บทความวิจัย

การสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตของข้าวนาปรังด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวัน

พิชชาทร มีมา* และ อริศรา เจริญปัญญาเนตร
สาขาวิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศศาสตร์ ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 1839 6452 อีเมล: parkdong07@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.018
รับเมื่อ 2 มีนาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 13 พฤษภาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 16 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวันในระบบเรดาร์ เพื่อพัฒนาเป็นแผนที่ผลผลิตข้าวนาปรัง บริเวณพื้นที่อำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนลวันหลายช่วงเวลาเพื่อนำมาสกัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และข้อมูลผลผลิตข้าวนาปรังจากการสัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่จำนวน 34 แปลง เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรตามในการสร้างแบบจำลอง สำหรับขั้นตอนในการศึกษาประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การปรับแก้ข้อมูลภาพดาวเทียมเซนติเนลวัน 2) การสกัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ 3) การสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังโดยใช้วิธีการทางสถิติ และ 4) การคัดเลือกแปลงนาข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ได้แก่ แบบจำลองที่นำค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาข้าวโพลาไรเซชันแบบการรับส่งสัญญาณในระนาบเดียวกัน (Like-polarized แบบ VV) เป็นตัวแปรอิสระ และผลผลิตข้าวนาปรัง (หน่วย : กิโลกรัมต่อไร่) เป็นตัวแปรตาม แบบจำลองดังกล่าวมีค่า R-Squared, Adjusted R-Squared, Predicted R-Squared, RMSE เท่ากับ 0.869, 0.828, 0.784, 40.08 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดาวเทียมเซนติเนลวัน การประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง เทคนิคการรับรู้ระยะไกล

การอ้างอิงบทความ: พิชชาทร มีมา และ อริศรา เจริญปัญญาเนตร, "การสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตของข้าวนาปรังด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,* ปีที่ 31, ฉบับที่ 3, หน้า 561–573, ก.ค.–ก.ย. 2564.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2564
The Journal of KMUTNB., Vol. 31, No. 3, Jul.–Sep. 2021

Research Article

Model Creation for Assessing Productivity of Dry Season Rice with Backscatter Coefficient from Sentinel-1

Phichaton Mema* and Arisara Charoenpanyanet
Program in Geography and Geoinformatics, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 09 1839 6452, E–mail: parkdong07@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.018
Received 2 March 2020; Revised 13 May 2020; Accepted 16 June 2020; Published online: 24 May 2021
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The purposes of this study were to create a model for assessment of dry season rice productivity with backscatter coefficient from Sentinel-1 in radar system for developing season rice productivity map in Phichai district, Uttaradit province. Multi-temporal Sentinel-1 was used to extract backscatter coefficient. The data of dry season rice productivity retrieved from the interview of farmers in 34 field areas was used as the dependent variable to create the model. There are 4 main steps in the study: 1) correction of Sentinel-1 data, 2) extraction of backscatter coefficient, 3) creation of the model for assessing productivity of dry season rice using statistical methods involved, and 4) selection of rice fields with percentage changes of backscatter coefficient. The results showed that the most effective model was the model using maximum and mean value of backscatter coefficient of rice field with the polarization state as a like-polarized (vertical to vertical; VV). This is an independent variable. Dry season rice productivity (unit: kilograms per rai) is a dependent variable. The model reveals its R-Squared, adjusted R-Squared, predicted R-Squared and RMSE as 0.869, 0.828, 0.784, and 40.08 kilograms per rai respectively.

Keywords: Backscatter Coefficient, Sentinel-1, Assessing Productivity, Assessing Productivity of Dry Season Rice, Remote Sensing Technique

