

การประมาณผลผลิตข้าวด้วยค่าดัชนีพืชพรรณ โดยใช้ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่นจากอากาศยานไร้คนขับ

Rice Yield Estimation with Vegetation Index Using Multispectral Imagery from Unmanned Aerial Vehicle

พงศ์ หลวงมูล* และ ถาวร อ่อนประไพ
Pong Loungmoon* and Thaworn Onpraphai

ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200
Department of Plant and Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

*Corresponding author: Email: Pong_loungmoon@cmu.ac.th

(Received: 30 November 2020; Accepted: 18 March 2021)

Abstract: Multispectral high - resolution imagery from unmanned aerial vehicle (UAV) of rice (Chai Nat 1 varieties) in the research plots at Mae Hia Agricultural Research, Demonstration and Training Center, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University was analyzed spatially to crop spectral parameters with a program of geographic information system (GIS) in terms of three vegetation index (VI) including two physical collaborating parameters. These parameters were developed collaborating with the rice yield data from crop cutting as the models in terms of simple and multiple linear regression equations to estimate rice yield in experimental plots. As a result, found that, the most reliable model was developed with all crop spectral parameters from unmanned aerial vehicle (UAV) in terms of multiple linear regression equation that is $Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.9X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.2X_5$ with the most determination coefficient of 0.879. In conclusion, the model can provided closely rice yield estimation with observed yields. It can be usefully implemented to predict rice yield at the plot level.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, multispectral imagery, vegetation index, rice yield estimation

บทคัดย่อ: ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในแปลงวิจัยที่ศูนย์วิจัยสถิติและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชในเชิงพื้นที่ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) ในลักษณะค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) 3 รูปแบบ และค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพ 2 ค่า และถูกนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและพหุคูณเพื่อประมาณการผลผลิตข้าวในแปลงทดลองร่วมกับค่าผลผลิตข้าวที่ได้จากการตั้งแปลงเก็บเกี่ยว ผลการศึกษา พบว่า แบบจำลองที่น่าเชื่อถือมากที่สุดถูกพัฒนาด้วยค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชทั้งหมด จากอากาศยานไร้คนขับในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ คือ $Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.9X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.2X_5$ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากที่สุดเท่ากับ 0.879 ผลการทดสอบสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถให้ค่าประมาณการผลผลิตข้าวที่ใกล้เคียงกับค่าผลผลิตจริง สามารถใช้เป็นประโยชน์ต่อการพยากรณ์ผลผลิตข้าวในระดับแปลงได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น ค่าดัชนีพืชพรรณ การประมาณการผลผลิตข้าว

คำนำ

ข้าวเป็นพืชหลักที่ใช้บริโภคภายในประเทศและส่งออกตลาดต่างประเทศ ในปีการเพาะปลูก 2561/62 ประเทศไทยมีผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวข้าวนาปีปริมาณรวมทั้งสิ้น 25,177,856 ตัน โดยสามารถส่งออกได้ประมาณ 8,000,000 ตัน มูลค่าประมาณ 136,000 ล้านบาท (Office of Agricultural Economics, 2019) อย่างไรก็ตาม ที่ผ่านมากษัตริกรผู้ผลิตข้าวมักประสบปัญหาปริมาณผลผลิตข้าวตกต่ำและราคาขายไม่แน่นอน โดยหากผู้ผลิตสามารถทราบข้อมูลผลผลิตและความสมบูรณ์ของข้าวในช่วงระยะที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้สามารถบริหารจัดการและแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (Land Development Department, 2006) ในปัจจุบัน หลายประเทศได้ปรับเปลี่ยนไปสู่ยุคการเกษตรสมัยใหม่ที่มีการวิจัยพัฒนาด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดระยะเวลาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านอาหารของมนุษย์ที่เพิ่มมากขึ้น

ในปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle: UAV) เป็นเครื่องมือหนึ่งในการสำรวจข้อมูลระยะไกล (remote sensing) ที่ถูกนำมาใช้อย่างมากในการเกษตรสมัยใหม่เพื่อการสำรวจพื้นที่เพาะปลูก การทำแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต และการติดตามผลผลิตทางการเกษตร ตลอดจนการเฝ้าระวังความเสียหายที่อาจเกิดจากโรค

และแมลงศัตรูพืช รวมถึงเพื่อการจัดการทรัพยากรทางการเกษตรที่จำเป็น ที่สำคัญคือสามารถใช้คาดการณ์ผลผลิตพืชในแปลงเพาะปลูกได้ (Gevaert *et al.*, 2014) ซึ่งชุดข้อมูลคาดการณ์ผลผลิตสุดท้ายที่น่าจะเป็นไปได้เป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปเรียกว่า “การประมาณผลผลิต” ซึ่งให้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบจากหลายปัจจัยที่สำคัญ เช่น ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ธาตุอาหาร ภูมิอากาศ และข้อมูลผลผลิตก่อนหน้านี้ (Krishna, 2018) ซึ่งเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสามารถบันทึกภาพผลผลิตทางเกษตรและบูรณาการร่วมกับเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (geo - informatics technology) ทำการคำนวณพารามิเตอร์ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นของพืช (crop spectral parameters) ที่ได้จากข้อมูลภาพถ่าย ในรูปแบบต่าง ๆ ของค่าดัชนีพืชพรรณ (vegetation index: VI) เพื่อใช้เป็นปัจจัยหนึ่งในการประมาณการผลผลิตพืชได้อย่างแม่นยำ

ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) เป็นค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์กับพืชพรรณที่สะท้อนปริมาณแสงตกกระทบในพื้นที่เพาะปลูกพืชด้วยสัดส่วนที่แตกต่างกันในช่วงเวลาที่ต่างกัน ทำให้ได้ข้อมูลสถานะของพืชรวมถึงสภาพความแข็งแรงและความผิดปกติของพืชนั้นในพื้นที่แปลงปลูก ซึ่งสิ่งปกคลุมที่เป็นพืชพรรณสมบูรณ์แข็งแรงถูกอธิบายด้วยการดูดซับของใบพืชในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red: 0.6 - 0.7 μm) ของพลังงานคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า และสะท้อนค่าช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดใกล้ (NIR: 0.7 and 1.1 μm). เป็นส่วนใหญ่ (López-Pérez *et al.*, 2015) ทั้งนี้ ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) เป็นการวัดค่าแบบอัตราส่วนด้วยช่วงค่าระหว่าง - 1.000 ถึง 1.000 โดยค่าเป็นลบ (- 1.000 ถึง 0.000) มีความสัมพันธ์กับข้อมูลความชื้นและแหล่งน้ำสำหรับค่าบวกแต่ค่อนข้างต่ำและเข้าใกล้ 0.000 (ประมาณ 0.200 to 0.400) แสดงถึงพื้นที่ที่มีพืชอยู่บ้างแต่น้อยมาก เช่น พุ่มไม้ ทุ่งหญ้า ในขณะที่ค่าเป็นบวกและยิ่งสูงมาก (เข้าใกล้ 1.000) เป็นพื้นที่พืชพรรณสีเขียวที่มีความอุดมสมบูรณ์ เช่น พื้นที่ป่าฝนเขตร้อน ป่าดิบชื้น เป็นต้น (Weier and Herring, 2000)

โดยทั่วไปค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) สามารถประยุกต์วิธีการคำนวณไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานได้อย่างหลากหลาย ตัวอย่างเช่น ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (normalized difference vegetation index: NDVI) (Rouse *et al.*, 1974; Thompson *et al.*, 2015) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (green normalized difference vegetation index: GNDVI) (Gitelson *et al.*, 1996) และค่าดัชนีพืชพรรณแบบปรับปรุงด้วยข้อมูล 2 ช่วงคลื่น (two - band enhanced vegetation index: EVI2) (Jiang *et al.*, 2008) เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อบันทึกข้อมูลภาพและวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการจัดการทรัพยากรและการประมาณการผลผลิตพืชทางการเกษตรเชิงพื้นที่จำนวนมาก (Krishna, 2018) ตัวอย่างเช่น Basso *et al.* (2013) ใช้อากาศยานไร้คนขับบันทึกภาพและวิเคราะห์ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณสีเขียวและข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวของพื้นที่ปลูกพืช (crop surface model: CSM) เพื่อจำแนกชนิดพืช ติดตามการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก และร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นเพื่อการคาดการณ์ผลผลิตพืชในแปลง ในขณะที่ Grassi (2014) ใช้อากาศยานไร้คนขับทำแผนที่ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) ของแปลงเพาะปลูกพืชในฤดูการเพื่อวางแผนการให้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพในระบบการเกษตรแบบแม่นยำ (precision agriculture)

ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) เป็นค่าที่อ่อนไหวและสัมพันธ์กับพืชพรรณในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (humidity) มวลชีวภาพ (biomass) ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll concentration) ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index; LAI) ความหนาแน่นของพืชพรรณ (vegetation density) ระยะการเจริญเติบโต (growth stages) ช่วงการออกดอก (panicle stage) ไนโตรเจนในพืช (nitrogen in the plant) และการตรวจจับวัชพืช (weed detection) เป็นต้น (Barrero *et al.*, 2016) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ของค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) จึงทำให้สามารถประเมินสถานภาพของพืชชนิดต่าง ๆ รวมถึงต้นข้าวที่อยู่ในแปลงได้

นอกจากนี้ ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (canopy cover : CC) และค่าความสูงของต้นข้าว (plant height: PH) ยังมีส่วนช่วยในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อการประมาณผลผลิตของข้าวในฐานะเป็นค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพของข้าว โดยค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) สามารถคำนวณได้โดยตรงจากข้อมูลภาพแปลงทดลองปลูกข้าวโดยกำหนดได้จากค่าสัดส่วนของการปกคลุมพื้นที่ของต้นข้าวต่อพื้นที่ส่วนล่างทั้งหมด (หรือพื้นที่แปลงทดลองทั้งหมดที่ปลูกข้าว) (Guevara-Escobar *et al.*, 2005) Guevara-Escobar *et al.* (2005) อธิบายว่า ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) ที่มีความสัมพันธ์และเหมาะสมกับค่าผลผลิตข้าวที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.65 - 0.75 ในขณะที่ ค่าความสูงของต้นข้าว (PH) โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตข้าวซึ่งในชุดข้อมูลภาพที่บันทึกได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ซึ่งคำนวณได้โดยตรงจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขของภูมิประเทศ (digital surface model: DSM) ของแปลงทดลอง

