



การตรวจวัดข้อมูลเชิงคลื่นและสรีรวิทยาของมันสำปะหลังภายใต้สภาวะเครียดน้ำ Spectral Reflectance and Physiological Measurement of Cassava under Water Stress Environment

ปิยนันท์ พิพัฒน์ศิริ^{1*} พัชร ประเสริฐกุล¹ นววิทย์ พงศ์อนันต์¹ กัญญารัตน์ ท้าวทา¹ สุเมธ คงภักดี¹

กำพล สกลสิริรุ่งโรจน์¹ อภิสิทธิ์ เอี่ยมหน่อ¹ และปรีสาร รักวาทีน²

¹ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (ไบโอเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

²สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

*Corresponding Author, E-mail: piyanan.pip@biotec.or.th

บทคัดย่อ

สภาวะเครียดน้ำเป็นปัจจัยที่ผลกับมันสำปะหลังในระยะพัฒนารากและการสร้างหัวใต้ดิน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับผลผลิตของมันสำปะหลัง การนำเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาความเครียดน้ำของพืชนั้นสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำลายพืช งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณในการตรวจวัดมันสำปะหลังในสภาวะเครียดน้ำระดับแปลงทดลอง ดำเนินการเก็บข้อมูลในแปลงปลูกทดสอบมันสำปะหลัง พันธุ์ระยอง 9 ภายใต้สภาพที่ไม่ขาดน้ำและสภาพอาศัยน้ำฝน ที่มีการปลูกช่วงปลายฤดูฝนเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน 2558 ในแปลงทดลองจังหวัดขอนแก่น เก็บข้อมูลค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมและข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลังที่อายุ 3 ถึง 5 เดือน เป็น 2 ชุดข้อมูลสำหรับการสร้างสมการทำนายและตรวจสอบความถูกต้องของสมการ จากนั้น วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาด้วยการวิเคราะห์การถดถอยและตรวจสอบความถูกต้อง ผลการศึกษา พบว่า ช่วงคลื่น 680 nm และดัชนี SAVI มีความสัมพันธ์กับอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบ โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.70 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนาย พบว่า มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลค่อนข้างน้อย และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.80 ดังนั้น ช่วงคลื่น 680 nm และดัชนี SAVI จึงสามารถใช้ในการตรวจวัดมันสำปะหลังในสภาวะเครียดน้ำได้โดยพิจารณาจากข้อมูลอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบของมันสำปะหลังได้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของการตรวจวัดความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำของมันสำปะหลังด้วยข้อมูลช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณ ข้อมูลที่ได้สามารถใช้ในการต่อยอดการศึกษาไปยังเซนเซอร์ต่างๆ ในระดับอากาศยานไร้คนขับและอวกาศ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการบริหารจัดการน้ำที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ABSTRACT

Plant water stress is the impact factor in the development of storage root stage of cassava and directly effects to the cassava yield. The application of remote sensing technology can be determined the plant water stress for rapid method and non-destructive plant. The objective of this study was detected the feasibility of the cassava water stress measurement using spectral reflectance under field scale. The field experiment was conducted in Khonkaen province, in a dry season period, October and November 2015, cassava Rayong 9, under

irrigation and rainfed. Spectral reflectance and physiology measurement were collected at 3 to 5 months after planting and divided to 2 datasets for calibration and validation dataset. Then, the data correlation analysis was analyzed for the calibration model, including regression equation and the coefficient of determination (R^2). Moreover, validation was determined the accuracy between measured and estimated value. The result showed the reflectance at wavelength 680 nanometer and SAVI were related to the average of photosynthesis and stomatal conductance ($R^2 > 0.70$). The validation was determined, less data discrepancy and r-square valued greater than 0.80. Therefore, the reflectance at wavelength 680 nanometer and SAVI could be detected the cassava water stress, using the average of photosynthesis and stomatal conductance. This research was preliminary studied for the advanced study to conduct in several field condition using unmanned aerial vehicle and/or spaceborne hyperspectral sensors for the existing water management to be more efficient.

คำสำคัญ: มันสำปะหลัง, ความเครียดน้ำ, สรีรวิทยาของพืช, ข้อมูลเชิงคลื่น, ดัชนีพืชพรรณ

Keywords: Cassava, Water stress, Plant physiology, Spectral reflectance, Vegetation index

บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชหัวและพืชอาหาร ที่มีความสำคัญในการผลิตเอทานอลซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตน้ำมัน และยังเป็นพืชอาหารสัตว์ที่สำคัญของประเทศที่อยู่ในเขตร้อนทั่วโลก จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2559) พบว่าประเทศไทยมีการปลูกมันสำปะหลังกระจายอยู่ทั่วประเทศรวม 50 จังหวัด จังหวัดนครราชสีมามีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 1,523,512 ไร่ รองลงมาคือ จังหวัดกำแพงเพชร ชัยภูมิ และกาญจนบุรี มีพื้นที่ปลูก 701,222 541,038 และ 485,617 ไร่ ตามลำดับ และจังหวัดขอนแก่น มีพื้นที่ปลูก 206,444 ไร่

