การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นระหว่างเทคนิค S-PROG และ LINDA

Comparison of radar rainfall nowcasting performance between S-PROG and LINDA techniques

รัชชานนท์ คุณวิเศษกุล[1] มลฑล เมธาประยูร[1] และ พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม[1,*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: punpim.m@ku.th*

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเรดาร์ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ฝนระยะสั้นและสามารถเพิ่มความถูกต้องของระบบการเตือนภัยล่วงหน้าได้ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เทคนิคการพยากรณ์ฝนระยะสั้นยังต้องการการพิสูจน์ให้มีความเหมาะสมกับพฤติกรรมของการเกิดฝนและสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ที่พิจารณา การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นระหว่างการใช้เทคนิค S-PROG และ LINDA ที่เหมาะสมต่อพฤติกรรมฝนในพื้นที่รัศมีของเรดาร์สัตหีบ ทั้งนี้ได้คัดเลือกข้อมูลการสะท้อนกลับจากสถานีเรดาร์สัตหีบรายๆ 6 นาที สำหรับการพยากรณ์ฝนล่วงหน้าตั้งแต่ 6, 12, ..., 120 นาที ภายใต้เหตุการณ์ฝนตกหนักจำนวน 14 เหตุการณ์ในปี พ.ศ.2564 ผลการศึกษาพบว่า เทคนิค S-PROG พยากรณ์กลุ่มฝนในรูปแบบพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยไม่สามารถจำลองกลุ่มฝนขนาดเล็กได้ ในขณะที่เทคนิค LINDA สามารถพยากรณ์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝนได้หลากหลายทั้งการรวมตัว การสลายตัว และสามารถจับตำแหน่งศูนย์กลางพายุของกลุ่มฝนได้ค่อนข้างดี เมื่อพิจารณาดัชนีประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์จำนวน 2 ดัชนี ได้แก่ Critical Success Index (CSI) และ Correlation พบว่าเทคนิค LINDA ให้ความแม่นยำเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ดีกว่า S-PROG โดยค่าดัชนี CSI ของเทคนิค S-PROG และ LINDA จะอยู่ในช่วง 0.87 – 0.45 และ 0.81 – 0.42 และค่าดัชนี Correlation ของเทคนิค S-PROG และ LINDA จะอยู่ในช่วง 0.85 – 0.15 และ 0.89 – 0.18 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ฝนเรดาร์, การพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น, เรดาร์สัตหีบ, เทคนิค S-PROG, เทคนิค LINDA

Abstract

The weather radar technology has been widely accepted for nowcasting rainfall and has the potential to enhance the efficiency of early warning systems. However, it is still necessary to verify the suitable of nowcasting techniques for specific regions based on their rainfall patterns and topography. This study aimed to investigate the effectiveness of two nowcasting techniques, namely the S-PROG and LINDA, in order to determine an efficient approach for nowcasting rainfall patterns within the Sattahip radar radius. Reflectivity data from the Sattahip Radar Station at 6-minute intervals was collected and the lead-time for nowcasting was set at 6, 12, ..., 120 minutes during 14 heavy rain events in 2021. The results of the study indicated that the S-PROG technique was capable of nowcasting rainfall on a large scale but lacked the ability to simulate small-scale rainfall clouds. Conversely, the LINDA technique was able to simulate a variety of rainfall patterns, including merging, splitting, and preservation of the center of the storm. The effectiveness of the nowcasting techniques was evaluated using the Critical Success Index (CSI) and Correlation metrics. The results showed that the LINDA demonstrated superior qualitative and quantitative performance which outperformed the S-PROG technique. The range of CSI values for the S-PROG and LINDA techniques were 0.87 - 0.45 and 0.81 - 0.42, respectively. The range of correlation values for the S-PROG and LINDA techniques were 0.85 - 0.15 and 0.89 - 0.18, respectively.

Keywords: Radar rainfall, Radar rainfall nowcasting, Sattahip radar station, S-PROG technique, LINDA technique

1. คำนำ

น้ำท่วมฉับพลันจัดเป็นหนึ่งในภัยพิบัติสำคัญที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย ภัยพิบัตินี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน อาคารบ้านเรือน เส้นทางการคมนาคมและขนส่ง ตลอดจนระบบสาธารณูปโภค โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดน้ำท่วมฉับพลันนั้นเกิดจาก ฝนตกหนักถึงหนักมากในช่วงระยะเวลาอันสั้น ส่งผลให้เกิดน้ำท่าไหลบ่าในพื้นที่อย่างรวดเร็ว สร้างความเสียหายฉับพลันและยากต่อการรับมือได้ทันท่วงที เพื่อลด

ผลกระทบจากภัยพิบัติจากน้ำท่วมฉับพลัน การพยากรณ์ฝนระยะสั้น (nowcasting) ในช่วงเวลา 1-6 ชั่วโมงล่วงหน้า ได้รับการยอมรับว่ามีประโยชน์และนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนระบบการพยากรณ์น้ำฝนระยะสั้น (Early Warning System, EWS) อย่างแพร่หลาย [5] ทั้งนี้การพยากรณ์ฝนระยะสั้นจะทำให้ได้ทราบถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ พฤติกรรมความรุนแรงของกลุ่มฝนล่วงหน้า จึงสามารถเพิ่มช่วงเวลาการแจ้งเตือนภัยหรืออพยพในพื้นที่เสี่ยงเพื่อที่จะลดความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ทันท่วงที

