

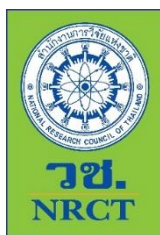
## รายงานการวิจัย

การติดตามเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศและปริมาณฝนรุนแรงและการ  
ทำนายในบริเวณภูมิภาคจีนและอินโดจีนด้วยดาวเทียมเป๋ยโตวและการผสมข้อมูล  
จากหลายแหล่ง

Atmospheric Water Vapor Variations and Extreme Precipitation  
Monitoring and Forecast over the China-Indochina Region Based on  
Beidou and Multi-Source

โดย ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ และคณะ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



## รายงานการวิจัย

การติดตามเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศและปริมาณฝนรุนแรงและการ  
ทำนายในบริเวณภูมิภาคจีนและอินโดจีนด้วยดาวเทียมเป่ยโตวและการผสมข้อมูล  
จากหลายแหล่ง

Atmospheric Water Vapor Variations and Extreme Precipitation  
Monitoring and Forecast over the China-Indochina Region Based on  
Beidou and Multi-Source

โดย ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ และคณะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

2564

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 ซึ่งสำเร็จลงได้จากความร่วมมือของหลายส่วนงาน ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือรวมถึงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทำวิจัย พร้อมกันนี้ขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กรมโยธาธิการ และผังเมือง สำหรับข้อมูลการรับสัญญาณ GNSS CORS และกรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ และสนับสนุนด้วยดีเสมอมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับแก้ไขข้อเสนอโครงการวิจัย รวมทั้งตรวจและแก้ไขเพื่อให้รายงานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการผันแปรของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ในระยะยาว เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูล GPS-PWV ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 11 สถานี ตั้งแต่ปี 2007-2016 โดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงด้วยโปรแกรม PANDA ผลการวิจัยพบว่า ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PWV แปรผกผันกับระดับความสูงของพื้นที่ แนวโน้มของค่า PWV ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นไปในเชิงบวกแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำฝนในพื้นที่นี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาว ในทางกลับกันแนวโน้มของค่า PWV ในภาคกลาง, ภาคตะวันออก, ภาคตะวันตกและภาคใต้เป็นไปในเชิงลบแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนมีแนวโน้มลดลงในระยะยาว ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประจำปีของ PWV มีขนาดตั้งแต่ 7 ถึง 16 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงเฟสของ PWV ประจำปีอยู่ที่ประมาณ -0.428 ซึ่งอยู่ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมในฤดูฝนและเป็นช่วงที่มีค่า PWV สูงสุดประจำปี

สำหรับเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมใช้ค่า PWV เฉลี่ยในวันที่ฝนตกในเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016 ของสถานีจันทบุรีเป็นตัวกำหนด ซึ่งพบว่าเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมเป็นวันที่ค่า GPS-PWV เฉลี่ยในเดือนพฤษภาคมสูงกว่า 58.5 มิลลิเมตร เป็นเวลา 3 วันติดต่อกัน หลังจากการทดสอบพบว่า เกณฑ์ใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีหลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วจะมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่อง และเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูดที่สูงขึ้นพบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดสอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่มากกว่าเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ

## Abstract

This research aim to analyze variation in a time series of Precipitable Water Vapor (PWV time series) to determine an alternative monsoon onset date for THAILAND using GPS-PWV from 11 widely-distributed Continuously Operating Reference Stations (CORS) from 2007 to 2016 and processing with PPP technique using PANDA software. It was found that the relationship of the PWV is inversely proportional to the elevation. Trends of PWV in the northern and northeastern regions have a positive, indicating that Rainfall tends to increase over the long term. On the other hand, the trend of PWV in the central, eastern, western, and southern regions is negative, showing that rainfall is likely to decrease in the long term. The annual amplitude of average PWV ranges from 7 to 16 millimeters, and the phase shift of annual PWV is about -0.428 (around July, rainy season) and is the period with the highest annual PWV.

The new threshold for determining the monsoon onset date is based on the average PWV on rainy days in May 2007-2016 of Chanthaburi Station. It was found that the new threshold was the days when the average GPS-PWV in May was higher than 58.50 millimeters for three consecutive days. After testing, it was found that the new threshold provided good results, with continuous rainfall after specifying the monsoon onset date with a new threshold. For other regions, the onset of the monsoon season will start later than about 3-5 days. It can be considered that the resolution is more in line with the actual conditions of the area than the criteria of the TMD, which has the same criteria for the whole country.

## สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทคัดย่อ .....	ง
Abstract.....	จ
สารบัญเรื่อง.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.1 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite Systems, GNSS).....	5
2.2 การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ .....	6
2.2.1 อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ งานวิจัยของ Davis et al. (1985) นำเสนอสมการ สำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) ของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เคลวิน, K) ดังสมการ (1)	7
2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP).....	9
2.4 การหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ท้องถิ่น (Deriving PWV from GNSS with Local Mean Temperature).....	10
2.5 ข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series).....	12
2.6 การสังเกตการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวและการตรวจสอบไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการ วิจัยและการประยุกต์ใช้ในภูมิภาค CICPEC .....	13
2.7 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและการตรวจสอบไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและการ ประยุกต์ใช้ในภูมิภาค CICPEC.....	14
2.8 ความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS เปรียบเทียบ กับ Microwave Radiometer (MWR) .....	14

บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV .....	20
3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน .....	21
3.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV ตลอดจังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยในช่วงปรากฏการณ์ ENSO (El Niño and Southern Oscillation).....	21
3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลม.....	21
3.5 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย .....	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	25
4.1 ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในประเทศไทย .....	25
4.2 การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล.....	26
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน.....	35
4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV ตลอดจังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยในช่วงปรากฏการณ์ ENSO (El Niño and Southern Oscillation).....	38
4.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลมในช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ .....	40
4.6 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย .....	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	53
รายชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยและคณะนักวิจัย.....	59

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean error) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จาก MWR ปี 2015 .....	17
ตารางที่ 3-1 ประกาศวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ปี 2007-2016 .....	23
ตารางที่ 4-1 แสดงค่า RMSE ของค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Function Model ในการวิเคราะห์ แนวโน้ม และองค์ประกอบตามฤดูกาลด้วยวิธี Robust Fit.....	26
ตารางที่ 4-2 รายละเอียดชื่อและพิกัดตำแหน่งรวมถึงค่าความสูงของสถานีรังวัดดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของกรมโยธาธิการ.....	28
ตารางที่ 4-3 ระยะห่างระหว่างสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยากับสถานี GNSS CORS .....	35
ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนของสถานีจันทบุรี (CHAN) ในเดือนพฤษภาคมของปี 2007-2016 สำหรับวันที่มีฝนตก และวันที่ฝนไม่ตก มีค่าเท่ากับ 58.50 และ 54.50 ตามลำดับ.....	43
ตารางที่ 4-5 วันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ได้จากการใช้เกณฑ์ใหม่ สำหรับปี 2007-2016 เมื่อมีค่า เกณฑ์ของ PWV เท่ากับ 58.50 มม. หรือมากกว่านั้นติดต่อกัน 3 วัน และเกณฑ์เดิมของกรมอุตุนิยมวิทยา..	45



## สารบัญภาพ

ภาพที่ 2-1 The Barometric Formula .....	8
ภาพที่ 2-2 เครื่อง Microwave Radiometer (MWR) ณ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา .....	15
ภาพที่ 2-3 ค่า PWV ที่ได้จาก MWR ระหว่างค่าที่ไม่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อน (จุดสีน้ำเงิน) และค่าที่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว (จุดสีดำ).....	16
ภาพที่ 2-4 กราฟแสดงค่า PWV โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล (สีดำ) และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (สีเขียว) เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จาก MWR ในปี 2015 ที่สถานี NKRM.....	17
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
ภาพที่ 3-2 สถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย ตอนกลางและตอนบนของประเทศ จำนวน 96 สถานี (แรเงาสีฟ้า) ที่ใช้ในการพิจารณาวันที่ฝนตกสำหรับเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม .....	24
ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธี Robust Fit กากบาทสีแดงคือค่าผิดปกติที่ตรวจพบ .....	25
ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV ในทุกสถานีรับสัญญาณ GNSS (สามเหลี่ยมสีแดง) .....	27
ภาพที่ 4-3 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคเหนือ (CHMA & UTTD STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก .....	29
ภาพที่ 4-4 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดเชียงใหม่และอุดรดิตถ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHMA และ UTTD .....	29
ภาพที่ 4-5 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (UDON, NKRM & SISK STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก.....	30
ภาพที่ 4-6 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดอุดรธานี, นครราชสีมา และศรีสะเกษ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี UDON, NKRM และ SISK.....	30
ภาพที่ 4-7 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคกลาง (DPT9 & NKSW STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ .....	31
ภาพที่ 4-8 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดกรุงเทพฯ และนครสวรรค์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี DPT9 และ NKSW .....	31
ภาพที่ 4-9 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคตะวันออกและตะวันตก (CHAN & PJRK STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ .....	32
ภาพที่ 4-10 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดจันทบุรีและประจวบคีรีขันธ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHAN และ PJRK.....	32

ภาพที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคใต้ (SOKA & SRTN STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ.....	33
ภาพที่ 4-12 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดสงขลา และสุราษฎร์ธานี แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี SOKA และ SRTN.....	34
ภาพที่ 4-13 ตำแหน่งสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา .....	36
ภาพที่ 4-14 แสดงค่า PWV ของสถานี CHAN (จุดสีน้ำเงิน) กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (กราฟแท่งสีเขียว) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในช่วงฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม (แถบแรเงา) ของทุกปี .....	37
ภาพที่ 4-15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่า PWV (จุดสีส้ม) ในช่วงระยะเวลา 3 ปี (2009-2011) ที่เป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์ El Niño (แรเงาสีส้ม) และ La Niña (แรเงาสีฟ้า) กราฟเส้นสีฟ้าเป็น ONI Index ของปรากฏการณ์ ENSO ในช่วงระยะเวลา 2009-2011 และปริมาณน้ำฝนรายวัน (กราฟแท่งสีเขียว).....	38
ภาพที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงรายสัปดาห์ของ SSTa สำหรับช่วงปี 2552-2554 ของปรากฏการณ์ ENSO และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนจาก 4 สถานี ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลของประเทศไทย .....	39
ภาพที่ 4-17 แสดงแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) จากสถานีจันทบุรี (CHAN) ช่วงเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016 .....	40
ภาพที่ 4-18 กราฟแท่งสีฟ้าแสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนตก และกราฟแท่งสีส้ม แสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนไม่ตก ในปี 2011 และ 2012.....	42
ภาพที่ 4-19 กราฟบน CDF Plot แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่มีฝนตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. ซึ่งมีจำนวนถึง 50% ในขณะที่กราฟล่างมีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ฝนไม่ตก ที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. อยู่เพียง 20% .....	44

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ระเบียงเศรษฐกิจจีน-คาบสมุทรอินโดจีน (China-Indochina Peninsula Economic Corridor : CICPEC) เป็นหนึ่งในหกระเบียงเศรษฐกิจตามแผนการพัฒนาบนเส้นทางสายไหม เชื่อมระหว่างเขตเศรษฐกิจสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ Pearl River (Pearl River Delta Economic Zone : PRD) กับประเทศในอนุภูมิภาคกลุ่มแม่น้ำโขง และหนึ่งในความเชื่อมโยงทั้ง 5 (Five Links) ของคณะกรรมการการพัฒนาและปฏิรูปแห่งชาติจีนที่ประกาศใช้แผนปฏิบัติการตามเอกสารชื่อ “Vision and Actions on Jointly Building Silk Road Economic Belt and 21st-Century Maritime Silk Road” คือ การเชื่อมโยงด้านสิ่งอำนวยความสะดวก (Facilities Connectivity) ด้วยการส่งเสริมให้มีการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ เช่น การขนส่งทางถนน พลังงาน รวมทั้งเครือข่ายด้านการสื่อสาร การลงทุนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานตลอดเส้นทางคมนาคมและการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษตลอดเส้นทาง อย่างไรก็ตามในด้านของการพัฒนาและการลงทุนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานบนแนวระเบียงเศรษฐกิจจีน-คาบสมุทรอินโดจีนนี้ถูกคุกคามด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภัยธรรมชาติ เช่น การเกิดฝนตกรุนแรงและบ่อยครั้งเป็นผลให้เกิดน้ำท่วม ดังนั้นการเตรียมความพร้อมในการปรับตัวสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อการจัดการที่ยั่งยืนในการพัฒนา CICPEC จึงถือว่าเป็นประเด็นสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่มีการเกิดฝนรุนแรงบ่อยครั้งนั้นปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) เป็นตัวการที่สำคัญอย่างหนึ่งในวัฏจักรของการเกิดฝน ซึ่งปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศนี้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การศึกษาสภาพภูมิอากาศระดับโลก ระดับภูมิภาคและระดับท้องถิ่นในปัจจุบันก็ใช้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ (Liang et al., 2015) รวมถึงเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) โดยตัวแปรนี้มีการศึกษาวิจัยกันมาอย่างต่อเนื่องสำหรับงานด้านอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่อดีตหรือเรียกอีกอย่างว่า GPS-Meteorology โดยการใช้ข้อมูลจากระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System: GPS) ในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ หรือการใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณ GPS ภาคพื้นดินเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Bevis et al., 1994) ซึ่งถือได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสามารถวัดสภาพอากาศได้อย่างต่อเนื่อง ต้นทุนต่ำ และมีความได้เปรียบทางด้านความครอบคลุมพื้นที่และความถี่ในการรังวัด (Coster et al., 1996; Jade & Vijayan, 2008; Suparta & Iskandar, 2012; Takiguchi et al., 2000) ดังนั้นองค์ความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงหลายมิติของปริมาณไอน้ำในอากาศจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเข้าใจการเกิดและพัฒนาการของปริมาณฝนที่ตกรุนแรง แต่งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการใช้เทคนิคจากข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศเพียงแหล่งเดียว และมีผลทำให้เกิดปัญหาหนัก ดังเช่นความไม่เข้ากันในระยะยาวและรายละเอียดเชิงพื้นที่ที่ค่อนข้างหยาบ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่องานวิจัยและการ

ประยุกต์ใช้งานด้านการเตือนภัยล่วงหน้า การทำนายและการทำนายระยะยาวของการเกิดสภาพอากาศที่มีฝนรุนแรง โครงการวิจัยนี้จึงเสนอการผสมข้อมูลหลายแหล่งในภูมิภาคจีนและอินโดจีน ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลจากสถานีฐานจีเอ็นเอสเอส (GNSS stations) ข้อมูลเรดิโอซอน (Radiosonde stations) สถานีวัดลมและแบบจำลองทำนายสภาพอากาศ เพื่อมาพัฒนาวิธีการรวมข้อมูลจากหลายแหล่งเพื่อสร้างข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศที่เป็นเนื้อเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำในอากาศในหลากหลายมิติทางเวลา ทั้งตามรายปีตามฤดูกาลและในทันที และศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความรุนแรงของการเกิดฝนหนัก ข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศที่มีความละเอียดสูงทั้งเชิงพื้นที่และเวลาและระบบติดตามเส้นทางการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งระบบทำนายสภาวะฝนรุนแรงจะถูกพัฒนาขึ้น วิธีการ แบบจำลองและระบบใหม่จากโครงการนี้จะป็นข้อมูลสนับสนุนที่ดีต่อการเตือนภัยล่วงหน้า การทำนายระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งจะเกิดประโยชน์ต่อการสร้างระบบสาธารณสุขพหุภาคีพื้นฐานและการพัฒนาเศรษฐกิจในภูมิภาคระเบียงเศรษฐกิจจีน-คาบสมุทรมอินโดจีนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนาวิธีการรวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่งเพื่อการหาไอน้ำในบรรยากาศที่มีความแม่นยำสูง
2. วิเคราะห์ลักษณะรูปแบบการแปรผันในระยะยาวของไอน้ำในบรรยากาศเหนือภูมิภาค CICPEC กับสภาวะโลกร้อน รวมถึงความสัมพันธ์กับความถี่และความรุนแรงของสภาพอากาศที่เพิ่มขึ้น
3. ตรวจสอบความแปรผันตามฤดูกาลของไอน้ำในบรรยากาศและการนำพาของไอน้ำรวมถึงความสัมพันธ์กับความถี่และความรุนแรงของสภาพอากาศที่รุนแรงขึ้น
4. ตรวจสอบและพยากรณ์อากาศที่รุนแรงโดยใช้รูปแบบการแปรผันระยะสั้นของไอน้ำในบรรยากาศและการนำพาของไอน้ำในบรรยากาศ

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

**ผลผลิต (Output) :** ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติ จำนวน 3 ฉบับ

1.3.1 ในส่วนของการวิเคราะห์รูปแบบความแปรปรวนของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ในประเทศไทยนั้น ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 ฉบับ ชื่อวารสาร Survey Review ซึ่งเป็นวารสารอยู่ในฐานข้อมูล ISI (Q2) ในชื่อเรื่อง “Variations of Precipitable Water Vapor Using GNSS CORS in Thailand.” ปี 2020

1.3.2 การวิเคราะห์เกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมจากข้อมูล PWV ในประเทศไทย ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 ฉบับ ชื่อวารสาร International Journal of Geoinformatics ซึ่งเป็นวารสารอยู่ในฐานข้อมูล Scopus (Q4) ในชื่อเรื่อง “Analysis of PWV derived

from the GNSS CORS stations for determining the onset of the southwest monsoon in Thailand.” ปี 2020

1.3.3 ในส่วนของหน่วยวิจัยทางจีน มีการตีพิมพ์ผลการวิเคราะห์ข้อมูล PWV ซึ่งใช้ข้อมูลจากทั้งของประเทศไทยและประเทศจีนในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 ฉบับ ในชื่อเรื่อง “Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation.” ปี 2020

**Citation:** SHI Chuang, ZHANG Weixing, CAO Yunchang, LOU Yidong, LIANG Hong, FAN Lei, C SATIRAPOD, C TRAKOLKUL. Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1112-1119.

