

การตอบสนองของดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอัมัลไลซ์ต่อปุ๋ยไนโตรเจน ในข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

NDVI response to nitrogen fertilizer application in waxy corn using UAV imagery

ปาณัท เจิมไธสง¹, สุนันtha กิ่งไพบูลย์^{1,2*}, เพ็ชรพร ชาวกิจเจริญ³

และ Yasushi Kiyoki⁴

Panath Jermthaisong¹, Sununtha Kingpaiboon^{1,2*}, Petchporn Chawakitchareon³
and Yasushi Kiyoki⁴

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) จัดสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงและ NDVI โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 2) ศึกษาการตอบสนองของ NDVI และผลผลิตต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และ 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI กับผลผลิต พื้นที่ศึกษาคือแปลงทดลองข้าวโพดข้าวเหนียวตั้งอยู่ที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวบ้านหนองบัว อำเภอบ้านฝาง จังหวัดขอนแก่น ทำการศึกษาในเดือนธันวาคม 2560 ถึงมีนาคม 2561 วางแผนการทดลองแบบ RCBD ประกอบด้วย 4 ตารับการทดลอง 2 ซ้ำ อัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ 0, 8, 20 และ 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ บันทึกภาพจากกล้องซึ่งติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ โดยคำนวณค่า NDVI เมื่ออายุ 66 วัน และเก็บเกี่ยวผลผลิตน้ำหนักฝักสดรวมเปลือก อายุ 81 วัน เก็บข้อมูล NDVI ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่ายในแต่ละตารับการทดลอง จำนวน 14 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 56 ตัวอย่าง และใช้ค่าเฉลี่ย NDVI เป็นตัวแทนแต่ละตารับการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มสีใบจากภาพถ่ายสีผสมจริงเพิ่มขึ้นตามระดับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน จากการวิเคราะห์ F-test วิธี Scheffe ข้อมูล NDVI และผลผลิต พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.1$) มีการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนและเพิ่มขึ้นตามปริมาณปุ๋ยไนโตรเจน เมื่อปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 0, 8, 20, 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ มีค่าเฉลี่ย NDVI เท่ากับ 0.70, 0.73, 0.77 และ 0.82 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยผลผลิตเท่ากับ 401.65, 969.64, 1,306.22 และ 1,316.25 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ โดยการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนมากกว่า 20 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ ไม่ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI กับผลผลิต โดยวิธีถดถอยอย่างง่ายแบบเส้นตรง พบว่าผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความสัมพันธ์อยู่ในระดับสัมพันธ์มาก ($R^2 = 0.79$)

คำสำคัญ: ดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอัมัลไลซ์, ไนโตรเจน, ข้าวโพดข้าวเหนียว, อากาศยานไร้คนขับ

Received October 28, 2019

Accepted March 27, 2020

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand

² สถาบันวิจัยทรัพยากรน้ำใต้ดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

Groundwater Resources Research Institute, Khon Kaen University, Thailand

³ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

⁴ Media and Governance บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเคโอ ญี่ปุ่น

Graduate School of Media and Governance, Keio University, Japan

*Corresponding author: sununtha@kku.ac.th

ABSTRACT: The objectives of this study were to 1) create true-color orthoimages map and calculate NDVI map using UAV image 2) study NDVI and waxy corn yield response to nitrogen fertilizer and 3) study the relationship between NDVI and waxy corn yield. Field experiment was conducted in the Waxy Corn Growing Community Enterprise Group, which is located in Ban Nong Bua, Ban Fang District, Khon Kaen Province during December 2017 to March 2018. The experimental design was randomized complete block design (RCBD) with four fertilizer treatments and two replications. Treatments consisted of various N fertilizer rates 0, 8, 20 and 32 kg N/rai. Images acquired using cameras mounted on unmanned aerial vehicle (UAV). NDVI and yield measurements were done at 66 and 81 days after sowing, respectively. NDVI values were collected from each treatment based on random sampling method. There were 14 samples for each treatment totalling 56 samples and the average value was recorded. The results showed that leaf greenness of true-color orthoimages by visual interpretation increased as N fertilizer application rate increased. The F-test using Scheffe's method of NDVI and yield were found statistically significant differences ($P \leq 0.01$). Analysis results also demonstrated the response of NDVI and yield increased as N fertilizer application rate increased. The average NDVI values of applying 0, 8, 20, 32 kg N/rai were 0.70, 0.73, 0.77 and 0.82, respectively; The average cob weight with husk yield increased from 401.65, 969.64, 1,306.22 and 1,316.25 kg/rai, respectively. However, applying more than 20 kg N/rai did not significantly increase yield. The relationship between NDVI and yield was evaluated by simple linear regression analysis. Yield was consistently increased with NDVI and found a strong relationship between the two ($R^2 = 0.79$).

Keywords: normalized difference vegetation index (NDVI), nitrogen, waxy corn, unmanned aerial vehicle (UAV)

บทนำ

ความก้าวหน้าในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เป็นไปอย่างต่อเนื่องทั้งในและต่างประเทศ อีกทั้งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาที่ลดลง ซึ่งถูกนำมาใช้ในหลายๆ สาขา เช่น ด้านผังเมืองและอสังหาริมทรัพย์ในการจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง ด้านป่าไม้ในการติดตามพื้นที่การขยายตัวของป่าไม้และพื้นที่ที่ถูกบุกรุกทำลาย ด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเพื่อช่วยประเมินพื้นที่น้ำท่วม ด้านการท่องเที่ยวในการจัดสร้างแบบจำลองสามมิติภายในโบราณสถาน เป็นต้น โดยเฉพาะด้านการเกษตรภายในประเทศไทย ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานรัฐบาลและองค์กรต่างๆ ให้มีการวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้ เช่น การประมาณค่าชีวมวลเหนือพื้นดินของต้นหม่อน โดยประเมินจากการใช้ภาพถ่ายทาง

อากาศจากอากาศยานไร้คนขับ (ศิลา, 2561) การพันสารชีวภัณฑ์เพื่อกำจัดและควบคุมโรคแมลงศัตรูพืชในพื้นที่การเกษตร (วิชัย และคณะ, 2560) การเฝ้าระวังและควบคุมการแพร่ขยายของหอยเชอรี่ในนาข้าวหอมนิล (ศิริเรือง และคณะ, 2559) การทำการเกษตรแบบสมาร์ทฟาร์มที่มีระบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าต่างๆ ซึ่งติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ (ธีรเกียรติ, 2558) และการทำการเกษตรแม่นยำสูงในไร่องุ่น โดยนำมาช่วยควบคุมการผลิต (เพ็ญรัตน์, 2552) เป็นต้น

การศึกษาครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) โดยจัดสร้างแปลงทดลองปลูกข้าวโพดข้าวเหนียว (*Zea mays* var. *ceratina*) พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ที่บริเวณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวบ้านหนองบัว ซึ่งอยู่ในโครงการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (One Tambon One Product : OTOP) ของตำบลหนองบัว อำเภอบ้านฝาง จังหวัดขอนแก่น

