



## การพัฒนานวัตกรรมในการวัดและจัดทำแผนที่ความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP

### Development of soil surface moisture measurement and mapping innovation from SMAP satellites

แพรวา วิจิตรธรรณสาร<sup>1\*</sup>, ณัฐริณี เอี้ยวรัตนวดี<sup>1</sup>, อนุเผ่า ออบแพทย์<sup>1</sup>

Parewa Vijitthanasarn<sup>1\*</sup>, Natharinee Aieorattanaweedee<sup>1</sup>, Anuphao Aobpaet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup>Department of civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

\*Corresponding author: Tel: +66-8-5689-9903, E-mail: [parewa.v@ku.th](mailto:parewa.v@ku.th)

#### บทคัดย่อ

การพัฒนานวัตกรรมในการวัดและจัดทำแผนที่ความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP (Soil Moisture Active Passive) มีวัตถุประสงค์ในการจัดทำแผนที่ความชื้นผิวดินด้วยข้อมูลจากดาวเทียม SMAP โดยเริ่มจากการพัฒนาเครื่องมือที่เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของการจัดทำระบบอัตโนมัติที่ช่วยลดระยะเวลาการทำงานตั้งแต่การดาวน์โหลดข้อมูล การประมวลผลข้อมูลรายเดือน และการจัดทำแผนที่ออนไลน์ (Web Map Service, WMS) ในรูปแบบของแผนที่อนุกรมเวลา (Time Series) ตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 ถึง สิงหาคม ปี พ.ศ. 2563 โดยนำภาพถ่ายดาวเทียม SMAP ซึ่งเป็นการตรวจวัดความชื้นของผิวดินด้วยเทคนิค L-band radar และ radiometer ร่วมกับการประมวลผลรวมกันระหว่างดาวเทียม Sentinel-1 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ความละเอียดที่ 1 km โดยการดาวน์โหลดข้อมูลให้เป็นแบบอัตโนมัติ จากนั้นทำการประมวลผลค่าความชื้นด้วยชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ไพธอนสคริปต์ (Python Script) ร่วมกับไลบรารี (library) ข้อมูลเชิงพื้นที่ชื่อ “The Geospatial Data Abstraction Library (GDAL)” หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับข้อมูลความชื้นผิวดินจากอุปกรณ์ IoT (Internet of Thing) โดยใช้ขอบเขตพื้นที่การศึกษาคือจังหวัดสุโขทัยและจังหวัดกำแพงเพชร และนำค่าที่ได้จากวิธีทั้งสองนี้มาเปรียบเทียบกัน ผลจากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP และค่าความชื้นจากภาคสนาม (IoT) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.04 ถึง 0.1 และเนื่องการเก็บข้อมูลจากภาคสนาม (IoT) นั้นเป็นการเก็บข้อมูลค่าความชื้นบนผิวดินเพียงตำแหน่งเดียวที่เครื่องวัดทำการติดตั้งอยู่ ทำให้ได้ค่าความชื้นผิวดินมาเพียงแค่นั้น ๆ แต่การเก็บค่าจากการใช้ภาพถ่ายดาวเทียม SMAP นั้นเป็นการเก็บข้อมูลในพื้นที่ขนาด 1 km ทำให้ค่าความชื้นผิวดินที่ได้มานั้นจะมีการเฉลี่ยค่าความชื้นของสิ่งอื่น ๆ ที่อยู่รอบจุดภาพมาด้วย ดังนั้นขนาดของพื้นที่ในการใช้งานจึงส่งผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพสูงสุดของข้อมูล แต่จากการทดสอบข้อมูลของดาวเทียม SMAP นั้น มีการกระจายตัวปกติที่ดีกว่าข้อมูลจากภาคสนาม (IoT) จึงทำให้ผลจากคำนวณค่าสหสัมพันธ์มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และสามารถนำข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้

คำสำคัญ: นวัตกรรม, ความชื้นผิวดิน, ดาวเทียม SMAP

#### Abstract

Development of soil surface moisture measurement and mapping innovation from SMAP (Soil Moisture Active Passive) satellites is aimed at mapping the soil moisture content with SMAP satellite data. It started with the development of an essential component tool for creating an automated system that reduces the working time since downloading the Monthly data, processing, and online mapping (Web Map Service, WMS) in the form of time series maps (Time Series) from January 2018 to August 2020. Using SMAP satellite imagery, surface soil moisture is measured using L-band radar and radiometer techniques in conjunction with Sentinel-1 satellites to obtain data at a resolution of 1 kilometre by automatically downloading the data. The surface soil moisture values are then extracted and processed using a series of command developed using Python Script in conjunction with the Geospatial Data Abstraction Library (GDAL). The soil moisture data obtained from the IoT (Internet of Thing) device

Received: March 28, 2021

Revised: May 5, 2021

Accepted: May 5, 2021

Available online: July 12, 2021

in the study area of Sukhothai and Kamphaeng Phet Province. Then, we compare the values obtained from these two methods. The study results showed that the correlation coefficient between SMAP surface soil moisture and field soil moisture (IoT) values were 0.04 to 0.1. The field data collection is the point-based measurement, so the soil moisture is just on that point. On the other hand, the surface soil moisture from SMAP satellite imagery collects data in an area of 1 square kilometre. As a result, the obtained surface soil moisture is an average of many other pixel objects. Therefore, the coverage area has an immense effect on the maximum performance of the SMAP data. Nevertheless, testing the data of SMAP satellites has better normal distribution than data from the field (IoT), thus making the result of the correlation calculation even more reliable. Furthermore, we can use soil surface moisture data from SMAP satellite to be applied in other related fields.

