

การใช้สัญญาณ GNSS ในการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือก
ในการระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมสำหรับประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE USE OF GNSS SIGNALS TO DETERMINE THE AMOUNT OF PRECIPITABLE WATER
VAPOR IN TROPOSPHERE TO DETERMINE AN ALTERNATIVE MONSOON ONSET DATE
FOR THAILAND



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Geomatic Engineering

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้สัญญาณ GNSS ในการหาปริมาณไอน้ำในชั้น บรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกในการระบุ วันเข้าสู่ฤดูมรสุมสำหรับประเทศไทย
โดย	นายโชคชัย ตระกลกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สลธิระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สลธิระพจน์)

..... กรรมการ
(ดร.ธีทัต เจริญกาลีญญา)

..... กรรมการ
(ดร.รงทศ ฉายากุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล)

โชคชัย ตรีภักดิ์ : การใช้สัญญาณ GNSS ในการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกในการระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมสำหรับประเทศไทย. (THE USE OF GNSS SIGNALS TO DETERMINE THE AMOUNT OF PRECIPITABLE WATER VAPOR IN TROPOSPHERE TO DETERMINE AN ALTERNATIVE MONSOON ONSET DATE FOR THAILAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

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

สำหรับเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมใช้ค่า PWV เฉลี่ยในวันที่ฝนตกในเดือน พฤษภาคม ปี 2007-2016 ของสถานีจันทบุรีเป็นตัวกำหนด ซึ่งพบว่าเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมเป็นวันที่ค่า GPS-PWV เฉลี่ยในเดือนพฤษภาคมสูงกว่า 58.5 มิลลิเมตร เป็นเวลา 3 วันติดต่อกัน หลังจากการทดสอบพบว่า เกณฑ์ใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีหลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วจะมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่อง และเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูดที่สูงขึ้น พบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดสอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่มากกว่าเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6071414521 : MAJOR GEOMATIC ENGINEERING

KEYWORD: Continuously Operating Reference Stations (CORS), Precipitable Water Vapor (PWV), Precise Point Positioning (PPP), Onset southwest monsoons

Chokchai Trakolkul : THE USE OF GNSS SIGNALS TO DETERMINE THE AMOUNT OF PRECIPITABLE WATER VAPOR IN TROPOSPHERE TO DETERMINE AN ALTERNATIVE MONSOON ONSET DATE FOR THAILAND. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

This research aims 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.

Field of Study: Geomatic Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้กับข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. อธิธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ธงทิศ ฉายากุล, ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา และ ผศ.ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้คำแนะนำในการศึกษาวิจัยครั้งนี้และ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยโดยสมบูรณ์ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอบพระคุณ พ่อ แม่ และครอบครัวที่คอยสนับสนุนในทุกด้าน และคอยเป็นกำลังใจให้ ขอบคุณ ผศ.ดร.สิริัญญา ทองชาติ และครอบครัว ที่แนะนำให้มาเรียน และสนับสนุนดูแลช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอบพระคุณ คุณชัยวัฒน์ ปานะชาติ กรมโยธาธิการและผังเมือง, กองบริการดิจิทัล อุดุณิยมหาวิทยาลัย อุดุณิยมหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ขอบคุณ คุณชัยยุทธ เจริญผล นิสิตปริญญาโทชั้นบัณฑิต ที่ช่วยเหลือในการทำงานรวมถึงช่วย แก้ปัญหาต่าง ๆ เกี่ยวกับข้อมูลที่ใช้และคำแนะนำในการประมวลผลข้อมูล พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ขอแสดงความดีของวิทยานิพนธ์ เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแต่บิดา มารดา ญาติพี่น้องและ คณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อประโยชน์ต่อสังคมและ ประเทศชาติสืบไป

โชคชัย ตระกลกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีทางอุตุนิยมวิทยา.....	6
2.1.1 ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere).....	6
2.1.2 อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	7
2.1.3 ความกดอากาศในแนวตั้ง.....	7
2.1.4 องค์ประกอบของบรรยากาศ.....	9
2.1.5 ลม และการไหลเวียน.....	9
2.1.6 ปรากฏการณ์ ENSO.....	14
2.2 The Microwave Radio meter (MWR)	17
2.3 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite Systems, GNSS).....	18

2.3.1 ระบบดาวเทียม GPS.....	19
2.3.2 ระบบดาวเทียม GLONAS.....	20
2.4 การล่าช้าอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay)	21
2.4.1 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)....	21
2.4.2 การหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GPS โดยใช้ค่าอุณหภูมิ เฉลี่ยท้องถิ่น (Deriving PWV from GNSS with Local Mean Temperature)	22
2.5 อนุกรมเวลา (Time series).....	24
2.6 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 การเตรียมข้อมูล	30
3.1.1 ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม	30
3.1.2 ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก่น้ำหนักดาวเทียม.....	31
3.1.3 ข้อมูลอุณหภูมิ และความกดอากาศ	32
3.1.4 ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางลม และความเร็วลม	32
3.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล	32
3.2.1 ประมวลผลค่าความคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD)	32
3.2.2 ขั้นตอนการแปลงข้อมูล ZTD เป็น PWV	34
3.3 การวิเคราะห์ผล	35
3.3.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของ PWV	35
3.3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน	36
3.3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็ว ลม.....	36
3.3.4 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย	36

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	39
4.1 ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในประเทศไทย	39
4.1.1 วิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle).....	41
4.1.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน	48
4.1.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลมในช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้	50
4.2 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย	51
4.2.1 วิเคราะห์หาช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน.....	52
4.2.2 ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม	53
4.2.3 การทดสอบการใช้ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการศึกษา	57
5.1.1 รูปแบบความแปรปรวนของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV).....	57
5.1.2 เกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมจากข้อมูล PWV.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ความรุนแรงของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงปี โดยในช่องด้านซ้ายคือปีที่เกิดเอลนีโญ และในช่องด้านขวาคือปีที่เกิดลานีญา.....	16
ตารางที่ 3-1 รายละเอียดชื่อและพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) ของกรมโยธาธิการ.....	30
ตารางที่ 3-2 รายละเอียดชื่อ รหัสและพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการศึกษา...	32
ตารางที่ 3-3 ประกาศวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ปี 2007 - 2016 ...	37
ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ของค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Function Model ในการวิเคราะห์แนวโน้ม และองค์ประกอบตามฤดูกาล ซึ่งวิธีการ Robust Fit มีความเหมาะสมกว่าวิธี 2SD ซึ่งดูได้จากค่า RMSE ที่มีค่าน้อยกว่า.....	40
ตารางที่ 4-2 ค่าแอมพลิจูด, การเปลี่ยนแปลงเฟส และแนวโน้มของ PWV ซึ่งในส่วนของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้ม PWV เพิ่มขึ้นบอกได้ถึงแนวโน้มในอนาคตที่ปริมาณฝนจะตกมากขึ้น ในขณะที่สถานีในภาคกลาง, ภาคตะวันออก และภาคใต้ลดลง แสดงถึงแนวโน้มปริมาณฝนที่น้อยลงในอนาคต.....	41
ตารางที่ 4-3 ระยะห่างระหว่างสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยากับสถานี GNSS CORS.....	49
ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนของสถานีจันทบุรี (CHAN) ในเดือนพฤษภาคมของปี 2007-2016 สำหรับวันที่มีฝนตก และวันที่ฝนไม่ตก มีค่าเท่ากับ 58.50 และ 54.50 ตามลำดับ	53
ตารางที่ 4-5 วันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ได้จากการใช้เกณฑ์ใหม่ สำหรับปี 2007-2016 เมื่อมีค่าเกณฑ์ของ PWV เท่ากับ 58.50 มม. หรือมากกว่านั้นติดต่อกัน 3 วัน และเกณฑ์เดิมของกรมอุตุนิยมวิทยา.....	55

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 จุดสีแดงแสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 11 สถานีทั่วประเทศไทย.....	4
ภาพที่ 2-1 The Barometric Formula.....	8
ภาพที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอากาศขณะเกิดลมบกในเวลากลางวัน	10
ภาพที่ 2-3 ลมมรสุมฤดูร้อน (summer monsoon).....	11
ภาพที่ 2-4 ลมมรสุมฤดูหนาว (winter monsoon).....	11
ภาพที่ 2-5 สถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย ตอนกลางและตอนบนของประเทศ จำนวน 96 สถานี (แรงงาสีฟ้า) ที่ใช้ในการพิจารณาวันที่ฝนตกสำหรับเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม ในส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาในภาคใต้ ไม่นำมาคิดเนื่องจากภาคใต้มีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี	14
ภาพที่ 2-6 Oceanic Niño Index (ONI) แสดงถึงปรากฏการณ์เอลนีโญ (สีแดงด้านบนของกราฟ) และปรากฏการณ์ลานีญา (สีฟ้าด้านล่างของกราฟ).....	16
ภาพที่ 2-7 เครื่องตรวจวัดไอน้ำด้วยรังสีไมโครเวฟ (The Microwave Radio meter: MWR).....	17
ภาพที่ 2-8 ค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (ในกรอบสี่เหลี่ยม) จากข้อมูล MWR ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ฝนตกในกรณีนี้เกิดจากหยดน้ำเกาะอยู่บริเวณส่วนบนของเสาอากาศ	18
ภาพที่ 2-9 ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS.....	19
ภาพที่ 3-1 การใช้โปรแกรม rtkget ดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก้नाฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS	31
ภาพที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
ภาพที่ 3-3 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลในงานวิจัย	38
ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธีใช้ค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2SD).....	39
ภาพที่ 4-2 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธี Robust Fit กากบาทสีแดงคือค่าผิดปกติที่ตรวจเจอ ...	40
ภาพที่ 4-3 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV แปรผกผันกับค่าระดับความสูง (msl.).....	42

ภาพที่ 4-4 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV ในทุกสถานีรับสัญญาณ GNSS (สามเหลี่ยมสีแดง) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ย PWV มีค่าสูงในส่วนของภาคใต้ และน้อยลงในส่วนของภูมิภาคที่สูงขึ้นไป .. 42

ภาพที่ 4-5 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคเหนือ (CHMA & UTTD) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก..... 43

ภาพที่ 4-6 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดเชียงใหม่และอุดรดิตถ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHMA และ UTTD..... 43

ภาพที่ 4-7 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (UDON, NKRM & SISK) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก..... 44

ภาพที่ 4-8 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดอุดรธานี, นครราชสีมา และศรีสะเกษ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี UDON, NKRM และ SISK 44

ภาพที่ 4-9 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคกลาง (DPT9 & NKSW) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม.และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ 45

ภาพที่ 4-10 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดกรุงเทพฯ และนครสวรรค์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี DPT9 และ NKSW..... 45

ภาพที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคตะวันออกและตะวันตก (CHAN & PJRK) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ..... 46

ภาพที่ 4-12 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดจันทบุรี และประจวบคีรีขันธ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHAN และ PJRK..... 46

ภาพที่ 4-13 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคใต้ (SOKA & SRTN) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ..... 47

ภาพที่ 4-14 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดสงขลา และสุราษฎร์ธานี แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี SOKA และ SRTN..... 47

ภาพที่ 4-15 แสดงตำแหน่งสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา 49

ภาพที่ 4-16 แสดงค่า PWV ของสถานี CHAN (จุดสีน้ำเงิน) กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (กราฟแท่งสีเขียว) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดในช่วงฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง ตุลาคม (แถบแรเงา) 50

ภาพที่ 4-17 แสดงแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) จากสถานีจันทบุรี (CHAN) ช่วงเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016..... 51

ภาพที่ 4-18 กราฟแท่งสีฟ้าแสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนตก และกราฟแท่งสีส้มแสดงค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนสำหรับวันที่ฝนไม่ตก ในปี 2011 และ 2012..... 52

ภาพที่ 4-19 ภาพบน CDF Plot แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่มีฝนตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. ซึ่งมีจำนวนถึง 50% ในขณะที่ภาพล่างมีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ฝนไม่ตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. อยู่เพียง 20% 54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานอุตุนิยมวิทยา เป็นงานที่สำคัญงานหนึ่งซึ่งว่าด้วยการศึกษาเกี่ยวกับบรรยากาศของโลก โดยเน้นการพยากรณ์อากาศและกระบวนการของสภาพอากาศ ปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมวิทยาเป็นเหตุการณ์เกี่ยวกับสภาพอากาศที่สังเกตได้ ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดจากความแปรผันของปัจจัยที่มีอยู่ในบรรยากาศของโลก อาทิเช่น อุณหภูมิ ความกดอากาศ ไอน้ำ รวมถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ปฏิกริยาของตัวแปร และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ต่างกัน เป็นต้น จากการสังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ดังนั้นการติดตามสภาพภูมิอากาศจึงมีความสำคัญมาก เพราะสามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่อาจส่งผลกระทบต่อในอนาคตได้ โดยความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลาสั้น ๆ เพียงไม่กี่วันหรือระยะเวลาปีต่อปีนั้น พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหลากหลายรูปแบบ ซึ่งเรียกรวมการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในลักษณะนี้ว่า “สภาพภูมิอากาศแปรปรวน” ตัวอย่างของสภาพภูมิอากาศแปรปรวนที่มักพบและเห็นได้ทั่วไปอยู่เสมอ คือ ฤดูฝนปีนี้ฝนตกมาก ปีนี้แล้งจัด ปีนี้ฝนทิ้งช่วงนานกว่าปกติ หรือปีนี้มีพายุใหญ่หลายลูกมากกว่าปกติ เป็นต้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นการพิจารณาสภาพความแปรปรวนของภูมิอากาศดังกล่าวข้างต้น จึงควรพิจารณาด้วยระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น เป็นระยะเวลาหลาย ๆ ปี เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยชุดข้อมูลการสังเกตเป็นระยะเวลาที่ยาวนานหลายสิบปีหรือมากกว่านั้น จะทำให้เห็นว่า ความถี่หรือความรุนแรงของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในแต่ละเหตุการณ์เกิดขึ้นเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และมีค่าเฉลี่ยคงที่ภายใต้ขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดที่ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับภาพรวมทั้งหมดตลอดช่วงของการวิเคราะห์

ประเทศไทยได้รับอิทธิพลของลมทะเลตามฤดูกาลที่มีการนำพาไอน้ำเข้าสู่ฝั่ง ตัวอย่างลมทะเลเหล่านี้คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะพัดเข้าสู่ประเทศไทยหลังจากหมดอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้แล้ว ประมาณกลางเดือนตุลาคม มรสุมนี้มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงบนซีกโลกเหนือ แถบประเทศมองโกเลียและจีน จึงพัดพาเอามวลอากาศเย็นเข้ามาปกคลุมประเทศไทยจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ทำให้ท้องฟ้าโปร่ง

อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้จะมีฝนชุกโดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากมรสุมนี้นำความชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้ามาปกคลุม การเริ่มต้นและสิ้นสุดมรสุมทั้งสองชนิดอาจผันแปรไปจากปกติได้ในแต่ละปี ซึ่งประกาศการเข้าสู่ฤดูมรสุมในประเทศไทยหน่วยงานที่รับผิดชอบ คือ กรมอุตุนิยมวิทยา โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาจากจำนวนวันที่ฝนตก และปริมาณน้ำฝนในแต่ละวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้งหมดจำนวน 96 สถานีในตอนกลางและตอนบนของประเทศ (จำนวนฝนที่ตกต้องมากกว่า 60% ของสถานีทั้งหมดจึงจะถือว่าเข้าสู่เกณฑ์ดังกล่าว) การกำหนดเวลาของการเริ่มและการถอนตัวของมรสุมดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนทั้งด้านการบริหารจัดการน้ำของหน่วยงานภาครัฐและประกอบการตัดสินใจในการปลูกพืชของเกษตรกร โดยเฉพาะเกษตรกรที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่ชลประทาน ทำเกษตรกรรมโดยอาศัยปริมาณน้ำฝนเพียงอย่างเดียว ทำให้เกษตรกรต้องใช้เวลาในการเพาะปลูกให้เหมาะสมกับช่วงที่มีฝนตกสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อช่วงระยะเวลาของการเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม อาทิเช่น ปรากฏการณ์ ENSO (ปรากฏการณ์ El Niño-La Niña) ที่อาจส่งผลให้ช่วงเวลาตามฤดูกาลอาจสั้นกว่าหรือยาวกว่าปกติอย่างไม่สม่ำเสมอได้ ดังนั้นการระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมที่แม่นยำจึงเป็นประเด็นที่สำคัญ

การศึกษาสภาพภูมิอากาศระดับโลก ระดับภูมิภาค และระดับท้องถิ่นในปัจจุบันใช้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) เป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ (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) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำไปใช้ศึกษาการเกิดของพายุ วัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของน้ำ และนำไปใช้กับแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลข (Numerical Weather Prediction: NWP) (Bevis et al., 1992) ด้วยการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลการสังเกตการณ์สภาพอากาศด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถพยากรณ์สภาพอากาศในอนาคตได้ โดยแบบจำลอง NWP ได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของแบบจำลองทางกายภาพที่ซับซ้อนและได้รับการพิสูจน์แล้วว่ารวบรวมข้อมูลไอน้ำ

จากเซ็นเซอร์อิสระอื่น ๆ ลงในแบบจำลอง NWP สามารถปรับปรุงความสามารถในการพยากรณ์สภาพอากาศของเซิร์ฟเวอร์สำหรับการพยากรณ์ได้แม่นยำขึ้น (Chen & Liu, 2014)

นอกจากนี้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณ GPS ภาคพื้นดิน (GPS-PWV) นั้นมีระดับความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา (Lu et al., 2015) อาทิเช่น เครื่องวิทยุหึ่งอากาศ (Radiosonde: RS), เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave Radiometer: MWR) หรือข้อมูลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำตัวแปรค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จาก GPS มาเป็นตัวแปรสำคัญในการระบุช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูฝนเป็นครั้งแรกในประเทศไทยที่ใช้ GPS-PWV ในการศึกษา (Takiguchi et al., 2000) โดยใช้ข้อมูลจากสถานี GPS จำนวน 5 แห่งเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 4 เดือน (เดือนมี.ค.-มิถุนายน 2541) และเปรียบเทียบค่า PWV กับค่า radiosonde (Sonde-PWV) การศึกษาต่อมาได้มีการนำค่า PWV จากการเก็บข้อมูลที่ยาวนานขึ้น เป็นระยะเวลา 3 ปีมาใช้ในการวิเคราะห์ (Nithiwatthn Choosakul, 2005) โดยการศึกษาล่าสุดมีการทดลองใช้ GPS-PWV เพื่อศึกษา วิธีการใหม่ในการระบุการเริ่มต้นและการถอนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Uang-aree et al., 2015)

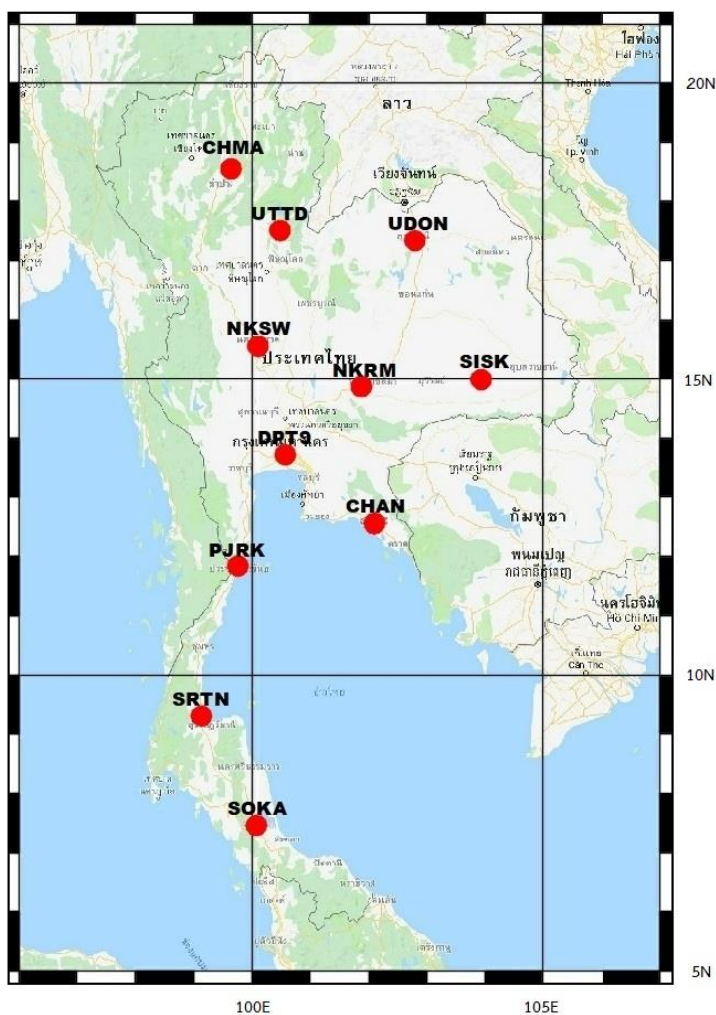
โดยใช้ค่า PWV จากข้อมูล GPS ที่เก็บรวบรวมจากเครื่องรับ GPS 4 แห่ง ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นเวลา 7 ปี (2007-2014) จากการศึกษาที่ผ่านมพบว่า ค่า PWV ถือได้ว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการระบุช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุม แต่ด้วยการศึกษาที่ผ่านมาจำนวนสถานีที่เก็บข้อมูลและนำมาใช้ในการวิเคราะห์ยังไม่ครอบคลุมทั้งประเทศ รวมถึงระยะเวลาของการเก็บข้อมูลที่ยาวนานที่สุดเป็นเวลา 7 ปี แต่ครอบคลุมพื้นที่เพียงภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำมากขึ้นในการระบุช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมที่สอดคล้องกับบริบทในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา การใช้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่ได้จาก GPS ในรูปแบบอนุกรมเวลา (GPS-PWV time-series) โดยใช้สถานีที่ครอบคลุมทั่วประเทศ (11 สถานีและระยะเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ยาวนานที่สุดในปัจจุบัน (ระยะเวลา 10 ปี) ร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ เพื่อระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทยรวมถึงการศึกษามลกระทบของตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรังวัดสัญญาณ GPS ภาคพื้นดินที่มีผลต่อค่า PWV ในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางเลือกแก่หน่วยงานราชการในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการผันแปรของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ในระยะยาว เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ในการศึกษาวิจัยใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศไทย ทำการรับสัญญาณพร้อมกันทุก ๆ 5 วินาทีต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2007–2016