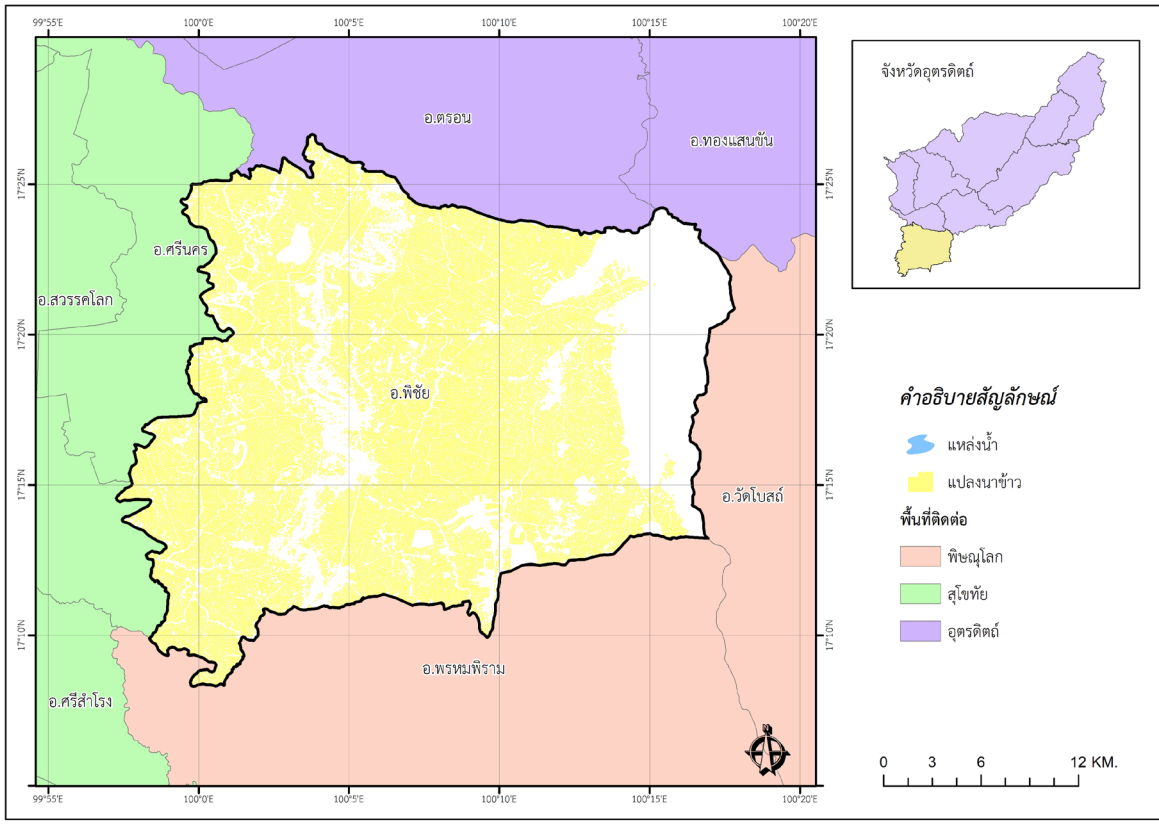
Please cite this article as: P. Mema and A. Charoenpanyanet, "Model creation for assessing productivity of dry season rice with backscatter coefficient from Sentinel-1," *The Journal of KMUTNB,* vol. 31, no. 3, pp. 561–573, Jul.–Sep. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศเป็นเครื่องมือที่มีส่วนช่วยในการเข้าใจปรากฏการณ์และการตัดสินใจเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการพัฒนาไปพร้อมกับข้อมูลที่หลากหลาย สามารถนำมาประยุกต์กับงานด้านต่างๆ หลายด้าน โดยเฉพาะด้านเกษตรกรรม ในประเทศไทยได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวมาช่วยทางด้านเกษตรกรรม เช่น Agri-Map ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์ G-Agro ระบบภูมิสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเกษตรเชิงพื้นที่ Rice GIS แอปข้อมูลทางภูมิสารสนเทศด้านข้าวไทย ระบบต่างๆ ข้างต้นเป็นระบบภูมิสารสนเทศด้านการเกษตรที่มีศักยภาพในการตัดสินใจการจัดการเชิงพื้นที่ในภาพใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดของข้อมูลในการช่วยสนับสนุนการตัดสินใจที่ยังไม่เพียงพอในหน่วยย่อย ยกตัวอย่างเช่น มีชั้นข้อมูลต่างๆ ที่สนับสนุนข้อมูลในระดับตำบล อำเภอ จังหวัด หรือข้อมูลเชิงพื้นที่แบบองค์รวม แต่ยังไม่อาจสะท้อนถึงข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในระดับรายแปลง การนำเทคนิคการรับรู้ระยะไกลมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการเข้าถึงข้อมูลในทุกระดับของพื้นที่จึงเป็นโอกาสที่สำคัญในการช่วยให้เกิดการพัฒนาข้อมูลที่ยกระดับการตัดสินใจในระดับพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคนิคการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ การรับรู้ระยะไกลเป็นทั้งศาสตร์และศิลป์ของการรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัตถุ พื้นที่ หรือปรากฏการณ์ต่างๆ บนพื้นผิวโลกผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลที่รับข้อมูลโดยอุปกรณ์ที่ไม่ได้สัมผัสกับสิ่งต่างๆ บนพื้นผิวโลกโดยตรง [1] ดาวเทียมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคการรับรู้ระยะไกลในการได้มาซึ่งข้อมูล ดาวเทียมเซนติเนลวัน (Sentinel-1) เป็นดาวเทียมระบบแอ็คทิฟ (Active) ประเภทเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar) จุดเด่นของดาวเทียมระบบนี้ คือ สามารถบันทึกภาพได้ทั้งกลางวันและกลางคืน มีศักยภาพในการทะลุชั้นบรรยากาศทำให้สามารถลดข้อจำกัดในด้านการนำข้อมูลมาใช้งานได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับดาวเทียมหลายช่วงคลื่น (Multispectral) เช่น ดาวเทียมแลนด์แซทแปด (Landsat8) ที่ข้อมูลมักเกิดปัญหาพบเมฆในภาพปริมาณสูงในพื้นที่เขตร้อนชื้น ข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนลวันเป็นข้อมูลที่สามารถเข้าถึงแบบเปิดไม่มีค่าใช้จ่ายของข้อมูลครอบคลุมทั่วโลก มีวงโคจรที่ 12 วันต่อดวง มีระบบบันทึกภาพช่วงคลื่นซีแบนด์ (C-Band) ความยาวคลื่น 3.75 ถึง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งตอบสนองต่อเรือนยอดและโครงสร้างภายในของพืชได้ดี [1], [2] สามารถนำมาศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนลวันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานและพื้นที่ ที่หลากหลาย เช่น การตรวจสอบการเก็บเกี่ยวพืชผล [3] การติดตามน้ำท่วม [4] การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเมือง [5]

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ หรือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของการกระเจิง (Backscatter Coefficient) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เซนเซอร์ได้รับนอกเหนือจากที่เซนเซอร์ควรจะได้รับ [6] เป็นค่าที่ใช้ชี้วัดความเข้มข้นของการสะท้อนที่สัญญาณเรดาร์ตกกระทบกับวัตถุและส่งกลับมายังตัวรับข้อมูลดาวเทียม โดยระดับของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น ขนาด รูปร่าง ทิศทางการวางตัว ความชื้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ ความยาวคลื่น โพลาไรเซชัน (Polarization) [7] จากคุณสมบัติที่กล่าวข้างต้นประกอบกับคุณสมบัติของข้อมูลจากดาวเทียมเซนติเนลวัน จึงเกิดแนวความคิดในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตข้าวรายแปลง โดยมีข้อสันนิษฐานว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเรือนยอดของข้าวมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ย่อมส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้น ทำการศึกษาข้าวนาปรังโดยพิจารณาจากช่วงเวลาการเพาะปลูกและการโอกาสการนำไปต่อยอดกับข้อมูลอื่นๆ ใช้วิธีการทางสถิติในการสร้างแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) เพื่อหาชุดตัวแปรอิสระที่เหมาะสมต่อการคาดการณ์ตัวแปรตาม โดยกำหนดตัวแปรอิสระเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับในแต่ละช่วงเวลาการเจริญเติบโตของข้าวและตัวแปรตามคือผลผลิตข้าว



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

โดยการศึกษานี้จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนากระบวนวิธีให้หลากหลาย ครอบคลุมระดับต่างๆ ของพื้นที่ และต่อยอดให้เกิดประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในพื้นที่อื่นๆ ในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

