

การศึกษาเปรียบเทียบความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม SMAP กับการตรวจวัดด้วย TDR ในพื้นที่นาข้าวภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Comparative Study of Soil Water Content between the SMAP Satellite Data and the TDR Measurements in Paddy Field, Northeast Thailand

เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย,¹ อิศเรศ กะการดี,^{1*} กฤตกานต์ เคลือบมณี,¹ ชลชลิตา ศิริสาชา,¹
ณนศร สุริยะโชติตระกูล,¹ รณชัย กล่อมจิต,¹ ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์,² มารุต ราชมณี,³
บุญลือ คะเชนทร์ชาติ⁴ และสรรธาร พชสิทธิ์^{1,5}

Ekasit Kositsakulchai,¹ Isared Kakarndee,^{1} Kittakan Khluebmanee,¹ Chonchalita Sirisakha,¹
Nathasorn Suriyachottrakul,¹ Ronnachai Klomjit,¹ Yutthana Phankamolsil,² Marut Ratmanee,³
Boonlue Kachenchart⁴ and Santhan Phodchasi^{1,5}*

Received 30 August 2021, Accepted 9 November 2021

ABSTRACT

Soil moisture has an important role in plant growth. Measurement of soil water content can be conducted using direct or indirect methods. Nowadays, satellite data of water content are widely used and accessible via the Internet. This paper aimed to validate the soil water content data from the Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite in paddy field, north-east Thailand. The satellite soil water content data were compared with those measured in the field using the Time Domain Reflectometry (TDR). The 264 measurements were conducted in 10 sites (3-5 repetitions/site), covering ~12,000 km² in Roi Et, Kalasin, and Mahasarakham during November (the end of rainy season) to June (beginning of rainy season). The correlation of soil water content data collected between SMAP and TDR was moderately good ($r^2=0.752$). The overall RMSE was 0.112 m³/m³, while the RMSE below 0.05 m³/m³, which corresponds to the expected accuracy of the SMAP requirements (0.04 m³/m³) were found during

¹ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

² สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.ไทรโยค จ.กาญจนบุรี 71150

Environmental Engineering and Disaster Management Program, Division of Engineering, Mahidol University, Sai Yok, Kanchanaburi 71150, Thailand.

³ กรมฝนหลวงและการบินเกษตร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

⁴ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand.

⁵ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

Research and Development Institute Buriram Rajabhat University, Meuang, Buriram 31000, Thailand.

*Corresponding author: E-mail address: isared.k@ku.th

the end of the rainy season (November-December). The SMAP satellite data can indeed represent the dynamics of soil water content in paddy fields during the dry season.

Keywords: Soil water content, SMAP, Time Domain Reflectometry, Paddy field, North-East Thailand

บทคัดย่อ

ความชื้นในดินเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช การวัดปริมาณความชื้นในดินอาจวัดด้วยวิธีวัดโดยตรงหรือวิธีวัดโดยอ้อม ในปัจจุบันมีการนำข้อมูลความชื้นในดินที่ตรวจวัดจากดาวเทียมมาใช้อย่างแพร่หลายและสามารถดาวน์โหลดได้ทางอินเทอร์เน็ต บทความนี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม Soil Moisture Active Passive (SMAP) ในพื้นที่นาข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยการเปรียบเทียบความชื้นในดินจากดาวเทียม SMAP กับการตรวจวัดด้วยเครื่อง Time Domain Reflectometry (TDR) จากจุดตรวจวัด 10 จุด (จุดละ 3-5 ไร่) รวม 264 ค่า ระหว่างเดือนพฤศจิกายน (ปลายฤดูฝน) ถึงเดือนมิถุนายน (ต้นฤดูฝน) ครอบคลุมพื้นที่ ~12,000 km² ในเขตจังหวัดร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ และมหาสารคาม พบว่าความชื้นในดินที่วัดด้วยเครื่อง TDR มีความสัมพันธ์กับข้อมูลจากดาวเทียม SMAP อยู่ในเกณฑ์ดีพอใช้ ($r^2=0.752$) โดยค่า RMSE โดยรวม เท่ากับ 0.112 m³/m³ โดยช่วงปลายฤดูฝน (พ.ย.-ธ.ค.) ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.05 m³/m³ ซึ่งใกล้เคียงกับข้อกำหนดของเครื่องมือดาวเทียม (0.04 m³/m³) ข้อมูลจากดาวเทียม SMAP สามารถแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินของพื้นที่นาข้าวในช่วงฤดูแล้งได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ความชื้นในดิน ดาวเทียม SMAP TDR นาข้าว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

คำนำ

ปริมาณน้ำในดิน (soil water content) หรือ ความชื้นในดินเป็นองค์ประกอบสำคัญในวัฏจักรอุทกวิทยา ทั้งในระดับแปลงเกษตรกรรมขนาดเล็กและในการจำลองระบบพื้นผิวดิน-บรรยากาศในระดับทั้งโลก (Petropoulos, Ireland, & Barrett, 2015; Srivastava, Petropoulos, G., & Yann, 2016) ความชื้นในดินเป็นปริมาณน้ำในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose zone) (Hillel, 1998) ตามความหมายของพจนานุกรมปฐพีวิทยา ความชื้นในดินคือน้ำซึ่งดูดซับบนผิวอนุภาคดินหรือยังอยู่ชั่วคราวหรืออยู่ในสภาวะไอน้ำในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา, 2541) ซึ่งน้ำเหล่านี้สามารถทำให้หมดได้เมื่ออบที่อุณหภูมิ 105°C - 110°C ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หรือเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณน้ำที่ถูกดึงดูดยังตามช่องว่างหรือเคลือบอยู่รอบ ๆ อนุภาคดินกับปริมาณทั้งหมดของดินนั้น ซึ่งจะมีหน่วยแสดงเป็นความชื้นของดินโดยมวลดิน

แห้งหรือความชื้นของดินโดยปริมาตรทั้งหมดของดินหรือความชื้นในดินโดยระดับความสูงของน้ำ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) การวัดปริมาณความชื้นของดิน แบ่งได้ 2 วิธี คือ การวัดโดยตรงด้วยการชั่งน้ำหนัก และการอ่านค่าที่ได้จากเครื่องมือที่เป็นค่าความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นของดินที่สะดวกกว่าการวัดโดยตรง

การหาความชื้นในดินด้วยการใช้ข้อมูลดาวเทียมเป็นอีกวิธีที่ได้รับความสนใจและมีเปรียบเทียบข้อมูลความชื้นในดินจากดาวเทียมหลายแหล่ง (Hajj *et al.*, 2018) ที่ปฏิบัติหน้าที่ตรวจสอบปริมาณความชื้นในดินโดยเฉพาะ อาทิเช่น ดาวเทียม SMAP (Soil Moisture Active Passive) ของ NASA ดาวเทียม SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) ของ ESA ดาวเทียม ASCAT (Advanced Scatterometer) ของ NOAA/NESDIS และดาวเทียม Sentinel-1 เป็นต้น มีทั้งเผยแพร่ฟรีหรือคิดค่าบริการ การนำข้อมูลจากดาวเทียม SMAP มาประยุกต์ใช้ให้