ภาพที่ 1-1 จุดสีแดงแสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 11 สถานีทั่วประเทศไทย

1.3.2 ในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย Position and Navigation Data Analyst (PANDA) ซึ่งพัฒนาโดย GNSS analysis center มหาวิทยาลัยวูฮั่น สาธารณรัฐประชาชนจีน ประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ Precipitable Water Vapor (PWV) โดยโปรแกรมสามารถหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ทุก 2 ชั่วโมงต่อวัน โดยใช้สมการ Mapping Function แบบ Global Mapping Function (GMF) ในการการประมาณค่า

คลาดเคลื่อนในแนวตั้ง Zenith Total Delay (ZTD) และใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในการแปลงค่า ZTD ไปเป็นค่า PWV

1.3.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ที่ได้จากการประมวลผล เพื่ออธิบายถึงลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา รวมถึงระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย และการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย

1.4.2 การระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุมที่แม่นยำสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนด้านการเกษตรและบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลิตผลทางการเกษตรโดยเฉพาะพืชไร่ซึ่งเป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย เช่น ในกรณีของการปลูกข้าวสำหรับเกษตรกรที่ไม่อยู่ในพื้นที่ชลประทานต้องอาศัยฝนในการทำนาข้าวก็ต้องการณ ระยะเวลาการปลูกข้าวให้เหมาะสมกับช่วงที่มีฝนตกสม่ำเสมอ ถ้ามรสุมมาช้ากว่าปกติหรือมาช้ากว่าที่ทางการประกาศ เกษตรกรปลูกข้าวไปแล้วไม่มีน้ำฝนหรือฝนขาดช่วงทำให้ผลิตผลเสียหาย หรือกรณีที่มีมรสุมมาเร็วกว่าปกติ ส่งผลให้เกษตรกรมีเวลาเตรียมดินน้อยไม่มีเวลาสำหรับการตากดินเพื่อทำลายวัชพืช เมื่อกว่านเมล็ดข้าวลงไปแล้วอาจเสียหายเนื่องจากมีวัชพืชในแปลงนามาก เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีทางอุตุนิยมวิทยา

อุตุนิยมวิทยาเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับบรรยากาศและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง การพยากรณ์อากาศจำเป็นต้องใช้สภาวะอากาศในปัจจุบันเป็นข้อมูลเริ่มต้น โดยได้มาจากการตรวจสอบสภาวะอากาศ ทั้งการตรวจอากาศผิวพื้นและการตรวจอากาศชั้นบนในระดับความสูง ซึ่งชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีไอน้ำอยู่และกระบวนการในบรรยากาศเนื่องจากไอน้ำเกิดขึ้นเฉพาะในชั้นนี้ โดยสิ่งสำคัญที่ต้องทำการตรวจเพื่อพยากรณ์อากาศได้แก่ อุณหภูมิ ความกดอากาศ ความชื้น ลม เมฆและฝน อีกทั้งการพยากรณ์อากาศจำเป็นต้องใช้ข้อมูลผลการตรวจอากาศในบริเวณนั้นร่วมกับผลการตรวจอากาศจากบริเวณที่อยู่โดยรอบด้วย เพราะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทฤษฎีทางอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้องกับไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีดังนี้

2.1.1 ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere)

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หมายถึง บรรยากาศชั้นแรกสุดที่อยู่ถัดจากพื้นโลกขึ้นไป บรรยากาศในชั้นนี้มีความหนาแน่นมากที่สุดถึงร้อยละ 80 ของมวลบรรยากาศ ปริมาณไอน้ำเกือบทั้งหมดของบรรยากาศจะปรากฏอยู่ในชั้นนี้รวมทั้งปรากฏการณ์สำคัญ ๆ ทางธรรมชาติที่เกี่ยวกับลมฟ้าอากาศ เช่น เมฆ หมอก ฝน หิมะ ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง พายุต่าง ๆ ก็ล้วนแต่เกิดขึ้นเฉพาะในบรรยากาศนี้เท่านั้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอากาศในชั้นนี้มีทั้งในแนวราบและแนวตั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตอนบน จะมีกระแสลมพัดอย่างรุนแรงที่เรียกว่า ลมกรด (jet stream) ซึ่งมีความเร็วลมมากกว่า 80 เมตรต่อวินาที 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 ซึ่งการลดลงของอุณหภูมินี้จะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานที่และระยะเวลา อาทิเช่น ชั้นโทรโพสเฟียร์ชั้นล่างมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 6-7 °C ต่อกิโลเมตร และ 7-8 °C ต่อกิโลเมตรในชั้นบนตามลำดับ ส่วนชั้นโทรโพสเฟียร์ชั้นบนอุณหภูมิอากาศจะลดลงเหลือ -50 ถึง -60 °C เป็นต้น

2.1.2 อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

จากงานวิจัยของ Davis et al. (1985) รายงานว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เคลวิน, K) ดังแสดงในสมการ (1)

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

จากสมการที่ 1 เมื่อ

P_v = แร่งดันไอน้ำในหน่วย มิลลิบาร์ (1 มิลลิบาร์ = 1 Hectopascal (hPa))

T = อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในหน่วย เคลวิน (K)

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

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

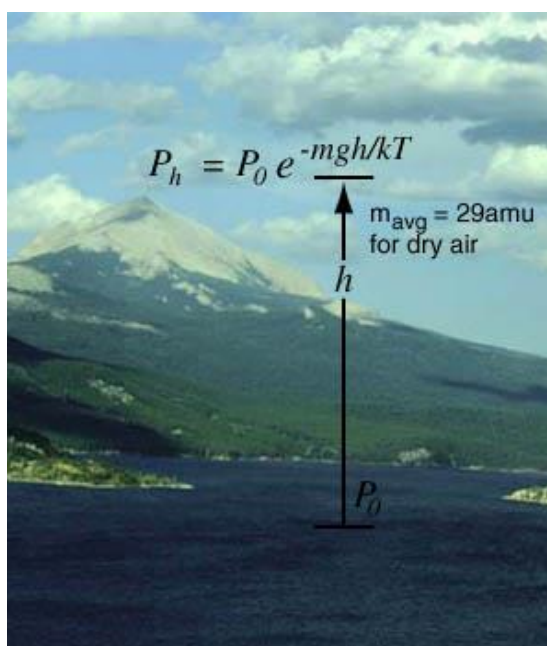
เมื่อ a เป็นสัมประสิทธิ์การถดถอย และ C เป็นค่าคงที่

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 ขึ้นอยู่กับการได้ข้อมูลของค่า T_m ซึ่งเป็นค่าเฉพาะไซต์และขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานี

2.1.3 ความกดอากาศในแนวตั้ง

ความกดอากาศ (Air pressure) คือ น้ำหนักของอากาศที่กดทับกันลงมาด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ความกดอากาศเกิดขึ้นจากน้ำหนักของอากาศที่รวมตัวกันเป็นบรรยากาศโลก ซึ่งจะมีค่าลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นเหนือพื้นโลก และความกดอากาศจะมีแรงดัน

ออกเท่ากันทุกทิศทาง โดยข้อมูลความกดอากาศนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่ต้องตรวจวัดเพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศ ในการศึกษาทางอุตุนิยมวิทยาการตรวจวัดค่าความกดอากาศตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า บารอมิเตอร์ปรอท (Mercury Baromete) เป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดความกดอากาศในการรายงานสภาพอากาศ การลดลงของความกดอากาศตามความสูงสามารถคาดการณ์ได้จากสมการความกดอากาศ (barometric formula) ดังสมการ (3) และภาพที่ 2-1 (Nave, 2001; Stull, 2000)



ภาพที่ 2-1 The Barometric Formula

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Nave, 2001)

จากภาพที่ 2-1 Barometric Formular, แสดงได้ดังสมการที่ (3)

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

จากสมการที่ 3

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)

2.1.4 องค์ประกอบของบรรยากาศ

บรรยากาศของโลก คือ อากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่โดยรอบ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญสองส่วน คือ อากาศแห้งและอากาศชื้น โดยอากาศแห้งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ประกอบด้วยไนโตรเจน 78%, ออกซิเจน 21% และก๊าซอื่น ๆ 1% เป็นสภาพอากาศที่ไม่มีไอน้ำอยู่เลย อากาศชื้นเป็นส่วนผสมของอากาศแห้งและไอน้ำ (Danielson et al., 2003) เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวโลกและการคายน้ำของพืช ไอน้ำเป็นตัวการที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น เมฆ หมอก น้ำค้าง ฝน หิมะ เป็นต้น ปริมาณไอน้ำในอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิมีสองไอน้ำในอากาศจะมีมาก แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำไอน้ำในอากาศจะมีน้อย และถ้าอากาศไม่สามารถรับไอน้ำได้ จะเรียกว่า เกิดสภาวะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ โดยการวัดค่าความชื้นในอากาศนิยมวัดใน 2 รูปแบบ ได้แก่

2.1.4.1 การวัดความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)

คือ การวัดอัตราส่วน (เป็นร้อยละ) ของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศในขณะนั้น ต่อ ปริมาณไอน้ำที่อาจจะมีอยู่ได้ เมื่ออากาศนั้น อิ่มตัวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือ “อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริง ต่อ ความดันไอน้ำอิ่มตัว” มีหน่วยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) โดยอากาศอิ่มตัวจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 100 % หมายถึงความชื้นที่มีไอน้ำอยู่เต็มอากาศ เช่น ในช่วงที่ฝนตกใหม่ ๆ อาจจะมีค่าความชื้นที่สูงเกือบ 100% เป็นต้น

2.1.4.2 การวัดความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity)

คือ การวัดปริมาณของไอน้ำในอากาศเป็นกรัมต่อ อากาศชื้นหนัก 1 กิโลกรัม หรือ อัตราส่วนระหว่างมวลน้ำที่มีอยู่จริง ต่อ ปริมาตรอากาศ

2.1.5 ลม และการไหลเวียน

ลม หมายถึง อากาศที่เคลื่อนที่ไปบนผิวโลกตามแนวนอนในทุกทิศทาง และด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน ทิศทางของลมทราบได้จากทิศซึ่งลมพัดเข้าหาตัว เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของพื้นที่สองแห่ง โดยอากาศจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (ความกดอากาศสูง) ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (ความกดอากาศต่ำ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง อากาศร้อนจะมีการขยายตัว ความหนาแน่นลดลง ความกดอากาศจะต่ำ อากาศจะลอยตัวสูงขึ้น ส่วนบริเวณที่มีอากาศเย็น จะหนักกว่าหรือ มีความหนาแน่นมากกว่าจึงไหลเข้ามาแทนที่อากาศร้อนทำให้เกิดลมขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)

2.1.5.1 ลมบก (LAND BREEZE)

ลมบกเป็นลมประจำถิ่นซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความกดอากาศระหว่างทะเลกับแผ่นดิน เกิดในเวลากลางคืน พื้นดินจะคายความร้อนที่เก็บสะสมไว้ก่อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งร้อนกว่าพื้นดินจะลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นดินซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ (ดังภาพที่ 2-2) ทำให้เกิดเป็นลมพัดจากชายฝั่งไปสู่ทะเล เรียกว่า ลมบก มีความแรงของลมน้อยกว่าลมทะเล จึงไม่สามารถพัดออกสู่ทะเลได้ระยะทางไกลเหมือนลมทะเล คือ ได้ระยะทางเพียง 8-10 กิโลเมตร

2.1.5.2 ลมทะเล (Sea Breeze)

ลมทะเลเกิดขึ้นในเวลากลางวันตามชายฝั่งทะเล ในลักษณะตรงกันข้ามกับลมบก คือในเวลากลางวัน เมื่อพื้นดินได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นน้ำ และอากาศเหนือพื้นดินเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวลอยขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ เกิดลมจากทะเลพัดหาฝั่ง เรียกว่า ลมทะเล ซึ่งจะเริ่มพัดในเวลาประมาณ 10.00 น. ลมทะเลมีความแรงมากกว่าลมบก จึงสามารถพัดได้เข้าหาฝั่งได้ระยะไกลถึง 16-48 กิโลเมตร

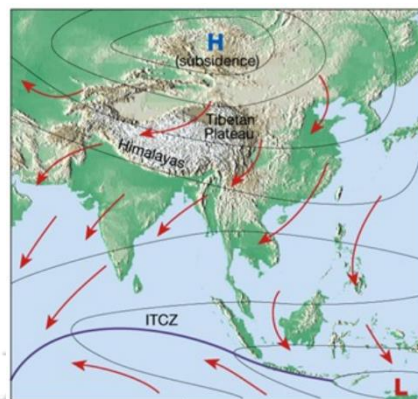


ภาพที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอากาศขณะเกิดลมบกในเวลากลางคืน

2.1.5.3 ลมมรสุม (MONSOON)

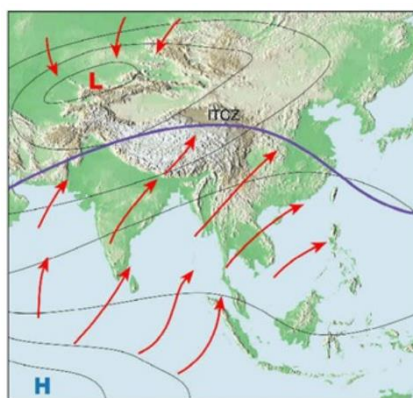
ลมมรสุม คือ ลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางไปกับการเปลี่ยนฤดู คือ ฤดูร้อนจะพัดในทิศทางหนึ่ง และจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว โดยการเรียกมาจากคำในภาษาอาหรับว่า “Mausim” ซึ่งแปลว่า “ฤดู” เป็นลมที่พัดในบริเวณทะเลอาหรับ ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะเวลา 6 เดือน และพัดอยู่ในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้เป็นระยะเวลา 6 เดือน ส่วนลมมรสุมที่เกิดในส่วนอื่นของโลกที่เด่นชัดได้แก่ ลมมรสุมที่เกิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียใต้ ซึ่งลักษณะการเกิดลมมรสุมนี้เกิดในลักษณะเดียวกันกับการเกิดลมบกลมทะเล คือ ลมมรสุมฤดูหนาว (winter monsoon) เป็นลมที่พัดจากใจกลางทวีปที่มีความกดอากาศสูง (บริเวณไซบีเรีย) ไปสู่ทะเลหรือบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ (บริเวณมหาสมุทรอินเดีย) อากาศเหนือมหาสมุทรอินเดีย

ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณไซบีเรียจะลอยตัวสูงขึ้น และอากาศบริเวณไซบีเรียจะไหลเข้าไปแทนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ดังภาพที่ 2-3) อากาศที่ไหลออกจากบริเวณความกดอากาศสูงไซบีเรียเป็นอากาศที่ไหลจมลง และทิศทางการลมจะเบนไปทางขวานำความหนาวเย็นและแห้งแล้ง ลักษณะท้องฟ้าแจ่มใส เรียกว่า ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดอยู่นาน 6 เดือน คือ ระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนมีนาคม พัดผ่านเข้าไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงและเอเชียใต้



ภาพที่ 2-3 ลมมรสุมฤดูหนาว (winter monsoon)
(Small, 2011)

ในฤดูร้อนลมจะพัดเปลี่ยนในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ลมมรสุมฤดูร้อน (summer monsoon) เป็นลมที่พัดจากทะเลเข้าสู่แผ่นดินและนำความชุ่มชื้นหรือฝนจากทะเลมาสู่แผ่นดิน โดยในช่วงฤดูร้อนอากาศภาคพื้นทวีปอุ่นกว่าพื้นน้ำ ซึ่งทำให้ภาคพื้นทวีปเป็นเขตความกดอากาศต่ำ พื้นน้ำเป็นเขตความกดอากาศสูง เกิดลมพัดจากพื้นน้ำที่เป็นเขตความกดอากาศสูงเข้าสู่พื้นดินที่เป็นเขตความกดอากาศต่ำ ในทิศทวนเข็มนาฬิกา กลายเป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยจะพัดอยู่นาน 6 เดือน คือ ระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนกันยายน (ดังภาพที่ 2-4)



ภาพที่ 2-4 ลมมรสุมฤดูร้อน (summer monsoon)
(Small, 2011)

ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะได้รับอิทธิพลของลมมรสุมที่มีกำลังแรงแต่มีความแตกต่างกัน โดยในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้รับอิทธิพลของลมมรสุมฤดูหนาว (ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ) ที่มีกำลังแรงกว่าและมีทิศทางที่คงที่กว่า ความเร็วลมตามชายฝั่งในเดือนมกราคมสูงกว่าเดือนกรกฎาคมหลายเท่า ส่วนกลุ่มประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้แก่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ไต้หวัน ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี ส่วนประเทศในเอเชียใต้รวมถึงประเทศอินเดีย ปากีสถาน และประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะได้รับอิทธิพลโดยตรงจากลมมรสุมในฤดูร้อน (ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้) เท่านั้น เนื่องจากเทือกเขาหิมาลัยขวางกั้นอยู่ ทำให้ลมมรสุมฤดูหนาวไม่สามารถแผ่เข้าไปถึงดินแดนเหล่านี้ได้

สำหรับประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองฤดู คือ ในช่วงฤดูฝน ได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในช่วงประมาณต้นเดือนพฤษภาคมจนถึงต้นเดือนตุลาคม และในช่วงฤดูหนาวได้รับอิทธิพลของ ช่วงประมาณปลายเดือนตุลาคมจนถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ ลมจะเปลี่ยนทิศเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งการเริ่มต้นและการถอนตัวของฤดูมรสุมนั้น มีปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณา ทั้งนี้ Matsumoto (1997) ได้ทำการตรวจสอบการเริ่มต้นและการถอนตัวของฤดูร้อนและฤดูฝนในคาบสมุทรอินโดจีนโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝน พบว่า ในประเทศไทยผลกระทบของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะมีขึ้นที่จุดเริ่มต้นของช่วงต้นเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนพฤษภาคม ในกรณีที่ฝนตกชุกปลายฤดูมรสุมจะเกิดขึ้นในช่วงปลายเดือนกันยายนในช่วงที่มีลมแรงพัดเข้าสู่ช่วงฤดูหนาว และ Kiguchi and Matsumoto (2005) ได้ให้ข้อแนะนำถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ในช่วงต้นหรือช่วงกลางเดือนพฤษภาคม สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้จุดเริ่มต้นของฤดูมรสุมในเอเชียและลมมรสุมฤดูร้อนหลักของประเทศไทยคือลมในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นจึงอาจเรียกว่ามรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Rangsun Arpakupphakul, 2004) ขยายความลมมรสุมฤดูร้อนหลักของประเทศไทยคือลมในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นจึงอาจเรียกว่ามรสุมตะวันตกเฉียงใต้

(กรมอุตุนิยมวิทยา, ม.ป.ป.) รายงานว่าเริ่มต้นประมาณกลางเดือนพฤษภาคม เมื่อมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทย และร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทย ทำให้มีฝนชุกทั่วไป ส่วนฤดูหนาวจะเริ่มต้นประมาณกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ เมื่อมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดปกคลุมประเทศไทย ดังนั้นฤดูหนาวสามารถแสดงได้โดยช่วงเวลาอิทธิพลของลมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยการประกาศเข้าสู่ฤดูฝนอย่างเป็นทางการของประเทศไทยนั้น ประกาศตามเกณฑ์ของ ศูนย์ภูมิภาค การอุตุนิยมวิทยา (2560) โดยมีเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมจากการพิจารณาจากจำนวนวันที่มีฝนตกใน 3 และ 5 วัน ดังนี้

1. ในระยะ 5 วันใด ๆ จะต้องมีการฝนตก 3 วัน ที่ต่อเนื่องกันหรือไม่ต่อเนื่องกันก็ได้ โดยปริมาณฝนใน 3 วันดังกล่าว ในแต่ละวันจะต้องมีฝนตกไม่น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรวมใน 5 วันนั้นต้องไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

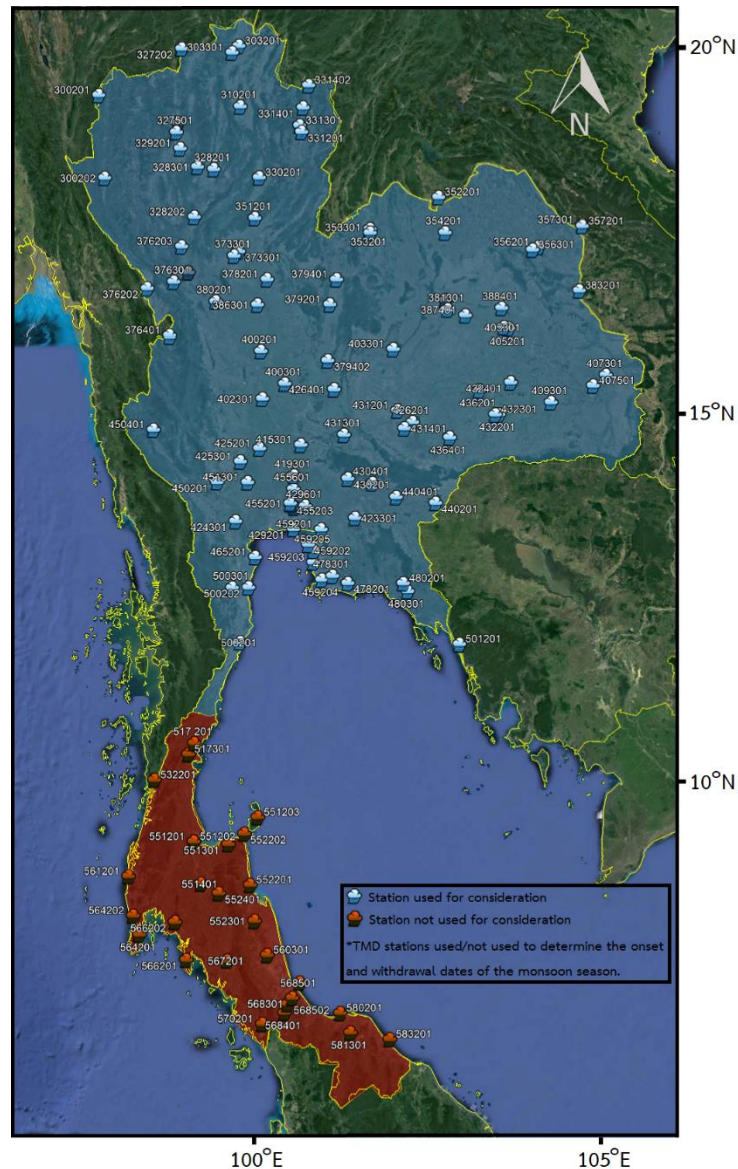
2. เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวเป็นของประเทศอินเดีย เมื่อนำมาใช้กับประเทศไทยจะต้องพิจารณาการเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ด้วย กล่าวคือ เริ่มต้นประมาณเดือนพฤษภาคมและสิ้นสุดประมาณเดือนตุลาคมมาประกอบจึงจะสมเหตุสมผล