ในการศึกษานี้ ได้ใช้ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ของแปลงปลูกข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ณ ศูนย์วิจัยสาริตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืช (crop spectral parameters) ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (geographic information system: GIS) ในลักษณะ

ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (2) ดัชนีความต่างของพืชพรรณสีเขียว และ (3) ดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (triangular greenness index: TGI) รวมถึงค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพของข้าว 2 ค่า คือ (4) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าวและ (5) ค่าความสูงของต้นข้าว เพื่อนำมาพัฒนาเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย และพหุคูณ (simple and multiple linear regression) เพื่อการประมาณการผลผลิตของข้าวในแปลงทดลอง ร่วมกับค่าผลผลิตข้าวที่ได้จากการตัดแปลงเก็บเกี่ยว (crop cutting) เพื่อทำการประเมินหาแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนและพัฒนาปรับปรุงผลผลิตข้าวต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการศึกษา:

ดำเนินการปลูกด้วยวิธีการปักดำข้าวพันธุ์ชยันต 1 ในพื้นที่ 600 ตารางเมตร แบ่งแปลงทดลองขนาด 4 x 3 เมตร (12 ตารางเมตร) จำนวน 48 แปลง ณ ศูนย์วิจัยสาริตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2561 โดยเก็บบันทึกข้อมูลภาพแบบหลาย

ช่วงคลื่น ด้วยกล้องบันทึกข้อมูลภาพเชิงเลข จำนวน 2 ตัว แบ่งเป็น (1) กล้องบันทึกข้อมูลภาพในช่วงคลื่นที่สายตามองเห็น 3 ช่วงคลื่น (visible: blue, green, red) sensor 1" CMOS Sony Exmor IMX206 และ (2) กล้องบันทึกข้อมูลภาพในช่วงคลื่นที่สายตามองเห็นแสงสีแดง (visible: red) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near - Infrared) MAPIR Survey 2 Camera - NDVI ที่ระดับความสูงบิน 20 เมตร ด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 4 Pro โดยใช้หลักการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศ (aerial photogrammetry) ในวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าว 90 วันหลังการปลูกและอยู่ในระยะการพัฒนารวง (reproductive phase) เพื่อนำข้อมูลภาพมาทำการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นของพืชจากกล้องบันทึกข้อมูลจำนวน 2 ตัว (Figure 1) มาทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) ใน 3 รูปแบบที่คาดว่าจะสามารถตอบสนองและมีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตของข้าวในแปลงทดลองได้อย่างใกล้เคียงที่สุด ได้แก่ (1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) (2) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (GNDVI) และ (3) ค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI) รวมถึงค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพของข้าว 2 ค่า ได้แก่ (4) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) (Hunt *et al.*, 2011)

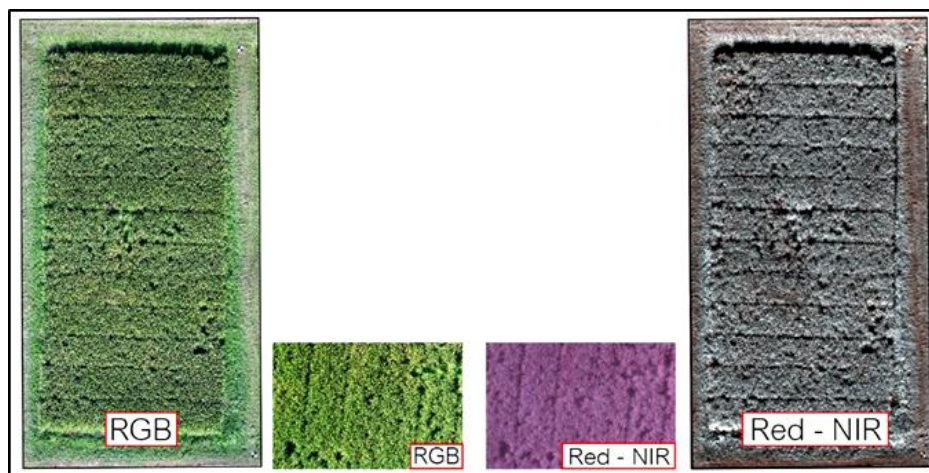


Figure 1. Example of mosaicking and partial images of a rice plot from UAV with visible (R,G,B) and Red - Near Infrared (Red - NIR) bands

และ (5) ค่าความสูงของต้นข้าว (PH) ค่าดัชนีเหล่านี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการติดตามความสมบูรณ์แข็งแรงและประมาณการผลผลิตและชีวมวลของพืช (Ren *et al.*, 2008) สำหรับค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI) เป็นค่าดัชนีพืชพรรณที่ได้มาจากข้อมูลภาพในช่วงคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น (visible: red, green, blue) (Figure 2) ซึ่งเป็นค่าสะท้อนของการตอบสนองของ

ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชที่มีผลต่อการติดตามพัฒนาการของพืชและผลผลิต (Hunt *et al.*, 2013) ส่วนค่าความสูงของต้นข้าว (PH) ถูกคำนวณจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขของภูมิประเทศที่วัดค่าความสูงต่างเรือนยอดและพื้นผิวภูมิประเทศ ซึ่งคำนวณได้ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcGIS 10.5 สมการต่าง ๆ ดัง Table 1