เกิดประโยชน์จึงมีความสำคัญโดยภาพรวม เนื่องจาก เป็นข้อมูลที่มีความสะดวกต่อการใช้งาน ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ สามารถใช้ให้ข้อมูล ปริมาณแลกเปลี่ยนคาร์บอนในภูมิอากาศ ความชื้น ในดิน ปริมาณคาร์บอนที่ดินดูดซับและปล่อย ออกมา ช่วยให้เราเข้าใจวัฏจักรคาร์บอน ในสิ่งแวดล้อมได้เพิ่มขึ้น (Kellner *et al.*, 2011) นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เพิ่มความสามารถในการทำนาย และตรวจสอบความแห้งแล้งที่จะเกิดขึ้นได้ ในอนาคต (อุมพร, 2557) ในต่างประเทศมีการนำ ข้อมูลดาวเทียม SMAP มาใช้ในเพื่อศึกษาการ เปลี่ยนแปลงความชื้นในดินอย่างแพร่หลาย

สำหรับในประเทศไทย ที่ผ่านมามีได้มี การศึกษาเปรียบเทียบผลของค่าความชื้นในดิน จากเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดินในท้องถิ่น เทียบกับค่าที่ได้จากดาวเทียม SMAP โดย ข้อมูลค่าความชื้นในดินจากทั้งสองแหล่งมีค่า ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกัน อาทิ การเก็บข้อมูล ความชื้นในดินจากชุดตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นเองให้ค่า ในทิศทางเดียวกันความชื้นในดินจากดาวเทียม SMAP (Kellner *et al.*, 2011; สุเจนต์ และคณะ, 2561) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่มีความสัมพันธ์กันสูงกับระดับความแห้งแล้งของ

พื้นที่ (Rajasekaran *et al.*, 2018) เพราะความชื้น ในดินจะส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่าง พื้นดินและบรรยากาศโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลง สภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ (Brocca *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษา งานที่สัมพันธ์กับดิน น้ำ และพืช ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับน้ำ เช่น น้ำท่วม ภัยแล้ง เป็นต้น ช่วยเพิ่มสมรรถนะ ของแบบจำลองการพยากรณ์น้ำท่วมหรือภัยแล้ง (Mladenova *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ข้อมูล ความชื้นในดินยังนำมาใช้ในการศึกษาด้าน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Arthur Endsley *et al.*, 2020) แล้วยังสามารถนำมาเป็นข้อมูล สนับสนุนการแจ้งเตือนพี่น้องเกษตรกรล่วงหน้า เกี่ยวกับแนวโน้มปัญหาของน้ำต่อภาคการเกษตร (Dandridge, Fang , & Lakshmi, 2020)

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา เปรียบเทียบความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม SMAP และความชื้นในดินจากการตรวจวัด ด้วยเครื่อง Time Domain Reflectometry (TDR) ในพื้นที่นาข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นการประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลความชื้นใน ดินจากดาวเทียม SMAP สำหรับการประยุกต์ใช้ งานในลำดับต่อไป

Table 1 Description of the TDR measurement sites

Site	Latitude	Longitude	Administrative Location (Tambon, District, Province)	Site Characteristics
LS001	15.607	103.233	Phan-aen, Phayakkhaphum Phisai, Maha Sarakham	Paddy field with bund higher than 1 m.; no surface water source
LS002	15.929	103.793	Khwaeng Thung, Thawat Buri, Roi Et	Paddy field in lowland along the Chi River; using shallow groundwater
LS003	15.822	103.831	Nong Kham, At Samat, Roi Et	Paddy field near creeks; ponding water in the rainy season
LS004	15.521	103.808	Sa Khu, Suwannaphum, Roi Et	Paddy field in a land reform project (Large-Scaled Field) with ditch and dike
LS005	15.573	103.695	Hin Kong, Suwannaphum, Roi Et	Paddy field with small ponds scattered throughout area
LS006	15.632	103.449	Phon Sung, Pathum Rat, Roi Et	Paddy field; no surface water source; gravel soil; stubble burning in dry season
LS007	15.859	103.178	Na Kha, Wapi Pathum, Maha Sarakham	Paddy field with lowland and upland alternately and large bund
LS008	16.274	103.801	Bua Kham, Pho Chai, Roi Et	Upland cassava; no surface water source
LS009	16.267	103.614	Thanya, Kamalasai, Kalasin	Irrigated paddy-field; double rice cropping; available water source
LS010	16.274	103.457	Khok Sa-At, Khong Chai, Kalasin	Mixed small and large paddy fields; no surface water source

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเขต 3 จังหวัด คือ จังหวัดร้อยเอ็ด (อำเภอปทุมรัตน์ อำเภอเกษตรวิสัย อำเภอสุวรรณภูมิ อำเภอโพธิ์ชัย อำเภออาจสามารถ และอำเภอธวัชบุรี) จังหวัดกาฬสินธุ์ (อำเภอกมลาไสย และอำเภอฆ้องชัย) และมหาสารคาม (อำเภอพยัคฆภูมิพิสัย และอำเภอวาปีปทุม) อยู่ระหว่างละติจูด $15^{\circ}34'15''$ ถึง $16^{\circ}15'45''$ เหนือ และลองจิจูด $103^{\circ}14'15''$ ถึง $103^{\circ}55.30''$ ตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 11,903 ตร.กม. (7.44 ล้านไร่) การใช้ที่ดินส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบ่งเป็นนาข้าว 5.16 ล้านไร่ (70% ของพื้นที่ศึกษา) รองลงมาเป็นกลุ่มพืชไร่และไม้ผล 7.82 แสนไร่ มีจุดตรวจวัดความชื้นในดินภาคสนามจำนวน 10 จุด ดัง Table 1 และใน Figure 1

ความชื้นในดิน

ปริมาณความชื้นในดินอาจประเมินค่าได้หลายลักษณะ (เอกสิทธิ์, 2559) อาทิ ความชื้นในดินโดยปริมาตร, โดยการชั่ง, ระดับความอึดตัวด้วยน้ำ หรือ ความลึกของน้ำเทียบเท่า การหาปริมาณความชื้นโดยปริมาตร (volumetric soil water content, θ_v) คำนวณจากปริมาตรของน้ำ (V_w) ต่อปริมาตรรวมของดิน (V_t) ดังสมการที่ (1) ส่วนความชื้นในดินโดยการชั่ง (gravimetric soil water content, θ_m) เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำ (m_w) ต่อมวลของอนุภาคดินแห้ง (m_s) ดังสมการที่ (2)

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \quad (1)$$

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \quad (2)$$

การหาปริมาณความชื้นน้ำในดินโดยปริมาตรสามารถคำนวณจากปริมาณความชื้นในดินโดยการชั่งซึ่งสะดวกกว่า (วิบูลย์, 2526) แล้วคูณด้วยความถ่วงจำเพาะปรากฏ (A_s) ดังสมการที่ (3)

$$\theta_v = A_s \theta_m \quad (3)$$

การวัดความชื้นในดินด้วย TDR

เครื่อง Time Domain Reflectometry (TDR) เป็นการวัดปริมาณน้ำในดินด้วยการพิจารณาระยะเวลาเดินทางของพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงผ่านดินมาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของดินที่ต้องการวัดความชื้น (Topp, Davis, & Annan, 1980; Jones, Wraith, & Or, 2002) โดยใช้แท่งโลหะ (rod) ของเครื่อง TDR วัดความชื้นในดินค่าของ \mathcal{E} คำนวณจากการวัดค่า transit time (t) คือเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปตามความยาว (l) ของ rods (Topp, Davis, & Annan, 1980) ดังสมการที่ (4)

$$\mathcal{E} = \left(\frac{ct}{2l} \right)^2 \quad (4)$$

เมื่อ c คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ มีค่า 3×10^8 m/s ซึ่งจากงานทดลองของ Topp, Davis, & Annan (1980) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า dielectric constant (\mathcal{E}) และ volumetric soil water content (θ_v) ได้ดังสมการที่ (5) โดยไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นรวมของดิน อุณหภูมิในดิน