โดยข้าวโพดข้าวเหนียวที่ผลิตได้นั้นเป็นที่นิยมบริโภค และได้รับการรับรองคุณภาพจากกรมส่งเสริมการเกษตร (สำนักงานเกษตรอำเภอบ้านฝาง, 2562) โดยค่า NDVI เป็นดัชนีพืชพรรณพื้นฐานที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดปัจจัยต่างๆ ของพืช เช่น ความสมบูรณ์ของพืช ความเขียว ความหนาแน่น ความสูง และผลผลิต เป็นต้น (Tucker, 1979) NDVI สามารถตรวจวัดความสมบูรณ์ของพืชได้ เนื่องจากพืชที่สมบูรณ์และมีสีเขียวเข้มจะมีการสะท้อนสูงในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ส่วนพืชที่ไม่สมบูรณ์จะมีการสะท้อนสูงในช่วงคลื่นสีแดง จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เรามองเห็นพืชที่อ่อนแอหรือตายแล้วเป็นสีน้ำตาลหรือแดง (สรศรีใจ, 2550) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า NDVI มีความสัมพันธ์กับความเขียวของพืช ซึ่งคลอโรฟิลล์จัดเป็นรงควัตถุ (Pigment) ที่ทำให้พืชมีสีเขียวโดยมีธาตุไนโตรเจนเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก สอดคล้องกับหลายรายงานที่ผ่านมา ซึ่งสรุปว่า NDVI มีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชและปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในการเพาะปลูก เช่น Shaver et al. (2011) สรุปว่า NDVI ของข้าวโพดจากเครื่องวัดแบบพกพาทั้ง 2 รุ่น ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัดแบบแอคทีฟ (Active sensor) ได้แก่ GreenSeeker 505 และ Crop Circle ACS-210 มีความสัมพันธ์กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในอัตราที่แตกต่างกัน Caturegli et al. (2016) สรุปว่า NDVI จากภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับมีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในต้นหญ้า Liu and Wiatrak (2011) สรุปว่า NDVI ของข้าวโพดจากเครื่องวัดรุ่น GreenSeeker มีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบที่อ่านได้จากเครื่องวัดคลอโรฟิลล์แบบพกพา รุ่น SPAD-502 และมีความสัมพันธ์กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในอัตราที่แตกต่างกัน สืบสกุล (2554) สรุปว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากเครื่องวัดรุ่น SPAD-502 มีความสัมพันธ์กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในอัตราที่แตกต่างกัน ประสงค์ และคณะ (2556) สรุปว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากเครื่องวัดรุ่น SPAD-502 มีความสัมพันธ์กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในอัตราที่แตกต่างกัน นอกจากนี้มีรายงานกล่าวถึง NDVI มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิต จากรายงานของ Fortes et al. (2015) สรุปว่า NDVI จากเครื่องวัดรุ่น Crop Circle ACS-470 มีความสัมพันธ์ และสามารถทำนายผลผลิตมะเขือเทศได้ รักศักดิ์

(2551) สรุปว่า NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT5-TM มีความสัมพันธ์กับผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ไรบร และคณะ (2557) สรุปว่า NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม SMMS มีความสัมพันธ์กับผลผลิตของข้าวนาปรัง จีรวัดณ์ และคณะ (2562) สรุปว่า NDVI จากภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับมีความสัมพันธ์กับผลผลิตข้าว และ Lisboa et al. (2018) สรุปว่า NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม CBERS-4 มีความสัมพันธ์และสามารถทำนายผลผลิตข้าวได้

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติม จากการศึกษาครั้งก่อนซึ่งใช้ภาพถ่ายดาวเทียมหรือเครื่องมือวัดแบบพกพา โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้ 1) จัดสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงและคำนวณค่า NDVI โดยใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ 2) ศึกษาการตอบสนองของ NDVI และผลผลิตข้าวโพดข้าวเหนียวต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่แตกต่างกัน และ 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI กับผลผลิตข้าวโพดข้าวเหนียว

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา (Figure 1) ตั้งอยู่บริเวณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวบ้านหนองบัว ตำบลหนองบัว อำเภอบ้านฝาง จังหวัดขอนแก่น พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ปลูกคือ พันธุ์ม่วงแต่ม มีการเตรียมแปลงโดยการไถ 2 ครั้ง ได้แก่ ไถครั้งแรกเพื่อพลิกหน้าดินและกลบเศษพืชและวัชพืชตากดินไว้ 10-7 วัน จากนั้นไถพรวนเพื่อย่อยดินให้แตกและคลุกเคล้าเศษซากพืชและดินให้สม่ำเสมอทำการปลูกแบบแถวคู่ ระยะระหว่างแถว 150 เซนติเมตร ระยะระหว่างต้นภายในแถว 75 x 35 เซนติเมตร จำนวน 1 ต้นต่อหลุม การให้น้ำแบบร่องคู่ ทุกๆ 7-10 วัน ฤดูกาลเพาะปลูก ในช่วงฤดูแล้งของปี การเพาะปลูก เดือนธันวาคม 2560 ถึงมีนาคม 2561 ชุดดินที่พบบริเวณพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลกรมพัฒนาที่ดิน มาตราส่วนนำเข้า 1:25,000 คือ ชุดดินอุดร (Ud-sIA) มีอนุกรมวิธานดินตามระบบการจำแนกดินของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA) Coarse-loamy, mixed, active, nonacid, isohyperthermic Typic Halaquepts