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ดี สามารถเจริญเติบโตได้ในดินหลายประเภท แม้แต่บนดินที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น เช่น ดินเหนียวจัดหรือดินทรายจัด และดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (ศานิต, 2557) ค่าความเป็นกรดต่างของดินสำหรับปลูกมันสำปะหลังควรเป็นกรดจัดมากถึงปานกลาง (4.5-8.0) ดินในประเทศไทยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง คือ ดินร่วนปนทรายและดินร่วนเหนียวบนพื้นที่ดอน เนื่องจากดินทั้งสองชนิดมีค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.0-7.0 (กรดจัดถึงปานกลาง) และมีหน้าดินลึกตั้งแต่ 50 เซนติเมตรขึ้นไป ซึ่งเหมาะต่อการลงหัวของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังต้องการปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,000-1,500 มิลลิเมตรต่อปี สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปีละ 800 มิลลิเมตร หรือมีช่วงฤดูแล้งนาน 4 ถึง 6

เดือน ถึงแม้ว่ามันสำปะหลังจะเจริญเติบโตได้ในสภาพแล้ง แต่ผลผลิตหัวมันมีโอกาสลดลงตามระยะเวลาที่ขาดน้ำ ช่วงวิกฤตของการขาดน้ำที่มีผลต่อมันสำปะหลังคือ ช่วง 1 ถึง 5 เดือนหลังปลูก ซึ่งเป็นระยะการสร้างรากและหัวมัน (Stages of root initiation and tuberization) โดยพบว่า การขาดน้ำเป็นระยะเวลา 2 เดือนติดต่อกันสามารถทำให้ผลผลิตหัวมันลดลงร้อยละ 32 ถึง 60 (Hillocks et al., 2002) และจากการศึกษาโมเดลการเจริญเติบโตของมันสำปะหลังในประเทศไทยของโอภาส (2552) พบว่า มันสำปะหลังจะหยุดชะงักการเจริญเติบโตในช่วงฤดูแล้ง 5 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม โดยจะทำให้จำนวนใบลดลงเพื่อลดการคายน้ำออกจากต้น ดังนั้นการให้น้ำในช่วงฤดูแล้ง 5 เดือนก่อนใบจะเริ่มร่วง จะช่วยให้หัวมันสำปะหลังมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องและผลผลิตเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพืชขาดน้ำจะเกิดการปิดปากใบ (Stomatal closure) ทำให้การคายน้ำลดลง ศักย์น้ำในใบลดลง อุณหภูมิของใบสูงขึ้น (สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ) พืชที่ปลูกภายใต้สภาพไร่น้ำต่างๆ ไปพบว่า อัตราการสังเคราะห์แสงจะลดลงมากในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พืชจะเกิดความเครียดน้ำมากที่สุด หากต้องการรักษาระดับการสังเคราะห์แสงไม่ให้ลดลง ควรมีการให้น้ำแก่พืช หรือรักษาระดับความชื้นในดินให้สูงอยู่เสมอ (เฉลิมพล, 2535)

การตรวจวัดความเครียดจากการขาดน้ำ สามารถทำได้ทางตรง ได้แก่ การสังเกตด้วยสายตา การตรวจวัดปริมาณน้ำในใบ และการวัดศักยภาพของน้ำในใบ หรือทางอ้อมด้วยการใช้

เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลในการวินิจฉัย โดยประเมินการเปลี่ยนแปลงของใบหรือเรือนยอดด้วยค่าการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectral reflection) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการสะท้อนเชิงคลื่นที่สามารถให้ข้อมูลด้านพืชพรรณต่างๆ เช่น องค์ประกอบของสารสี พื้นที่ใบ ปริมาณน้ำ ทั้งในใบพืชและเรือนยอดของพืช โดยพืชจะมีลักษณะการสะท้อนที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงคลื่น จึงสามารถใช้ในการจำแนกชนิดและความผิดปกติของพืชได้ (จรรย์ธร, 2557; Sofia, 2010) การตรวจหาความเครียดน้ำของพืชโดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลและการวัดค่าจริงภาคสนาม พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสีในพืช (คลอโรฟิลล์) มีความสัมพันธ์กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (VIS) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในพืชมีความสัมพันธ์กับช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ช่วงคลื่นอินฟราเรดกลาง (MIR) ช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) และดัชนี NDVI และ WI (Govender et al., 2009)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณในการตรวจวัดมันสำปะหลังในสภาวะเครียดน้ำระดับแปลงทดลอง โดยมีการวัดค่าการสะท้อนแสงของเรือนยอดรวมกับการเก็บข้อมูลสรีรวิทยาของพืช ได้แก่ อัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปากใบ และแรงดึงการระเหยน้ำในอากาศ เพื่อบ่งชี้สภาวะเครียดน้ำของมันสำปะหลัง

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา แปลงทดลองของหมวดพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (พิกัด 16° 28' 25" N, 102° 48' 34" E, Alt. 190 m.) ที่ดำเนินการปลูกทดลองโดยทีมวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง "การเจริญเติบโต พัฒนาการ และสรีรวิทยา การตอบสนองของมันสำปะหลังพันธุ์ต่างกันต่อสภาพแวดล้อมแต่ละฤดูการผลิต" พื้นที่ศึกษามีลักษณะดินเป็นดินร่วนปนทราย (Oxic paleustult) ข้อมูลอากาศรายเดือนเฉลี่ย 5 ปี (2554-2558) จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน อำเภอมืองจังหวัดขอนแก่น ตั้งอยู่ห่างจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นประมาณ 7 กิโลเมตร (พิกัด 16° 25' 60" N, 102° 49' 60" E) แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำฝนรายปี เท่ากับ 1,088 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย