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \mathcal{E} - 5.5 \times 10^{-4} \mathcal{E}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \mathcal{E}^3 \quad (5)$$

ดาวเทียม SMAP

ดาวเทียม SMAP ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NASA) ปลอยเมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2558 สำหรับใช้สำรวจเก็บข้อมูลและสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลง

ความชื้นในดินบนพื้นผิวโลก ข้อมูล SMAP (Reichle *et al.*, 2018) ได้จากการใช้ L-band radar และ L-band radiometer ร่วมกันในการตรวจวัด ข้อมูลความชื้นในดิน โดย SMAP radiometer ตรวจวัดข้อมูลการเปล่งรังสีช่วงไมโครเวฟจากพื้นผิว ~5 cm มีความละเอียด ~40 km ส่วน SMAP L-band SAR ให้ข้อมูลความละเอียด ~1 ถึง 3 km ผลลัพธ์ข้อมูล SMAP แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ผลลัพธ์ระดับที่ 1 เป็นข้อมูลจากการตรวจวัดโดยเครื่องมือบนดาวเทียม ผลลัพธ์ระดับที่ 2 มีการประมวลผลการตรวจวัดเป็นพารามิเตอร์ทางกายภาพของพื้นผิวโลกโดยอ้างอิงตำแหน่งเดียวกับระดับที่ 1 ผลลัพธ์ระดับที่ 3 เป็นการประมวลข้อมูลระดับก่อนหน้าและมีการปรับพิสัยลงบนกริดโลก ผลลัพธ์ระดับที่ 4 มีการประมวลข้อมูลความชื้นในดินและพารามิเตอร์อื่นๆ เพิ่มเติม

ด้วยแบบจำลองพื้นผิว (land surface model) (NASA, 2014)

งานวิจัยนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ระดับ 4 (L4_SM) (Reichle, 2018; Reichle *et al.*, 2019) ข้อมูลมีขนาดจุดภาพประมาณ 9 km ระยะเวลาที่รอประมวลผล (latency) น้อยกว่า 7 วัน มีการบันทึกข้อมูลเป็นราย 3 ชม. ตามช่วงเวลา (time series) มีค่าความชื้นในดิน 3 ระดับชั้น คือ (i) ความชื้นในดินที่พื้นผิว (surface soil moisture) เฉลี่ย 0-10 cm แนวตั้งกับผิวดิน (ii) ความชื้นในดินในเขตราก (root zone soil moisture) เฉลี่ย 0-100 cm แนวตั้งกับผิวดิน และ (iii) ความชื้นทั้งหน้าตัดดิน (profile soil moisture) เฉลี่ย 0-200 cm (Reichle *et al.*, 2014) สามารถดาวน์โหลดฟรีได้จาก www.earthdata.nasa.gov/SMAP หลังจากวันที่ดาวเทียมสำรวจประมาณ 3 วัน

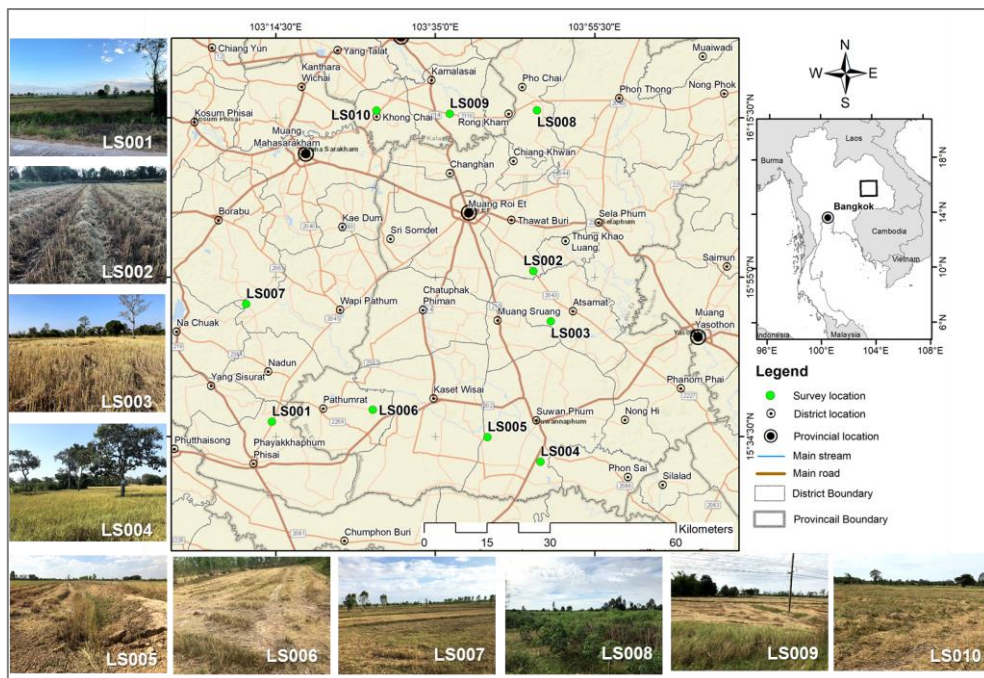


Figure 1 Study area located in Roi Et, Kalasin, and Mahasarakham

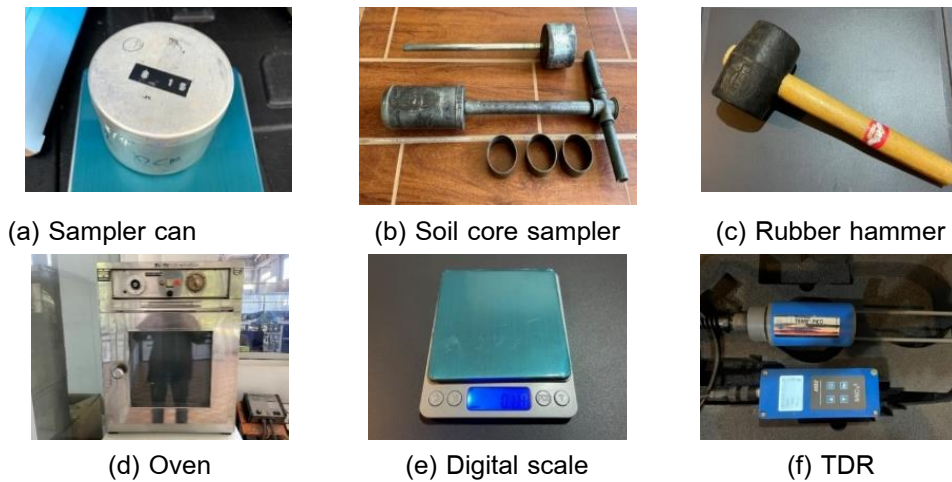


Figure 2 Instruments for soil sampling and soil water content measurements in laboratory and in field

วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานส่วนแรกเป็นการทวนสอบการวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR โดยการเก็บตัวอย่างดินวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความชื้นในดินโดยปริมาตร พร้อมกับตรวจวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR (Abdullah *et al.*, 2018) อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่าง (Figure 3) ประกอบด้วย (a) กระป๋องเก็บตัวอย่างดิน (b) Soil core sampler (c) ค้อนยาง (d) เตาอบตัวอย่างดิน และ (e) เครื่องชั่งดิจิตอล ส่วนเครื่องวัดความชื้นในดิน TDR (Figure 3(f)) ใช้เครื่องยี่ห้อ IMKO รุ่น HD2 และ Soil moisture probe รุ่น TRIME-PICO 64 ที่มีหัวโพรบ ยาว 15 cm ส่วนที่สองเป็นรวบรวมข้อมูลดาวเทียม SMAP และการวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR ข้อมูลความชื้นในดินจากดาวเทียม SMAP ที่ดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ EarthData โดยกำหนดขอบเขตตามพิกัดภูมิศาสตร์ครอบคลุมพื้นที่ของจุดตรวจวัดด้วยเครื่อง TDR และพิจารณาข้อมูลรายสามชั่วโมงระหว่างวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2564 ส่วนข้อมูลความชื้นในดินจาก TDR ได้สำรวจในพื้นที่ศึกษา (Figure 1) จำนวน 10 จุด (จุดละ 3-5 ซ้ำ โดย TDR วัดความชื้นเฉลี่ย 15 cm จากผิวดิน) จำนวน 4 ครั้ง รวม 264 ค่า โดยครั้งที่ 1 ตรวจวัดวันที่ 27-29 พฤศจิกายน 2563

ครั้งที่ 2 วันที่ 29 ธันวาคม 2563 ครั้งที่ 3 วันที่ 3 เมษายน 2564 และครั้งที่ 4 วันที่ 18 มิถุนายน 2564 โดยการสำรวจแต่ละครั้งเว้นช่วงเวลาใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาที่ศึกษา (พ.ย. 2563 ถึง มิ.ย. 2564) การเปรียบเทียบความแตกต่างของความชื้นในดิน พิจารณาจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) (สมการที่ (6)) โดย O_i เป็นความชื้นในดินตรวจวัดจาก TDR และ P_i เป็นความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม SMAP ที่ตำแหน่งและช่วงเวลาเดียวกัน

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (6)$$

ผลและวิจารณ์

การทวนสอบการวัดความชื้นในดินด้วย TDR

ผลการทวนสอบการวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR แสดงใน Figure 3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินโดยปริมาตรจากการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (แกนนอน) และความชื้นในดินจากการวัดด้วย TDR ในสนาม (แกนตั้ง) คำนวณค่า $r^2=0.958$ และ $RMSE=0.027 \text{ m}^3/\text{m}^3$ การวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

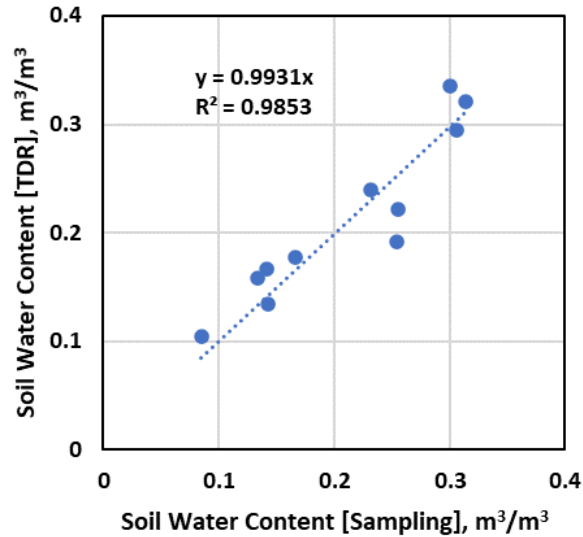


Figure 3 Validation of soil water content from TDR field measurement by comparing with oven-dried sampling

ความชื้นในดินจากการวัดด้วย TDR

จาก Table 2 คือค่าเฉลี่ยและ standard error (TDR±SE) ของความชื้นในดินจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง TDR จำนวน 4 ครั้ง จำนวน 10 จุดตรวจวัด (LS001-LS010) พบว่า ครั้งที่ 1 (พฤศจิกายน) มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($0.244 \pm 0.013 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Table 2) โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด ($0.027 \pm 0.007 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Table 2) ในครั้งที่ 3 (เมษายน) ทั้งนี้ พบว่าความชื้นในดินมีแนวโน้มลดลงจากเดือนพฤศจิกายน (ครั้งที่ 1) ต่อเนื่องไปเดือนธันวาคม (ครั้งที่ 2) และมีค่าต่ำสุดในเดือนเมษายน (ครั้งที่ 3) และเริ่มกลับมาสูงขึ้นในเดือนมิถุนายน (ครั้งที่ 4) เมื่อพิจารณาแยกตามจุดตรวจวัด จุด LS009 มีความชื้นในดินสูงกว่าจุดอื่นทุกครั้งที่ตรวจวัดเนื่องจากเป็นพื้นที่นาเขตโครงการชลประทานมีน้ำทั้งปีโดยมีค่าเฉลี่ย $0.273 \pm 0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 2) ส่วนความชื้นในดินจุด LS008 มีค่าต่ำกว่าจุดอื่นเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากสภาพเป็นไร่มันสำปะหลังและอยู่ในโซนที่สูงโดยมีค่าเฉลี่ย $0.079 \pm 0.019 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 2)

ความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม SMAP

จาก Figure 4 แสดงข้อมูลความชื้นในดินของดาวเทียม SMAP รายสามชั่วโมงที่ดาวินโหลดจากเว็บไซต์ EarthData เริ่มต้นวันที่ 1 มกราคม

2564 ถึง 30 มิถุนายน 2564 มีค่าความชื้นในดิน 3 ระดับ คือ (i) ความชื้นในดินที่พื้นผิว (surface soil moisture) แสดงเป็นจุดสีดำ (ii) ความชื้นในดินในเขตราก (rootzone soil moisture) เป็นจุดสีเขียว และ (iii) ความชื้นทั้งหน้าตัดดิน (profile soil moisture) จุดสีเหลือง ข้อมูลความชื้นในดินทั้ง 3 ระดับ มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงในทิศทางเดียวกันในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) แต่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินมากขึ้นในช่วงปลายฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน (เมษายน-มิถุนายน) ตามอิทธิพลจากฝนตกโดยเฉพาะความชื้นที่ระดับ surface จากนั้นเมื่อพิจารณาความชื้นในดินเฉลี่ยรายเดือนตาม Table 3 พบว่าที่ระดับ rootzone มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับความชื้นในดินระดับอื่นโดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ $0.269 \text{ m}^3/\text{m}^3$ รองลงมาเป็นระดับ profile เฉลี่ยเท่ากับ $0.265 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 3) และต่ำสุดที่ระดับ surface เนื่องจากที่ระดับ surface มีการระเหยสูงกว่าชั้นอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ย $0.206 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 3) เมื่อพิจารณาความชื้นในดินเฉลี่ยเชิงพื้นที่พบว่าในจุด LS004 และ LS005 มีค่าเฉลี่ยรวมทุกเดือนสูงกว่าทุกจุดเนื่องจากเป็นผืนนาแปลงใหญ่มีการขุดคูน้ำลอบรอบและมีบ่อน้ำกระจายทั่วไปในพื้นที่ โดยมีค่าประมาณ $0.283 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 3) เมื่อพิจารณาความชื้นในดินเฉลี่ยเชิงเวลา พบว่าในเดือน

