

การวิเคราะห์ค่าปริมาณไอน้ำจากเทคนิคการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GNSS จากสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่องในประเทศไทย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ANALYSIS OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM PRECISE POSITIONING (PPP) TECHNIQUE USING GNSS DATA FROM CONTINUOUSLY OPERATING REFERENCE STATIONS (CORS) IN THAILAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ค่าปริมาณไอน้ำจากเทคนิคการประมวลผล
จุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GNSS
จากสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่องในประเทศไทย

โดย

นางสาวปารมี หมื่นราม

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พลະการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

..... กรรมการ
(ดร.ธงทิศ ฉายากุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พันโท ดร.สรวิศ สุภเวชัย)

ปารมี หมื่นราม : การวิเคราะห์ค่าปริมาณไอน้ำจากเทคนิคการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GNSS จากสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่องในประเทศไทย (ANALYSIS OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM PRECISE POSITIONING (PPP) TECHNIQUE USING GNSS DATA FROM CONTINUOUSLY OPERATING REFERENCE STATIONS (CORS) IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามระยะทางของพื้นที่ศึกษา จากการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากแต่ละสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ทำงานแบบต่อเนื่อง ด้วยโปรแกรม (Position And Navigation Data Analyst: PANDA) เนื่องจากปัจจุบันสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่อง GNSS (Continuously Operating Reference Stations: CORS) มีประโยชน์ในด้านการหาค่าพิกัดตำแหน่งแล้ว ยังมีบทบาทในงานด้านอุตุนิยมวิทยา โดยข้อมูล GNSS นั้นสามารถหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Precipitate Water Vapor: PWV) ที่ได้จากค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งจะใช้ข้อมูลสถานีทั้งหมด 10 สถานี ซึ่งได้จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรมที่ดิน และกรมโยธาธิการและผังเมือง ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2559

โดยที่ความครอบคลุมพื้นที่ (Coverage Area) ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากแต่ละสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่อง GNSS ยังไม่มีความแน่ชัดสำหรับพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งความครอบคลุมแต่ละสถานีจะสามารถเป็นแนวทางในการวิเคราะห์จัดตั้งสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่อง GNSS ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้ และนอกจากนี้ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือทางด้านอุตุนิยมวิทยาที่ติดตั้งกับสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบความต่อเนื่องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามระยะทางของพื้นที่ศึกษา โดยผลการวิจัยพบว่า ระยะห่างระหว่างสถานีสำหรับพื้นที่ภาคกลาง ของประเทศไทย ควรจัดตั้งสถานีอยู่ห่างกันประมาณ 74 กม. จากการคำนวณด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ซึ่งค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870437221 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: CONTINUOUSLY OPERATING REFERENCE STATIONS (CORS) / PRECIPITATE WATER VAPOR (PWV) / GNSS, PRECISE POINT POSITIONING (PPP) / POSITION AND NAVIGATION DATA ANALYST (PANDA) / GNSS

PARAMEE MEUNRAM: ANALYSIS OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM PRECISE POSITIONING (PPP) TECHNIQUE USING GNSS DATA FROM CONTINUOUSLY OPERATING REFERENCE STATIONS (CORS) IN THAILAND.
ADVISOR: PROF.CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., pp.

The objective of this study was distance variation of precipitable water vapor between CORS stations in Thailand using Precise Point Positioning (PPP) technique with Position and Navigation Data Analyst (PANDA) software. Nowadays, GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORS) is not only used to obtain position but also plays an important role in meteorology. The GNSS data can provide information on Precipitable Water Vapor (PWV) derived from a tropospheric delay which GNSS CORS data from 10 stations which are held by Chulalongkorn University, Department of Lands and Department of Public Works and Town & Country Planning in the period of 1 January – 31 December 2016 are used in this study

However, the coverage area of precipitable water vapor in each GNSS CORS station is not precisely determined for Thailand region. Concerning the coverage area in each GNSS CORS station, good GNSS CORS station's establishment could provide the best benefit in term of providing precipitable water vapor. In addition, it can reduce expenses in meteorology equipment which is installed at Continuously Operating Reference Stations. Therefore, this paper focus on distance variation of precipitable water vapor between CORS stations. The result shows that distance of CORS station's establishment at 74 km. as calculated with Polynomial Equation. And Precipitate Water Vapor (PWV) changes in the acceptance criteria.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำให้คำปรึกษาและให้แนวทางที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งติดตามความก้าวหน้าการดำเนินงานวิจัยในทุกขั้นตอนตลอดจนถึงการปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ ผู้วิจัยซาบซึ้งในความเอาใจใส่ และความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง ขอทราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ รศ.ดร.บรรเจิด พละการ และ อ.ดร.ธงทิศ ฉายากุล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทั้งสองท่านที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนเสียสละเวลาในการพิจารณาความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความเหมาะสมด้านเนื้อหามากยิ่งขึ้น และขอกราบขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่เป็นผู้ถ่ายทอดวิชาความรู้แก่ศิษย์ และสั่งสอนให้ศิษย์เป็นคนดี

ขอขอบพระคุณพันโท สรวิศ สุภเวชย์ กรรมการภายนอก ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และให้คำแนะนำด้านการเขียนเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี จนเสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยนี้เป็นรูปธรรมขึ้นมาได้ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ อาทิเช่น กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ที่สำคัญอย่างยิ่งขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รัก ในการให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนเรื่องการศึกษามาโดยตลอด ซึ่งเป็นพลังใจที่สำคัญตั้งแต่เริ่มต้นโดยเสมอมา

นอกจากนี้ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทั้งนิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3.1 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	6
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	8
บทที่ 2.....	9
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP).....	9
2.2 แบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	12
2.3 การคำนวณและประมาณค่า Mapping Function.....	13
2.4 การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	14
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.3.1 การประมาณค่าความถูกต้องของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สำหรับพื้นที่ประเทศไทย.....	17

2.3.2 การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิ เฉลี่ยท้องถิ่นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดทางอุตุนิยมวิทยา Microwave Radiometer สำหรับประเทศไทย.....	20
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ GNSS เพื่อหาค่า ZTD/PWV	22
บทที่ 3	23
วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 การเตรียมข้อมูล.....	23
3.2 ขั้นตอนการประมวลผล.....	25
3.3 การวิเคราะห์ผล	28
บทที่ 4.....	30
ผลการศึกษา	30
4.1 ผลการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS.....	30
4.2 การเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี.....	36
บทที่ 5	53
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการศึกษา	53
5.2 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	55
5.3 ข้อเสนอแนะ	55
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก. กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของแต่ละสถานีรายวัน.....	58
ภาคผนวก ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างสถานี กับการกระจายตัวของ ค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยแสดงด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ...	64
ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียด source code ไพทอนสคริปต์ เพื่อรวมไฟล์ RINEX จาก ข้อมูลรายชั่วโมงเป็นรายวัน	70

ณ

หน้า

.....72

รายการอ้างอิง.....72

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์76



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ที่ถูกส่งดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเมื่อคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะเกิดการสะท้อนและหักเหทำให้คลื่นเดินทางเร็วขึ้นหรือช้าลง ซึ่งชั้นบรรยากาศที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่นสัญญาณนั้น คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ และชั้นโทรโพสเฟียร์ ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับชั้นโทรโพสเฟียร์ซึ่งมีความสูงจากพื้นโลกประมาณ 50 กิโลเมตร (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008) ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศของโลกชั้นที่ต่ำสุด และมีความสำคัญต่อมนุษย์ ซึ่งในชั้นนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบคือ ส่วนประกอบแห้ง (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) และส่วนประกอบชื้น (Zenith Wet Delay, ZWD) โดยส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดประมาณ 90% ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และส่วนประกอบชื้นจะมีขนาดประมาณ 10% ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบนี้มีผลทำให้คลื่นเดินทางมาถึงเครื่องรับช้ากว่าความเป็นจริง ทำให้ระยะที่วัดได้ยาวกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้เราสามารถนำค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มาแปลงให้เป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศต่อไปได้ โดยค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นสัญญาณที่ผ่านชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ทิศทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ, ระยะทางที่คลื่นเดินทางผ่าน, อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคในการประมวลผลข้อมูลมีอยู่ 2 วิธีการ เพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay, ZTD) คือ การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) และการประมวลผลแบบเส้นฐาน (Baseline Network) การประยุกต์ใช้เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) ในงานอดุณิยามวิทยาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปใช้ได้มีอย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายต่ำ อีกทั้งมีความได้เปรียบทางด้านความถี่ในการรับสัญญาณ และความหนาแน่นของจำนวนสถานีรับวัด โดยในช่วงเวลาที่ผ่าน

มามีหลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS มีระดับความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา

แต่ในการนำไปใช้งานในด้านอุตุนิยมวิทยาสำหรับพื้นที่ประเทศไทยนั้นยังไม่ได้มีการตรวจสอบการครอบคลุมพื้นที่ (Coverage Area) ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากแต่ละสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ซึ่งความครอบคลุมแต่ละสถานีนั้นจะสามารถเป็นแนวทางในการวิเคราะห์จัดตั้งสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องในการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคตได้ และให้สอดคล้องกับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตุนิยมวิทยาในการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ รวมถึงประโยชน์ในด้านการเกษตรกรรม เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาและวิเคราะห์หาระยะทางทางราบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีผลต่อค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากแต่ละสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องสำหรับประเทศไทย เพื่อประโยชน์ในการช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือทางด้านอุตุนิยมวิทยาที่ติดตั้งกับสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง และเพื่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