ในอดีตที่ผ่านมามีการใช้ประโยชน์จากจุดเด่นของการตรวจวัดข้อมูลความละเอียดสูงทั้งเชิงพื้นที่และเวลาของเรดาร์ (โดยทั่วไปมีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ 1 ตร.กม. และตรวจวัดทุกๆ 5-15 นาที) ในการประเมินน้ำฝน (Radar Rainfall Estimation) ทำให้ทราบถึงรูปแบบ พฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนทั้งเชิงเวลาและพื้นที่ความละเอียดสูง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น (Radar Nowcasting) สำหรับระยะเวลาตั้งแต่ 0-6 ชั่วโมง โดยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (cross correlation) นับเป็นเทคนิคทางสถิติเบื้องต้นที่ได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี 1966 โดยการจับคู่กลุ่มฝนและวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตรวจวัดที่เวลาแตกต่างกัน เพื่อประเมินทิศทางการเคลื่อนตัวของค่าการสะท้อนกลับของเรดาร์ [2] และในปีเดียวกันนั้น Wilson [1] สามารถวิเคราะห์ทิศทางการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนได้จากใช้ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (cross correlation) ซึ่งพบว่า ช่วงเวลาการพยากรณ์กลุ่มฝนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของกลุ่มฝน กลุ่มฝนขนาดใหญ่จะมีแนวโน้มที่จะคงอยู่นานกว่ากลุ่มฝนขนาดเล็ก และ กลุ่มฝนขนาดเล็กมักจะสลายตัวอย่างรวดเร็วในระยะเวลาประมาณ 10 นาที ทั้งนี้เพื่อให้สามารถตรวจจับพายุฝนในระดับพิกเซลได้ Seed [3] ได้พัฒนาเทคนิค Spectral Prognosis (S-PROG) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิค Optical Flow เพื่อทำการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น โดยมีสมมติฐานว่าช่วงอายุของกลุ่มฝนมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันไปตามขนาดของกลุ่มฝน โดยกลุ่มฝนขนาดเล็กมักจะสลายตัวไวกว่ากลุ่มฝนขนาดใหญ่ เทคนิคนี้ประสิทธิภาพดีเมื่อเจอกับพายุที่มีความเร็วไม่แตกต่างกับความเร็วเฉลี่ยมากนักแต่ประสิทธิภาพจะต่ำลงเมื่อเจอกับสถานการณ์พายุขนาดใหญ่ที่รุนแรงและเคลื่อนตัวด้วยความเร็วที่แตกต่างจากความเร็วเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง Pulkinen [4] แสดงถึงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยข้อมูลเรดาร์คอมโพสิตในประเทศฟินแลนด์ สวิตเซอร์แลนด์ สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย ได้อย่างมีแม่นยำ เช่นเดียวกันกับ Imhoff [5] ได้ทำการสรุปไว้ว่าในเหตุการณ์ 1,533 เหตุการณ์ส่วนใหญ่ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Pysteps มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถตรวจจับพฤติกรรมของฝนขนาดเล็กได้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ที่ชื่อว่า Lagrangian INtrego-Difference with Autoregression (LINDA) ในอัลกอริทึม Pysteps ที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งรูปแบบ Deterministic และ Stochastic ได้ และถูกออกแบบโดยเฉพาะสำหรับการพยากรณ์ฝนตกหนักในพื้นที่ขนาดเล็ก โดยเทคนิค LINDA มีจุดเด่นคือผลลัพธ์การพยากรณ์สามารถคงสภาพกลุ่มฝนขนาดเล็กได้ดี และมีประสิทธิภาพในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนรูปแบบการก่อตัวและสลายตัวได้เป็นอย่างดี [6]

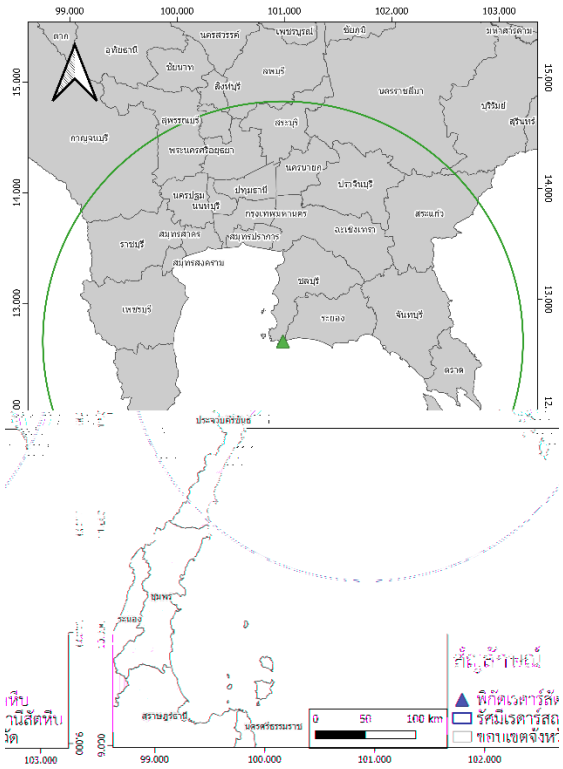
ถึงแม้ว่าการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อการพยากรณ์ฝนระยะสั้นมีมาอย่างต่อเนื่องอย่างไม่หยุดนิ่ง โดยแต่ละการพัฒนาล้วนมีเป้าหมายเพื่อทดสอบให้เหมาะสมกับพฤติกรรมฝนในพื้นที่ที่สนใจที่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไปจากความผันแปรอย่างสูงของธรรมชาติน้ำฝนย่อมมีความไม่แน่นอนสูงมากที่เทคนิคที่ได้รับการพัฒนาให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาหนึ่งจะไม่สามารถนำไปใช้กับภูมิภาคอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพทัดเทียมกัน งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเรดาร์ระหว่างทคนิค S-PROG และ LINDA สำหรับการพยากรณ์ฝนระยะสั้นในพื้นที่ประเทศไทย โดยได้เลือกใช้ข้อมูลเรดาร์จากสถานีเรดาร์สัตหีบ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 22 จังหวัด ในภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย สำหรับการศึกษานี้

2. พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ใช้สถานีเรดาร์สัตหีบในความดูแลของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี พิกัดเส้นรุ้ง 12.647°N เส้นแวง 100.966°E ที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 174 เมตร รัศมีการตรวจวัด 240 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 22 จังหวัด ได้แก่ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด นครนายก ปราจีนบุรี สระแก้ว นครราชสีมา ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี ราชบุรี กาญจนบุรี สุพรรณบุรี นครปฐม สมุทรสงคราม สมุทรสาคร สมุทรปราการ กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา สระบุรี และจังหวัดอ่างทอง สำหรับภาพถ่ายสถานีเรดาร์สัตหีบและรัศมีการตรวจวัดของเรดาร์แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 สถานีเรดาร์สัตหีบ



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งสถานี และรัศมีการตรวจวัดของเรดาร์สัตหีบ

3. การรวบรวมข้อมูล

สถานีเรดาร์สัตหีบเป็นเรดาร์ตรวจอากาศชนิดดอปเปลอร์ (Doppler) ย่านความถี่ S-band ตรวจวัดด้วยมุมเงย 14 มุม จัดเก็บข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Radar Reflectivity Data) ในทุกๆ 6 นาที ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) ที่ระดับความสูง 2.5 กิโลเมตร ภายใต้รัศมีกวาด 240 กิโลเมตร โดยได้รวบรวมข้อมูลค่าการสะท้อนกลับจากเรดาร์ระหว่างเดือนสิงหาคม-ตุลาคม ปี พ.ศ. 2564 สำหรับการศึกษานี้