Keywords: Innovation, Surface soil moisture, SMAP satellite

## 1 บทนำ

ความชื้นผิวดินหมายถึงปริมาณน้ำหรือไอน้ำที่มีอยู่บนผิวดิน โดยโครงสร้างของดินที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณน้ำหรือไอน้ำที่สะสมอยู่บนผิวดิน ความชื้นผิวดินมีความสำคัญและมีผลต่อการระเหยของน้ำ การคายน้ำของพืช ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ความชื้นผิวดินยังส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นดินและบรรยากาศ การระเหยน้ำจากดินนั้นต้องใช้พลังงานมากและมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในพื้นที่นั้น ๆ (อุมาพร, 2557) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาดาวเทียม SMAP หรือ Soil Moisture Active and Passive ซึ่งเป็นดาวเทียมที่มีภารกิจในการตรวจสอบสภาพแวดล้อมของ NASA (The National Aeronautics and Space Administration) โดยใช้คลื่น L-band ที่มีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เท่ากับ 21 cm และมีความถี่ (f) อยู่ที่ 1.21 GHz ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรเมื่อวันที่ 31 มกราคม ปี พ.ศ. 2558 เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนดาวเทียมถูกออกแบบมาเพื่อวัดค่าการปลดปล่อยและการสะท้อนกลับพื้นผิว (Surface emission and backscatter) ซึ่งจะเป็นการสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความชื้นผิวดินและการละลายและแข็งตัวของน้ำบนพื้นผิวโลก และยังสามารถสร้างแบบจำลองของผิวน้ำ (Surface Water) ฟลักซ์ของคาร์บอน (Carbon Fluxes) สภาพอากาศ และยังสามารถใช้งานทางด้านการเกษตร (Entekhabi et al., 2010) ซึ่งยังรวมไปถึงข้อมูลความชื้นผิวดินของพื้นที่ประเทศไทยก็สามารถเข้าถึงได้เช่นกัน แต่ดาวเทียม SMAP นั้นจะสามารถตรวจวัดความชื้นผิวดินได้ประมาณ 5 cm จากผิวดิน (Jackson et al., 1997; Escorihuela et al., 2010) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ความละเอียดที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ SMAP L2\_SM\_SP: SoilMoisture (Sentinel Radar + Radiometer) มีความละเอียดในการตรวจวัดอยู่ที่ 1 Km<sup>2</sup>ซึ่งในความละเอียดระดับนี้นั้นยังไม่มีเครื่องมือใดที่สามารถประมวลผลค่าพิกัดของภาพถ่ายดาวเทียมให้ตรงกับค่าพิกัดจริงได้ ต่างจากภาพถ่ายดาวเทียม SMAP ที่ความละเอียด 3 Km<sup>2</sup>ที่ในปัจจุบันมีข้อมูลให้บริการอยู่แล้ว ผู้วิจัยจึงต้องมีส่วนในการจัดทำข้อมูลดาวเทียม SMAP ที่ความละเอียด 1 Km<sup>2</sup> ขึ้นมาเองโดยใช้ไลบรารีของ Geospatial Data Abstraction Library ที่เป็นแบบรหัสเปิด (opensource)

เพื่อใช้แก้ไขข้อมูลที่อ้างอิงกับระบบภูมิศาสตร์ และภาษาไพธอน (Python) ในการสร้างเครื่องมือประมวลผลข้อมูลดาวเทียม SMAP ในความละเอียด 1 Km<sup>2</sup> ขึ้นมา โดยข้อมูลความชื้นผิวดินที่ได้มาจาก SMAP สามารถใช้วิเคราะห์ได้หลากหลายด้านและเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านเกษตรกรรมของประเทศไทยในอนาคต

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของดาวเทียม SMAP โดยการนำค่าความชื้นผิวดินที่ตรวจวัดด้วยดาวเทียม SMAP ไปเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่ตรวจวัดจากดินโดยตรงด้วยอุปกรณ์ IoT ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดค่าความชื้นผิวดินโดยใช้หลักการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ โดยเซ็นเซอร์จะตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) แล้วสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองฝั่ง ทำให้ในเนื้อวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าแบ่งขั้วบวกกับขั้วลบ (Dipole) และเกิดค่าต้านทาน (Permittivity) ในวัสดุขึ้นมา จะพบว่าค่าต้านทานของน้ำมีค่าที่สูงมาก จากการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าในวัสดุรูปทรงต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรค่าต้านทานสัมพันธ์กันในทางตรงเสมออุปกรณ์จึงอาศัยหลักการนี้ในการตรวจวัดค่าความชื้นผิวดิน (AgriThailoT, 2563) ส่วนดาวเทียม SMAP มีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความชื้นผิวดินได้หรือไม่ ตรวจสอบโดยการนำค่าที่ได้ทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันด้วยการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) และค่าการวิเคราะห์ถดถอย (Linear Regression) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลดาวเทียมความชื้นผิวดิน SMAP เมื่อเทียบกับข้อมูลความชื้นผิวดินจากสถานีภาคสนาม (IoT)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตของมนุษย์มากขึ้น โดยเฉพาะทางด้านของอินเทอร์เน็ตซึ่งเป็นเครือข่ายไร้สายขนาดใหญ่ที่มนุษย์ทุกคนสามารถเข้าถึงได้โดยง่าย ทำให้เครือข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นส่วนสำคัญในการเผยแพร่ข่าวสารต่าง ๆ (โสภาวดี, 2558) ซึ่งผู้วิจัยได้เล็งเห็นในส่วนสำคัญนี้ จึงได้จัดทำบริการให้บริการแผนที่ผ่านเว็บไซต์ (Web Map Services) ขึ้น ซึ่งเป็นการนำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) มาพัฒนาในการนำเสนอข้อมูลอนุกรมเวลา (Time Series) จากช่วง เดือนมกราคม ปี พ.ศ.

2561 ถึง เดือนสิงหาคม ปี พ.ศ. 2563 ที่ผู้ใช้งานสามารถเรียกดูได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) ทั่วไป

## 2 วิธีการ

### 2.1 พื้นที่ศึกษา

จังหวัดสุโขทัย แบ่งตามเขตภูมิภาคทางภูมิศาสตร์ของประเทศไทยจะอยู่ในเขตภาคเหนือตอนบน แต่ถ้าแบ่งตามเขตการปกครองของประเทศไทย จังหวัดสุโขทัยจะตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ 16 องศา 34 ลิปดา ถึง 17 องศา 46 ลิปดาเหนือ ลองจิจูดที่ 99 องศา 24 ลิปดา ถึง 100 องศา 01 ลิปดาตะวันออก มีเนื้อที่ประมาณ 6,596.09 Km<sup>2</sup> พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม โดยตอนเหนือเป็นที่ราบสูงมีภูเขาเป็นแนวยาวมาทางทิศตะวันตก พื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบและตอนใต้เป็นที่ราบสูง มีแม่น้ำไหลผ่านจากเหนือลงใต้ ลักษณะภูมิอากาศโดยทั่วไปมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แบ่งออกเป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ด้านทรัพยากรน้ำ จังหวัดสุโขทัยมีแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาล) โดยมีแหล่งที่สำคัญ เช่น แม่น้ำยม ห้วยแม่หมอก ห้วยแม่ลำพัน เป็นต้น โดยมีจำนวนสถานีตรวจวัดค่าความชื้นผิวดิน (IoT) อยู่ทั้งหมด 17 สถานี