วิเคราะห์และเปรียบเทียบความต่อเนื่องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามระยะห่างระหว่างสถานีในพื้นที่ศึกษา โดยการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากแต่ละสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ทำงานแบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ขอบเขตงานวิจัย

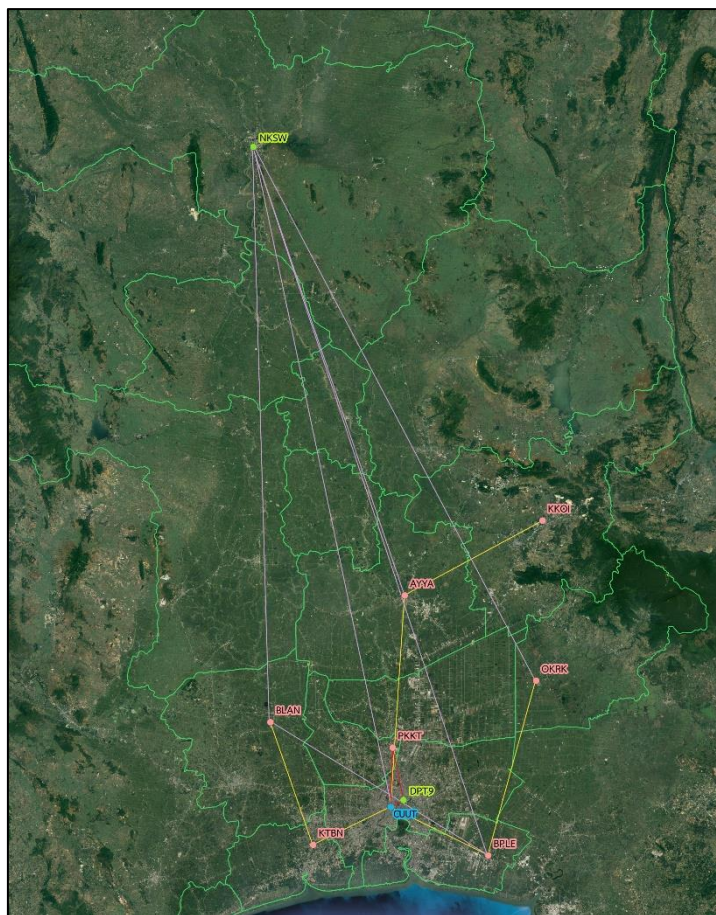
ศึกษาข้อมูลจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากสถานีรังวัดดาวเทียม GNSS สถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่อง ทั้งหมด 10 สถานีเฉพาะในพื้นที่ภาคกลาง ซึ่งได้จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรมที่ดิน และกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นระยะเวลา

1 ปี คือระหว่างวันที่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ.2559 โดยการศึกษาข้อมูลจากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของแต่ละสถานีรังวัดดาวเทียม GNSS จากสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่อง โดยจะแบ่งการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีผลต่อค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยระยะทางระหว่างสถานีออกเป็น 3 กรณี เช่น

กรณีทดสอบ	สถานี	ระยะทาง (กม.)
ระยะทางตั้งแต่ 1-20 กิโลเมตร	ระหว่างสถานี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) กับ กรุงเทพมหานคร (DTP9)	4.76
	ระหว่างสถานี กรุงเทพมหานคร (DTP9) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	17.54
	ระหว่างสถานี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	19.09
ระยะทางระหว่าง 21-80 กิโลเมตร	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN) กับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	29.52
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	37.11
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	42.90
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA)	51.69
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองครักษ์ (OKRK)	60.23

กรณีทดสอบ	สถานี	ระยะทาง (กม.)
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA)	69.77
ระยะทางตั้งแต่ 80 กิโลเมตร	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN) กับ สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	86.28
	สำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA) กับ นครสวรรค์ (NKSW)	156.31
	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN) กับ นครสวรรค์ (NKSW)	189.98
	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองครักษ์ (OKRK) กับ นครสวรรค์ (NKSW)	199.78
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) กับ นครสวรรค์ (NKSW)	222.93
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE) กับ นครสวรรค์ (NKSW)	246.21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตารางที่ 1 แสดงระยะห่างระหว่างสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม



รูปที่ 1 แสดงระยะห่างระหว่างสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม

ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบทำงานต่อเนื่องในประเทศไทยเฉพาะภาคกลาง ซึ่งค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้มานั้นถูกแปลงมาจากค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทำให้ผู้วิจัยมุ่งเน้นที่จะศึกษาหาระยะห่างระหว่างสถานีที่เริ่มทำให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงแบ่งระยะห่างระหว่างสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบทำงานต่อเนื่องเป็นกรณีศึกษาโดยให้สอดคล้องกับความยาวของเส้นฐานที่จัดอยู่ในประเภทความยาวเส้นฐาน สั้นปานกลาง และยาว เพื่อทดสอบระยะห่างระหว่างสถานีมีให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

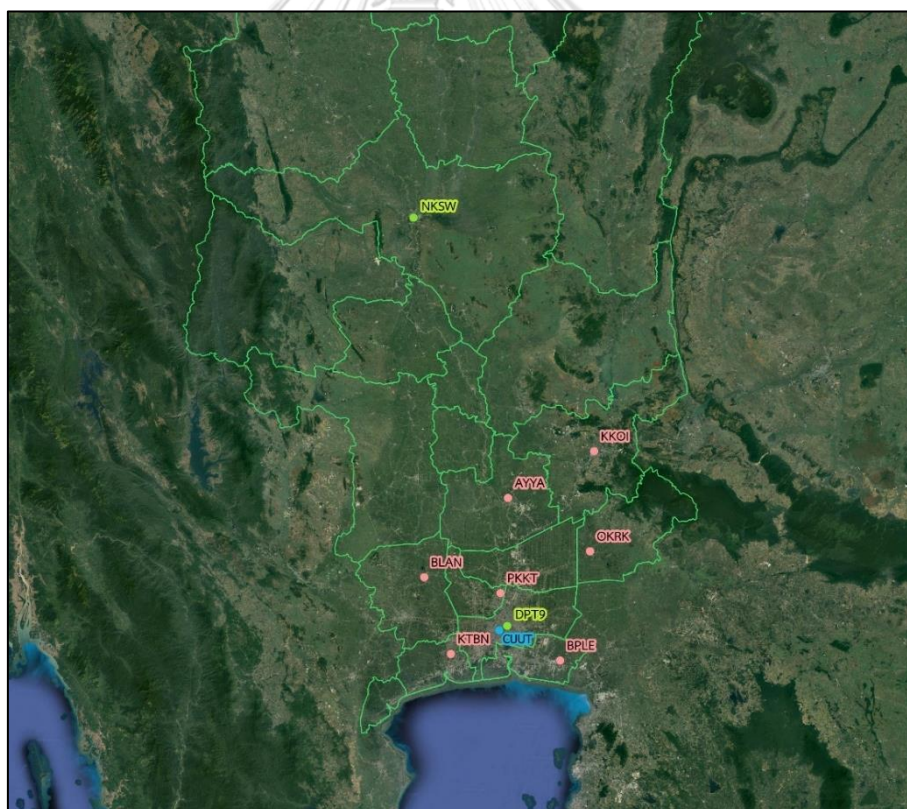
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยใช้ข้อมูลเฉพาะพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ทำงานแบบทำงานต่อเนื่องของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรมที่ดิน และกรมโยธาธิการและผังเมือง รวมทั้งหมดเป็น 10 สถานีในเขตพื้นที่ภาคกลาง ได้แก่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT), ส่วนกรมที่ดิน ได้แก่ สำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA) สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK) สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN) สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT) สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN) สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI) และสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE) และกรมโยธาธิการและผังเมือง ได้แก่ กรุงเทพมหานคร (DTP9) และนครสวรรค์ (NKSW) ซึ่งสามารถแสดงตำแหน่งที่ตั้งของแต่ละสถานีบนแผนที่ โดยดูจากรูปที่ (2)

สถานีรังวัด	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด
กรมที่ดิน	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	14.361552	100.57983
	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	14.108596	100.981846
	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	13.985392	100.169372
	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	13.909719	100.543134
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	13.620653	100.300132
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	14.583624	101.001393

สถานีรังวัด	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด
	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	13.589265	100.835171
กรมโยธาธิการ และผังเมือง	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	13.756781	100.573199
	นครสวรรค์ (NKSW)	15.690637	100.114112
จุฬาลงกรณ์- มหาวิทยาลัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	13.735914	100.533923

ตารางที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง เฉพาะภาคกลาง

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยจะใช้ข้อมูล GNSS เป็นระยะเวลา 1 ปี คือระหว่างวันที่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ.2559 ประกอบไปด้วย 1) ข้อมูลจากสถานี CUUT ซึ่งตั้งอยู่บนตาดฟ้าตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นเครื่องรับสัญญาณ GNSS Trimble รุ่น NetR9 โดยใช้เสาอากาศ Trimble Zephyr Geodetic 2 Model 57971 ซึ่งเป็นเสาอากาศระดับยี่ห้อเดติกส์สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน รับสัญญาณตลอด 24 ชั่วโมง, 2) ข้อมูลของกรมที่ดิน ในพื้นที่เฉพาะภาคกลางจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบทำงานต่อเนื่อง และ 3) ข้อมูลจากกรมโยธาธิการและผังเมือง รวมเป็นจำนวน 10 สถานี ซึ่งสถานีรังวัดดาวเทียมของกรมโยธาธิการและผังเมืองทุกสถานีเป็นสถานีแบบถาวร ส่วนใหญ่นั้นติดตั้งอยู่บนยอดของอาคารโยธาธิการจังหวัด ลักษณะการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและ Meteorological Sensor ที่มีความมั่นคงและไม่เคลื่อนที่