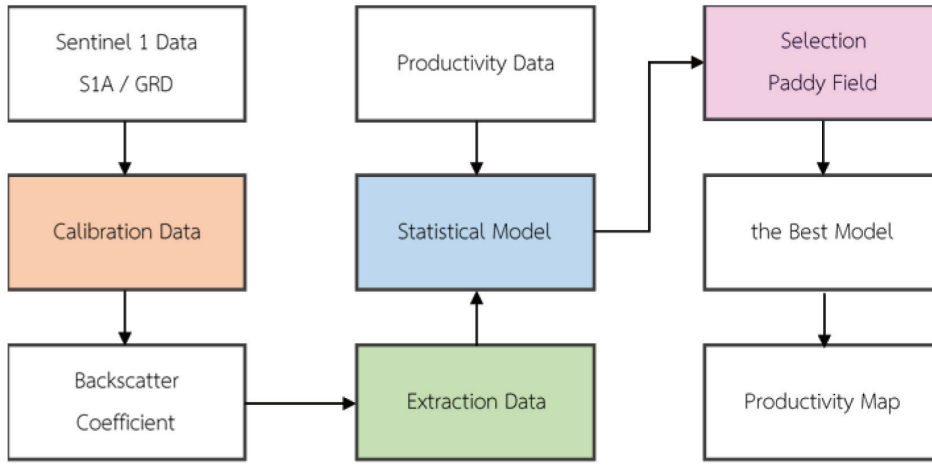
2.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่ อำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์ ดังรูปที่ 1 เป็นพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ดังกล่าวตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย ขนาดพื้นที่ทั้งหมด 762.07 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 476,297 ไร่ เป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญ พบการปลูกข้าวมากที่สุดในบริเวณดังกล่าว คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 264,500 ไร่

2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

2.2.1 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมเซนติเนลวัน ระบบบันทึกภาพแบบช่วงคลื่นซีแบนด์ ความยาวคลื่น 3.75 ถึง 7.5 เซนติเมตร แพลตฟอร์มเอสวันเอ (S1A) ชนิดผลิตภัณฑ์จีอาร์ดี (GRD) โหมดเซนเซอร์ไอดับเบิลยู (IW) เลขวงโคจรสัมพันธ์ 172 ประกอบด้วยโพลาไรเซชัน แบบวีเอช (Vertical Transmit and Horizontal Receive; VH) และแบบวีวี (Vertical Transmit and Vertical Receive; VV) ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ข้อมูลมีระยะห่างของวงโคจรที่ 12 วัน ชุดข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในช่วงระหว่างวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึง 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

การศึกษาครั้งนี้ได้นำข้อมูลมาใช้ 11 ชุดข้อมูล ทำการปรับเทียบข้อมูลชุดที่ 1 ให้ใกล้เคียงกับระยะเริ่มต้นการเจริญ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

เติบโตของข้าวนาปรัง โดยใช้จุดกึ่งกลางของระยะวงโคจร (6 วัน) เป็นตัวตัดสินใจในการปรับเทียบข้อมูล

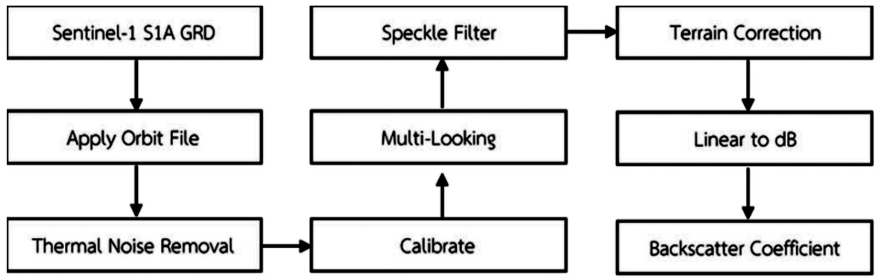
2.2.2 ข้อมูลผลผลิตข้าวนาปรังสำหรับสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง ทำการสุ่มตรวจข้อมูลแปลงนาในพื้นที่จำนวน 100 แปลงนา โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ 1) แปลงนาที่มีขนาดมากกว่า 5 ไร่ ขึ้นไป เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการสกัดข้อมูล 2) แปลงนาที่เกษตรกรยืนยันว่ามีน้ำเพียงพอต่อการทำการเกษตรในรอบนั้นๆ ทำการเลือกพันธุ์ข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูก ณ แปลงนา ที่พบจากการสุ่มตรวจ ซึ่งได้แก่ แปลงนาที่ปลูกข้าวสายพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่กรมการข้าวรับรองพันธุ์ และขึ้นทะเบียนเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indications) ในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง [8] จำนวน 48 แปลง จากนั้นทำการคัดเลือกแปลงนาตัวอย่างที่มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับใกล้เคียงกัน ทั้งสิ้นจำนวน 34 แปลง เพื่อกำหนดขอบเขตการนำไปข้อมูลสร้างแบบจำลองให้ชัดเจน และลดความแปรปรวนของการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ทำการติดตามข้อมูลของแต่ละแปลงนาเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลผลผลิตข้าวนาปรังหลังการเก็บเกี่ยว ข้อมูลช่วงเวลาการเริ่มต้นเพาะปลูกและช่วงเวลาเก็บเกี่ยว และขอบเขตพื้นที่แปลงนาทั้งหมด

2.3 วิธีการวิจัย

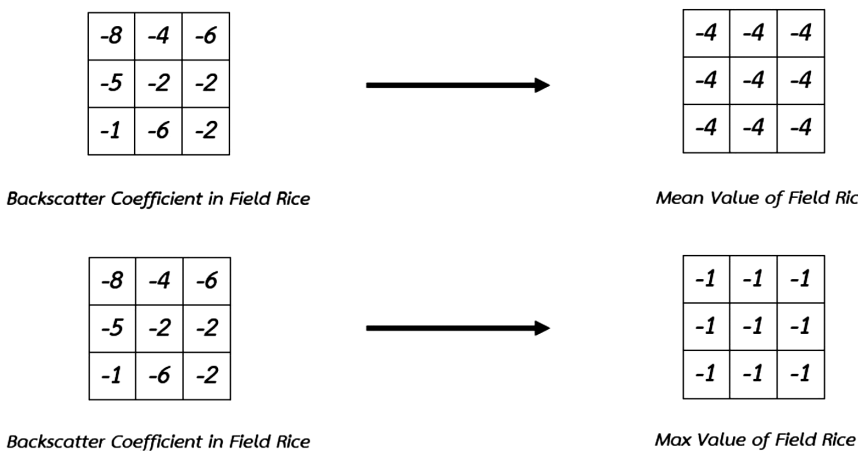
การศึกษาครั้งนี้มีได้ใช้วิธีการทางสถิติในการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การปรับแก้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเซนติเนลวันสู่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Correction Data) 2) การสกัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสำหรับการสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง (Extraction Data) 3) การสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตโดยใช้เทคนิคทางสถิติ (Statistical Model) และ 4) การคัดเลือกแปลงนาข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 2