3. ค่าที่ได้เป็นช่วงวันที่เริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 1 เกิดขึ้นและต่อเนื่องกันไปถือเป็นการเริ่มต้นของฤดูมรสุม แต่ถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 1 แล้วฝนลดน้อยถอยลงไป ถือว่าสิ้นสุดฤดูมรสุม

4. การเริ่มต้นและสิ้นสุดของฤดูมรสุมในข้อ 2 อาจจะมาเร็วหรือช้ากว่ากำหนดได้ ทั้งนี้เพราะภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกมากกว่าภาคอื่น ๆ

หมายเหตุ สำหรับการพิจารณาจำนวนวันที่มีฝนตกในข้อ 1 ทางศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา ได้พิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนในเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน จะนับตั้งแต่เวลา 07.00 น. จนถึงเวลา 07.00 น. ของวันถัดไป จากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้งหมดจำนวน 96 สถานีในตอนกลางและตอนบนของประเทศ ตั้งแต่ภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคอีสานและภาคเหนือ (ภาพที่ 2-5) ซึ่งจะต้องมีฝนตกจำนวน 60% ของสถานีทั้งหมด จึงจะถือว่าเข้าสู่เกณฑ์ดังกล่าว ในส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาในภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเช่นเดียวกับในภาคอื่น แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำพาความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้ภาคใต้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ และมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นในเกณฑ์การพิจารณาการเข้าสู่ช่วงฤดูมรสุมนี้ จึงไม่นำข้อมูลสถานีในภาคใต้มาใช้ในการพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม

Fasullo and Webster (2002) ตรวจสอบการเริ่มต้นมรสุมอินเดียขนาดใหญ่พบว่าไอน้ำ เมฆและปริมาณน้ำฝน มีบทบาทสำคัญที่ต่อวงจรอุทกวิทยาสามารถใช้เป็นพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญในการเฝ้าติดตามมรสุม



ภาพที่ 2-5 สถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย ตอนกลางและตอนบนของประเทศ จำนวน 96 สถานี (แรเงาสีฟ้า) ที่ใช้ในการพิจารณาวันที่ฝนตกสำหรับเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม ในส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาในภาคใต้ไม่นำมาคิดเนื่องจากภาคใต้มีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี

2.1.6 ปรากฏการณ์ ENSO

ปรากฏการณ์ ENSO ย่อมาจาก El Niño/Southern Oscillation เป็นปรากฏการณ์ที่ลมอ่อนกำลังลงหรือพัดสวนทางจากทิศทางเดิมที่ขนานไปกับชายฝั่ง โดยจะพัดออกจากชายฝั่งแทนจึงทำให้มหาสมุทรพัดเอากระแสน้ำอุ่นไปทางทิศตะวันออกแทนทิศตะวันตกทำให้อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งประเทศเปรูอุ่นขึ้นกว่าปกติ ENSO เป็นคำที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิว

น้ำทะเลในมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรและความผันแปรของระบบอากาศในซีกโลกใต้ จึงหมายความว่ารวมถึงปรากฏการณ์ทั้งเอลนีโญและลานีญา

2.1.6.1 เอลนีโญ (El Niño) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณตอนกลางและตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกเขตร้อนมีค่าสูงกว่าปกติ (อุ่นกว่าปกติ) ขณะที่อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีค่าต่ำกว่าปกติ ทั้งนี้เนื่องจากลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้ที่พัดอยู่เป็นประจำในมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีกำลังอ่อนกว่าปกติ ทำให้น้ำทะเลที่อุ่นจากด้านตะวันตกของมหาสมุทร ไหลย้อนกลับไปทางด้านตะวันออกของมหาสมุทร จึงทำให้บริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกมีปริมาณฝนลดลงกว่าปกติ ขณะที่ปริมาณฝนบริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกมีปริมาณสูงกว่าปกติ ความถี่ของการเกิดเอลนีโญคือประมาณ 2-3 ปีต่อครั้ง และแต่ละครั้งนานประมาณ 12-18 เดือน

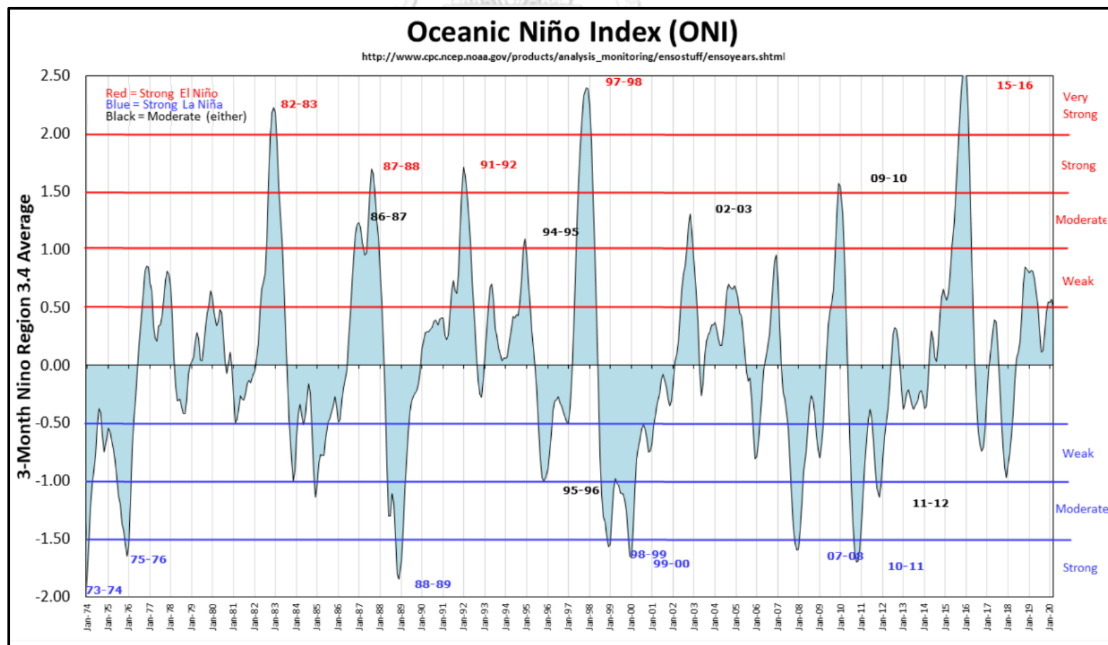
2.1.6.2 ลานีญา (La Niña) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่กลับกันกับเอลนีโญ กล่าวคือ การที่อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณตอนกลางและตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกมีค่าต่ำกว่าปกติ (เย็นกว่าปกติ) ขณะที่อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีค่าสูงกว่าปกติ (อุ่นกว่าปกติ) ทั้งนี้เนื่องจากลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้ที่พัดอยู่เป็นประจำในมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีกำลังแรงกว่าปกติ จึงพัดพาเอาผิวน้ำทะเลที่อุ่นจากด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกไปสะสมอยู่ทางด้านตะวันตกของมหาสมุทร ทำให้ด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิก มีปริมาณฝนตกสูงกว่าปกติ ขณะที่ด้านตะวันออกของมหาสมุทร มีปริมาณฝนลดลงกว่าปกติ ความถี่ของการเกิดลานีญาคือ 4-5 ปีต่อครั้ง และแต่ละครั้งนานประมาณ 9-12 เดือน

ปัจจุบันเชื่อกันว่าปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญามีอิทธิพลทำให้สภาพอากาศมีการผันแปรทั่วโลก โดยเฉพาะอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝน ผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาต่อสภาพอากาศของโลกสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายในแต่ละพื้นที่ ความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของเหตุการณ์ในแต่ละครั้ง

Oceanic Niño Index (ONI) เป็นมาตรฐานที่ NOAA ใช้เพื่อระบุปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา ซึ่งเป็นเหตุการณ์ในมหาสมุทรแปซิฟิกเขตร้อน ถ้ามีค่าเป็นบวกคือ ปรากฏการณ์เอลนีโญ และถ้ามีค่าเป็นลบคือ ปรากฏการณ์ลานีญา ระดับความรุนแรงแต่ละชนิดจะแบ่งออกเป็นสามขั้นคือ รุนแรงมาก (1.5-1.9) รุนแรงปานกลาง (1.0-1.4) และรุนแรงน้อย (0.5-0.9) (Golden Gate Weather Services, 2020) แสดงดังตารางที่ 2-1 และภาพที่ 2-6

ตารางที่ 2-1 ความรุนแรงของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงปี โดยในช่องด้านซ้ายคือปีที่เกิดเอลนีโญ และในช่องด้านขวาคือปีที่เกิดลานีญา

เอลนีโญ				ลานีญา		
รุนแรงน้อย	รุนแรงปานกลาง	รุนแรงมาก	รุนแรงมากที่สุด	รุนแรงน้อย	รุนแรงปานกลาง	รุนแรงมาก
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2008-09		
2019-20				2017-18		



ภาพที่ 2-6 Oceanic Niño Index (ONI) แสดงถึงปรากฏการณ์เอลนีโญ (สีแดงด้านบนของกราฟ) และปรากฏการณ์ลานีญา (สีฟ้าด้านล่างของกราฟ)

2.2 The Microwave Radio meter (MWR)

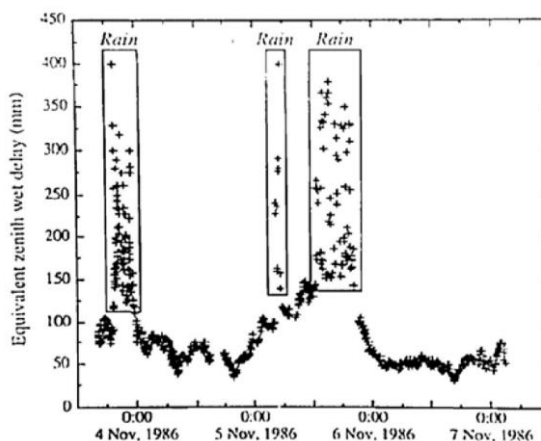
เครื่องตรวจวัดไอน้ำด้วยรังสีไมโครเวฟ (MWR) รับรังสีไมโครเวฟจากท้องฟ้าที่ความถี่ 23.8 GHz (band K) และ 31.4 GHz (band Ka) ระบบเป็นแบบ passive ทั้งสองความถี่มีความสามารถในการตรวจจับการรวมกันของน้ำและไอน้ำแบบพร้อมกันตามวิธีที่เลือกไว้ ความถี่ 23.8 GHz ทำหน้าที่ตรวจจับไอน้ำในชั้นบรรยากาศเพราะอยู่ในแถบความถี่ที่ส่งวนไว้โดยไม่ต้องส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการสังเกตการณ์บนท้องฟ้า ซึ่งไอน้ำจะถูกตรวจจับในความถี่ช่องนี้ ในลักษณะเดียวกับที่ความถี่ 31.4 GHz ทำหน้าที่ตรวจจับสภาพของเมฆฝนในชั้นบรรยากาศ และเมื่อคำนวณอุณหภูมิความสว่างของท้องฟ้าสามารถหาน้ำในเมฆฝนและไอน้ำได้ (ดังภาพที่ 2-7)



ภาพที่ 2-7 เครื่องตรวจวัดไอน้ำด้วยรังสีไมโครเวฟ (The Microwave Radio meter: MWR)
(Nithiwatthn Choosakul, 2005)

Elgered et al. (1991) พบว่าความคลาดเคลื่อนของอัลกอริธึมของเครื่องวัดรังสีไอน้ำเนื่องจากมีข้อผิดพลาดในค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ภาพที่ 2-8 แสดงผลกระทบของหยดน้ำที่เกิดขึ้นบนหน้าอากาศรับสัญญาณในช่วงฝนตก ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนประมาณ 4–6 % ของ Zenith Wet Delay จะมีค่าประมาณ 100–300 มิลลิเมตร

Coster et al. (1997) อธิบายเพิ่มเติมว่าอาจมีข้อผิดพลาดในการประเมิน zenith wet delay (ZWD) ของ MWR ในอัลกอริธึมของการดึงข้อมูลในรูปแบบการดัดแปลงสำหรับการปล่อยไอน้ำที่ความถี่ WMR และ/หรือในการสอบเทียบเครื่องวัดรังสี คาดว่า PWV จะเกิดอคติ 1 มิลลิเมตร สำหรับสภาพแห้ง (6.5 mm. ZWD) และ 2.5 mm ของ PWV (16-20 mm. ZWD) สำหรับสภาวะที่มีความชื้นสูง



ภาพที่ 2-8 ค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (ในกรอบสี่เหลี่ยม) จากข้อมูล MWR ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ฝนตกในกรณีนี้เกิดจากหยดน้ำเกาะอยู่บริเวณส่วนบนของเสาอากาศ

(Elgered et al., 1991)

จากงานวิจัยของ (Chen & Liu, 2014) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS กับข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยา หรือ Microwave radiometer (MWR) ที่ประเทศฮ่องกง แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จาก GPS มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่วัดด้วยเครื่องมือ MWR

2.3 ระบบดาวเทียมนำหนบนโลก (Global Navigation Satellite Systems, GNSS)

การหาค่าพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียมได้เป็นที่รู้จักและมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการสำรวจจริงวัดแบบเดิม นั่นคือสามารถทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ขึ้นกับสถานที่และสภาพอากาศ มีความสะดวกในการทำงานเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเลือกตำแหน่งหมุดให้มองเห็นกัน อีกทั้งไม่เสียค่าใช้จ่ายในการรับสัญญาณดาวเทียมมีแต่เพียงค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์รับสัญญาณและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีทางการสำรวจจริงวัดด้วยดาวเทียมได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว 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 ซึ่งทุกระบบจะมีส่วนประกอบ

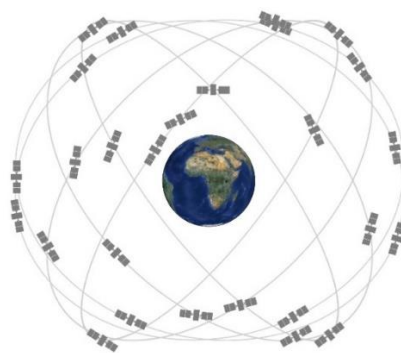
พื้นฐาน 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space segment) ส่วนควบคุม (Control segment) และ ส่วนผู้ใช้ (User segment)

2.3.1 ระบบดาวเทียม GPS

ระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System, GPS) เป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GPS ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหม (The United States Department of Defense, DoD) ประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เพื่อประโยชน์ทางการทหารและหน่วยงานราชการของสหรัฐอเมริกา โดยใช้ในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลงมายังพื้นโลก เมื่อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS รับสัญญาณจากดาวเทียมได้แล้วจะนำเอาข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้ไปประมวลผลหาตำแหน่งที่ต้องการ

ระบบดาวเทียม GPS ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนอวกาศ ส่วนควบคุม และส่วนผู้ใช้ โดยส่วนควบคุมจะมีสถานีติดตามภาคพื้นดินที่กระจายอยู่บนพื้นโลกเพื่อคอยติดตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียม ซึ่งทำให้สามารถคำนวณวงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียมที่ช่วงเวลาต่าง 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 ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS

(NCO, 2018)

จากตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม GPS ในลักษณะดังกล่าวทำให้ผู้ใช้สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงทั่วโลกตลอด 24 ชั่วโมง ในปัจจุบันมีดาวเทียมอยู่ในวงโคจร 31 ดวง (ข้อมูล ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2563; <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>)

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

2.3.2 ระบบดาวเทียม GLONAS

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/>)

2.4 การล่าช้าอันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay)

โทรโพสเฟียร์ (troposphere) คือ ชั้นบรรยากาศที่เราอาศัยอยู่ มีระยะความสูงจากผิวโลกขึ้นไปไม่เกิน 10 กิโลเมตร อุณหภูมิของบรรยากาศชั้นนี้จะค่อย ๆ ลดลงตามระดับความสูง โดยเฉลี่ยอุณหภูมิจะลดลงประมาณ 6.5 องศาเซลเซียสต่อกิโลเมตร เป็นชั้นบรรยากาศที่มีอากาศหนาแน่นและมีไอน้ำมาก มีการเคลื่อนที่ของอากาศทั้งแนวระดับและแนวตั้ง ทำให้เกิดลักษณะลมฟ้าอากาศต่าง ๆ เช่น มีหมอก เมฆ ฝน ลม พายุ เป็นบรรยากาศชั้นที่มีความสำคัญทางอุตุนิยมวิทยา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบแห้งและส่วนประกอบชื้น โดยส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดประมาณ 90 % ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ส่วนประกอบชื้นจะมีขนาดประมาณ 10% ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยทั่วไปสามารถที่จะหาค่าคลาดเคลื่อนจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ในส่วนแห้งได้ดี แต่ในส่วนชื้นนั้นยากที่จะหาค่าที่ถูกต้อง ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบมีผลทำให้คลื่นเดินทางมาถึงเครื่องรับช้ากว่าความเป็นจริง ทำให้ระยะที่วัดได้ยาวกว่าที่ควรจะเป็น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นทางที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนี้เช่นเดียวกับในชั้นไอโอโนสเฟียร์ การล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นในอากาศ ขณะทำการรังวัด เป็นต้น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดตั้งแต่ 2 เมตร เมื่อตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ในแนวตั้งของเครื่องรับจนกระทั่ง 20 เมตร เมื่อตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ใกล้เคียงกับแนวราบ (Brunner & Welsch, 1992) เนื่องจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ไม่ได้ขึ้นกับความถี่ของคลื่นสัญญาณ ดังนั้นการใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับแบบสองความถี่จึงไม่สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการล่าช้าของการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ให้หมดไปได้เหมือนกับกรณีของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2548)

2.4.1 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP)

ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงนั้น มีพารามิเตอร์สำหรับในการประมวลผล 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, ค่าแก้่านาฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) ในการประมวลผล ดังนั้น สมการการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสามารถเขียนได้ ดังนี้ (Kouba & Héroux, 2001)

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \epsilon p)_{L3} \quad (5)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \epsilon\phi)_{L3} \quad (6)$$

จากสมการที่ 5 และ 6

P = สมการค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range) (เมตร)

ϕ = สมการค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) (เมตร)

ρ = 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)

λ = ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

ϵp และ $\epsilon\phi$ = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) และ สัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise) (เมตร)

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

ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ข้อมูล GPS คือ ค่าความสูงของน้ำในหน่วยมิลลิเมตรภายในพื้นที่ 1 ตารางเมตร หรือกิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) ซึ่ง $1 \text{ kg}/\text{m}^2 = 1$ มิลลิเมตร โดยค่า PWV ได้จากการรวมปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศทางดิ่งเหนือตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณสูงขึ้นไปเป็นคอลัมน์จนถึงชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์กลับตัวรวมกันเป็นคอลัมน์ของน้ำในภาชนะ ค่าประมาณ ZTD เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS ประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก (Davis et al., 1991) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบแห้ง (Zenith Hydrostatic Delay: ZHD) และค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบชื้น (Zenith Wet Delay: ZWD)

2.4.2.1 ในส่วน Dry part เกิดจากก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (ตัวอย่าง N₂-78%, O₂-21%, Ar-0.9%) แปรผันตามอุณหภูมิและความกดอากาศ สำหรับ Dry part นั้นได้มีแบบจำลองที่สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้ ได้แก่ แบบจำลองของ (Hopfield, 1971) แบบจำลองของ

(Saastamoinen, 1972) เป็นต้น และเทอมนี้ถูกเรียกว่า Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) ในบริเวณประเทศไทย แบบจำลองของ Saastamoinen มีความเหมาะสมมากที่สุด (Satirapod & Chalmwattanachai, 2005) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการประมวลผล ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 7 (Bevis et al., 1992)

$$ZHD = \frac{2.2768 \times P_s}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028H} \quad (7)$$

จากสมการที่ 7

P_s = ค่าความกดอากาศพื้นผิวในหน่วย มิลลิบาร์ (1 มิลลิบาร์ = 1 Hectopascal (hPa))

ϕ = ละติจูดที่สถานีรังวัดดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน

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

จะได้ค่า Zenith Hydrostatic Delay , ZHD ในหน่วย มิลลิเมตร

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

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (8)$$

จากสมการที่ 8 จะได้ค่า Zenith Wet Delay, ZWD ในหน่วย มิลลิเมตร

โดยสามารถหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้จากค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า PWV และค่า ZWD ดังสมการ (Bevis et al., 1992)

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \times RV \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (9)$$

โดยที่ ρ_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 เคลวิน²/มิลลิบาร์)

T_m = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere mean temperature)