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)

สำหรับการรังวัดสัญญาณดาวเทียม เพื่อต้องการทราบค่าพิกัดของตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ และเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องมากที่สุด จำเป็นจะต้องมีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆออกไป ซึ่งหนึ่งในค่าคลาดเคลื่อนเหล่านั้น คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกี่ยวข้อง โดยตรงกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ และเพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนที่มีความถูกต้องสูงนั้น จะต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยการใช้ข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (Ionosphere free, L3) ลดค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมโดยใช้ข้อมูลวงโคจรความละเอียดสูง (Precise Orbit) ลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath) โดยใช้เสาอากาศที่มีคุณสมบัติป้องกันคลื่นหลายวิถี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีความถูกต้องสูง เพื่อการนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป

โดยทำการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจากซอฟต์แวร์ Position And Navigation Data Analyst (PANDA) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องโดย GNSS Research Center, Wuhan University ประเทศจีน ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางตั้งระดับเซนติเมตร (Li et al., 2015)

เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทั้งนี้ข้อมูลจะต้องแปลงให้เป็นรูปแบบ RINEX (Receiver-Independent Exchange Format) ก่อนที่จะทำการประมวลผล ร่วมกับข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้ทางพิกัดความละเอียดสูงชนิด Final orbit ของหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง จะใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) ซึ่งทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier Phase) การประมวลผลจะต้องทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบ (Systematic Error) ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนส

เฟียร์ (Ionosphere delay), ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset), ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV), ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up (WU, 1993) ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในระดับเมตร (meters level) สำหรับค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในระบบสมการค่าสังเกต

ดังนั้นในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (P., 2001) ค่าคลาดเคลื่อนแต่ละค่าจะถูกขจัดด้วยกระบวนการดังตารางที่ 3

รูปแบบของค่าคลาดเคลื่อน	วิธีแก้ไข
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere delay)	จะใช้แบบจำลองเชิงเส้นจากข้อมูลสองความถี่ (Ionosphere free combination) จะทำให้ได้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ที่อยู่ในรูปแบบ Ionosphere free
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay)	ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในขั้นตอนการประมวลผล
ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset)	จะใช้ข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจาก GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) ซึ่งเป็นหนึ่งในศูนย์วิเคราะห์ GNSS ที่ IGS ยอมรับ
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV)	จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลองของ IGS

รูปแบบของค่าคลาดเคลื่อน	วิธีแก้ไข
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลก และมหาสมุทร (Solid earth tide , Ocean loading)	จะทำการปรับแก้โดยใช้แบบจำลอง IERS 2003
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม Phase-windup	จะทำการแก้ไขด้วยหลักการเฟสโพลาไรซ์เซชัน (Phase polarization)

ตารางที่ 3 รูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนและวิธีขจัดค่าคลาดเคลื่อน

เมื่อทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเป็นระบบ (Systematic Error) ดังกล่าวแล้ว จะทำการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square adjustment) โดยใช้สมการ ซึ่งเป็นข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) ตามลำดับ ที่อยู่รูป Ionosphere-free linear combination จากทั้งสองสมการ

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \epsilon\rho)_{L3} \quad (1)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \epsilon\phi)_{L3} \quad (2)$$

- โดยที่
- P = สมการค่ารังวัดซูโดเรนจ์ (Pseudo range)
 - ϕ = สมการค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase)
 - ρ = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ
 - c = ความเร็วแสง
 - dt = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ
 - dT = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาดาวเทียม
 - M = Mapping Function ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม

ZTD = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ทางตั้งเหนือ
เครื่องรับสัญญาณ

Zenith Total Delay

N = เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี

λ = ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี

ep และ $\epsilon\phi$ = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก คลื่นหลายวิถี (Multipath)

และสัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise)

สำหรับการใช้แบบจำลองสมการค่าสังเกตข้างต้น ในเทอมของค่าพิกัดเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งจะแฝงอยู่ในเทอมของระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ ค่าเลขปริศนาของดาวเทียมแต่ละดวงและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ และทำการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรดังกล่าวโดยการประมาณค่า

2.2 แบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว ความละเอียดสูง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากส่วนประกอบแห้ง (Dry part) ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น H_2 , O_2 และก๊าซอื่นๆ และค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากส่วนประกอบชื้น (Wet part) ซึ่งเกิดจากปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศ ซึ่งยากที่จะประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง เพราะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลา จึงถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ ดังสมการ (Bevis et al., 1992)

ในโปรแกรม PANDA การประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางเอียง (Slant Path Delay, SPD) จะได้จากการใช้ Mapping Function คูณกับค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางตั้ง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในทิศทางเอียง กับความคลาดเคลื่อนทางตั้งที่เกิดจากส่วนประกอบแห้ง หรือ ZHD และความคลาดเคลื่อนทางตั้งที่เกิดจากส่วนประกอบชื้น หรือ ZWD และ Mapping Function ได้ดังสมการที่ (3)

$$SPD = ZTD * Mf(E) = ZHD * Mdry(E) + ZWD * Mwet(E) \quad (3)$$

โดยที่ Mf = Total Mapping function
 Mdry, Mwet = Mapping function สำหรับอากาศแห้งและอากาศชื้น
 E = ค่ามุมสูงของดาวเทียม (Elevation angle) มีหน่วย องศา

2.3 การคำนวณและประมาณค่า Mapping Function

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาหลายงานวิจัยได้ศึกษาและพัฒนา Mapping Function ได้แก่ Ifadis, Herring และ Niell (Younes & Elmezayen, 2012) เป็นต้น ซึ่งการประมาณค่า Mapping Function เหล่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $1/\text{size } E$ ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$Mdry(E) = \frac{1 + \frac{ah}{bh}}{1 + \frac{1+ch}{ah}} \frac{ah}{\sin e + \frac{bh}{\sin e + ch}} \quad (4)$$

และ

$$Mwet(E) = \frac{1 + \frac{aw}{bw}}{1 + \frac{1+cw}{aw}} \frac{aw}{\sin e + \frac{bw}{\sin e + cw}} \quad (5)$$

ทั้งนี้ Mapping Function ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องที่ได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้งาน ในหลายงานวิจัย คือ 1) Vienna Mapping Functions VMF1 (Boehm, 2004) หรือ Global Mapping Function GMF (A. N. J. Boehm, P. Tregoning, H. Schuh, 2006) 2) Niell Mapping Function NMF (Niell, 1996, 2000) ในซอฟต์แวร์ PANDA สามารถเลือกที่จะใช้แบบจำลอง GMF หรือ NMF เพื่อประมาณค่า Mapping Function การศึกษาจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองทั้งสองในพื้นที่ประเทศไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลอง GMF เพื่อประมาณค่า Mapping Function สามารถแสดงรายละเอียดของแบบจำลอง GMF และ NMF ได้ดังนี้

แบบจำลอง Global Mapping Function

การประมาณค่า Mapping Function โดยใช้แบบจำลอง GMF มีค่าสัมประสิทธิ์ $bw = 0.00146$, $cw = 0.04391$, $bh = 0.0029$, สำหรับ ch สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ สำหรับค่า ah และ aw สามารถประมาณค่าได้จากแบบจำลอง GMF ด้วยฟังก์ชัน Spherical Harmonic รายละเอียดการประมาณค่าสามารถศึกษาได้จากโค้ดโปรแกรม http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/gmf_f_hu.m ดังสมการที่ (6)

$$a = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\varphi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] + A \cos\left(\frac{DOY-28}{365} 2\pi\right) \quad (6)$$

เมื่อ φ, λ คือ พิกัดละติจูด และลองจิจูด, n และ m คือ ดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิก, A_{nm} และ B_{nm} คือตัวแปรไม่ทราบค่า (Unknowns) และ $P_{nm}(\sin\varphi)$ คือ ฟังก์ชันเลอจอง (Legendre function), DOY คือ ลำดับวันใน 1 ปี (Day Of Year)

สำหรับ Dry part สามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการที่ (7)

$$M_{dry}(E,H) = m(E,a_d,b_d,c_d) + [1/\sin E - m(E,a_{ht},b_{ht},c_{ht})]H \quad (7)$$

โดยที่ a_d, b_d, c_d คือตัวแปรที่ประกอบไปด้วย เวลา (t) และ ละติจูด (φ) ซึ่งหาคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\zeta(\varphi,t) = \zeta_{avg}(\varphi) - \zeta_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{DOY-28}{365.25}\right) \quad (8)$$

2.4 การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ข้อมูล GNSS ซึ่งได้จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลคือ ค่าพิกัดตำแหน่งของสถานี, คลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ, เลขปริศนาจากการผสมผสานเฟสคลื่นส่ง และค่า ZTD ซึ่งค่า ZTD จะถูก

นำมาใช้เพื่อแปลงไปเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ณ ตำแหน่งเหนือเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยจะคำนวณร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (9)

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (9)$$

ค่า ZHD สามารถคำนวณประมาณค่าได้อย่างถูกต้องที่ระดับ 1-5 มิลลิเมตร (Denghui Wang, 2014) ซึ่งมีหลากหลายแบบจำลองที่ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อประมาณค่า ZHD (Chen & Liu, 2016) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของ Saastamonien ร่วมกับค่าความกดอากาศพื้นผิว (air surface pressure, Ps) ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีรังวัดดาวเทียม GNSS ดังสมการที่ (10)

$$ZHD = \frac{2.2768 \times Ps}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028H} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10)

Ps = ค่าความกดอากาศพื้นผิว ในหน่วย มิลลิบาร์

ϕ = ละติจูดที่สถานีรังวัดดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน

H = ความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (MSL) ในหน่วย เมตร

จะได้ค่า ZHD ในหน่วย มิลลิเมตร

โดยการแปลงค่าความคลาดเคลื่อนจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากอากาศขึ้นไปเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Π ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า PWV และค่า ZWD ดังสมการที่ (11) (Bevis et al., 1992)

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

จากสมการที่ (11) จะได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในหน่วย kg/m^2 หรือ มิลลิเมตร

โดยที่

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho w \times Rv \left(\frac{k3}{Tm} + k'2 \right)} \quad (12)$$

โดยที่ ρw = ความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว (999.97 กก/ลบ.ม.)

