sensors for soil moisture measurement. *Measurement*, 197, 111301.
- Schwartz, M., Li, Z., Sakaki, T., Moradi, A., & Smits, K. (2019). Accounting for temperature effects on the performance of soil moisture sensors in sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 83(5), 1319-1323.
- Togneri, R., Kamienski, C., Dantas, R., Prati, R., Toscano, A., Soininen, J. P., & Cinotti, T. S. (2019). Advancing IoT-based smart irrigation. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2(4), 20-25.
- Yu, L., Gao, W., Shamshiri, R. R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(4), 32-42.