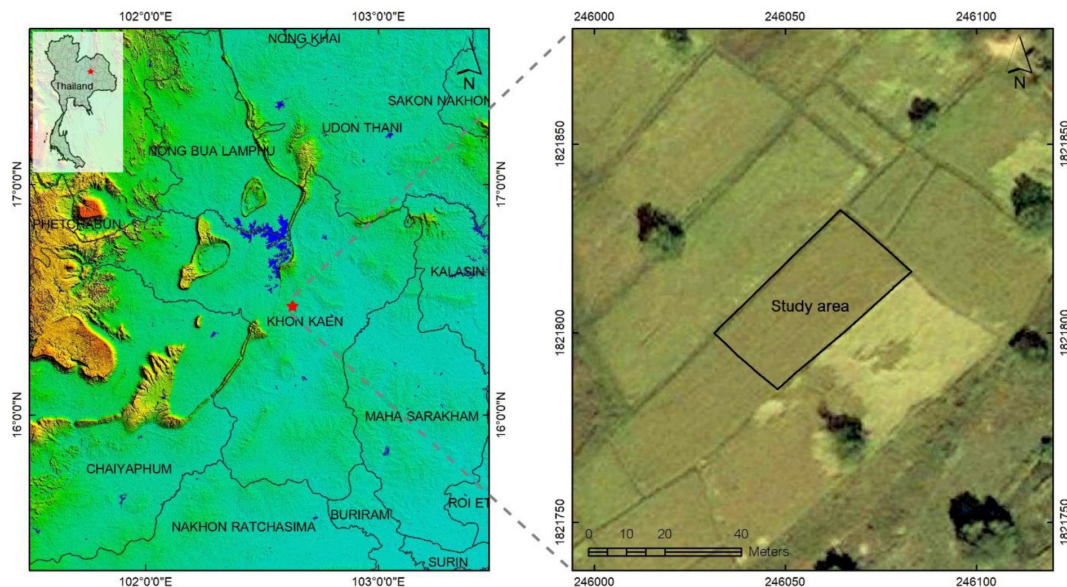


Figure 1 study area

การวางแผนการทดลอง

ข้าวโพดมีการเจริญเติบโตแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (Vegetative: V) และระยะการเจริญเติบโตด้านการเจริญพันธุ์ (Reproductive: R) ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นเริ่มตั้งแต่ระยะงอก (Emergence: VE) จากนั้นเริ่มนับระยะ V1, V2, V3 จนถึง Vn โดยปรากฏพบกาบใบ (Leaf collar) ของใบที่กางสมบูรณ์จำนวน 1, 2, 3 จนถึง n ใบ ตามลำดับ จนถึงระยะปรากฏช่อดอกตัวผู้ (Tasseling: VT) ส่วนระยะการเจริญเติบโตด้านการเจริญพันธุ์ เริ่มตั้งแต่ระยะ R1 (Silking) ข้าวโพดปรากฏไหมผลิฝักกาบหุ้มฝัก ระยะ R2 (Blister) เป็นระยะที่กำลังเนื้อมีสีของเหลวภายในเมล็ดมีลักษณะใสไม่มีสี ระยะ R3 (Milk Stage) เป็นระยะที่น้ำนม ระยะ R4 (Dough Stage) ภายในเมล็ดเป็นแป้งอ่อน ระยะ R5 (Dent Stage) ภายในเมล็ดเปลี่ยนเป็นแป้งแข็ง และระยะ R6 (Physiological Maturity) เป็นระยะสุกแก่ทางสรีระ เปลือกหุ้มฝักจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (แพรวพรรณ, 2553) จากรายงานการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า NDVI ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดกับผลผลิต พบว่าค่า NDVI ของข้าวโพดใน

ระยะ R1 มีความสัมพันธ์ มากที่สุดกับผลผลิต (Liu and Wiatrak, 2011; Sanodiya, 2017) ดังนั้นการศึกษครั้งนี้จึงทำการบันทึกภาพถ่ายสีผสมจริงและภาพถ่ายหลายช่วงคลื่นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อข้าวโพดมีการเจริญเติบโตอยู่ในระยะ R1 ซึ่งข้าวโพดข้าวเหนียวในพื้นที่ศึกษามีอายุ 66 วัน

โดยจัดทำทดลองแปลงปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD) มีการเตรียมแปลงเพาะปลูกโดยการไถ 2 ครั้ง ได้แก่ ไถตะ เพื่อพลิกหน้าดินและกลบเศษพืชและวัชพืช ตากดินไว้ 7-10 วัน จากนั้นไถพรวนเพื่อย่อยดินให้แตกและคลุกเคล้าเศษซากพืชและดินให้สม่ำเสมอ ทำการเริ่มปลูกวันที่ 22 ธันวาคม 2560 บันทึกภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับเมื่อข้าวโพดอายุ 66 วัน โดยมีการเจริญเติบโตอยู่ในระยะ R1 และเก็บเกี่ยวผลผลิต วันที่ 13 มีนาคม 2561 ซึ่งข้าวโพดอายุ 81 วัน มีการใส่ปุ๋ยทั้งหมด 3 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 รองพื้นพร้อมปลูก ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 เมื่อข้าวโพดอายุ 31 วัน และครั้งที่ 3 ใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 เมื่อข้าวโพดอายุ 53 วัน ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกันประกอบด้วย 4 ตารับการทดลอง (Treatment) จำนวน 2 ซ้ำ โดยจากการตรวจ

เอกสารเกี่ยวกับจำนวนซ้ำ (Replication) ในการวางแผนการทดลองทางการเกษตร พบว่าจำนวนซ้ำต้องมีจำนวนมากกว่า 2 ซ้ำขึ้นไป ซึ่งจำนวนซ้ำที่มากขึ้นทำให้ผลการทดลองมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น โดยในแต่ละดำรับการทดลองสามารถมีจำนวนซ้ำที่ไม่เท่ากันได้ (Grant, 2010; Horsley, 2019) และควรมีองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom: DF) ของแหล่งความแปรผันภายในกลุ่ม (Within-Groups) หรือองศาความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน (Error) มากกว่า 15 ขึ้นไป (FAO, 1999) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน โดยมีจำนวนซ้ำในแต่ละดำรับการทดลอง 2 ซ้ำ และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทนของประชากรทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลองจำนวน 14 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่าง

ทั้งหมด 56 ตัวอย่าง ทำให้มีค่าองศาความเป็นอิสระของแหล่งความแปรผันภายในกลุ่มเท่ากับ 52 จึงพิจารณาได้ว่าจำนวนซ้ำและจำนวนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์ตามหลักการวิจัยทางการเกษตร โดยในแต่ละดำรับการทดลองมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 อัตรา (Table 1, Figure 2) ดังนี้

- ดำรับที่ 1 (T1 หรือ Control) ไม่ใส่ปุ๋ย
- ดำรับที่ 2 (T2) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อัตรา 8 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่
- ดำรับที่ 3 (T3) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อัตรา 20 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่
- ดำรับที่ 4 (T4) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อัตรา 32 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่

Table 1 Fertilizer application rates of each treatment

Treatment	1 st Basal dressing N-P-K (15-15-15) (kg N/rai)	2 nd Side dressing N-P-K (46-0-0) (kg N/rai)	3 rd Side dressing N-P-K (46-0-0) (kg N/rai)	Total N application (kg N/rai)
T1	0	0	0	0
T2	5	1.5	1.5	8
T3	15	2.5	2.5	20
T4	20	6	6	32