Rv = ค่าคงที่ของไอน้ำ (461.525 จูล/กก.*เคลวิน)

$k'2$ = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (22.1 เคลวิน/มิลลิบาร์)

$k3$ = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (3,739 เคลวิน²/มิลลิบาร์)

Tm = อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric mean temperature) ณ ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ (เคลวิน)

สำหรับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่สามารถคำนวณได้หน่วยเป็น มิลลิเมตร เพราะว่าสมมติให้คอลัมน์ของอากาศที่สูงจากพื้นจนถึงชั้นบรรยากาศเป็น 1 ตารางเมตร (m²) ที่เป็นค่าความสูงของน้ำ โดยที่ Total Precipitable Water ของคอลัมน์จะเท่ากับจำนวนของน้ำที่ความชื้นทั้งหมดควบแน่นกัน ซึ่งปกติแล้วหน่วยที่ใช้จะเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงน้ำหนักของน้ำที่ควบแน่นกัน จึงได้เปรียบเปรยให้เป็นหน่วย มิลลิเมตร (mm.) ในลักษณะของน้ำสะสมกันอยู่ที่ด้านล่างของคอลัมน์สำหรับหน้าตัดหนึ่ง

ในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะใช้แบบจำลอง Bevis (1992) ดังสมการที่ (13)

$$T_m = 70.2 + 0.72 * T_s, \quad T_s = \text{อุณหภูมิ ณ พื้นผิว (เคลวิน)} \quad (13)$$

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิและความกดอากาศที่พื้นผิว ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี GNSS สามารถประมาณค่าได้จากแบบจำลอง Empirical model โดยได้จาก GPT (Global Pressure and Temperature) ซึ่งสามารถศึกษาการประมาณค่าความดันและอุณหภูมิ จากโค้ดโปรแกรมได้ที่ <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/gpt.m>

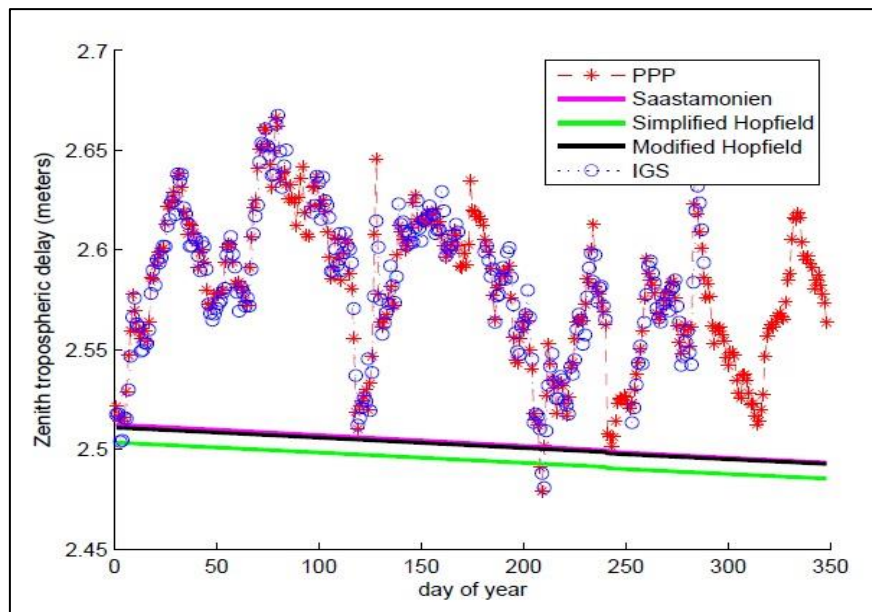
ตารางที่ 4 ข้อมูลของ GPT/GMF (K. Lagler, 2013)

Data	GPT/GMF
NWM data	Monthly mean profiles from ERA-40 (23 pressure levels): 1999–2002
Representation	Spherical harmonics up to degree and order 9 at mean sea level
Temporal variability	Mean and annual terms
Phase	Fixed to January 28
Temperature reduction	Constant lapse rate – 6.5°C/km assumed
Pressure reduction	Exponential based on standard atmosphere
Output parameters	Pressure (P), temperature (T), mapping function coefficients (a_h, a_w)

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

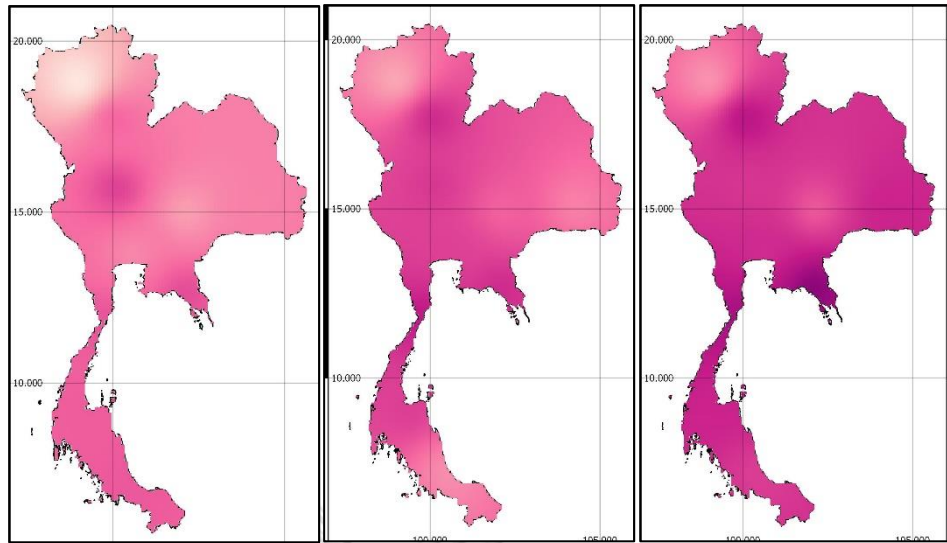
2.3.1 การประมาณค่าความถูกต้องของค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สำหรับพื้นที่ประเทศไทย

(Kitpracha, 2015b) ในงานวิจัยนี้ค่า ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่สถานี CUUT บนดาวฟ้าตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ของเดือนพฤศจิกายน 2015 โดยใช้เทคนิคการประมวลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบสถิตย์ (Static) ด้วยซอฟต์แวร์ PANDA จากมหาวิทยาลัย Wuhan

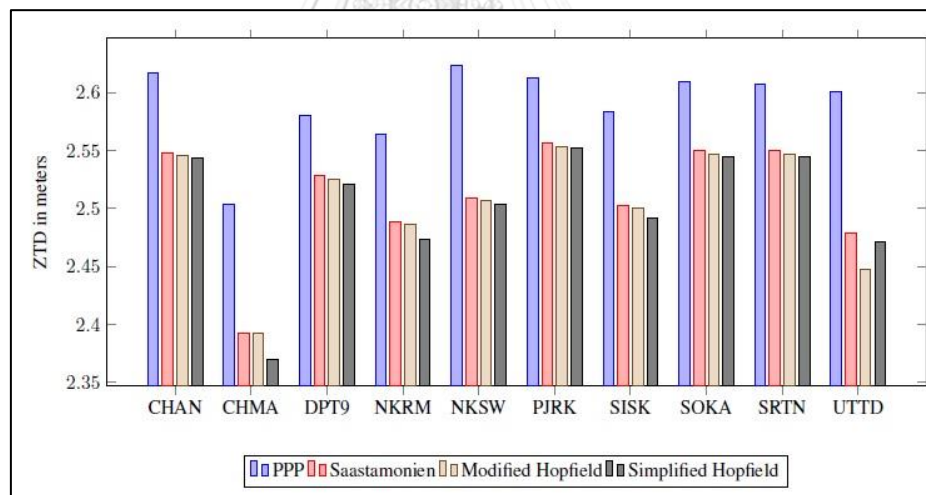


รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่า ZTD ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีการแบบต่างๆ ประกอบไปด้วย การประมาณแบบจุดเดียวความละเอียดสูง, แบบจำลอง Saastamonien, แบบจำลอง Modified Hopfield, แบบจำลอง Simplified Hopfield และข้อมูล ZTD ของจากหน่วยงาน IGS ที่สถานี CUUT