รายปี 31.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยรายปี 23.1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 69.9 เปอร์เซ็นต์

ดำเนินการเก็บข้อมูลในแปลงปลูกทดสอบมันสำปะหลังพันธุ์ระยะของ 9 ที่มีลักษณะลำต้นตั้งตรงสูงไม่มีการแตกกิ่ง (non-branching) และอายุยาว โดยปลูกในช่วงปลายฤดูฝนเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน 2558 ภายใต้สภาพที่มีการให้น้ำและไม่ให้น้ำ โดยแปลงที่มีการให้น้ำจะมีการให้น้ำแบบสปริงเกอร์ตลอดฤดูปลูกเพื่อรักษาระดับค่าศักย์ของน้ำในดินไม่ต่ำกว่า -30 kPa ที่ความลึก 20 เซนติเมตร และแปลงที่ไม่มีการให้น้ำ จะมีการให้น้ำหลังปลูกจนถึงออกแล้ว 20 วันหลังจากนั้นจะอาศัยน้ำฝน ใช้แผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block (RCB) จำนวน 3 ซ้ำ ระยะระหว่างแถว 1 เมตรและระหว่างต้น 1 เมตร ในแปลงขนาด 28 x 7 ตารางเมตร เป็นขนาดพื้นที่ 0.37 ไร่ เก็บข้อมูล 3 ต้นต่อแปลง และเป็นมันสำปะหลังต้นเดิม เดือนละ 2 ครั้ง ตั้งแต่อายุ 3 ถึง 5 เดือน (6 ชุดข้อมูล)

2. การเก็บข้อมูล

2.1 การเก็บข้อมูลความชื้นดินบริเวณแปลงทดลอง เก็บข้อมูลความชื้นดินจาก watermark ที่มีการติดตั้งบริเวณสันร่องระหว่างต้น ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร เพื่อกำหนดการให้น้ำเมื่อความชื้นดินมีค่าลดลงต่ำกว่า -30 kPa ของแปลงที่กำหนัดการให้น้ำ และเก็บข้อมูลก่อนการให้น้ำหรือวันที่ไม่มีฝนตก เพื่อลดผลกระทบจากน้ำที่ได้รับและมันสำปะหลังจะได้ปรับตัวและแสดงออกให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่กำหนด

2.2 การเก็บข้อมูลการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม ด้วยเครื่อง Field spectroradiometer รุ่น Fieldspec® 3 (ASD) ที่มีช่วงคลื่น 350-2500 นาโนเมตร (nm) กำหนดค่าขอบเขตการมองเห็น (FOV) เท่ากับ 25 องศา ที่เรือนยอดของมันสำปะหลังสูง 1.5 เมตร ครอบคลุมเรือนยอดและพื้นดินเท่ากับ 0.67 เมตร (ความสูงต้นมันสำปะหลังที่อายุ 3-5 เดือน เท่ากับ 1.0-1.5 เมตร) เก็บข้อมูลในช่วงกลางวัน (11.00-14.00 น.) ที่ปราศจากเมฆ ฝน และลม การเก็บข้อมูลจะมีการ Calibrate เครื่องด้วยกระบวนการ Dark current measurement และ White reference และเก็บบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โดยเก็บข้อมูล 3 ต้นต่อแปลง และที่ตำแหน่งเดิมในทุกเดือน เดือนละ 2 ครั้ง ตั้งแต่มันสำปะหลังอายุ 3-5 เดือน รวมเป็น 18 ตัวอย่าง

ต่อเดือน และมีการเก็บข้อมูลเป็น 2 ชุดข้อมูล คือ ชุดข้อมูลแปลงปลูกเดือนพฤศจิกายน 2558 เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างสมการการทำนาย และข้อมูลแปลงปลูกเดือนตุลาคม 2558 เป็นข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนาย

2.3 การเก็บข้อมูลสรีรวิทยาของพืช ดำเนินการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง Licor 6400XT โดยข้อมูลที่ได้ ได้แก่ ข้อมูลอัตราการสังเคราะห์แสง (P_n) การชักนำการเปิดปากใบ (g_s) และแรงดึงการระเหยน้ำในอากาศ (VPD_{air}) โดยเก็บข้อมูลต้นเดียวกับที่วัดค่าการสะท้อนแสงและเก็บข้อมูลทันทีหลังจากวัดค่าการสะท้อนแสง บริเวณใบมันสำปะหลังที่แผ่ขยายเต็มที่ลำดับที่ 1 ถึง 5 และนำมาหาค่าเฉลี่ย

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การเตรียมข้อมูลการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม (Spectral data pre-processing) ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Field spectroradiometer จะเป็นข้อมูลที่มีการบันทึกช่วงคลื่นห่างกัน 1 nm ที่ช่วงคลื่น 350-2500 nm เป็นแบบ Raw DN ซึ่งจะมีการนำมาแปลงเป็นค่า Reflectance ด้วยซอฟต์แวร์ ViewSpec และวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการสะท้อนแสง (Reflectance) จากจำนวน 30 ครั้งต่อจุด ให้เหลือเพียงครั้งเดียวเพื่อเป็นตัวแทนค่าการสะท้อนในแต่ละจุด และมีการกำจัดค่าการสะท้อนที่เกิดจากอิทธิพลของ Atmospheric water absorption ได้แก่ ช่วงคลื่น 1351-1450 และ 1801-2500 nm (800 ช่วงคลื่น) จึงเป็นช่วงคลื่นที่ใช้สำหรับวิเคราะห์จำนวน 1350 ช่วงคลื่น