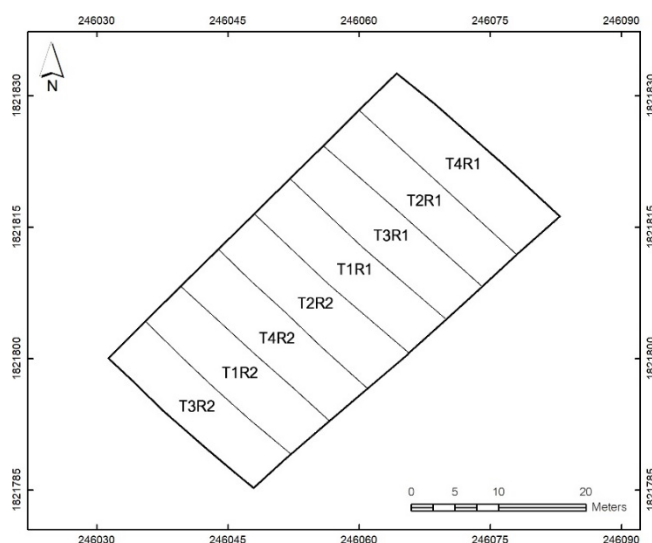


Figure 2 The experimental field with randomized complete block design

วัสดุและอุปกรณ์

กล้องบันทึกภาพ จำนวน 2 กล้อง ได้แก่ 1) กล้องบันทึกภาพช่วงคลื่นที่สายตามองเห็น (Visible) รุ่น FC300X ความละเอียด 12 ล้านพิกเซล ขนาดภาพ 4000 x 3000 พิกเซล (กล้องที่ติดตั้งมาพร้อมกับอากาศยานไร้คนขับ) ถูกติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ รุ่น Phantom 3 Professional (DJI Technology Co. Ltd., Shenzhen, China) และ 2) กล้องบันทึกภาพช่วงคลื่นสีแดง (Red) ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร และ

ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร รุ่น Survey 2 (MAPIR Inc., San Diego, CA, USA) ความละเอียด 16 ล้านพิกเซล ขนาดภาพ 4603 x 3456 พิกเซล พร้อมด้วยแผ่น Calibration Target V1 (MAPIR Inc.) เพื่อใช้แปลงค่าเชิงตัวเลขให้เป็นค่าการสะท้อน และแผ่นกำหนดจุดควบคุม (Ground Control Points: GCPs) รอบแปลงพื้นที่ศึกษา เพื่อกำหนดพิกัดภูมิศาสตร์และปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิต (Geometric Correction) (Figure 3)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3 (a) Phantom 3 professional (b) Survey 2 camera (c) Calibration target V1 and (d) GCPs

การประมวลผลภาพและการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวางแผนการบิน โดยกำหนดระยะทับซ้อนด้านหน้าและด้านข้าง เท่ากับ 80 และ 75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ บินที่ระดับความสูง 40 เมตร จากพื้นดิน บันทึกภาพแปลงทดลอง ในวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2561 โดยข้าวโพดข้าวเหนียวอายุ 66 วัน หลังปลูก อยู่ในการเจริญเติบโตระยะ R1 โดยจะได้ภาพถ่ายจากกล้องบันทึกภาพช่วงคลื่นที่สายตามองเห็นจำนวนหลายภาพ ข้อมูลภาพเป็นค่าเชิงตัวเลข

(Digital Number) ข้อมูล 8 บิต ทำการต่อภาพ (Mosaicking) โดยโปรแกรม Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) และปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตด้วยการกำหนดค่าพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดควบคุม โดยโปรแกรม QGIS จะได้ภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงความละเอียดของจุดภาพ 3 เซนติเมตร เพื่อนำไปตีความหมายของภาพต่อไป

ส่วนภาพถ่ายจากกล้องบันทึกภาพหลายช่วงคลื่น

จะได้ภาพถ่ายจำนวนหลายภาพครอบคลุมพื้นที่ศึกษาเช่นกันโดยข้อมูลภาพเป็นค่าเชิงตัวเลข (Digital number: DN) ข้อมูล 8 บิต ซึ่ง Channel สีแดง จะบันทึกค่าจากช่วงคลื่นที่แดง และ Channel สีน้ำเงิน จะบันทึกค่าจากช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ทำการต่อภาพ (Mosaicking) โดยโปรแกรม Agisoft PhotoScan และปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตด้วยการกำหนดค่าพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดควบคุม โดยโปรแกรม QGIS จากนั้นทำการแปลงค่าเชิงตัวเลขไปเป็นค่าการสะท้อน (Reflectance) ข้อมูล 16 บิต โดยใช้ข้อมูลจากแผ่น Calibration Target V1 ในโปรแกรม MAPIR Camera Control ความละเอียดของจุดภาพ 3 เซนติเมตร และคำนวณค่า NDVI (Tucker, 1979) ดังสมการที่ (1)

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (1)$$

เมื่อ ρ_{NIR} คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง และ ρ_{Red} คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างข้อมูลค่า NDVI ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple Random Sampling) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างในแต่ละตำรับการทดลองของแต่ละซ้ำและเก็บในทุกๆ แถว จำนวน 7 ตัวอย่าง ดังนั้นในแต่ละตำรับการทดลองจะมีตัวอย่างทั้งหมด 14 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 56 ตัวอย่าง ขั้นตอนการศึกษาแสดงดัง Figure 4 สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของ NDVI และผลผลิต ในแต่ละตำรับการทดลอง ใช้สถิติ F-test วิธี Scheffe' test และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI และผลผลิต โดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง 2 ตัวแปร

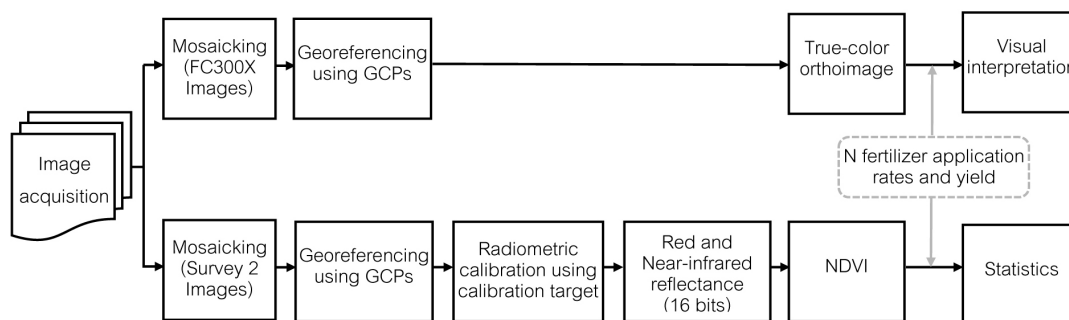


Figure 4 Flowchart of images and data processing

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริง

ผลการจัดสร้างภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงโดยอากาศยานไร้คนขับ ตั้งแต่เริ่มเพาะปลูกจนถึงช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิต (Figure 5) เพื่อนำไปตีความข้อมูลภาพด้วยสายตา (Visual interpretation) โดยพิจารณาจากภาพเมื่อมองในมุมตั้ง (Figure 6) พบว่าในตำรับที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (Control) มีสีใบของต้นข้าวโพดข้าวเหนียวเป็นสีเขียวอ่อนอมเหลืองและมีการเจริญเติบโตน้อยที่สุดพื้นที่ทรงพุ่มของใบมีขนาดเล็ก ทำให้มองเห็นพื้นหลังซึ่ง