โดยผลลัพธ์การประมาณค่า ZTD ซึ่งได้จากเทคนิคการประมาณผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงที่ สถานี CUUT ของเดือนพฤศจิกายน 2015 แตกต่างจากข้อมูลความละเอียดสูงจาก IGS ในระดับมิลลิเมตร ในทางกลับกัน ZTD ซึ่งค่าได้จากแบบจำลองทั่วไป ได้ให้ค่าความถูกต้องในระดับเดซิเมตร (1/10 เมตร) ความถูกต้องของการประมาณค่า ZTD สามารถนำมาคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลของ IGS และค่า RMSE ของ ZTD ที่ถูกคำนวณด้วยเทคนิคการประมาณแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) จากแบบจำลอง Saastamonien Modified Hopfield และ Simplified Hopfield คือ 9 85 86 93 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Shi, Xu, Li, & Gao, 2015) และแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ZTD ในแต่ละช่วงเวลาได้ดังรูปที่ 4 ในช่วงเดือนเมษายน(รูปซ้าย) เดือนมิถุนายน(รูปกลาง) และเดือนพฤศจิกายน(รูปขวา) ปีพ.ศ.2558



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ZTD ในแต่ละช่วงเวลาของเดือนเมษายน(รูปซ้าย)
เดือนมิถุนายน(รูปกลาง) และเดือนพฤศจิกายน(รูปขวา) ปีพ.ศ.2558

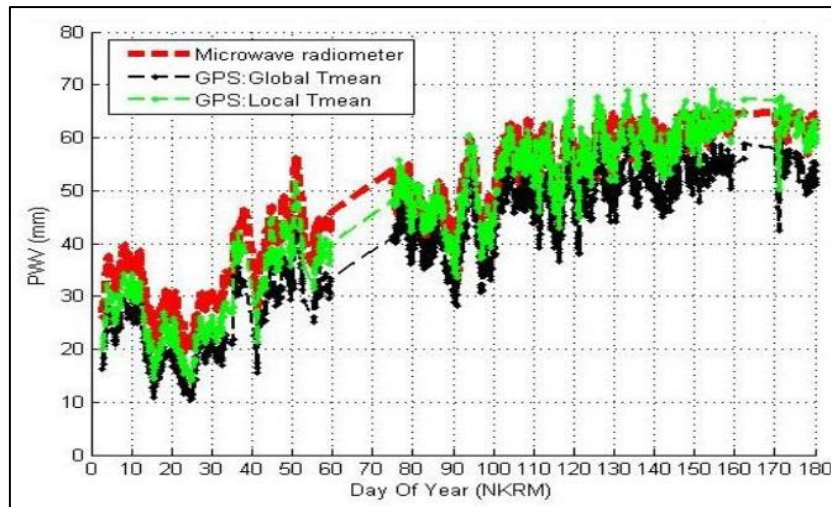


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่า ZTD ที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง,
แบบจำลอง Saastamonien, Modified Hopfield, และ Simplified Hopfield
ณ สถานี CORS ของเดือนเมษายน (Kitpracha, 2015a)

จากการเปรียบเทียบค่า ZTD ที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ดังรูปที่ 5 โดยสรุปแล้วค่า ZTD ที่ถูกคำนวณด้วยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ให้ค่าความถูกต้องที่มากกว่าแบบจำลองทั่วไป ซึ่งได้แก่ Saastamonien, Modified Hopfield และ Simplified Hopfield โดยการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากหน่วยงาน IGS ดังนั้นเราสามารถใช้งานประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อประมาณค่า ZTD สำหรับประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง อีกทั้งค่า ZTD นี้สามารถใช้เป็นค่าแก้ไขสำหรับสถานี CORS เพื่อประยุกต์ใช้ในการประมวลผลแบบ Real Time Kinematics (RTK) หรือเป็นแนวทางเพื่อสร้างแบบจำลองท้องถิ่นสำหรับประเทศไทยในอนาคต

2.3.2 การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดทางอุตุนิยมวิทยา Microwave Radiometer สำหรับประเทศไทย

(Jongrukchob, 2016) จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าในการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นจะมีค่าที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก Microwave Radiometer มากกว่าเมื่อประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer (MWR)

Tm Model	Mean error (mm)	RMSE (mm)
Local	1.5	3.7
Global	8.1	8.6

รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก Microwave Radiometer

จากรูปที่ 7 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล เท่ากับ 8.1 มิลลิเมตร และ 8.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และ 3.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ GNSS เพื่อหาค่า ZTD/PWW

(Bevis, 1992) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางใหม่ในการตรวจจับระยะไกลของไอน้ำตามระบบ global positioning system (GPS) โดยนักสำรวจยี่ห้อเดซี (Geodesists) และนักธรณีฟิสิกส์ (Geophysicists) ได้คิดค้นวิธีการประเมินขอบเขตที่สัญญาณส่งมาจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่เกิดความล่าช้าเนื่องจากไอน้ำในบรรยากาศ ความล่าช้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศเคลื่อนที่แบบขึ้น (ZWD) โดยจะให้อ่านความดันและอุณหภูมิพื้นผิวที่ตัวเครื่องรับสัญญาณ GPS และ ZWD จะเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ที่สามารถแปลงเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเหนือเครื่องรับสัญญาณได้โดยเมื่อทราบข้อมูลอุณหภูมิและความดัน ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีรับสัญญาณ GPS เครื่องข่ายเครื่องรับสัญญาณ GPS แบบทำงานต่อเนื่อง ได้ถูกสร้างโดยนักสำรวจยี่ห้อเดซี) นักธรณีฟิสิกส์ หน่วยงานของรัฐ หน่วยงานทางทหาร และอื่นๆ เพิ่มความสามารถในการวางตำแหน่งได้กว้างขึ้น การวัดเหล่านี้สามารถใช้ในการพยากรณ์ และเป็นการวิจัยพื้นฐานของการเกิดพายุ วัฏจักรการหมุนเวียนของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก โดยเฉพาะการออกแบบเครื่องข่าย GPS ที่หนาแน่น สามารถดูการกระจายตัวของไอน้ำในบริเวณใกล้เคียง

(Yubin Yuan, 2014) ไอน้ำในบรรยากาศ (PWW) ที่ได้จากข้อมูล Global Positioning System (GPS) ได้รับการตรวจสอบในรอบ 2 ทศวรรษ แต่ก็ยังคงเป็นงานที่ท้าทายที่ให้ถึงความถูกต้องสูงและในโหมดแบบ real-time ในการศึกษานี้จะพูดถึงความถูกต้องของค่า ZTD และ PWW ที่ใช้ GPS ในการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) การรังวัดดาวเทียม GPS ระยะเวลา 1 เดือนจาก 20 สถานีกระจายทั่วโลกจะถูกเลือกมาสำหรับการทดสอบ การได้ค่า ZTD สถานีส่วนใหญ่เป็นไปตามกับผลิตภัณฑ์ Tropospheric จากหน่วยงานบริการ Global Navigation Satellite Systems (GNSS) และให้ค่า root-mean-square errors (RMSEs) น้อยกว่า 13 มิลลิเมตร ซึ่งมีเกณฑ์ที่ค่าถึง 15 มิลลิเมตร ถ้า ZTD มีการป้อนข้อมูลแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข ค่า RMSE ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก radiosonde เป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็น RMSE ของปริมาณไอน้ำ ซึ่งกล่าวได้ว่าการใช้ข้อมูล GPS ด้วยเทคนิคประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบ real-time สามารถใช้พยากรณ์อากาศ เนื่องจากเป็นแบบ Real-time และสามารถติดตามสภาพอากาศได้ทุกวัน และมีความสามารถวัดได้ในทุกสภาพอากาศ

บทที่ 3

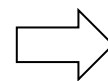
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างสถานี โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) การเตรียมข้อมูล 2) ขั้นตอนการประมวลผล 3) การวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนการดำเนินงานได้ดังนี้

3.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูล GNSS ที่ใช้ในการประมวลผลในซอฟต์แวร์ PANDA จะต้องอยู่รูปแบบฟอร์แมต RINEX (Receiver-Independent Exchange Format) ก่อนที่จะทำการประมวลผลเพื่อความละเอียดสูง ผู้วิจัยได้ รวบรวมข้อมูล GNSS ในรูปแบบ RINEX จากหน่วยงานกรมที่ดิน กรมโยธาธิการ และผังเมือง และจากสถานี CUUT ตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้รับจากกรมที่ดิน ข้อมูลมีการจัดเก็บแยกเป็นรายชั่วโมง การประมวลผลด้วยโปรแกรม PANDA จำเป็นต้องรวมข้อมูลเป็นรายวันก่อน โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลเฉพาะภาคกลาง เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2559

<input type="checkbox"/> AYYA002A.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002E.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002I.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002O.16g
<input type="checkbox"/> AYYA002A.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002F.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002J.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002O.16n
<input type="checkbox"/> AYYA002A.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002F.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002K.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002O.16o
<input type="checkbox"/> AYYA002A.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002F.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002K.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002P.16a
<input type="checkbox"/> AYYA002B.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002F.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002K.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002P.16g
<input type="checkbox"/> AYYA002B.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002G.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002K.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002P.16n
<input type="checkbox"/> AYYA002B.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002G.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002L.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002P.16o
<input type="checkbox"/> AYYA002B.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002G.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002L.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002Q.16a
<input type="checkbox"/> AYYA002C.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002G.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002L.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002Q.16g
<input type="checkbox"/> AYYA002C.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002H.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002L.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002Q.16n
<input type="checkbox"/> AYYA002C.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002H.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002M.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002Q.16o
<input type="checkbox"/> AYYA002C.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002H.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002M.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002R.16a
<input type="checkbox"/> AYYA002D.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002H.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002M.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002R.16g
<input type="checkbox"/> AYYA002D.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002I.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002M.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002R.16n
<input type="checkbox"/> AYYA002D.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002I.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002N.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002R.16o
<input type="checkbox"/> AYYA002D.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002I.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002N.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002S.16a
<input type="checkbox"/> AYYA002E.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002I.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002N.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002S.16g
<input type="checkbox"/> AYYA002E.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002J.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002N.16o	<input type="checkbox"/> AYYA002S.16n
<input type="checkbox"/> AYYA002E.16n	<input type="checkbox"/> AYYA002J.16g	<input type="checkbox"/> AYYA002O.16a	<input type="checkbox"/> AYYA002S.16o