2.3.1 การปรับแก้ข้อมูลภาพดาวเทียมเซนติเนลวันสู่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับข้อมูลภาพดาวเทียมเซนติเนลวันจำเป็นต้องได้รับการปรับแก้ข้อมูล เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสำหรับนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการปรับแก้ภาพดาวเทียมเซนติเนลวัน โดยใช้โปรแกรมรหัสเปิด ได้แก่ โปรแกรมสแนป (SNAP; Sentinel Application Platform) โดยมีขั้นตอนการปรับแก้ ดังรูปที่ 3

เริ่มจากทำการปรับแก้ตำแหน่งข้อมูลดาวเทียม จากนั้นจึงปรับแก้สัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน ปรับแก้ความ



รูปที่ 3 การปรับแก้ข้อมูลเซนติเนลวัน



รูปที่ 4 หลักการสกัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

คลาดเคลื่อนเชิงรังสี ปรับปรุงคุณภาพของภาพ ทำการกรองสเปคเคิล (Speckle) ที่ปรากฏบนภาพปรับแก้เชิงภูมิประเทศ และสุดท้ายแปลงข้อมูลรูปแบบเชิงเส้น (Linear) ให้เป็นรูปแบบเดซิเบล (Decibel) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

2.3.2 การสกัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสำหรับการสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง

กระบวนการสกัดข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวัน เป็นกระบวนการดึงข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้ทำการปรับแก้จากขั้นตอนก่อนหน้าในพื้นที่แปลงนาแต่ละแปลงออกมา เพื่อนำไปสร้างตัวแปรอิสระในแต่ละช่วงเวลา โดยในการศึกษาได้ใช้วิธีการสกัดข้อมูลในพื้นที่แปลงนาทั้งหมด ด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยของแปลงนาทั้งหมด และวิธีการหาค่าสูงสุดของแปลงนาทั้งหมด ตามรูปที่ 4 โดยค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุดของแปลงนาทั้งหมดที่นำมาใช้เป็นตัวแปรอิสระเพื่อสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวนาปรังมีจำนวนทั้งสิ้น 8 ช่วงชุดข้อมูล (ตัดช่วงชุดข้อมูลที่ 1 ถึง 3 เนื่องจากอาจเกิดการปะปนกันของต้นข้าวหน้าดิน หรือน้ำ และหลังช่วงชุดข้อมูลที่ 11 เนื่องจากพฤติกรรมของเวลาการเก็บเกี่ยวข้าวของเกษตรกรไม่เท่ากัน จึงไม่นำข้อมูลส่วนดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เพื่อลดความแปรปรวนของค่าสถิติในการนำไปวิเคราะห์) ทำการกำหนดชื่อของตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ค่าเฉลี่ยของแปลงนาทั้งหมดช่วงที่ 4 ถึงช่วงที่ 11 เท่ากับ MN_4, MN_5, ..., MN_{11} และค่าสูงสุดของแปลงนาทั้งหมดช่วงที่ 4 ถึงช่วงที่ 11 เท่ากับMX_4, MX_5, ..., MX_{11} โดยช่วงที่ 4 เป็นช่วงชุดข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์

การสะท้อนกลับที่ปรากฏบริเวณช่วงเริ่มระยะแตกกอของข้าวแปลงนานั้นๆ ขณะที่ช่วงที่ 11 เป็นช่วงชุดข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ปรากฏในช่วงท้ายของการเพาะปลูกข้าวนาปรัง

2.3.3 การสร้างแบบจำลองประเมินผลผลิตโดยใช้เทคนิคทางสถิติ

ในการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังได้ใช้เทคนิคทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ วิธีการคัดเลือกตัวแปรใช้การถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง โดยรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณดังสมการที่ (1) [9] มีดังนี้

$$\hat{Y} = b_0+b_1X_1+b_2X_2+\ldots+b_pX_p, \quad (1)$$

โดย $\hat{Y}$ เป็นค่าทำนายหรือค่าที่คาดหวังของตัวแปรตาม (Dependent Variable)

X_1 ถึง X_p เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) หรือตัวแปรทำนาย

b_0 คือ ค่าของ Y เมื่อตัวแปรอิสระทั้งหมดเท่ากับศูนย์

b_1 ถึง b_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณของแต่ละตัวแปร

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแต่ละตัวแปร แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงใน Y ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงหนึ่งหน่วยในตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ค่าที่คาดหวังหรือตัวแปรตาม ($\hat{Y}$) ได้แก่ ปริมาณผลผลิตข้าวนาปรัง และตัวแปรอิสระ (X_1 ถึง X_p) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวันตามช่วงเวลาระยะห่างวงโคจร 12 วัน เริ่มจากระยะแตกกอของการปลูกข้าว ถัดไป 8 ชุดข้อมูล ประกอบด้วยสามเงื่อนไขในการนำข้อมูลมาใช้วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาทั้งหมด ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาทั้งหมด และค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาทั้งหมด