3.2 วิเคราะห์ช่วงคลื่นการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม (Spectral reflectance) ข้อมูลค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม จะถูกนำไปคำนวณเป็นช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน (Blue band) 450-510 nm ช่วงคลื่นสีเขียว (Green band) 530-590 nm ช่วงคลื่นสีแดง (Red band) 640-670 nm ช่วงคลื่นขอบแดง (Red-edge band) 680-730 nm ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR band) 850-880 nm และช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR band) 1570-1650 nm (USGS, 2016) สำหรับวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ และจัดเรียงข้อมูลเป็นช่วงคลื่นห่างกันทุก 10 nm สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์

3.3 วิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation indices) ข้อมูลช่วงคลื่นจะถูกนำไปคำนวณเป็นดัชนีพืชพรรณ 21 ดัชนี ซึ่งการประมวลผลข้อมูลโดยการทำดัชนี เป็นการสังเคราะห์ข้อมูล

ใหม่จากข้อมูลเดิมที่มีอยู่ ซึ่งข้อมูลใหม่หรือแบนด์ใหม่ที่เกิดขึ้นอาจจะได้เพียงแบนด์เดียวหรือ 2 แบนด์จากข้อมูลภาพดั้งเดิม ฟังก์ชันที่ใช้มีตั้งแต่ฟังก์ชันคณิตศาสตร์จนถึงสมการพหุนาม ซึ่งการทำดัชนีพืชพรรณจะบอกถึงสัดส่วนของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นผิวโดยคำนวณจากการนำช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณมาทำสัดส่วนซึ่งกันและกัน โดยจะมีการปรับเน้นสัญญาณการสะท้อนแสงของพืชพรรณ การลดความคลาดเคลื่อนของการสะท้อนแสงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของสภาพอากาศและไต่เรือนยอด หรือการลดสัญญาณรบกวนหรือผลกระทบจากการสะท้อนพลังงานของดินหรือการดูดซับพลังงานของชั้นบรรยากาศ ซึ่งดัชนีการสะท้อนแสงที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเครียดจากขาดน้ำของพืช แสดงดังตารางที่ 1

3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ (Statistical analysis) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างข้อมูลช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณกับข้อมูลสรีรวิทยาของพืช (อัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปากใบ และแรงดึงการระเหยน้ำ) ด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการถดถอยและหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และคัดเลือกช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณที่มีความสัมพันธ์กันมากและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($R^2 > 0.70$) จากนั้น ประเมินความถูกต้องของการประเมินข้อมูลสรีรวิทยาของพืชด้วยช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณที่เก็บจากพื้นที่จริง โดยการแทนค่าในสมการถดถอย และคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (RMSE) ด้วยสมการด้านล่าง

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

เมื่อ X_{obs} คือ ข้อมูลจริงที่วัดได้ที่ i , X_{model} คือ ข้อมูลจากการทำนายที่ i , n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

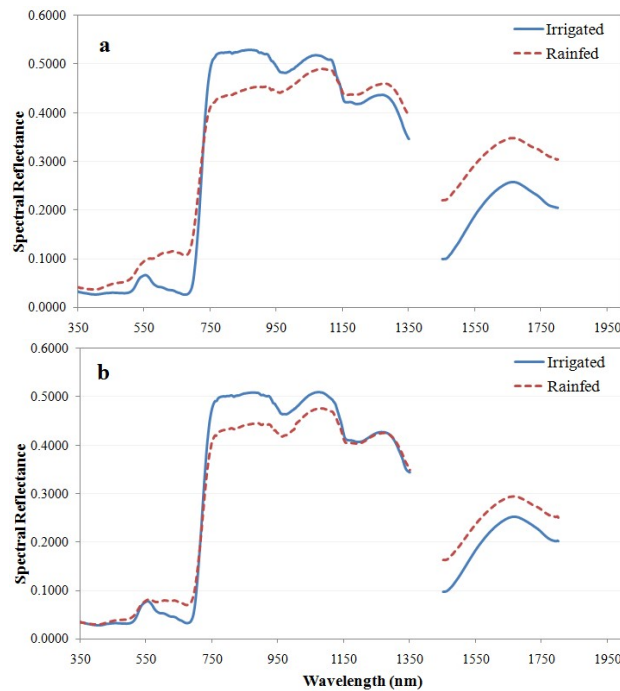
ผลการวิจัย

1. ข้อมูลช่วงคลื่นการสะท้อนแสงและข้อมูลสรีรวิทยา

1.1 ข้อมูลช่วงคลื่นการสะท้อนแสงที่เรือนยอด

ข้อมูลค่าเฉลี่ยช่วงคลื่นการสะท้อนแสงที่เรือนยอดมันสำปะหลังอายุ 3-5 เดือนที่มีการให้น้ำและไม่ให้น้ำของแปลงปลูกมันสำปะหลังเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน 2558 มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็น