**ผลลัพธ์ (Outcome) :** มีการใช้ประโยชน์ของงานวิจัย โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ มีการขอความอนุเคราะห์ในส่วนของคุณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในโครงการวิจัยนี้ เพื่อนำไปต่อยอดการศึกษารายละเอียดถึงความสัมพันธ์ของคุณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (GNSS-PWV) กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่มีผลต่อการเกิดฝน โดยมอบหมายให้ นางสาวพัชรวดี จิตสุทธิ ตำแหน่ง นักภูมิสารสนเทศ ฝ่ายพัฒนาเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นผู้ประสานงานข้อมูล ตามหนังสือขอความอนุเคราะห์ เลขที่ อว 5901/2008 ลงวันที่ 13 พฤศจิกายน 2563 และยังมีในส่วนของกรมอุตุนิยมวิทยาที่กำลังดำเนินการทำเรื่องขอความอนุเคราะห์ข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในโครงการวิจัยนี้ ไปต่อยอดในการทำวิจัยด้วยเช่นกัน



## บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite Systems, GNSS)

การหาค่าพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียมเป็นที่รู้จักและมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการสำรวจจริงวัดแบบเดิม ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีทางการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนได้มีการกำหนดคำเฉพาะขึ้นมาที่มีชื่อว่า Global Navigation Satellite Systems หรือเรียกโดยย่อว่า GNSS โดยเป็นคำที่ใช้แทนระบบการหาพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม ที่ประกอบด้วยดาวเทียมหลายระบบรวมกัน (โดยปกติหมายถึง ต้องมีอย่างน้อย 2 ระบบขึ้นไป) ได้แก่ ระบบดาวเทียม GPS ของสหรัฐอเมริกา ระบบดาวเทียม GLONASS ของรัสเซีย ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม Beidou (หรือ Compass) ของประเทศจีน ระบบดาวเทียม IRNSS ของอินเดีย ระบบดาวเทียม DORIS ของฝรั่งเศส ระบบดาวเทียม QZSS ของญี่ปุ่น เป็นต้น

ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System, GPS) เป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GPS ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหม (The United States Department of Defense, DoD) ประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เพื่อประโยชน์ทางการทหารและหน่วยงานราชการของสหรัฐอเมริกา โดยใช้การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลงมายังพื้นโลก เมื่อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS รับสัญญาณจากดาวเทียมได้แล้วจะนำเอาข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้ไปประมวลผลหาตำแหน่งที่ต้องการ ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ ส่วนควบคุมและส่วนผู้ใช้ โดยส่วนควบคุมจะมีสถานีติดตามภาคพื้นดินที่กระจายอยู่บนพื้นโลกเพื่อคอยติดตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียม ซึ่งทำให้สามารถคำนวณวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมที่ขณะเวลาต่าง ๆ ได้ จากนั้นส่วนควบคุมก็จะทำนายวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมทุกดวงในระบบล่วงหน้าแล้วส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังส่วนอวกาศซึ่งก็คือตัวดาวเทียม ดาวเทียมก็จะทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ออกมาพร้อมกับคลื่นวิทยุมายังโลก ในส่วนของผู้ใช้เมื่อต้องการจะทราบตำแหน่งของจุดใด ๆ ก็เพียงนำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปตั้งตรงจุดที่ต้องการหาตำแหน่ง แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลก็จะทราบตำแหน่งที่ต้องการ ในส่วนอวกาศประกอบด้วยตัวดาวเทียมและสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยระบบออกแบบให้มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรอยู่ในวงโคจร 6 ระนาบ แต่ละระนาบมีจำนวนดาวเทียม 4 ดวง โดยทุกระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 55 องศา และทำมุมระหว่างกัน 60 องศา มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที

คลื่นสัญญาณที่ดาวเทียม GPS ส่งออกมาเป็นคลื่นวิทยุในช่วงคลื่น L-band ที่มีสองความถี่คือ ความถี่ 1575.42 MHz เรียกว่าคลื่น L1 ซึ่งมีความยาวคลื่น 19.05 cm และความถี่ 1227.60 MHz เรียกว่าคลื่น L2 ซึ่งมีความยาวคลื่น 24.45 cm คลื่นวิทยุดังกล่าวจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยรหัสและข้อมูลดาวเทียม รหัสที่ใช้ในการกล้ำสัญญาณมี 2 ชนิดคือ รหัส C/A-code (Coarse/Acquisition-code) มีความถี่ 1.023 MHz ความยาวคลื่น 300 m และรหัส P-code (Precision-code) มีความถี่ 10.23 MHz ความยาว

คลื่น 30 m ซึ่งรหัส P-code จะส่งวนไว้ใช้เฉพาะในวงการทหารและบางหน่วยงานของสหรัฐอเมริกาเท่านั้น ในคลื่น L1 นั้นจะถูกกล้ำสัญญาณด้วยรหัสทั้งสองชนิด แต่คลื่น L2 จะถูกกล้ำสัญญาณเฉพาะรหัส P-code ส่วนข้อมูลดาวเทียมจะมีทั้งในคลื่น L1 และ L2 โดยข้อมูลนำหนดาวเทียม (Navigation message) จะประกอบด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียมหรืออีพิเมอร์ริสดาวเทียม (Satellite ephemerides) ค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม (Satellite clock corrections) และสถานะภาพของดาวเทียม (Satellite status)

ระบบดาวเทียมอีกหนึ่งระบบได้แก่ ระบบดาวเทียม GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) เป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GLONASS ถูกพัฒนาโดยสหภาพโซเวียต (Union of Soviet Socialist Republics, USSR) หรือประเทศรัสเซียในปัจจุบัน ตั้งแต่ปี 1970 ดาวเทียมดวงแรกถูกส่งขึ้นเมื่อปี 1982 โดยระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้มีความคล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS ทั้งส่วนประกอบและหลักการทำงาน ที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ ส่วนควบคุม และส่วนผู้ใช้ โดยระบบออกแบบให้มีจำนวนดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวง โคจรอยู่ในวงโคจร 3 ระนาบ แต่ละระนาบมีดาวเทียม 8 ดวง โดยทุกระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 64.8 องศา และทำมุมระหว่างกัน 120 องศา มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 19,100 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 15 นาที ปัจจุบันมีจำนวนดาวเทียมอยู่ในวงโคจรทั้งหมด 27 ดวง โดยใช้งานได้ 24 ดวง สำรอง 2 ดวง และอยู่ในช่วงของการทดสอบ 1 ดวง (ข้อมูล ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2563; <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>)

## 2.2 การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หมายถึง บรรยากาศชั้นแรกสุดที่อยู่ถัดจากพื้นโลกขึ้นไป บรรยากาศในชั้นนี้มีความหนาแน่นมากที่สุดถึงร้อยละ 80 ของมวลบรรยากาศ ปริมาณไอน้ำเกือบทั้งหมดของบรรยากาศจะปรากฏอยู่ในชั้นนี้รวมถึงปรากฏการณ์สำคัญ ๆ ทางธรรมชาติที่เกี่ยวกับลมฟ้าอากาศ เช่น เมฆ หมอก ฝน หิมะ ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง พายุต่าง ๆ เป็นต้น การเคลื่อนที่ของอากาศในชั้นนี้มีทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ความสูงของชั้นโทรโพสเฟียร์ในแต่ละแห่งมีความผันแปรขึ้นอยู่กับความแรงในการยกตัวของอากาศที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความกดอากาศ ซึ่งจะเห็นว่าความสูงของชั้นโทรโพสเฟียร์สัมพันธ์กับละติจูด ฤดูกาล และการเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศผิวพื้นประจำวัน โดยทั่วไปชั้นโทรโพสเฟียร์มีความสูงเฉลี่ยที่บริเวณศูนย์สูตรประมาณ 17-18 กิโลเมตร ที่บริเวณละติจูดกลางประมาณ 10-12 กิโลเมตร และที่บริเวณขั้วโลกประมาณ 8-9 กิโลเมตร แนวเขตขอบบนสุดของชั้นโทรโพสเฟียร์เรียกว่า โทรโปพอส (tropopause) อุณหภูมิในชั้นโทรโพสเฟียร์จะมีค่าลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น สภาพของอุณหภูมิลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า lapse condition อัตราการลดลงอุณหภูมิของบรรยากาศ (environmental lapse rate) ในชั้นโทรโพสเฟียร์โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 6.5 °C ต่อกิโลเมตร ซึ่งการลดลงของอุณหภูมินี้จะไม่เท่ากับขึ้นอยู่กับสถานที่และระยะเวลา อาทิเช่น ชั้นโทรโพสเฟียร์ชั้นล่างมีอัตราการลดลงอุณหภูมิต่างกับ 6-7 °C ต่อกิโลเมตร และ 7-8 °C ต่อกิโลเมตรในชั้นบนตามลำดับ



โทรโพสเฟียร์ (troposphere) เป็นบรรยากาศชั้นที่มีความสำคัญทางอุตุนิยมวิทยา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบแห้งและส่วนประกอบชื้น โดยส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดประมาณ 90 % ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ส่วนประกอบชื้นจะมีขนาดประมาณ 10% ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยทั่วไปสามารถที่จะหาค่าคลาดเคลื่อนจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ในส่วนแห้งได้ดี แต่ในส่วนชื้นนั้นยากที่จะหาค่าที่ถูกต้อง ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบมีผลทำให้คลื่นเดินทางมาถึงเครื่องรับช้ากว่าความเป็นจริง ทำให้ระยะที่วัดได้ยาวกว่าที่ควรจะเป็น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นทางที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนี้เช่นเดียวกับในชั้นไอโอโนสเฟียร์ การล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นในอากาศขณะทำการรังวัด เป็นต้น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดตั้งแต่ 2 เมตร เมื่อตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ในแนวตั้งของเครื่องรับจนกระทั่ง 20 เมตร เมื่อตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ใกล้เคียงกับแนวราบ (Brunner & Welsch, 1992) เนื่องจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ไม่ได้ขึ้นกับความถี่ของคลื่นสัญญาณ ดังนั้นการใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับแบบสองความถี่จึงไม่สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ให้หมดไปได้เหมือนกับกรณีของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2548)

2.2.1 อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ งานวิจัยของ Davis et al. (1985) นำเสนอสมการสำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) ของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เคลวิน, K) ดังสมการ (1)

$$T_m = \frac{\int \left(\frac{P_v}{T}\right) dz}{\int \left(\frac{P_v}{T^2}\right) dz} \quad (1)$$

เมื่อ  $P_v$  = แรงดันไอน้ำ ในหน่วย มิลลิบาร์ (1 มิลลิบาร์ = 1 Hectopascal (hPa)

$T$  = อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในหน่วย เคลวิน (K)

ค่า  $T$  สามารถตรวจวัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวิทยุห้วงอากาศ (Radiosonde) และสามารถเรียกดูค่า  $T_m$  ตามเส้นทางของสัญญาณที่เรียกว่า ข้อมูลอุณหภูมิโทรโพสเฟียร์ โดย (Bevis et al., 1992) แนะนำว่า ค่า  $T_m$  สามารถประมาณการได้โดยอุณหภูมิผิว  $T_s$  ดังความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_m - T_s$  สมการ (2)

$$T_m = aT_s + C \quad (2)$$

เมื่อ  $a$  = สัมประสิทธิ์การถดถอย และ  $C$  เป็นค่าคงที่

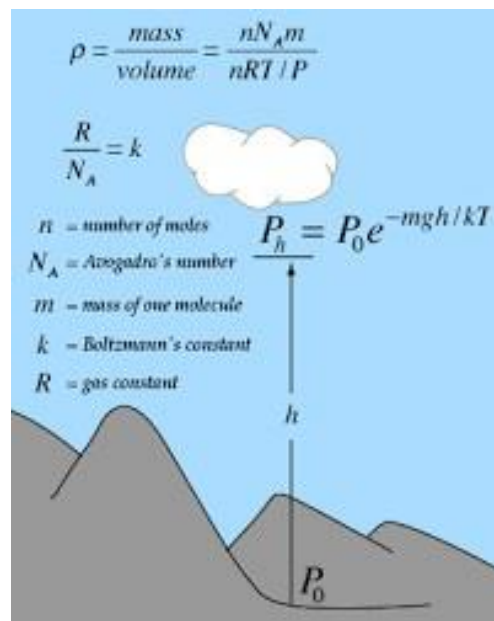
ความถูกต้องของค่า  $a$  และ  $C$  ขึ้นอยู่กับการเก็บข้อมูลของค่า  $T_m$  และ  $T_s$  โดยค่า  $T_m$  ได้จากการเก็บข้อมูลที่มีจำนวนมากกว่า 10 ปีจากวิทยุห้วงอากาศ และค่า  $T_s$  จากอุณหภูมิพื้นผิว งานวิจัยของ Ross and

Rosenfeld (1997) แนะนำว่า ความถูกต้องของค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_m-T_s$  นี้ ขึ้นอยู่กับการได้ ข้อมูลของค่า  $T_m$  ซึ่งเป็นค่าเฉพาะไซต์และขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานี

**2.2.2 ความกดอากาศในแนวตั้ง** ความกดอากาศ (Air pressure) คือ น้ำหนักของอากาศที่กดทับ กันลงมาด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีแรงดันออกเท่ากันทุกทิศทาง ความกดอากาศ เกิดขึ้นจากน้ำหนักของอากาศที่รวมตัวกันเป็นบรรยากาศโลก ซึ่งจะมีค่าลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นเหนือพื้น โลก โดยข้อมูลความกดอากาศนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่ต้องตรวจวัดเพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศ ในการศึกษา ทางอุตุนิยมวิทยาการตรวจวัดค่าความกดอากาศตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า บารอมิเตอร์ปรอท (Mercury Barometer) เป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดความกดอากาศในการรายงานสภาพอากาศโดย คำนวณได้จากสมการความกดอากาศ (barometric formula) ดังสมการ (3) และภาพที่ 2-1

$$P_h = P_0 e^{-mgh/kT} \quad (3)$$

- เมื่อ  $P_h$  = ความกดอากาศที่ความสูง  $h$ , ม. (hPa)  
 $P_0$  = ความกดอากาศที่ระดับทะเลปานกลาง, ม. (hPa)  
 $m$  = มวลของโมเลกุล และเท่ากับ 29 หน่วยมวลอะตอม (amu)  
 $g$  = แรงโน้มถ่วง ( $ms^{-2}$ )  
 $k$  = ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)  
 $T$  = อุณหภูมิเฉลี่ย ในหน่วย เคลวิน (K)



ภาพที่ 2-1 The Barometric Formula

(อ้างอิง <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/barfor.html>)

### 2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)

พารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงนั้น ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) ในการประมวลผลข้อมูล GPS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay: ZTD) โดยใช้ข้อมูลในรูปแบบ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ในการประมวลผล นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก้नाฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) ในการประมวลผล ดังนั้น สมการการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสามารถเขียนได้ ดังนี้ (Kouba & Héroux, 2001)

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \varepsilon_p)_{L3} \quad (4)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \varepsilon_\phi)_{L3} \quad (5)$$

เมื่อ  $P$  = สมการค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

$\phi$  = สมการค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) (เมตร)

$\rho$  = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)

$c$  = ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$dt$  = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

$dT$  = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

$M$  = Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม (องศา)

$ZTD$  = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Zenith Total Delay (มิลลิเมตร)

$N$  = เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

$\varepsilon_p$  และ  $\varepsilon_\phi$  = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) และ สัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise) (เมตร)

## 2.4 การหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (Deriving PWV from GNSS with Local Mean Temperature)

ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ข้อมูล GPS คือ ค่าความสูงของน้ำในหน่วยมิลลิเมตรภายในพื้นที่ 1 ตารางเมตร หรือก็โลกรัมต่อตารางเมตร ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) ซึ่ง  $1 \text{ kg}/\text{m}^2 = 1$  มิลลิเมตร โดยค่า PWV ได้จากการรวมปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทางตั้งเหนือตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณสูงขึ้นเป็นคอลัมน์จนสุดชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์กลั่นตัวรวมกันเป็นคอลัมน์ของน้ำในภาชนะ ค่าประมาณ ZTD เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS ประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก (Davis et al., 1991) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางตั้งแบบแห้ง (Zenith Hydrostatic Delay: ZHD) และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้งแบบชื้น (Zenith Wet Delay: ZWD) ในส่วน Dry part เกิดจากก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (ตัวอย่าง  $\text{N}_2$ -78%,  $\text{O}_2$ -21%,  $\text{Ar}$ -0.9%) แปรผันตามอุณหภูมิและความกดอากาศ

สำหรับ Dry part นั้นได้มีแบบจำลองที่สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ ได้แก่ แบบจำลองของ Hopfield (1971) แบบจำลองของ Saastamoinen (1972) เป็นต้น และเทอมนี้ถูกเรียกว่า Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) ในบริเวณประเทศไทยแบบจำลองของ Saastamoinen (1972) มีความเหมาะสมมากที่สุด (Satirapod & Chalermwattanachai, 2005) ในการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงจึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการประมวลผล ซึ่งจะสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (6) (Bevis et al., 1992)

$$\text{ZHD} = \frac{2.2768 \times P_s}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028H} \quad (6)$$

เมื่อ  $P_s$  = ค่าความกดอากาศพื้นผิว ในหน่วย มิลลิบาร์ (1 มิลลิบาร์ = 1 Hectopascal (hPa))

$\phi$  = ละติจูดที่สถานีรับสัญญาณดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน

$H$  = ความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) ในหน่วย เมตร

จะได้ค่า Zenith Hydrostatic Delay , ZHD ในหน่วย มิลลิเมตร

สำหรับ Wet part เกิดจากปริมาณไอน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ความแปรปรวนในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศขณะทำการรับสัญญาณ แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนนี้จะมีขนาดเล็ก แต่ทว่ามีความแปรปรวนสูงทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงนั้นจำเป็นต้องมีการประมาณค่าพร้อมกับการหาพิกัดด้วย และเรียกเทอมนี้ได้ว่า Zenith Wet Delay (ZWD) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์กับงานอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) โดยทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ไปเป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) (Bevis et al., 1992)

$$\text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD} \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) จะได้ค่า Zenith Wet Delay, ZWD ในหน่วย มิลลิเมตร

โดยค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้จากค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า PWV และค่า ZWD แสดงดังสมการ (8) (Bevis et al., 1992)

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \times RV \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2 \right)} \quad (8)$$

โดยที่  $\rho_w$  = ความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว (999.97 กก/ลบ.ม.)

$RV$  = ค่าคงที่ของไอน้ำ (461.525 จูล/กก.\*เคลวิน)

$k_2$  = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (22.1 เคลวิน/มิลลิบาร์)

$k_3$  = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (3,739 เคลวิน<sup>2</sup>/มิลลิบาร์)

$T_m$  = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere mean temperature)

แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ( $T_m$ ) สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น จากงานวิจัยของ Suwanton et al. (2017) แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลอง  $T_m$  ท้องถิ่นจะให้ความถูกต้องที่สูงกว่า โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ จากข้อมูล AIRS และ AMSU เพื่อหาค่า  $T_m$  สำหรับประเทศไทย (ในหน่วยเคลวิน) จะมีสมการดังนี้

$$T_m = 0.6066T_s + 113.2914 \quad (9)$$

ค่า ZWD ที่คำนวณได้จากสมการที่ (7) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไอน้ำที่อยู่ในบรรยากาศ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ZWD และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ หรือ PWV หน่วยมิลลิเมตร ได้จากสมการที่ (10) (Bevis et al., 1992)

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (10)$$

## 2.5 ข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series)

คือ ชุดของข้อมูลที่เก็บรวบรวมตามระยะเวลาเป็นช่วง ๆ หรือค่าสังเกตที่เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับเวลาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีระยะเวลาที่ติดต่อกันอย่างเป็นระบบ โดยอนุกรมเวลามี 4 ส่วนประกอบ ได้แก่ แนวโน้ม (T), ฤดูกาล (S), วัฏจักร (C) และผิดปกติหรือความไม่แน่นอน (I) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 แนวโน้ม (Trend Component: T) หมายถึง การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาในระยะยาว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลง และลักษณะแนวโน้มนั้นอาจจะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ ระยะเวลาที่จะทำให้เห็นแนวโน้มส่วนใหญ่ไม่ควรต่ำกว่า 10 ช่วงเวลา ลักษณะเด่นของเส้นแนวโน้มคือจะต้องเรียบไม่มีการหักมุม ใด ๆ

2.5.2 ฤดูกาล (Seasonal Component: S) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของฤดูกาล ซึ่งจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันในช่วงเวลาเดียวกันของแต่ละปี โดยทั่วไปช่วงเวลาของฤดูกาลหนึ่ง ๆ มักจะสั้นกว่า 1 ปี เช่น รายเดือน รายไตรมาส คำว่าฤดูกาลในที่นี้หมายถึง สภาพภูมิอากาศ วัฒนธรรม สภาพสังคม หรือเทศกาลต่าง ๆ ก็ได้

2.5.3 วัฏจักร (Cyclical Component: C) หมายถึง การเคลื่อนไหวของข้อมูลที่มีลักษณะซ้ำ ๆ กัน คล้ายกับความผันแปรตามฤดูกาล ต่างกันที่ระยะเวลาของการเคลื่อนไหวของข้อมูลจะมีระยะเวลานานกว่าหนึ่งปี เช่น 4 ปี หรือ 10 ปี เป็นต้น เช่น ในวัฏจักรของธุรกิจหรือทางการเกษตร เป็นต้น

2.5.4 ผิดปกติหรือความไม่แน่นอน (Irregular Component: I) หมายถึง การเคลื่อนไหวของข้อมูลที่ไม่มีความแน่นอน ลักษณะของข้อมูลที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะของเหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดการณ์เอาไว้ล่วงหน้า เช่น เหตุการณ์น้ำท่วม ฝนแล้ง การชุมนุมประท้วง และการประกาศนัดหยุดงาน เป็นต้น

การวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) เป็นการพยากรณ์ที่อาศัยข้อมูลในอดีตมาพิจารณาว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเมื่อเวลาเปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นอย่างไร มีการเคลื่อนไหวมากน้อยเพียงใด และสามารถพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงข้อมูลในอนาคตได้ การวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลานี้จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเวลาในอดีตเป็นพื้นฐาน (ศิริลักษณ์ เล็กสมบูรณ์ 2531) ข้อมูลอนุกรมเวลา อาจได้รับอิทธิพลของปัจจัยที่เป็นส่วนประกอบของอนุกรมเวลาทั้ง 4 ปัจจัยหรือเพียงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเท่านั้นก็ได้ การวิเคราะห์จึงควรแยกวิเคราะห์ทีละปัจจัย ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ปัจจัยค่าแนวโน้มและค่าผันแปรตามฤดูกาลเท่านั้น

## 2.6 การสังเกตการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวและการตรวจสอบไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและการประยุกต์ใช้ในภูมิภาค CICPEC