2.3.4 การคัดเลือกแปลงนาข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ในการนำข้อมูลแปลงนาไปใช้ร่วมกับแบบจำลองที่ดีที่สุดที่วิเคราะห์ได้สำหรับการประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง ต้องทำการคัดเลือกแปลงนาที่เหมาะสม เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลทำให้ไม่สามารถระบุสายพันธุ์ของแปลงนาในพื้นที่เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับแบบจำลองได้ จึงทำการวิเคราะห์วิธีการคัดเลือกแปลงนา โดยการศึกษาลักษณะรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาตัวอย่างทั้งหมด 34 แปลงนาที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ในช่วงระยะเริ่มต้นการเพาะปลูก โดยมีข้อสันนิษฐานว่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงจากแปลงนาตัวอย่างที่ทำการศึกษารูปแบบที่เกิดขึ้นย่อมมีลักษณะใกล้เคียงที่ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแปลงนาสำหรับนำไปใช้กับแบบจำลองประเมินผลผลิต ใช้ช่วงชุดข้อมูลที่ 1, 2, 3 และ 4 ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาในการวิเคราะห์ ปรับลำดับการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลให้สอดคล้องกันมากที่สุด จากรูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขเพื่อคัดเลือกแปลงนาสำหรับการนำไปใช้ประเมินผลผลิต (วิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโพลาไรเซชันแบบวีวี) โดยใช้เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ นำแปลงนาที่ผ่านเงื่อนไขไปใช้งานกับแบบจำลองประเมินผลผลิตเพื่อสร้างแผนที่ผลผลิตต่อไป

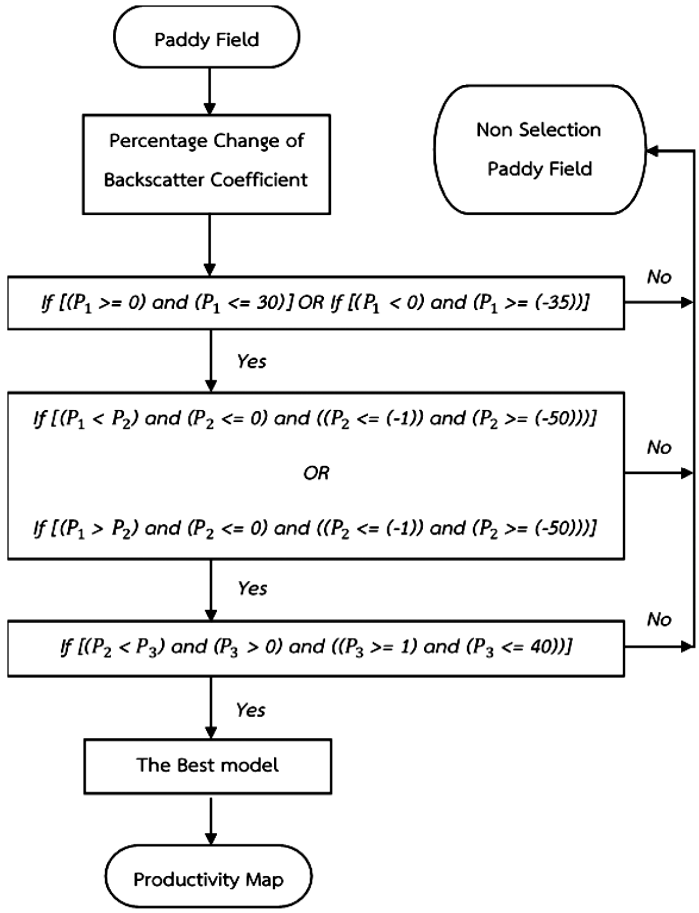
การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังสมการที่ (2) ต่อไปนี้

$$P_n = \frac{MN_n - MN_{n+1}}{MN} \times 100 \quad (2)$$

โดย P_n คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ณ ช่วงที่ n ถึง n+1

MN_n คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ ณ ช่วงเวลาที่ n

MN_{n+1} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ ณ ช่วงที่เวลาที่ n+1



รูปที่ 5 วิธีการคัดเลือกแปลงนาข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

3. ผลการทดลอง

จากการใช้เทคนิคทางสถิติ ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับใช้ในการประเมินผลผลิตข้าวนาปรัง โดยจากตารางที่ 1 แสดงตารางสรุปผลรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองต่างๆ ไว้ 12 แบบจำลอง โดยเกิดจากการสร้างตัวแปรอิสระจากกระบวนการสกัดข้อมูลจากข้อมูลแปลงนา ทั้ง 3 รูปแบบ อย่างละ 2 โพลาไรเซชัน (วีเอชและวีวี) ได้แก่ การใช้ค่าสูงสุดจากแปลงนา การใช้ค่าเฉลี่ยจากแปลงนา และการใช้ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดจากแปลงนา และสร้างตัวแปรตามจากหน่วยของผลผลิต แบ่งออกเป็นผลผลิตทั้งหมดของแปลงนา หน่วยกิโลกรัม (KG) และผลผลิตต่อไร่ของแปลงนา หน่วยกิโลกรัมต่อไร่ (PRR) ทำการคัดเลือกแบบจำลองโดยพิจารณาจากค่า R-Squared โดยที่ค่า R-Squared จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้ดียิ่งขึ้นค่า Adjusted R-Squared เป็นตัวช่วยพิจารณาการนำเข้าตัวแปรอิสระของแบบจำลอง ค่า Predicted R-Squared เป็นค่าที่ใช้ทวนสอบแบบจำลอง (Model Validation) เพื่อวัดประสิทธิภาพในการคาดการณ์ของแบบจำลอง โดยมีพื้นฐานจากวิธีการตรวจสอบไขว้แบบ Leave One Out Cross Validation [10], [11] และค่า RMSE เป็นค่าที่ใช้วัดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง โดยค่า R-Squared, Adjusted R-Squared และ Predicted R-Squared พิจารณาค่าที่ใกล้ 1 มากที่สุด

ตารางที่ 1 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง

Model	Polarization	Unit	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	RMSE
Max Value of Field Rice	VH	KG	0.718	0.673	0.598	3,543
Max Value of Field Rice	VH	PPR	0.622	0.523	0.323	79.96
Max Value of Field Rice	VV	KG	0.704	0.627	0.482	4,026
Max Value of Field Rice	VV	PPR	0.318	0.209	0.028	97.37
Mean Value of Field Rice	VH	KG	0.377	0.247	0.000	4,881
Mean Value of Field Rice	VH	PPR	0.381	0.252	0.000	98.10
Mean Value of Field Rice	VV	KG	0.330	0.196	0.000	6,013
Mean Value of Field Rice	VV	PPR	0.683	0.646	0.579	61.75
Mean & Max Value of Field Rice	VH	KG	0.711	0.636	0.498	3,894
Mean & Max Value of Field Rice	VH	PPR	0.842	0.759	0.654	49.90
Mean & Max Value of Field Rice	VV	KG	0.693	0.629	0.543	4,216
Mean & Max Value of Field Rice	VV	PPR	0.869	0.828	0.784	40.08