พฤศจิกายนความชื้นในดินเฉลี่ยสูงสุดที่ระดับ surface อยู่ที่ $0.307 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 3) โดยความชื้นในดินเฉลี่ยจะเริ่มลดลงจนต่ำสุดในเดือนมีนาคม ($0.134 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Table 3) และเริ่มกลับมามีแนวโน้มสูงขึ้นในเดือนเมษายนต่อเนื่องจนถึงเดือนมิถุนายน

ความชื้นในดินจากเครื่อง TDR เทียบกับ SMAP

การเปรียบเทียบความชื้นในดินที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง TDR จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับความชื้นในดินที่ระดับชั้น surface ของดาวเทียม SMAP เนื่องจาก ข้อมูลทั้งสองพิจารณาความชื้นในดินที่ระยะความลึกจากผิวดินใกล้เคียงกัน โดย TDR วัดความชื้นในดินช่วง 0-15 cm ส่วน surface SMAP พิจารณาที่ 0-10 cm ใน Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินโดยปริมาตรจากการวัดด้วย TDR ในสนาม (แกนนอน) และความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม SMAP ที่ระดับชั้น surface (แกนตั้ง) คำนวณค่า $r^2=0.752$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในระดับดีพอใช้

จากการเปรียบเทียบความชื้นในดินที่วัดตรวจด้วย TDR กับข้อมูลดาวเทียม SMAP ใน Table 2 เมื่อนำค่า RMSE มาพิจารณาตามเวลาพบว่า การสำรวจในครั้งที่ 2 มีค่า RMSE น้อยที่สุดคือ $0.094 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Table 2) และมีค่าสูงสุดในครั้งที่ 4 ($0.141 \text{ m}^3/\text{m}^3$) โดยในครั้งที่ 3 และครั้งที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับครั้งที่ 2 จากนั้นเมื่อนำค่า RMSE มาพิจารณาเชิงพื้นที่ที่สามารถแบ่งจุดสำรวจได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ค่า RMSE ต่ำกว่า $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$: มี 5 จุด คือ LS001 LS002 LS003 LS008 และ LS010 กลุ่มที่ 2 ค่า RMSE อยู่ระหว่าง $0.10-0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$: มี 3 จุด คือ LS006 LS007 และ LS009 กลุ่มที่ 3 ค่า RMSE มากกว่า 0.15 มี 2 จุด คือ: LS004 และ LS005

เมื่อพิจารณาค่า RMSE (Table 2) ในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ร่วมกัน สามารถแบ่งออกได้ 4 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 (RMSE น้อยกว่าหรือใกล้เคียง $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$) มี 10 ค่า จากการตรวจวัดครั้งที่ 1 จำนวน 3 จุด (LS002, LS006, LS010)

ครั้งที่ 2 จำนวน 3 จุด (LS001, LS006, LS010) ครั้งที่ 3 จำนวน 1 จุด (LS007) และครั้งที่ 4 จำนวน 3 จุด (LS001, LS007, LS008) กลุ่มที่ 2 (RMSE $0.05-0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$) มี 15 ค่า จากการตรวจวัดครั้งที่ 1 จำนวน 4 จุด (LS001, LS003, LS004, LS009) ครั้งที่ 2 จำนวน 3 จุด (LS002 LS003, LS004) ครั้งที่ 3 จำนวน 6 จุด คือ (LS001, LS002, LS003, LS006, LS008, LS010) ครั้งที่ 4 จำนวน 3 จุด คือ (LS003, LS010) กลุ่มที่ 3 (RMSE $0.10-0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$) มี 9 ค่า จากการวัดครั้งที่ 1 จำนวน 2 จุด คือ (LS005, LS008) ครั้งที่ 2 จำนวน 4 จุด คือ (LS005, LS007, LS008, LS009) ครั้งที่ 3 จำนวน 1 จุด (LS009) ครั้งที่ 4 จำนวน 2 จุด (LS002, LS009) กลุ่มที่ 4 (RMSE มากกว่า $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$) มี 6 ค่า จากการวัดครั้งที่ 1 จำนวน 1 จุด (LS007) ครั้งที่ 3 จำนวน 2 จุด คือ (LS004, LS005) ครั้งที่ 4 จำนวน 3 จุด (LS004, LS005, LS006)

ข้อมูลความชื้นในดินจากข้อมูลดาวเทียม มีกระบวนการตรวจสอบความน่าเชื่อถืออย่างเป็นระบบ (Loew *et al.*, 2017; Gruber *et al.*, 2020) ค่า RMSE ของจุดตรวจวัดในกลุ่มพื้นที่ที่ 1 ซึ่งมีค่า RMSE น้อยกว่า $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ให้ผลการประเมินสอดคล้องกับงานศึกษาที่ผ่านมา (Cosh *et al.*, 2015; Chan *et al.*, 2016; Colliander *et al.*, 2020) โดยพบว่าค่า RMSE ต่ำช่วงปลายฤดูฝน (พฤศจิกายน-ธันวาคม) เป็นสภาพที่ดินยังมีความชื้นสะสมสูงและไม่มีฝนตกระหว่างการตรวจวัด นอกจากนี้ ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่เพิ่งเก็บเกี่ยวข้าว ในพื้นที่ยังมีตอซังปกคลุมผิวดิน มีผลให้ลดการถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศระหว่างวัน ในขณะที่ค่า RMSE สูงช่วงต้นฤดูฝน (มิถุนายน) เนื่องจากมีการไถพรวนกำจัดตอซังและวัชพืชเพื่อทำนาทำให้ไม่มีสิ่งปกคลุมดินและมีอิทธิพลจากฝนตก อีกทั้งในพื้นที่มีการทำนาแต่ละแปลงไม่พร้อมกัน โดยบางจุดตรวจวัดมีการทำนาไปแล้วในขณะที่แปลงข้างเคียงยังไม่ได้ทำ เมื่อตรวจวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR จึงมีค่าที่มีความแปรปรวนสูงกว่า

Table 2 Comparison of soil water content between SMAP satellite retrieval and TDR measurement