350-700 nm มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.10 และแปลงที่ไม่มีการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแปลงที่มีการให้น้ำ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ 750-1300 nm มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.40 ถึง 0.53 โดยแปลงที่ไม่มีการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าแปลงที่มีการให้น้ำ ขณะที่ช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น 1570-1800 nm มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.10 ถึง 0.30 แปลงที่ไม่มีการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแปลงที่มีการให้น้ำ (รูปที่ 1)



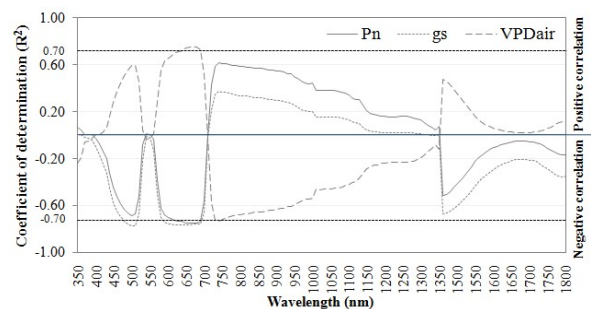
รูปที่ 1 ค่าเฉลี่ยข้อมูลช่วงคลื่นการสะท้อนแสงที่เรือนยอดมันสำปะหลังอายุ 3-5 เดือนที่มีการให้น้ำและไม่ให้น้ำของแปลงปลูกเดือนตุลาคม (a) และพฤศจิกายน 2558 (b)

2. ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลช่วงคลื่นการสะท้อนแสงกับข้อมูลสรีรวิทยา

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลช่วงคลื่นการสะท้อนแสงกับข้อมูลอัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปากใบ และแรงดึงการระเหยน้ำ พบว่า ช่วงคลื่นระหว่าง 620 ถึง 690 nm มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.70 ถึง 0.77 โดยมีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบ และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับแรงดึงการระเหยน้ำ (รูปที่ 2)

1.2 ข้อมูลสรีรวิทยา

ข้อมูลอัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปากใบ และแรงดึงการระเหยน้ำของมันสำปะหลังที่อายุ 3-5 เดือนของแปลงที่มีการให้น้ำเทียบกับแปลงที่ไม่มีการให้น้ำ พบว่า อัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบในแปลงที่ไม่มีการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าแปลงให้น้ำ ขณะที่ ค่าเฉลี่ยแรงดึงการระเหยน้ำในอากาศของแปลงที่ไม่มีการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแปลงให้น้ำ และเป็นเช่นเดียวกันทั้งในแปลงปลูกเดือนตุลาคม และพฤศจิกายน 2558 (ตารางที่ 2)



รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของช่วงคลื่นการสะท้อนแสงที่เรือนยอดกับข้อมูลสรีรวิทยา

ตารางที่ 1 ดัชนีพืชพรรณที่ใช้ในการศึกษา

Vegetation Indices	Full name	Equation	References
DWSI	Disease Water Stress Index	$(R_{802}+R_{547})/(R_{1657}+R_{682})$	Galvao et al. (2005)
DWSI-1	Disease Water Stress Index 1	R_{800}/R_{1660}	Apan et al. (2003)
DWSI-2	Disease Water Stress Index 2	R_{1660}/R_{550}	Apan et al. (2003)
DWSI-3	Disease Water Stress Index 3	R_{1660}/R_{680}	Apan et al. (2003)
DWSI-4	Disease Water Stress Index 4	R_{550}/R_{680}	Apan et al. (2003)
DWSI-5	Disease Water Stress Index 5	$(R_{800}-R_{550})/(R_{1660}+R_{680})$	Apan et al. (2003)
EVI	Enhanced Vegetation Index	$(2.5(NIR-RED))/(NIR+6RED-7.5BLUE+1)$	Huete et al. (2002)
MSI	Moisture Stress Index	R_{1599}/R_{819}	Hunt and Rock (1989) Ceccato et al. (2001)
NDII	Normalized Difference Infrared Index	$(R_{819}-R_{1649})/(R_{819}+R_{1649})$	Hardisky et al. (1983) Jackson et al. (2004)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	Rouse et al. (1974)
NDWI	Normalized Difference Water Index	$(R_{860}-R_{1240})/(R_{860}+R_{1240})$	Gao (1996)
NIR _v	Near Infrared Reflectance of Vegetation	$NDVI \times NIR$	Badgley et al. (2017)
OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
PRI	Photochemical Reflectance Index	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	Gamon et al. (1992)
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index	$(NIR-RED)/(NIR+RED+L) \times (1+L)$; $L=0.5$	Huete (1988)
SR 900/680	Simple Ratio 900/680	R_{900}/R_{680}	Genc et al. (2011)
SR 970/900	Simple Ratio 970/900	R_{970}/R_{900}	Penuelas et al. (1993a,1997,1998) Apan et al. (2003) Pinter et al. (2003)
SR 970/902	Simple Ratio 970/902	R_{970}/R_{902}	Penuelas et al. (1994)
WI	Water Index	R_{900}/R_{970}	Penuelas et al. (1997) Van Gaalen et al. (2007)
WBI3	Water Band Index 3	R_{950}/R_{900}	Penuelas et al. (1993b) Riedell and Blckmer (1999)
WBI4	Water Band Index 4	R_{895}/R_{972}	Serrano et al. (2000)