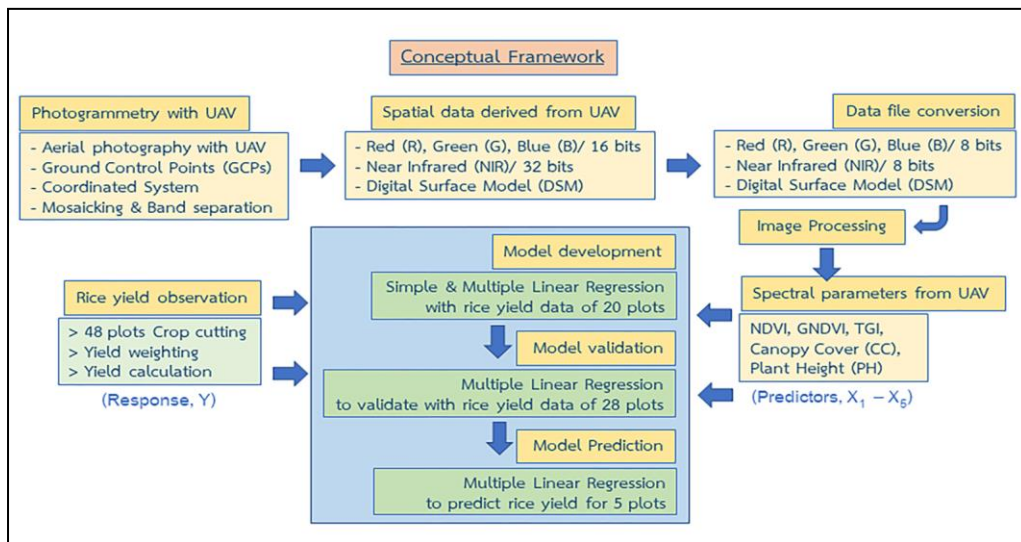


Figure 2. Conceptual framework of the research

Table 1. Spectral parameters derived from two digital cameras with UAV

Cameras	Parameters	Equations	References
Multispectral	NDVI	$= \text{NIR} - \text{Red} / \text{NIR} + \text{Red}^1$	Rouse <i>et al.</i> , 1974; Thompson <i>et al.</i> , 2015;
	GNDVI	$= \text{NIR} - \text{Green} / \text{NIR} + \text{Green}^2$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996; Hunt <i>et al.</i> , 2011
	Canopy Cover (CC)	$= \frac{\text{no. of crop pixels in AOI}}{\text{overall number of pixels in the AOI}}^3$	Hunt <i>et al.</i> , 2011
	Triangular Greenness Index (TGI)	$= \text{Green} - (0.39 \times \text{RED}) - (0.61 \times \text{Blue})$	Hunt <i>et al.</i> , 2011
RGB	Plant Height (PH)	$= (\text{Crop canopy} - \text{Soil surface})$	Malambo <i>et al.</i> , 2018

Remark ¹ NIR and Red are pixel values in near infrared and red channels, respectively

² Green are pixel values in green channel / ³ AOI is Areas of Interest

จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างข้อมูลผลผลิตข้าว โดยวิธีการดัดแปลงเก็บเกี่ยวในพื้นที่ขนาด 1 ตารางเมตร จำนวน 48 แปลง ซึ่งวัดน้ำหนักเมล็ดและปรับความชื้นเมล็ดที่ 14 % ในวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2561 เพื่อพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและพหุคูณ โดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น (1) การพัฒนาแบบจำลอง (2) การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และ (3) การทำนายผลผลิตข้าวโดยใช้ข้อมูลผลผลิตข้าวและค่าการสะท้อนช่วงคลื่นของพืชจากแปลงทดลองจำนวน 20, 28, และ 5 แปลง ตามลำดับ (Figure 2) และประเมินค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ที่บ่งบอกความเชื่อมั่นของสมการ (Chenga *et al.*, 2014)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นของพืชจากอากาศยานไร้คนขับ (Crop spectral parameters from UAV)

ผลจากการประมวลผลภาพ (image processing) ทำให้ได้ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นของพืช (crop spectral parameters) จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) จากนั้นนำไปแปลงค่าข้อมูลเชิงเลข (digital number: DN) ให้เป็นค่ามาตรฐาน 8 bits เพื่อนำไป

คำนวณค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) (2) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (GNDVI) และ (3) ค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI) รวมถึงค่าตัวแปรรวมทางกายภาพของข้าว ได้แก่ (4) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) และ (5) ค่าความสูงของต้นข้าว (PH) (Figure 3) โดยพบว่าค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) มีค่าอยู่ระหว่าง -0.123 ถึง -0.093; ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณสีเขียว (GNDVI) -0.114 ถึง 0.015; ค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI) 0.356 ถึง 0.498; ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) 0.630 ถึง 0.846 และ ค่าความสูงของต้นข้าว (PH) 0.611 ถึง 0.766 ตามลำดับ (Figure 3) ซึ่งค่าดัชนีพืชพรรณและค่าตัวแปรรวมทางกายภาพของข้าวเหล่านี้ จะใช้เป็นตัวแปรประมาณการ (predictors, $X_1 - X_5$) ในการพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวโดยคาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในแปลงทดลอง

2. ค่าผลผลิตข้าวในแปลงทดลอง (Rice yield observation)

ค่าผลผลิตข้าวต่อไร่ในแปลงทดลองได้จากวิธีการดัดแปลงเก็บเกี่ยว (crop cutting) โดยทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2561 ในพื้นที่ขนาด

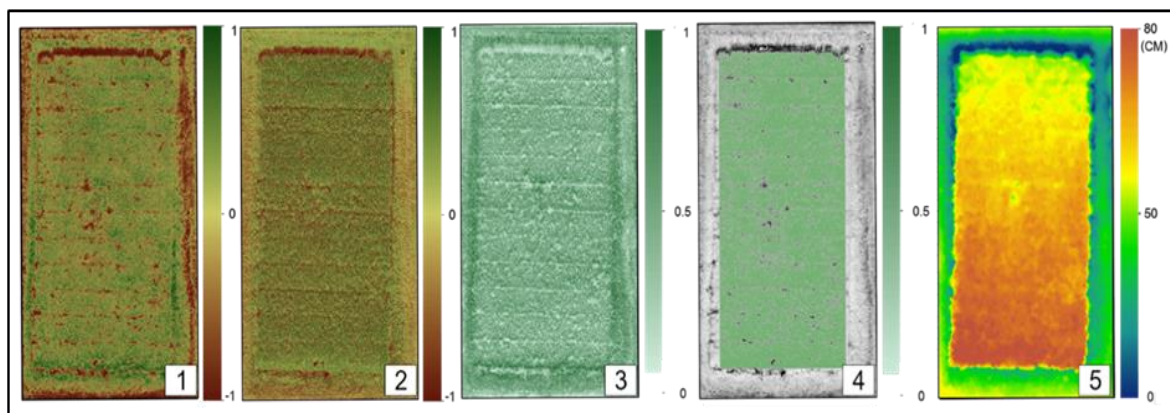


Figure 3. Map shows (1) Normalized difference vegetation index (NDVI), (2) Green normalized difference vegetation index (GNDVI), (3) Triangular greenness index (TGI), (4) Canopy cover (CC), and (5) Plant height (PH)

12 ตารางเมตร จำนวน 48 แปลง นำเมล็ดข้าวมาชั่ง วัตุน้ำหนักและปรับความชื้นเมล็ดให้เป็นมาตรฐานเดียวกันที่ 14 % ได้ผลผลิตข้าวต่อไร่ของทั้ง 48 แปลง (Table 2) โดยพบว่า ผลผลิตข้าวที่ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 889.63 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 35) ผลผลิตข้าวที่สูงที่สุด

เท่ากับ 1,637.93 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 33) โดยเฉลี่ย ผลผลิตข้าวทั้ง 48 แปลง เท่ากับ 1,176.17 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งผลผลิตข้าวต่อไร่ที่ได้จากวิธีการตั้งแปลงเก็บเกี่ยวนี้ จะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง (Response, Y) ในการพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวต่อไป

Table 2. Rice yield estimation (in the stage of model development and validation) with spectral parameters by multispectral high - resolution imagery from unmanned aerial vehicle (UAV) in November 7, 2018

Group	Plot	Rice yield (crop cutting)	Rice yield estimation	Residuals
		(kg / rai)	Kg / rai	
1	1	1,340.64	1,392.11	- 51.47
	2	1,362.68	1,458.29	- 95.61
	3	1,368.94	1,403.69	- 34.75
	4	1,508.69	1,463.78	44.91
	5	1,454.19	1,463.60	- 9.41
	6	1,590.92	1,518.81	72.11
	7	1,238.79	1,227.82	10.97
	8	1,344.12	1,402.33	- 58.21
	9	1,359.44	1,268.14	91.30
	10	1,217.96	1,241.90	-23.94
	11	1,545.41	1,491.67	53.74
	12	1,359.02	1,417.50	-58.48
	13	1,301.75	1,337.44	- 35.69
	14	1,441.47	1,422.81	18.66
	15	1,312.84	1,274.16	38.68
	16	1,344.92	1,319.06	25.86
	17	1,378.96	1,380.98	- 2.02
	18	1,322.58	1,351.85	- 29.27
	19	1,510.03	1,463.01	47.02
	20	1,230.08	1,234.48	- 4.40
2	21	1,433.58	1,390.28	43.31
	22	1,235.70	1,431.38	- 195.68
	23	1,475.84	1,295.68	180.16
	24	1,528.74	1,250.46	278.29
	25	1,090.72	1,416.73	- 326.01
	26	1,074.83	1,423.23	- 348.40
	27	1,500.95	1,453.95	47.00

Table 2. Continued

Group	Plot	Rice yield (crop cutting)	Rice yield estimation	Residuals
		(kg / rai)	Kg / rai	
	27	1,500.95	1,453.95	47.00
	28	1,146.11	1,453.10	- 307.00
	29	1,550.28	1,287.53	262.76
	30	1,204.91	1,342.84	- 137.93
	31	1,537.88	1,297.34	240.53
	32	1,231.02	1,393.14	- 162.12
	33	1,904.58	1,390.06	514.52
	34	1,111.26	1,371.87	- 260.61
	35	1,034.46	1,378.72	- 344.26
	36	1,334.53	1,427.57	- 93.04
	37	1,311.14	1,450.61	- 139.47
	38	1,510.56	1,316.54	194.03
	39	1,708.48	1,357.41	351.07
	40	1,247.92	1,366.21	- 118.29
	41	1,235.77	1,413.92	- 178.16
	42	1,140.98	1,299.09	- 158.11
	43	1,553.49	1,440.86	112.63
	44	1,220.56	1,343.56	- 123.00
	45	1,498.04	1,276.91	221.13
	46	1,110.97	1,444.30	- 333.34
	47	1,371.00	1,208.69	162.31
	48	1,790.73	1,408.57	382.16
Average		1,367.26	1,372.17	- 4.91

3. ผลการพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าว (Model development of rice yield estimation)

1.1 การพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น (Model development of rice yield estimation with the regression equation)

ทำการพัฒนาแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและพหุคูณ (simple and multiple linear regression) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (response, Y)

คือ ผลผลิตข้าวต่อไร่ที่ได้จากวิธีการตั้งแปลงเก็บเกี่ยว โดยการสุ่มตัวอย่างในแปลงทดลองกลุ่มที่ 1 (แปลงที่ 1 - 20) จำนวน 20 แปลง และตัวแปรประมาณการ (predictors, $X_1 - X_5$) จากค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชได้แก่ ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) 3 รูปแบบ คือ (1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI) (2) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (GNDVI) และ (3) ค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI) ร่วมกับค่าตัวแปรรวมทางกายภาพของข้าว คือ (4) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC) และ (5)

ค่าความสูงของต้นข้าว (PH) ทำให้ได้สมการประมาณการผลผลิตข้าวใน 4 รูปแบบ (Table 3 และ Table 4) ซึ่งทำการคัดเลือกสมการที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ประกอบกับค่า RMSE (Root Mean Square Error) เพื่อจะนำไปใช้ในการทดสอบความถูกต้อง (model validation) และพยากรณ์ผลผลิต (yield prediction) ต่อไป โดยพบว่า สมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยที่ ตัวแปรตอบสนอง คือ ผลผลิตข้าว (Y) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรประมาณการ ($X_1 - X_5$) คือ ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI; X_1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ ด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (GNDVI; X_2) ค่าดัชนีความเขียวแบบสามเหลี่ยม (TGI; X_3) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของ

ต้นข้าว (CC; X_4) ค่าความสูงของต้นข้าว (PH; X_5) คือ $Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.9X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.2X_5$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุดเท่ากับ 0.879 จากนั้นได้ทำการทดสอบใช้สมการเพื่อประมาณการผลผลิตข้าวรายแปลง (modelling rice yield) ในแปลงทดลองกลุ่มที่ 1 ดังกล่าวจำนวน 20 แปลง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าผลผลิตข้าวที่ได้จากการตั้งแปลงเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นค่าผลผลิตจริง (observed rice yield) พบว่า การประมาณการผลผลิตข้าวได้สูงสุดที่ 1,590.92 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 6) และต่ำสุดที่ 1,230.08 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 20) ด้วยค่าผลผลิตเฉลี่ยที่ 1,376.67 กิโลกรัมต่อไร่

Table 3. Regression models to predict rice yield with R^2 and RMSE

Models	R^2	RMSE (kg / rai)	
$Y = 2163.36 + 7981.99X_1 - 1728.41X_2$	0.661	75.492	(1)
$Y = -530.19 - 5526.26X_1 + 2989.44X_3$	0.861	51.146	(2)
$Y = 420.89 - 786.60X_2 + 2101.19X_3$	0.853	52.533	(3)
$Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.90X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.20X_5$	0.879	47.909	(4)

กำหนดให้

Y	=	Rice yield estimation	
NDVI	=	Normalized difference vegetation index	(X1)
GNDVI	=	Green normalized difference vegetation index	(X2)
TGI	=	Triangular greenness index	(X3)
CC	=	Canopy cover	(X4)
PH	=	Plant height	(X5)

Table 4. ANOVA of multiple linear regression with NDVI, GNDVI, TGI, CC and PH

Value	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	5	156427.973	31285.595	9.541	< 0.001
Residual	14	45907.066	3279.076		
Total	19	202335.039			

3.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าว (Model validation of rice yield estimation)

แบบจำลองประมาณการผลผลิตข้าวในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ คือ $Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.90X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.20X_5$ ($R^2 = 0.879$) ถูกนำมาทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) โดยใช้สมการทำการประมาณการค่าผลผลิตข้าว (modelling rice yield) ในแปลงทดลองกลุ่มที่ 2 จำนวน 28 แปลง (Table 2) โดยเปรียบเทียบกับค่าผลผลิตข้าวที่ได้จากการตั้งแปลงเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นค่าผลผลิตจริง (observed rice yield) พบว่า การประมาณการผลผลิตข้าวได้สูงสุดที่ 1,453.10 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 28) และผลผลิตต่ำสุดที่ 1,208.69 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 47) ด้วยค่าผลผลิตเฉลี่ยที่ 1,368.95 กิโลกรัมต่อไร่ โดยค่าเฉลี่ยจากการประมาณการผลผลิตด้วยสมการน้อยกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลผลิตจริง (residuals) 8.41 กิโลกรัมต่อไร่

3.3 การพยากรณ์ผลผลิตข้าวด้วยแบบจำลองฯ (Rice yield prediction with the model)