เนื่องจากไอน้ำในบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) มีบทบาทสำคัญในระบบภูมิอากาศและเหตุการณ์สภาพอากาศจำนวนมาก จึงมีความพยายามอย่างยิ่งในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ PWV ในช่วงเวลาที่แตกต่างกันและการประยุกต์ใช้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ PWV ในการทำนายและการพยากรณ์สภาพอากาศ ถึงแม้ว่าจะได้รับความสำเร็จอย่างมากทั่วโลก แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องบางประการเกี่ยวกับการวิจัยและการประยุกต์ใช้ในภูมิภาค CICPEC ในด้านการสังเกตการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวและการตรวจสอบไอน้ำในชั้นบรรยากาศ คือ การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ขาดการแปรผันของไอน้ำบรรยากาศในระยะยาวในภูมิภาคต่าง ๆ ด้วยการสำรวจจากวิทยุห้วงอากาศ (Radiosonde) หรือเครื่องวัดคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Radio Meter: MWR) จากดาวเทียม แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวระหว่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและอุณหภูมิประมาณสอดคล้องกับสมการ Clausius-Clapeyron (C-C) ทั่วโลก แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคอย่างชัดเจน (Ross และ Elliott, 2001; Trenberth et al., 2005; Durre et al., 2009) อย่างไรก็ตามผลการวิจัยบนพื้นฐานของข้อมูล radiosonde ที่มีเครื่องมือที่แตกต่างกันอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างกัน ซึ่งทำให้การศึกษาสภาพอากาศโดยใช้การสังเกตเหล่านี้เกิดผลกระทบในทางกลับกัน MWR ที่ใช้กับดาวเทียมไม่เหมาะสมสำหรับการหาค่า PWV เหนือพื้นดิน โดย Gradinarsky et al. (2002) ได้ทำการสำรวจโดยใช้สถานี GNSS ภาคพื้นดินเป็นครั้งแรกเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของ PWV ในประเทศสวีเดนในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาซึ่งแสดงให้เห็นว่า GNSS ภาคพื้นดินมีประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์มากในการศึกษาสภาพภูมิอากาศในอนาคต หลังจากนั้น Vey et al. (2009) และ Ning et al. (2016) ได้ทำการประมาณค่าของ PWV ทั่วโลกจากข้อมูลที่สถานี GNSS หลายร้อยแห่งจากหน่วยงาน IGS

สำหรับในประเทศจีนมีการศึกษาจำนวนมากที่ใช้ข้อมูล radiosonde หรือข้อมูลวิเคราะห์ซ้ำพบว่าความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วง 30-40 ปีที่ผ่านมา ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของความชื้นและความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิในประเทศจีน (Zhai and Zhou, 1997; Dai and Yang, 2009; Xie et al., 2011; Zhao et al., 2015) โดย Zhang et al. (2019) ระบุว่า สามารถสังเกตเห็นสัญญาณแปลกปลอมได้ชัดเจนในข้อมูล PWV ในระยะยาวเว้นแต่จะมีการปรับแก้ที่เหมาะสมกับข้อมูล radiosonde หรือข้อมูลวิเคราะห์ซ้ำในประเทศจีน เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้ได้รับผลกระทบจากปัญหาในการรับสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นในระยะยาวของ PWV ที่ได้ข้อมูลจาก radiosonde ถึงแม้ว่าข้อมูลจากสถานี GNSS ภาคพื้นดินนั้นมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันแต่ยังคงเจอกับความไม่แน่นอนที่เกิดจากรูปแบบการประยุกต์ใช้แบบจำลองและความแตกต่างในวิธีการประมวลผล การเปลี่ยนแปลงของเครื่องมือและสภาพแวดล้อม (Ning et al., 2016) ปัจจุบันพบว่ายังขาดงานวิจัยอีกมากที่ศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของไอน้ำในคาบสมุทรจีน-อินโดจีน และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว รวมถึงกฎการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่รุนแรง

## 2.7 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและการตรวจสอบไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและการประยุกต์ใช้ในภูมิภาค CICPEC

สภาพอากาศในภูมิภาค CICPEC ที่ได้รับผลกระทบจากมรสุมในทวีปเอเชียมีความซับซ้อนมาก จากข้อมูลสถานี GNSS ภาคพื้นดิน Bock et al. (2008) และ Poan et al. (2013) ได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงประจำปีของ PWV และวิวัฒนาการของมรสุมในแอฟริกาตะวันตก นอกจากนี้ Singh et al. (2004) and Puviarasan et al. (2015) แสดงให้เห็นว่าการแปรผันประจำปีของ PWV สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ล่วงหน้าของการเริ่มและถอนตัวของมรสุมในอินเดียและการวิวัฒนาการตามลำดับ โดยใช้ SSM /I และข้อมูลจากสถานี GNSS ภาคพื้นดิน จากการกระจายของ PWV ที่ได้จากสถานี GNSS มากกว่า 500 สถานี Means (2012) ได้แสดงให้เห็นรายละเอียดของช่วงมรสุมและตรวจสอบเพิ่มเติมถึงระยะเวลาในการเริ่มและถอนตัว รวมถึงร่องรอยการเคลื่อนไหวยของมรสุม โดยในประเทศจีนมีงานวิจัยจำนวนมากที่วิเคราะห์หาค่าประกอบที่หลากหลายของ PWV ประจำปีจากข้อมูล GNSS ภาคพื้นดิน และแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงประจำปีของ PWV ในประเทศจีนส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากลมมรสุมในฤดูร้อนมากกว่าฤดูหนาว อย่างไรก็ตามยังขาดข้อสรุปที่ชัดเจนบางประเด็น อาทิเช่น ในเรื่องของเส้นทางการเคลื่อนผ่านของ PWV ในภูมิภาค CICPEC ร้อยละของอิทธิพลของของลมมรสุมย่อยแต่ละตัวต่อปริมาณของ PWV รวมถึงความสัมพันธ์ภายในของสภาพอากาศที่รุนแรงกับมรสุม เป็นต้น

## 2.8 ความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS เปรียบเทียบกับ Microwave Radiometer (MWR)

การประยุกต์ใช้ข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในงานอุตุนิยมวิทยา หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ GNSS-Meteorology ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลายาวนานมากกว่าสองทศวรรษ และยังคงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง (Bevis et al., 1992; Elgered et al., 1991; Shi et al., 2015) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีค่าใช้จ่ายต่ำ อีกทั้งมีความได้เปรียบทางด้านความถี่ในการรังวัดและการครอบคลุมเชิงพื้นที่ นอกจากนี้การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS นั้น มีระดับความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา (Lu et al., 2015) เช่น เครื่องวิทยุห้วงอากาศ (Radiosonde), เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave Radiometer) หรือจากข้อมูลดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น ในช่วง 3-5 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีทางการสำรวจด้วยระบบดาวเทียม GNSS มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งในเรื่องของการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียม, เทคนิคการประมวลผลข้อมูลที่รวดเร็วและถูกต้องสูง, การเพิ่มขึ้นของสถานีโครงข่าย GNSS ถาวร และอุปกรณ์ที่ช่วยให้การหาค่าพิกัดตำแหน่งได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น อีกทั้งด้วยการจัดตั้งโครงการ RTPP (Real-Time Pilot Project) ของหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) เพื่อให้บริการข้อมูล ค่าแก้วงโคจรและนาฬิกา ดาวเทียมความละเอียดถูกต้องสูงแบบ Real-Time ผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ซึ่งเปิดให้ใช้งานใน



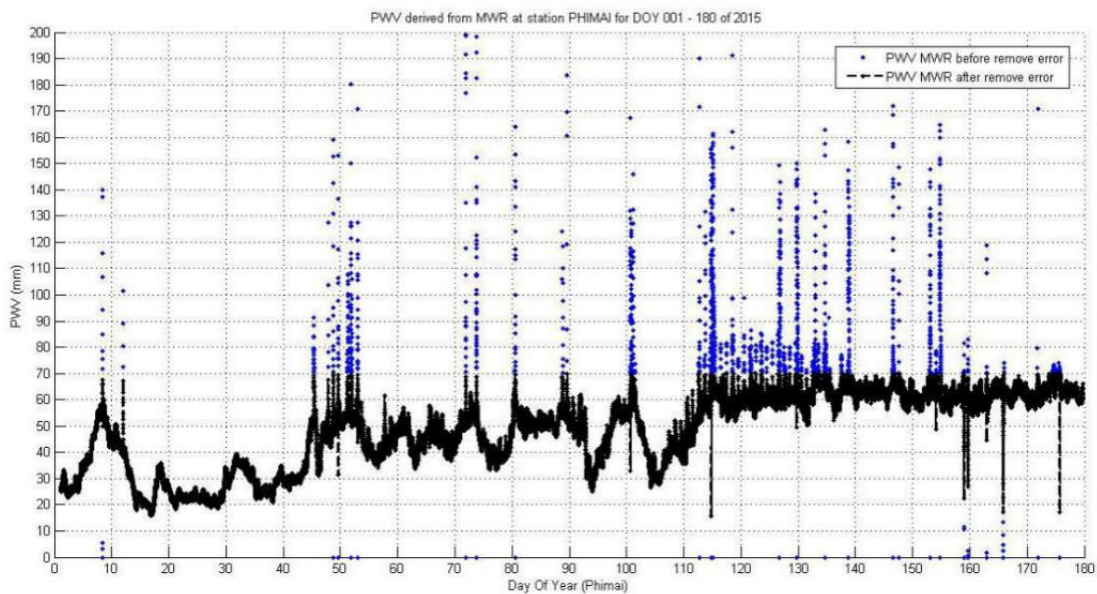
ปี 2556 การพัฒนาเหล่านี้มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้การประยุกต์ใช้ค่า GNSS เพื่อหาค่าพิกัดตำแหน่ง และประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีความถูกต้องสูงมากขึ้น และด้วยประเทศไทยเริ่มมีการจัดสร้างโครงข่ายสถานี GNSS ถาวรตั้งแต่ปี 2559 เพื่อติดตั้งระบบรับวัดพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที ซึ่งกำลังดำเนินงานติดตั้งทั่วประเทศ เพื่อขยายขีดความสามารถและการใช้ทรัพยากรโครงข่าย GNSS อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น จึงเป็นโอกาสอันดีของประเทศไทย ที่จะประยุกต์ใช้ข้อมูล GNSS จากโครงข่ายเหล่านี้นอกเหนือไปจากการหาพิกัดตำแหน่งแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยาเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, งานด้านการพยากรณ์อากาศ หรือการให้บริการค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นต้น

ในส่วนของประเทศไทยมีงานวิจัยของ Jongrukchob T. et al. (2017) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS แบบต่อเนื่อง Continuously Operating Reference Stations (CORS) โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่อง Microwave Radiometer (MWR) ซึ่งในประเทศไทยมีเพียงเครื่องเดียวตั้งอยู่ที่สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา โดยมีสถานี GNSS ที่ตั้งอยู่ใกล้ที่สุดคือสถานี NKRM จังหวัดนครราชสีมา เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบความถูกต้องของ PWV



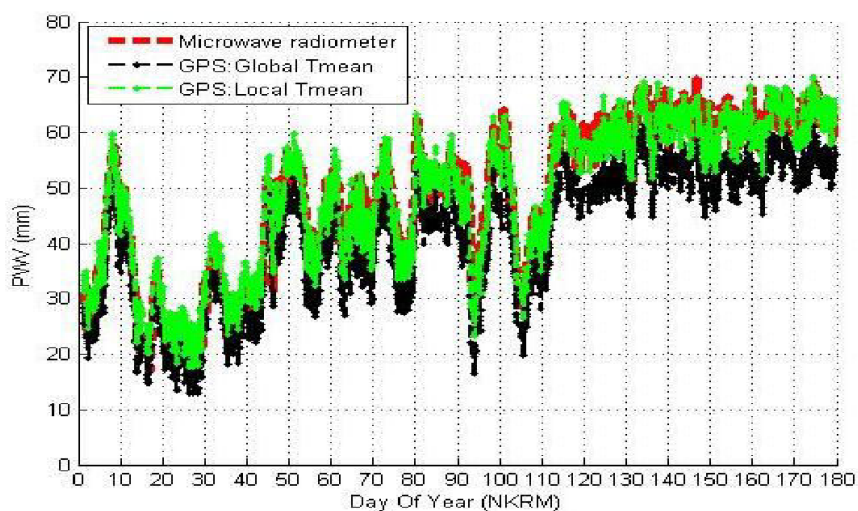
ภาพที่ 2-2 เครื่อง Microwave Radiometer (MWR)  
ณ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา  
(Nithiwatthn Choosakul, 2005)

อย่างไรก็ดีค่า PWV ที่ได้จากเครื่อง Microwave Radiometer (MWR) ยังมีค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่รวมอยู่ ทำให้ต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ทิ้งออกไป ซึ่งสาเหตุของการเกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้มาจากการรับสัญญาณในช่วงที่มีฝนตกและเมฆหนาเกาะอยู่บริเวณที่รับข้อมูล จึงทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้แสดงการเปรียบเทียบค่า PWV ที่ได้จาก MWR ระหว่างค่าที่ไม่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อน (จุดสีน้ำเงินเข้ม) และค่าที่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว (จุดสีดำ) แกนราบแสดงข้อมูลตามเวลาในหน่วยของวันในปี 2015 ที่ใช้ในการทดสอบ และแกนตั้งแสดงค่า PWV หน่วยมิลลิเมตร ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ค่า PWV ที่ได้จาก MWR ระหว่างค่าที่ไม่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อน (จุดสีน้ำเงิน) และค่าที่มีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนแล้ว (จุดสีดำ)  
(Jongrukchob T. et al., 2017)

ผลการศึกษาพบว่ากราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จาก MWR (ดังภาพที่ 2-4) จะพบว่าความแตกต่างระหว่างการใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลเทียบกับ MWR จะมีความแตกต่างมากกว่า การใช้อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในการหาค่า PWV และค่าระดับความแตกต่างของค่า PWV กับ MWR โดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 2-1) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการหาค่า PWV จากข้อมูล GPS



ภาพที่ 2-4 กราฟแสดงค่า PWV โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล (สีดำ) และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (สีเขียว) เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จาก MWR ในปี 2015 ที่สถานี NKRM (Jongrukchob T. et al., 2017)

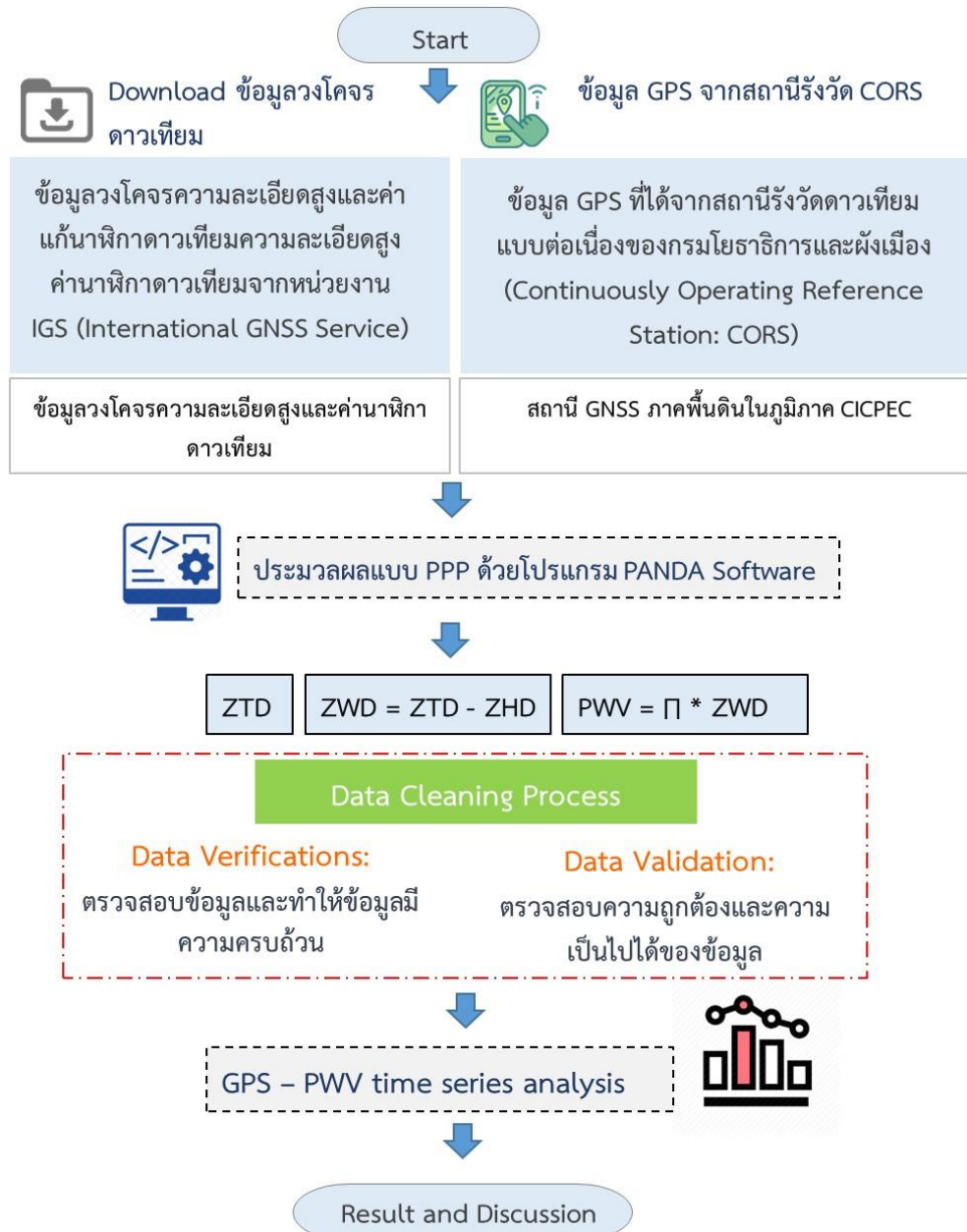
ตารางที่ 2-1 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean error) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จาก MWR ปี 2015

$T_m$ Model	Mean error (mm.)	RMSE (mm.)
Local	-0.3	2.9
Global	6.8	7.5



### บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าประสงค์ของโครงการวิจัยสามารถแสดงขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยได้ดังภาพที่ 3-1 และรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ตั้งแต่ปี 2007-2016 โดยใช้การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย ด้วยการใช้แบบจำลองจากสมการ (Trisirisatayawong I. et al., 2011)

$$PWV_t = A \cdot \cos(2\pi \cdot t - t_0) + m \cdot t + c \quad (11)$$

Functional model ที่ใช้ในการจำลองประกอบด้วย ส่วนแรกจำลองการเปลี่ยนแปลง PWV ที่เกิดจากวัฏจักรรายปี โดยเลือกใช้ฟังก์ชัน Cosine ส่วนที่สอง จำลองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระยะยาว โดยเลือกใช้สมการเส้นตรง

โดยที่  $A$  = แอมพลิจูดของวัฏจักรรายปี

$T$  = ระยะเวลา (ปี) จากเวลาอ้างอิงเริ่มต้น (ใช้ 1 มกราคม 2007)

$t_0$  = offset ของวันที่ระดับ PWV สูงสุดในปีที่หา  $t=0$  หรือ 1 มกราคม (rad)

$m$  = ความชันของสมการเส้นตรง ซึ่งหมายถึงอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ PWV (mm/ปี)

$c$  = จุดตัดบนแกน  $y$  ของสมการเส้นตรง

ก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Functional Model ดังกล่าว ต้องมีการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นก่อนการวิเคราะห์ โดยค่า PWV ที่ได้มาจากการประมวลผลข้อมูลทั้งหมดในตอนต้น นำมาทำการเขียนแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล (Scatter plot) เพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูลเบื้องต้น หากพบว่าข้อมูลบางค่าผิดไปจากกลุ่มเยอะ ๆ ซึ่งถ้าหากใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวิเคราะห์ด้วยแล้วอาจทำให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อน หรือมีความน่าเชื่อถือน้อยลง ซึ่งเรียกข้อมูลดังกล่าวได้ว่าเป็นค่าผิดปกติ (Outlier) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตรวจสอบข้อมูลโดยวิธีการ Robust Fit (Holland & Welsch, 1977) ซึ่งในการหาค่าตอบจะใช้วิธีการวนซ้ำ และทำการปรับค่าน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ย PWV รายวันในแต่ละค่าที่มีต่อค่าพารามิเตอร์จากค่าเศษคงเหลือ (Residual) ของค่าเฉลี่ย PWV รายวัน เมื่อการคำนวณซ้ำจนลู่ออกเข้าหาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์แล้ว ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด วิธีการ Robust Fit (IRLS) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและยืดหยุ่นสำหรับปัญหาด้านวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้ให้ปรับเปลี่ยนรูปแบบให้เข้ากับอัลกอริทึม IRLS พื้นฐาน ทำให้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประมาณค่าที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (Burrus, 2012)

### 3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน

ข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อตรวจสอบหาความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS

ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับข้อมูลปริมาณน้ำฝน ให้มีความถูกต้องชัดเจน ข้อมูลสถานีน้ำฝนควรอยู่ ณ ตำแหน่งใกล้กับสถานี GNSS ในระยะทางไม่เกิน 8 กิโลเมตร (จากรายงานฉบับสมบูรณ์โครงการที่ปรึกษา โครงการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้สัญญาณ GNSS สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลฝนจากโทรมาตรแบบอัตโนมัติ พบว่าที่ระยะ 8 กิโลเมตร เป็นระยะที่ยังคงมีข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS)

### 3.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV ตลอดจังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยในช่วงปรากฏการณ์ ENSO (El Niño and Southern Oscillation)