ส่วนค่า RMSE พิจารณาค่าที่น้อยที่สุดต่อหน่วยนั้นๆ ประกอบกับพิจารณาปัญหาที่อาจเกิดความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบพหุ (Multicollinearity) ปัญหาแบบจำลองคาดการณ์ค่าต่ำเกินไป (Under-fitting) หรือปัญหาแบบจำลองคาดการณ์ค่าที่สูงเกินไป (Over-fitting) เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากตารางที่ 1 ผลของแบบจำลองสำหรับประเมินผลผลิตข้าวนาปรังที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดของการศึกษา ได้แก่ แบบจำลองที่ใช้ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของแปลงนาข้าวโพลาไรเซชันแบบวีวี (VV) หน่วยผลผลิตต่อไร่ (PRR) ค่า R-Squared เท่ากับ 0.869 ค่า Adjusted R-Squared เท่ากับ 0.828 และค่า Predicted R-Squared เท่ากับ 0.784 โดยมีรูปแบบสมการสำหรับการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังดังสมการที่ (3)

$$PPR=1203.5-(34.78*MN_4)+(93.95*MN_5)-(6.79*MN_8)+(25.12*MX_4)-(37.31*MX_5)-(17.34*MX_6)+(19.38*MX_7) \quad (3)$$

โดยที่ PPR คือ ผลผลิตต่อไร่ (กก./ไร่)

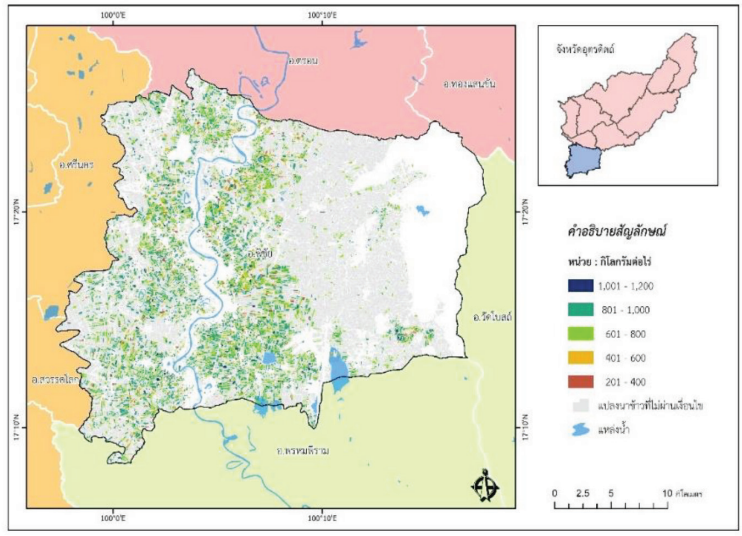
MX_n คือ ค่าสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาข้าว ณ ช่วงเวลาที่ n

MN_n คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแปลงนาข้าว ณ ช่วงเวลาที่ n

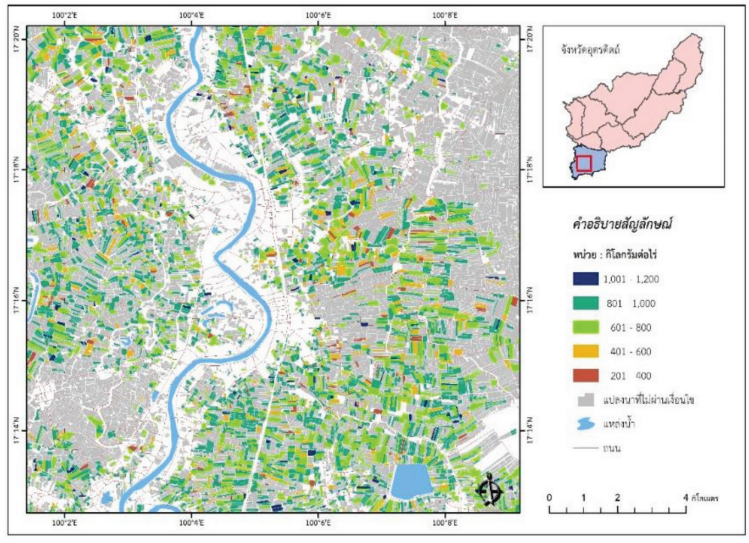
n คือ ช่วงเวลาของลำดับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ณ แปลงนาข้าว เช่น $n = 1$ เท่ากับช่วงเวลาเริ่มต้นการเพาะปลูก

นำแบบจำลองสำหรับการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังที่ดีที่สุด กับแปลงนาข้าวที่ได้จากการคัดเลือกแปลงนาข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับทำการคำนวณสำหรับสร้างแผนที่ผลผลิตข้าวนาปรังรายแปลง ดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7

ผลจากการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังด้วยแบบจำลอง พบว่า ผลผลิตเฉลี่ยในพื้นที่จากการประเมินของแบบจำลองเท่ากับ 771 กิโลกรัมต่อไร่ ผลผลิตรวมทั้งหมดในพื้นที่ จากการประเมินของแบบจำลอง เท่ากับ 52,171 ตัน



รูปที่ 6 แผนที่ผลผลิตข้าวนาปรัง บริเวณอำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์



รูปที่ 7 แผนที่ผลผลิตข้าวนาปรัง บริเวณอำเภอพิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์ (ส่วนขยาย)

ปริมาณผลผลิต 201 ถึง 400 กิโลกรัมต่อไร่ พื้นที่เพาะปลูก 2,415 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 854 ตัน ปริมาณผลผลิต 401 ถึง 600 กิโลกรัมต่อไร่ พื้นที่เพาะปลูก 7,533 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 3,865 ตัน ปริมาณผลผลิต 601 ถึง 800 กิโลกรัมต่อไร่ พื้นที่เพาะปลูก 26,099 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 19,017 ตัน ปริมาณผลผลิต 801 ถึง 1000 กิโลกรัมต่อไร่ พื้นที่เพาะปลูก 30,543 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 26,728 ตัน ปริมาณผลผลิต 1001 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อไร่ พื้นที่เพาะปลูก 1,648 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 1,701 ตัน