	Site	28 Nov 2020	29 Dec 2020	3 Apr 2021	18 Jun 2021	Average
SMAP	LS001	0.238	0.178	0.076	0.256	0.187
	LS002	0.257	0.185	0.093	0.229	0.191
	LS003	0.247	0.178	0.099	0.233	0.189
	LS004	0.354	0.291	0.186	0.345	0.3
	LS005	0.364	0.299	0.185	0.352	0.297
	LS006	0.272	0.207	0.095	0.281	0.223
	LS007	0.271	0.203	0.099	0.202	0.194
	LS008	0.197	0.116	0.102	0.254	0.167
	LS009	0.212	0.133	0.104	0.265	0.171
	LS010	0.215	0.136	0.109	0.263	0.184
	Average	0.261	0.192	0.114	0.268	0.211
TDR	LS001	0.303±0.014	0.179±0.014	0.005±0.003	0.254±0.012	0.185±0.026
	LS002	0.292±0.006	0.256±0.011	0.029±0.009	0.075±0.012	0.163±0.026
	LS003	0.321±0.005	0.245±0.009	0.029±0.013	0.307±0.012	0.225±0.027
	LS004	0.308±0.015	0.216±0.006	0.002±0.002	0.116±0.016	0.169±0.027
	LS005	0.222±0.013	0.146±0.011	0.005±0.005	0.184±0.017	0.135±0.020
	LS006	0.268±0.022	0.255±0.014	0.028±0.028	0.058±0.003	0.164±0.026
	LS007	0.078±0.010	0.085±0.007	0.044±0.008	0.208±0.023	0.104±0.016
	LS008	0.086±0.009	0.005±0.005	0.020±0.009	0.206±0.008	0.079±0.019
	LS009	0.308±0.025	0.256±0.014	0.148±0.074	0.414±0.007	0.273±0.026
	LS010	0.243±0.012	0.125±0.017	0.000±0.000	0.167±0.020	0.141±0.021
	Average	0.244±0.013	0.177±0.012	0.027±0.007	0.185±0.014	0.161±0.008
RMSE	LS001	0.071	0.028	0.071	0.024	0.054
	LS002	0.036	0.075	0.067	0.156	0.095
	LS003	0.075	0.069	0.075	0.077	0.074
	LS004	0.055	0.076	0.184	0.231	0.153
	LS005	0.144	0.154	0.18	0.171	0.164
	LS006	0.049	0.055	0.083	0.223	0.124
	LS007	0.194	0.118	0.058	0.046	0.119
	LS008	0.112	0.111	0.084	0.052	0.093
	LS009	0.108	0.127	0.114	0.149	0.122
	LS010	0.037	0.036	0.109	0.105	0.078
	Average	0.099	0.094	0.109	0.141	0.112

Note: SMAP ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) is soil water content retrieved from the SMAP satellite; TDR ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) is soil water content measured using TDR showing mean and standard error (MEAN±SE) values; RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) is the root mean square of errors between SMAP and TDR.

Table 3 Monthly mean of SMAP soil water content at surface, rootzone, and profile

	Site	Nov 2020	Dec 2020	Jan 2021	Feb 2021	Mar 2021	Apr 2021	May 2021	Jun 2021	Average
Surface	LS001	0.288	0.207	0.139	0.114	0.112	0.17	0.196	0.248	0.184
	LS002	0.288	0.211	0.146	0.137	0.127	0.176	0.193	0.224	0.188
	LS003	0.285	0.206	0.149	0.144	0.134	0.175	0.200	0.232	0.191
	LS004	0.403	0.309	0.249	0.231	0.209	0.241	0.275	0.337	0.282
	LS005	0.409	0.318	0.253	0.230	0.209	0.241	0.272	0.335	0.283
	LS006	0.312	0.23	0.165	0.138	0.129	0.177	0.203	0.266	0.203
	LS007	0.320	0.226	0.163	0.149	0.136	0.195	0.216	0.235	0.205
	LS008	0.245	0.144	0.103	0.129	0.112	0.145	0.171	0.224	0.159
	LS009	0.260	0.168	0.126	0.153	0.126	0.158	0.188	0.249	0.179
	LS010	0.264	0.172	0.132	0.156	0.134	0.161	0.189	0.247	0.182
	Average	0.307	0.219	0.163	0.158	0.143	0.184	0.21	0.26	0.206
Rootzone	LS001	0.330	0.260	0.219	0.202	0.191	0.215	0.247	0.278	0.243
	LS002	0.324	0.257	0.221	0.212	0.207	0.225	0.242	0.254	0.243
	LS003	0.328	0.257	0.222	0.214	0.211	0.225	0.246	0.260	0.245
	LS004	0.433	0.360	0.315	0.296	0.278	0.291	0.329	0.372	0.334
	LS005	0.436	0.365	0.319	0.297	0.279	0.293	0.328	0.370	0.336
	LS006	0.359	0.293	0.251	0.232	0.218	0.238	0.269	0.310	0.271
	LS007	0.372	0.293	0.25	0.235	0.227	0.257	0.279	0.291	0.276
	LS008	0.309	0.231	0.194	0.196	0.196	0.208	0.237	0.258	0.229
	LS009	0.334	0.26	0.222	0.223	0.222	0.232	0.26	0.292	0.256
	LS010	0.336	0.262	0.225	0.225	0.226	0.236	0.259	0.291	0.258
	Average	0.356	0.284	0.244	0.233	0.226	0.242	0.270	0.298	0.269
Profile	LS001	0.313	0.249	0.212	0.197	0.187	0.208	0.237	0.265	0.234
	LS002	0.337	0.265	0.227	0.216	0.211	0.229	0.248	0.261	0.249
	LS003	0.340	0.265	0.227	0.218	0.214	0.229	0.251	0.266	0.251
	LS004	0.426	0.356	0.313	0.295	0.278	0.289	0.326	0.367	0.331
	LS005	0.430	0.362	0.317	0.296	0.278	0.291	0.325	0.366	0.333
	LS006	0.341	0.281	0.244	0.226	0.214	0.232	0.260	0.296	0.262
	LS007	0.354	0.282	0.243	0.229	0.222	0.248	0.269	0.280	0.266
	LS008	0.294	0.224	0.19	0.191	0.191	0.202	0.228	0.247	0.221
	LS009	0.318	0.252	0.218	0.218	0.217	0.227	0.251	0.279	0.248
	LS010	0.320	0.254	0.220	0.220	0.221	0.230	0.250	0.279	0.249
	Average	0.347	0.279	0.241	0.231	0.223	0.239	0.265	0.291	0.265