สำหรับคุณสมบัติของเรดาร์สถานีสัตหีบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเรดาร์ ณ สถานีสัตหีบ

คุณสมบัติ	คุณลักษณะ
1.ชนิดของเรดาร์	Doppler S band
2.ความถี่	2860 MHz
3.ความยาวคลื่น	10.45 cm
4.กำลังส่งสูงสุด	927 KW
5.ความกว้างลำคลื่น	1.0°
6.ความกว้างสัญญาณพัลส์	0.8 μs
7.ความถี่สัญญาณพัลส์ซ้ำซ้อน	625 Hz
8.รัศมีการตรวจวัด	240 Km
9.Gate width	250 m
10.มุมการตรวจวัด (14 มุมเงย)	0.5°, 1.5°, 2.4°, 3.4°, 4.3°, 5.3°, 6.2°, 7.5°, 8.7°, 10.0°, 12.0°, 14.0°, 16.7°, 19.5°

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 การตรวจวัดและการประเมินฝนด้วยเรดาร์ตรวจอากาศ

เรดาร์ตรวจอากาศเป็นเทคโนโลยีการตรวจวัดข้อมูลน้ำฝนแบบทางอ้อม โดยระบบเรดาร์จะส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) แบบทรงกรวยผ่านจานสายอากาศออกไปในชั้นบรรยากาศด้วยความเร็วแสง เมื่อสัญญาณคลื่นกระทบหยดน้ำในชั้นบรรยากาศรวมถึงวัตถุอื่นๆ ด้วย จะสะท้อนกลับมายังจานสายอากาศ จากนั้นระบบจะประมวลผลพลังงานที่สะท้อนกลับมาเป็นค่าการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Radar Reflectivity Data, Z) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้เพียงแค่ความแรงของฝนเชิงคุณภาพได้เท่านั้น โดยทั่วไปการประเมินข้อมูลฝนในเชิงปริมาณ ข้อมูลการสะท้อนกลับที่ตรวจวัดได้จากเรดาร์ต้องนำไปแปลงค่าให้เป็นความเข้มฝนผ่านความสัมพันธ์ Z-R (Z-R relationship) ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการเลขยกกำลังดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Z = AR^b \qquad (1)$$

เมื่อ Z คือ ค่าการสะท้อนกลับ (มิลลิเมตร^6/เมตร^3), A และ b คือ พารามิเตอร์ของสมการความสัมพันธ์ Z-R ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ A และ b มีความผันแปรสูงโดยขึ้นอยู่กับ rain drop size distribution โดยพารามิเตอร์ A สามารถผันแปรในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 31 ถึง 500 ในขณะที่พารามิเตอร์ b มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่แคบอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.8 [7-10]

4.2 การพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น

เทคนิค Optical Flow ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Image Processing) ที่ใช้เพื่อประเมินการเคลื่อนตัวของวัตถุจากชุดของภาพที่ต่อเนื่องกันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเรดาร์เพื่อประเมินการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนจากข้อมูลตรวจวัดเรดาร์ที่ต่อเนื่องกัน โดยหลักการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค Optical Flow ประกอบด้วย 2 กระบวนหลักดังนี้

1) การประเมินทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝน (Advection field estimation) เป็นการนำชุดข้อมูลภาพเรดาร์ที่ตรวจวัดต่อเนื่องมาวิเคราะห์เพื่อหาทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝน โดยใช้หลักการของวิธี Optical flow ได้แก่ การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสี ณ ตำแหน่งพิกเซลต่างๆ จากภาพที่ต่อเนื่องกัน พิกเซลที่อยู่ใกล้กันจะมีทิศทางการเคลื่อนตัวไปในทิศทางใกล้เคียงกัน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้ทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนแต่ละกลุ่มในภาพเรดาร์

2) การพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนในอนาคต (Extrapolation) เมื่อได้ทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนแล้ว ต่อมาจะเป็นการวิเคราะห์การพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความเข้มของกลุ่มฝน ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเชิงพื้นที่และปริมาณ เช่น การก่อตัว (Growth) การสลายตัว (Decay) การรวมตัว (Merging) และการแยกตัว (Splitting) ของกลุ่มฝน ด้วยความซับซ้อนของพฤติกรรมของกลุ่มฝนดังกล่าวทำให้นักวิจัยต่าง ๆ ได้จำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝนด้วยสมมติฐานที่แตกต่างกันทำให้เกิด

แบบจำลองการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยวิธี Optical Flow ที่แตกต่างกันตามความซับซ้อนในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการพัฒนาการของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค Optical Flow

งานวิจัย	วิธีการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค Optical Flow	พัฒนาการของเทคนิค
Seed, 2003	Spectral Prognosis (S-PROG)	การวิเคราะห์แบบจำลองชนิด Deterministic
Seed et al., 2013	Short-Term Ensemble Prediction System (STEPS)	พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์แบบจำลองชนิด Stochastic
Pulkkinen, et al., 2020	Autoregressive Nowcasting using VIL (ANVIL)	พัฒนาความแม่นยำของการพยากรณ์ของกลุ่มฝนรูปแบบ Convective
Pulkkinen et al., 2021	Lagrangian INtegro-Difference equation model with Autoregression (LINDA)	พัฒนารูปแบบการจำลองโครงสร้างของกลุ่มฝนขนาดเล็ก และเพิ่มประสิทธิภาพการจำลองการก่อตัวและสลายตัวของพายุ

เครื่องมือ Pysteps ประกอบด้วยวิธีการพยากรณ์แบบ optical flow ด้วยเทคนิคทางสถิติต่าง ๆ ทั้ง Deterministic และ Stochastic ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูง สำหรับรายละเอียดเทคนิคการพยากรณ์ในเครื่องมือ Pysteps ได้ยกตัวอย่างการพยากรณ์รูปแบบ Deterministic ดังวิธีการดังต่อไปนี้