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการสร้างแบบจำลองในการประเมินผลผลิตข้าวนาปรังด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากดาวเทียมเซนติเนลวัน แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการ

ศึกษาครั้งนี้ใช้การสกัดข้อมูลสำหรับนำมาสร้างตัวแปรอิสระในช่วงชุดข้อมูลที่ 4 ถึง 8 อยู่ในช่วงระหว่างการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบ (Vegetation Phase) ถึงช่วงการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ (Reproductive Phase) [12] เป็นช่วงที่ข้าวแตกกอ ลำต้นสูงขึ้น เริ่มสร้างช่อรวงอ่อนและเตรียมเข้าสู่ระยะออกดอก ระยะเวลาประมาณ 36 ถึง 84 วันหลังหว่านเมล็ด ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าสูงสุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าเฉลี่ยเป็นการเฉลี่ยค่าจากวัตถุโดยรวมของแปลงนาที่สะท้อนการผสมระหว่างเรือนยอดของข้าว ปริมาณน้ำและเงื่อนไขต่างๆ ที่ปรากฏในแต่ละแปลงนาเปรียบเหมือนตัวแทนปัจจัยโดยรวมของแปลงนานั้นๆ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าสูงสุดเป็นค่าที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงเรือนยอดของข้าวเป็นหลัก โดยเมื่อปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับย่อมเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของกลไกการกระเจิงที่ตอบสนองต่อพื้นผิวเรียบ (Smooth Surface) [7] ส่วนเรือนยอดของข้าวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของกลไกการกระเจิงที่เป็นการกระเจิงเชิงปริมาณ (Volume Scattering) [7] ดังนั้นจากตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าสูงสุดมาสร้างแบบจำลอง ผลของแบบจำลองโดยรวมค่อนข้างตอบสนองต่อปริมาณผลผลิตได้ดีกว่าการนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากค่าเฉลี่ยมาสร้างแบบจำลอง แต่การนำค่าทั้งสองมาสร้างแบบจำลองร่วมกัน ได้ผลของแบบจำลองที่ดีกว่า เนื่องจากการเจริญเติบโตของเรือนยอดของข้าวจะมีผลตอบสนองต่อปริมาณผลผลิตแล้ว ปัจจัยอื่นๆ ในแปลงนาย่อมส่งผลต่อปริมาณผลผลิตด้วย การนำทั้งค่าทั้งสองตัวมาวิเคราะห์ร่วมกันจึงได้แบบจำลองประเมินผลผลิตข้าวที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้แบบจำลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากโพลาไรเซชันแบบวีวี (VV) ให้ผลของแบบจำลองที่ดีกว่าโพลาไรเซชันแบบวีเอช (VH) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเรือนยอดของข้าวนั้น ไม่ใช่สาเหตุเดียวที่สามารถประเมินผลผลิตข้าวได้ ต้องประกอบกับปัจจัยอื่นๆ ด้วย สาเหตุเนื่องจากโพลาไรเซชันแบบไขว้ (Cross Polarization; VH) จะตอบสนองต่อการกระเจิงเชิงปริมาณได้ดีว่าโพลาไรเซชันแบบระนาบเดียวกัน (Like Polarization; VV) [13] แตกต่างกับการศึกษาของ Wang [14] ที่ระบุว่าโพลาไรเซชันแบบวีเอช มีความสัมพันธ์ในการตอบสนองต่อผลผลิตข้าวดีกว่าโพลาไรเซชันแบบวีวี หน่วยของตัวแปรตามที่ใช้ได้แก่ ผลผลิตต่อไร่ (หน่วย : กิโลกรัมต่อไร่) แบบจำลองมีค่า R-Squared เท่ากับ 0.869 ค่า Adjusted R-Squared เท่ากับ 0.828 ค่า Predicted R-Squared เท่ากับ 0.784 และค่า RMSE เท่ากับ 40.08 กิโลกรัมต่อไร่ แตกต่างจากแนวทางการศึกษาของ Wang [14] ที่นำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโดยวิเคราะห์จากดัชนีที่ได้จากข้อมูลเซนติเนลวัน ทำการประเมินผลผลิตข้าว โดยแบบจำลองที่ดีที่สุด ใช้ดัชนีความต่างของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโพลาไรเซชันแบบวีเอช ในช่วงระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดและระยะแตกกอ แบบจำลองมีค่า R-Squared เท่ากับ 0.65 และ RMSE เท่ากับ 0.74 ตันต่อเฮกแตร์ ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Lam-dao [15] ที่ใช้อัตราส่วนโพลาไรเซชันเอชเอช และวีวี (HH and VV) ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ จากดาวเทียมเทอราซาร์เอ็กซ์ (TerraSAR-X) ช่วงคลื่นเอ็กซ์แบนด์ (X-Band) ซึ่งมีศักยภาพในการทะลุทะลวงน้อยกว่าช่วงคลื่นซีแบนด์ (C-Band) ของดาวเทียมเซนติเนลวันที่ใช้ในการศึกษา ใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณในการสร้างแบบจำลองหลายตัวแปร ใช้ข้อมูลหลังหว่านเมล็ด 5 ช่วงเวลา ผลการทดลองพบว่า แบบจำลองที่ไม่ได้นำช่วงกลางของการเจริญเติบโตของข้าวมาวิเคราะห์ ค่า R-Squared จะน้อยกว่าแบบจำลองที่นำช่วงกลางของการเจริญเติบโตของข้าวมาวิเคราะห์ แบบจำลองที่ดีที่สุด มี R-Squared เท่ากับ 0.795 เป็นกรณีที่ใช้ข้อมูล 5 ภาพ ระยะเวลา 8 ถึง 85 วันหลังการหว่านเมล็ด

ผลผลิตข้าวนาปรังเฉลี่ยในพื้นที่จากการประเมินของแบบจำลองประเมินผลผลิตที่ศึกษาจากข้าวสายพันธุ์ปทุมธานี 1 นั้น เท่ากับ 771 กิโลกรัมต่อไร่ มีความสอดคล้องกับข้อมูลองค์ความรู้เรื่องข้าวจากกองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว [16] ที่ระบุว่าข้าวสายพันธุ์ปทุมธานี 1 ให้ผลผลิตต่อไร่อยู่ที่ประมาณ 650 ถึง 774 กิโลกรัมต่อไร่ โดยการปลูกข้าวนาปรังและปริมาณผลผลิตในพื้นที่อาจเปลี่ยนแปลงไป