2.4.2.3 แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น จากงานวิจัยของ Suwanton et al. (2017) ซึ่งแสดงให้เห็นการใช้แบบจำลอง T_m ท้องถิ่นจะให้ความถูกต้องที่สูงกว่า โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ จากข้อมูล AIRS และ AMSU เพื่อหาค่า T_m สำหรับประเทศไทย มีสมการดังนี้

$$T_m = 0.6066T_s + 113.2914 \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 จะได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในหน่วย เคลวิน

ค่า ZWD ที่คำนวณได้จากสมการที่ (8) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไอน้ำที่อยู่ในบรรยากาศ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ZWD และปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ หรือ PWV หน่วยมิลลิเมตร ได้จากสมการที่ (9) (Bevis et al., 1992)

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 จะได้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ในหน่วย มิลลิเมตร

2.5 อนุกรมเวลา (Time series)

หมายถึง ข้อมูลหรือค่าสังเกตที่เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับเวลาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ช่วงห่างของเวลาที่ข้อมูลเหล่านี้ถูกเก็บรวบรวมจะต้องมีระยะพอ ๆ กัน เช่น รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน รายไตรมาส หรือรายปี การวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) เป็นการพยากรณ์ที่อาศัยข้อมูลในอดีตมาพิจารณาว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเมื่อเวลาเปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นอย่างไร มีการเคลื่อนไหวมากน้อยเพียงใด โดยมีข้อสมมติว่าการเคลื่อนไหวของข้อมูลในอนาคตจะไม่แตกต่างกับในอดีต โดยอนุกรมเวลามีส่วนประกอบดังนี้

2.5.1 แนวโน้ม (Trend Component: T) หมายถึง การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาในระยะยาว ว่าน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลง และลักษณะแนวโน้มนั้นอาจจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ ระยะเวลาที่จะทำให้เห็นแนวโน้มส่วนใหญ่ไม่ควรต่ำกว่า 10 ช่วงเวลา ลักษณะเด่นของเส้นแนวโน้มคือจะต้องเรียบไม่มีการหักมุม ณ ที่ใด 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 เช่น รายได้ของบริษัทขนส่ง จำกัด จะ

เพิ่มขึ้นมากในช่วงเดือนเมษายนและเดือนมกราคมเพราะเป็นช่วงหยุดยาว คนนิยมเดินทางกลับภูมิลำเนาหรือไปเที่ยว

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

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

ข้อมูลอนุกรมเวลา อาจได้รับอิทธิพลของปัจจัยที่เป็นส่วนประกอบของอนุกรมเวลาทั้ง 4 ปัจจัยหรือเพียงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเท่านั้นก็ได้ การวิเคราะห์จึงควรแยกวิเคราะห์ทีละปัจจัย ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ปัจจัยค่าแนวโน้มและค่าผันแปรตามฤดูกาลเท่านั้น

2.6 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่สามารถประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) ถูกพัฒนาขึ้นโดย GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) ใช้เป็นโปรแกรมหลักในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) (Li et al., 2015) โดยใช้ข้อมูลในรูปแบบ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ในการประมวลผล นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก้नाฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) ในการประมวลผล

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยด้านการศึกษาสภาพภูมิอากาศโดยใช้ค่า PWV ที่ได้จาก GPS ในรูปแบบอนุกรมเวลา (GPS-PWV time-series)

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาสภาพภูมิอากาศโดยใช้ค่า PWV ในรูปแบบอนุกรมเวลา อยู่ด้วยกันหลายงานวิจัย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Jin et al. (2007) ทำการศึกษาอนุกรมเวลาของ ZTD ที่มีความละเอียด 2 ชั่วโมงจากสถานีบริการ GPS ระหว่างประเทศ (International IGS) จำนวน 150 แห่งทั่วโลก เพื่อตรวจสอบแนวโน้มและความผันผวนตามฤดูกาลของ ZTD รวมทั้งสภาพภูมิอากาศ ผลการศึกษาพบว่า แนวโน้มความแปรปรวนของ ZTD มีค่าประมาณ 1.5 ± 0.001

มิลลิเมตรต่อปีที่สถานี IGS ทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบในส่วนต่าง ๆ ของซีกโลกเหนือและลดลงในส่วนมากของซีกโลกใต้ นอกจากนี้แนวโน้มของ ZTD มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ยอดรวมของแนวโน้มการขึ้นลงของ GPS ที่กระจายไปทั่วโลกมีค่าเกือบเป็นศูนย์ซึ่งอาจสะท้อนให้เห็นว่ารูปแบบ ZTD ของโลกมีความสมดุลในระดับโลก รูปแบบรายปีที่สำคัญของ ZTD พบได้ในทุกสถานี GPS ที่มี amplitude ตั้งแต่ 25 ถึง 75 มม. ความแปรปรวนของ amplitudes ประจำปีของ ZTD ใกล้เคียงกับพหุคูณตรีโกณมิติ โดยทั่วไปมีขนาดใหญ่กว่าในภาคพื้นทวีป amplitude ของการแปรปรวน ZTD ที่ใหญ่ขึ้นส่วนใหญ่จะพบที่ละติจูดกลาง (ใกล้ 20°S และ 40°N) และขนาดที่เล็กลงของการแปรปรวน ZTD อยู่ที่ละติจูดที่สูงขึ้น (เช่น แอนตาร์กติกา) และบริเวณเส้นศูนย์สูตร นอกจากนี้ความแปรปรวนของความถี่สูง (RMS of ZTD residuals) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 15 ถึง 65 มม. ของความคลาดเคลื่อน ขึ้นอยู่กับความสูงของสถานี ส่วนสถานีภาคพื้นทวีปมีแนวโน้มที่จะมีความแปรปรวนต่ำและสถานีในมหาสมุทรและชายฝั่งมีแนวโน้มความแปรปรวนมากขึ้น วงจร ZTD ตามฤดูกาลเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบชั้น (ZWD) ต่อมาในปี 2009 มีงานวิจัยของ Shuanggen and Luo (2009) ศึกษาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) 13 ปี ราย 2 ชั่วโมงจากสถานีสำรวจ GPS ที่กระจายทั่วโลก 155 แห่ง พบว่าช่วงฤดูที่แตกต่างกันคือในช่วงฤดูร้อนมีไอน้ำสูงสุดและในฤดูหนาวมีไอน้ำต่ำสุด amplitudes ที่สูงขึ้นของรูปแบบ PWV ประจำปีตั้งอยู่ใน mid-latitudes ประมาณ $10 - 20 \pm 0.5$ มม. และ amplitudes ต่ำพบได้ในละติจูดสูงและพื้นที่เส้นศูนย์สูตรประมาณ 5 ± 0.5 มม. ความแตกต่างขนาดใหญ่ระหว่าง PWV เฉลี่ยในฤดูร้อนและฤดูหนาวพบได้ใน mid-latitudes ประมาณ 10-30 มิลลิเมตรโดยเฉพาะในแถบซีกโลกเหนือ นอกจากนี้ความแปรปรวนของ PWV ที่พบในสถานี IGS รายวัน (24 ชั่วโมง) มีค่า amplitude ประมาณ $0.2-1.2 \pm 0.1$ มม. และมีค่าสูงสุดคือตั้งแต่เที่ยงวันถึงเที่ยงคืน (12 ชม.) และมีลดลงโดยมี amplitude น้อยกว่า 0.3 มิลลิเมตร ต่อมา มีการสร้างแบบจำลองและคาดการณ์ชุดข้อมูลอนุกรมเวลาของ PWV โดย Sharifi and Sourı (2014) ได้ใช้เทคนิค Precise Point Positioning (PPP) สำหรับเครื่องรับสัญญาณ GPS แบบความถี่คู่ เพื่อประเมินค่า Zenith wet delay (ZWD) โดยกระบวนการ stochastic process ที่เรียกว่าการเดินแบบสุ่มในช่วงเวลา 5 นาที ได้มีการตรวจสอบรูปแบบตามฤดูกาลและรายวันของ PWV สำหรับสถานี GPS สีแห่งที่ตั้งอยู่ในยุโรป โดยมีละติจูดและความสูงของสถานีเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดสำหรับปริมาณไอน้ำ ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์เกี่ยวกับภูมิอากาศและอุตุนิยมวิทยา แบบจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีผสม (LS-HE และ LS-SVM) สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพในการสังเกตการณ์และทำการคาดการณ์ ความเบี่ยงเบน (~ 0.37 มม.) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (~ 3 มม.) และมีงานวิจัยของ Alshawaf et al. (2016) ใช้ชุดข้อมูลเวลาจาก GNSS ศูนย์ข้อมูลพยากรณ์ยุโรประยะปานกลาง (ERA-Interim) และการวัดทางอุตุนิยมวิทยา เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในยุโรปกลาง ชุดเวลา PWV ได้จากสามวิธีได้แก่ วิธีแรก

เป็นการประมาณจากการสังเกตการณ์ GNSS ภาคพื้นดินโดยใช้วิธีจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) วิธีที่สองได้มาจากข้อมูล ERA-Interim และวิธีสุดท้ายพิจารณาจากการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุกวัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในเชิงบวกของ PWV ในพื้นที่ GNSS มากกว่า 60 แห่งมีค่าเพิ่มขึ้น 0.3-0.6 มม.

Takiguchi et al. (2000) ได้ทำการวิจัยในประเด็นเรื่อง การพิจารณาการเริ่มต้นของลมมรสุมแห่งเอเชีย โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจาก GPS โดยทำการสำรวจ GPS จำนวน 5 แห่งในประเทศไทยตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2541 ภายใต้โครงการอุทกวิทยาที่เรียกว่า GAME-T โดยทำการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ทุก ๆ 30 นาที และเปรียบเทียบค่า PWV กับค่าที่ได้จากข้อมูล radiosonde (Sonde-PWV) พบว่า โดยทั่วไปแนวโน้มในระยะยาวของทั้ง GPS-PWV และ Sonde-PWV มีความสม่ำเสมอและปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเดือนพฤษภาคม ซึ่งสอดคล้องกับการเริ่มต้นของมรสุม นอกจากนี้การเปรียบเทียบ GPS-PWV กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นและปริมาณน้ำฝน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า GPS-PWV กับความเข้มของฝนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและเชียงใหม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่า GPS-PWV สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเริ่มต้นของฤดูมรสุมในพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง และเพื่อให้เห็นถึงวิธีการในการระบุการเริ่มต้นและการถอนตัวของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้โดยใช้ค่าไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Nithiwatthn Choosakul (2005) ได้นำค่า PWV ที่ได้จากสถานี GPS จำนวน 4 แห่ง เป็นเวลา 3 ปี (2544 – 2546) มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยพิจารณาจากค่า PWV ร่วมกับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทิศทางของลมและฝนที่ตก พบว่าช่วงเข้าและออกฤดูมรสุมกำหนดได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของ PWV ที่ขึ้นและลงตามลำดับ สอดคล้องกับช่วงที่ลมมีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง จำนวนและความถี่ของฝนที่ตก ส่วนการแผ่กระจายของความกดอากาศสูงกำลังแรงที่พิจารณาจาก PWV พบว่ามีแบบแผนของการลดลงของ PWV ก่อนที่ความกดอากาศสูงจะเข้ามาประมาณ 3-5 วัน และยังพบว่า การกระตุกของข้อมูล PWV ในวันที่มีลมสงบ สามารถอธิบายได้ว่ามีการนำพาความชื้นด้วยลมสงบเข้าสู่แผ่นดิน งานวิจัยล่าสุดของ Uang-aree et al. (2015) ใช้ค่า PWV จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากเครื่องรับ GPS จำนวน 4 แห่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยทำการประมวลผลข้อมูล GPS-PWV เพื่อการตัดสินใจหาเกณฑ์ใหม่สำหรับการระบุวันเริ่มต้นและการถอนตัวของช่วงฤดูมรสุม พบว่า เกณฑ์ใหม่ระบุการเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่มีค่า GPS-PWV เฉลี่ยรายวันเกินกว่า 52.1 มม. เป็นเวลา 8 วันติดต่อกัน และช่วงการถอนตัวของฤดูมรสุมเป็นระยะเวลาที่มีค่า GPS-PWV เฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 52.1 มม. หรือน้อยกว่า 6 วันติดต่อกัน

2.7.2 งานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้ข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่า ZTD และ PWV

มีการนำเสนอวิธีตรวจวัดปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศแบบใหม่ โดยใช้ข้อมูล GPS โดย Bevis et al. (1992) ทำการศึกษาผลกระทบต่อการแพร่กระจายสัญญาณของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ในรูปของตัวแปร ZWD ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระบบสมการค่าสังเกต ค่า ZWD สามารถแปลงเป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศเหนือเครื่องรับสัญญาณได้ เมื่อทราบข้อมูล อุณหภูมิและความดัน ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีรับสัญญาณ GPS ทั้งนี้โครงข่ายสถานี GPS นอกจากถูกนำไปใช้งานโดยนักสำรวจ, นักธรณีวิทยา, หน่วยงานของรัฐ และทางทหารแล้ว ยังสามารถนำไปใช้เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ เพื่อใช้ประโยชน์ได้ในหลาย ๆ ด้านเช่น การพยากรณ์อากาศ, เป็นข้อมูลสำคัญในงานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดพายุในชั้นบรรยากาศ, วัฏจักรการหมุนเวียนของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภูมิอากาศโลกได้ เป็นต้น Yuan et al. (2014) ได้ทำการประยุกต์ใช้ข้อมูล GPS เพื่อประมาณค่า ZTD และ PWV ด้วยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงร่วมกับข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบ Real-Time จากสถานีโครงข่าย IGS ที่กระจายอยู่ทั่วโลกจำนวน 20 สถานีเป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ค่า Real-Time ZTD ของทุกสถานีมีความสอดคล้องกับค่า ZTD จากหน่วยงาน IGS ที่ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยมีค่า RMSE น้อยกว่า 13 มม. ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลข และค่า Real-Time PWV เปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ได้จากเครื่องวิทยุหึ่งอากาศ มีค่า RMSE น้อยกว่า 3 มม. ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการพยากรณ์อากาศระยะสั้น นอกจากนี้ Li et al. (2015) ได้พัฒนาโปรแกรมต้นแบบเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูล Multi-GNSS (GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo) จากสถานีโครงข่าย MGEX (IGS Multi-GNSS Experiment) ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ร่วมกับข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจากหน่วยวิจัย GFZ (German Research Center for Geosciences) ผลวิจัยพบว่า เมื่อใช้ข้อมูล Multi-GNSS ค่าความถูกต้องของค่า ZTD มีค่าประมาณ 10-20 มม. ซึ่งช่วยเพิ่มความถูกต้องอย่างชัดเจนให้กับการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.0-1.5 มม. นอกจากนี้ค่ากระโดด (outlier) ที่เกิดจากการใช้เพียงข้อมูลระบบเดียว ถูกขจัดออกไปเมื่อใช้ข้อมูล Multi-GNSS

2.7.3 งานวิจัยด้านพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

งานวิจัยของ Boehm et al. (2007) ได้พัฒนาแบบจำลอง GPT (Global pressure and temperature) เพื่อประมาณค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิทั่วโลก ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานรังวัดสำรวจชั้นสูง (Geodetic) เช่น การประมาณค่า ZHD, ประมาณ

ค่าแรงกระทำที่เกิดชั้นบรรยากาศ (Atmosphere loading) และการเปลี่ยนแปลงรูปความร้อนของ กล้องโทรทรรศน์วิทยุพื้นฐานระยะยาว (Very Long Baseline Interferometry: VLBI) เป็นต้น ผล การพัฒนาดังกล่าว ทำให้ได้แบบจำลองที่สามารถประมาณค่าความดันและอุณหภูมิทุกตำแหน่งบน โลก โดยความดันและอุณหภูมิที่ประมาณค่าได้อ้างอิงกับความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) ในส่วนของในประเทศไทยมีการพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในชั้น บรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากงานวิจัยของ Suwantong et al. (2017) โดยการใช้ข้อมูล Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) ที่ได้จากดาวเทียม NASA Aqua ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย โดยดาวเทียมจะเคลื่อนที่ผ่าน เหนือผิวโลกวันละ 2 ครั้ง ช่วงเวลากลางวันและกลางคืน เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้น บรรยากาศที่ได้จากการประมาณค่า ZTD จากการใช้ข้อมูล GNSS โดยคำนวณค่าพารามิเตอร์ของ แบบจำลองด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter (EKF) เพื่อประมาณค่าตัวแปรในแบบจำลอง อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ทั้งนี้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าอุณหภูมิที่ พื้นผิว (Surface Temperature) ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้ข้อมูลแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเมื่อ เปรียบเทียบกับข้อมูลแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยสากล เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมี ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ค่า RMSE และความเอนเอียงมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมข้อมูล

3.1.1 ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม

ทำการรวบรวมข้อมูล GPS ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศไทย ในรูปแบบ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2007–2016 เป็นระยะเวลา 10 ปี

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดชื่อและพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (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

สำหรับขั้นตอนของการเตรียมข้อมูล เนื่องจากข้อมูล GPS ที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลในซอฟต์แวร์ PANDA นั้น ต้องเป็นข้อมูลรายวันในรูปแบบของ RINEX (Receiver-Independent Exchange Format) แต่ข้อมูลที่ได้รับรวบรวมมาจากกรมโยธาฯ เป็นข้อมูลในรูปแบบ RINEX ซึ่งมีการจัดเก็บแบบแยกเป็นรายชั่วโมง (24 ชั่วโมง/วัน) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องรวมข้อมูลเป็นรายวัน ก่อนนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูล

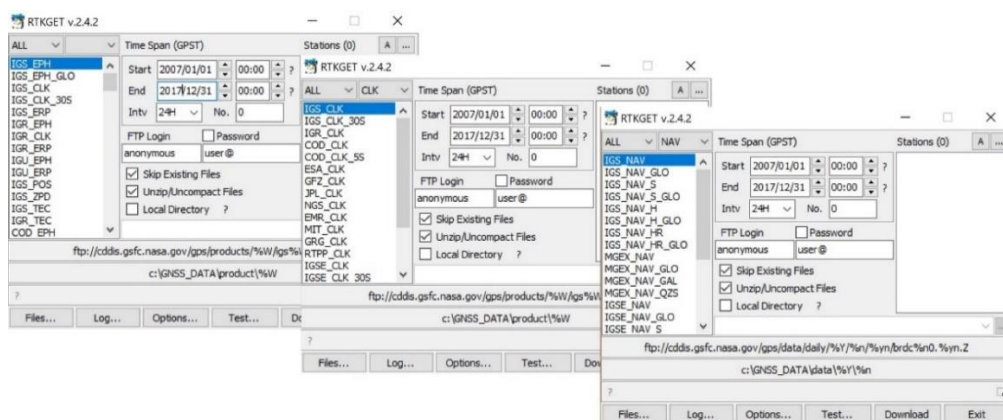
การรวมข้อมูล RINEX ให้เป็นรายวัน โดยทำการรวมข้อมูลรายชั่วโมงซึ่งเป็นข้อมูลที่
ได้รับมารวมอยู่ในไฟล์เดียว (ไฟล์ต้นฉบับเป็นไฟล์ zip แยกเป็น 24 ชั่วโมง) ใช้โปรแกรม TEQC ใน
การรวมข้อมูล ซึ่งโปรแกรมนี้มีหน้าที่หลักดังนี้คือ แปลงรูปแบบของข้อมูล RINEX, เพิ่ม หรือ ลด
ข้อมูลความถี่ในการจัดเก็บข้อมูล RINEX รวมไปถึงวิเคราะห์และประเมินคุณภาพสัญญาณดาวเทียม
เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลรับวัด โดยมีรูปแบบของตัวอย่างคำสั่งดังนี้

```
teqc chan330a.07o chan330b.07o chan330c.07o chan330d.07o
chan330e.07o chan330f.07o chan330g.07o chan330h.07o chan330i.07o chan330j.07o
chan330k.07o chan330l.07o chan330m.07o chan330n.07o chan330o.07o
chan330p.07o chan330q.07o chan330r.07o chan330s.07o chan330t.07o chan330u.07o
chan330v.07o chan330w.07o chan330x.07o > chan3300.07o
```

โดยเรียกโปรแกรม TEQC ตามด้วยไฟล์ข้อมูลรับวัดรายชั่วโมงจำนวน 24 ไฟล์ เรียงต่อกัน
ไปและใช้ช่องว่าง (Space bar) ระหว่างไฟล์ที่ต้องการรวมจนครบทุกไฟล์ ตามด้วยคำสั่ง '>' และ
ระบุชื่อไฟล์ผลลัพธ์ที่ต้องการ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก (10 ปี 11 สถานี) หากใช้
วิธีแบบนี้จะทำให้เสียเวลามากเนื่องจากทำได้แค่เพียงทีละ 1 วัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกและ
รวดเร็วจึงใช้วิธีการเขียนสคริปต์ลงในโปรแกรมไพธอน (python) เพื่อช่วยในการรวมข้อมูลรายชั่วโมง
ให้เป็นรายวัน ซึ่งสามารถสั่งให้โปรแกรมรวมไฟล์ได้ครั้งละปีหรือหลายปีติดต่อกันได้

3.1.2 ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก้नाฬิกาดาวเทียม

เพื่อให้การประมวลผลข้อมูลมีความถูกต้องที่ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลวงโคจร
ดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit, ค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS (International
GNSS Service) โดยใช้โปรแกรม Rtkget.exe ช่วยในการดาวน์โหลดข้อมูล



ภาพที่ 3-1 การใช้โปรแกรม rtkget ดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit,
ค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม จากหน่วยงาน IGS

3.1.3 ข้อมูลอุณหภูมิจึงความกดอากาศ

ข้อมูลอุณหภูมิจึงความกดอากาศที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งอยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา (Thai Meteorological Department: TMD) เพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิจึงความกดอากาศ ในสมการที่ (10) และ Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) ในสมการที่ (7) ตามลำดับ โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2007–2016 เป็นระยะเวลา 10 ปี