จังหวัดกำแพงเพชร ตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือตอนล่างตอนไปทางตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ระหว่างละติจูด 15 องศา 51 ลิปดาเหนือ ถึงลองจิจูดที่ 16 องศา 54 ลิปดาเหนือ มีเนื้อที่ประมาณ 8,607.50 Km<sup>2</sup> หรือประมาณ 5,379,688 ไร่ ลักษณะภูมิอากาศประเภททุ่งหญ้าเมืองร้อน (Tropical Cross Land Savana) มีฝนตกสลับแห้งแล้ง มีอุณหภูมิสูงเกือบตลอดทั้งปีและมีสภาพอากาศแห้งแล้งในช่วงฤดูร้อน สภาพภูมิอากาศได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มี 3 ฤดู คือฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว มีลักษณะภูมิประเทศด้านตะวันตกเป็นภูเขาสูงลาดลงมา ทางด้านตะวันออกลักษณะเป็นดินปนทรายเหมาะแก่การทำนาและปลูกพืชไร่ โดยมีจำนวนสถานีตรวจวัดค่าความชื้นผิวดิน (IoT) อยู่ทั้งหมด 105 สถานี รวมทั้งหมด 122 สถานี ดังที่แสดงในรูปที่ 1

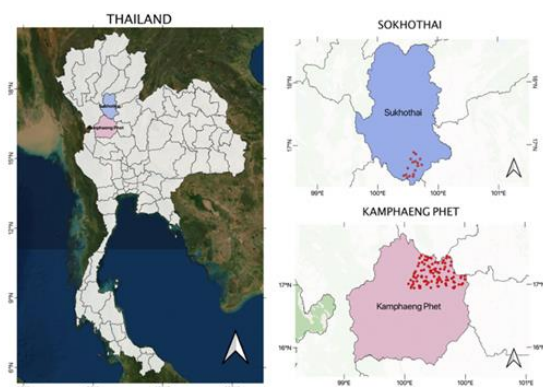


Figure 1 Province location And the position of the TOI.

### 2.2 ข้อมูลที่ใช้ศึกษา

1) ข้อมูลความชื้นจากสถานีตรวจวัด IoT ซึ่งตามหลักการแล้ว น้ำผิวดินเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดกับช่องโพรงของเนื้อดิน ปริมาณน้ำผิวดินมีการตรวจวัดพื้นฐานอยู่ 2 แบบ คือ ปริมาณน้ำผิวดินโดยมวลและปริมาณน้ำผิวดินโดยปริมาตร แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ ในการเก็บค่าความชื้นผิวดิน หลักการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ โดยเซ็นเซอร์จะตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองฝั่ง ทำให้ในเนื้อวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ประจุแบ่งฝั่งขั้วบวกกับขั้วลบ (Dipole) และในแต่ละวัสดุจะมีค่าต้านทาน (Permittivity) ไม่เท่ากัน โดยจะพบว่าค่า Permittivity ของน้ำมีค่าที่สูงมากและมีความต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากสูตรการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ในวัสดุรูปทรงต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรค่าต้านทาน สัมพันธ์กันในทางตรงเสมอ อุปกรณ์เลยอาศัยหลักการนี้ในการตรวจวัดค่าความชื้นผิวดิน โดยค่าที่เก็บมานั้น มีสถานีที่เก็บค่า (IoT) อยู่ในพื้นที่ 2 จังหวัด คือ สุโขทัย และกำแพงเพชร โดยตรวจวัดค่าในระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 จนถึงวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2563 จำนวน 122 สถานี

2) ข้อมูลดาวเทียม Soli Moisture Active Passive (SMAP) ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจวัดความชื้นผิวดิน (Soil Moisture) และการแข็งตัวหรือละลายของน้ำแข็งบนผิวดิน (freeze/thaw) ในระดับโลก (Global Scale) โดยการใช้เรดาร์ (Rader) และ เรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) ช่วงคลื่น L-band ในการตรวจวัด โดยการเก็บข้อมูลด้วยเรดิโอมิเตอร์นั้นเป็นการเก็บข้อมูลด้วยช่วงคลื่นวิทยุที่จะสามารถเก็บข้อมูลทะลุผ่านเมฆได้ ทำให้ภาพที่ได้มานั้นไม่มีเมฆหรือสิ่งบดบังมารบกวน ซึ่งมีการเก็บข้อมูลด้วยความละเอียดเชิงพื้นที่ 36 km ให้บริการครอบคลุมทั่วโลกทุก ๆ 2 ถึง 3 วัน (Chan et al., 2018)” ซึ่งจะช่วยให้ผู้ที่ศึกษาสามารถประมาณค่าของน้ำและพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างพื้นดินกับบรรยากาศได้ (Peng et al., 2017; Wigneron et al., 2017) SMAP ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ต่ำ ในการทำแผนที่ความชื้นผิวดินบนโลกเนื่องจากคลื่นความถี่ต่ำจะทำให้การรบกวนของชั้นบรรยากาศลดลงและสามารถเก็บข้อมูลผ่านชั้นปกคลุมของพืชลงไปถึงผิวดินได้ ซึ่งจะมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้คลื่นที่มีความถี่สูง (Panciera et al., 2013; Colliander et al., 2013)

ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ L2\_SM\_SP : Soil Moisture (Sentinel Rader + Radiometer) 3 km/1 km เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจาก Sentinel L2\_S0\_S1 และ SMAP L3\_SM\_P\_E ซึ่งให้การสะท้อนกลับของเรดาร์ Sentinel แบบกริดและการสังเกตอุณหภูมิความสว่างของเครื่องวัดรังสี SMAP เพื่อลบอิทธิพลของแหล่งน้ำออกไป ในการสร้างผลิตภัณฑ์ L2\_SM\_SP จะประมวลผล Sentinel L2\_S0\_S1 ความละเอียด 1 km ร่วมกับกับ L3\_SM\_P\_E ความละเอียด 9 km โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ประมาณความชื้นผิวดินที่ระดับความลึก 5 cm จากผิวดิน ซึ่งมีช่วงเวลาเฉลี่ยทุก 3 วัน ในทุก ๆ พื้นที่ของโลก