นำสมการแบบจำลองการประมาณการผลผลิตข้าว (สมการที่ 4) ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว (model validation) ไปใช้ในการทดสอบการพยากรณ์ (prediction) ผลผลิตจริงของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ใน

แปลงปลูกข้าวข้างเคียง(แยกต่างหากจากแปลงทดลองที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง) ขนาด 18 x 6 เมตร (108 ตารางเมตร) จำนวน 5 แปลง พบว่า การประมาณการผลผลิตข้าวได้สูงสุดที่ 1,588.78 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 4) และต่ำสุดที่ 1,267.55 กิโลกรัมต่อไร่ (แปลงที่ 5) ด้วยค่าผลผลิตเฉลี่ยที่ 1,483.36 กิโลกรัมต่อไร่ โดยค่าเฉลี่ยจากการประมาณการผลผลิตด้วยสมการน้อยกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลผลิตจริง (residuals) 96.86 กิโลกรัมต่อไร่ อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในการศึกษาครั้งนี้ (1,367.26 กิโลกรัมต่อไร่) สูงกว่าผลผลิตเฉลี่ยที่เป็นลักษณะประจำพันธุ์ชัยนาท 1 (740 กิโลกรัมต่อไร่) ที่ได้รับการรับรองพันธุ์เมื่อ 9 กันยายน 2536 (Department of Agriculture, 1993) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ดำเนินการในสภาพแปลงวิจัย ที่มีหน่วยทดลองขนาดเล็ก มีการจัดการปัจจัยการผลิตและการจัดการแปลงอย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงทำให้ศักยภาพในการให้ผลผลิตนั้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วไป (Table 5)

โดยผลการประมาณ ผลผลิตข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง การทดสอบความถูกต้อง และประมาณการผลผลิตข้าวในแปลงข้างเคียง พบว่า แบบจำลองประมาณการผลผลิต ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืช (crop spectral parameters) จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) นี้ ให้ค่าประมาณการผลผลิตข้าวที่

Table 5. Rice yield estimation (in the stage of yield prediction) with spectral parameters by multispectral high - resolution imagery from unmanned aerial vehicle (UAV) in November 7, 2018

Plot	NDVI	GNDVI	TGI	CC	PH	Rice yield (crop cutting)	Rice yield estimation	Residuals
						kg / rai	kg / rai	
1	- 0.0874	- 0.0191	0.5238	0.7829	1.0097	1,296.19	1,429.63	- 133.43
2	- 0.0849	- 0.0442	0.5406	0.8312	0.8598	1,317.33	1,526.06	- 208.73
3	- 0.0860	- 0.0363	0.5390	0.8047	1.0450	1,474.99	1,469.18	5.82
4	- 0.0801	0.0146	0.5807	0.8650	0.8845	1,576.42	1,588.78	- 12.37
5	- 0.0956	0.0131	0.4685	0.7172	0.5505	1,267.55	1,403.14	- 135.59
Average						1,386.50	1,483.36	- 96.86

ใกล้เคียงกับค่าผลผลิตจริง ซึ่งสามารถใช้เป็นประโยชน์ต่อการพยากรณ์ผลผลิตข้าวในระดับแปลงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ตัวแปรร่วมของข้อมูลค่าดัชนีพืชพรรณและค่าทางกายภาพของข้าวที่มีมากกว่าหนึ่งค่าจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของสมการประมาณการผลผลิตที่แม่นยำมากกว่าการใช้ค่าดัชนีพืชพรรณอย่างเดียวอย่างหนึ่งเพียงค่าเดียว (Bai et al., 2016) และเนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านการเกษตรกรรม จึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาต่อยอดให้แบบจำลองได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นที่จะสามารถพยากรณ์ผลผลิตข้าวและพืชอื่น ๆ ได้มากยิ่งขึ้นต่อไป

สรุป

การพัฒนาแบบจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในลักษณะค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) 3 รูปแบบ และค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพของข้าว 2 ค่า ทำให้ได้สมการประมาณการผลผลิตข้าว ด้วยตัวแปรตอบสนอง (response, Y) คือ ผลผลิตข้าวต่อไร่จากแปลงทดสอบ จำนวน 20 แปลง และตัวแปรประมาณการ (predictors, $X_1 - X_5$) คือ ค่าพารามิเตอร์การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชในรูปแบบค่าดัชนีพืชพรรณ (VI) 3 รูปแบบ ร่วมกับค่าตัวแปรร่วมทางกายภาพของข้าว 2 ค่า ทำให้ได้สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อประมาณการผลผลิตข้าว โดยที่ตัวแปรตอบสนอง คือ ผลผลิตข้าว (Y) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรประมาณการ ($X_1 - X_5$) คือ ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI; X_1) ค่าดัชนีความต่างของพืชพรรณด้วยช่วงคลื่นแสงสีเขียว (GNDVI; X_2) ค่าสัดส่วนการปกคลุมของต้นข้าว (CC; X_3) ค่าความสูงของต้นข้าว (PH; X_4) คือ $Y = -430.86 - 5108.88X_1 - 447.90X_2 + 2751.09X_3 + 282.36X_4 - 254.20X_5$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุดที่ 0.879 โดยได้ค่าประมาณการผลผลิตข้าวเฉลี่ย 1,376.67 กิโลกรัมต่อไร่ จากนั้น