1) เทคนิค S-PROG

ได้ถูกพัฒนาโดย Seed [3] เพื่อการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น โดยมีสมมติฐานว่าช่วงอายุของกลุ่มฝนมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันไปตามขนาดของกลุ่มฝน โดยกลุ่มฝนขนาดเล็กมักจะสลายตัวไวกว่ากลุ่มฝนขนาดใหญ่ ดังนั้นเทคนิค S-PROG จึงทำการแบ่งกลุ่มฝนออกเป็นหลายระดับตามความละเอียดตั้งแต่ความละเอียดต่ำจนถึงความละเอียดสูง โดยแต่ละระดับเป็นตัวแทนของกลุ่มฝนขนาดใหญ่จนถึงกลุ่มฝนขนาดเล็ก และทำการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝนแยกกันในแต่ละระดับ ด้วยสมการ auto-regressive (AR) และรวมผลลัพธ์การพยากรณ์ในแต่ละชั้นออกมาเป็นผลพยากรณ์โดยรวมในขั้นสุดท้าย สามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ S-PROG ได้ดังต่อไปนี้ 1) วิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนจากภาพเรดาร์ในอดีตด้วยเทคนิค optical flow 2) ต่อขยายเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนในอนาคต 3) แบ่งสเกลการพยากรณ์ของฝนออกเป็นหลายชั้นตั้งแต่สเกลละเอียด-หยาบ และพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น และ 4) รวมผลลัพธ์การพยากรณ์ในแต่ละชั้นออกมาเป็นผลพยากรณ์โดยรวม

2) เทคนิค LINDA

เทคนิค LINDA ถูกพัฒนาขึ้นด้วยการรวมเอาวิธี Lagrangian persistence, Integro-difference equation และ Cell-based เข้าด้วยกัน โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งรูปแบบ Deterministic และ Stochastic [6] ซึ่งเทคนิค LINDA ได้ถูกออกแบบเพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ในอดีต โดยเฉพาะการพยากรณ์ฝนตกหนักในพื้นที่ขนาดเล็กและสามารถคงสภาพกลุ่มฝนขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี โดยสามารถเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์จากวิธี S-PROG สามารถสรุปขั้นตอนการพยากรณ์ด้วยเทคนิค LINDA ได้ดังนี้ คือ 1) ตรวจจับลักษณะกลุ่มฝนในภาพเรดาร์ ด้วยวิธี Blob ที่สามารถตรวจจับศูนย์กลางของกลุ่มฝนที่มีความเข้มฝนสูง โดยทำการกำหนดเกณฑ์ความเข้มฝนต่ำสุดเพื่อเป็นเกณฑ์ในการตรวจจับกลุ่มฝน และ วิธี Lagrangian of Gaussian เพื่อกำหนดขอบเขตของกลุ่มฝน 2) วิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนตัวของกลุ่มฝนจากภาพเรดาร์ในอดีตด้วยเทคนิค optical flow โดยจะมีการเพิ่มขั้นตอนการควบคุมคุณภาพเพื่อลบค่าที่ผิดปกติ จากนั้นจะทำการ Interpolate เพื่อให้ได้ทิศทางการเคลื่อนตัวในทุกพิกเซล 3) ใช้หลักการ autoregressive integrated (ARI) ร่วมกับการ convolution เพื่อค้นหาเค้าโครงสำหรับพยากรณ์การก่อตัวและสลายตัวของกลุ่มฝน 4) ใช้หลักการ Integrate differences ร่วมกับการ convolution เพื่อปรับปรุงผลการพยากรณ์

5. วิธีการศึกษา

5.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

จากข้อมูลภาพการสะท้อนกลับจากเรดาร์ที่รวบรวมไว้ข้างต้น ต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยขั้นตอนเริ่มต้นได้พิจารณาคัดเลือกข้อมูลเรดาร์ที่มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัญหาการหักเหของคลื่นเรดาร์ที่ผิดปกติและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากปัญหาทางอิเล็กทรอนิกส์ออกจากการศึกษา สำหรับปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตรวจวัดข้อมูลที่ไม่ได้เกิดจากกลุ่มฝนเช่น ground clutter หรือ beam blocking ได้พิจารณาโดยการหาตำแหน่งภาพที่มีสัญญาณการสะท้อนกลับที่ผิดปกติจากภาพเรดาร์ จากนั้นกำจัดออกและแทนที่ข้อมูลดังกล่าวด้วยค่าที่ถูกประมาณค่าในช่วง (interpolation) จากข้อมูล pixel ที่อยู่โดยรอบ ปัญหาที่เกิดจาก bright band นับไม่เป็นอุปสรรคสำหรับข้อมูลจากเรดาร์ เนื่องจากเป็นข้อมูลประเภท CAPPI ที่มีระดับการตรวจวัดอยู่ต่ำกว่าระดับเยือกแข็ง (freezing level) นอกจากนั้นแล้วได้เลือกใช้เฉพาะข้อมูลค่าการสะท้อนกลับของเรดาร์ที่มีค่ามากกว่า 15 dBZ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนคลื่นเรดาร์ (noise) และในกรณีที่ค่าการสะท้อนกลับของเรดาร์มีค่ามากกว่า 53 dBZ ได้ถูกพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 53 dBZ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเนื่องจากผลกระทบเนื่องจากเรดาร์ตรวจสัญญาณที่เกิดจากลูกเห็บ [11]

5.2 การศึกษาฝนเรดาร์ระยะสั้นจากเหตุการณ์ในอดีต

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นโมดูล Pysteps (python framework for short-term ensemble prediction systems) บนภาษาคอมพิวเตอร์ไพธอน ได้ถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้ โดยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับการพยากรณ์ฝนระยะสั้นแบบ Deterministic 2 วิธีได้แก่ 1) S-PROG และ 2) LINDA การศึกษานี้จึงได้

เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีเรดาร์สัตหีบเพียงสถานีเดียวในการทดสอบฝนเรดาร์พยากรณ์ระยะสั้น โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1) คัดเลือกเหตุการณ์กลุ่มฝนสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์ฝนระยะสั้น โดยพิจารณาจากรูปแบบการตกของฝนที่มีความเข้มสูง และกลุ่มฝนมีขนาดใหญ่ จำนวน 14 เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2564

2) นำข้อมูลภาพค่าการสะท้อนกลับของเรดาร์ของสถานีเรดาร์สัตหีบ ราย 6 นาที ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (จำนวนทั้งหมด 10 ภาพ) ก่อนหน้าของแต่ละเหตุการณ์ที่คัดเลือก กำหนดเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นการพยากรณ์ (Initial Time) โดยนำชุดข้อมูลภาพดังกล่าวเป็นข้อมูลด้านเข้าของโมเดลพยากรณ์ S-PROG และ LINDA เพื่อเรียนรู้ทิศทางการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฝน

3) พยากรณ์น้ำฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA ด้วยโมดูล Pysteps ในภาษาคอมพิวเตอร์ไพธอน โดยกำหนดช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า 2 ชั่วโมง และใช้สมการ Z-R ของสัตหีบที่ได้สอบเทียบไว้ ($Z = 251R^{1.5}$) [12] เพื่อแปลงข้อมูลค่าการสะท้อนกลับของเรดาร์เป็นความเข้มฝน ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลค่าความเข้มฝนเรดาร์ ราย 6 นาที ระหว่างช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าตั้งแต่ 6, 12, ..., 120 นาที

นำผลการพยากรณ์เทคนิค S-PROG และ LINDA มาประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลเรดาร์ตรวจวัดจริง ณ ช่วงเวลาล่วงหน้าที่สอดคล้องกับฝนพยากรณ์ โดยคำนวณในแต่ละช่วงเวลาการพยากรณ์ ราย 6 นาที ตั้งแต่ 6, 12, ..., 120 นาที ทั้งนี้ในการพิจารณาประสิทธิภาพจะพิจารณาเฉพาะพิกเซลที่มีค่าฝนในข้อมูลเรดาร์จริงหรือข้อมูลพยากรณ์เท่านั้น เนื่องจากพิกเซลส่วนใหญ่ในข้อมูลภาพเรดาร์มักเป็นรูปแบบไม่มีฝนตกซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวจำนวนมากมาพิจารณาจะทำให้การวิเคราะห์ดัชนีมีความคลาดเคลื่อนได้ โดยรายละเอียดการประเมินประสิทธิภาพจะแสดงในหัวข้อถัดไป

5.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการประเมินฝนเรดาร์พยากรณ์ระยะสั้น

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น ผลลัพธ์ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นเทคนิค S-PROG และ LINDA ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์กับข้อมูลการตรวจวัดเรดาร์ ณ เวลาล่วงหน้าที่สอดคล้องกับช่วงเวลาการพยากรณ์ โดยการศึกษาประเมินประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังนี้

1) ดัชนีประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพ

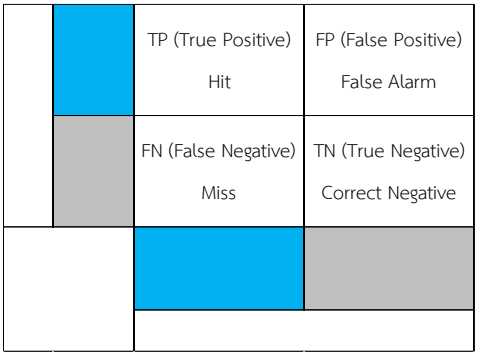
การวิเคราะห์ความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพจะถูกพิจารณาระหว่างข้อมูลจากการตรวจวัดเรดาร์และข้อมูลจากการพยากรณ์ ในแต่ละพิกเซลที่ช่วงเวลาการพยากรณ์สอดคล้องกัน โดยพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขฝนตกและฝนไม่ตกระหว่างข้อมูลจริงและข้อมูลจากการพยากรณ์ สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 กรณี ดังรูปที่ 3 แสดงคำอธิบายกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) True Positive (TP) หรือ Hit คือข้อมูลพยากรณ์และข้อมูลจริงมีฝนตกทั้งคู่

2) False Positive (FP) หรือ False alarm คือข้อมูลพยากรณ์มีฝนตก แต่ข้อมูลจริงไม่มีตกฝน

3) False Negative (FN) หรือ Miss คือ ข้อมูลพยากรณ์ไม่มีฝนตก แต่ข้อมูลจริงมีฝนตก

4) True Negative (TN) หรือ Correct negative คือ ข้อมูลพยากรณ์และข้อมูลจริงไม่มีฝนตก



รูปที่ 3 รูปแบบการวิเคราะห์ความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพ

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพและจำแนกออกเป็น 4 กรณีข้างต้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาจะทำการวิเคราะห์ดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์ดังตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ดัชนีที่ใช้ประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพ

ดัชนี	สูตรการคำนวณ	ช่วงของดัชนี	ค่าที่ดีที่สุด
Accuracy	(TP+TN)/Total	0-1	1
Probability of Detection (POD)	TP/(TP+FN)	0-1	1
Critical Success Index (CSI)	TP/(TP+FN+FP)	0-1	1

โดยที่ข้อบ่งชี้ความแม่นยำของ Accuracy คือความแม่นยำในการพยากรณ์ทั้งฝนตกและฝนไม่ตกเทียบกับเหตุกาณ์พยากรณ์ทั้งหมด Probability of Detection (POD) คือความแม่นยำในการพยากรณ์ฝนตกเทียบกับเหตุการณ์ฝนตกจริงทั้งหมด และ Critical Success Index (CSI) คือความแม่นยำในการพยากรณ์ฝนตกเทียบกับกรณีฝนตกทั้งหมดทั้งการพยากรณ์และตรวจวัดจริง

2

Mean Absolute Error (MAE) correlation

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N}|O_i - F_i|}{N} \quad (2)$$

โดยที่ N คือ จำนวนพิกเซลที่มีค่าฝนในภาพเรดาร์

O_i คือ ความเข้มฝนของข้อมูลเรดาร์จริง พิกเซล i (มม./ชม.)

F_i คือ ความเข้มฝนของฝนเรดาร์พยากรณ์ พิกเซล i (มม./ชม.)

$$Correlation = \frac{\sum_{i=1}^{N}[(F_i-\mu_F)(O_i-\mu_O)]}{\sigma_F \sigma_O} \quad (3)$$

โดยที่ μ_O คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มฝนของข้อมูลเรดาร์จริง (มม./ชม.)

μ_F คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มฝนของฝนเรดาร์พยากรณ์ (มม./ชม.)

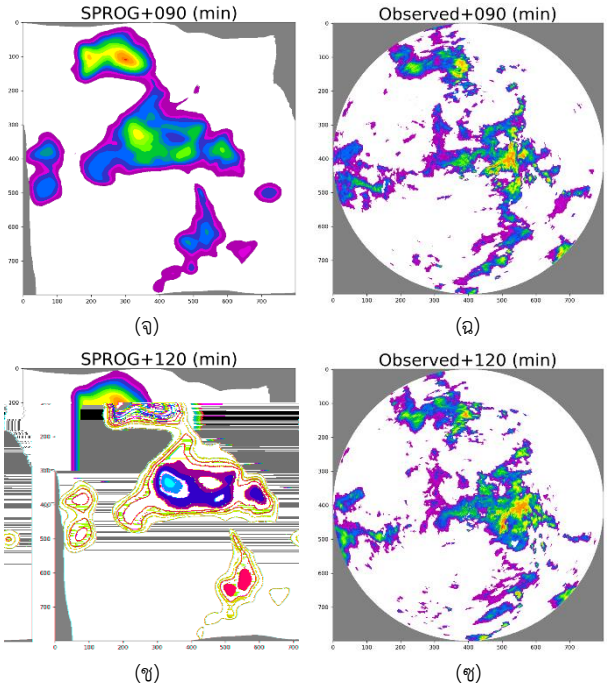
σ_O คือ ค่าความแปรปรวนของความเข้มฝนข้อมูลเรดาร์จริง (มม./ชม.)