วิเคราะห์รูปแบบ PWV ของสถานี CHAN, PJRK, SOKA และ SRTN ซึ่งมีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยและมีสถานีรับสัญญาณ GNSS CORS ตั้งอยู่ในช่วงระยะเวลาการสังเกตซึ่งอยู่ในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) (เดือนมิถุนายน 2552 – เดือนกุมภาพันธ์ 2553) และปรากฏการณ์ลานีญา (La Niña) (เดือนพฤษภาคม 2553 – เดือนเมษายน 2554) โดยใช้ค่า ONI (Ocean Niño Index) จากบริเวณที่เรียกว่า Niño 3.4 (มหาสมุทรแปซิฟิกบริเวณ 5N-5S, 170W-120W) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยทุก 3 เดือน ซึ่งทางองค์การบริหารสมุทรศาสตร์และบรรยากาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) ได้ใช้ค่านี้เป็นดัชนีทำนายการเกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) และลานีญา (La Niña) ประกอบกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อตรวจสอบหาความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อนำไปสู่การพิจารณาถึงความสัมพันธ์เรื่องฝนรุนแรง พายุฝน รวมไปถึงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

### 3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลม

ใช้ข้อมูลสถานีที่อยู่ ณ ตำแหน่งใกล้กับสถานี GNSS มากที่สุดเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเรื่องของปริมาณน้ำฝน

### 3.5 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย

ในการวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย โดยดูจากค่า GPS\_PWV ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ตกประกอบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานี

ตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ในการพิจารณา โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของ ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา มีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้ (ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560)

3.5.1 ในระยะ 5 วันใด ๆ จะต้องมียฝนตก 3 วัน ที่ต่อเนื่องกันหรือไม่ต่อเนื่องกันก็ได้ โดยปริมาณน้ำฝนใน 3 วันดังกล่าว ในแต่ละวันจะต้องมียฝนตกไม่น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรวมใน 5 วันนั้นต้องไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

3.5.2 เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวเป็นของประเทศอินเดีย เมื่อนำมาใช้กับประเทศไทยจะต้องพิจารณาการเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ด้วย กล่าวคือ เริ่มต้นประมาณเดือนพฤษภาคม และสิ้นสุดประมาณเดือนตุลาคมมาประกอบจึงจะสมเหตุผล

3.5.3 ค่าที่ได้เป็นช่วงวันที่เริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 3.4.1 เกิดขึ้นและต่อเนื่องกันไปถือเป็นการเริ่มต้นของฤดูมรสุม แต่ถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 3.4.1 แล้วฝนลดน้อยถอยลงไป ถือว่าสิ้นสุดฤดูมรสุม

3.5.4 การเริ่มต้นและสิ้นสุดของฤดูมรสุมในข้อ 3.4.2 อาจจะมาเร็วหรือช้ากว่ากำหนดได้ ทั้งนี้เพราะภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกมากกว่าภาคอื่น ๆ

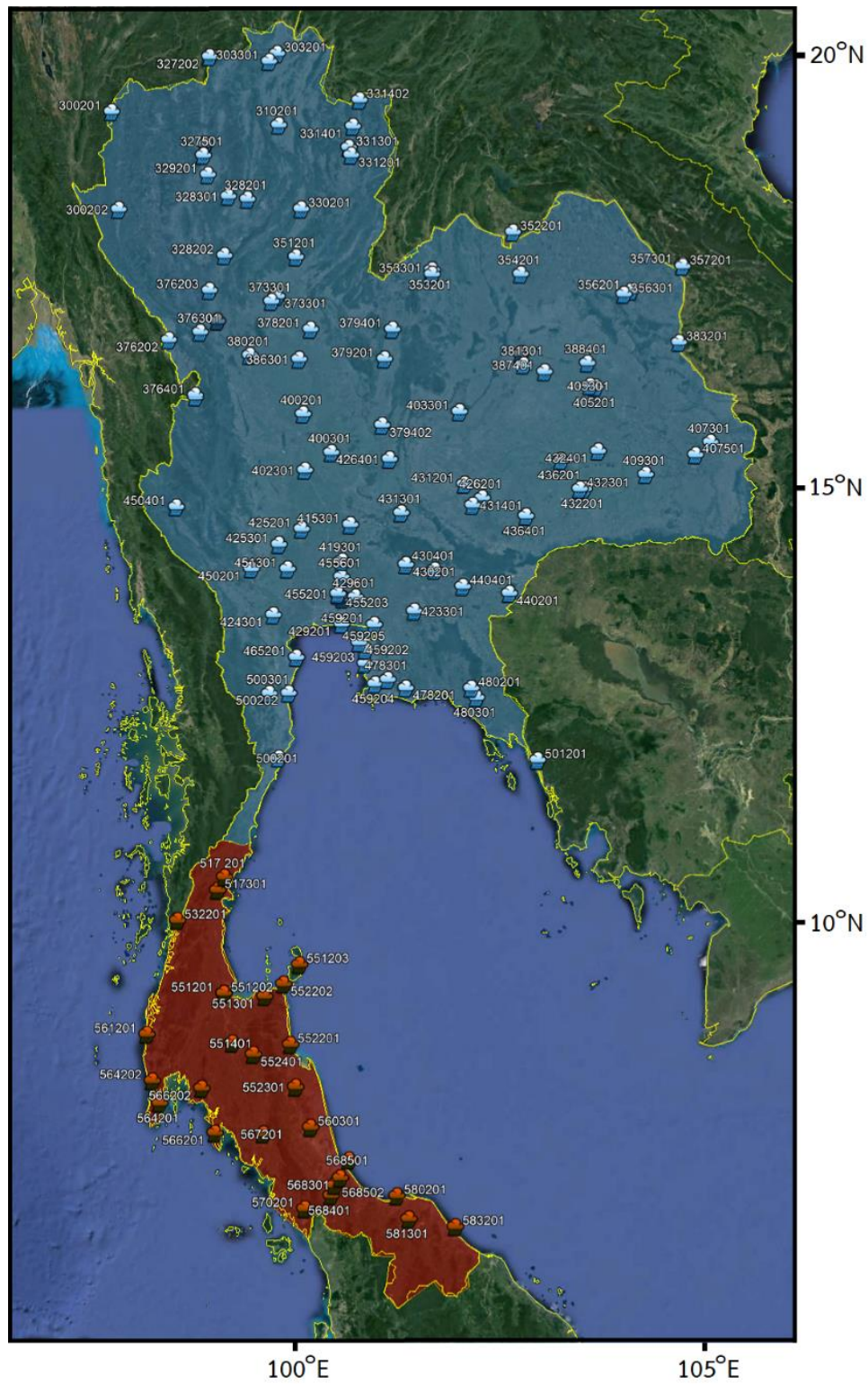
หมายเหตุ สำหรับการพิจารณาจำนวนวันที่มีฝนตกในข้อ 3.4.1 ทางศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา ได้พิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนในเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน จะนับตั้งแต่เวลา 07.00 น. จนถึงเวลา 07.00 น. ของวันถัดไป จากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้งหมดจำนวน 96 สถานี ในตอนกลางและตอนบนของประเทศ ตั้งแต่ภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคอีสานและภาคเหนือ (ภาพที่ 3-2) ซึ่งจะต้องมีฝนตกจำนวน 60% ของสถานีทั้งหมดจึงจะถือว่าเข้าสู่เกณฑ์ดังกล่าว ในส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาในภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เช่นเดียวกับในภาคอื่น แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำพาความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้ภาคใต้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ และมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นในเกณฑ์การพิจารณาการเข้าสู่ช่วงฤดูมรสุมนี้ จึงไม่นำข้อมูลสถานีในภาคใต้มาใช้ในการพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม โดยเกณฑ์ข้างต้นของกรมอุตุนิยมวิทยา ในรอบ 10 ปี คือ 2007-2016 ที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบเป็นไปดังตารางที่ 3-1



ตารางที่ 3-1 ประกาศวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ปี 2007-2016

วันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้									
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
5 พ.ค.	10 พ.ค.	9 พ.ค.	21 พ.ค.	6 พ.ค.	5 พ.ค.	18 พ.ค.	27 พ.ค.	22 พ.ค.	18 พ.ค.

ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย โดยพิจารณาจากข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ในประเทศไทย ที่สถานีจันทบุรี (CHAN) ร่วมกับข้อมูลปริมาณฝนน้ำฝนและทิศทาง/ความเร็วลม เนื่องจากสถานีจันทบุรีเป็นสถานีที่อยู่ในภูมิภาคที่ได้รับผลกระทบจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น ไม่นับรวมกับภาคใต้ เพราะในภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกตลอด เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เช่นเดียวกับภาคอื่น แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ และมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้สถานีในภาคใต้มารวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย ซึ่งเกณฑ์ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของกรมอุตุนิยมวิทยานั้นก็ไม่ได้มีการนำสถานีวัดน้ำฝนในส่วนของภาคใต้มารทำการวิเคราะห์ร่วมด้วยเช่นเดียวกัน



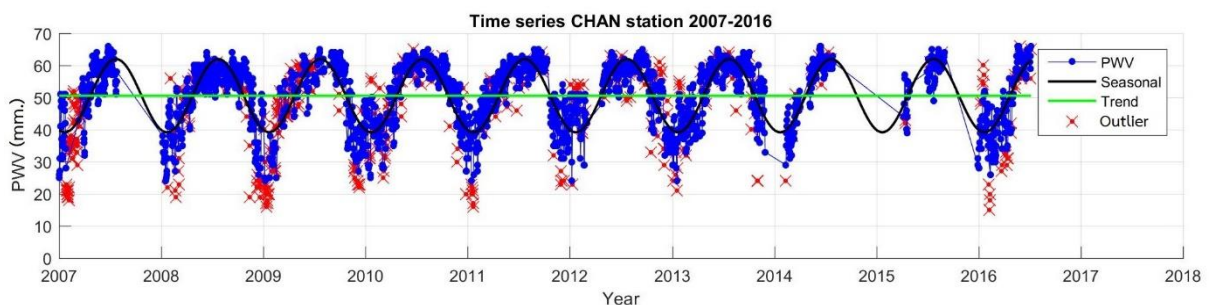
ภาพที่ 3-2 สถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย ตอนกลางและตอนบนของประเทศ จำนวน 96 สถานี (แรงงาสีฟ้า) ที่ใช้ในการพิจารณาวันที่ฝนตกสำหรับเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม (Chokchai Trakolkul, 2019)

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

สำหรับผลการศึกษาในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้จะนำเสนอผลของการศึกษาความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ในรูปแบบของการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) และประเด็นด้านความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน รวมไปถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลม และการประยุกต์ใช้ค่า PWV ในการวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย ซึ่งแสดงได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 4.1 ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในประเทศไทย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศเป็นข้อที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการพิจารณาค่า GPS-PWV Time-Series ในการวิเคราะห์นั้นจำเป็นต้องตรวจสอบเพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งพบว่า มีข้อมูลบางค่าที่มีลักษณะผิดไปจากกลุ่มมาก ถ้าหากใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวิเคราะห์ด้วยแล้วอาจทำให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อน หรือมีความน่าเชื่อถือน้อยลง ซึ่งในส่วนของข้อมูลดังกล่าวถือว่าเป็นค่าผิดปกติ (Outlier) ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตรวจสอบและขจัดค่าผิดปกติโดยวิธีการ Robust Fit (Holland & Welsch, 1977) เป็นการหาค่าตอบโดยจะใช้วิธีการวนซ้ำ และทำการปรับค่าน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ย PWV รายวันในแต่ละค่าที่มีต่อค่าพารามิเตอร์จากค่าเศษคงเหลือ (Residual) ของค่าเฉลี่ย PWV รายวัน เมื่อการคำนวณวนซ้ำเข้าสู่หาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์แล้ว ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธี Robust Fit กากบาทสีแดงคือค่าผิดปกติที่ตรวจพบ

จากภาพที่ 4-1 แสดงถึงค่าผิดปกติ (Outlier) ที่ตรวจพบจากวิธี Robust Fit ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงค่า RMSE ของค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Function Model ในการวิเคราะห์แนวโน้ม และองค์ประกอบตามฤดูกาลด้วยวิธี Robust Fit

สถานี	รหัสสถานี	ค่า RMSE
เชียงใหม่	CHMA	5.284
อุตรดิตถ์	UTTD	5.539
อุดรธานี	UDON	5.307
นครราชสีมา	NKRM	5.067
ศรีสะเกษ	SISK	4.942
กรุงเทพมหานคร	DPT9	5.531
นครสวรรค์	NKSW	6.042
จันทบุรี	CHAN	5.492
ประจวบคีรีขันธ์	PJRK	5.667
สุราษฎร์ธานี	SRTN	6.415
สงขลา	SOKA	6.267

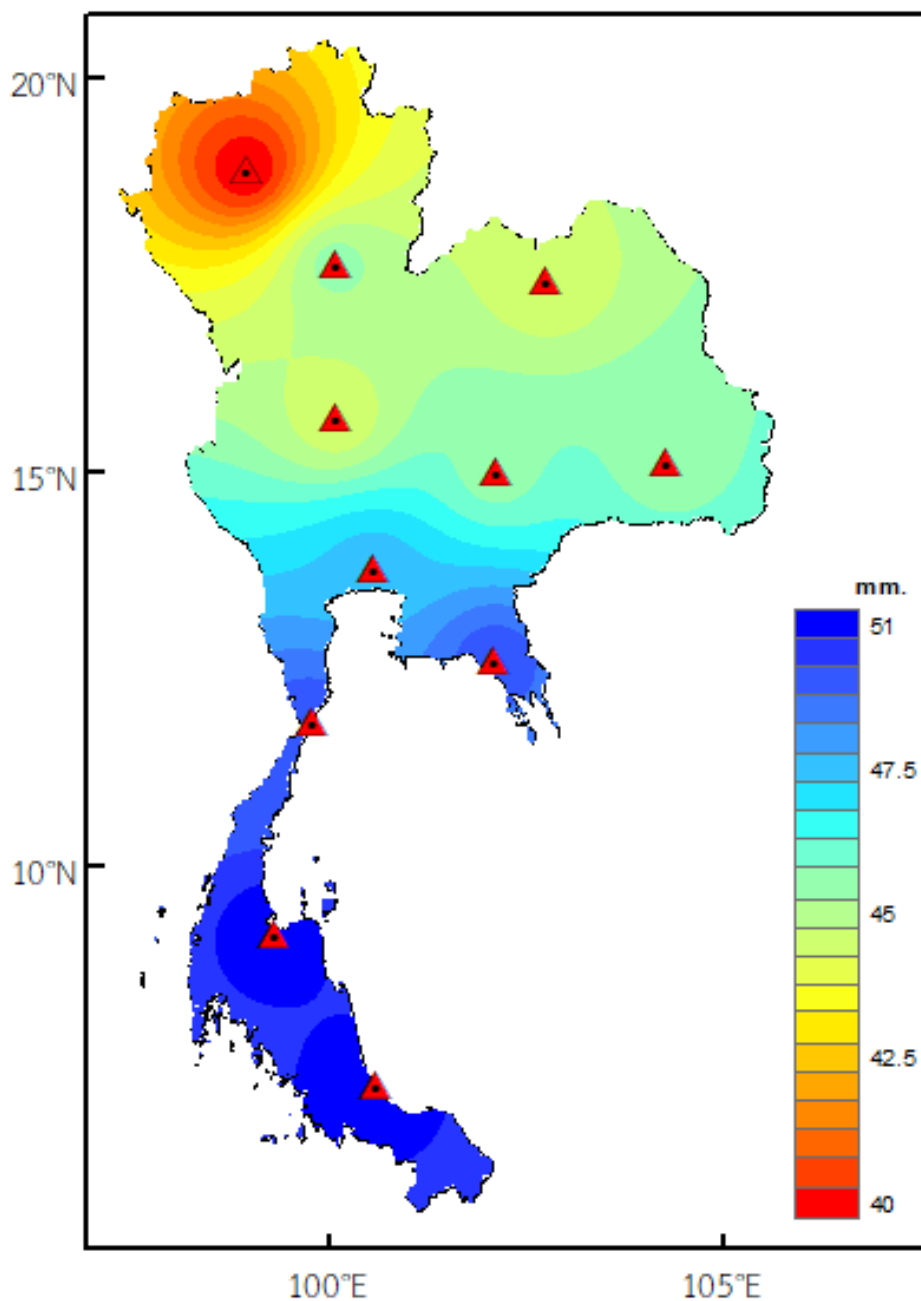
#### 4.2 การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาของความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ตั้งแต่ปี 2007-2016 โดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) พบว่าส่วนประกอบตามฤดูกาลที่ได้จากสมการ

$$PWV_t = A * \cos(2\pi * t - t_0) + m * t + c \quad (11)$$

สามารถใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ค่าแอมพลิจูดของค่า PWV และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) เพื่อใช้ในการกำหนดว่าเดือนใดที่มีค่าตามฤดูกาลสูงสุด พบว่า ค่าเฉลี่ยของ PWV ของทุกสถานีมีค่าเฉลี่ยประมาณ 49 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของอยู่ที่  $\pm 10$  มิลลิเมตร โดยมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยสุดอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร PWV มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคมจากระดับประมาณ 20 มิลลิเมตรจนถึง 60 มิลลิเมตร เป็นผลจากอิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ได้นำพาไอน้ำจากทะเลเข้าสู่ฝั่ง ซึ่งเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนน้ำสามารถระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าสู่บรรยากาศได้มากขึ้นโดยสังเกตได้ว่ามี PWV เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน PWV มีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ระหว่างประมาณ 50 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวในช่วงเดือนตุลาคม PWV เริ่มลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 40 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ย PWV กับระดับความสูงของพื้นที่ พบว่า เป็นลักษณะการ

แปรผกผันกัน ได้แก่ บริเวณที่มีระดับความสูงมาก เช่นบริเวณภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่าง มีค่าเฉลี่ย PWV ต่ำ และค่า PWV เฉลี่ยจะสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีระดับความสูงและละติจูดที่ลดลงมา (ดังภาพที่ 4-2 และตารางที่ 4-2) วัฏจักรของ PWV ตามฤดูกาลเหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากความผันแปรขององค์ประกอบเปียก (ZWD)



ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV ในทุกสถานีรับสัญญาณ GNSS (สามเหลี่ยมสีแดง)  
(Trakolkul & Satirapod, 2020b)

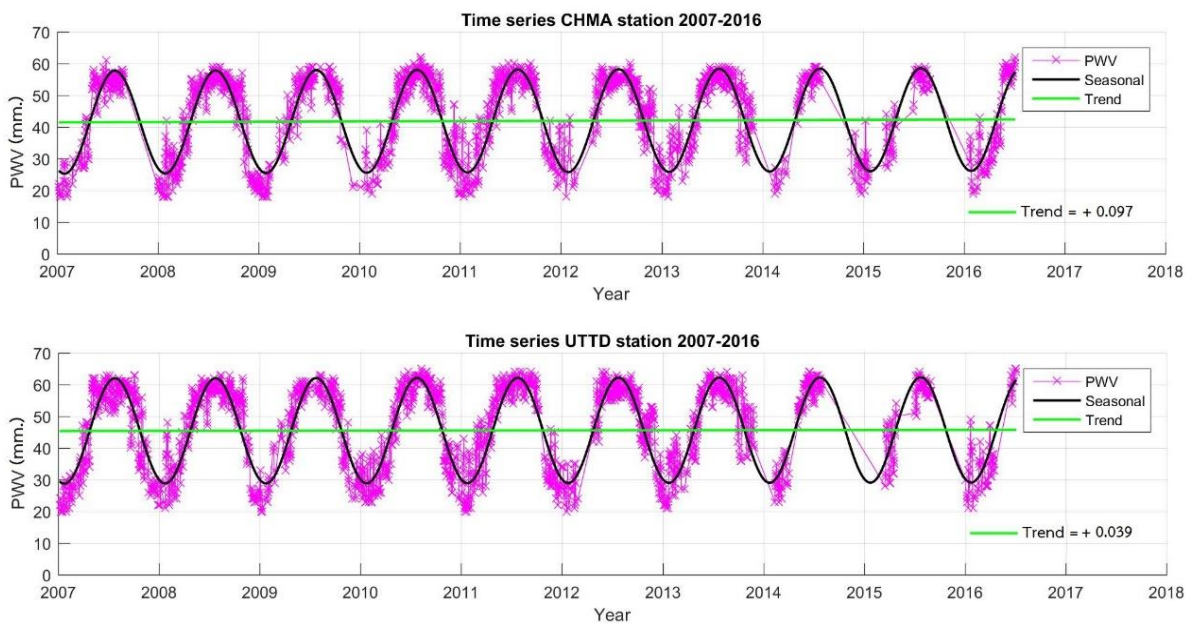
**ตารางที่ 4-2** รายละเอียดชื่อและพิกัดตำแหน่งรวมถึงค่าความสูงของสถานีรับวัดดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของกรมโยธาธิการ

Name	Code	Latitude	Longitude	Height
Chiang Mai	CHMA	18.83528	98.96996	310.447
Uttaradit	UTTD	17.63009	100.0963	51.262
Udon Thani	UDON	17.41273	102.7807	150.235
Nakhon Ratchasima	NKRM	14.99208	102.1294	166.145
Sisaket	SISK	15.11612	104.2857	105.105
Bangkok	DPT9	13.75678	100.5732	38.169
Nakhon Sawan	NKSW	15.69064	100.1141	21.406
Chanthaburi	CHAN	12.61031	102.1024	8.004
Prachuap Khiri Khan	PJRK	11.81162	99.79635	-11.735
Surat Thani	SRTN	9.132225	99.33136	9.949
Songkhla	SOKA	7.206694	100.5961	18.437