เป็นดินบริเวณด้านล่าง ส่วนตำรับที่ 2 มีความเข้มของสีใบเป็นสีเขียวเพิ่มมากขึ้น และตำรับการทดลองที่ 3 และ 4 พบว่ามีสีใบเป็นสีเขียวเข้ม ซึ่งมีระดับความเข้มมากที่สุด โดยในตำรับที่ 3 และ 4 มีระดับความเข้มของสีใบและความหนาแน่นของทรงพุ่มใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาภาพในแนวราบ (Figure 7) พบว่า ในตำรับที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย ปรากฏเห็นสีใบเป็นสีเขียวอ่อนอมเหลืองชัดเจนเหมือนดังภาพในมุมตั้ง และมีความสูงของต้นน้อยที่สุดอย่างชัดเจน ส่วนในตำรับที่ 2 พบว่ามีความเข้มของสีใบเพิ่มมากขึ้น แต่มีความเข้มของสีใบน้อยกว่าตำรับที่ 3 และ 4 เมื่อพิจารณาความสูงของต้นใน

ดำวันที่ 2 ถึง 4 พบว่า มีระดับความสูงใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระดับความเข้มของสีใบข้าวโพดข้าวเหนียว จะมีระดับความเข้มเพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ สืบสกุล (2554) ที่พบว่าเมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีความเข้มของสีใบมากขึ้น ทั้งจากการประเมินระดับความเข้มของสีใบจากเครื่องวัดคลอโรฟิลล์มิเตอร์ (Minolta SPAD-502) และจากแผ่นเทียบสีใบ (Leaf color chart) โดยเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้สี

ของของใบมีความเข้มคงที่สูงสุด จากรายงานของ Croft and Chen (2018) และ Zhao et al. (2003) สรุปว่าสีเขียวในส่วนต่างๆ ของพืชเกิดจากรงควัตถุ (Pigment) ของคลอโรฟิลล์ซึ่งมีธาตุไนโตรเจนเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก ดังนั้นเมื่อพืชได้รับไนโตรเจนมากขึ้นจะทำให้สีของใบและลำต้นมีสีเขียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาในพืชชนิดอื่นๆ โดย Lee et al. (2011) พบว่า สีใบของข้าว มีระดับความเขียวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้