σ_F คือ ค่าความแปรปรวนของความเข้มฝนเรดาร์พยากรณ์ (มม./ชม.)

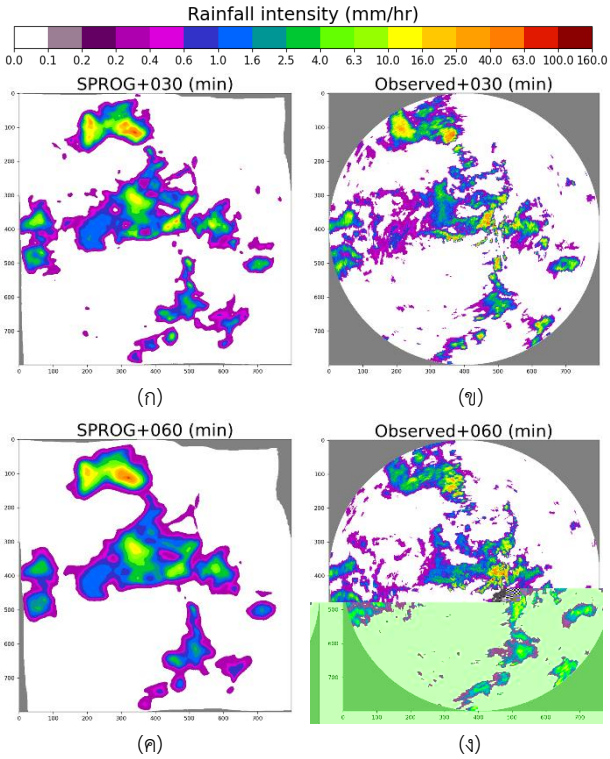
6. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

6.1 ผลการศึกษาฝนเรดาร์พยากรณ์ระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA

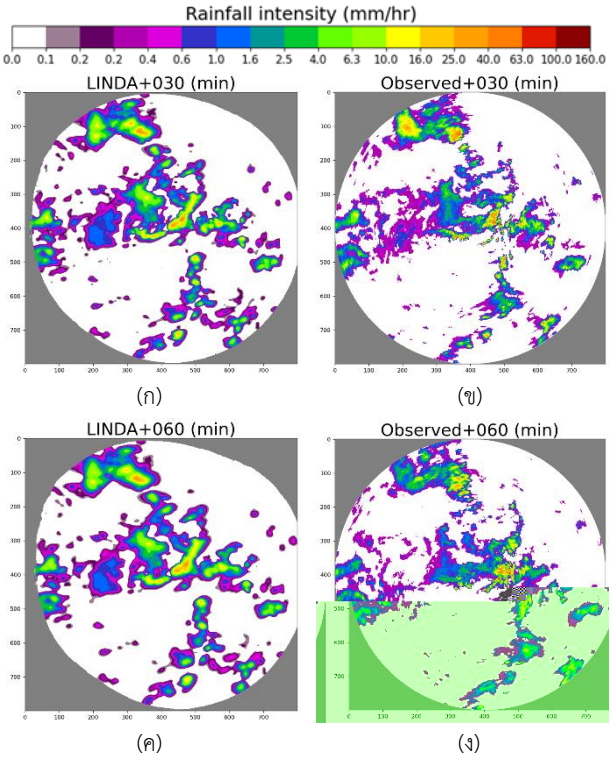
แสดงตัวอย่างผลการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นเปรียบเทียบระหว่างภาพเรดาร์จริง และผลการพยากรณ์เทคนิค S-PROG และ LINDA ที่เหตุการณ์ วันที่ 26 ส.ค. 2564 23:00 – 27 ส.ค. 2564 01:00 ช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า 30, 60, 90, 120 นาที ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



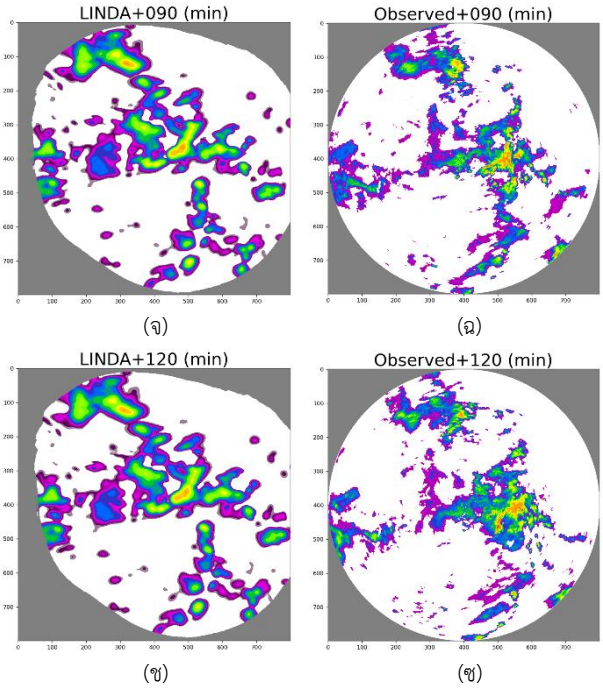
รูปที่ 4 (ต่อ) ผลการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยวิธี S-PROG (จ) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 90 (ฉ) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 90 (ช) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 120 (ซ) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 120



รูปที่ 4 ผลการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยวิธี S-PROG (ก) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 30 (ข) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 30 (ค) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 60 (ง) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 60



รูปที่ 5 ผลการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยวิธี LINDA (ก) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 30 (ข) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 30 (ค) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 60 (ง) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 60