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดชื่อ รหัสและพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อสถานี	รหัสสถานีอุตุนิยมวิทยา	ละติจูด	ลองจิจูด
เชียงใหม่	327501/48327	18.79000	98.97694
อุดรดิตถ์	351201/48351	17.61667	100.10000
อุดรธานี	354201/48354	17.38333	102.80000
นครราชสีมา	431201/48431	14.96278	102.07667
ศรีสะเกษ	409301/48409	15.03333	104.25000
กรุงเทพมหานคร	455201/48455	13.72639	100.56000
นครสวรรค์	400201/48400	15.80000	100.16667
จันทบุรี	480201/48480	12.61667	102.10639
ประจวบคีรีขันธ์	500201/48500	11.83333	99.83333
สุราษฎร์ธานี	551201/48551	9.13556	99.15194
สงขลา	568501/48568	7.20389	100.60472

3.1.4 ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางลม และความเร็วลม

ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางลมและความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของกรมอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุดซึ่งเป็นสถานีเดียวกันกับในหัวข้อ 3.1.3 (ตารางที่ 3-2) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2007–2016 เป็นระยะเวลา 10 ปี เช่นเดียวกัน เพื่อตรวจสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) กับข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูลทิศทางลมและความเร็วลม

3.2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล

3.2.1 ประมวลผลค่าความคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD)

นำข้อมูล GNSS จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ซึ่งถูก

จัดเก็บอยู่ในรูปแบบ RINEX ไฟล์แบบรายวัน และนำข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมที่ดาวนำโหนดมาจากหน่วยงาน IGS จัดเก็บในแฟ้มเฉพาะของซอฟต์แวร์ PANDA จากนั้นทำการประมวลผลโดยเลือกใช้เฉพาะข้อมูลของกลุ่มดาวเทียม GPS มาประมวลผลข้อมูลที่ละวันจนครบข้อมูลทั้งหมดด้วยโปรแกรม PANDA และใช้ Global Mapping function (GMF) ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD)

โปรแกรม PANDA ถูกใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูล GNSS ซึ่งถูกพัฒนาจากหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) โดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ โดยเริ่มจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่จำเป็นออกไปก่อน เช่น ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยการคำนวณจะใช้แบบจำลองของสมการค่าสังเกตุ lonosphere free linear Combination มาประยุกต์ใช้ ทำให้ช่วยขจัดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้ออกไปได้ เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ เหล่านี้สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในระดับเมตร (meters level) ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณา ได้แก่

3.2.1.1 ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset)

3.2.1.2 ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV)

3.2.1.3 ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide, Ocean loading)

3.2.1.4 ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม

โดยสมมติว่าค่าความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ เหล่านี้สามารถคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือถูกขจัดออกไปได้ ในส่วนของโปรแกรม PANDA จะทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ด้วยการกำหนดเรียกใช้ค่าแก้ผ่านทางไฟล์ข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถดาวนำโหนดได้จากหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) และ GNSS Research Center ของทาง Wuhan University (WUM)

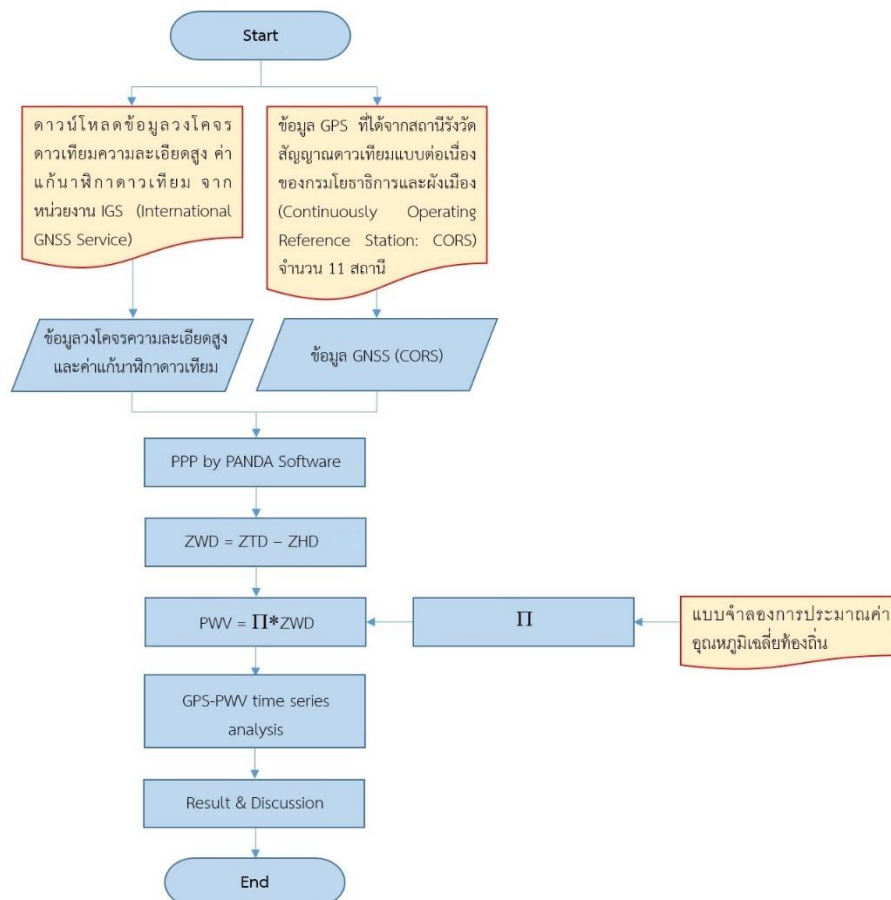
นอกจากนี้ยังมีการใช้แบบจำลอง Global Mapping function (GMF) ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD) เนื่องจากความเป็นจริงดาวเทียม ณ ขณะส่งสัญญาณมายังเครื่องรับไม่ได้อยู่บนแนวตั้งและเพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนที่อยู่ในแนวตั้ง

3.2.2 ขั้นตอนการแปลงข้อมูล ZTD เป็น PWV

ข้อมูล ZTD ที่ได้จากการประมวลผลด้วยวิธีจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) ด้วยโปรแกรม PANDA จะถูกแปลงเป็น PWV โดยใช้ข้อมูลหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากแบบจำลองท้องถิ่น จากนั้นทำการหาค่า ZWD โดยใช้สมการที่ (8) แล้วนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากการใช้แบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในสมการที่ (10) แล้วทำการคำนวณค่า PWV โดยใช้สมการที่ (9) และ (11) ตามลำดับ

สำหรับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ที่คำนวณได้จะอยู่ในหน่วยที่เป็นมิลลิเมตรเพราะเป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลที่เป็นค่าความสูงของน้ำ 1 กิโลกรัม/ตารางเมตร (kg/m^2) ซึ่งเปรียบได้กับการรวมปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในทางตั้งเหนือตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณสูงขึ้นไปเป็นคอลัมน์จนสุดชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แล้วกลั่นตัวรวมกันเป็นน้ำในภาชนะ เปรียบได้ว่ามีในพื้นที่ 1 ตารางเมตรและสูงขึ้นไปจนบนสุดของบรรยากาศโทรโพสเฟียร์หากในพื้นที่นั้นมีน้ำอยู่ทั้งหมด 1 มม. ซึ่งเท่ากับมีปริมาณน้ำ 1 กก.

ขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 การวิเคราะห์ผล

3.3.1 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)

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

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 ที่ได้มาจากการประมวลผลข้อมูลทั้งหมดในตอนต้นนำมาทำการเขียนแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล (Scatter plot) เพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูลเบื้องต้น หากพบว่าข้อมูลบางค่าผิดไปจากกลุ่มเยอะ ๆ ซึ่งถ้าหากใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวิเคราะห์ด้วยแล้วอาจทำให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อน หรือมีความน่าเชื่อถือน้อยลง ซึ่งเรียกข้อมูลดังกล่าวได้ว่าเป็นค่าผิดปกติ (Outlier) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตรวจสอบข้อมูลด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีใช้ค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2SD เท่ากับระดับความเชื่อมั่นที่ 95%) ซึ่งหากข้อมูลชุดใดที่มีค่าเกินกว่า 2SD ข้อมูลชุดนั้นจะถูกขจัดออกไป วิธีการนี้เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายในการระบุค่าผิดปกติที่เป็นไปได้ และมีประสิทธิภาพภายใต้การกระจายแบบปกติ เปอร์เซ็นต์ที่คาดหวังของค่าผิดปกตินอกช่วง คือ 5% ภายใต้ตัวอย่างปกติขนาดใหญ่ แต่อาจเป็นปัญหาในการใช้กับข้อมูลที่ไม่ปกติหรือขนาดตัวอย่างขนาดเล็ก เนื่องจากในการตรวจหาค่าผิดปกติและเปอร์เซ็นต์ค่าผิดปกติที่คาดไว้จะเปลี่ยนไปตามขนาดตัวอย่างหรือประเภทการกระจายของข้อมูล (Seo, 2006) และอีกวิธีหนึ่งที่น่ามาใช้คือการใช้

คำนวณโดยวิธีการ Robust Fit (Holland & Welsch, 1977) ซึ่งในการหาค่าตอบจะใช้วิธีการวนซ้ำ และทำการปรับค่าน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ย PWV รายวันในแต่ละค่าที่มีต่อค่าพารามิเตอร์จากค่าเศษคงเหลือ (Residual) ของค่าเฉลี่ย PWV รายวัน เมื่อการคำนวณวนซ้ำจนเข้าสู่หาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์แล้ว ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด วิธีการ Robust Fit (IRLS) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและยืดหยุ่นสำหรับปัญหาด้านวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้ให้ปรับเปลี่ยนรูปแบบให้เข้ากับอัลกอริทึม IRLS พื้นฐาน ทำให้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประมาณค่าที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (Burrus, 2012)

3.3.2 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)

3.3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลม

ใช้ข้อมูลสถานีที่อยู่ ณ ตำแหน่งใกล้กับสถานี GNSS มากที่สุดเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเรื่องของปริมาณน้ำฝน

3.3.4 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย

ในการวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย โดยดูจากค่า GPS_PWV ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ตกประกอบกับข้อมูลทิศทางและความเร็วลมที่ได้จากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) ที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ในการพิจารณา โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของ ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนา

อุตุวิทยามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้ (ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560)

3.3.4.1 ในระยะ 5 วันใด ๆ จะต้องมียอดน้ำฝน 3 วัน ที่ต่อเนื่องกันหรือไม่ต่อเนื่องกันก็ได้ โดยปริมาณน้ำฝนใน 3 วันดังกล่าว ในแต่ละวันจะต้องมียอดน้ำฝนไม่น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรวมใน 5 วันนั้นต้องไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

3.3.4.2 เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวเป็นของประเทศอินเดีย เมื่อนำมาใช้กับประเทศไทย จะต้องพิจารณาการเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ด้วย กล่าวคือ เริ่มต้นประมาณเดือนพฤษภาคม และสิ้นสุดประมาณเดือนตุลาคมมาประกอบจึงจะสมเหตุผล

3.3.4.3 ค่าที่ได้เป็นช่วงวันที่เริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 3.3.4.1 เกิดขึ้นและต่อเนื่องกันไปถือเป็นการเริ่มต้นของฤดูมรสุม แต่ถ้ามีฝนดังกล่าวในข้อ 3.3.4.1 แล้วฝนลดน้อยถอยลงไป ถือว่าสิ้นสุดฤดูมรสุม

3.3.4.4 การเริ่มต้นและสิ้นสุดของฤดูมรสุมในข้อ 2 อาจจะมาเร็วหรือช้ากว่ากำหนดได้ ทั้งนี้เพราะภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกมากกว่าภาคอื่น ๆ

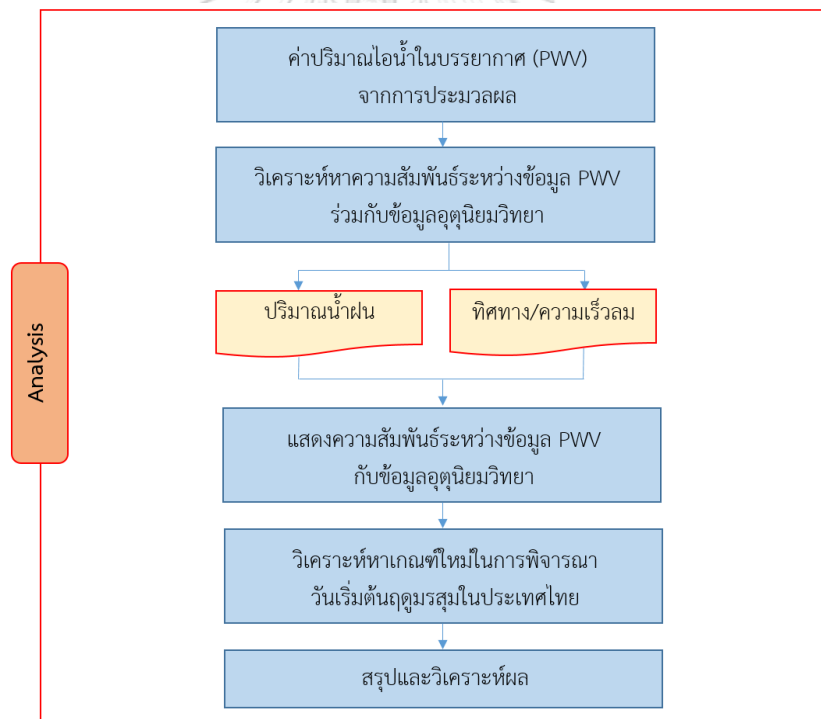
หมายเหตุ สำหรับการพิจารณาจำนวนวันที่มีฝนตกในข้อ 1 ทางศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา ได้พิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนในเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน จะนับตั้งแต่เวลา 07.00 น. จนถึงเวลา 07.00 น. ของวันถัดไป จากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้งหมดจำนวน 96 สถานีในตอนกลางและตอนบนของประเทศ ตั้งแต่ภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคอีสาน และภาคเหนือ (ภาพที่ 2-5) ซึ่งจะต้องมีฝนตกจำนวน 60% ของสถานีทั้งหมดจึงจะถือว่าเข้าสู่เกณฑ์ดังกล่าว ในส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาในภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเช่นเดียวกับในภาคอื่น แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำพาความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้ภาคใต้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ และมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นในเกณฑ์การพิจารณาการเข้าสู่ช่วงฤดูมรสุมนี้ จึงไม่นำข้อมูลสถานีในภาคใต้มาใช้ในการพิจารณาวันเริ่มต้นและสิ้นสุดฤดูมรสุม

โดยเกณฑ์ข้างต้นของกรมอุตุนิยมวิทยา ในรอบ 10 ปี คือ 2007-2016 ที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบเป็นไปดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 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 เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเช่นเดียวกันกับภาคอื่น แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ และมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้สถานีในภาคใต้มาวิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย ซึ่งเกณฑ์ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมของกรมอุตุนิยมวิทยานั้นก็ไม่ได้มีการนำสถานีวัดน้ำฝนในส่วนของภาคใต้มาทำการวิเคราะห์ร่วมด้วยเช่นเดียวกัน โดยลำดับขั้นตอนในส่วนของการวิเคราะห์ผลแสดงดังภาพที่ 3-3



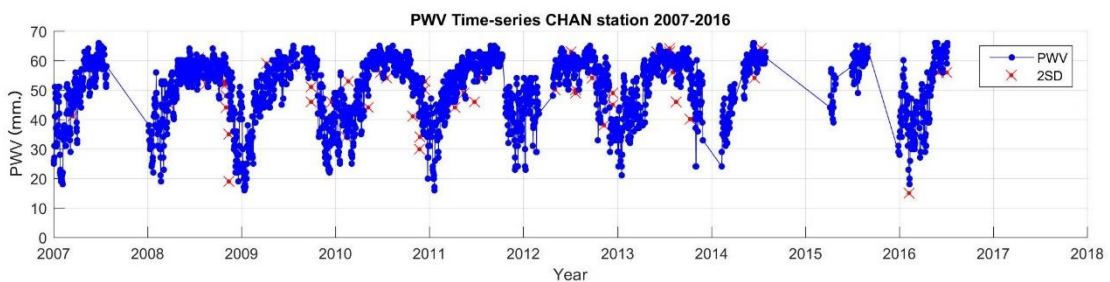
ภาพที่ 3-3 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลในงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

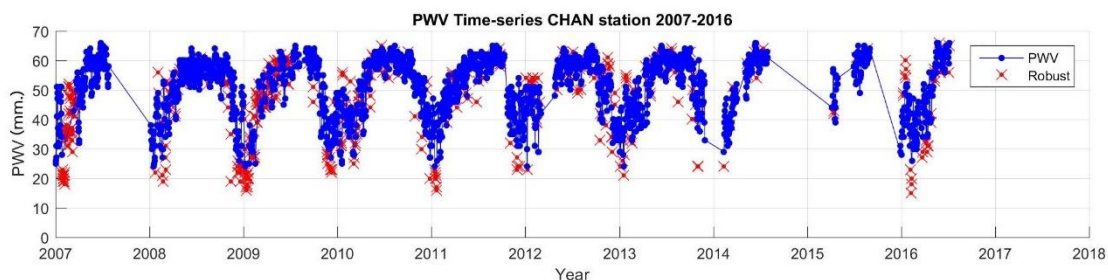
4.1 ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในประเทศไทย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการพิจารณาค่า GPS-PWV Time-Series ในการวิเคราะห์นั้น จำเป็นต้องตรวจสอบเพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูลโดยการเขียนแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล (Scatter plot) ซึ่งพบว่า มีข้อมูลบางค่าที่มีลักษณะผิดไปจากกลุ่มเยอะ ๆ ถ้าหากใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวิเคราะห์ด้วยแล้วอาจทำให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อน หรือมีความน่าเชื่อถือน้อยลง ซึ่งในส่วนของข้อมูลดังกล่าวถือว่าเป็นค่าผิดปกติ (Outlier) ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตรวจสอบและขจัดค่าผิดปกติออกไปด้วยกัน 2 วิธีคือ วิธีใช้ค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2SD) พบว่ามีการตรวจพบค่าผิดปกติในข้อมูลบางส่วนและได้ทำการตัดข้อมูลส่วนนี้ออกไป แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Ordinary Least Square Regression: OLS) ดังภาพที่ 4-1 แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์ และการคำนวณโดยวิธีการ Robust Fit (Holland & Welsch, 1977) เป็นการหาค่าตอบจะใช้วิธีการวนซ้ำ และทำการปรับค่าน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ย PWV รายวันในแต่ละค่าที่มีต่อค่าพารามิเตอร์จากค่าเศษคงเหลือ (Residual) ของค่าเฉลี่ย PWV รายวัน เมื่อการคำนวณวนซ้ำลู่เข้าหาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์แล้ว ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-1 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธีใช้ค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2SD)

กากบาทสีแดงคือค่าผิดปกติที่ตรวจเจอ



ภาพที่ 4-2 การตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธี Robust Fit กากบาทสีแดงคือค่าผิดปกติที่ตรวจเจอ

จากภาพที่ 4-1 และภาพที่ 4-2 แสดงถึงค่าผิดปกติ (Outlier) ที่ตรวจพบจากวิธีค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2SD) และ Robust Fit ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า วิธี Robust Fit นั้น ในแต่ละรอบของการวนซ้ำจะปรับค่าน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ย PWV รายวัน และเมื่อการคำนวณซ้ำจนลู่ออกเข้าหาค่าตอบของค่าพารามิเตอร์แล้วจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกว่า ซึ่งจะเห็นได้จากค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของวิธี Robust Fit ที่มีค่าน้อยกว่าวิธี 2SD ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ของค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Function Model ในการวิเคราะห์แนวโน้ม และองค์ประกอบตามฤดูกาล ซึ่งวิธีการ Robust Fit มีความเหมาะสมกว่าวิธี 2SD ซึ่งดูได้จากค่า RMSE ที่มีค่าน้อยกว่า

สถานี	รหัสสถานี	ค่า RMSE	
		2SD	Robust Fit
เชียงใหม่	CHMA	6.665	5.284
อุดรดิตต์	UTTD	6.404	5.539
อุดรธานี	UDON	6.401	5.307
นครราชสีมา	NKRM	6.458	5.067
ศรีสะเกษ	SISK	6.221	4.942
กรุงเทพมหานคร	DPT9	6.567	5.531
นครสวรรค์	NKSW	7.009	6.042
จันทบุรี	CHAN	6.459	5.492
ประจวบคีรีขันธ์	PJRK	6.615	5.667
สุราษฎร์ธานี	SRTN	6.723	6.415
สงขลา	SOKA	6.570	6.267

ดังนั้นจากผลลัพธ์ดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี Robust Fit ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสามารถให้คำตอบของค่าพารามิเตอร์สำหรับ Function Model ที่เหมาะสมกว่าวิธี 2SD

4.1.1 วิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle)

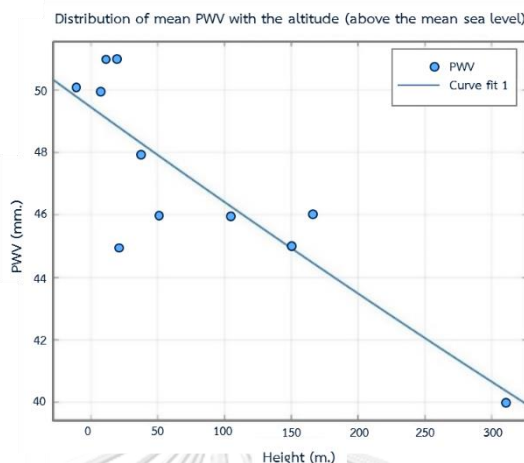
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาของความแปรปรวนของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Continuously Operating Reference Station: CORS) จำนวน 11 สถานี ตั้งแต่ปี 2007-2016 โดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) พบว่า ส่วนประกอบตามฤดูกาลที่ได้จากสมการ $PWV_t = A \cdot \cos(2\pi \cdot t - t_0) + m \cdot t + c$ นี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) ค่าแอมพลิจูดของค่า PWV และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) เพื่อใช้ในการกำหนดว่าเดือนใดที่มีค่าตามฤดูกาลสูงสุดแสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าแอมพลิจูด, การเปลี่ยนแปลงเฟส และแนวโน้มของ PWV ซึ่งในส่วนของภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้ม PWV เพิ่มขึ้นได้ถึงแนวโน้มในอนาคตที่ปริมาณฝนจะตกมากขึ้น ในขณะที่สถานีในภาคกลาง, ภาคตะวันออก และภาคใต้ติดลบ แสดงถึงแนวโน้มปริมาณฝนที่น้อยลงในอนาคต