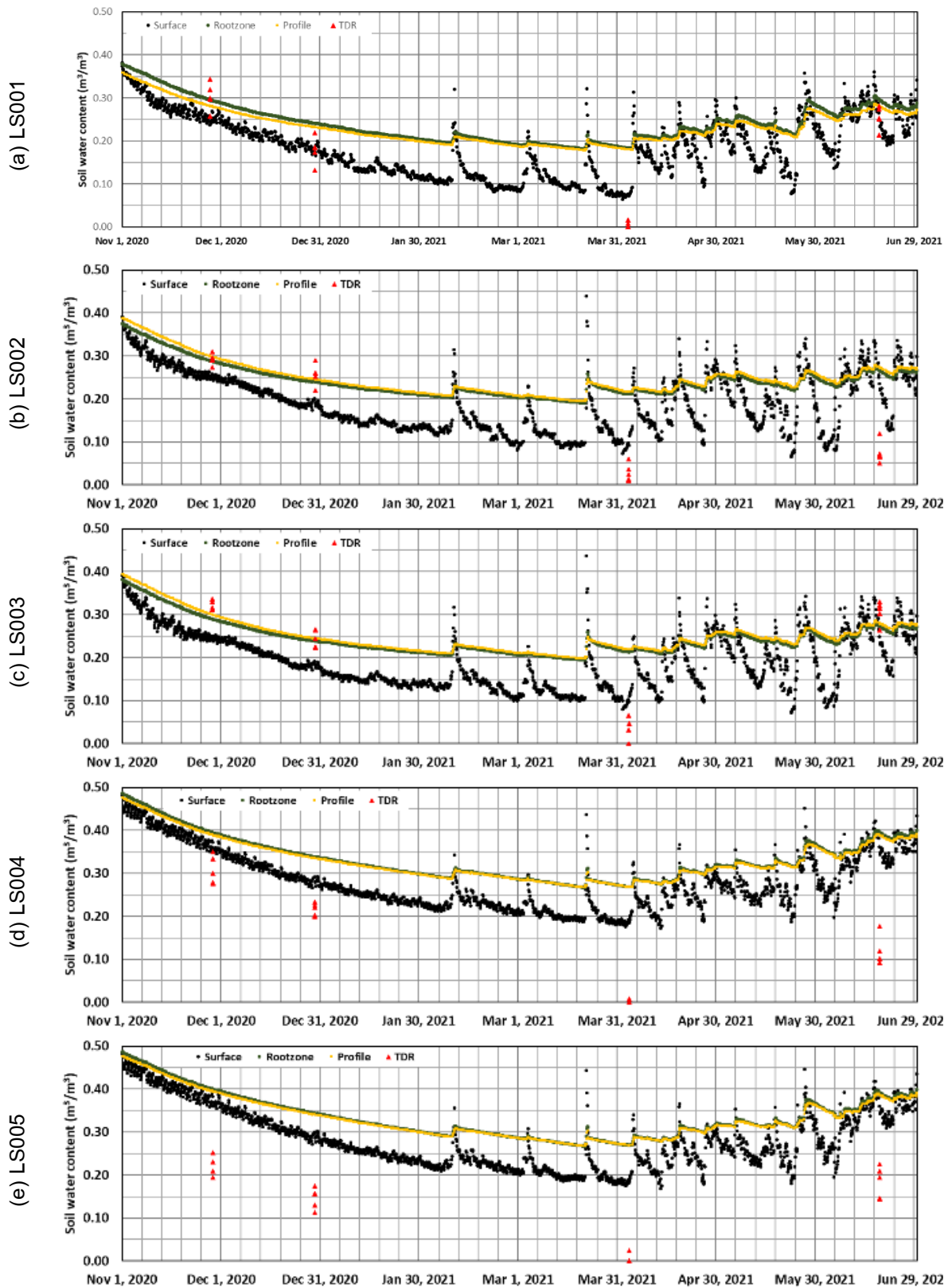


Figure 4 Soil water content at 10 sites measured using TDR and retrieved from 3-h SMAP data at surface, rootzone, and profile from 1 November 2020 to 30 June 2021 (1)

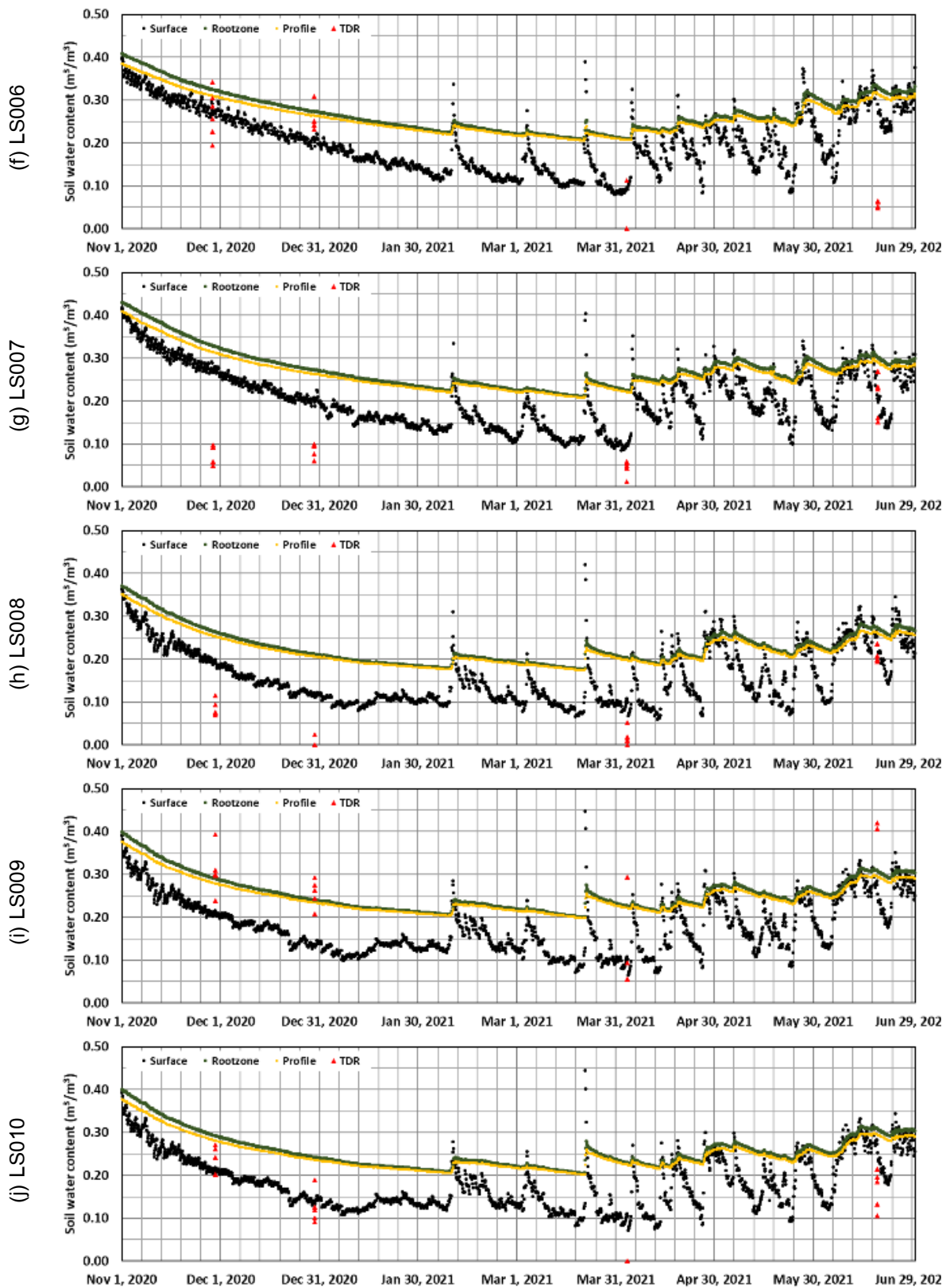


Figure 4 Soil water content at 10 sites measured using TDR and retrieved from 3-h SMAP data at surface, rootzone, and profile from 1 November 2020 to 30 June 2021 (2)