อย่างไรก็ตามการประมาณการเหล่านี้จะไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีหิมะและน้ำแข็งปกคลุมหรือบริเวณที่มีพืชพันธุ์หนาแน่นที่มีปริมาณที่มากกว่า 5 kg/m<sup>2</sup> “Narendra et al. (2018)” ตามตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการแสดงข้อมูลผลิตภัณฑ์ SMAP ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกปรับปรุงและสามารถนำไปใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ และในการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความชื้นผิวดิน ต้องเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม SMAP L2\_SM\_SP:SoilMoisture (Sentinel Radar + Radiometer) ที่ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดสุโขทัยและจังหวัดกำแพงเพชร ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 จนถึงวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2563 และนำข้อมูล SMAP จากฐานข้อมูล NASA มาหาค่าความชื้นตามตำแหน่งของสถานีตรวจวัดค่าความชื้น (IoT) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองข้อมูลด้วยค่า

สหสัมพันธ์ (Correlation) และ การวิเคราะห์การถดถอย (Liner Regression) เพื่อศึกษาว่าค่าความชื้นทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

Table 1 Standard and Enhanced SMAP data products

Product	Description	Gridding	
L1A_TB	-	-	
L1A_S0	Radiometer Data in Time-Order	-	
L1B_TB	Radiometer T <sub>B</sub> in Time-Order	36x47 km	
L1A_S0_LoRes	Low-Resolution Radar $\sigma_0$ in Time-Order	5x30 km	Instrument Data
L1A_S0_HiRes	High-Resolution Radar $\sigma_0$ in Time-Order	1-3 km	
L1C_TB	Radiometer T <sub>B</sub> in Half-Orbit	36 km	
L2_SM	Soil Moisture (Radar)	3 km	
L2_SM_P	Soil Moisture (Radiometer)	36 km	Science Data
L2_SM_AP	Soil Moisture (Radar+ Radiometer)	9 km	(Half-Orbit)
L3_FT_A	Freeze/Thaw State (Radar)	3 km	
L3_SM_A	Soil Moisture (Radar)	3 km	Science Data
L3_SM_P	Soil Moisture (Radiometer)	36 km	(Daily Composite)
L3_SM_AP	Soil Moisture (Radar+ Radiometer)	9 km	
L4_SM	Soil Moisture (Surface and Root Zone)	9 km	Science
L4_C	Carbon Net Ecosystem Exchange (NEE)	9 km	Value-Added

### 2.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 2.3.1 การเตรียมข้อมูลและการประมวลผลข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม

ขั้นตอนประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อให้ภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้มานั้นมีค่าพิกัดที่ตรงกับค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกและนำมาเปิดคู่กับตำแหน่งของสถานีตรวจวัดค่าความชื้นผิวดิน (IoT) เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียม SMAP L2\_SM\_SP : Soil Moisture (Sentinel Rader + Radiometer) 3 km และ 1 km ที่ทำการรวบรวมมานั้นในตอนแรกไฟล์ที่ได้มานั้นจะเป็นข้อมูลในรูปแบบ HDF5 หรือ H5 เป็นไฟล์ข้อมูลที่บันทึกในรูปแบบชั้นข้อมูล มีอาร์เรย์ (Array) หรือการเก็บข้อมูลประเภทเดียวกันเป็นแบบ

ลำดับ ซึ่งมีหลายมิติข้อมูล ซึ่ง SMAP L2\_SM\_SP : Soil Moisture (Sentinel Rader + Radiometer) 3 km และ 1 km จะถูกบรรจุไว้ใน HDF5 หรือ H5 อีกที เมื่อทำการเปิด SMAP L2\_SM\_SP : Soil Moisture (Sentinel Rader + Radiometer) 3 km และ 1 km แล้วข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนภาพถ่ายดาวเทียม SMAP ที่เป็นเพียงภาพราสเตอร์ (Raster) และ ส่วนคำอธิบายข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (Geographic Meta Data XML, GMD) ซึ่งจะเป็นไปตามประเภทของภาพถ่ายดาวเทียมนั้น ๆ โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่จะถูกเก็บเป็นสเกลาร์ (Scalars) หรือปริมาณเพียงขนาดเดียวและบางส่วนจะถูกเก็บเป็นอาร์เรย์ (array) (Narendra et al, 2018)” ดังนั้นต้องทำการตั้งค่าพิกัด (Georeferencing) เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมที่



ได้รับมาทั้งหมดและจากจำนวนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทั้งหมดที่รวบรวมมานั้นมีจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการเข้าไปหาค่าพิกัดจากเมตาดาต้า (Metadata) และนำมาตรึงเข้ากับภาพถ่ายดาวเทียม โดยในขั้นตอนนี้ต้องใช้ไพธอน (Python) ในการเขียนสคริปต์ (Script) ขึ้นมาร่วมด้วยกับไลบรารีของ Gdal (Geospatial Data Abstraction Library) ที่ใช้ในการอ่านและเขียนภาพ (Raster) ที่อ้างอิงกับระบบพิกัดภูมิศาสตร์

เมื่อทำการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม SMAP เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะใช้โปรแกรม QGIS (Quantum GIS) ที่มีประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลปริภูมิที่สามารถเรียกใช้ข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) และราสเตอร์ (Raster) เช่น Shapefile และ GeoTIFF ได้ โดยเริ่มจากการนำภาพถ่ายดาวเทียม SMAP ที่มีข้อมูลค่าพิกัดเปิดคู่กับข้อมูลค่าความชื้นผิวดินจากสถานที่รวบรวมได้ เพื่อทำการเก็บค่าความชื้นผิวดินจากภาพถ่ายดาวเทียมที่จุดเดียวกับสถานีตรวจวัดความชื้นผิวดิน จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นของดินระหว่างค่าที่เก็บได้จากดาวเทียม SMAP และค่าความชื้นในสนาม (IoT) เพื่อจะนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ตามหลักสถิติต่อไป โดยมีขั้นตอนดังในรูปที่ 2

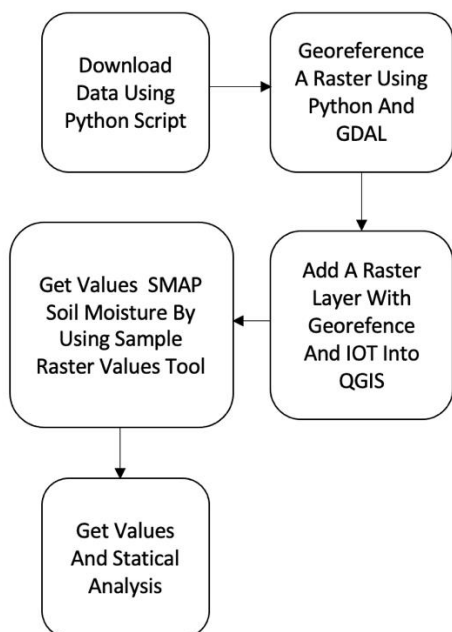


Figure 2 Methods of operation.