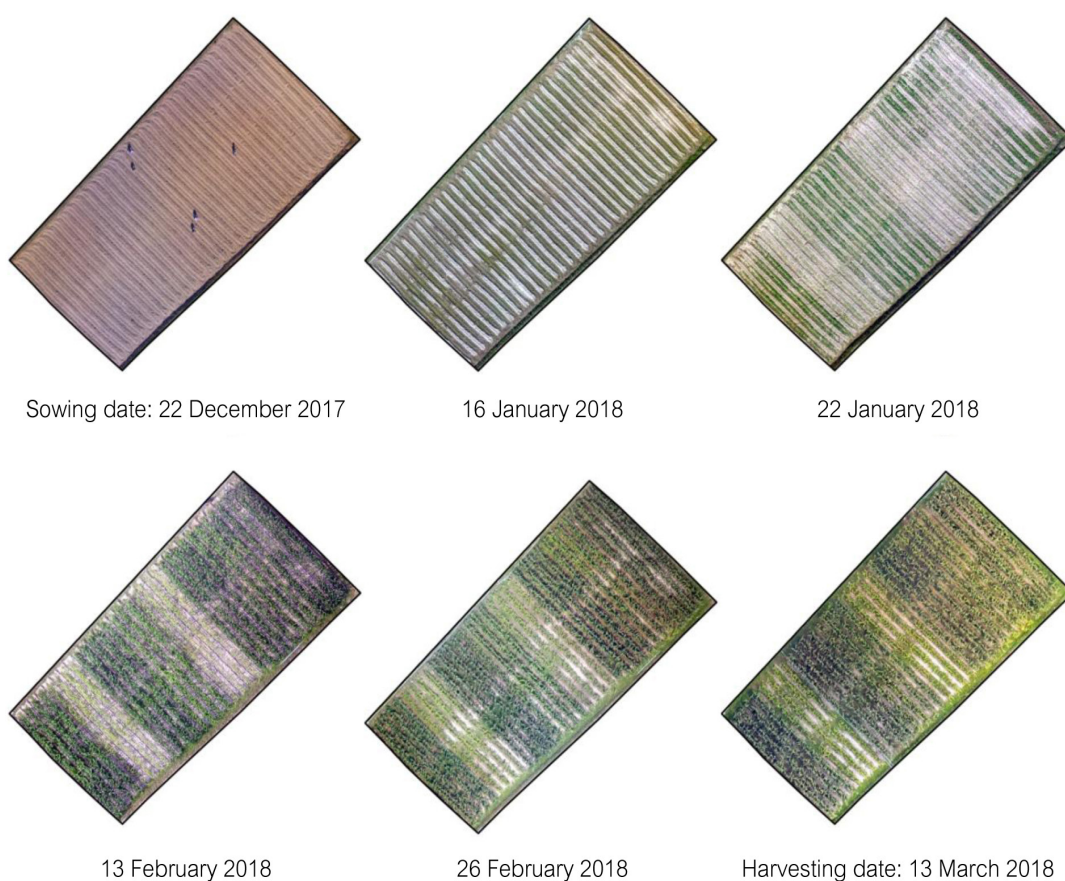


Figure 5 True-color orthoimages from sowing to harvesting date

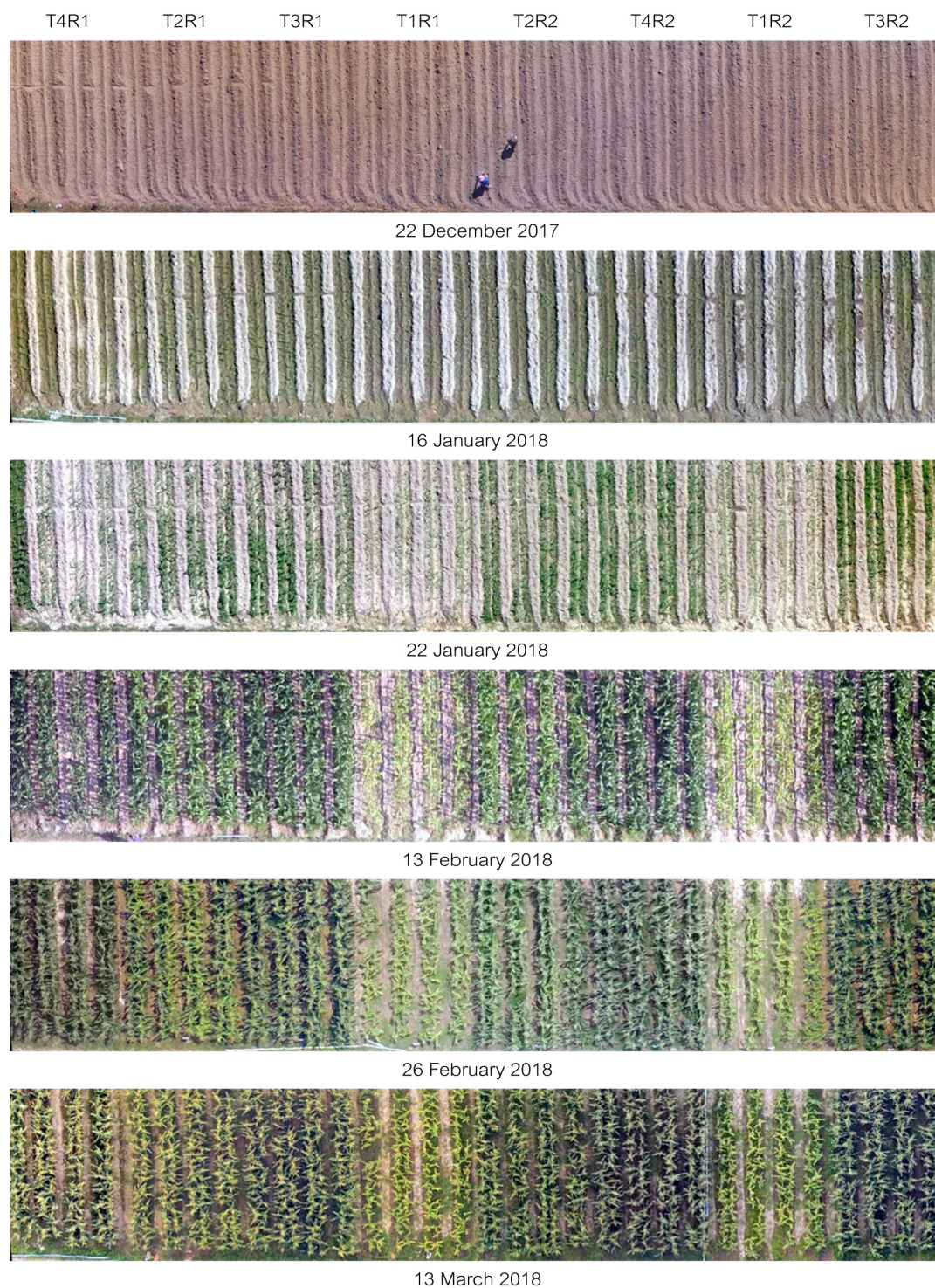


Figure 6 Leaf greenness of true-color orthoimages for visual interpretation

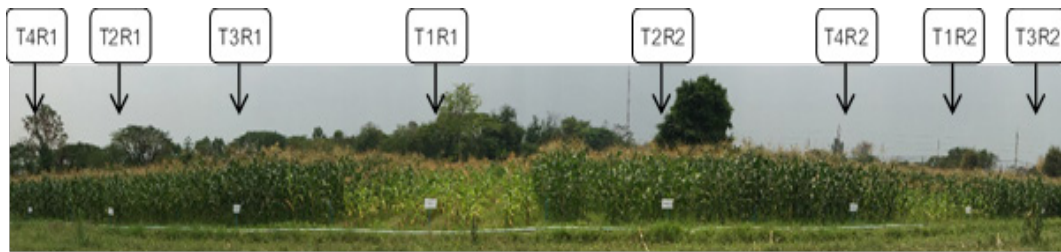


Figure 7 Horizontal panorama image on 13 March 2018

ดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอัมไลซ์ (NDVI)

ผลการคำนวณค่า NDVI เมื่อข้าวโพดข้าวเหนียว อายุ 66 วันหลังปลูก มีการเจริญเติบโตอยู่ในระยะ R1 บันทึกภาพวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2561 พบว่าในพื้นที่แปลงทดลองมีค่า NDVI น้อยที่สุดเท่ากับ 0.16 ซึ่งพบในบริเวณร่องทางเดินระหว่างแปลงซึ่งเป็นพื้นที่ดินโล่งหรือมีวัชพืชอยู่เล็กน้อย ส่วนบริเวณที่มีค่า NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.96 พบในบริเวณต้นข้าวโพดที่มีทรงพุ่มเบียดกันอยู่หนาแน่น (Figure 8) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า NDVI ในแต่ละดำรับการทดลองจากการสุ่มตัวอย่างค่า NDVI โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย จำนวน 7 ตัวอย่างในแต่ละซ้ำของการทดลอง หรือในแต่ละดำรับการทดลองมีจำนวน 14 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 56 ตัวอย่าง พบว่ามีค่า NDVI เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 0.70 และดำรับที่ 4 ใส่

ปุ๋ยไนโตรเจน 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ มีค่า NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.82 และพบว่าค่า NDVI มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) (Table 2) การตอบสนองของค่า NDVI ต่อปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในแปลงข้าวโพดข้าวเหนียว มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวก โดย NDVI มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปุ๋ยไนโตรเจน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Shaver et al. (2011) ซึ่งสรุปว่า NDVI ของข้าวโพดจากเครื่องวัดแบบพกพา 2 รุ่น ได้แก่ Green Seeker และ Crop Circle ACS-210 มีความสัมพันธ์ในระดับสูงกับอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้แตกต่างกัน 4 ระดับ และ Liu and Wiatrak (2011) สรุปว่า NDVI ของข้าวโพดในการปลูกแบบไม่ไถพรวนดิน (No-tillage) จากเครื่อง GreenSeeker มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกัน 5 ระดับ

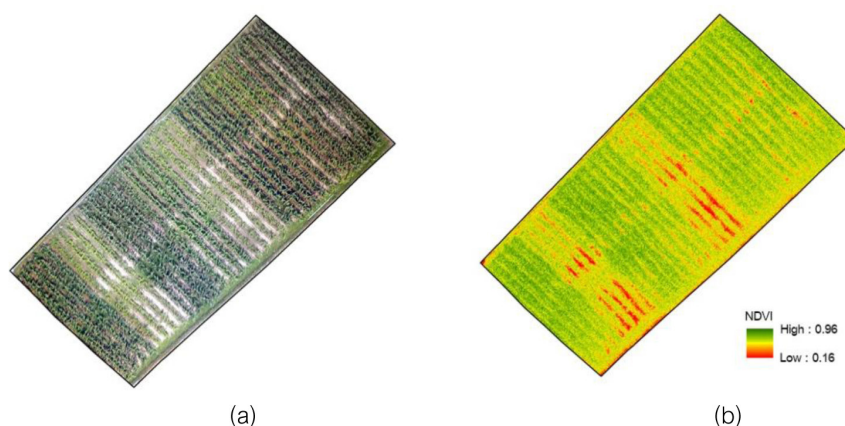


Figure 8 (a) True-color orthoimage and (b) NDVI at 66 day after sowing (26 February 2018)

ผลผลิต

ผลการบันทึกข้อมูลผลผลิตข้าวโพดข้าวเหนียวจากการสุ่มเก็บตัวอย่างและชั่งน้ำหนักฝักสดรวมเปลือก ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละตำรับการทดลองและคำนวณเป็นผลผลิตต่อไร่ พบว่าตำรับที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย ให้ผลผลิตเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 401.65 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับที่ 4 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ ให้ผลผลิตเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 1,316.25 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลผลิตในแต่ละตำรับการทดลอง (Table 2) พบว่า ผลผลิตของข้าวโพดข้าวเหนียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) ต่อปริมาณการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในระดับต่างๆ โดยตำรับที่ 3 และ 4 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI และผลผลิตจากกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Figure 9) พบว่าผลผลิตมีแนว