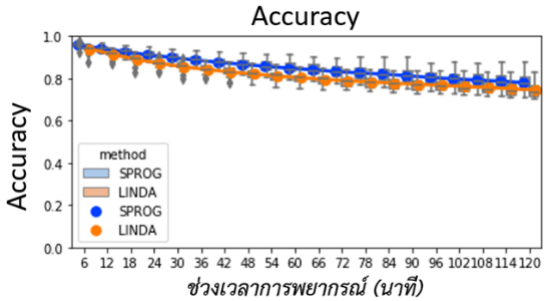
รูปที่ 5 (ต่อ) ผลการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นด้วยวิธี LINDA (จ) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 90 (ฉ) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 90 (ช) ผลการพยากรณ์ในนาทีที่ 120 (ซ) ข้อมูลตรวจวัดในนาทีที่ 120

6.2 การประเมินประสิทธิภาพของฝนเรดาร์พยากรณ์ระยะสั้น

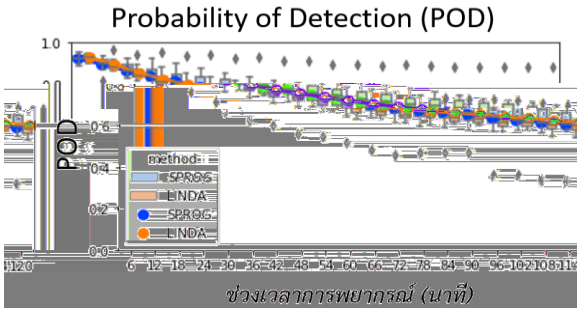
S-PROG LINDA initial time)

S-PROG LINDA 6, 12, ..., 120

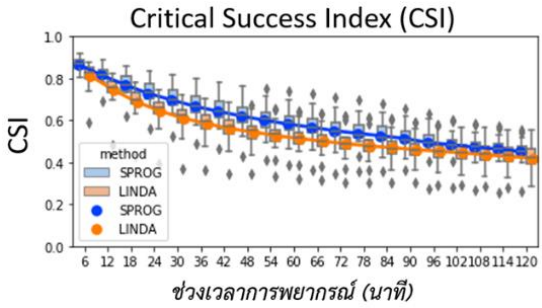
Accuracy, POD, CSI, correlation, MAE 6 10



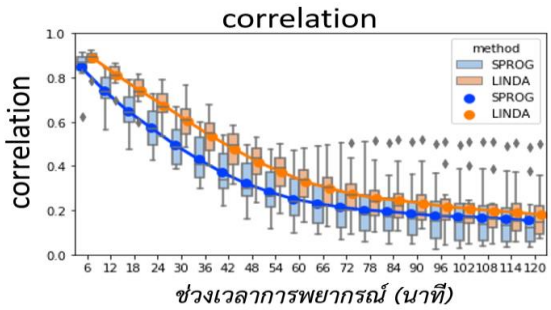
รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ดัชนี Accuracy ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA



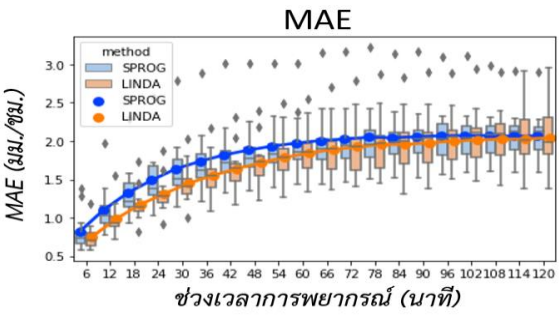
รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ดัชนี POD ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ดัชนี CSI ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ดัชนี Correlation ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ดัชนี MAE ของการพยากรณ์ฝนระยะสั้นด้วยเทคนิค S-PROG และ LINDA

จากผลการประเมินประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้น พบว่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนเรดาร์ค่อย ๆ ลดลงตามช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า โดยเมื่อพิจารณาช่วงแรกของการพยากรณ์พบว่าทั้งเทคนิค S-PROG และ LINDA มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับภาพเรดาร์ที่ตรวจวัดได้จริง และผลการพยากรณ์จะมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อช่วงเวลาการพยากรณ์เพิ่มมากขึ้น สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของการพยากรณ์สามารถจำแนกดัชนีที่ใช้ประเมินออกเป็น 2 หัวข้อตามการพิจารณาเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังนี้

1) การพิจารณาดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพ

สำหรับการพิจารณาดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงคุณภาพได้แก่ Accuracy, POD, และ CSI ที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของการพยากรณ์และภาพเรดาร์ที่ตรวจวัดได้ โดยเทียบกรณีฝนตกหรือฝนไม่ตกในแต่ละพิกเซลพบว่า ในช่วงเริ่มต้นการพยากรณ์เทคนิค S-PROG และ LINDA มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยเทคนิค LINDA มีประสิทธิภาพน้อยกว่า S-PROG เล็กน้อยเมื่อช่วงเวลาการพยากรณ์ถึง 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาของดัชนีเชิงคุณภาพต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

- ดัชนี Accuracy ใช้สำหรับบ่งชี้ความแม่นยำในการพยากรณ์ฝนตกและไม่ตกเทียบกับเหตุการณ์พยากรณ์ทั้งหมด พบว่าทั้ง S-PROG และ LINDA ให้ผลใกล้เคียงกันตั้งแต่การพยากรณ์ 6 นาทีถึง 2 ชั่วโมง โดยมีค่า Accuracy อยู่ในช่วง 0.96 – 0.78 และ 0.94 – 0.75 ตามลำดับ

- ดัชนี POD ใช้บ่งชี้ความแม่นยำในการพยากรณ์ฝนตกเทียบกับฝนตกจริงทั้งหมด พบว่าทั้ง S-PROG และ LINDA ให้ผลใกล้เคียงกันตั้งแต่การพยากรณ์ 6 นาทีถึง 2 ชั่วโมง โดยมีค่า POD อยู่ในช่วง 0.92 – 0.60 และ 0.93 – 0.61 ตามลำดับ

- ดัชนี CSI ใช้บ่งชี้ความแม่นยำในการพยากรณ์ฝนตกเทียบกับกรณีฝนตกทั้งหมดทั้งการพยากรณ์และตรวจวัดจริง พบว่าเทคนิค LINDA มีประสิทธิภาพน้อยกว่า S-PROG เล็กน้อย โดยมีค่า CSI อยู่ในช่วงอยู่ในช่วง 0.87 – 0.45 และ 0.81 – 0.42 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากวิเคราะห์ดัชนี CSI มีการพิจารณารูปแบบการพยากรณ์ชนิด False alarm ที่เป็นรูปแบบการพยากรณ์เตือนฝนตกที่ผิดพลาด โดยทคนิค LINDA นั้นให้ผลลัพธ์การพยากรณ์กลุ่มฝนที่มีความละเอียดสูงและคงสภาพก้อนกลุ่มฝนขนาดเล็ก ในขณะที่เทคนิค S-PROG การพยากรณ์กลุ่มฝนขนาดเล็กมักจะสลายไปหรือรวมตัวกับกลุ่มฝนขนาดใหญ่ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับภาพเรดาร์ตรวจวัดจริงแล้วเทคนิค S-PROG มีการเกิด False alarm ที่น้อยกว่า LINDA และส่งผลให้มีดัชนี CSI ที่ดีกว่า

2) การพิจารณาดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงปริมาณ

สำหรับการวิเคราะห์ดัชนีความแม่นยำของการพยากรณ์เชิงปริมาณได้แก่ ดัชนี Correlation และ MAE พบว่าเทคนิค LINDA มีประสิทธิภาพดีกว่า S-PROG โดยผลการวิเคราะห์เทคนิค S-PROG และ LINDA ที่ช่วงเวลาการพยากรณ์ 6 นาทีถึง 2 ชั่วโมง มีค่า Correlation อยู่ในช่วง 0.85 – 0.15 และ 0.89 – 0.18 ตามลำดับ และ MAE มีค่าอยู่ในช่วง 0.81 – 2.07 และ 0.75 – 2.04 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเทคนิค LINDA สามารถพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนได้มีประสิทธิภาพมากกว่า S-PROG

7. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนเรดาร์ระยะสั้นระหว่างเทคนิค S-PROG และ LINDA ซึ่งมีพื้นฐานมาจากเทคนิค Optical Flow ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ฝนเรดาร์ของทั้ง 2 วิธี มีแนวโน้มที่จะลดลงตามช่วงเวลาของการพยากรณ์ล่วงหน้า โดยเทคนิค S-PROG ให้ผลการพยากรณ์กลุ่มฝนมีขอบเขตครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความละเอียดของรูปร่างกลุ่มฝนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิค LINDA ที่สามารถพยากรณ์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝนได้หลากหลายทั้งการรวมตัว การสลายตัว และให้รูปร่างของกลุ่มฝนที่มีความละเอียดมากกว่า นอกจากนั้นเทคนิค LINDA ยังสามารถจับตำแหน่งศูนย์กลางพายุของกลุ่มฝนได้ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับ S-PROG โดยเมื่อพิจารณาผลของดัชนีชี้วัดความแม่นยำเชิงคุณภาพพบว่าทั้งวิธี S-PROG และ LINDA มีประสิทธิภาพที่คล้ายคลึงกันโดยวิธี S-PROG ให้ผลที่ดีกว่า LINDA เล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณให้ผลค่อนข้างชัดเจนว่าเทคนิค LINDA ให้ความถูกต้องที่เหนือกว่าวิธี S-PROG ดังนั้นเทคนิค LINDA จึงมีความสามารถในการนำไปพัฒนาระบบพยากรณ์ฝนระยะสั้น 2 ชั่วโมง ภายใต้รัศมีของเรดาร์สัตหีบมากกว่า S-PROG อย่างไรก็ตาม การเพิ่มช่วงเวลาการพยากรณ์ให้มีระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นควบคู่ไปกับการเพิ่มความถูกต้องในการพยากรณ์ให้เพิ่มขึ้นยังคงต้องพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และเป็นเป้าหมายต่อไปที่ควรทำวิจัยต่อยอดในขั้นสูง เพื่อขยายผลประโยชน์ของน้ำฝนเรดาร์ให้ครอบคลุมการใช้ประโยชน์ที่หลากหลายด้าน และช่วยเพิ่มระยะเวลาการเตรียมการรับมือต่อภัยพิบัติได้ยาวนานและทันท่วงทีมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ (คอบช.) โดยสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน) และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณกรมฝนหลวงและการบินเกษตรสำหรับข้อมูลเรดาร์สัตหีบสำหรับดำเนินงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wilson, J. W. (1966). *Movement and predictability of radar echoes*. Institutes for Environmental Research technical memorandum NSSL., pp.8-11

[2] Kessler, E. (1966). “Computer Program for Calculating Average Lengths of Weather Radar Echoes and Pattern Bandedness.” *Journal of Atmospheric Science*, 23(5), pp. 569–574.

[3] Seed, A. W. (2003). “A Dynamic and Spatial Scaling Approach to Advection Forecasting.” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42(3), pp.381-388.

[4] Pulkinen, S., Nerini, D., Perez Hortal, A.A., Velasco-Forero, C., Seed, A., Germann, U., and Foresti, L. (2019). Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(10), pp.4185-4219.

[5] Imhoff, R.O., Brauer, C.C., Overeem, A., Weerts, A.H., and Uijlenhoet, R. (2020). "Spatial and Temporal Evaluation of Radar Rainfall Nowcasting Techniques on 1,533 Events." *Water Resources Research*, 56(8), pp.e2019WR026723.

[6] Pulkkinen, S., Chandrasekar, V., and Niemi, T. (2021). "Lagrangian Integro-Difference Equation Model for Precipitation Nowcasting." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(12), pp.2125-2145.

[7] Battan, L.J. (1973). *Radar observation of the atmosphere*, The University of Chicago Press, pp.84-116.

[8] Seed, A., Nicol, W.J., Austin, G.L., Stow, C.D., and Bradley, S.G. (1996). "The impact of radar and rain gauge sampling errors when calibrating a weather radar." *Meteorological Applications*, 3(1), pp.43–52.

[9] Steiner, M., Smith, J.A., Burges, S.J., Alonso, C.V., and Darden, R.W. (1999). "Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation." *Water Resource Research*, 35(8), pp.2487–2503.

[10] Mapiam, P.P., Sharma, A., and Sriwongsitanon, N. (2014). Defining the Z-R relationship using gauge rainfall with coarse temporal resolution: Implications for flood forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), pp.04014003.

[11] Fulton, R.A., Miller, D.A., Seo, D.J., Breidenbach, J.P., and O'Bannon, T. (1998). The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and forecasting*, 13, pp.377–395.

[12] มลฑล เมธาประยูร, ไพโรจน์ สมุทรักษ์ และ พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม (2562). ฟังก์ชั่นย่อส่วนเชิงเวลาสำหรับการประเมินน้ำฝนระยะสั้นกว่าหนึ่งชั่วโมงด้วยเรดาร์. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16*, นครปฐม , 3-4 ธันวาคม 2562, หน้า 328-336.