ตามปัจจัยต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ที่ก่อให้เกิดโรคแมลงเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความแห้งแล้งในพื้นที่ การเข้าถึงทรัพยากรของเกษตรกร ความเหลื่อมล้ำทางด้านพื้นที่ (ระบบชลประทาน) ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตแทบทั้งสิ้น

จุดเด่นของวิธีการศึกษานี้คือ การนำศักยภาพของข้อมูลดาวเทียมเซนติเนลวัน ที่สามารถเข้าถึงได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ครอบคลุมทั่วโลก ลดปัญหาเรื่องเมฆ มาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศด้านการเกษตรสำหรับประเมินผลผลิตข้าว จากผลจากการศึกษาพบว่า แบบจำลองในการประเมินผลผลิตของข้าวนาปรังโดยใช้ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาการเจริญเติบโตสามารถนำไปประเมินผลผลิตข้าวได้ในระดับที่ยอมรับได้และได้ข้อมูลที่มีความละเอียดในระดับรายแปลง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่สำคัญสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาสำหรับการตัดสินใจเชิงพื้นที่ในหน่วยย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุดด้อยของวิธีการศึกษานี้คือ การศึกษานี้ไม่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกับพันธุ์ข้าวชนิดอื่นๆ ทำให้ไม่สามารถระบุความแตกต่างของพันธุ์ข้าวที่ทำการศึกษากับพันธุ์ข้าวที่ไม่ได้ทำการศึกษาได้ และขาดการวิเคราะห์ในประเด็นของบริบทแวดล้อมอื่นๆ ที่อาจสัมพันธ์กันกับปริมาณผลผลิต เช่น เงื่อนไขของการคัดเลือกแปลงนาตัวอย่างทำการเก็บข้อมูลแปลงนาที่เกษตรกรยืนยันว่ามีน้ำเพียงพอต่อการทำนารอบนั้นๆ แต่ไม่ได้เจาะลึกไปถึงประเด็นว่าปริมาณน้ำที่เพียงพอมีปริมาณเท่าไหร่ หรือเรื่องของการให้ปุ๋ย การจัดการแปลงนาของเกษตรกรแต่ละคน ซึ่งการศึกษาบริบทอื่นๆ อาจมีส่วนช่วยให้เข้าใจรูปแบบความสัมพันธ์ของปริมาณผลผลิตที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมากขึ้น

ข้อเสนอแนะของงานวิจัย ควรขยายขอบเขตการติดตามข้อมูลพันธุ์ข้าวที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อสามารถเข้าใจรูปแบบของการเจริญเติบโตของข้าวในพื้นที่ศึกษาได้มากขึ้นกว่าเดิม สำหรับนำไปพัฒนาแผนที่ผลผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นต่อไป ควรเพิ่มข้อมูลสำหรับสร้างหรือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ควรทำการตรวจสอบผลของข้อมูลหลังการวิเคราะห์ เพื่อติดตามผลสำหรับนำมาปรับปรุงตัวแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation,* 7th ed., John Wiley & Sons, 2015.

[2] Y. Ban, “Synthetic aperture radar for a crop information synthetic aperture radar for a crop information multitemporal approach,” Doctor of Philosophy in Geography, University of Waterloo, 1996.

[3] O. Kavats, D. Khramov, K. Sergieieva, and V. Vasyliev, “Monitoring harvesting by time series of Sentinel-1 SAR data,” *Remote Sensing,* vol. 11, no. 21, pp. 2496, 2019.

[4] F. Carreño Conde and M. De Mata Muñoz, “Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR Images: The ebro river case study,” *Water,* vol. 11, no. 12, pp. 2454, 2019.

[5] A. Benedetti, M. Picchiani, and F. Del Frate, “Sentinel-1 and Sentinel-2 Data fusion for urban change detection,” *in Proceedings IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,* 2018, pp. 1962–1965.

[6] M. A. Reddy, *Remote Sensing and Geographical Information Systems,* 3rd ed., Hyderabad, India: Adithya Art Printers, 2008.

[7] A. M. J. Meijerink, D. Bannert, O. Batelaan, M. W. Lubczynski, and T. Pointet, *Remote Sensing Applications to Groundwater,* 1st ed., Paris: UNESCO, 2007.

[8] The Secretariat of the Cabinet. (2013, October).

Review Report of Performance of the Cabinet case: National Economic and Social Advisory Council Consultation and Recommen-dations for the Cabinet Topic: Sustainable Solutions to Rice Problems. Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: http://www.soc.go.th/acrobat/nesac151056.pdf

[9] W. W. Lamorte. (2016). *The Multiple Linear Regression Model.* [Online]. Available: http://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/MPH-Modules/BS/BS704-EP713_Multi-variableMethods/BS704-EP713_Multi-variableMethods2.html

[10] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed., John Wiley & Sons, 2012.

[11] C. Zaiontz. (2014). *Multiple Regression: Cross Validation.* [Online]. Available: http://www.real-statistics.com/multiple-regression/cross-validation

[12] Global Rice Science Partnership, *Rice Almanac*. 5th ed., Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute, 2013.

[13] A. Sowter. *Radar Imaging Course: Image Interpretation.* [Online]. Available: http://www.learningzone.rspsoc.org.uk/index.php/Learning-Materials/Radar-Imaging/Image-Interpretation-Polarisation

[14] J. Wang, Q. Dai, J. Shang, X.-l. Jin, Q. Sun, G. Zhou, and Q. Dai, "Field-Scale rice yield estimation using Sentinel-1A synthetic aperture radar (SAR) data in coastal saline region of Jiangsu Province, China," *Remote Sensing,* vol. 11, no. 19, pp. 2274, 2019.

[15] N. Lam-Dao, P. Hoang-Phi, J. Huth, and P. Cao-Van, "Estimation of the rice yield in the Mekong Delta using SAR dual polarisation data," presented at the Asian Conference for Remote Sensing 2011, Taiwan, October 3–7, 2011.

[16] Division of Rice Research and Development. (2016). *Rice Knowledge Bank.* [Online]. Available: http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-rice_yield_per_rai.htm