### 2.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักทางสถิติ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลค่าความชื้นผิวดินจากภาพถ่ายดาวเทียม SMAP กับข้อมูลจากภาคสนาม (IoT) ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 ถึง วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2563 จำนวน 122 สถานี โดยมีการกระจายตัวดังรูปที่ 3

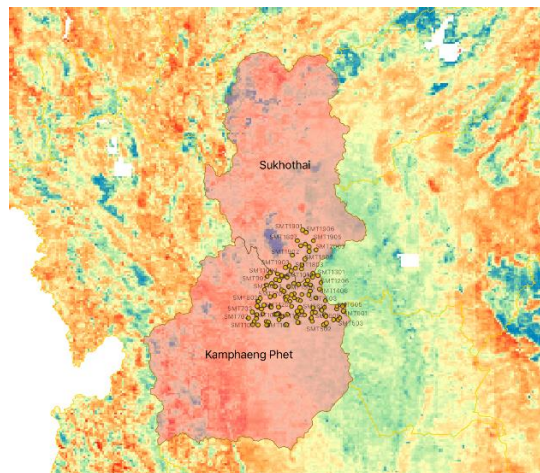


Figure 3- Location of 122 IoT stations.

ในการตรวจสอบนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักสถิติหรือ ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) มีรูปสมการตามที่แสดงในสมการที่ 1 เป็นการดูทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient,  $r$ ) ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์นี้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 นั้นหมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หากมีค่าใกล้ +1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงอย่างมาก และหากมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

และใช้การทดสอบความเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normality Test) ซึ่งเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติเสมอ ไม่เช่นนั้นการทดสอบสมมติฐาน หรือการอนุมานด้วยเครื่องมือทางสถิติอื่น ๆ จะให้ผลคลาดเคลื่อน ตั้งแต่บ่อยไปจนถึงไม่อาจยอมรับได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะความไม่เป็นการกระจายตัวแบบปกติ ในการทดสอบนี้มีหลายวิธี แต่ในการทดสอบครั้งนี้เลือกใช้วิธี Normal Quantile Plot คือการพล็อตจุดตัดระหว่างค่า Z quantiles กับข้อมูลใด ๆ ที่เก็บตัวอย่างมา โดยมีสมมติฐานว่า ข้อมูลที่เก็บมาจาก IoT มีการกระจายตัวแบบ Normal Distribution หากเป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวอย่างกับค่า Z จะใกล้เคียงเส้นตรง ด้วยการหาค่า Quantiles มีรูปสมการที่แสดงในสมการที่ 2 โดยที่  $i = 1, 2, \dots, n$  เป็นค่าอันดับข้อมูลที่เรียงจากน้อยไปมาก และใช้ฟังก์ชัน NORMSINV ในการหาค่าทางสถิติ

$$\text{Quantiles} = \frac{i-0.5}{n} \quad (2)$$

2.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อให้สะดวกต่อผู้ที่ต้องการเข้าถึงข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างแผนที่ออนไลน์ หรือ Web Map Service (WMS) ของข้อมูลความชื้นผิวดินโดยใช้ดาวเทียม SMAP ขึ้น โดยจะจัดทำในรูปแบบของอนุกรมเวลา (Time Series) แสดงในช่วงเวลาตั้งแต่ เดือน มกราคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือน สิงหาคม ปี พ.ศ. 2563 โดย Web Map Service (WMS) เป็นโพรโตคอลมาตรฐาน (Standard Protocol) สำหรับการทำให้แผนที่ที่สร้างโดยเซิร์ฟเวอร์แผนที่ (Map Server) จากรูปที่ 4 เป็นการแสดงวิธีที่ WMS เปลี่ยนข้อมูลให้เป็นภาพแผนที่ ค่าของแผนที่จากฝั่งของผู้ใช้ (Client) จะสร้างพารามิเตอร์ (Parameters) ที่เซิร์ฟเวอร์แผนที่ (Map Server) แล้วส่งข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการ กลับไปยังผู้ใช้งาน “Cristina Rosales Sánchez (2013)” WMS มีบริการ 3 อย่างด้วยกัน 1) ให้บริการข้อมูลและคำอธิบาย Metadata ของชุดข้อมูล 2) ให้บริการภาพแผนที่แบบหลายมิติ 3) ให้บริการข้อมูลที่ต้องการใช้แสดงบนแผนที่ ซึ่ง WMS จะทำงานด้วยการรับข้อมูลที่ใช้ร้องขอผ่าน Uniform Resource Locators (URL) ซึ่ง URL นี้จะเป็นตัวเก็บข้อมูลแผนที่ ระบบพิกัดอ้างอิงและข้อมูลอื่น ๆ เอาไว้ หากผู้ใช้ร้องขอแผนที่ที่มากกว่ากว่า 2 แผนที่อยู่ในพิกัดเดียวกัน ผู้ใช้สามารถนำแผนที่ทั้ง 2 ที่ได้มาซ้อนทับกันได้มากกว่าหนึ่งชั้นข้อมูล

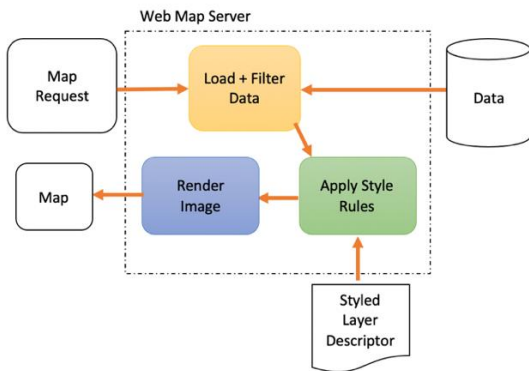


Figure 4 Diagram Of Systematic Procedure Of WMS (โสภาวดี, 2558).