ได้นำไปทดสอบความถูกต้อง (model validation) กับผลผลิตข้าวจากแปลงตัวอย่าง 28 แปลง พบว่าค่าประมาณการผลผลิตข้าวเฉลี่ย 1,368.95 กิโลกรัมต่อไร่ โดยค่าเฉลี่ยจากการประมาณผลผลิตด้วยสมการน้อยกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลผลิตจริง 8.41 กิโลกรัมต่อไร่ และเมื่อนำสมการแบบจำลองไปพยากรณ์ผลผลิตข้าวข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในแปลงปลูกข้าวข้างเคียง จำนวน 5 แปลง พบว่า ได้ค่าผลผลิตเฉลี่ย 1,483.36 กิโลกรัมต่อไร่ โดยค่าเฉลี่ยจากการประมาณผลผลิตด้วยสมการน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของผลผลิตจริง 96.86 กิโลกรัมต่อไร่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้คำแนะนำและสนับสนุนข้อมูลการเพาะปลูกข้าวที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัย สาคิตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bai, G., Y. Ge, W. Hussain, P.S. Baenziger and G. Graef. 2016. A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. Computers and Electronics in Agriculture 128: 181-192.
- Barrero, O., D. Rojas, C. Gonzalez and S. Perdomo. 2016. Weed detection in rice fields using aerial images and neural networks. pp. 1-4. In: Proceedings of XXI Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision IEEE, Bucaramanga.

- Basso, B., D. Cammarano and E. Carfagna. 2013. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. (Online). Available: http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings_and_workshops/GS_SAC_2013/Improving_methods_for_crops_estimates/Crop_Yield_Forecasting_Methods_and_Early_Warning_Systems_Lit_review.pdf (December 18, 2020).
- Chenga, C.-L., Shalabh and G. Garg. 2014. Coefficient of determination for multiple measurement error models. *Journal of Multivariate Analysis* 126: 137-152.
- Department of Agriculture. 1993. Rice Varieties Chai Nat 1. Technical Documents. Thailand Rice Science Institute, Department of Agriculture, Bangkok. 20 p. (in Thai)
- Gevaert, C.M., J. Tang, F.J. García-Haro, J. Suomalainen and L. Kooistra. 2014. Combining hyperspectral UAV and multispectral Formosat-2 imagery for precision agriculture applications. doi: 10.1109/WHISPERS.2014.8077607. In: *Proceedings of 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, Lausanne.
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman and M.N. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 289-298.
- Grassi, M. 2014. Five actual uses for drones in precision agriculture today. (Online). Available: <http://drone life.com/2014/12/30/5-actual-uses-drones-precision-agriculture-today/> (June 20, 2020).
- Guevara-Escobar, A., J. Tellez and E. Gonzalez-Sosa. 2005. Use of digital photography for analysis of canopy closure. *Agroforestry Systems* 65(3): 175-185.
- Hunt, E.R., P.C. Doraiswamy, J.E. McMurtrey, C.S.T. Daughtry, E.M. Perry and B. Akhmedov. 2013. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 103-112.
- Hunt, E.R., W.D. Hively, G.W. McCarty, C.S.T. Daughtry, P.J. Forrester, R.J. Kratochvil, J.L. Carr, N.F. Allen, J.R. Fox-Rabinovitz and C.D. Miller. 2011. NIR-green-blue high-resolution digital images for assessment of winter cover crop biomass. *GIScience and Remote Sensing* 48(1): 86-98.
- Jiang, Z., A.R. Huete, K. Didan and T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112(10): 3833-3845.
- Krishna, K.R. 2018. *Agricultural Drones: A Peaceful Pursuit*. Apple Academic Press, Burlington. 412 p.
- Land Development Department. 2006. Forecasting of Rice Yield in 2006 by Remote Sensing Technology and Geographic Information System. Technical Documents. Office of Soil Survey and Land Use Planning, Land Development Department, Bangkok. 402 p. (in Thai)
- López-Pérez, A., M.R. Martínez-Menes and D.S. Fernández-Reynoso. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de

- vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(1): 121-137
- Malambo, L., S.C. Popescu, S.C. Murray, E. Putman, N.A. Pugh, D.W. Horne, G. Richardson, R. Sheridan, W.L. Rooney, R. Avant, M. Vidrine, B. McCutchen, D. Baltensperger and M. Bishop. 2018. Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 64: 31-42.
- Office of Agricultural Economics. 2019. Important Agricultural Product Situations and Trends in 2020. Final Report. Office of Agricultural Economics, Bangkok. 235 p. (in Thai)
- Ren, J., Z. Chen, Q. Zhou and H. Tang. 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(4): 403-413
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, pp. 309-317. *In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. NASA, Washington, D.C.
- Thompson, L.J., R.B. Ferguson, N. Kitchen, D.W. Frazen, M. Mamo, H. Yang and J.S. Schepers. 2015. Model and sensor-based recommendation approaches for in-season nitrogen management in corn. *Agronomy Journal* 107(6): 2020-2030.
- Weier, J. and D. Herring. 2000. Measuring Vegetation (NDVI & EVI). (Online). Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation> (Sep 30, 2020).
-