โน้มเพิ่มมากขึ้นตามค่า NDVI โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.79 และมีความสัมพันธ์อยู่ในระดับมาก สอดคล้องกับผลการทดลองของ Shaver et al. (2011) ที่สรุปเพิ่มเติมว่า NDVI มีความสัมพันธ์อยู่ในระดับมากกับผลผลิตข้าวโพด โดยสามารถใช้เป็นตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวสำหรับการทำนายผลผลิตข้าวโพดได้ และกล่าวว่าตัวแปรอิสระอื่นๆ เช่น ปริมาณไนโตรเจนในดิน ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ปริมาณไนโตรเจนในใบ และความสูงของต้น ไม่ทำให้ผลของค่าความสัมพันธ์การตัดสินใจเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการทดลองของ รักศักดิ์ (2551) ซึ่งคำนวณค่า NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT 5-TM โดยสรุป NDVI มีความสัมพันธ์กับผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และผลการศึกษาในพืชชนิดอื่น โดย จีรวัดณ์ และคณะ (2562) คำนวณค่า NDVI จากภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับ พบว่ามีความสัมพันธ์กับผลผลิต้อย

Table 2 Mean NDVI and yield of each treatment

Treatment	N application rates (kg N/rai)	NDVI	Yield (kg/rai)
T1	0	0.70 ^a	401.65 ^a
T2	8	0.73 ^b	969.64 ^b
T3	20	0.77 ^c	1,306.22 ^c
T4	32	0.82 ^d	1,316.25 ^c
F-test		**	**
C.V. (%)		6.74	39.71

** = significance at $P \leq 0.01$

Different letters in the same column indicates statistically significant difference ($P \leq 0.01$) with Scheffe' test

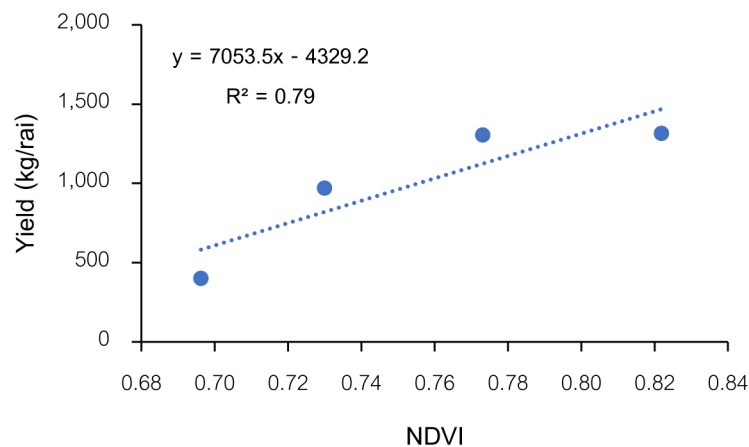


Figure 9 The relationship between NDVI and yield

สรุป

การตอบสนองของความเข้มของสีใบ NDVI และผลผลิต ต่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจน มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวก กล่าวคือเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนมากขึ้น จะทำให้ความเข้มของสีใบ NDVI และผลผลิต เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงระดับหนึ่งข้าวโพดข้าวเหนียวจะเริ่มตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนในรูปผลผลิตน้อยลง โดยการให้ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 32 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ ให้ผลผลิตน้ำหนักฝักสดรวมเปลือกสูงสุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการให้ปุ๋ยไนโตรเจน 20 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ แสดงให้เห็นว่าข้าวโพดข้าวเหนียวเริ่มมีการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนน้อยลงเมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนมากกว่า 20 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ ดังนั้นจึงควรให้ปุ๋ยไนโตรเจนที่อัตรา 20 กิโลกรัม ไนโตรเจนต่อไร่ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI กับผลผลิตพบว่าอยู่ในระดับมีความสัมพันธ์มาก จากความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยนำค่า NDVI จากภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการประเมินความสมบูรณ์ของข้าวโพดข้าวเหนียวและใช้ประเมินความต้องการปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับข้าวโพดข้าวเหนียวได้ ข้อควรระวังในการนำข้อมูล NDVI จากภาพถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับไปใช้ คือค่า NDVI ของข้าวโพดจะแตกต่างกันตามระยะการเจริญเติบโตและพันธุ์ข้าวโพด นอกจากนี้ในขั้นตอนการก่อสร้างภาพถ่ายควรคำนึงถึงระดับความสูงใน

การบิน เมื่อบินในระดับความสูงเพิ่มขึ้นจะทำให้ความละเอียดของจุดภาพน้อยลงและเวลาที่บันทึกภาพควรเป็นช่วงเวลาระหว่างก่อนหรือหลังเที่ยงประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อหลีกเลี่ยงเงาที่ปรากฏในภาพซึ่งมีผลต่อค่า NDVI ที่ผลิตได้

จากเทคนิคการสร้างภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงและภาพถ่ายหลายช่วงคลื่นโดยอากาศยานไร้คนขับสามารถนำวิธีการสร้างภาพถ่ายไปประยุกต์ใช้ในการเกษตรด้านอื่นๆ เช่น การติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อสร้างภาพถ่ายความร้อนอุณหภูมิพื้นผิว (Thermal image) โดยเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการจำแนกระดับความชื้นของดิน ความเครียดของพืชที่ขาดน้ำ การคายระเหยภายในพื้นที่ หรือตรวจวัดสภาพภูมิประเทศ การชะล้างพังทลาย ความสูงของต้นด้วย การติดตั้งเซนเซอร์ LIDAR จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ สามารถนำไปพัฒนาร่วมกับปัจจัยอื่นๆ เช่น พันธุ์ สมบัติดิน ภูมิอากาศ การให้น้ำ ข้อมูลเชิงพื้นที่หลายช่วงเวลา (Spatio-temporal data), Sufficiency Index เป็นต้น เพื่อใช้ในการปรับปรุงศักยภาพการผลิตให้เพิ่มสูงขึ้นและมีความถูกต้องของข้อมูลมากขึ้น นอกจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะสรุปออกมาเป็นภาพรวมทั้งพื้นที่ที่ศึกษาแล้ว การจัดทำภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริงและ NDVI โดยใช้อากาศยานไร้คนขับยังสามารถแสดงผลพร้อมออกมาในเชิงพื้นที่ โดยแสดงเป็นภาพแผนที่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา ทำให้มองเห็นภาพรวมและเฉพาะพื้นที่ส่วนย่อยภายใน