โดยข้อมูลภาพแผนที่ความชื้นผิวดินที่ผ่านการประมวลผลแล้วจะถูกอัปโหลด (Upload) ขึ้นไปที่เว็บเซิร์ฟเวอร์ : Geoserver (Web Server: Geoserver) ซึ่ง Geoserver เป็นแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ GIS ที่ใช้ Java (Java-based GIS Server Application) สำหรับเผยแพร่บริการ Open Geospatial Consortium (OGC) ที่เป็นสื่อกลางระหว่างฐานข้อมูลและผู้ใช้ (Client) ช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลโดยการแปลงค่าขอเว็บจากผู้ใช้ให้เป็นข้อมูลไปยังฐานข้อมูลหรือไฟล์ GIS ที่ผู้ใช้ต้องการ ดังรูปที่ 5

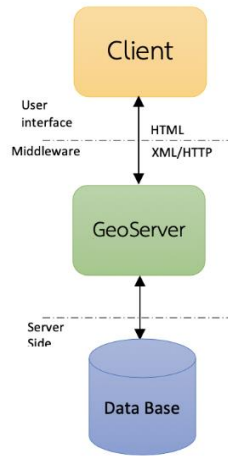


Figure 5 Diagram Of Systematic Procedure Of WMS “โสภาวดี (2558).

3 ผลลัพธ์และการวิจารณ์

จากการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความชื้นผิวดิน SMAP และ ข้อมูลความชื้นจากภาคสนาม (IoT) โดยการตรวจสอบจากสมการสหสัมพันธ์ (Correlation) ของข้อมูลทั้งสองในวันเดียวกัน ตำแหน่งเดียวกันโดยมีความละเอียดของจุดภาพอยู่ที่ 1 Km<sup>2</sup> พบว่ามีค่าตัวแปรสหสัมพันธ์ (r) อยู่ที่ 0.04 ถึง 0.10 ดังรูปที่ 6 เมื่อทำการศึกษาข้อมูลจากบทวิจัยอื่น ๆ แล้วนั้น ข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP จะมีระดับความแม่นยำในการให้ข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 0.04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (Steven et al., 2010) แต่การวิจัยครั้งนี้ใช้เวลาสังเกตข้อมูลต่างๆ เพียง 5 เดือนเท่านั้น หากใช้เวลาสังเกตครบ 1 ปีหรือมากกว่านั้นผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP และข้อมูล IoT จะทำให้ผลออกมาชัดเจนมากยิ่งขึ้น

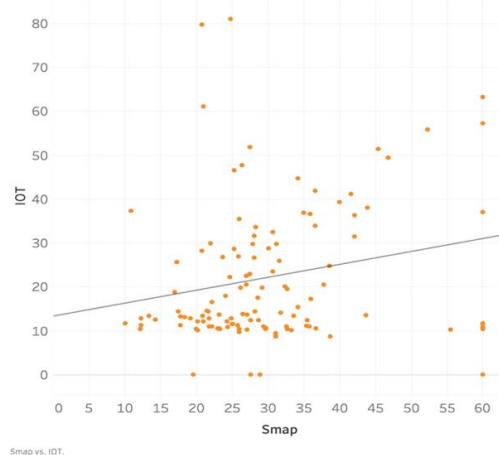


Figure 6 Correlation between SMAP and IoT data.

และเนื่องด้วยในบางวันมีทิศทางที่ตรงข้ามกันเนื่องจากมีปัจจัยเหล่านี้ คือ

- 1) ผลผลิตถัณฑ์ดาวเทียม SMAP L2\_SM\_SP : SoilMoisture (Sentinel Radar + Radiometer) มีความละเอียดในการ

ตรวจวัดอยู่ที่ 1 Km<sup>2</sup> ทำให้ค่าที่ได้มานั้นจะมีค่าความชื้นของสิ่งอื่น ๆ ปะปนเข้ามาด้วยในหนึ่งจุดภาพ หรือ ใน 1 พิกเซล (Pixel) ของภาพราสเตอร์ (raster) นั้นจะเป็นการเฉลี่ยค่าความชื้นของสิ่งต่างๆที่ติดมาในจุดภาพเหล่านั้นมาเป็นค่าความชื้นรวมด้วยกัน ดังรูปที่ 7 แต่ในการตรวจวัดภาคสนาม (IoT) เป็นการวัดค่าที่จุดเพียงจุดเดียวที่เครื่องวัดค่าทำการติดตั้งอยู่ทำให้ได้ค่าความชื้นในจุดเพียงจุดเดียวมา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ในบางวันเมื่อนำค่ามาตรวจสอบแล้วได้ผลที่มีทิศทางตรงข้ามกัน



Figure 7 SMAP and IOT satellite image display.

2) จากการทดสอบทดสอบความเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normality Test) ของข้อมูล พบว่า Quantile ของ SMAP มีความกระจายตัวที่เป็นปกติ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ดีกว่าการกระจายตัวของ IoT ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 จึงทำให้ผลจากคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่ได้มานั้นมีผลที่น่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น เพราะจากทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normality Test) เป็นการทดสอบข้อมูลที่จะทำมาอนุมานด้วยเครื่องมือทางสถิติเพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลที่น่ามาทดสอบนั้นมีการกระจายตัวอย่างไร ถ้าหากข้อมูลที่น่ามาทดสอบนั้นมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นแบบปกติ (Non-Normal Distribution) แล้วนั้น การอนุมานทางสถิติจะมีผลคลาดเคลื่อนจนอาจไม่สามารถยอมรับได้จากนั้นได้ทำการแสดงผลความชื้นผิวดินโดยทำการเฉลี่ยให้มีค่าความชื้นบนผิวดินในปี พ.ศ. 2561 และ ปี พ.ศ. 2562 ในรูปแบบของแผนที่โดยมีขอบเขตอยู่ที่จังหวัดสุโขทัยและจังหวัดกำแพงเพชร ดังรูปที่ 10 จากนั้นผู้วิจัยได้จัดทำ Web Map Service (WMS) ขึ้นโดยใช้ข้อมูลความชื้นผิวดินที่ได้จากดาวเทียม SMAP ที่ความละเอียด 1 km ในรูปแบบของอนุกรมเวลา (Time Series) ตั้งแต่ เดือน มกราคม ปี พ.ศ.2561 ถึง เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2563 ขอบเขตพื้นที่ในประเทศไทยทั้งหมด ดังรูปภาพที่ 11