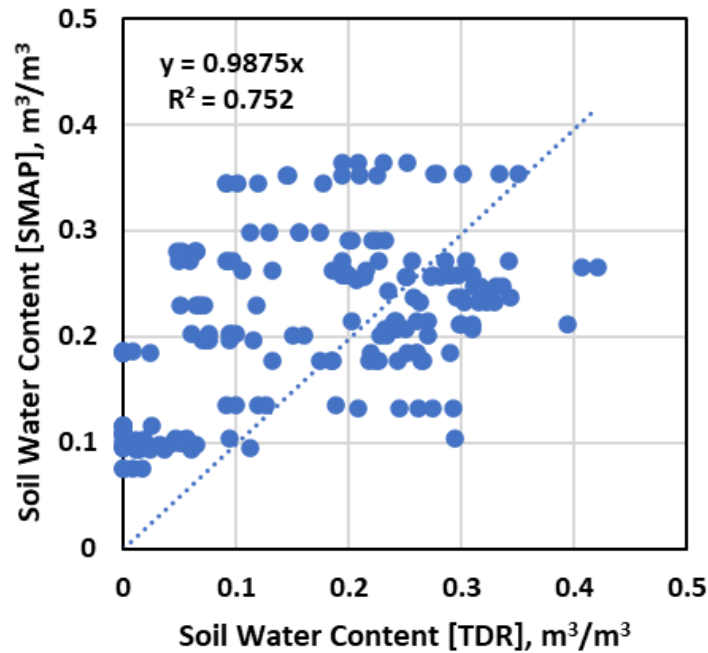


Figure 5 Soil water content compare between SMAP and TDR

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ($r^2=0.958$) และความชื้นในดินจากข้อมูล SMAP มีความสัมพันธ์ดีพอใช้ ($r^2=0.752$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่อง TDR โดยการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินทั้งจากการวัดด้วยเครื่อง TDR และจากดาวเทียม SMAP มีความสอดคล้องกับฤดูกาล โดยมีปริมาณความชื้นสูงในช่วงปลายฤดูฝน (พฤศจิกายน) จากนั้นลดลงจนถึงช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน และกลับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเริ่มเข้าสู่ฤดูฝน (มิถุนายน) ความแตกต่างของความชื้นในดินระหว่างการวัดด้วยเครื่อง TDR กับข้อมูล SMAP ที่พื้นผิวมีค่า RMSE เฉลี่ยรวม 0.112 m^3/m^3 โดยส่วนใหญ่มีค่า RMSE น้อยกว่า 0.10 m^3/m^3 และในช่วงปลายฤดูฝนขณะที่ดินยังมีความชื้นสูงและไม่มีฝนตก ค่า RMSE ของบางจุดที่ตรวจวัดมีค่าน้อยกว่า 0.05 m^3/m^3 ซึ่งใกล้เคียงกับข้อกำหนดของเครื่องมือดาวเทียม (0.04 m^3/m^3) (NASA, 2014)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) โดยเป็นผลงานส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยการจัดทำแผนที่ระดับประเทศสภาพการขาดน้ำในดินโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมแบบใกล้เวลาปัจจุบันภายใต้แผนงานวิจัยการวิจัยและพัฒนาระบบสารสนเทศเชิงพื้นที่เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการฝนหลวง

เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา. (2541). *พจนานุกรมปฐพีวิทยา*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิบูลย์ บุญยชรโรกุล. (2526). *หลักการชลประทาน*. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สุเจนต์ พรหมเหมื่อน, จอมภพ แววศักดิ์, ศุภกร กตาทิการกุล, และสุทธิษา กอนเรือง. (2561). การศึกษาความชื้นของดินโดยอาศัยข้อมูลการรับรู้จากระยะไกลและการตรวจวัดภาคพื้นดินด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเอง (กรณีศึกษาจังหวัดพัทลุง). *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 21(3), 224-232.
- อุมาพร จารุสมบัติ. (2557). ดาวเทียมดวงใหม่ตรวจวัดความชื้นของดิน. *วารสารสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 42(190), 16-21.
- เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. (2559). การเคลื่อนที่ของน้ำในดินและการประยุกต์สำหรับการระบายน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abdullah, N. H. H., Kuan, N. W., Ibrahim, A., Ismail, B. N., Majid, M. R. A., Ramli, R., & Mansor, N. S. (2018). Determination of soil water content using time domain reflectometer (TDR) for clayey soil. *AIP Conference Proceedings*, 2020(1) , 020016.
- Arthur Endsley, K., Kimball, J. S., Reichle, R. H., & Watts, J. D. (2020). Satellite Monitoring of Global Surface Soil Organic Carbon Dynamics Using the SMAP Level 4 Carbon Product. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(12) , e2020JG006100.
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water*, 9(2).
- Chan, S. K., Bindlish, R., O'Neill, P. E., Njoku, E., Jackson, T., Colliander, A., ... Kerr, Y. (2016) . Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8), 4994-5007.
- Colliander, A., Jackson, T. J., Berg, A., Bosch, D. D., Caldwell, T., Chan, S., ... Yueh, S. H. (2020) . Effect of Rainfall Events on SMAP Radiometer-Based Soil Moisture Accuracy Using Core Validation Sites. *Journal of Hydrometeorology*, 21(2) , 255-264.
- Cosh, M. H., Coopersmith, E. J., Petersen, W. A., Prueger, J., & Niemeier, J. J. (2015). Soil Moisture Model Calibration and Validation: An ARS Watershed on the South Fork Iowa River. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 1087-1101.
- Dandridge, C., Fang, B., & Lakshmi, V. (2020). Downscaling of SMAP Soil Moisture in the Lower Mekong River Basin. *Water*, 12(1), 56.
- Hajj, M. E., Baghdadi, N., Zribi, M., Fernández, N. R., Wigneron, J. P., Al-Yaari, A., ... Calvet, J. C. (2018). Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at Sites in Southwestern France. *Remote Sensing*, 10(4).
- Rajasekaran, E., Das, N. N., Poulsen, C., Behrangi, A., Swigart, J., Svoboda, M., ... Entin, J. (2018). SMAP Soil Moisture Change as an Indicator of Drought Conditions. *Remote Sensing*, 10(5), 788.

- Gruber, A., De Lannoy, G., Albergel, C., Al-Yaari, A., Brocca, L., Calvet, J.C., ... Wagner, W. (2020). Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors? *Remote Sensing of Environment*, 244, 111806.
- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press, San Diego. *Environmental soil physics. Academic Press, San Diego.*
- Jones, S. B., Wraith, J. M., & Or, D. (2002). Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, 16(1), 141-153.
- Kellner, O., Niyogi, D., Lei, M., & Kumar, A. (2011). The role of anomalous soil moisture on the inland reintensification of Tropical Storm Erin (2007). *Natural Hazards*, 63(3), 1573-1600.
- Loew, A., Bell, W., Brocca, L., Bulgin, C. E., Burdanowitz, J., Calbet, X., ... Verhoelst, T. (2017). Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 779-817.
- Mladenova, I. E., Bolten, J. D., Crow, W. T., Sazib, N., Cosh, M. H., Tucker, C. J., & Reynolds, C. (2019). Evaluating the Operational Application of SMAP for Global Agricultural Drought Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 3387-3397.
- NASA. (2014). *SMAP Handbook - Soil Moisture Active Passive: Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space*. USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA) Washington.
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 36-56.
- Reichle, L. M., Epstein, H. E., Bhatt, U. S., Reynolds, M. K., & Walker, D. A. (2018). Spatial Heterogeneity of the Temporal Dynamics of Arctic Tundra Vegetation. *Geophysical Research Letters*, 45(17), 9206-9215.
- Reichle, R., G. De Lannoy, R. D. Koster, W. T. Crow, J. S. Kimball, and Q. Liu. 2018. *SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Geophysical Data*, Version 4. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Reichle, R., Koster, R., De Lannoy, G., Crow, W., & Kimball, J. (2014). *Level 4 Surface and Root Zone Soil Moisture (L4_SM) Data Product In: GMAO Office Note No. 6 (Initial Version 1.3)*.
- Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J. M., Kimball, J. S., ... Walker, J. P. (2019). Version 4 of the SMAP Level-4 Soil Moisture Algorithm and Data Product. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3106-3130.

Srivastava, P. K., Petropoulos, G., & Y. H. Kerr (Eds.). (2016). *Satellite Soil Moisture Retrieval: Techniques and Applications*. Elsevier. Netherlands: Amsterdam.

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.