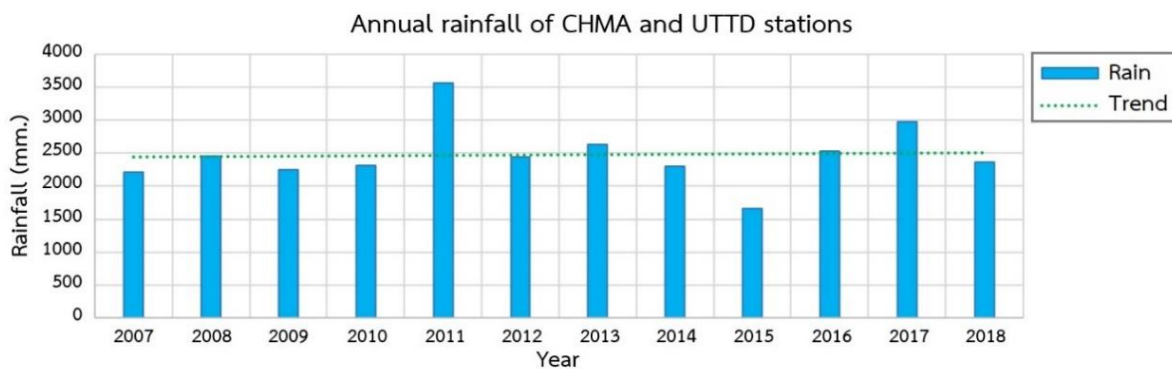
วัฏจักรของ PWV ในแต่ละปีแสดงให้เห็นกระบวนการในชั้นบรรยากาศและวัฏจักรการไหลเวียนของอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงประจำปีและแนวโน้มของ PWV ในแต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกันโดยมีลักษณะแยกได้ดังนี้

**4.2.1 ภาคเหนือ** ที่สถานีเชียงใหม่ (CHMA) และสถานีอุตรดิตถ์ (UTTD) มีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 16 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม. และการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 28 ถึง 63 มิลลิเมตร แนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-3) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-4)

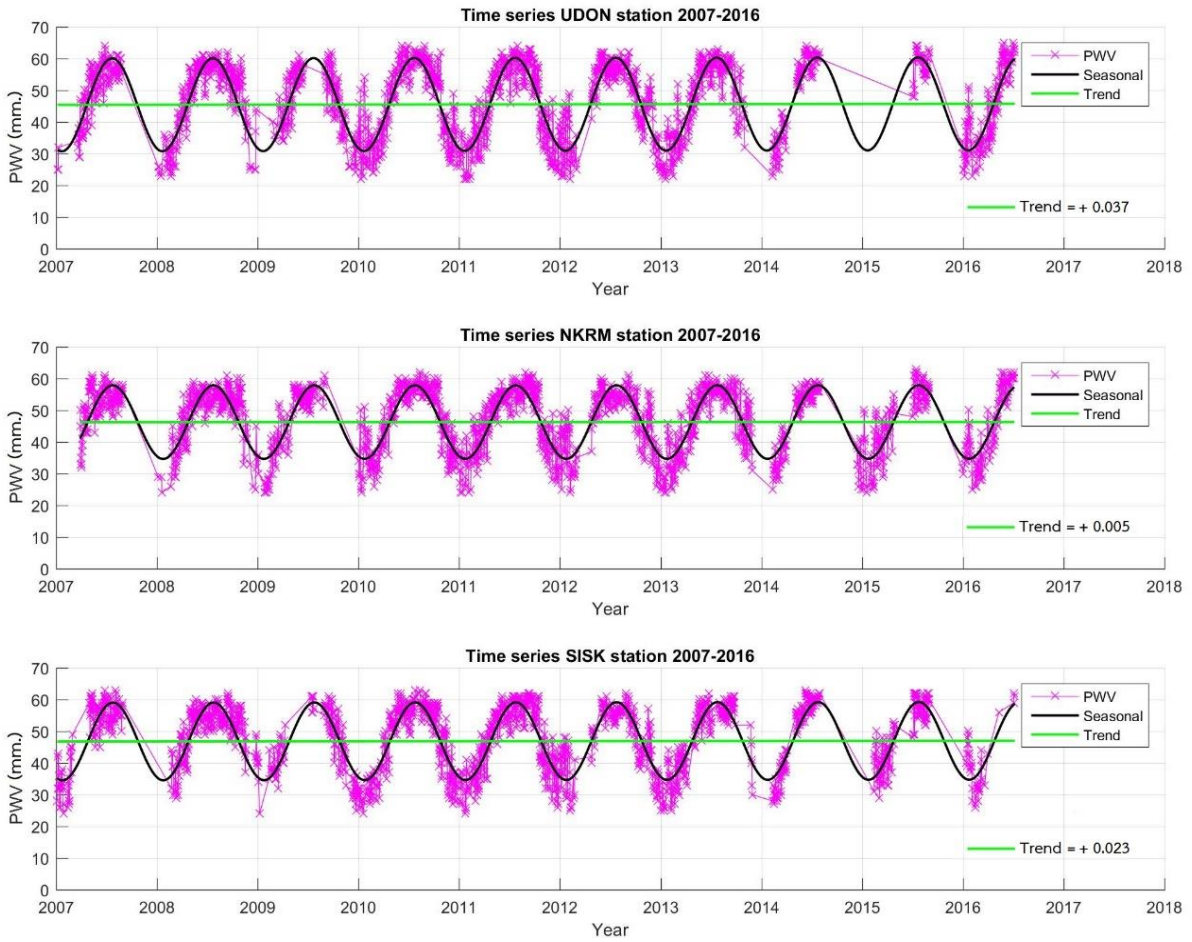
**4.2.2 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ** ที่สถานีอุดรธานี (UDON), สถานีนครราชสีมา (NKRM) และสถานีศรีสะเกษ (SISK) ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 13 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 35 ถึง 61 มิลลิเมตร และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกทั้ง 3 สถานี (ดังภาพที่ 4-5) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาวเช่นเดียวกับในภาคเหนือ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-6)



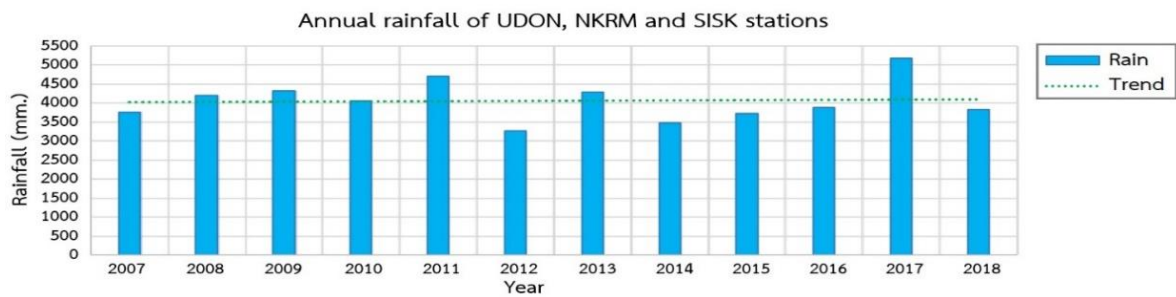
ภาพที่ 4-3 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคเหนือ (CHMA & UTDD STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก



ภาพที่ 4-4 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดเชียงใหม่และอุดรดิตถ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHMA และ UTDD



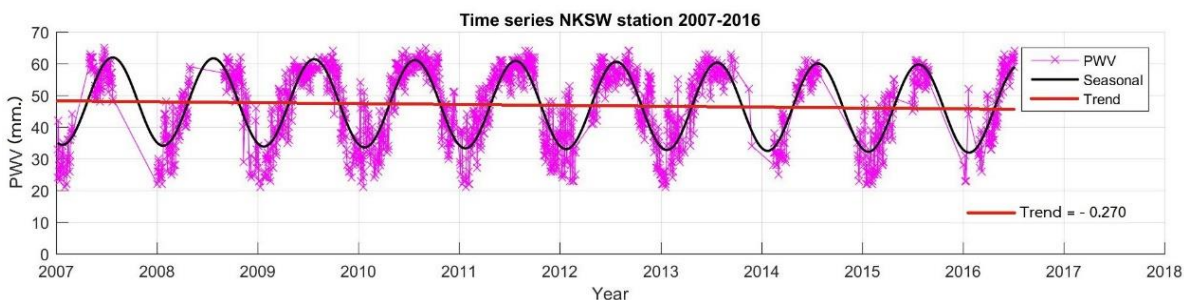
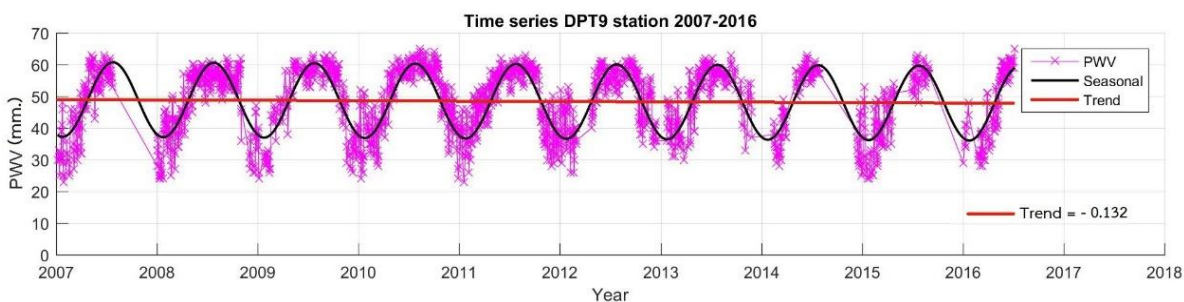
ภาพที่ 4-5 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (UDON, NKRM & SISK STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก



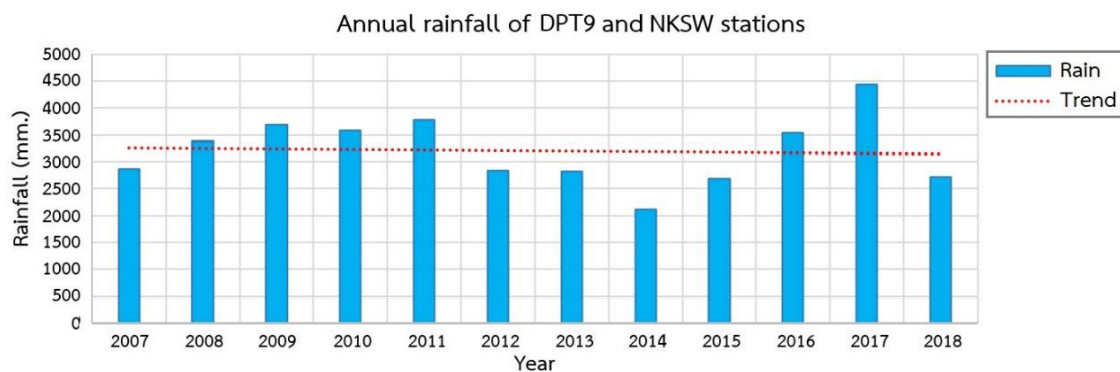
ภาพที่ 4-6 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดอุดรธานี, นครราชสีมา และศรีสะเกษ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี UDON, NKRM และ SISK



**4.2.3 ภาคกลาง** ที่สถานีกรุงเทพมหานคร (DPT9) และสถานีนครสวรรค์ (NKSW) มีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 13 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 34 ถึง 62 มิลลิเมตร แนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-7) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-8)

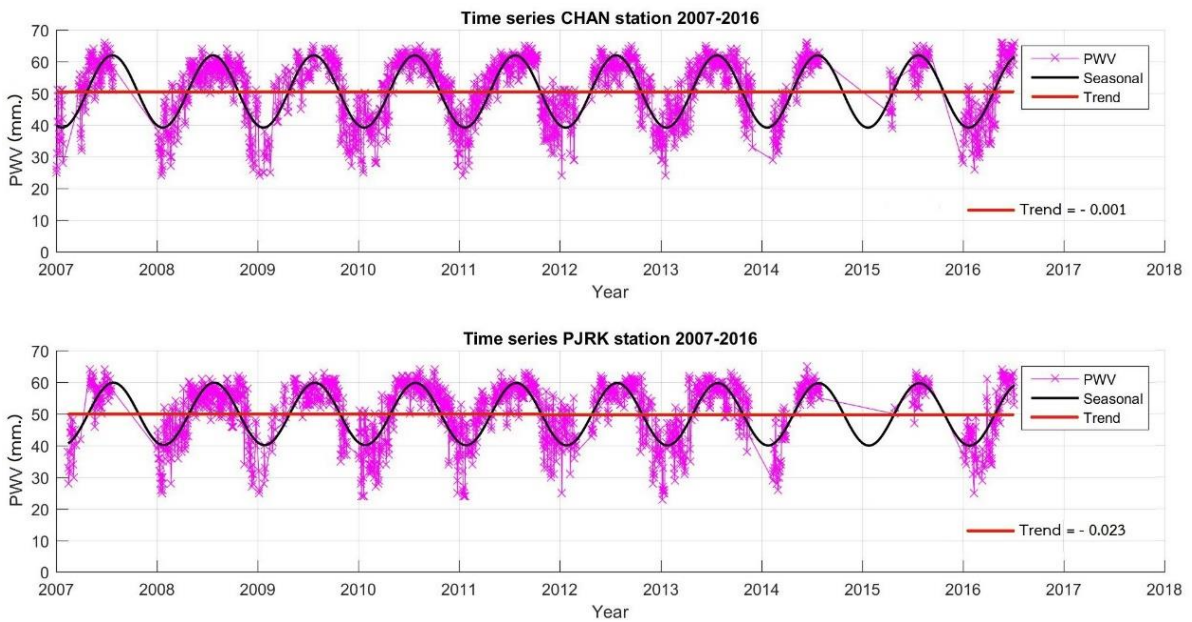


ภาพที่ 4-7 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคกลาง (DPT9 & NKSW STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ

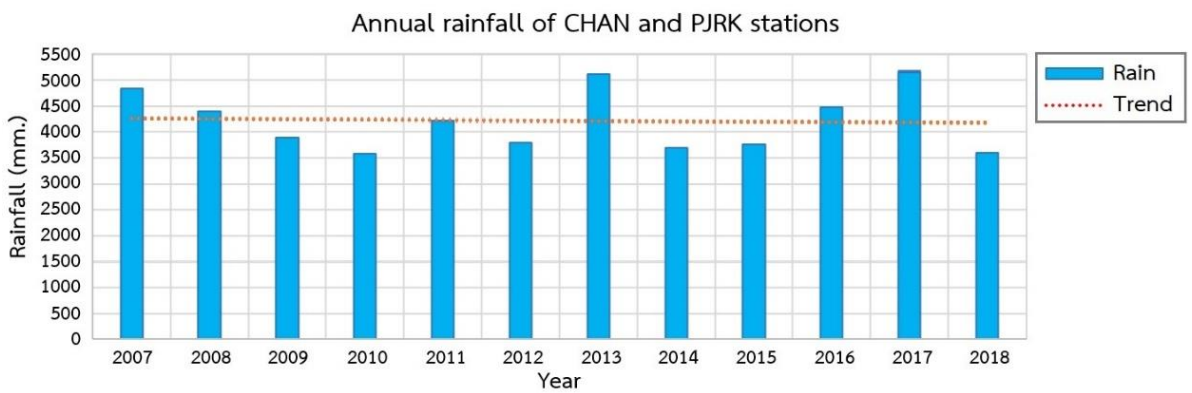


ภาพที่ 4-8 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดกรุงเทพฯ และนครสวรรค์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี DPT9 และ NKSW

**4.2.4 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันตก** ที่สถานีจันทบุรี (CHAN) และสถานีประจวบคีรีขันธ์ (PJRK) มีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 11 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 40 ถึง 62 มิลลิเมตร และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-9) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวเช่นเดียวกับในภาคกลาง สอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-10)

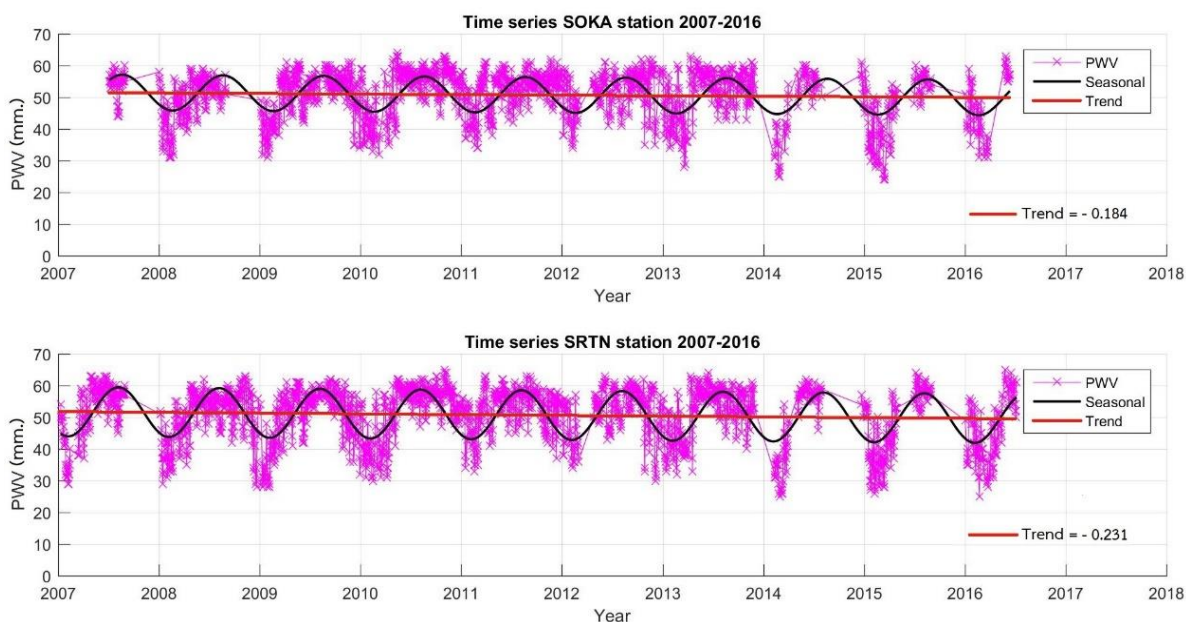


ภาพที่ 4-9 องค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตก (CHAN & PJRK STATION) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ



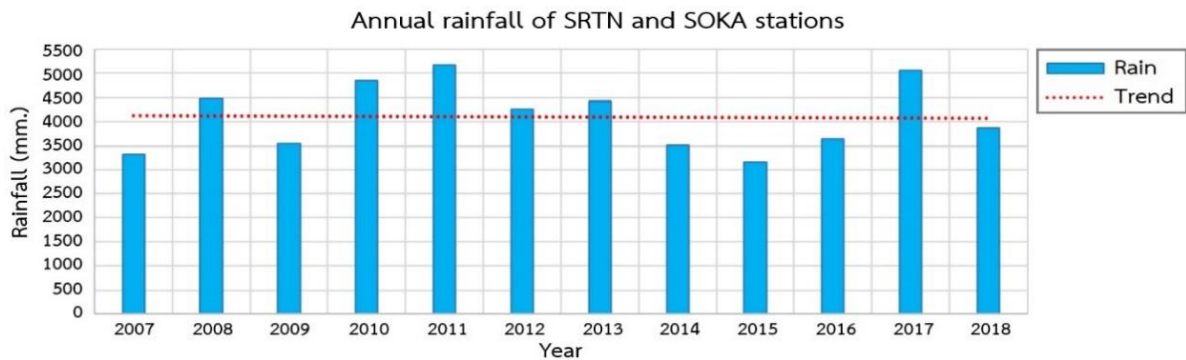
ภาพที่ 4-10 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดจันทบุรีและประจวบคีรีขันธ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHAN และ PJRK

**4.2.5 ภาคใต้** ที่สถานีสงขลา (SOKA) และสถานีสุราษฎร์ธานี (SRTN) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 44 ถึง 58 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 7 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. (ภาพที่ 4-11) จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าสถานีสุราษฎร์ธานีและสงขลามีค่าเฉลี่ย PWV สูงกว่าในทุกภูมิภาคแสดงให้เห็นถึงรูปแบบของลักษณะภูมิอากาศในภาคใต้ที่มีลักษณะแตกต่างสอดคล้องกับความชื้นที่ภาคใต้มีฝนตกชุกตลอดปี ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุด ข้อมูลทั้งหมดชี้ชัดให้เห็นถึงลักษณะภูมิอากาศของภาคใต้ได้อย่างชัดเจน แนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานีเช่นเดียวกับในภาคกลาง, ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน (ภาพที่ 4-12)



ภาพที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคใต้ (SOKA & SRTN STATION)

มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ



ภาพที่ 4-12 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดสงขลา และสุราษฎร์ธานี แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี SOKA และ SRTN

โดยสรุปภาพรวมแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกในส่วนของภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุฯ ที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน กลับกันในส่วนของภาคกลาง, ภาคตะวันออก, ภาคตะวันตกและภาคใต้ มีแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณฝนในส่วนนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง ที่มีแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีลดลงเช่นเดียวกัน

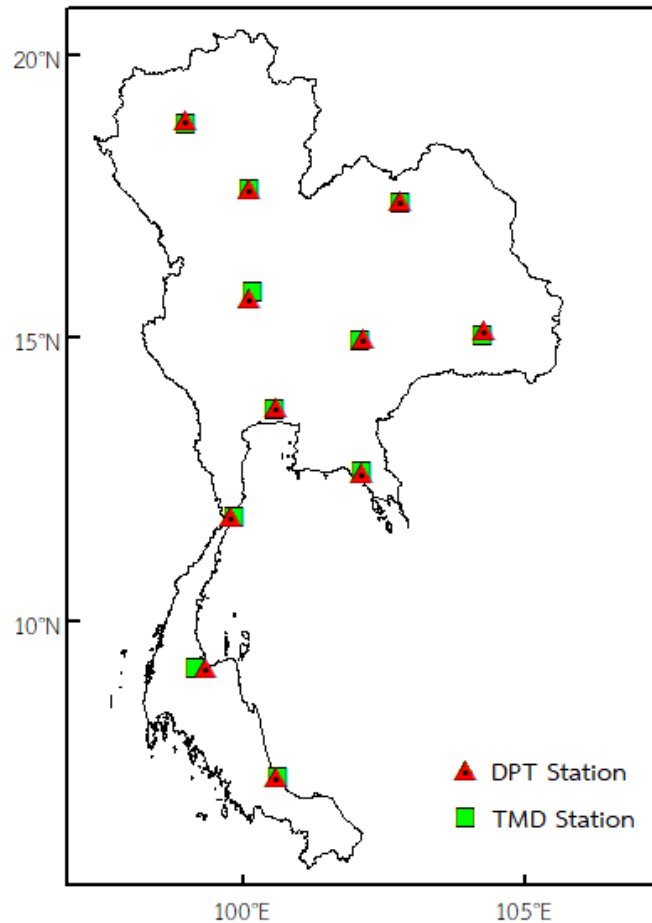
นอกจากนี้ในส่วนขององค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของ PWV พบว่าค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประจำปีของ PWV พบได้ที่สถานี GNSS ทุกแห่ง โดยมีขนาดตั้งแต่ 7 ถึง 16 มิลลิเมตร ความผันแปรระหว่างแอมพลิจูดของ PWV ประจำปีในภาคใต้และใกล้กับชายฝั่งมหาสมุทรโดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กกว่าในภูมิภาคของประเทศ อาจเป็นเพราะผลกระทบของทะเลต่อภูมิภาคซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีฝนตกชุกมากกว่าภูมิภาคอื่น ความแปรปรวนขึ้นอยู่กับความสูงของสถานีซึ่งสถานีในทะเลลึกจะมีความแปรปรวนต่ำและสถานีที่เป็นพื้นที่ปหรือลักษณะพื้นที่ที่สูงขึ้นจะมีความแปรปรวนมากขึ้นตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) ของ PWV ประจำปีอยู่ที่ประมาณ  $-0.428$  ซึ่งอยู่ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมในเป็นฤดูฝนและเป็นช่วงที่มีค่า PWV สูงสุดประจำปี โดยวัฏจักรของ PWV ตามฤดูกาลเหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากความผันแปรขององค์ประกอบเบี่ยง (ZWD) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง พบว่าช่วงที่เป็นฤดูฝน (ประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม) ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงของสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS ที่มีปริมาณน้ำฝนมากและหนาแน่นในช่วงเดียวกัน

#### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน

ข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุด (จากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับปริมาณน้ำฝน ให้ความถูกต้องชัดเจน จากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้สัญญาณ GNSS สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลฝนจากโทรมาตรแบบอัตโนมัติ พบว่าที่ระยะ 8 กิโลเมตร เป็นระยะที่ยังคงมีข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS มากที่สุด (ตารางที่ 4-3) คือ สถานีจันทบุรี (CHAN) และสถานีสงขลา (SOKA) ซึ่งมีระยะห่างกันเพียง 1 กม. ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV กับค่าปริมาณน้ำฝน โดยแสดงตำแหน่งของสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาดังภาพที่ 4-13

ตารางที่ 4-3 ระยะห่างระหว่างสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยากับสถานี GNSS CORS

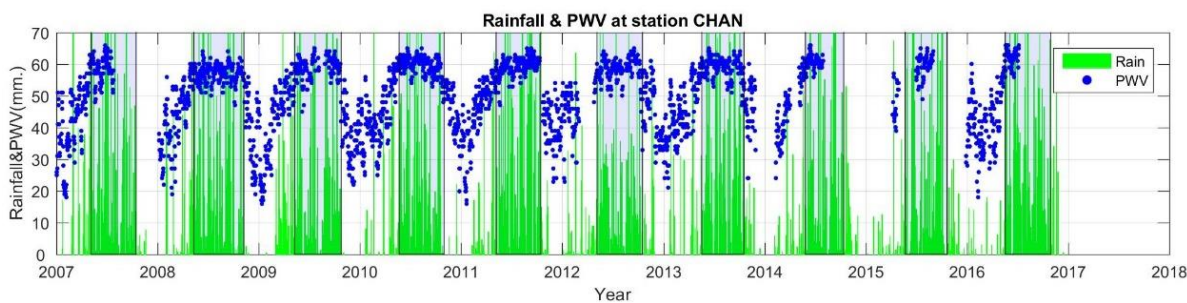
รหัสสถานีอุตุฯ	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	สถานี GNSS	ระยะห่าง (กม.)
327501/48327	เชียงใหม่	18.79000	98.97694	CHMA	5
351201/48351	อุดรดิตถ์	17.61667	100.10000	UTTD	2
354201/48354	อุดรธานี	17.38333	102.80000	UDON	4
431201/48431	นครราชสีมา	14.96278	102.07667	NKRM	7
409301/48409	ศรีสะเกษ	15.03333	104.25000	SISK	10
455201/48455	กรุงเทพมหานคร	13.72639	100.56000	DPT9	4
400201/48400	นครสวรรค์	15.80000	100.16667	NKSW	13
480201/48480	จันทบุรี	12.61667	102.10639	CHAN	1
500201/48500	ประจวบคีรีขันธ์	11.83333	99.83333	PJRK	5
551201/48551	สุราษฎร์ธานี	9.13556	99.15194	SRTN	20
568501/48568	สงขลา	7.20389	100.60472	SOKA	1



ภาพที่ 4-13 ตำแหน่งสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา

(Trakolkul & Satirapod, 2020a)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV และปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง พบว่า ในแต่ละปี ตั้งแต่ปี 2007-2016 ของสถานี CHAN ในช่วงที่เป็นฤดูฝน (แถบแรเงาสีเทา ดังภาพที่ 4-14) ประมาณ กลางเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมี ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุดเท่ากับ 51 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่  $\pm 10$  มิลลิเมตร โดยมี ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยสุดที่ 24 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (ปี 2007-2016) จากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี CHAN (ระยะห่าง 1 กิโลเมตร จากหน่วยงาน TMD) มีค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของน้ำฝนอยู่ที่  $\pm 25$  มิลลิเมตร โดยมี ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 395 มิลลิเมตร และน้อยสุดที่ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนที่มากและหนาแน่นในช่วงเวลา เดียวกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณ PWV กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง พบว่าช่วงที่ เป็นฤดูฝน (ประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม) ค่า PWV มีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมี ค่าเฉลี่ยของ PWV มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงของสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่ อยู่ใกล้กับสถานี GNSS ที่มีปริมาณน้ำฝนมากและหนาแน่นในช่วงเดียวกัน



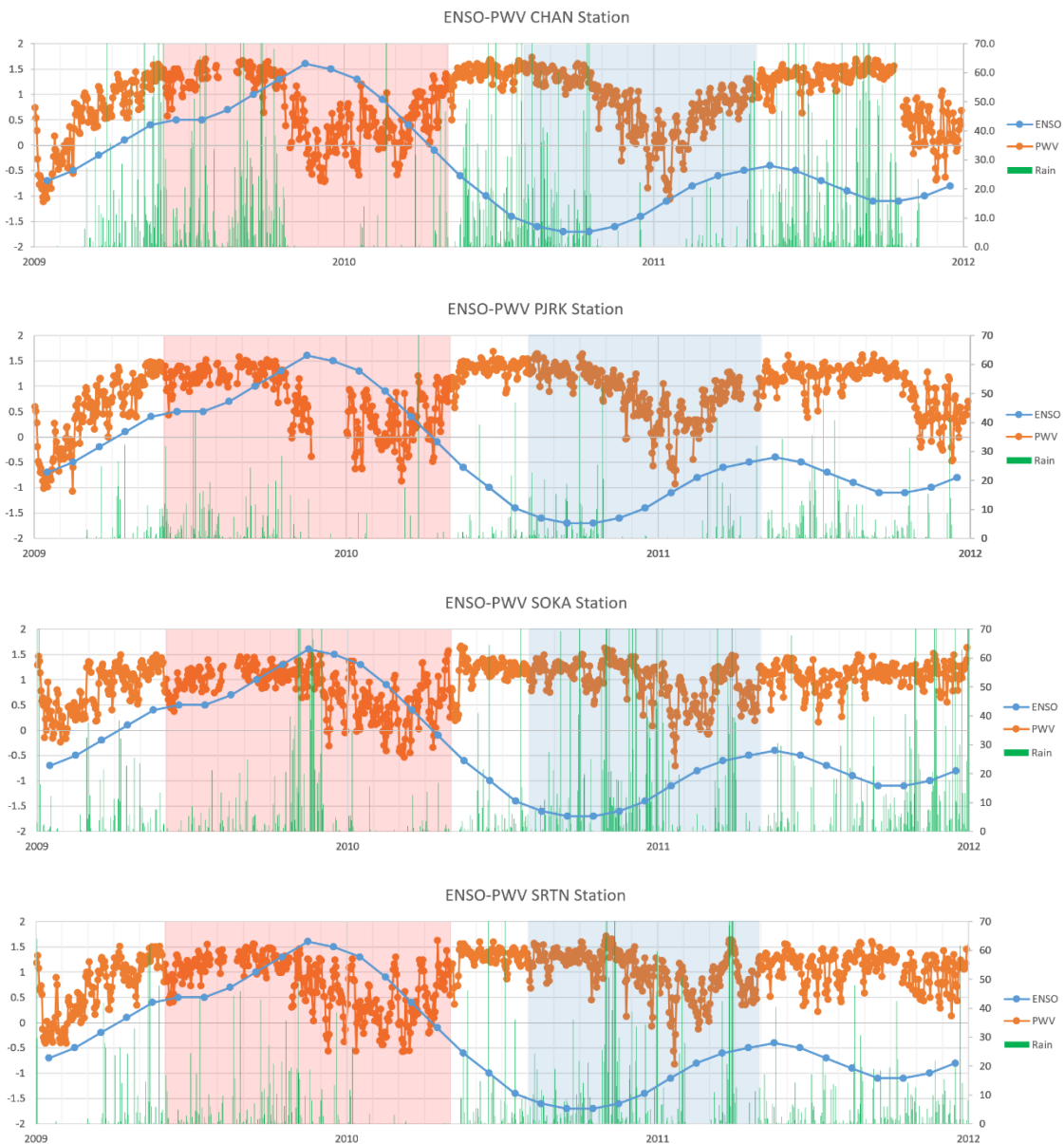
ภาพที่ 4-14 แสดงค่า PWV ของสถานี CHAN (จุดสีน้ำเงิน) กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (กราฟแท่งสีเขียว) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดในช่วงฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม (แถบแรเงา) ของทุกปี (Trakolkul & Satirapod, 2020b)

จากผลงานวิจัยสามารถสรุปผลในสองประเด็นนี้ได้ว่า ค่าเฉลี่ย PWV ของทุกสถานีมีค่า 49 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่  $\pm 10$  มิลลิเมตร (ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยสุดอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร) ปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคมจากระดับประมาณ 20 มิลลิเมตรจนถึง 60 มิลลิเมตร เป็นผลมาจากอิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่นำพาไอน้ำจากทะเลเข้าสู่ฝั่งในช่วงเข้าสู่ฤดูร้อน เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ระหว่างประมาณ 50 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวในช่วงเดือนตุลาคมปริมาณไอน้ำเริ่มลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 40 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PWV แปรผกผันกับระดับความสูงของพื้นที่ บริเวณที่มีระดับความสูงมาก เช่นบริเวณภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่าง จะมีค่าเฉลี่ย PWV ต่ำ และค่า PWV เฉลี่ยจะสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีระดับความสูงและละติจูดที่ลดลงมา ส่วนขององค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของ PWV พบว่าค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประจำปีของ PWV มีขนาดตั้งแต่ 7 ถึง 16 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) ของ PWV ประจำปีอยู่ที่ประมาณ  $-0.428$  ซึ่งอยู่ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมในฤดูฝนและเป็นช่วงที่มีค่า PWV สูงสุดประจำปี ผลการเปรียบเทียบค่า PWV กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดในช่วงฤดูฝนคือประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงของสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS ที่มีปริมาณน้ำฝนมากและตกต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน

การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่า PWV สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับการเริ่มต้นของฤดูมรสุมและแนวโน้มปริมาณน้ำฝนในประเทศไทย และทำให้เห็นรูปแบบที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ที่มีลักษณะพิเศษไม่เหมือนกับพื้นที่อื่นๆ ความผันแปรระหว่างแอมพลิจูดของ PWV ประจำปีในภาคใต้และใกล้กับชายฝั่งมหาสมุทรขนาดเล็กกว่าในภูมิภาคอื่นของประเทศ อาจเป็นเพราะผลกระทบของทะเลต่อภูมิอากาศโดยรอบทำให้ภาคใต้มีฝนตกชุกต่อเนื่องทั้งจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูร้อนและลมมรสุม

ตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว การพิจารณาแค่เพียงปริมาณน้ำฝนเพียงอย่างเดียวนั้น จะทำให้ไม่สามารถเห็นความชัดเจนของฤดูกาลในภาคใต้ได้ดีเท่ากับแบบจำลองของ PWV ที่สามารถทำให้เห็นสภาพภูมิอากาศที่ชัดเจนมากกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่าแอมพลิจูดที่ใหญ่จึงทำให้เห็นความชัดเจนของช่วงฤดูกาล

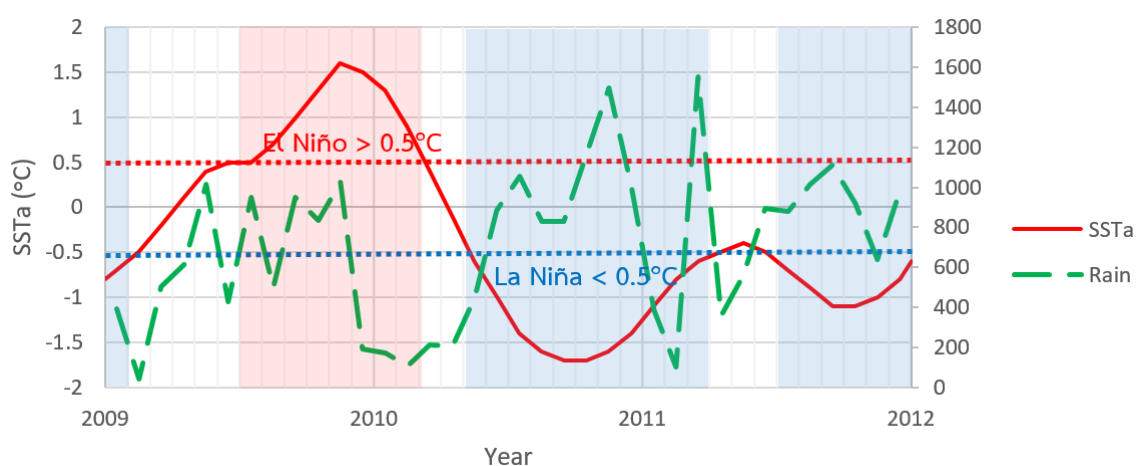
#### 4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV ตลอดจังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยในช่วงปรากฏการณ์ ENSO (El Niño and Southern Oscillation)



ภาพที่ 4-15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่า PWV (จุดสีส้ม) ในช่วงระยะเวลา 3 ปี (2009-2011) ที่เป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์ El Niño (แรเงาสีส้ม) และ La Niña (แรเงาสีฟ้า) กราฟเส้นสีฟ้าเป็น ONI Index ของปรากฏการณ์ ENSO ในช่วงระยะเวลา 2009-2011 และปริมาณน้ำฝนรายวัน (กราฟแท่งสีเขียว)



จากภาพที่ 4-15 รูปแบบ PWV ของสถานี CHAN, PJRK, SOKA และ SRTN ซึ่งมีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลของประเทศไทยและมีสถานีรับสัญญาณ GNSS CORS ตั้งอยู่ในช่วงระยะเวลาการสังเกตซึ่งอยู่ในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) (เดือนมิถุนายน 2552 – เดือนกุมภาพันธ์ 2553) และปรากฏการณ์ลานีญา (La Niña) (เดือนพฤษภาคม 2553 – เดือนเมษายน 2554) รูปแบบ PWV ที่คำนวณได้จะแตกต่างกันไประหว่าง 16 มม. ถึง 65 มม. โดยมี STD เท่ากับ 11.2, 10.2, 8.5 และ 7.3 มม. ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของ PWV เท่ากับ 50 มม. จะเห็นได้ว่ารูปแบบของ PWV มีความชัดเจนตามรูปแบบฤดูกาล เช่น สูงขึ้นในช่วงฤดูฝน (กลางปี) และต่ำกว่าในช่วงฤดูแล้ง (ในช่วงต้นและปลายปี) ฤดูฝนเริ่มต้นในช่วงต้นเดือนพฤษภาคม (Trakolkul & Satirapod, 2020b) และสิ้นสุดในช่วงประมาณปลายเดือนตุลาคม ในขณะที่ฤดูแล้งจะอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน แต่มีการสังเกตเห็นว่า PWV ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีการแกว่งตัวผิดปกติในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2010 เหลือประมาณ 25 มม. (แรงแงสีส้ม) ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจอยู่ในเหตุการณ์ El Niño ในเวลานี้



ภาพที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงรายสัปดาห์ของ SSTA สำหรับช่วงปี 2552-2554 ของปรากฏการณ์ ENSO และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนจาก 4 สถานี ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลของประเทศไทย

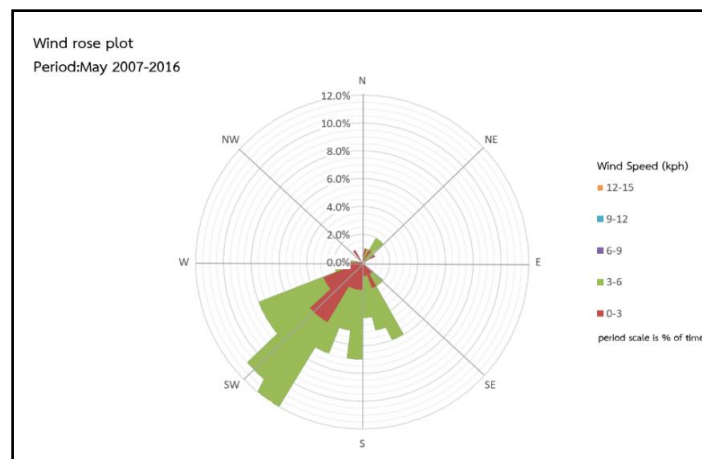
ในภาพที่ 4-16 เหตุการณ์ La Niña นำฝนที่ตกลงมาอย่างไม่มีนัยสำคัญ อิทธิพลของร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านภาคใต้ตอนบน ภาคกลางและภาคตะวันออก และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้ประเทศไทยมีฝนตกชุกหนาแน่นและมีฝนตกหนักถึงหนักมาก เป็นผลให้สภาพอากาศเลวร้าย หลายพื้นที่เกิดน้ำท่วมเฉียบพลัน น้ำป่าไหลหลาก ช่วงเดือนตุลาคม-พฤศจิกายนก่อให้เกิดความเสียหายอย่างหนัก ในช่วงวันที่ 10 ตุลาคม 2010 จนกระทั่งสถานการณ์คลี่คลายทั้งหมดในวันที่ 14 ธันวาคม 2010 มีจังหวัดที่ได้รับผลกระทบร้ายแรงจากอุทกภัยครั้งนี้ ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเกิดอุทกภัยรุนแรง 4 อำเภอ และอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (พื้นที่ในเขตเมืองได้รับผลกระทบถึง 80%) และจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝน (ภาพที่ 4-15) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับ PWV (Trakolkul & Satirapod, 2020b) โดย