R: Red band, G: Green band, B: Blue band, NIR: Near Infrared, R_x: Reflectance at x nm

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลังที่อายุ 3-5 เดือนของชุดข้อมูลสำหรับการสร้างสมการทำนายและตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (n=18)

Parameter	Function	Calibration data		Validation data	
		Irrigated	Rainfed	Irrigated	Rainfed
P_N	Min	23.38	7.07	18.15	5.05
	Max	31.72	22.60	29.88	20.28
	Mean	27.24	15.32	24.55	13.78
	SD	2.90	4.95	5.94	5.20
g_s	Min	0.33	0.07	0.20	0.05
	Max	0.56	0.23	0.35	0.20
	Mean	0.41	0.14	0.27	0.11
	SD	0.08	0.06	0.07	0.06
VPD_{air}	Min	2.25	3.20	2.89	3.58
	Max	3.34	6.73	3.43	6.77
	Mean	2.78	5.10	3.14	4.52
	SD	0.49	1.17	0.27	1.18

P_N : อัตราการสังเคราะห์แสง (หน่วย $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), g_s : การชักนำการเปิดปากใบ (หน่วย $\text{molH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), VPD_{air} : แรงดึงการระเหยน้ำในอากาศ (หน่วย kPa)

จากความสัมพันธ์ของช่วงคลื่นการสะท้อนแสงกับข้อมูลสรีรวิทยา สามารถนำสมการความสัมพันธ์มาประเมินข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลังได้โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลในพื้นที่จริงที่เก็บในเดือนตุลาคม 2558 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนาย โดยการแทนค่าในสมการและคำนวณความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ผลการศึกษาพบว่า ช่วงคลื่น 680 nm สามารถใช้ประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลน้อยที่สุดเท่ากับ 8.25 และ 0.18 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากกว่า 0.80 ขณะที่ผลการประเมินแรงดึงการระเหยน้ำของอากาศยังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าน้อยกว่า 0.80 (ตารางที่ 3)

3. ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดัชนีพืชพรรณกับข้อมูลสรีรวิทยา

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดัชนีพืชพรรณกับข้อมูลสรีรวิทยา พบว่า ดัชนี DWSI DWSI-1 DWSI-3 DWSI-5 EVI MSI NDII NDVI NDWI OSAVI PRI SAVI และ

SR900/680 มีความสัมพันธ์กับอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบ โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.70 และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติระหว่างแปลงที่มีการให้น้ำและไม่ให้น้ำ แสดงดังตารางที่ 4

จากความสัมพันธ์ของดัชนีพืชพรรณกับข้อมูลสรีรวิทยา (ตารางที่ 4) นำสมการความสัมพันธ์มาประเมินข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลังได้โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลในพื้นที่จริงที่เก็บในเดือนตุลาคม 2558 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนาย โดยการแทนค่าในสมการและคำนวณความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

ผลการศึกษาพบว่า ดัชนี SAVI สามารถใช้ประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการเปิดปากใบได้ดีที่สุดรองลงมา คือ ดัชนี EVI และ OSAVI โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอัตราการสังเคราะห์แสงเท่ากับ 2.99 3.16 และ 3.52 ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการชักนำการเปิดปากใบเท่ากับ 0.04 0.05 และ 0.06 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบจำลองการสะท้อนแสงที่เรื้อนยอดกับข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลัง

Output variable	Input variable	Calibration data (n=18)		Validation data (n=18)	
		Model expression	R-squared	RMSE	R-squared
P _N	620	Y = -358.2x + 43.3455	-0.73**	9.7041	0.93
	630	Y = -336.99x + 41.8576	-0.74**	9.3903	0.93
	640	Y = -323.14x + 40.7632	-0.74**	9.2672	0.93
	650	Y = -308.61x + 38.7037	-0.75**	8.8998	0.93
	660	Y = -298.77x + 37.3545	-0.75**	8.6286	0.94
	670	Y = -293.61x + 36.0216	-0.76**	8.3422	0.94
	680	Y = -288.66x + 35.8996	-0.75**	8.2467	0.94
	690	Y = -281.45x + 38.2739	-0.74**	8.6164	0.94
g _s	620	Y = -7.57x + 0.7373	-0.76**	0.2254	0.87
	630	Y = -7.1x + 0.7048	-0.77**	0.2171	0.87
	640	Y = -6.8x + 0.6806	-0.77**	0.2138	0.87
	650	Y = -6.45x + 0.6348	-0.77**	0.2029	0.88
	660	Y = -6.22x + 0.6051	-0.76**	0.1956	0.88
	670	Y = -6.08x + 0.5752	-0.76**	0.1875	0.88
	680	Y = -5.97x + 0.5728	-0.75**	0.1847	0.88
	690	Y = -5.9x + 0.6269	-0.76**	0.1980	0.87
VPD _{air}	620	Y = 72.39x - 0.5314	0.70**	3.6258	0.72
	630	Y = 68.22x - 0.2388	0.70**	3.0740	0.72
	640	Y = 65.7x - 0.0358	0.71**	2.7385	0.72
	650	Y = 63.08x + 0.3619	0.73**	2.6263	0.72
	660	Y = 61.26x + 0.6259	0.74**	2.5805	0.72
	670	Y = 60.29x + 0.894	0.74**	2.5277	0.72
	680	Y = 59.28x + 0.919	0.74**	2.5074	0.72
	690	Y = 57.59x + 0.4453	0.72**	2.5677	0.72