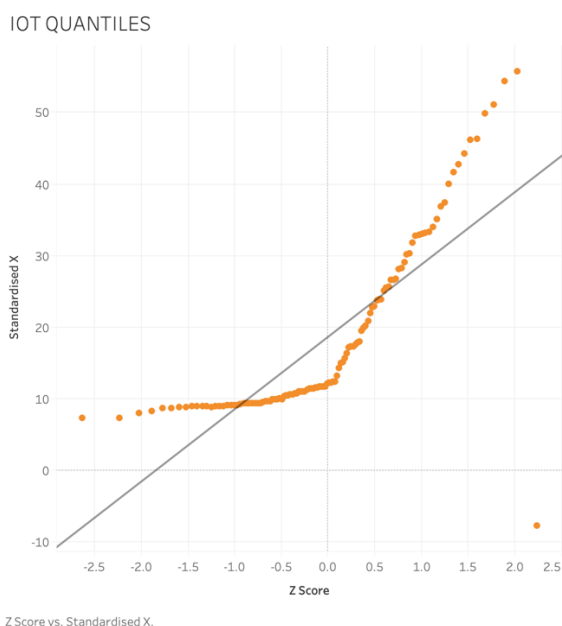


Figure 8 Show IoT Quantile Graphs.

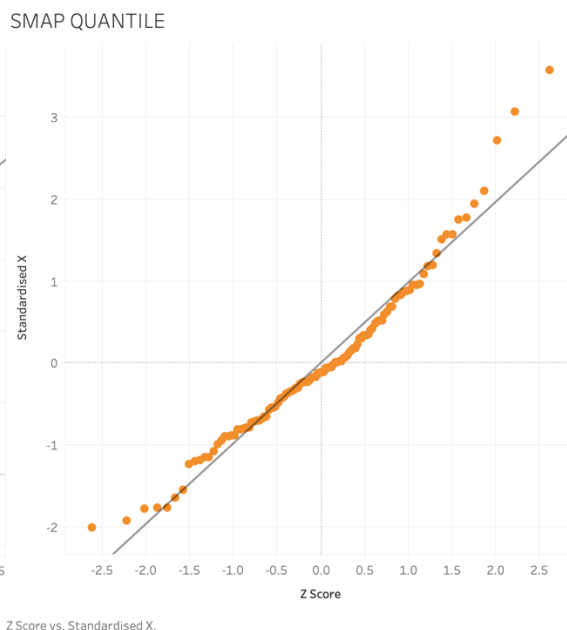


Figure 9 Show SMAP Quantile Graphs.



### Soil Moisture Map Using SMAP Satellite of Sukhothai and Kamphaeng Phet

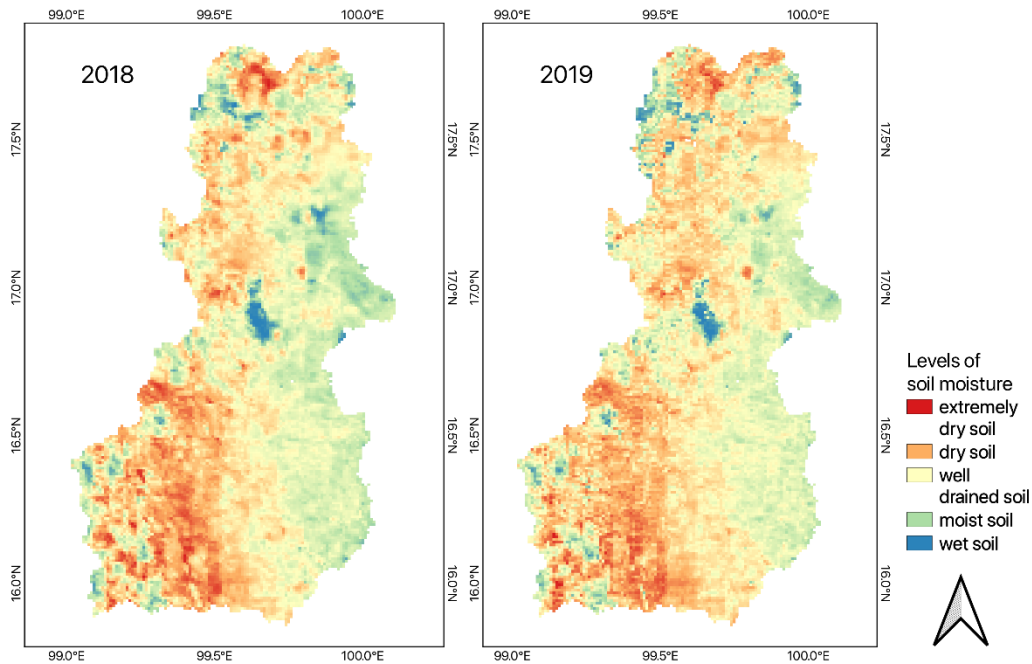


Figure 10 Soil Moisture Map Using SMAP Satellite of Sukhothai and Kamphaeng Phet.



Figure 11 (Web Map Service) Soil Moisture Map Using SMAP Satellite of Thailand.

#### 4 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงถึงประสิทธิภาพของข้อมูลจากดาวเทียม SMAP ในการหาค่าความชื้นผิวดิน เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการเกษตร ด้านภัยพิบัติ หรือด้านอื่น ๆ จากการตรวจสอบโดยการนำข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP มาเปรียบเทียบกับข้อมูลความชื้นที่บันทึกจากภาคสนาม (IoT) ด้วยวิธีการทางสถิติ ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation, r) ที่ได้นั้นมีค่าอยู่ที่ 0.04 – 0.10 จึงพิสูจน์ได้ว่าความสัมพันธ์ของข้อมูล