แปลง เพื่อช่วยในการจัดการต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการเกษตรแม่นยำสูงที่ต้องระบุพิกัดภายในของแปลง เช่น การให้น้ำ ให้ปุ๋ยที่แตกต่างกันตามความต้องการภายในสภาพแวดล้อมย่อยนั้นๆ หรือการแบ่งเขตการจัดการ (Management zone) ได้

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ “สวก” ผู้วิจัยขอขอบคุณ สวก. และบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนด้านงบประมาณ ขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินการวิจัย และขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวบ้านหนองบัวที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ดำเนินการจัดสร้างแปลงทดลอง

เอกสารอ้างอิง

จิรวัดณ์ โนโตโฮง, ขวัญตรี แสงประชานารักษ์, Chanreaksa Chea, เจษฎา โพธิ์สม, เสรี วงศ์พิเชษฐ, ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, และ มหิศร ว่องผาติ. 2562. การศึกษาความเป็นไปได้ในการทำนายผลผลิตอ้อยในแปลงโดยใช้ดัชนีพืชพรรณ NDVI, Clred edge และปริมาตรจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงตัวเลข. เก่งเกษตร 47: 679-694.

ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. 2558. Smart Farm. <http://smartfarmthailand.com/precisionfarming/index.php/product/micro-climate-monitoring>. ค้นเมื่อ 30 กันยายน 2562.

ประสงค์ โยระภักดิ์, ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา, และ อรรถกร นัฏฐ์รุ่ง. 2556. การประเมินปริมาณไนโตรเจนในใบที่สัมพันธ์กับการเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วเขียว. น. 591-597. ใน: โครงการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

เพ็ญธิรัตน์ อัครผลสุวรรณ. 2552. ไร่ไวน์อุ่น

อัจฉริยะ. กลุ่มพัฒนาเทคโนโลยีการเผยแพร่ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยีกรมส่งเสริมการเกษตร.

แพรวพรรณ เปรมปราโมทย์. 2553. ผลของระยะปลูกและปุ๋ยไนโตรเจนต่อลักษณะทางพืชไร่และผลผลิตของข้าวโพดเทียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ภราดร กาญจนสุธรรม, นิพนธ์ ตั้งธรรม, และเรืองโร ไตรฤกษ์. 2557. การประมาณผลผลิตต่อไร่ของข้าวนาปรังด้วยข้อมูลดาวเทียม SMMS โดยใช้ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) : กรณีศึกษาอำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22: 55-66.

รักศักดิ์ เสริมศักดิ์. 2551. การทำนายผลผลิตพืชไร่โดยใช้การสะท้อนแสงของทรงพุ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

วิชัย โอภาณุกุล, อานนท์ สายคำฟู, พงษ์ชาติ ปุณณวัฒน์, อิศเรศ เทียนทัต, บาลทิพย์ ทองแดง, และวีระ สุขประเสริฐ. 2560. การพันสารชีวภัณฑ์เพื่อกำจัดและควบคุมโรคแมลงศัตรูพืชในพื้นที่การเกษตร. การวิจัยอากาศยานไร้คนขับ (Drone) สำหรับเกษตรอินทรีย์. น. 219-223. ใน: การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร.

ศิริเรือง พัฒน์ช่วย, ศิวะพร วิวัฒน์ปัญญา, พรประสิทธิ์ บุญทอง, และวิลาธรณ์ สุขชนะ. 2559. การพัฒนาอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเฝ้าระวังและควบคุมการแพร่ขยายของหอยเชอรี่ในนาข้าวหอมมะลิ. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

ศิวา แก้วปลั่ง. 2561. การประเมินการใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

- สำหรับการประมาณค่าชีวมวลเหนือพื้นดินของต้นหม่อน. แก่นเกษตร 46(พิเศษ 1): 381-387.
- สรศรีใจ กลิ่นดาว. 2550. การสำรวจระยะไกล : การประมวลผลภาพเชิงเลขเบื้องต้น. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเกษตรอำเภอบ้านฝาง. 2562. ผู้บริหารกรมส่งเสริมการเกษตรเยี่ยมกลุ่มข้าวโพดข้าวเหนียวหนองบัว. แหล่งข้อมูล: <http://banfang.khonkaen.doe.go.th/read-394>. ค้นเมื่อ 30 กันยายน 2562.
- สืบสกุล ศิริยุทธ์. 2554. การประเมินระดับคลอโรฟิลล์ในใบด้วยดัชนีชี้วัดที่สัมพันธ์กับการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวโพด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- Caturegli, L., M. Corniglia, M. Gaetani, N. Grossi, S. Magni, M. Migliazzi, L. Angelini, M. Mazzoncini, N. Silvestri, M. Fontanelli, M. Raffaelli, A. Peruzzi, and M. Volterrani. 2016. Unmanned Aerial Vehicle to Estimate Nitrogen Status of Turfgrasses. *PLoS ONE* 11: 1-13.
- Croft, H., and J. Chen. 2018. Leaf pigment content. *Comprehensive Remote Sensing* 3: 117-142.
- FAO. 1999. Design and analysis of experiments. <http://www.fao.org/3/X6831E/X6831E07.htm> Accessed 20 Mar. 2020.
- Fortes, R., M. H. Prieto, A. García-Martín, A. Córdoba, L. Martínez, and C. Campillo. 2015. Using NDVI and guided sampling to develop yield prediction maps of processing tomato crop. *Spanish Journal of Agricultural Research* 13: e02-004.
- Grant, T. 2010. The Randomized Complete Block Design (RCBD). <https://pbg-works.org/sites/pbgworks.org/files/RandomizedCompleteBlockDesignTutorial.pdf> Accessed 20 Mar. 2020.
- Horsley, R. 2019. Randomized Complete Block Design (RCBD). [https://www.ndsu.edu/faculty/horsley/RCBD .pdf](https://www.ndsu.edu/faculty/horsley/RCBD.pdf) Accessed 20 Mar. 2020.
- Lee, Y., C. Yang, K. Chang, and Y. Shen. 2011. Effects of nitrogen status on leaf anatomy, chlorophyll content and canopy reflectance of paddy rice. *Botanical Studies* 52: 295-303.
- Lisboa, I., M. Damian, M. Cherubin, P. Barros, P. Iorio, C. Cerri, and C. Cerri. 2018. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. *Agronomy* 8: 1-21
- Liu, K., and P. Wiatrak. 2011. Corn (Zea Mays L.) Plant characteristics and grain yield response to N fertilization programs in no-tillage system. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 6: 172-179.
- Sanodiya, R., M. Singh, V. Bector, B. Patel, and P. Mishra. 2017. Yield Prediction by Integrating NDVI and N-Tester Data with Yield Monitor Data. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6: 1296-1307.
- Shaver, T. M., R. Khosla, and D. G. Westfall. 2011. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precision Agriculture* 12: 892-904.
- Tucker, C. J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Zhao, D., K. Reddy, V. Kakani, J. Read, and G. Carter. 2003. Corn (Zea mays L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. *Plant and Soil* 257: 205-217.