NS: Not significant, ** Correlation is significant at the 0.01 level, * Correlation is significant at the 0.05 level

วิจารณ์ผลการวิจัย

1. ดัชนี SAVI EVI และ OSAVI มีความสัมพันธ์กับข้อมูลสรีรวิทยาดีกว่าดัชนี NDVI เนื่องจากดัชนีเหล่านี้ปรับปรุงมาจากดัชนี NDVI โดยใช้ค่าปัจจัยปรับแก้เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) หรือผลกระทบจากการสะท้อนพลังงานของดินหรือการดูดซับพลังงานของชั้นบรรยากาศ

2. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงคลื่นการสะท้อนแสง ดัชนีพืชพรรณ และข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลังในสภาพแปลงที่มีการให้น้ำและไม่ให้น้ำนั้น สามารถนำช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการประเมินสถานะเครียดของมันสำปะหลังและพืชอื่นๆ เชิงพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเวลาและพื้นที่ (Temporal and spatial) เพื่อให้มีการบริหารจัดการน้ำที่มีอยู่ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของดัชนีพืชพรรณกับกับข้อมูลสรีรวิทยาของมันสำปะหลัง (n=18)

Indices	P_N	g_s	VPD _{air}
DWSI	0.76**	0.79**	NS
DWSI-1	0.72**	0.76**	NS
DWSI-2	NS	-0.29*	NS
DWSI-3	0.80**	0.77**	NS
DWSI-4	-0.24*	NS	0.28*
DWSI-5	0.76**	0.79**	NS
EVI	0.80**	0.62**	NS
MSI	-0.71**	-0.70**	NS
NDII	0.72**	0.73**	NS
NDVI	0.81**	0.70**	NS
NDWI	0.69**	0.69**	NS
NIR _v	NS	0.53**	NS
OSAVI	0.81**	0.65**	NS
PRI	0.77**	0.70**	NS
SAVI	0.78**	0.58**	NS
SR 900/680	0.79**	0.80**	NS
SR 970/900	-0.61**	-0.59**	0.53**
SR 970/902	-0.62**	-0.58**	0.54**
WI	0.62**	0.60**	-0.53**
WBI3	-0.56**	-0.52**	0.51**
WBI4	0.61**	0.59**	-0.51**

NS: Not significant, ** Correlation is significant at the 0.01 level, * Correlation is significant at the 0.05 level

ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์และความคลาดเคลื่อนของข้อมูลของดัชนีพืชพรรณที่คัดเลือกกับข้อมูลสรีรวิทยา

Output variable	Input variable	Calibration data set (n=18)	Validation data set (n=18)	
		Model expression	RMSE	R-squared
P_N	DWSI	$Y = 18.209x - 10.165$	3.8005	0.81
	DWSI-1	$Y = 20.676x - 14.898$	3.6923	0.83
	DWSI-3	$Y = 3.44x + 0.4344$	4.3729	0.75
	DWSI-5	$Y = 18.159x - 10.19$	3.7891	0.81
	EVI	$Y = 46.27x - 10.6837$	3.1616	0.87
	MSI	$Y = -53.178x + 49.669$	4.1356	0.90
	NDII	$Y = 72.24x + 1.9274$	3.8454	0.87
	NDVI	$Y = 67.98x - 32.3449$	4.6621	0.92
	OSAVI	$Y = 78.32x - 26.3318$	3.5230	0.91
	PRI	$Y = 253.94x + 37.126$	5.5236	0.76
	SAVI	$Y = 151.06x - 19.993$	2.9929	0.90
	SR 900/680	$Y = 1.35x + 6.2908$	4.3588	0.74

ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์และความคลาดเคลื่อนของข้อมูลของดัชนีพืชพรรณที่คัดเลือกกับข้อมูลสรีรวิทยา (ต่อ)

Output variable	Input variable	Calibration data set (n=18)		Validation data set (n=18)	
		Model expression	RMSE	R-squared	
g _s	DWSI	$Y = 0.3833x - 0.391$	0.0782	0.85	
	DWSI-1	$Y = 0.4382x - 0.4956$	0.0791	0.86	
	DWSI-3	$Y = 0.07x - 0.1518$	0.0980	0.81	
	DWSI-5	$Y = 0.3825x - 0.3919$	0.0779	0.85	
	EVI	$Y = 0.8418x - 0.3162$	0.0464	0.85	
	MSI	$Y = -1.0891x + 0.8512$	0.0902	0.87	
	NDII	$Y = 1.5026x - 0.1321$	0.0837	0.88	
	NDVI	$Y = 1.3x - 0.7586$	0.0926	0.88	
	OSAVI	$Y = 1.44x - 0.6125$	0.0620	0.87	
	PRI	$Y = 4.995x + 0.5799$	0.1039	0.85	
	SAVI	$Y = 2.6944x - 0.4716$	0.0446	0.85	
	SR 900/680	$Y = 0.03x - 0.0416$	0.1006	0.80	

NS: Not significant, ** Correlation is significant at the 0.01 level, * Correlation is significant at the 0.05 level

สรุปผลการวิจัย

1. ช่วงคลื่น 680 nm และดัชนี SAVI มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้น (Linear regression) กับข้อมูลสรีรวิทยา โดยสามารถใช้ประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงและการชักนำการปิดปากใบในช่วงเที่ยงวัน โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.70

2. การตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนายพบว่า ช่วงคลื่น 680 nm และดัชนี SAVI สามารถใช้ประเมินการชักนำการเปิดปากใบ โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เท่ากับ 0.18 และ 0.06 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.88 และ 0.87 ตามลำดับ และช่วงคลื่นและดัชนีดังกล่าวยังสามารถใช้ประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เท่ากับ 8.25 และ 2.99 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.94 และ 0.90 ตามลำดับ

3. งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับพื้นที่ศึกษาหรือพันธุ์อื่นๆ ได้ ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดที่รวดเร็ว และสามารถขยายผลไปในเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลกับการจัดการน้ำให้มีประสิทธิภาพหรือการเกษตรแม่นยำเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตของพืชได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิจัยของภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร สาขาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ เครื่อง LI-6400XT และผู้ประสานงานเพื่อศึกษาและเก็บข้อมูลในแปลงทดลองของโครงการวิจัยเรื่อง "การเจริญเติบโต พัฒนาการ และสรีรวิทยา การตอบสนองของมันสำปะหลังพันธุ์ต่างกันต่อสภาพแวดล้อมแต่ละฤดูกาลผลิต" ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาและชีวเคมีด้านพืช ไปโอเทค ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง LI-6400XT เพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และฝ่ายบริหารจัดการคลังเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- จรรย์ธร บุญญาภาพ. (2557). หลักการรับรู้ระยะไกลด้านนิเวศวิทยาพืชพรรณและการอนุรักษ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนติ้ง เฮาส์. หน้า 315-323.
- เฉลิมพล ชมพเพชร. (2535). สรีรวิทยาการผลิตพืชไร่. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนติ้ง เฮาส์. หน้า 137-144.
- ศานิต สวัสดิ์กาญจน์. (2557). พืชอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนติ้ง เฮาส์. หน้า 88-94.

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2559). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2559. แหล่งข้อมูล: http://www.oae.go.th/download/download_journal/2560/yearbook59.pdf. ค้นเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2560.
- โอภาช บุญเส็ง. (2552). โพรโตคอลหรือต้นแบบของการผลิตมันสำปะหลัง ในดินชุดหลักของประเทศไทย. แหล่งข้อมูล: http://www.thaitapiocastarch.org/article14_th.asp. ค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2558.
- Apan, A., Alex, H., Stuart, Ph. and John, M. (2003). Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 hyperion imagery for discriminating sugarcane disease. Available source: https://eprints.usq.edu.au/8061/1/Apan_Held_Phinn_Markley_SSI_2003_PV.pdf. November 15, 2016.
- Badgley, G., Field, C.B. and Berry, J.A. (2017). Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances* 3(3).
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S. and Gregoire, J. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* 77(1): 22-33.
- Galvao, L.S., Formaggio, A.R. and Tisot, D.A. (2005). Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment* 94(4): 523-534.
- Gamon, J.A., Penuelas, J. and Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41(1): 35-44.
- Gao, B.C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 257-266.
- Genc, L., Demirel, K., Camoglu, G., Asik, S. and Smith, S. (2011). Determination of Plant Water Stress Using Spectral Reflectance Measurements in Watermelon (*Citrullus vulgaris*). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 11(2): 296-304.
- Govender, M., Dye, P.J., Weiersbye, I.M., Witkowski, E.T.F. and Ahmed, F. (2009). Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress. Available source: <http://www.wrc.org.za>. June 13, 2013.
- Hardisky, M., Klemas, V. and Smart, R. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina Alterniflora* Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49(1): 77-83.
- Hillocks, R.J., Thresh, J.M. and Bellotti, A.C. (2002). *In Cassava: biology, production and utilization*. New York: CABI Publishing. pp.82-83.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3): 295-309.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2): 195-213.
- Hunt, J.E. and Rock, B. (1989). Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30(1): 43-54.
- Jackson, T., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., Doriaswamy, P. and Hunt, E.R.. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment* 92(4): 475-482.
- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and Save, R. (1993a). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing* 14(10): 1887-1905.
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Griffin, K.L. and Field, C.B. (1993b). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment* 46(2): 110-118.
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J. and Field, C.B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* 48(2): 135-146.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R. and Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 18(13): 2869-2875.

- Peñuelas, J. and Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trend in Plant Science* 3(4): 151-156.
- Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T. and Upchurch, D.R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69(6): 647-664.
- Riedell, W.E. and Blackmer, T.M. (1999). Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat. *Crop Science* 39(6): 1835-1840.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55(2): 95-107.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. Available source: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750020419.pdf>. May 20, 2016.
- Serrano, L., Susan, S.L., Roberts, D.A., Gamon, J.A. and Peñuelas, J. (2000). Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data. *Remote Sensing of Environment* 74(3): 570-581.
- Sofia, B.L. (2010). Vegetation analysis using remote sensing. Available source: http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/513/mod_page/content/72/LA_NFRI_Sofia.pdf. September 5, 2016
- USGS. (2016). What are the band designations for the Landsat satellites?. Available source: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>. May 20, 2016.
- Van Gaanlen K.E., Flanagan, L.B. and Peddle D.R. (2007). Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and spectral reflectance in Sphagnum moss at varying water contents. *Oecologia* 153(1): 19-28.