ความชื้นผิวดินจากภาพถ่ายดาวเทียม SMAP และข้อมูลความชื้นผิวดินจาก IoT มีความสัมพันธ์ที่คล้อยตามกัน ทำให้สามารถใช้ข้อมูลจากดาวเทียม SMAP ในการหาค่าความชื้นผิวดินได้ แต่เนื่องด้วยการเก็บค่าความชื้นผิวดินของดาวเทียม SMAP เป็นการเก็บค่าเป็นจุดภาพที่มีขนาด 1 Km<sup>2</sup> ทำให้ในหนึ่งจุดภาพจะเป็นการเฉลี่ยค่าความชื้นจากสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ ณ จุดภาพปะปนมาด้วย แต่การเก็บค่าจากสนาม (IoT) เป็นการเก็บค่าเพียงจุด ๆ เดียวที่จุดที่ติดตั้งเครื่องวัดความชื้นผิวดิน และยังไม่มีปัจจัยทางด้านของเวลาใน



การเก็บค่า ซึ่งในหนึ่งวันดาวเทียม SMAP จะเก็บได้เพียงช่วงเวลาเดียว แต่การเก็บค่าจากภาคสนามจะสามารถติดตามค่าความชื้นผิวดินได้ตลอดเวลา ด้วยเหตุปัจจัยเหล่านี้จึงส่งผลให้ค่าที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีจุดที่ไม่คล้อยตามกันอยู่บ้างแต่เป็นส่วนน้อย และจากกราฟ Quantile ซึ่งเป็นการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล เมื่อมีการนำข้อมูลต่าง ๆ มาทดสอบสมมติฐาน หรือการอนุมานด้วยเครื่องมือทางสถิติ ผู้ทดสอบต้องแน่ใจว่าข้อมูลที่นำมาทดสอบนั้นเป็นข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ถ้าเมื่อใดข้อมูลที่ได้นั้นมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ (Non-Normal Distribution) แล้วการอนุมานด้วยเครื่องมือทางสถิติก็จะได้ผลที่คลาดเคลื่อนไม่มากนักน้อยจนถึงไม่อาจยอมรับได้ จากการทดสอบนั้นข้อมูลของดาวเทียม SMAP นั้นมีการกระจายตัวเป็นปกติที่ดีกว่าข้อมูลจากภาคสนาม (IoT) จึงทำให้ผลจากค่าความสัมพันธ์ (Correlation, r) มีผลที่น่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ ได้ เช่น ระบบตรวจความเครียดจากการขาดน้ำของพืช และการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ต่าง ๆ ที่จะสามารถทำได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเพราะความชื้นผิวดินนั้นแปรผันตรงกับการขาดน้ำของพืชหรือทางด้านอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต และเพื่อให้สะดวกต่อผู้ที่ต้องการเข้าถึงข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP จึงทำการสร้างแผนที่ออนไลน์ หรือ Web Map Service (WMS) โดยการอาศัยเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) ในการเผยแพร่ข้อมูลความชื้นผิวดินโดยใช้ดาวเทียม SMAP ซึ่งจัดทำในรูปแบบของอนุกรมเวลา (Time Series) ของพื้นที่ในประเทศไทยแสดงในช่วงเวลาตั้งแต่ เดือน มกราคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือน สิงหาคม ปี พ.ศ. 2563 โดยผู้ใช้งานสามารถเรียกดูได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) ขึ้นมาเพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อไป

## 5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนโครงการงานวิศวกรรมเพื่อแสดงถึงความก้าวหน้าด้านสิ่งประดิษฐ์ ของนิสิตชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณขอขอบคุณข้อมูลความชื้นภาคสนาม (IoT) จากบริษัทอินฟราพลัส จำกัด ขอขอบคุณ National Snow and Ice Data Center (NSIDC) สำหรับข้อมูลความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP ผลิตภัณฑ์ L2\_SM\_SP : SoilMoisture (Sentinel Radar + Radiometer) และขอขอบคุณ ผศ.พ.ดร.สรวิศ สุกเวทย์ สำหรับข้อเสนอแนวทางในการทำงานวิจัย

## 6 เอกสารอ้างอิง

โสภาวดี โชติกลาง. 2558. การพัฒนา WEB MAP SERVICES เพื่อเผยแพร่แหล่งท่องเที่ยวชุมชนในพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกเฉียงเหนือ : กรณีศึกษาจังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด, 19-22

- อุมพร จารุสมบัติ. 2557. รอบรู้วิทยุ: ดาวเทียมดวงใหม่ตรวจวัดความชื้นของดิน (SMAP: Soil Moisture Active Passive), 190
- AgriThailoT. 2563. ความชื้นในดินคืออะไร ในมุมมองของการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์. แหล่งข้อมูล : <https://medium.com/agrithailoT>. เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2564
- Chan, S. K., Bindlish, R., O'Neill, P., Jackson, T., Njoku, E., Dunbar, S., ... & Kerr, Y. 2018. Development and assessment of the SMAP enhanced passive soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*, 204, 931-941.
- Colliander, A., Jackson, T. J., Bindlish, R., Chan, S., Das, N., Kim, S. B., ... & Yueh, S. 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sensing of Environment*, 191, 215-231.
- Sánchez, C. R. 2013. Prototype Design for a Web-GIS Disaster Management System: Enhancement of Flood Management Systems by Integration of Crowdsourcing Data.
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., ... & Van Zyl, J. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- Escorihuela, M. J., Chanzy, A., Wigneron, J. P., & Kerr, Y. H. 2010. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 114(5), 995-1001.
- Jackson, T. J., O'Neill, P. E., & Swift, C. T. 1997. Passive microwave observation of diurnal surface soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5), 1210-1222.
- Togliatti, K. (2020). Using SMAP and SMOS vegetation optical depth to measure crop water in vegetation. Doctoral dissertation, Iowa State University, USA.
- Das, N., & Dunbar, R. S. 2018. Level 2 SMAP/Sentinel Active/Passive Soil Moisture Product Specification Document.
- Panciera, R., Walker, J. P., Jackson, T. J., Gray, D. A., Tanase, M. A., Ryu, D., ... Hacker, J. M. 2013. The soil moisture active passive experiments (SMAPEx): Toward soil moisture retrieval from the SMAP mission. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 52(1), 490-507.
- Peng, J., Loew, A., Merlin, O., & Verhoest, N. E. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely

- sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 341-366.
- 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.
- Walker, V. A. 2019. A New Approach to Retrieving Soil Moisture from SMAP over the Corn Belt. Doctoral dissertation, Iowa State University, USA.
- Wigneron, J. P., Jackson, T. J., O'Neill, P., De Lannoy, G., De Rosnay, P., Walker, J. P., ... Kerr, Y. 2017. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 192, 238-262.