สูงสุดประมาณในเดือนกรกฎาคมและต่ำสุดประมาณเดือนกุมภาพันธ์ รูปแบบของปริมาณน้ำฝนที่ชัดเจนจากอัตราฝนสะสมรายเดือนแสดงไว้ในภาพที่ 4-16 (กราฟเส้นสีเขียว) ทั้งปริมาณฝนและค่าเฉลี่ยรายเดือนของอัตราฝนแสดงรูปแบบตรงกันข้ามกับช่วงของ La Niña

#### 4.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลมในช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ข้อมูลทิศทางลมที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกรับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดลม(จากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา) ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุดซึ่งเป็นสถานีเดียวกันกับสถานีที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณน้ำฝน เพื่อเปรียบเทียบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมในช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ให้มีความถูกต้องชัดเจน

ในการศึกษาข้อมูลทิศทางและความเร็วลมทำการพล็อตรูปแบบของแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) เพื่อแสดงปริมาณความเร็วและทิศทางของลม ณ สถานีจันทบุรี (CHAN) ในช่วงเดือนพฤษภาคมของทุกปี (ปี 2007-2016) โดยการจัดเรียงข้อมูลความเร็วลมที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละทิศทางและคำนวณเป็นร้อยละของเวลาที่ลมพัดมาจากทิศทางที่กำหนด (ดังภาพที่ 4-17) แสดงข้อมูลอยู่ในรูปกราฟวงกลม และในส่วนของข้อมูลทิศทางลมจัดเรียงโดยแบ่งวงกลมออกเป็นแปดส่วนโค้งที่รองรับมุมเท่ากับ 45 องศา ความยาวกราฟในแนวรัศมีของแต่ละส่วนแสดงร้อยละของเวลาที่ลมพัดในทิศทางนั้น ๆ โดยมีแถบสีที่ระบุระดับความเร็วของลมและค่าร้อยละของเวลาที่ลมพัดในความเร็วที่ระบุในทิศทางดังกล่าว ซึ่งทำให้เห็นความชัดเจนของข้อมูลมากขึ้น



ภาพที่ 4-17 แสดงแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) จากสถานีจันทบุรี (CHAN) ช่วงเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016 (Trakolkul & Satirapod, 2020a)

ผลการพิจารณาพบว่า ในช่วงเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย (เดือนพฤษภาคม) ซึ่งกำหนดได้ด้วยเกณฑ์ GPS-PWV ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางลมเป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้

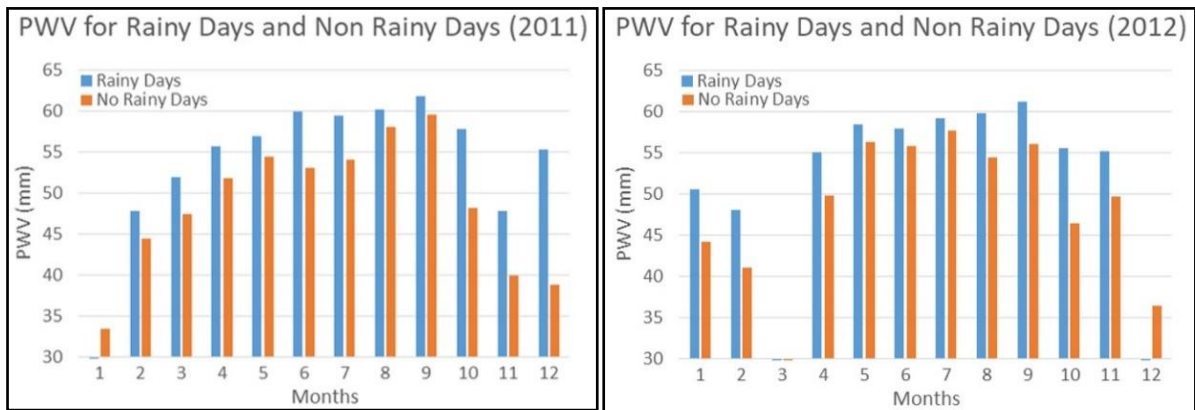
#### 4.6 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย

ในการวิเคราะห์เพื่อหาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทยนั้น มีงานวิจัยที่ผ่านมามากมายงานวิจัยที่นำค่า GPS-PWV มาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาวันเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดฤดูมรสุม ในส่วนของงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องของจำนวนข้อมูลและความครอบคลุมของสถานี GNSS โดยใช้อ้างอิงข้อมูล GPS-PWV ที่ได้จากสถานี GNSS ทั่วประเทศทุกภูมิภาค จำนวน 11 สถานี ระยะเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 10 ปี (ตั้งแต่ปี 2007-2016) ซึ่งทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ทั้งรายสถานีและแต่ละภูมิภาค ทำให้เกณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นกว่าการใช้เกณฑ์เดียวกันทั้งประเทศ ตามเกณฑ์เก่าที่ใช้ของกรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์อุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) นั้นพิจารณาจากปริมาณน้ำฝนเพียงปัจจัยเดียว และเป็นเกณฑ์ที่ใช้ประกาศทั่วประเทศ ซึ่งในเชิงบริบทของพื้นที่นั้นอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ที่ใช้ประกอบการพิจารณาระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย อาทิเช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางและความเร็วลม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Takiguchi et al., 2000) ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ GPS-PWV สอดคล้องกับการเริ่มต้นของมรสุมโดยเฉพาะฝนตกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการพิจารณาให้ละเอียดควรมีการตรวจสอบข้อมูล GPS พร้อมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ อีกด้วย โดยรายละเอียดของผลการวิเคราะห์แสดงดังต่อไปนี้

##### 4.6.1 วิเคราะห์หาช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน

จากข้อมูลอนุกรมเวลาของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV time-series) ในประเทศไทยที่สถานีจันทบุรี (CHAN) เลือกพิจารณาปี 2011 และปี 2012 ซึ่งเป็นปีที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาไม่มาก เพื่อดูลักษณะความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างค่า PWV และปริมาณน้ำฝน โดยการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่า PWV ระหว่างวันที่มีฝนตกกับวันที่ฝนไม่ตก แสดงดังภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 กราฟแท่งสีฟ้าแสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนตก และกราฟแท่งสีส้มแสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนไม่ตก ในปี 2011 และ 2012 (Trakolkul & Satirapod, 2020a)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV ในแต่ละเดือนนั้น สำหรับวันที่ฝนตก (แถบสีฟ้า) และวันที่ฝนไม่ตก (แถบสีส้ม) ค่า PWV มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ PWV สำหรับวันที่มีฝนตกจะมีค่าสูงกว่าวันที่ไม่มีฝนตก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Manandhar et al. (2016) ที่ พบว่า ค่า PWV มีค่าเฉลี่ยในวันที่ฝนตกสูงกว่าในวันที่ฝนไม่ได้ตกเช่นกัน และจากการวิเคราะห์ข้อมูลในปี 2011 และปี 2012 สามารถเห็นความแตกต่างสูงสุดของ PWV ในวันที่ฝนตกและฝนไม่ตกได้ถึง 33.48 มม. ในเดือนมกราคม และ 36.40 มม. ในเดือนธันวาคมตามลำดับ สำหรับเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีความแตกต่างของ PWV ระหว่างวันที่ฝนตกและวันที่ฝนไม่ตกเพียง 2.51 มม. และ 2.09 มม. ตามลำดับ และพบว่ารูปแบบการกระจายของค่า PWV เฉลี่ยรายเดือนสำหรับวันที่ฝนตกและฝนไม่ตก สอดคล้องกับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูล PWV เพื่อกำหนดการเข้าสู่ฤดูมรสุม

#### 4.6.2 ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม

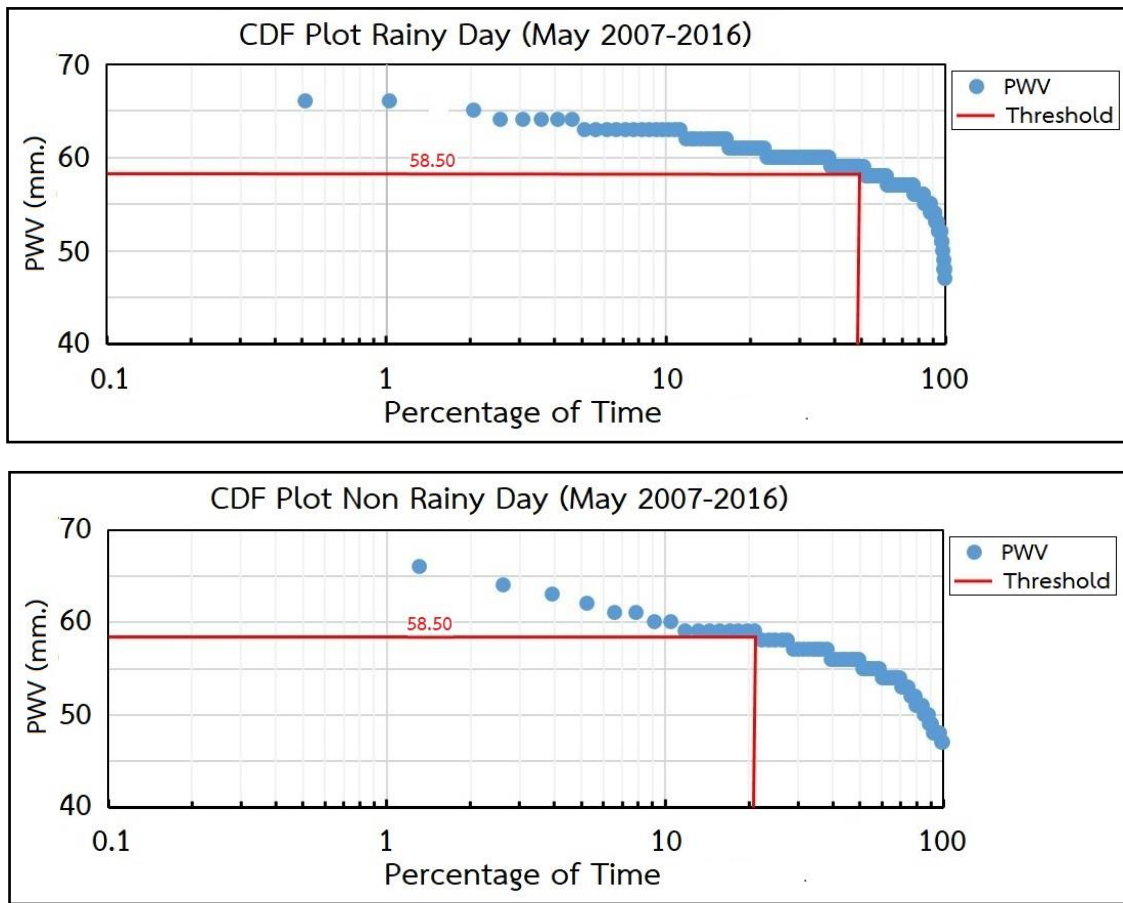
ผลการศึกษาก่อนหน้านี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV และปริมาณน้ำฝน ในหลายประเด็น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของค่า PWV นั้นหมายถึงฝนตก ซึ่งในหัวข้อนี้เสนอการกำหนดค่าสำหรับเกณฑ์ PWV ในการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม โดยเลือกเดือนพฤษภาคมของทุกปี (ตั้งแต่ปี 2007-2016) มาใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนของสถานีจันทบุรี (CHAN) ในเดือนพฤษภาคมของปี 2007-2016 สำหรับวันที่มีฝนตก และวันที่ฝนไม่ตก มีค่าเท่ากับ 58.50 และ 54.50 ตามลำดับ

เดือน/ปี	ค่าเฉลี่ย PWV วันที่ฝนตก	ค่าเฉลี่ย PWV วันที่ฝนไม่ตก
พฤษภาคม 2007	59.18	52.67
พฤษภาคม 2008	56.73	53.00
พฤษภาคม 2009	58.08	51.67
พฤษภาคม 2010	59.81	56.57
พฤษภาคม 2011	56.95	54.44
พฤษภาคม 2012	58.42	56.33
พฤษภาคม 2013	58.00	54.09
พฤษภาคม 2014	57.71	55.00
พฤษภาคม 2015	No Data	No Data
พฤษภาคม 2016	61.60	56.75
<b>เฉลี่ย</b>	<b>58.50</b>	<b>54.50</b>

ผลการพิจารณาพบว่า ค่าเฉลี่ย PWV ในเดือนพฤษภาคมของทุกปี สำหรับวันที่มีฝนตกและวันที่ฝนไม่ตก มีค่าเท่ากับ 58.50 มม. และ 54.50 มม. ตามลำดับ ดังนั้นค่าเกณฑ์ที่ใช้ระบุแนวโน้มของการเข้าสู่ฤดูฝน คือ เมื่อค่า PWV ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งมีค่าเกิน 58.50 มม. พบว่ามีแนวโน้มเข้าสู่ฤดูฝน และเพื่อให้เห็นภาพรวมของการกระจายตัวของ PWV ได้ทำการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Distribution Function: CDF) ของค่าเฉลี่ย PWV สำหรับวันที่ฝนตก (กราฟบน) และฝนไม่ตก (กราฟล่าง) ในเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016 เพื่อตรวจสอบว่าเกณฑ์ที่ใช้ระบุการเข้าสู่ฤดูฝนเมื่อค่า PWV เกิน 58.50 มม. นั้นมีจำนวนวันที่ฝนตกเป็นร้อยละเท่าไร (ดังภาพที่ 4-19)

ผลการศึกษาพบว่า สำหรับวันที่ฝนตกมีค่า PWV สูงกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์อยู่ถึงประมาณร้อยละ 50 ของวันทั้งหมด และในวันที่ไม่มีฝนตกมีค่า PWV สูงกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์อยู่ประมาณเพียงร้อยละ 20 ของวันทั้งหมด จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าเกณฑ์ PWV เท่ากับ 58.50 มม. ที่กำหนดนั้นเป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่มีโอกาสเกิดฝนมากถึงร้อยละ 50 ดังนั้น ค่า PWV เท่ากับ 58.50 มม. นี้จะเป็นเกณฑ์ใหม่ในการระบุวันเริ่มต้นเข้าสู่ฤดูมรสุม



ภาพที่ 4-19 กราฟบน CDF Plot แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่มีฝนตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. ซึ่งมีจำนวนถึง 50% ในขณะที่กราฟล่างมีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ฝนไม่ตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. อยู่เพียง 20% (Trakolkul & Satirapod, 2020a)

#### 4.6.3 การทดสอบการใช้ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม

ในการทดสอบเกณฑ์ของการระบุวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จากการพิจารณาค่า PWV (เท่ากับ 58.50 มม.) นั้น ทำโดยการเปรียบเทียบ PWV Time-series ของสถานีจันทบุรี (CHAN) ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนและทิศทาง/ความเร็วลม เนื่องจากสถานีจันทบุรีเป็นสถานีที่อยู่ในภูมิภาคที่ได้รับผลกระทบจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น (แต่ทั้งนี้ไม่พิจารณารวมพื้นที่ภาคใต้ เนื่องจากเหตุผลที่รูปแบบของการเกิดฝนในพื้นที่ภาคใต้นั้นแตกต่างจากพื้นที่อื่นๆ ของประเทศไทยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว) ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้ค่าเกณฑ์ PWV เท่ากับ 58.50 มม. หรือมากกว่านั้นติดต่อกัน 3 วัน สามารถระบุการเริ่มต้นของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในประเทศไทยได้ โดยทำการเปรียบเทียบกับวันที่ประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยาดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 วันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ได้จากการใช้เกณฑ์ใหม่ สำหรับปี 2007-2016 เมื่อมีค่าเกณฑ์ของ PWV เท่ากับ 58.50 มม. หรือมากกว่านั้นติดต่อกัน 3 วัน และเกณฑ์เดิมของกรมอุตุนิยมวิทยา

ปี	กรมอุตุนิยมวิทยา	ค่าเกณฑ์ใหม่จาก PWV
2007	5 พฤษภาคม	3 พฤษภาคม
2008	10 พฤษภาคม	5 พฤษภาคม
2009	9 พฤษภาคม	13 พฤษภาคม
2010	21 พฤษภาคม	16 พฤษภาคม
2011	6 พฤษภาคม	9 พฤษภาคม
2012	5 พฤษภาคม	6 พฤษภาคม
2013	18 พฤษภาคม	19 พฤษภาคม
2014	27 พฤษภาคม	27 พฤษภาคม
2015	22 พฤษภาคม	ไม่มีข้อมูล PWV
2016	18 พฤษภาคม	16 พฤษภาคม

จากตารางที่ 4-5 พบว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบวันที่ระบุการเริ่มต้นของฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ตั้งแต่ปี 2007-2016 ระหว่างวิธีการประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่เคยประกาศมากับการวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์ใหม่คือ การระบุด้วยค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) เท่ากับหรือมากกว่า 58.50 มม. นี้ มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 1-3 วัน ยกเว้นในปี 2008 และ 2010 ที่ PWV แสดงให้เห็นว่ามีการเข้าสู่ฤดูฝนเร็วกว่าประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยาประมาณ 5 วัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อมูลย้อนหลังพบว่า ในปี 2008 และ 2010 เป็นปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญา ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นประมาณ 3-4 ปีต่อครั้ง แต่ไม่ทุกครั้งที่ประเทศไทยจะได้รับอิทธิพล ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่การพิจารณาว่า ประเทศไทยจะได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญาในปีนั้น ๆ หรือไม่ อาจต้องใช้ข้อมูลทั้งจากกรมอุตุนิยมวิทยาและข้อมูล PWV ในการคาดการณ์ร่วมกัน (ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวในงานวิจัยนี้มีเพียง 2 ปี และสถานีเดียวเท่านั้น)

นอกจากนี้ผลการวิจัยยังพบว่า หลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่องและเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูดที่สูงขึ้นไปซึ่งมีลักษณะของค่าเฉลี่ย PWV ที่ลดลง เช่น ภาคกลาง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ นั้น พบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ (เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยของ PWV ที่ต่ำกว่าในส่วน of สถานีจันทบุรีที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากสถานี CHAN เป็นสถานีที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและชายฝั่ง และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น) ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ ทำให้สอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่ เพราะช่วงเวลาในการเข้าสู่ฤดูฝนของแต่ละภูมิภาคไม่เท่ากัน บางพื้นที่เร็วในขณะที่บางพื้นที่เกิดช้ากว่า ในอนาคตถ้ามีข้อมูลและสถานี GNSS ที่เพิ่มมากขึ้นอาจลงรายละเอียดได้ถึงระดับจังหวัดหรืออำเภอได้





## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการผันแปรของไอน้ำในชั้นบรรยากาศในระยะยาว (PWV-Time Series) สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถนำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเกณฑ์การระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมได้อย่างแม่นยำ และมีความละเอียดเชิงพื้นที่มากกว่าที่กรมอุตุนิยมวิทยาใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณ GNSS ที่ตั้งอยู่ในทุกภูมิภาคของประเทศมาร่วมในการวิเคราะห์ สำหรับผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสรุปได้ตามลำดับดังนี้

#### 5.1.1 รูปแบบความแปรปรวนของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV)

จากงานวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ย PWV ของทุกสถานีมีค่า 49 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่  $\pm 10$  มิลลิเมตร (ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยที่สุดอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร) ปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคมจากระดับประมาณ 20 มิลลิเมตรจนถึง 60 มิลลิเมตร เป็นผลมาจากอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่นำพาไอน้ำจากทะเลเข้าสู่ฝั่งในช่วงเข้าสู่ฤดูร้อน เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน ปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ระหว่างประมาณ 50 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวในช่วงเดือนตุลาคมปริมาณไอน้ำเริ่มลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 40 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PWV แปรผกผันกับระดับความสูงของพื้นที่ บริเวณที่มีระดับความสูงมาก เช่นบริเวณภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่าง จะมีค่าเฉลี่ย PWV ต่ำ และค่า PWV เฉลี่ยจะสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีระดับความสูงและละติจูดที่ลดลงมา

ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนพื้นที่ภาคกลาง, ภาคตะวันออก, ภาคตะวันตกและภาคใต้ มีแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบ แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในพื้นที่เหล่านี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง ที่มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งมีลักษณะรูปแบบของสภาพภูมิอากาศเฉพาะ พบว่า ภาคใต้มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 44 ถึง 58 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 7 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุด (RMSE ของสถานีสุราษฎร์ธานี และสงขลามีค่าสูงกว่าในทุกภูมิภาค) และมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุดเนื่องจากภาคใต้มีฝนตกชุกตลอดทั้งปี

ส่วนขององค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของ PWV พบว่าค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประจำปีของ PWV มีขนาดตั้งแต่ 7 ถึง 16 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) ของ PWV ประจำปีอยู่ที่ประมาณ  $-0.428$  ซึ่งอยู่ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมในฤดูฝนและเป็นช่วงที่มีค่า PWV สูงสุดประจำปี ผลการเปรียบเทียบค่า PWV กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในช่วงฤดูฝนคือประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงของสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS ที่มีปริมาณน้ำฝนมากและตกต่อเนื่องในช่วงเวลาเดียวกัน

การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่า PWV สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับการเริ่มต้นของฤดูมรสุมและแนวโน้มปริมาณน้ำฝนในประเทศไทย และทำให้เห็นรูปแบบที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ที่มีลักษณะพิเศษไม่เหมือนกับพื้นที่อื่นๆ ความผันแปรระหว่างแอมพลิจูดของ PWV ประจำปีในภาคใต้และใกล้กับชายฝั่งมหาสมุทรขนาดเล็กกว่าในภูมิภาคอื่นของประเทศ อาจเป็นเพราะผลกระทบของทะเลต่อภูมิอากาศโดยรอบทำให้ภาคใต้มีฝนตกชุกต่อเนื่องทั้งจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูร้อนและลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว การพิจารณาแค่เพียงปริมาณน้ำฝนเพียงอย่างเดียวจะทำได้ไม่สามารรถเห็นความชัดเจนของฤดูกาลในภาคใต้ได้ดีเท่ากับแบบจำลองของ PWV ที่สามารถทำให้เห็นสภาพภูมิอากาศที่ชัดเจนมากกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่าแอมพลิจูดที่ใหญ่จึงทำให้เห็นความชัดเจนของช่วงฤดูกาล

นอกจากนี้ในการศึกษาข้อมูลทิศทางและความเร็วลมพบว่า ในช่วงเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย (เดือนพฤษภาคม) ซึ่งกำหนดได้ด้วยเกณฑ์ GPS-PWV ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางลมเป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้

### 5.1.2 เกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมจากข้อมูล PWV

การหาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทยนั้นในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอเกณฑ์ด้วยการพิจารณาจากค่า PWV ที่มีค่าเท่ากับ 58.5 มิลลิเมตร หรือมากกว่าติดต่อกัน 3 วัน เป็นเกณฑ์ในการระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมของประเทศไทย สำหรับงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องของจำนวนข้อมูลและความครอบคลุมของสถานี GNSS โดยใช้ข้อมูล GPS-PWV ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี (ทั่วประเทศ) ระยะเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 10 ปี (ตั้งแต่ปี 2007-2016) ประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) ด้วยโปรแกรม PANDA ซึ่งถูกพัฒนาจากหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ที่ใช้ประกอบการพิจารณาระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย อาทิเช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางและความเร็วลม ซึ่งจะ

ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ ทั้งรายสถานี และแต่ละภูมิภาค ทำให้เกณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นกว่าเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) ที่พิจารณาจากปริมาณน้ำฝนเพียงปัจจัยเดียวและใช้เป็นเกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ

ผลลัพธ์ของการใช้เกณฑ์ใหม่ในการระบุวันเริ่มต้นฤดูมรสุมโดยใช้ค่า PWV เมื่อเทียบกับเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาพบว่า เกณฑ์ใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีและมีความแม่นยำกว่าเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาโดยมีข้อบกพร่องน้อยมาก รวมถึงเมื่อเกิดปรากฏการณ์ที่คาดไม่ถึง อาทิเช่น ในการเกิดผลกระทบจากสภาวะลานีญา (La Niña) ในปี 2008 และปี 2010 ซึ่งเป็นปีที่มีฝนตกหนักและมีน้ำมากเกณฑ์ใหม่ก็สามารถระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมได้เร็วกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาถึง 5 วัน นอกจากนี้ผลการวิจัยยังพบว่า หลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้ว จะมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่องและเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูดที่สูงขึ้นไปซึ่งมีลักษณะของค่าเฉลี่ย PWV ที่ลดลง เช่น ภาคกลาง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ นั้น พบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ (เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยของ PWV ที่ต่ำกว่าในส่วนของสถานีจันทบุรีที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากสถานี CHAN เป็นสถานีที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนืออยู่ใกล้ทะเลและชายฝั่ง และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น) ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ ทำให้สอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่ เพราะช่วงเวลาในการเข้าสู่ฤดูฝนของแต่ละภูมิภาคไม่เท่ากัน บางพื้นที่เร็วในขณะที่บางพื้นที่เกิดช้ากว่า ในอนาคตถ้ามีข้อมูลและสถานี GNSS ที่เพิ่มมากขึ้นอาจลงรายละเอียดได้ถึงระดับจังหวัดหรืออำเภอได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ใช้งานง่ายเนื่องจากต้องการเพียงค่า PWV และไม่ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณฝนและทิศทางลม

สำหรับผลการศึกษาคั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกแก่หน่วยงานราชการในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนการเกษตรและบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถใช้ข้อมูลความแปรปรวนของค่า PWV ในส่วนของแนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) เพื่อประโยชน์ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate Change) ในประเทศไทยที่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางเกษตรกรรมซึ่งเป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS CORS จำนวน 11 สถานี กระจายทั่วประเทศ ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลการรับวัดที่มีระยะเวลาที่ยาวนานมากที่สุดในขณะที่ทำวิจัย โดยในแต่ละภูมิภาคข้อมูลของสถานีมีเพียงภูมิภาคละ 2-3 สถานี ซึ่งในปัจจุบันสถานี CORS ในประเทศไทยเริ่มมีมากขึ้นถึง 244 สถานี (กรมแผนที่ทหาร, 2019) ในอนาคตถ้าสถานีเหล่านี้มีข้อมูลที่ยาวนานมากพอ จะช่วยให้การศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภูมิอากาศและฤดูกาลในประเทศไทยทำได้ละเอียดถึงในระดับจังหวัดได้ มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานี CORS ดังกล่าวจะทำให้การวิจัยในอนาคตมีความครอบคลุมด้านพื้นที่ และมีความถูกต้องได้แม่นยำมากขึ้น (Shuanggen & Luo, 2009)

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลแบบภายหลัง (Post Processing) โดยเลือกใช้ข้อมูลเฉพาะกลุ่มดาวเทียม GPS ในการประมวลผลเท่านั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการหาค่า PWV ในการทำวิจัยต่อไปควรนำดาวเทียมทุกระบบมาร่วมใช้ในการประมวลผล ซึ่งจากงานวิจัยของ Jongrukchob T. et al. (2017) แสดงให้เห็นว่า ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล GPS และข้อมูล GLONASS มีความใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของข้อมูลที่ได้จากระบบ BEIDOU ยังมีความแตกต่างกัน อาจเป็นผลมาจากระบบยังไม่สามารถทำงานได้เต็มครบสมบูรณ์ทั้งระบบ และจากงานวิจัยของ Chaiyut Charoenphon (2019) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลุ่มของดาวเทียม GNSS จาก Galileo และ BeiDou ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับค่า PWV ได้ ดังนั้นในอนาคตเมื่อระบบดาวเทียมทั้ง 3 ระบบใช้งานได้สมบูรณ์จะส่งผลให้การประมวลผลหา PWV มีความถูกต้องและผลลัพธ์น่าเชื่อถือมากขึ้น

5.2.3 แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ( $T_m$ ) สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น จากงานวิจัยของ Suwantong et al. (2017) เพื่อหาค่า  $T_m$  สำหรับประเทศไทยทำให้ได้ค่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นที่มีความถูกต้องมากขึ้น ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ  $T_m$  ให้มีความละเอียดมากขึ้นโดยแยก  $T_m$  เป็นรายภูมิภาคจะทำให้ได้ค่า PWV ที่ดีขึ้นและละเอียดมากขึ้น ซึ่งเคยมีงานศึกษาเกี่ยวกับ  $T_m$  รายภูมิภาคโดย Khaichaiyaphum et al. (2017) แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ดีพอเนื่องจากข้อมูล GNSS ที่ใช้มีระยะเวลาที่น้อยเกินไป สำหรับปัจจุบันที่มีข้อมูลยาวนานขึ้น สามารถทำให้การหาค่า  $T_m$  จากแบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิท้องถิ่นมีความถูกต้องและละเอียดมากขึ้น ซึ่งเป็นงานวิจัยในอนาคตที่น่าสนใจ

5.2.4 ผลของการนำเสนอแนวโน้มของฝนที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคจากงานวิจัยนี้ มีความสำคัญและยังไม่เคยมีงานวิจัยที่ใช้ค่าไอน้ำในชั้นบรรยากาศซึ่งมีความละเอียดในระดับเชิงพื้นที่รายภูมิภาค (Local Model) และใช้ข้อมูลระยะยาวมาพยากรณ์ (Predict) แนวโน้มของการเกิดฝนในระยะยาว ซึ่งถือว่ามี ความสำคัญมากในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ในประเทศไทย ทั้งนี้

งานวิจัยต่อไปเมื่อสถานี CORS มีมากขึ้นควรมีการศึกษาเพิ่ม เพื่อให้ครอบคลุมด้านพื้นที่ที่มีความละเอียดมากขึ้น

5.2.5 ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะสภาพแวดล้อมของที่ตั้งสถานี CORS แต่ทั้งนี้ประเด็นเรื่องสภาพพื้นที่โดยรอบของสถานี CORS ก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป เนื่องจาก Canadian Geodetic Survey (2017) ได้ให้ข้อแนะนำไว้ว่า สภาพแวดล้อมโดยรอบสถานี CORS ควรเลือกพื้นที่เปิดโล่งโดยรอบที่มีสิ่งกีดขวางน้อยที่สุดในระยะไม่น้อยกว่า 30 ม. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมโดยรอบสถานี เช่น การเติบโตของต้นไม้หรือไม้พุ่ม ต่อเติมอาคาร การต่อเติมควดฟ้า ผนังโลหะ และป้ายโลหะ เป็นต้น อาจทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) อาจส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ

5.2.6 เนื่องจากในช่วงเวลาที่ทำกรวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ (ปี 2007-2016) ปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญานั้น (ปี 2008 และปี 2010) พบข้อสังเกตว่า ค่า PWV บ่งชี้ถึงการเข้าสู่ฤดูฝนเร็วกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยา ประมาณ 5 วัน แต่ทั้งนี้ยังไม่มีข้อมูลที่อ้างอิงได้ชัดเจนว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมที่มาเร็วกว่าจากค่า PWV นั้นเป็นอิทธิพลที่เกิดจากปรากฏการณ์ลานีญาหรือไม่ ดังนั้นในการศึกษาต่อไป ควรมีการพิจารณาค่า PWV ร่วมกับปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน ความเร็วของการเข้าสู่ช่วงฤดูฝน และความต่อเนื่องของฝนที่ตก เป็นต้น เนื่องจากเหตุการณ์ลานีญานี้จะเกิดขึ้น 3-4 ปี/ครั้ง แต่ไม่ทุกครั้งที่อิทธิพลมาถึงประเทศไทย

ผลของการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตุนิยมวิทยาได้ในหลายด้าน เช่น ใช้สำหรับการเฝ้าระวัง ติดตามและการพยากรณ์ (Businger, 2009) รวมไปถึงการปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองสภาพอากาศในการพยากรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาพอากาศจำกัด ดังนั้นผลลัพธ์ของการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับหลายองค์กรในประเทศไทย เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา (TMD), สถาบันสารสนเทศพลังน้ำ (HIIT) และกรมฝนหลวงและการบินเกษตร เพื่อระบุสัญญาณของสภาพภูมิอากาศในภูมิภาค สามารถหาค่า PWV ได้อย่างแม่นยำให้ผลลัพธ์ที่ดี และมีต้นทุนต่ำกว่าการติดตั้งเซ็นเซอร์ทางอุตุนิยมวิทยา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวางแผนการเกษตรและบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ



## บรรณานุกรม

- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., & Ware, R. H. (1994). GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology* 33(3): 379-386. doi:10.1175/1520-0450(1994)033<0379:Gmmzwd>2.0.Co;2
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research* 97(D14): 15787-15801. doi:10.1029/92jd01517
- Bock O., et al. (2008): West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *J. Geophys. Res.*, 113 (D21105). doi:10.1029/2008JD010327.
- Brunner, F. K., & Welsch, W. M. (1992). Effect of the troposphere on GPS measurements. *GPS World* 4(42).
- Burrus, C. S. (2012). Iterative Reweighted Least Squares [Online]. Available from: <https://cnx.org/contents/krkDdys0@12/Iterative-Reweighted-Least-Squares> [2020, May 26]
- Businger, S. (2009). Application of GPS in Meteorology [Online]. Available from: [https://www.navcen.uscg.gov/pdf/cgsicMeetings/Hawaii\\_June\\_2009/CGSICtalk.pdf](https://www.navcen.uscg.gov/pdf/cgsicMeetings/Hawaii_June_2009/CGSICtalk.pdf) [2020, April 5]
- Canadian Geodetic Survey. (2017). GNSS REFERENCE STATION INSTALLATION AND OPERATION BEST PRACTICES [Online]. Available from: [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/BestPractices\\_GNSS\\_Reference\\_Station.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/BestPractices_GNSS_Reference_Station.pdf) [2020, June 2]
- Chaiyut Charoenphon. (2019). Real-time estimation of precipitable water vapor using GNSS precise point positioning in Thailand. Doctor of Philosophy's Thesis, Department of Survey Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Chokchai Trakolkul. (2019). THE USE OF GNSS SIGNALS TO DETERMINE THE AMOUNT OF PRECIPITABLE WATER VAPOR IN TROPOSPHERE TO DETERMINE AN ALTERNATIVE

MONSOON ONSET DATE FOR THAILAND. Doctor of Philosophy's Thesis, Department of Survey Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.

- Coster, A. J., Niell, A. E., Solheim, F. S., Mendes, V. B., Toor, P. C., Buchmann, K. P., & Upham, C. A. (1996). Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer. Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996) Kansas City, MO: 625-634.
- Dai A., Wang, J., Thorne, P. W., Parker, D. E., Haimberger, L., & Wang, X. (2011). A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J. Climate*, 24, 965–991.
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Journal of Radio Science* 20: 1593-1607.
- Durre, I., Williams, J., Ying, X., & Vose, R. S. (2009). Radiosonde based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: An update. *J. Geophys. Res.*, 114, D05112.
- Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. (1991). Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B4), 6541-6555. doi:10.1029/90jb00834
- Gradinarsky, L. P., Johansson, J., Bouma, H. R., Scherneck, H.-G., & Elgered, G. (2002). Climate monitoring using GPS. *Phys. Chem. Earth*, 27, 335–340.
- Holland, P. W., & Welsch, R. E. (1977). Robust regression using iteratively reweighted leastsquare. *Communications in Statistics - Theory and Methods* 6(9): 813-827. doi:10.1080/03610927708827533
- Hopfield, H. S. (1971). Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data. *Radio Science* 6(3): 357-367. doi:10.1029/RS006i003p00357
- Jade, S., & Vijayan, M. S. M. (2008). GPS-based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data. *Journal of Geophysical Research* 113(D3). doi:10.1029/2007jd008758



- Jongrukchob T., Supavetch S., & Satirapod C. (2017). Determination of precipitable water vapor from GNSS signal using local mean temperature. *Royal Thai Survey Department Journal* 1(37): 36-44.
- Khaichaiyaphum, P., Satirapod, C., Thongtan, T., & Srestasathiern, P. (2017). Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model Using AQUA Satellite for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation in Thailand. *Journal of RESGAT* 18(Special).
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions* 5(2): 12-28. doi:10.1007/pl00012883
- Liang, H., Cao, Y., Wan, X., Xu, Z., Wang, H., & Hu, H. (2015). Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China. *Geodesy and Geodynamics* 6(2): 135-142. doi:10.1016/j.geog.2015.03.001
- Lu, C. X., Li, X. X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M. R., . . . Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. doi:10.1007/s00190-015-08180
- Manandhar, S., Lee, Y. H., & Dev, S. (2016). GPS derived PWV for rainfall monitoring. Paper presented at the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- Means J. D. (2012). GPS precipitable water as a diagnostic of the north American monsoon in California and Nevada. *J. Climate*, 26: 1432–1444.
- Ning T., Wickert, J., Deng, Z., Heise, S., Dick, G., Vey, S., & Schöne, T. (2016). Homogenized Time Series of the Atmospheric Water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. *J. Climate*, 29: 2443–2456.
- Nithiwatthn Choosakul. (2005). APPLICATION OF GLOBAL POSITIONING SYSTEM(GPS) DATA FOR ATMOSPHERIC WATER VAPOUR VARIATION IN THAILAND. Master's Thesis, Department of Geology, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Poan D. E., Roehrig, R., Couvreur, F., & Lafore , J. (2013). West African monsoon intraseasonal variability: a precipitable water perspective. *J. Climate*, 70: 1035–1052. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-087.1>.

- Puviarasan N., Sharma, A. K., Ranalkar, M., Giri, R.K. (2015). Onset, advance and withdrawal of southwest monsoon over Indian subcontinent: A study from precipitable water measurement using ground based GPS receivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 122: 45–57.
- Ross, R. J., & Rosenfeld, S. (1997). Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for Global Positioning System applications. *Journal of Geophysical Research* 102(September): 21719-21730. doi:10.1029/97JD0180
- Ross, R. J., & Elliott, W. P. (2001). Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends. *J. Climate*, 14: 1602–1612.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)* 105(1): 279-298. doi:10.1007/bf02521844
- Satirapod, C., & Chalermwattanachai, P. (2005). Impact of Different Tropospheric Models on GPS Baseline Accuracy\_Case Study in Thailand. *Positioning Vol. 1 No. 9*.
- Singh R. P., Dey, S., Sahoo, A. K., Kafatos, M. (2004). Retrieval of water vapor using SSM/I and its relation with the onset of monsoon. *Annales Geophysicae*, 22(8): 3079–3083.
- Shi, J., Xu, C., Guo, J., & Gao, Y. (2015). Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3452–3459. doi:10.1109/TGRS.2014.2377041
- Shuanggen, J., & Luo, O. F. (2009). Variability and Climatology of PWV From Global 13-Year GPS Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(7): 1918-1924. doi:10.1109/tgrs.2008.2010401
- Suparta, W., & Iskandar, A. (2012). Monitoring of GPS Water Vapor Variability during ENSO Events over the Borneo Region. *Asian Journal of Earth Sciences* 5(3): 88-95. doi:10.3923/ajes.2012.88.95
- Suwantong, R., Srestasathien, P., Satirapod, C., Chuang, S., & Kitpracha, C. (2017). Mean atmospheric temperature model estimation for GNSS meteorology using AIRS and AMSU data. *Engineering and Applied Science Research* 44(1): 46-52.

- Takiguchi, H., Kato, T., Kobayashi, H., & Nakaegawa, T. (2000). GPS Observations in Thailand for Hydrological Applications. *Earth, Planets and Space* 52(11): 913-919. doi:10.1186/BF03352305
- Trakolkul, C., & Satirapod, C. (2020a). Analysis of PWV derived from the GNSS CORS stations for determining the onset of the southwest monsoon in Thailand. *International Journal of Geoinformatics* 16(2): 71-78.
- Trakolkul, C., & Satirapod, C. (2020b). Variations of Precipitable Water Vapor Using GNSS CORS in Thailand. *Survey Review* 53(376): 90-96. doi:10.1080/00396265.2020.1713611
- Trisirisatayawong I., Satirapod C., & Thamwittawas S. (2011). Post-seismic Plate Downlift in Thailand after 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. The 16th National Convention on Civil Engineering, 18-20 May 2011 The Zign Hotel Pattaya Chonburi.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Smith, L. (2005). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dyn.*, 24.
- Vey S., Dietrich, R., Fritsche, M., Rülke, A., Steigenberger, P., & Rothacher, M. (2009). On the homogeneity and interpretation of precipitable water time series derived from global GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D10101.
- Zhang, W., Lou, Y., Cao, Y., Liang, H., Shi, C., Huang, J., et al. (2019). Corrections of radiosonde-based precipitable water using ground-based GPS and applications on historical radiosonde data over China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 3208–3222. <https://doi.org/10.1029/2018JD029662>
- Zhao T., Wang, J., & Dai, A. (2015): Evaluation of atmospheric precipitable water from reanalysis products using homogenized radiosonde observations over China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120.
- กรมแผนที่ทหาร. (2019). ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Station) ในประเทศไทย [Online]. Available from: <https://geoportal.rtsd.mi.th/portal/apps/webappviewer/index.html?id=34f1f8f7a4be423897f0fb930f1dffa7> [31 พฤษภาคม 2563]

ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. (2560). วันเริ่มต้น-สิ้นสุดฤดูฝน และเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุม  
[Online]. Available from: <http://climate.tmd.go.th/content/article/411> [2 พฤศจิกายน 2563]

## รายชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยและคณะนักวิจัย

### คณะนักวิจัยไทย

1. ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ หัวหน้าโครงการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มือถือ 086-796-6629
2. นายโชคชัย ตระกลกุล ผู้ช่วยนักวิจัย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มือถือ 086-566-0859
3. นายประมินทร์ พิซิตการคำ ผู้ช่วยนักวิจัย  
สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

### คณะนักวิจัยจีน

4. Prof. Dr. Chuang Shi หัวหน้าโครงการ  
GNSS Research Center, Wuhan University
5. Dr. Yunchang Cao ผู้ช่วยนักวิจัย  
China Meteorological Administration, China
6. Prof. Dr. Yidong Lou ผู้ช่วยนักวิจัย  
GNSS Research Center, Wuhan University