Station	Latitude	Longitude	Height	Amplitude	Mean	Phase shift	Trend	Max	Min
CHMA	18.83528	98.96996	310.447	16.231	44	-0.428	0.097±0.050	62	18
UTTD	17.63009	100.0963	51.262	16.625	47	-0.438	0.039±0.048	65	20
UDON	17.41273	102.7807	150.235	14.680	48	-0.446	0.037±0.047	65	22
NKRM	14.99208	102.1294	166.145	11.607	48	-0.439	0.005±0.044	63	24
SISK	15.11612	104.2857	105.105	12.269	48	-0.437	0.023±0.049	63	24
DPT9	13.75678	100.5732	38.169	11.794	49	-0.437	-0.132±0.047	65	23
NKSW	15.69064	100.1141	21.406	13.866	47	-0.439	-0.270±0.055	65	21
CHAN	12.61031	102.1024	8.004	11.408	51	-0.443	-0.001±0.047	66	24
PJRK	11.81162	99.79635	-11.735	9.841	51	-0.433	-0.023±0.054	66	23
SRTN	9.132225	99.33136	9.949	7.786	51	-0.402	-0.231±0.051	65	25
SOKA	7.206694	100.5961	18.437	5.617	51	-0.365	-0.184±0.061	64	24

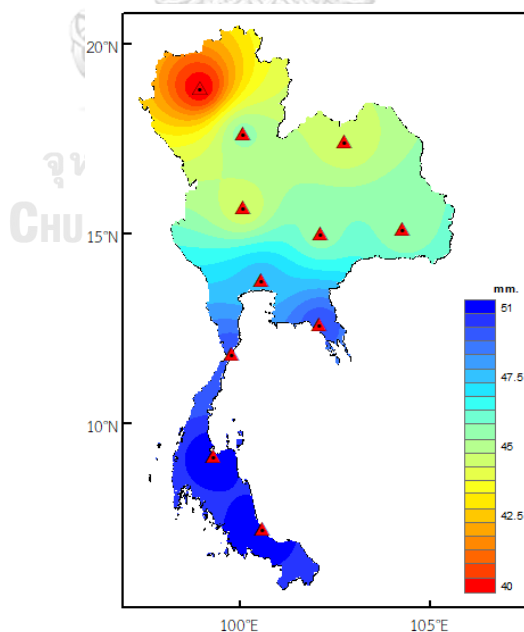
ผลการตรวจสอบแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณไอน้ำของทุกสถานีมีค่าเฉลี่ยประมาณ 49 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่ ±10 มิลลิเมตร โดยมีความมากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยที่สุดอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร ปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคมจากระดับประมาณ 20 มิลลิเมตรจนถึง 60 มิลลิเมตร เป็นผลจากอิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ได้นำพาไอน้ำจากทะเลเข้าสู่ฝั่ง ซึ่งเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนน้ำสามารถระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าสู่บรรยากาศได้มากขึ้น โดยสังเกตได้ว่ามี

ปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ระหว่างประมาณ 50 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวในช่วงเดือนตุลาคมปริมาณไอน้ำเริ่มลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 40 มิลลิเมตร (ดังภาพที่ 4-3)



ภาพที่ 4-3 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV แปรผกผันกับค่าระดับความสูง (msl.)

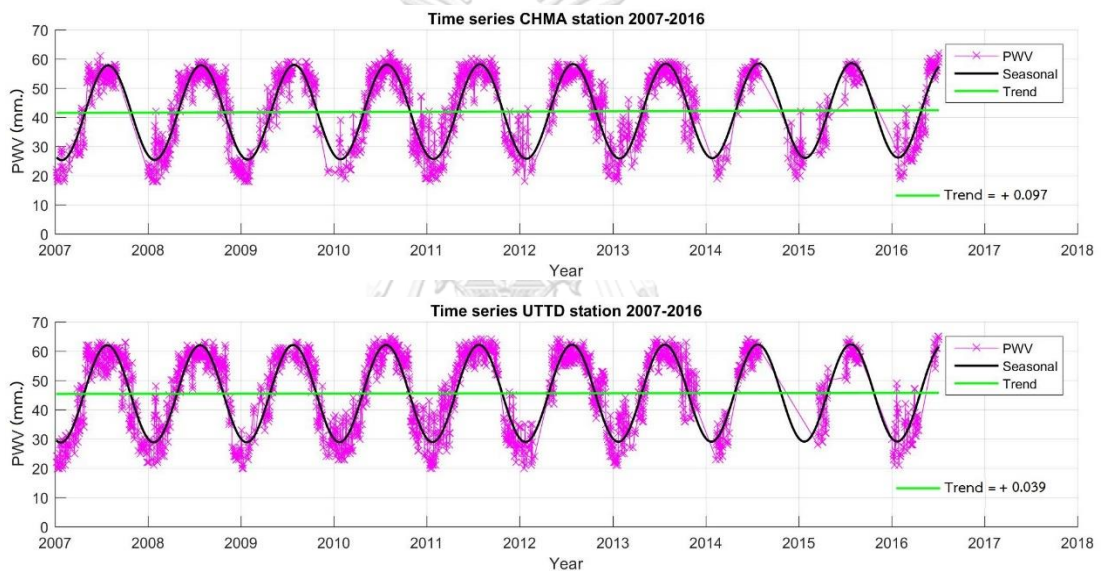
ความสัมพันธ์ของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ย PWV กับระดับความสูงของพื้นที่พบว่า เป็นลักษณะการแปรผกผันกันได้แก่ บริเวณที่มีระดับความสูงมาก เช่นบริเวณภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่าง มีค่าเฉลี่ย PWV ต่ำ และค่า PWV เฉลี่ยจะสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีระดับความสูงและละติจูดที่ลดลงมา ดังภาพที่ 4-4



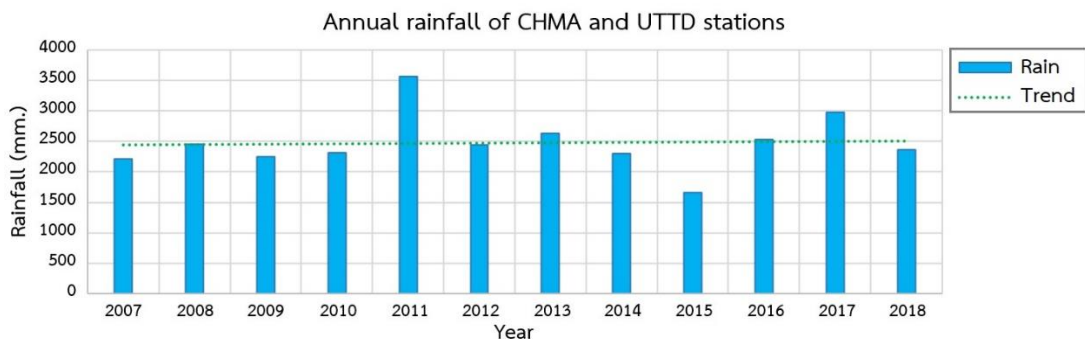
ภาพที่ 4-4 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ย PWV ในทุกสถานีรับสัญญาณ GNSS (สามเหลี่ยมสีแดง) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ย PWV มีค่าสูงในส่วนของภาคใต้ และน้อยลงในส่วนของภูมิภาคที่สูงขึ้นไป (Trakolkul & Satirapod, 2020b)

วัฏจักรของ PWV ในแต่ละปีแสดงให้เห็นกระบวนการในชั้นบรรยากาศและวัฏจักรการไหลเวียนของอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงประจำปีและแนวโน้มของ PWV ในแต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกันโดยมีลักษณะแยกได้ดังนี้

4.1.1.1 ภาคเหนือ: ที่สถานีเชียงใหม่ (CHMA) และสถานีอุตรดิตถ์ (UTTD) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 28 ถึง 63 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 16 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวก ทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-5) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-6)

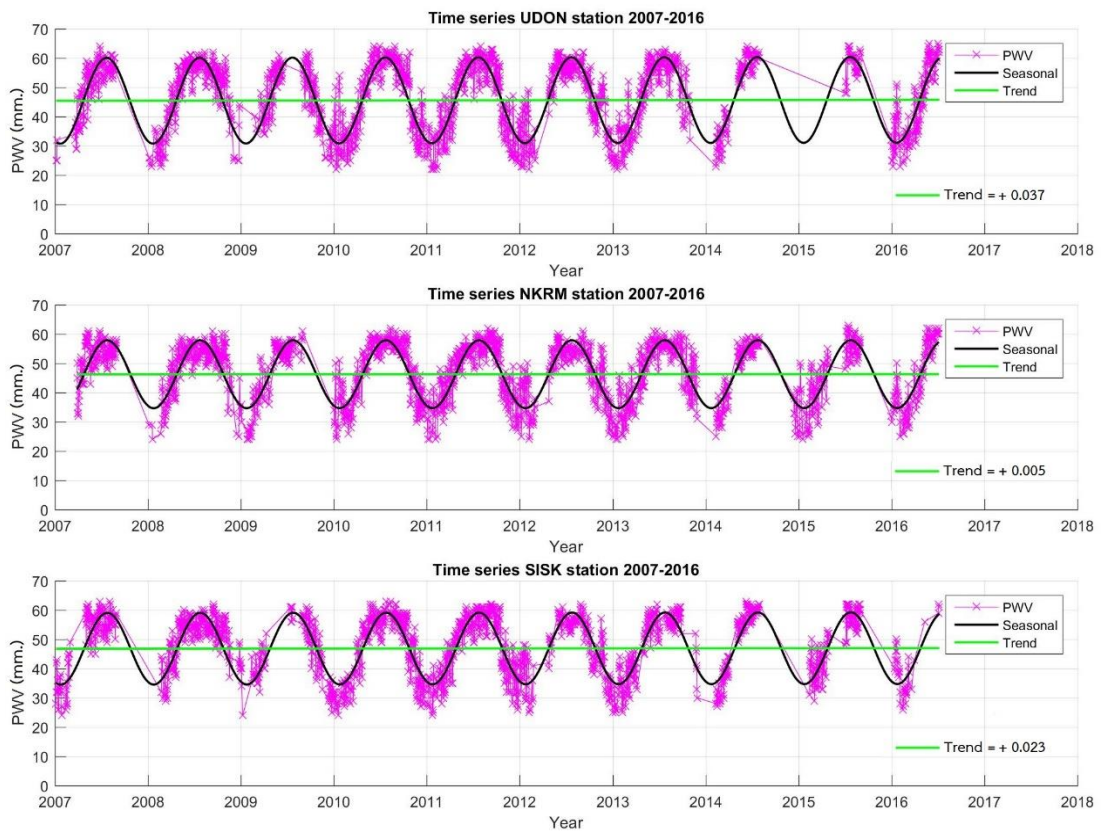


ภาพที่ 4-5 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคเหนือ (CHMA & UTDD) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 44.5 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก

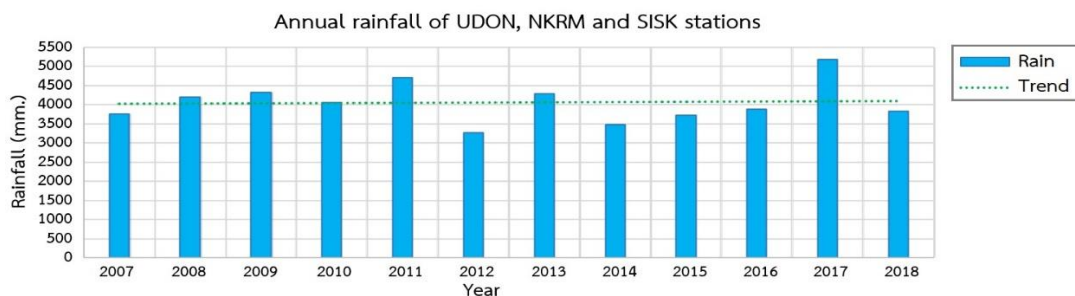


ภาพที่ 4-6 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดเชียงใหม่และอุตรดิตถ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHMA และ UTDD

4.1.1.2 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่สถานีอุดรธานี (UDON), สถานี นครราชสีมา (NKRM) และสถานีศรีสะเกษ (SISK) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 35 ถึง 61 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 13 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกทั้ง 3 สถานี (ดังภาพที่ 4-7) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาวเช่นเดียวกันกับในภาคเหนือ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-8)

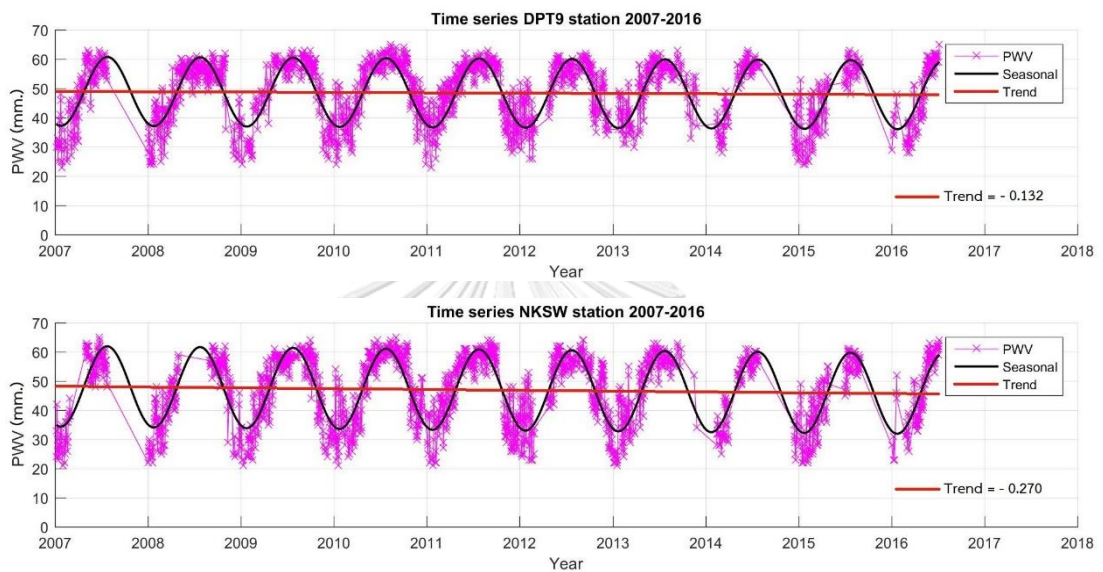


ภาพที่ 4-7 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (UDON, NKRM & SISK) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นบวก

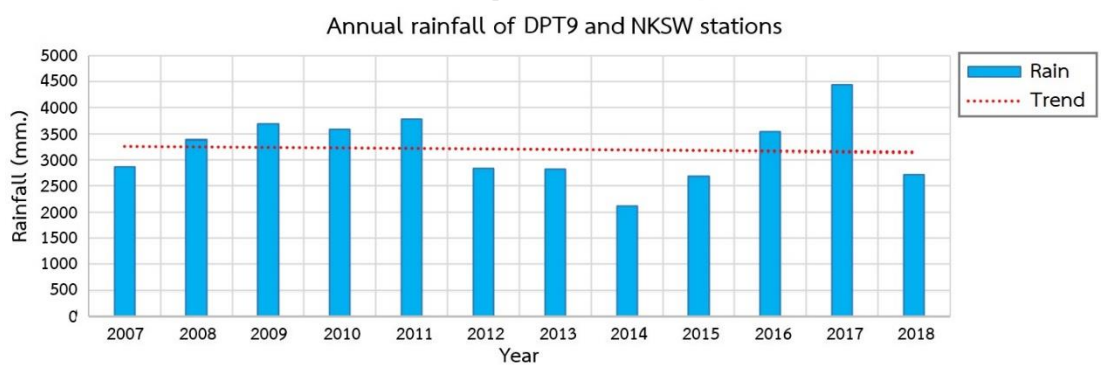


ภาพที่ 4-8 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดอุดรธานี, นครราชสีมา และศรีสะเกษ แสดงให้เห็นแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี UDON, NKRM และ SISK

4.1.1.3 ภาคกลาง ที่สถานีกรุงเทพมหานคร (DPT9) และสถานีนครสวรรค์ (NKSU) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 34 ถึง 62 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 13 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-9) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-10)

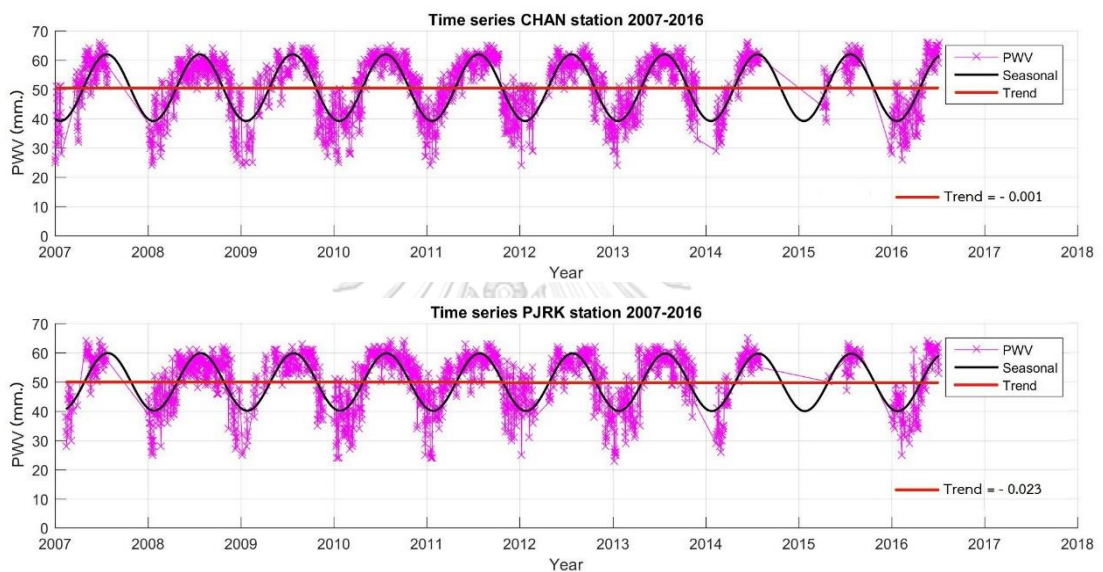


ภาพที่ 4-9 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้มของ PWV ในภาคกลาง (DPT9 & NKSU) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ

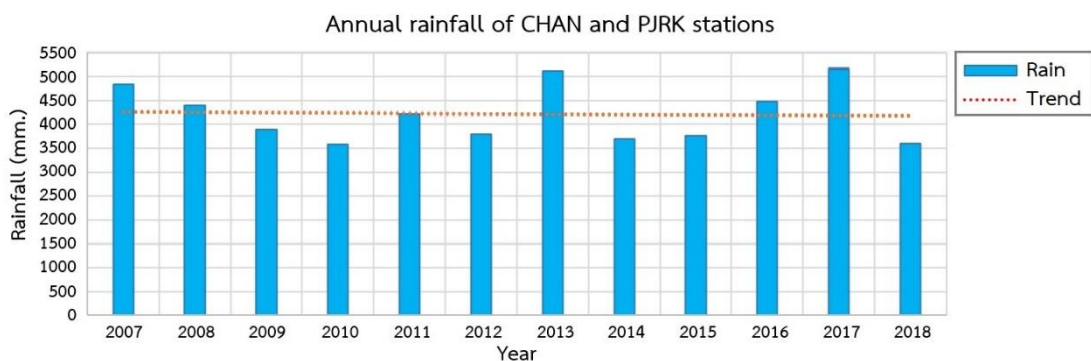


ภาพที่ 4-10 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดกรุงเทพฯ และนครสวรรค์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี DPT9 และ NKSU

4.1.1.4 ภาคตะวันออกและภาคตะวันตก ที่สถานีจันทบุรี (CHAN) และสถานีประจวบคีรีขันธ์ (PJK) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 40 ถึง 62 มิลลิเมตร และมีความเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 11 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 48 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานี (ดังภาพที่ 4-11) แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวเช่นเดียวกับในภาคกลาง สอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน (ดังภาพที่ 4-12)

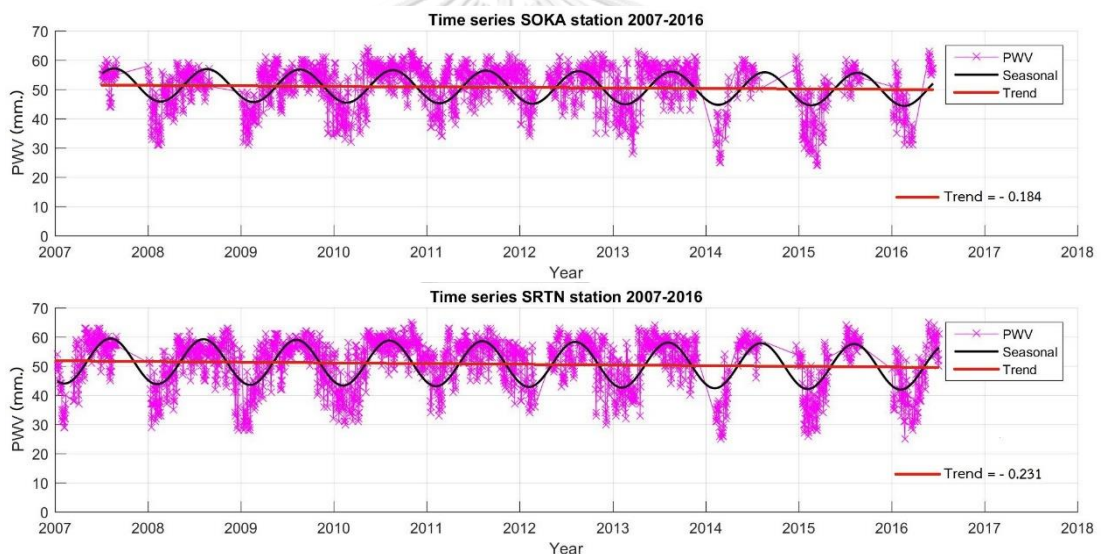


ภาพที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคตะวันออกและตะวันตก (CHAN & PJK) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ

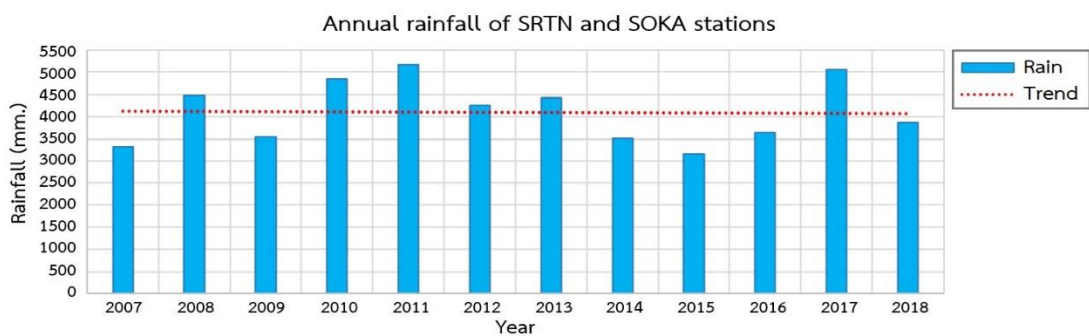


ภาพที่ 4-12 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดจันทบุรี และประจวบคีรีขันธ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี CHAN และ PJK

4.1.1.5 ภาคใต้ ที่สถานีสงขลา (SOKA) และสถานีสุราษฎร์ธานี (SRTN) มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 44 ถึง 58 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 7 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. (ภาพที่ 4-13) จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่า RMSE ของสถานีสุราษฎร์ธานีและสงขลามีค่าสูงกว่าในทุกภูมิภาคแสดงให้เห็นถึงรูปแบบของลักษณะภูมิอากาศในภาคใต้ที่มีลักษณะแตกต่างสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ภาคใต้มีฝนตกชุกตลอดปี ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุด ข้อมูลทั้งหมดชี้ชัดให้เห็นถึงลักษณะภูมิอากาศของภาคใต้ได้อย่างชัดเจน แนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบทั้ง 2 สถานีเช่นเดียวกับในภาคกลาง, ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภูมิภาคนี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน (ภาพที่ 4-14)



ภาพที่ 4-13 แสดงองค์ประกอบตามฤดูกาลและแนวโน้ม PWV ของภาคใต้ (SOKA & SRTN) มีค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. และแนวโน้มของ PWV เป็นลบ



ภาพที่ 4-14 ปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีของสถานีอุตุฯ ในจังหวัดสงขลา และสุราษฎร์ธานี แสดงให้เห็นแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับแนวโน้มของ PWV ที่สถานี SOKA และ SRTN

โดยสรุปภาพรวมแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกในส่วนของภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี 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 ประจำปีในภาคใต้และใกล้กับชายฝั่งมหาสมุทร โดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กกว่าในภูมิภาคของประเทศ อาจเป็นเพราะผลกระทบของทะเลต่อภูมิอากาศ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีฝนตกชุกมากกว่าภูมิภาคอื่น ความแปรปรวนขึ้นอยู่กับความสูงของสถานี ซึ่งสถานีในทะเลมักจะมีความแปรปรวนต่ำและสถานีที่เป็นพื้นที่หรือลักษณะพื้นที่ที่สูงขึ้นจะมีความแปรปรวนมากขึ้นตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift) ของ PWV ประจำปีอยู่ที่ประมาณ -0.428 ซึ่งอยู่ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมในเป็นฤดูฝนและเป็นช่วงที่มีค่า PWV สูงสุดประจำปี

วัฏจักรของ PWV ตามฤดูกาลเหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากความผันแปรขององค์ประกอบเปียก (ZWD) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง พบว่าช่วงที่เป็นฤดูฝน (ประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม) ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงของสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS ที่มีปริมาณน้ำฝนมากและหนาแน่นในช่วงเดียวกัน

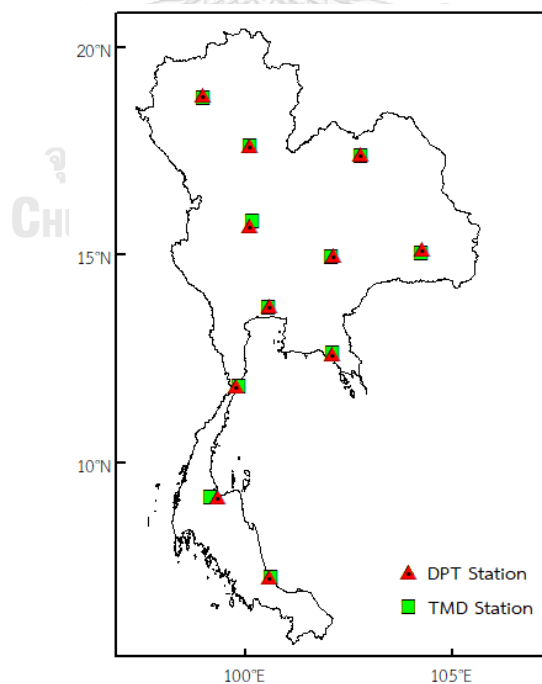
4.1.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับปริมาณน้ำฝน

ข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้สถานี GNSS ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมากที่สุด (จากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับปริมาณน้ำฝน ให้ความถูกต้องชัดเจน จากรายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้สัญญาณ GNSS สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลฝนจากโทรมาตรแบบอัตโนมัติ พบว่าที่ระยะ 8 กิโลเมตร เป็นระยะที่ยังคงมีข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS มากที่สุด (ตารางที่ 4-3) คือ สถานีจันทบุรี (CHAN) และสถานีสงขลา (SOKA) ซึ่งมีระยะห่างกันเพียง 1 กม. ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV กับค่าปริมาณน้ำฝน โดยแสดงตำแหน่งของสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาดังภาพที่ 4-15

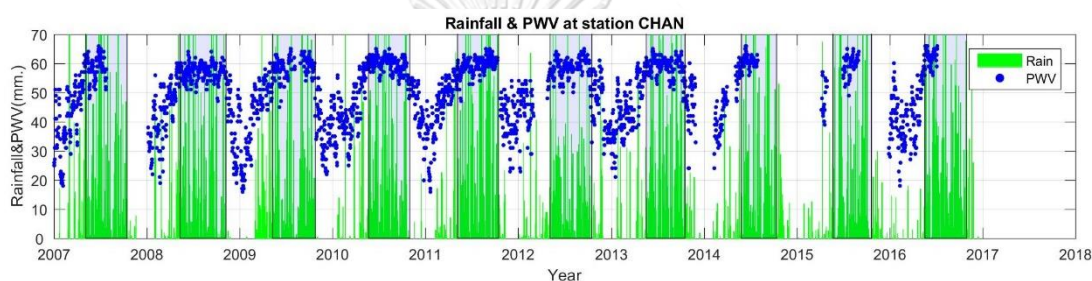
ตารางที่ 4-3 ระยะห่างระหว่างสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยากับสถานี GNSS CORS

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 4-15 แสดงตำแหน่งสถานี GNSS และสถานีตรวจวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา
(Trakolkul & Satirapod, 2020a)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV และปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง พบว่า ในแต่ละปี ตั้งแต่ปี 2007-2016 ของสถานี CHAN ในช่วงที่เป็นฤดูฝน (แถบแรเงาสีเทา ดังภาพที่ 4-16) ประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุดและมีค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำมากที่สุดเท่ากับ 51 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่ ± 10 มิลลิเมตร โดยมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยสุดที่ 24 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (ปี 2007-2016) จากสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับสถานี CHAN (ระยะห่าง 1 กิโลเมตร จากหน่วยงาน TMD) มีค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของน้ำฝนอยู่ที่ ± 25 มิลลิเมตร โดยมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 395 มิลลิเมตร และน้อยสุดที่ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนที่มากและหนาแน่นในช่วงเวลาเดียวกัน



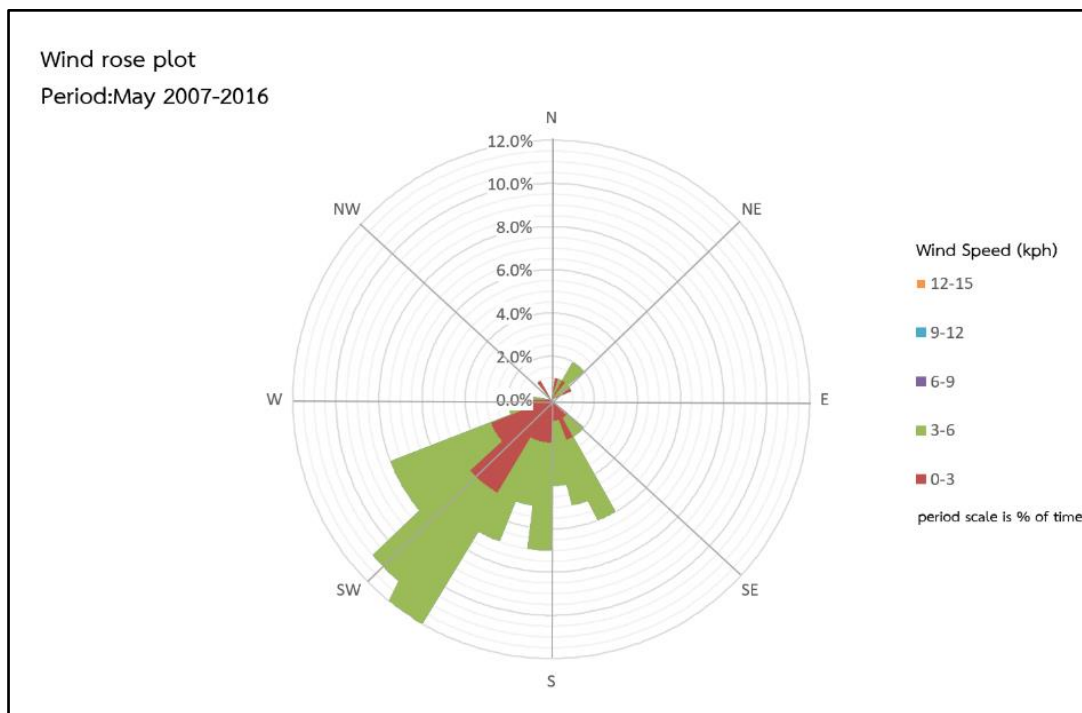
ภาพที่ 4-16 แสดงค่า PWV ของสถานี CHAN (จุดสีน้ำเงิน) กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง (กราฟแท่งสีเขียว) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่า PWV ที่มีการแกว่งตัวน้อย และมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดในช่วงฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง ตุลาคม (แถบแรเงา)

4.1.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศกับทิศทางและความเร็วลมในช่วงของการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

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

ในการศึกษาข้อมูลทิศทางและความเร็วลมทำโดยการพล็อตรูปแบบของแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) เพื่อแสดงปริมาณความเร็วและทิศทางของลม ณ สถานีจันทบุรี (CHAN) ในช่วงเดือนพฤษภาคมของทุกปี (ปี 2007-2016) โดยการจัดเรียงข้อมูลความเร็วลมที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละทิศทางและคำนวณเป็นร้อยละของเวลาที่ลมพัดมาจากทิศทางที่กำหนด (ดังภาพที่ 4-17) แสดงข้อมูลอยู่ในรูปกราฟวงกลม และในส่วนของข้อมูลทิศทางลมจัดเรียงโดยแบ่งวงกลมออกเป็นแปดส่วนโค้งที่รองรับมุมเท่ากับ 45 องศา ความยาวกราฟในแนวรัศมีของแต่ละส่วนแสดงร้อยละของ

เวลาที่ลมพัดในทิศทางนั้น ๆ โดยมีแถบสีที่ระบุระดับความเร็วของลมและค่าร้อยละของเวลาที่ลมพัดในความเร็วที่ระบุในทิศทางดังกล่าว ซึ่งทำให้เห็นความชัดเจนของข้อมูลที่มากขึ้น



ภาพที่ 4-17 แสดงแผนภูมิทิศทางลม (Wind Rose) จากสถานีจันทบุรี (CHAN) ช่วงเดือนพฤษภาคม ปี 2007-2016

ผลการพิจารณาพบว่า ในช่วงเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย (เดือนพฤษภาคม) ซึ่งกำหนดได้ด้วยเกณฑ์ GPS-PWV ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางลมเป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้

4.2 วิเคราะห์หาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทย

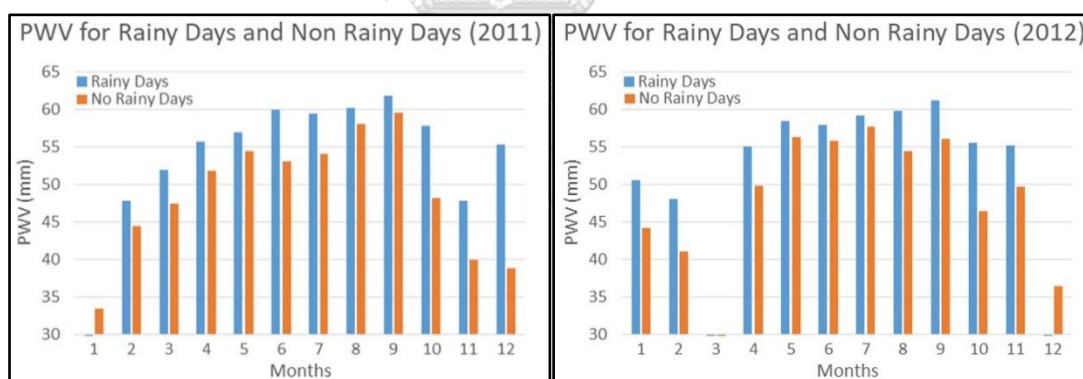
ในการวิเคราะห์เพื่อหาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทยนั้น มีงานวิจัยที่ผ่านมามากมายงานวิจัยที่น่าค่า GPS-PWV มาประยุกต์ใช้ในเพื่อวิเคราะห์หาวันเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดฤดูมรสุม ในส่วนของงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องของจำนวนข้อมูลและความครอบคลุมของสถานี GNSS โดยใช้ข้อมูล GPS-PWV ที่ได้จากสถานี GNSS ทั่วประเทศทุกภูมิภาค จำนวน 11 สถานี ระยะเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 10 ปี (ตั้งแต่ปี 2007-2016) ซึ่งทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ทั้งรายสถานีและแต่ละภูมิภาค ทำให้เกณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นกว่าการใช้เกณฑ์เดียวกันทั้งประเทศ ตามเกณฑ์เก่าที่ใช้ของกรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์อุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) นั้น

พิจารณาจากปริมาณน้ำฝนเพียงปัจจัยเดียว และเป็นเกณฑ์ที่ใช้ประกาศทั่วประเทศ ซึ่งในเชิงบริบทของพื้นที่นั้นอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

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

4.2.1 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

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV ในแต่ละเดือนนั้น สำหรับวันที่ฝนตก (แถบสีฟ้า) และวันที่ฝนไม่ตก (แถบสีส้ม) ค่า PWV มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ PWV สำหรับวันที่มีฝนตกจะมีค่าสูงกว่าวันที่ไม่มีฝนตก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Manandhar et al. (2016) ที่พบว่า ค่า PWV มีค่าเฉลี่ยในวันที่ฝนตกสูงกว่าในวันที่ฝนไม่ได้ตกเช่นกัน และจากการวิเคราะห์ข้อมูลในปี 2011 และปี 2012 สามารถเห็นความแตกต่างสูงสุดของ PWV ในวันที่ฝนตกและฝนไม่ตกได้ถึง 33.48 มม. ในเดือนมกราคม และ 36.40 มม. ในเดือนธันวาคมตามลำดับ สำหรับเดือนพฤษภาคมซึ่ง

เป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีความแตกต่างของ PWV ระหว่างวันที่ฝนตกและวันที่ฝนไม่ตกเพียง 2.51 มม. และ 2.09 มม. ตามลำดับ และพบว่ารูปแบบการกระจายของค่า PWV เฉลี่ยรายเดือนสำหรับวันที่ฝนตกและฝนไม่ตก สอดคล้องกับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูล PWV เพื่อกำหนดการเข้าสู่ฤดูมรสุม

4.2.2 ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม

ผลการศึกษาก่อนหน้านี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWV และปริมาณน้ำฝนในหลายประเด็น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของค่า PWV นั้นหมายถึงฝนตก ซึ่งในหัวข้อนี้นำเสนอการกำหนดค่าสำหรับเกณฑ์ PWV ในการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม โดยเลือกเดือนพฤษภาคมของทุกปี (ตั้งแต่ปี 2007-2016) มาใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4-4

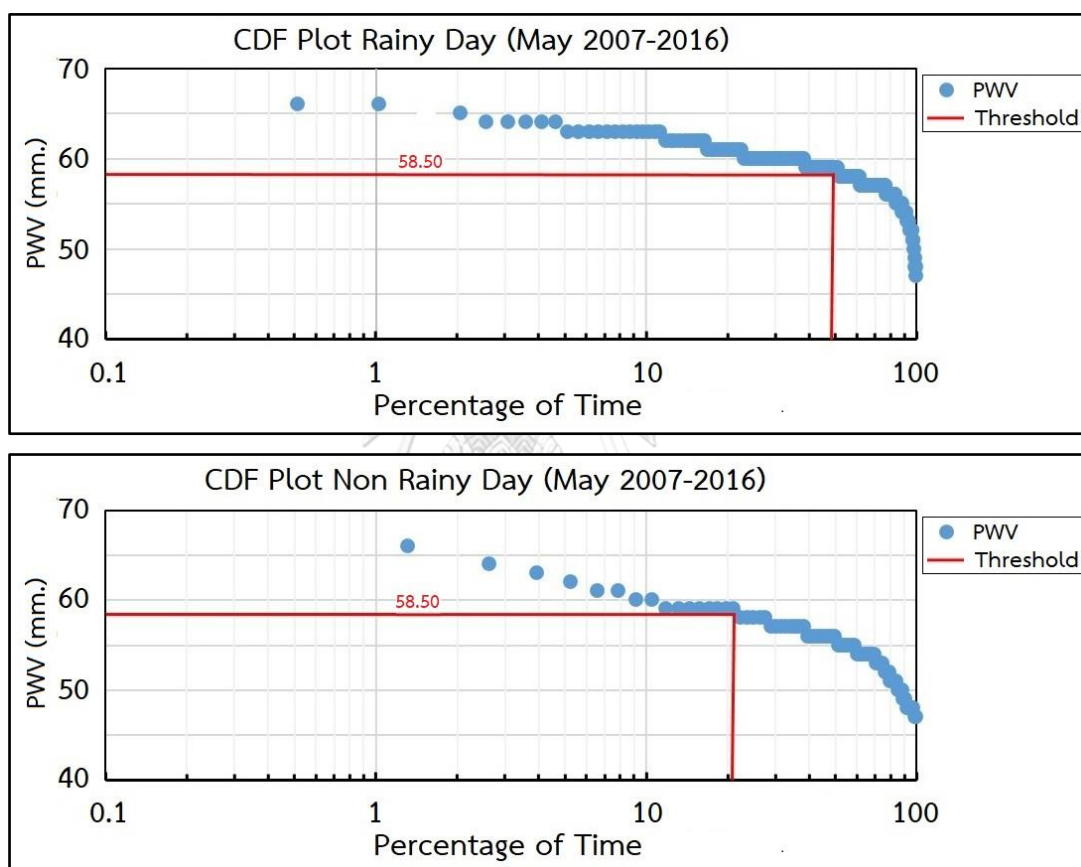
ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ย PWV ต่อวันต่อเดือนของสถานีจันทบุรี (CHAN) ในเดือนพฤษภาคมของปี 2007-2016 สำหรับวันที่มีฝนตก และวันที่ฝนไม่ตก มีค่าเท่ากับ 58.50 และ 54.50 ตามลำดับ

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
เฉลี่ย	58.50	54.50

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 เพื่อตรวจสอบว่า

เกณฑ์ที่ใช้ระบุการเข้าสู่ฤดูฝนเมื่อค่า 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 ภาพบน CDF Plot แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่มีฝนตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. ซึ่งมีจำนวนถึง 50% ในขณะที่ภาพล่างมีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ฝนไม่ตกที่มีเกณฑ์ PWV มากกว่า 58.50 มม. อยู่เพียง 20%

4.2.3 การทดสอบการใช้ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาการเข้าสู่ฤดูมรสุม

ในการทดสอบเกณฑ์ของการระบุวันเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จากการพิจารณา ค่า PWV (เท่ากับ 58.50 มม.) นั้น ทำโดยการเปรียบเทียบ PWV Time-series ของสถานีจันทบุรี (CHAN) ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนและทิศทาง/ความเร็วลม เนื่องจากสถานีจันทบุรีเป็นสถานีที่อยู่

ในภูมิภาคที่ได้รับผลกระทบจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น (แต่ทั้งนี้ไม่พิจารณารวมพื้นที่ภาคใต้ เนื่องจากเหตุผลที่รูปแบบของการเกิดฝนในพื้นที่ภาคใต้นั้นแตกต่างจากพื้นที่อื่นๆ ของประเทศไทยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว) ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้ค่าเกณฑ์ PWV เท่ากับ 58.50 มม. หรือมากกว่านั้นติดต่อกัน 3 วัน สามารถระบุการเริ่มต้นของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในประเทศไทยได้ โดยทำการเปรียบเทียบกับวันที่ประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยาตั้งตารางที่ 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 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบวันที่ระบุการเริ่มต้นของฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ตั้งแต่ปี 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 หลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่องและเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูด

ที่สูงขึ้นไปซึ่งมีลักษณะของค่าเฉลี่ย PWV ที่ลดลง เช่น ภาคกลาง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนืออื่น พบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ (เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยของ PWV ที่ต่ำกว่าในส่วนของสถานีจันทบุรีที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากสถานี CHAN เป็นสถานีที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือใกล้ทะเลและชายฝั่ง และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ก่อนภูมิภาคอื่น) ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ ทำให้สอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่ เพราะช่วงเวลาในการเข้าสู่ฤดูฝนของแต่ละภูมิภาคไม่เท่ากัน บางพื้นที่เร็วในขณะที่บางพื้นที่เกิดช้ากว่า ในอนาคตถ้ามีข้อมูลและสถานี GNSS ที่เพิ่มมากขึ้นอาจลงรายละเอียดได้ถึงระดับจังหวัดหรืออำเภอได้

ดังนั้นผลการทดสอบการใช้ค่าเกณฑ์ PWV สำหรับการพิจารณาวันเข้าสู่ฤดูมรสุมสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

4.2.3.1 มีความแม่นยำมากขึ้นและวันที่ระบุวันที่มีความใกล้เคียง ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาในการพิจารณาอิทธิพลจากปรากฏการณ์ลานีญา ว่าประเทศไทยจะได้รับอิทธิพลดังกล่าวหรือไม่

4.2.3.2 สอดคล้องตามบริบทของพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคหลายครั้งหลังจากมีการประกาศวันเข้าสู่ฤดูมรสุม (จากการประกาศเดิมด้วยวิธีของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ) แล้วในบางภูมิภาคเกิดฝนขาดช่วงเกษตรกรหว่านเมล็ดพันธุ์แล้วฝนไม่ตกทำให้ผลผลิตเสียหาย หรือบางปีที่เกิดมรสุมมาก่อนกำหนดส่งผลให้เกษตรกรมีเวลาเตรียมดินน้อยไม่มีเวลาสำหรับการตากดินเพื่อทำลายวัชพืช เมื่อหว่านเมล็ดพันธุ์ลงไปแล้วอาจเสียหายเนื่องจากมีวัชพืชในแปลงนามาก เป็นต้น

4.2.3.3 วิธีนี้ใช้งานง่ายเนื่องจากต้องการเพียงค่า PWV และไม่ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณฝนและทิศทางลม

4.2.3.4 หลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วจะมีปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่อง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

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

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 รูปแบบความแปรปรวนของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV)

จากงานวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ย PWV ของทุกสถานีมีค่า 49 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของไอน้ำอยู่ที่ ± 10 มิลลิเมตร (ค่ามากที่สุดอยู่ที่ 66 มิลลิเมตรและน้อยสุดอยู่ที่ 18 มิลลิเมตร) ปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนกรกฎาคมจากระดับประมาณ 20 มิลลิเมตรจนถึง 60 มิลลิเมตร เป็นผลมาจากอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่นำพาไอน้ำจากทะเลเข้าสู่ฝั่งในช่วงเข้าสู่ฤดูร้อน เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนปริมาณไอน้ำมีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันอยู่ระหว่างประมาณ 50 มิลลิเมตรถึง 60 มิลลิเมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวในเดือนตุลาคมปริมาณไอน้ำเริ่มลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 40 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า PWV แปรผกผันกับระดับความสูงของพื้นที่ บริเวณที่มีระดับความสูงมาก เช่นบริเวณภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่างจะมีค่าเฉลี่ย PWV ต่ำ และค่า PWV เฉลี่ยจะสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีระดับความสูงและละติจูดที่ลดลงมา

ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงบวกแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมงจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้กับสถานี GNSS พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนรวมในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนพื้นที่ภาคกลาง, ภาคตะวันออก, ภาคตะวันตกและภาคใต้ มีแนวโน้มของ PWV เป็นไปในเชิงลบ แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำฝนในพื้นที่เหล่านี้ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง ที่มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งมีลักษณะรูปแบบของสภาพ

ภูมิอากาศเฉพาะ พบว่า ภาคใต้มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) อยู่ที่ 44 ถึง 58 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดประมาณ 7 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ย PWV เท่ากับ 51 มม. ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศมีการแกว่งตัวน้อยที่สุด (RMSE ของสถานีสุราษฎร์ธานีและสงขลามีค่าสูงกว่าในทุกภูมิภาค) 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 โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ที่มีลักษณะพิเศษไม่เหมือนกับพื้นที่อื่น ๆ ความผันแปรระหว่างแอมพลิจูดของ PWV ประจำปีในภาคใต้และใกล้กับชายฝั่งมหาสมุทรขนาดเล็กกว่าในภูมิภาคอื่นของประเทศ อาจเป็นเพราะผลกระทบของทะเลต่อภูมิอากาศโดยรอบทำให้ภาคใต้มีฝนตกชุกต่อเนื่องทั้งจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูร้อนและลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว การพิจารณาแค่เพียงปริมาณน้ำฝนเพียงอย่างเดียวจะทำได้เพียงอย่างเดียว จะทำให้ไม่สามารถเห็นความชัดเจนของฤดูกาลในภาคใต้ได้ดีเท่ากับแบบจำลองของ PWV ที่สามารถทำให้เห็นสภาพภูมิอากาศที่ชัดเจนมากกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่าแอมพลิจูดที่ใหญ่จึงทำให้เห็นความชัดเจนของช่วงฤดูกาล

นอกจากนี้ในการศึกษาข้อมูลทิศทางและความเร็วลมพบว่า ในช่วงเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย (เดือนพฤษภาคม) ซึ่งกำหนดได้ด้วยเกณฑ์ GPS-PWV ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางลมเป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้

5.1.2 เกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมจากข้อมูล PWV

การหาเกณฑ์ใหม่ในการพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุมในประเทศไทยนั้นในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอเกณฑ์ด้วยการพิจารณาจากค่า PWV ที่มีค่าเท่ากับ 58.50 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 ซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ ทั้งรายสถานีและแต่ละภูมิภาค ทำให้เกณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นกว่าเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์ภูมิภาค อุตุนิยมวิทยา, 2560) ที่พิจารณาจากปริมาณน้ำฝนเพียงปัจจัยเดียวและใช้เป็นเกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ

ผลลัพธ์ของการใช้เกณฑ์ใหม่ในการระบุวันเริ่มต้นฤดูมรสุมโดยใช้ค่า PWV เมื่อเทียบกับเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาพบว่า เกณฑ์ใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีและมีความแม่นยำ และมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูล PWV ร่วมกับเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อพิจารณาว่า ประเทศไทยจะได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญาในปีนั้น ๆ หรือไม่ นอกจากนี้ผลการวิจัยยังพบว่า หลังจากมีการกำหนดวันเข้าสู่ฤดูมรสุมแล้วจะมีปริมาณน้ำฝนที่ตกอย่างต่อเนื่องและเมื่อใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันนี้กับภูมิภาคอื่นที่อยู่ละติจูดที่สูงขึ้นไปซึ่งมีลักษณะของค่าเฉลี่ย PWV ที่ลดลง เช่น ภาคกลาง, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนืออื่น พบว่า การเข้าสู่ฤดูมรสุมจะมาช้ากว่าประมาณ 3-5 วัน ตามบริบทของพื้นที่ (เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยของ PWV ที่ต่ำกว่าในส่วน of สถานีจันทบุรีที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากสถานี CHAN เป็นสถานีที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงใต้ใกล้ทะเลและชายฝั่ง และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อ่อนกว่าภูมิภาคอื่น) ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งใช้เกณฑ์เดียวกันทั่วประเทศ ทำให้สอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่ เพราะช่วงเวลาในการเข้าสู่ฤดูฝนของแต่ละภูมิภาคไม่เท่ากัน บางพื้นที่เร็วในขณะที่บางพื้นที่เกิดช้ากว่า ในอนาคตถ้ามีข้อมูลและสถานี GNSS ที่เพิ่มมากขึ้นอาจลงรายละเอียดได้ถึงระดับจังหวัดหรืออำเภอได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ใช้งานง่ายเนื่องจากต้องการเพียงค่า PWV และไม่ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณฝนและทิศทางลม

สำหรับผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (PWV) เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกแก่หน่วยงานราชการในการระบุช่วงการเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศไทย และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนการเกษตรและบริหาร

จัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถใช้ข้อมูลความแปรปรวนของค่า PWV ในส่วนของแนวโน้ม (Trend) และองค์ประกอบตามฤดูกาล (Seasonal Cycle) เพื่อประโยชน์ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate Change) ในประเทศไทยที่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางเกษตรกรรมซึ่งเป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS CORS จำนวน 11 สถานีกระจายทั่วประเทศ ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลการรับวัดที่มีระยะเวลาที่ยาวนานมากที่สุดในขณะที่ทำวิจัย โดยในแต่ละภูมิภาคข้อมูลของสถานีมีเพียงภูมิภาคละ 2-3 สถานี ซึ่งในปัจจุบันสถานี CORS ในประเทศไทยเริ่มมีมากขึ้นถึง 244 สถานี (กรมแผนที่ทหาร, 2019) ในอนาคตถ้าสถานีเหล่านี้มีข้อมูลที่ยาวนานมากพอ จะช่วยให้การหาเกณฑ์การเริ่มต้นฤดูมรสุมสำหรับประเทศไทยทำได้ละเอียดถึงในระดับจังหวัดได้ มีความละเอียดและสอดคล้องกับสภาพจริงตามบริบทของแต่ละพื้นที่ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานี CORS ดังกล่าวจะทำให้การวิจัยในอนาคตมีความครอบคลุมด้านพื้นที่ และมีความถูกต้องได้แม่นยำมากขึ้น (Shuanggen & Luo, 2009) รวมถึงในอนาคตถ้าหากมีการศึกษาในระดับที่ใหญ่ขึ้นและบูรณาการข้อมูลกันระหว่างประเทศภายในภูมิภาคเอเชียจะทำให้ได้ข้อมูล PWV ที่มีความละเอียดสูงทั้งเชิงพื้นที่และเวลา ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองในการพยากรณ์ทั้งในระยะสั้นและการวิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระยะยาว (Chen & Liu, 2014) และการรวมตัวของไอน้ำแบบบูรณาการเข้าด้วยกันในแบบจำลองการคาดการณ์สภาพอากาศและการพยากรณ์อากาศด้วยตัวเลข (NWM) ของ (Wang et al., 2005) แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เครือข่าย GPS ที่มีอยู่และข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่จำลองขึ้นสำหรับการประมาณค่าไอน้ำซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผสมผสานรูปแบบการพยากรณ์อากาศด้วยตัวเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลแบบภายหลัง (Post Processing) โดยเลือกใช้ข้อมูลเฉพาะกลุ่มดาวเทียม GPS ในการประมวลผลเท่านั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการหาค่า PWV ในการทำวิจัยต่อไปควรรนำดาวเทียมทุกระบบมาร่วมใช้ในการประมวลผล ซึ่งจากงานวิจัยของ Jongrukchob T. et al. (2017) แสดงให้เห็นว่า ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล GPS และข้อมูล GLONASS มีความใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของข้อมูลที่ได้จากระบบ BEIDOU ยังมีความแตกต่างกัน อาจเป็นผลมาจากระบบยังไม่สามารถทำงานได้เต็มครบสมบูรณ์ทั้งระบบ และจากงานวิจัยของ Chaiyut Charoenphon (2020) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลุ่มของดาวเทียม GNSS จาก Galileo และ BeiDou ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า PWV ได้ ดังนั้นในอนาคตเมื่อระบบดาวเทียมทั้ง 3 ระบบใช้งานได้สมบูรณ์จะส่งผลให้การประมวลผลหา PWV มีความถูกต้องและผลลัพธ์น่าเชื่อถือมากขึ้น

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

5.2.4 รูปแบบความแปรปรวนของไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงแนวนอนและองค์ประกอบตามฤดูกาลในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือ Functional Model ที่เลือกใช้อาจยังไม่เหมาะสมกับพื้นที่ในส่วนของภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากทุกภาคของประเทศไทยได้รับอิทธิพลทั้งจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดจากประเทศจีนมาในบริเวณของภาคอื่น ๆ ไม่ผ่านทะเลจึงไม่นำพาความชื้นมาด้วย แต่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมาถึงภาคใต้ฝั่งตะวันออกผ่านอ่าวไทย ส่งผลให้นำพาความชื้นเข้ามาด้วยจึงทำให้มีฝนตกในเดือนที่ภาคอื่น ๆ มีลักษณะหนาวและแห้ง ดังนั้นลักษณะภูมิอากาศหรือฝนตกในภาคใต้ฝั่งตะวันออกจึงผิดแผกไปจากบริเวณอื่นของประเทศ ซึ่งงานวิจัยต่อไปควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ โดยศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้แบบจำลองที่ประกอบด้วย ฟังก์ชัน Cosine จำนวน 2 ลูกคลื่นที่มีเฟสต่างกันประมาณ 180 องศา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์วัฏจักรรายปีและรายครึ่งปีในส่วนของภาคใต้ฝั่งตะวันออกซึ่งมีรูปแบบของมรสุมไม่เหมือนภูมิภาคอื่น

5.2.5 ผลของการนำเสนอแนวนอนของฝนที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคจากงานวิจัยนี้ มีความสำคัญและยังไม่เคยมีงานวิจัยที่ใช้ค่าไอน้ำในชั้นบรรยากาศซึ่งมีความละเอียดในระดับเชิงพื้นที่รายภูมิภาค (Local Model) และใช้ข้อมูลระยะยาวมาพยากรณ์ (Predict) แนวนอนของการเกิดฝนในระยะยาว ซึ่งถือว่ามีความสำคัญมากในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ในประเทศไทย ทั้งนี้งานวิจัยต่อไปเมื่อสถานี CORS มีมากขึ้นควรมีการศึกษาเพิ่ม เพื่อให้ครอบคลุมด้านพื้นที่ที่มีความละเอียดมากขึ้นไปอีก

5.2.6 ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะสภาพแวดล้อมของที่ตั้งสถานี CORS แต่ทั้งนี้ประเด็นเรื่องสภาพพื้นที่โดยรอบของสถานี CORS ก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป เนื่องจาก Canadian Geodetic Survey (2017) ได้ให้ข้อเสนอแนะไว้ว่า สภาพแวดล้อมโดยรอบสถานี CORS ควรเลือกพื้นที่เปิดโล่งโดยรอบที่มีสิ่งกีดขวางน้อยที่สุดในระยะไม่น้อยกว่า 30 ม. ซึ่งการ

เปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมโดยรอบสถานี เช่น การเติบโตของต้นไม้หรือไม้พุ่ม ต่อเติมอาคาร การต่อเติมคานฟ้า ผนังโลหะ และป้ายโลหะ เป็นต้น อาจทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) อาจส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ

5.2.7 งานวิจัยต่อไป ควรมีการพัฒนาข้อมูลสู่รูปแบบการวิเคราะห์แบบ Real-Time หรือ Near Real-Time เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทันสมัยเป็นปัจจุบันในการระบุวันเข้าสู่ฤดูมรสุม

5.2.8 เนื่องจากในช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ (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 แต่ไม่ทุกครั้งที่มีอิทธิพลมาถึงประเทศไทย

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

บรรณานุกรม

- Alshawaf, F., Dick, G., Heise, S., Simeonov, T., Vey, S., Schmidt, T., & Wickert, J. (2016). Decadal variations in atmospheric water vapor time series estimated using ground-based GNSS. Atmospheric Measurement Techniques Discussions: 1 - 16 . doi:10.5194/amt-2016-151
- 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
- Boehm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. Journal of Geodesy 81(10): 679-683. doi:10.1007/s00190-007-0135-3
- 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 [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 [2020, June 2]

- Chaiyut Charoenphon. (2020). 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.
- Chen, B., & Liu, Z. (2014). Analysis of Precipitable Water Vapor (PWV) Data Derived from Multiple Techniques: GPS, WVR, Radiosonde and NHM in Hong Kong. In *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume I* (pp. 159-175).
- 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.
- Coster, A. J., Niell, A. E., Solheim, F. S., Mendes, V. B., Toor, P. C., & Langley, R. B. (1997). The Effect of Gradients in the GPS Estimation of Tropospheric Water Vapor. The ION 53rd Annual Meeting, Albuquerque, NM, June 30 to July 1, 1997. New Mexico.
- Danielson, E. W., Levin, J., & Abrams, E. (2003). Meteorology. 2nd ed. New York: Von Hoffmann Press.
- Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. (1991). Effects of atmospheric modeling errors on determinations of baseline vectors from very long baseline interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 96 (B1) : 643 - 650 . doi:10.1029/90JB01503
- 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.
- Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. (1991). Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of Wet Delay. Journal of Geophysical Research 96(B4): 6541-6555. doi:10.1029/90JB00834
- Fasullo, J., & Webster, P. J. (2002). A Hydrological Definition of Indian Monsoon Onset and Withdrawal. Journal of Climate 16: 3200-3211. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3200a:AHDOIM>2.0.CO;2

- Golden Gate Weather Services. (2020). El Niño and La Niña Years and Intensities [Online]. Available from: <https://ggweather.com/enso/oni.htm> [2020, May 25]
- Holland, P. W., & Welsch, R. E. (1977). Robust regression using iteratively reweighted least-square. 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
- Jin, S., Park, J.-U., Cho, J.-H., & Park, P.-H. (2007). Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay (1994–2006) and climate implications. Journal of Geophysical Research 112(D9). doi:10.1029/2006jd007772
- 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., & Srestasathien, P. (2017). Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model Using AQUA Satellite for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation in Thailand. Journal of RESGAT 18(Special).
- Kiguchi, M., & Matsumoto, J. (2005). The Rainfall Phenomena during the Pre-monsoon Period over the Indochina Peninsula in the GAME-IOP Year, 1998. Journal of the Meteorological Society of Japan 83(1): 89-106. doi:10.2151/jmsj.83.89
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions 5(2): 12-28. doi:10.1007/pl00012883
- Li, M., Li, W., Shi, C., Zhao, Q., Su, X., Qu, L., & Liu, Z. (2015). Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach. Advances in Space Research 55(1): 150-162. doi:10.1016/j.asr.2014.10.010

- 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) : 1 3 5 - 1 4 2 . doi:10.1016/j.geog.2015.03.001
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M., . . . 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/s00190-015-0818-0
- 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).
- Matsumoto, J. (1997). Seasonal Transition of Summer Rainy Season over Indochina and Adjacent Monsoon Region. Advances in Atmospheric Science 14(2): 231-245. doi:10.1007/s00376-997-0022-0
- Nave, C. R. (2001) . The Barometric Formula [Online]. Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/barfor.html> [2018, Sep 19]
- NCO. (2018). The GPS space segment: Constellation Arrangement [Online]. Available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> [2018, Oct 10]
- 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.
- Rangsun Arpakupphakul. (2004). Introduction to Meteorology. Bangkok: Chulalongkorn University.
- 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
- 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.

- Seo, S. (2006). A Review and Comparison of Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets. Master's Thesis, Graduate School of Public Health, University of Pittsburgh.
- Sharifi, M. A., & Souri, A. H. (2014). A hybrid LS-HE and LS-SVM model to predict time series of precipitable water vapor derived from GPS measurements. Arabian Journal of Geosciences 8(9): 7257-7272. doi:10.1007/s12517-014-1716-0
- 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
- Small, J. D. (2011). ESCI 106 - Weather and Climate Lecture 7 [Online]. Available from: <https://slideplayer.com/slide/5013096/> [2018, Sep 21]
- Stull, R. B. (2000). Meteorology for Scientists and Engineers. 2nd ed. USA: Brooks Cole; (December 30, 1999).
- 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., Srestasathiern, 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. doi:10.1080/00396265.2020.1713611
- Tririsatayawong 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.

- Uang-aree, P., Kingpaiboon, S., & Khuanmar, K. (2015). Determination of the dates of the southwest monsoon in northeastern Thailand from the data on precipitable water vapor obtained by GPS. Russian Meteorology and Hydrology 40(10): 647-657. doi:10.3103/s1068373915100027
- Wang, J., Zhang, L., & Dai, A. (2005). Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications. Journal of Geophysical Research 110(D21). doi:10.1029/2005JD006215
- Yuan, Y. B., Zhang, K. F., Rohm, W., Choy, S., Norman, R., & Wang, C. S. (2014). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. Journal of Geophysical Research-Atmospheres 119(16): 10044-10057. doi:10.1002/2014JD021486
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2548). เอกสารคำสอนวิชา งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมแผนที่ทหาร. (2019). ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Station) ในประเทศไทย [Online]. Available from: <https://geoportal.rtsd.mi.th/portal/apps/webappviewer/index.html?id=34f1f8f7a4be423897f0fb930f1dffa7> [31 พฤษภาคม 2563]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานลม. สารานุกรมพลังงานทดแทน. 1:283-309.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (ม.ป.ป.). ฤดูกาลของประเทศไทย [Online]. Available from: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=53> [2 ตุลาคม 2561]
- ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. (2560). วันเริ่มต้น-สิ้นสุดฤดูฝน และเกณฑ์การพิจารณาวันเริ่มต้นฤดูมรสุม [Online]. Available from: <http://climate.tmd.go.th/content/article/411> [2 ตุลาคม 2561]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายโชคชัย ตระกลกุล
วัน เดือน ปี เกิด	3 ธันวาคม 2520
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วศ.ม.วิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2555 วศ.บ.วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต 2543
ที่อยู่ปัจจุบัน	117/413 หมู่ 9 หมู่บ้านบัวทอง ซ.9/8 ถ.ตลิ่งชัน-สุพรรณบุรี ต.บางรักพัฒนา อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110
ผลงานตีพิมพ์	Trakolkul, C., & Satirapod, C. (2020b). Variations of Precipitable Water Vapor Using GNSS CORS in Thailand. Survey Review. DOI:10.1080/00396265.2020.1713611 Trakolkul, C., and Satirapod, C., 2020, 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.