AYYA002O.16o

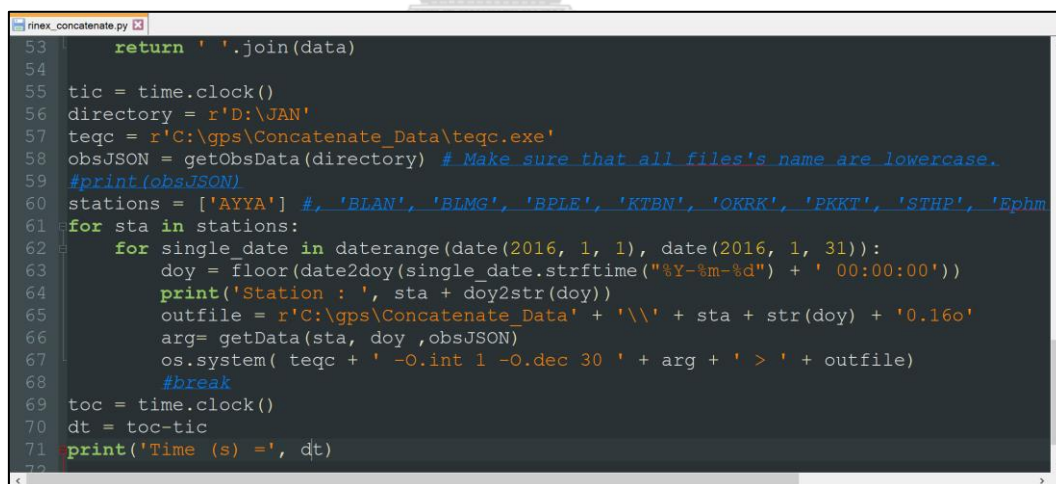
รูปที่ 8 แสดงการรวมข้อมูลรายชั่วโมงเป็นรายวัน

โดยใช้โปรแกรม TEQC ที่มีหน้าที่ 3 ส่วน คือ 1) แปลงฟอร์แมตข้อมูล RINEX 2) เพิ่ม/ลดข้อมูลความถี่ในการจัดเก็บข้อมูล RINEX 3) วิเคราะห์และประเมินคุณภาพสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลรังวัด ก่อนทำการประมวลผลข้อมูล GNSS (Louis H. Estey, July 1999) ซึ่งได้ทำการรวมข้อมูลรายชั่วโมงให้เป็นรายวัน รวมทั้งลดความถี่ในการจัดเก็บข้อมูลจาก 1 วินาทีเป็น 30 วินาที โดยมีรูปแบบของตัวอย่างคำสั่งดังนี้

```
teqc.exe -O.int 1 -O.dec 30 AYYA002H.16o AYYA002I.16o ... > AYYA002O.16o
```

โดยจะเรียกโปรแกรม TEQC ตามด้วยคำสั่งเพื่อลดความถี่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจาก 1 วินาที เป็น 30 นาที รูปแบบคำสั่งคือ -O.int 1 -O.dec 30 จากนั้นระบุไฟล์ที่ต้องการรวมโดยใช้ช่องว่างระหว่างชื่อไฟล์ที่ต้องการรวมจนครบทุกไฟล์ ตามด้วยคำสั่ง > ตามด้วยชื่อไฟล์ผลลัพธ์

ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมากเพื่อให้เกิดความรวดเร็วจึงได้พัฒนาไพทอนสคริปต์ (python) เพื่อช่วยในการรวมข้อมูลรายชั่วโมงให้เป็นรายวัน แสดงรายละเอียดโค้ดโปรแกรมในภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียด source code ไพทอนสคริปต์ เพื่อรวมไฟล์ RINEX จากข้อมูลรายชั่วโมงเป็นรายวัน



```

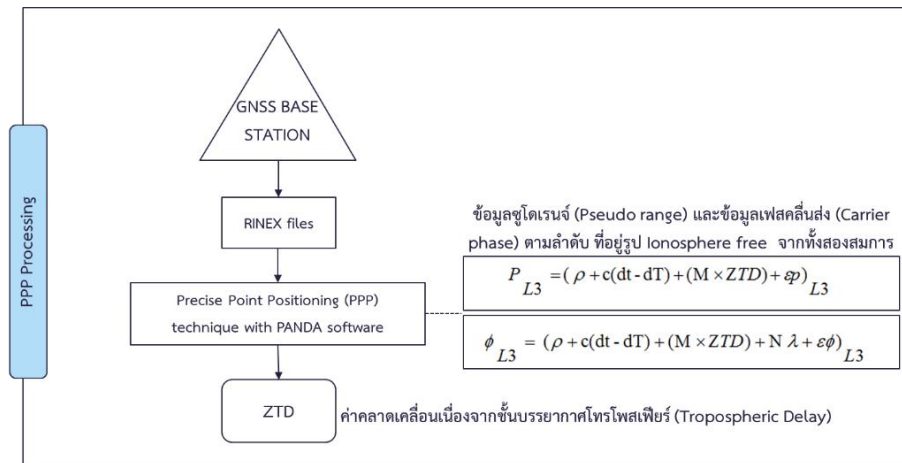
53     return ' '.join(data)
54
55     tic = time.clock()
56     directory = r'D:\JAN'
57     teqc = r'C:\gps\Concatenate_Data\teqc.exe'
58     obsJSON = getObsData(directory) # Make sure that all files's name are lowercase.
59     #print(obsJSON)
60     stations = ['AYYA'] #, 'BLAN', 'BLMG', 'BPLE', 'KTBN', 'OKRK', 'PKKT', 'STHP', 'Ephm
61     for sta in stations:
62         for single_date in daterange(date(2016, 1, 1), date(2016, 1, 31)):
63             doy = floor(date2doy(single_date.strftime("%Y-%m-%d") + ' 00:00:00'))
64             print('Station : ', sta + doy2str(doy))
65             outfile = r'C:\gps\Concatenate_Data' + '\\\ ' + sta + str(doy) + '.16o'
66             arg= getData(sta, doy ,obsJSON)
67             os.system( teqc + ' -O.int 1 -O.dec 30 ' + arg + ' > ' + outfile)
68             #break
69     toc = time.clock()
70     dt = toc-tic
71     print('Time (s) =', dt)
72

```

รูปที่ 9 ไพทอนสคริปต์เพื่อรวมไฟล์ Rinex จากข้อมูลรายชั่วโมงเป็นรายวัน

สามารถดาวโหลดซอฟต์แวร์ TEQC ได้จาก <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>

3.2 ขั้นตอนการประมวลผล



รูปที่ 10 ขั้นตอนการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

สำหรับงานวิจัยนี้โปรแกรม PANDA ถูกใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูล GNSS ซึ่งพัฒนามาจากหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) โดยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณไอออนในบรรยากาศ ในขั้นตอนการประมวลผลนั้นจะแบ่งเป็น 1) การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) และ 2) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

โดยจะเริ่มจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จำเป็นที่จะต้องมีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนต่างๆออกไปก่อน โดยการคำนวณใช้แบบจำลองสมการค่าสังเกต Ionosphere free linear combination มาประยุกต์ใช้เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพราะค่าคลาดเคลื่อนต่างๆเหล่านั้นสามารถทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในระดับเมตร (meters level) ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนต่างๆที่ต้องพิจารณา ได้แก่

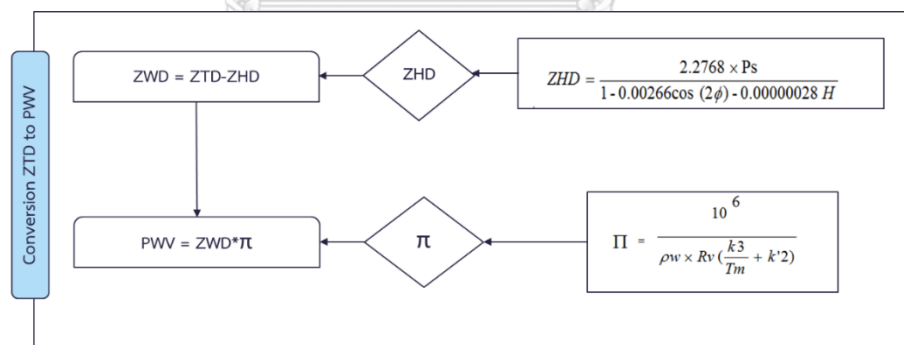
- 1) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset)
- 2) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center Offset & Phase Center Variation (PCO & PCV)

3) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide, Ocean loading)

และ 4) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up (WU, 1993) ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม

โดยสมมติว่าค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือถูกขจัดออกไปได้ ในส่วนของโปรแกรม PANDA จะทำการปรับแก้ด้วยการกำหนดค่าผ่านทางไฟล์ เพื่อการเรียกใช้สำหรับการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการปรับแก้ได้จากหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) และ GNSS Research Center ของ Wuhan University (WUM)

นอกจากที่แบบจำลองจะประมาณค่าในแนวตั้งนั้น ต้องมีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางเอียง (Slant Path Delay, SPD) เนื่องจากความเป็นจริงดาวเทียม ณ ขณะส่งสัญญาณมายังเครื่องรับไม่ได้อยู่แนวตั้ง และเพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนนั้นอยู่ในแนวตั้ง จะต้องทำการคำนวณซึ่งแสดงอยู่ใน Mapping function (M) กับค่า ZTD ซึ่งอยู่ในเทอมของสมการที่ (1) และ (2) โดยจะเลือกใช้ Global Mapping Function (GMF) ที่เป็น Mapping function ที่ใช้ในปัจจุบันและแพร่หลาย แสดงรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณในหัวข้อที่ 2.3



รูปที่ 11 ขั้นตอนการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

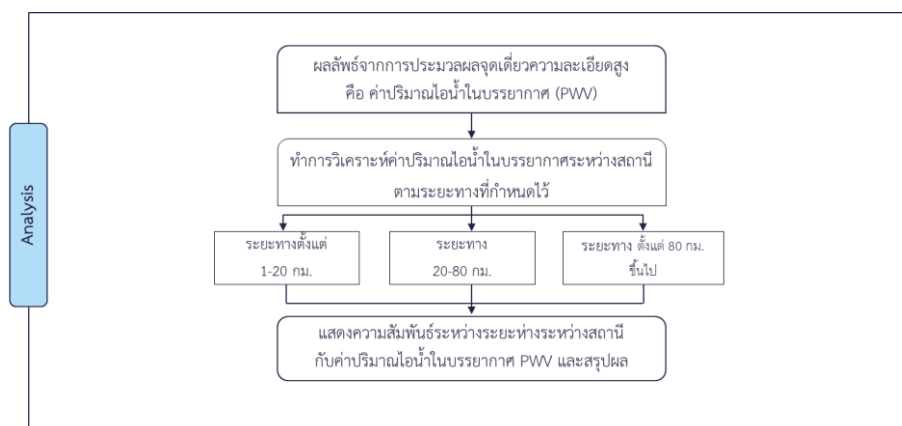
ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลคือ ค่าพิกัดของสถานี (x,y,z), ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ, ค่าเลขปริศนา (ambiguity) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ นี้จะถูกนำมาใช้เพื่อ

แปลงเป็นค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศต่อไป และต่อมาเป็นส่วนของค่า ZTD ที่คำนวณได้จากการประมวลผลนั้น จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบชื้น หรือ ZWD และค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบแห้ง หรือ ZHD สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (9)

สำหรับค่า ZHD สามารถคำนวณเพื่อหาค่าได้ หากเราทราบค่าความกดอากาศพื้นผิว (P_s) และอุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง Empirical โดยได้จาก GPT (Global Pressure and Temperature) เพื่อประมาณค่าความดัน (P_s) และอุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) (R. H. J. Boehm, H. Schuh, 2007) สำหรับการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นอีกวิธีการหนึ่ง นอกจากการวัดที่ได้จากเครื่องมือด้านอุตุนิยมวิทยา แต่ด้วยความจำกัดในเรื่องเวลาจึงเลือกใช้แบบจำลอง GPT (Global Pressure and Temperature) โดยเข้าสู่สูตรของ (Bevis, 1992) ในการคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

สำหรับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่สามารถคำนวณได้จากสมการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) ที่ (11)-(13) จะได้หน่วยเป็น มิลลิเมตร เพราะเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากการประมวลผลที่เป็นค่าความสูงของน้ำ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) = 1 มิลลิเมตร) ซึ่งโดยจะเปรียบกับการรวมปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทางดิ่งเหนือตำแหน่ง ณ เครื่องรับสัญญาณสูงขึ้นไปเป็นคอลัมน์จนสุดชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่กลั่นตัวรวมกันเป็นคอลัมน์ของน้ำในภาชนะ จึงเป็นค่า PWV ที่เป็นผลลัพธ์จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยโปรแกรม PANDA เปรียบได้ว่า มีพื้นที่ 1 ตารางเมตร และสูงขึ้นไปจนบนสุดของบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หากในพื้นที่นั้นมีน้ำอยู่ภายใน พื้นที่ที่สูงขึ้นไป 1 มม. จะเท่ากับมีปริมาณน้ำ 1 กก. น้ำหนักของปริมาตรน้ำในอากาศ 1 กก. จะได้เท่ากับ 1 มม.

3.3 การวิเคราะห์ผล



รูปที่ 12 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) ของแต่ละสถานี ในขั้นตอนสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างสถานีที่ให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยขั้นตอนแรกได้แบ่งการวิเคราะห์เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยระยะทาง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

- 1) ระยะทางตั้งแต่ 1-20 กิโลเมตร
- 2) ระยะทางระหว่าง 21-80 กิโลเมตร
- และ 3) ระยะทางตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป

โดยนำค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจับคู่กันด้วยข้อมูลในเวลาตรงกัน แล้วจึงนำค่านั้นมาคำนวณเพื่อหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานีได้

ดังนั้นการคำนวณค่า S.D. สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$S.D. = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{n} \quad (14)$$

โดยที่ x = ค่า PWV ของสถานีที่ใช้อ้างอิง
 \bar{x} = ค่า PWV ที่เป็นสถานีจับคู่
 n = จำนวนของเดือน (เฉพาะข้อมูลในช่วงเวลาที่ตรงกัน)

แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบตามกรณี โดยจะแสดงค่า S.D. ที่คำนวณได้จากแต่ละคู่กรณีดังตารางที่ 8 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่แปรเปลี่ยนไปตามระยะทาง ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นระยะห่างระหว่างสถานีมีค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไปแตกต่างกันตามระยะทาง

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปแบบของค่า S.D. ตามกรณีศึกษาแล้ว จะทำการใช้หลักวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ในการแสดงสมการที่เป็นตัวแบบ $y = b \cdot x + c$ โดยให้ตัวแปรอิสระ (x) คือ ระยะห่างระหว่างสถานี มีหน่วยเป็น กิโลเมตร กับตัวแปรตาม (y) คือ ค่า S.D. ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ส่วน b และ c จะเป็นค่า regression coefficient และค่าคงที่ ตามลำดับ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร เพื่อหาระยะห่างระหว่างสถานีที่ให้ค่าความถูกต้องของค่า S.D. ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ยอมรับได้ โดยอยู่ที่ 3 มม. จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงในรูปแบบกราฟที่ให้แกน x เป็นระยะห่างระหว่างสถานี หน่วย กม. และแกน y เป็นค่า S.D. ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ หน่วย มม.

เมื่อได้สมการเชิงเส้นจึงนำมาทดสอบความเชื่อมั่นของสมการที่ได้จากหลักวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ทำได้โดยนำมาหาค่า R-Squared ที่จะสามารถแสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยที่ R-Squared มีค่าที่ยิ่งสูง ความผันแปรของตัวแปร (y) สามารถทำนายได้ด้วยตัวแปร (x) ซึ่งในที่นี้หมายถึง ถ้า R-Squared ที่ได้มีค่าสูง เราสามารถแทนระยะห่างระหว่างสถานีเพื่อคำนวณหาค่าต่างของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้

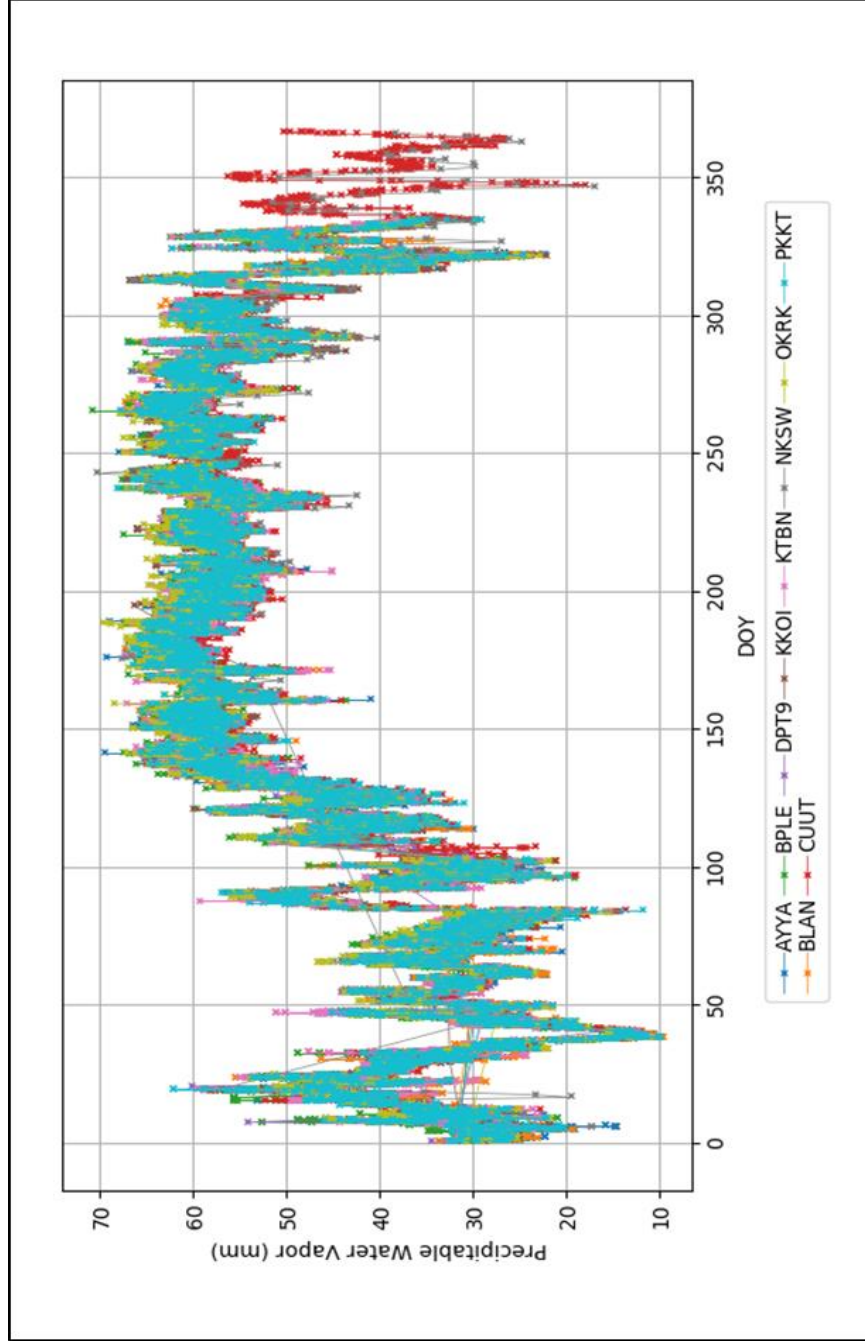
บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ผลการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ด้วยโปรแกรม PANDA เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องทั้งหมด 10 สถานี ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรมที่ดิน และกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นระยะเวลา 1 ปี คือระหว่างวันที่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2559 สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันได้ดังรูป





รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวัน

จากรูปกราฟที่ 13 เป็นการแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวัน ซึ่งจะเห็นว่า ภาคกลางจะมีค่าของ PWV ที่สอดคล้องกัน แต่จะมีบางสถานีที่ค่าโดดของ PWV เช่น กรุงเทพมหานคร (DTP9) และสถานีนครสวรรค์ (NKSW) ที่มีข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ สำหรับการประมวลผลประมาณ 270 วันจากทั้งหมด 366 วัน ช่วงเวลาที่ข้อมูลขาดหายไปนั้นจึงไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของข้อมูล อาจทำให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำที่ต้องได้อาจผิดไปจากความเป็นจริงเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสถานีรังวัดอื่นๆ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันที่ได้จากการประมวลผลด้วยข้อมูล GNSS ถูกนำไปทำการเฉลี่ยรายเดือนสามารถแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายเดือนได้ดังตารางที่ 5 นี้



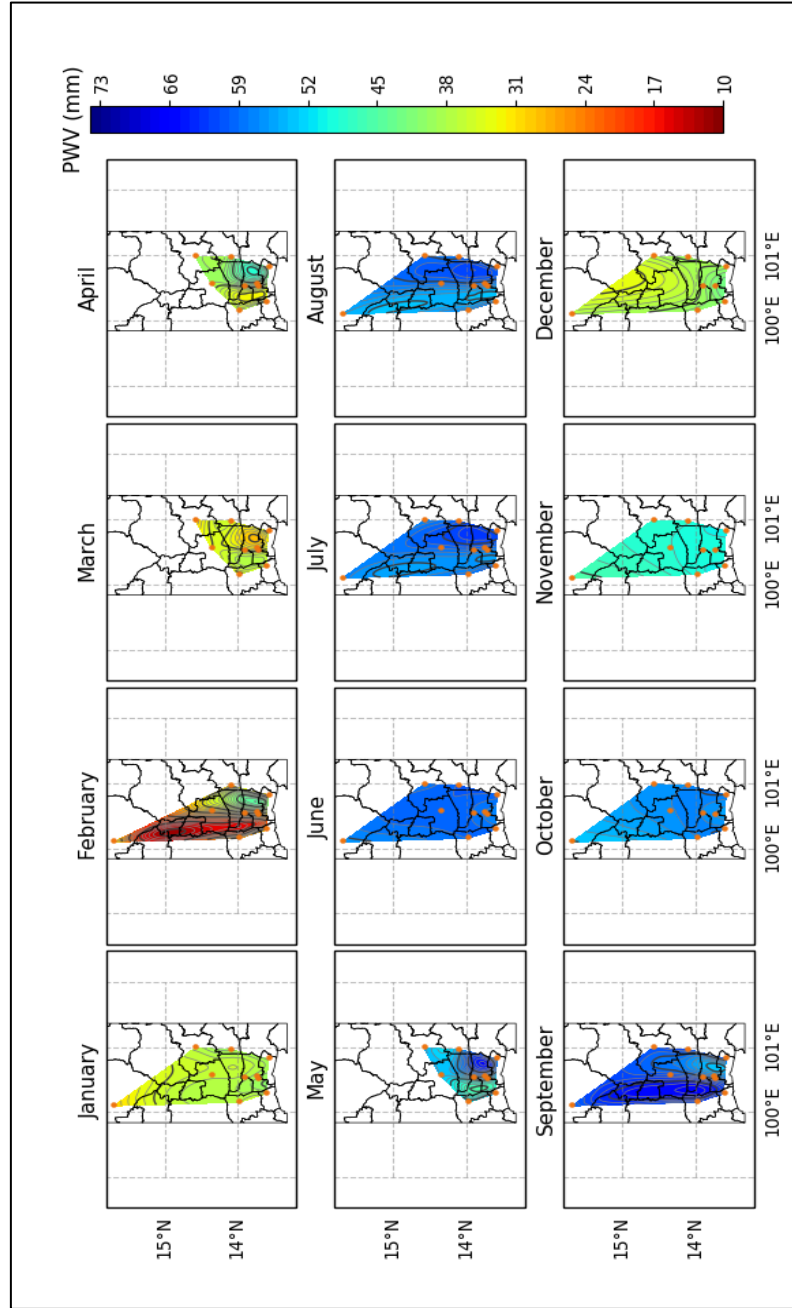
สถานี	เดือน												Mean	Min.	Max.
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12			
AYYA	36.59	27.90	33.97	39.02	53.57	59.71	59.24	58.15	61.21	56.79	48.90	N/A	48.64	27.90	61.21
BLAN	36.92	28.09	32.81	38.18	53.51	59.05	58.85	57.35	60.63	56.78	49.31	40.52	47.67	28.09	60.63
BPLE	39.35	29.50	35.73	39.95	54.45	59.63	59.73	58.30	60.96	57.90	50.73	39.42	48.80	29.50	60.96
CUUT	39.10	28.62	33.70	37.45	52.53	57.84	57.63	56.09	58.77	56.04	49.30	41.80	47.41	28.62	58.77
DPT9	38.44	33.46	31.77	40.82	56.49	58.03	58.90	57.61	56.95	N/A	N/A	N/A	48.06	31.77	58.90
KKOI	37.33	N/A	29.59	40.25	54.59	58.42	56.85	58.98	61.11	56.16	48.26	37.64	49.02	29.59	61.11
KTBN	37.40	28.87	34.68	39.29	53.68	59.07	58.81	56.82	60.35	57.77	50.50	41.56	48.23	28.87	60.35
NKSW	29.84	33.10	N/A	N/A	N/A	56.39	57.51	55.06	58.73	52.90	45.40	37.97	47.43	29.84	58.73
OKRK	39.54	27.82	35.40	40.61	54.68	60.12	60.02	58.75	61.23	57.14	48.80	39.38	48.62	27.82	61.23
PKKT	37.58	28.48	33.89	38.59	53.22	58.84	58.60	57.16	60.24	56.94	49.50	39.48	47.71	28.48	60.24

ตารางที่ 5 แสดงค่าปริมาณน้ำในบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน

จากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) เฉลี่ยรายเดือนจากรางข้างต้น สามารถแสดง เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของทุกสถานี ในแต่ละเดือน ได้ดังรูปที่ 14 โดยจากรูปสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เฉลี่ยเป็นรายเดือน จึงสามารถนำมาประกอบการอธิบายถึงเรื่องสภาวะอากาศประเทศไทยได้

จากการศึกษาลักษณะสภาวะอากาศทั่วไปของปีพ.ศ. 2559 ของอุตุนิยมวิทยา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้ แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน คือเริ่มจากช่วงเดือนพฤษภาคม หย่อมความกดอากาศต่ำปกคลุมส่งผลให้ประเทศไทยมีปริมาณฝนและการกระจายของฝนเพิ่มขึ้น ส่วนในระยะครึ่งหลังของเดือน มีหลายพื้นที่ฝนตกอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเดือนมิถุนายนถึงตุลาคม พายุโซนร้อนทำให้ประเทศไทยมีฝนตกหนาแน่นเกือบตลอดช่วงฤดูฝน โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในทุกภาคและทั้งประเทศในช่วงฤดูฝนสูงกว่าปกติ ซึ่งดูได้รูปที่ 14 จะแสดงได้ว่าค่า PWV ส่วนใหญ่ เป็นน้ำเงิน เพราะมีค่า PWV ที่สูง และเริ่มลดลงเมื่อเข้าฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม) แต่สำหรับฝนในเดือนพฤศจิกายน พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีปริมาณฝนสูงกว่าปกติ เนื่องจากอิทธิพลของพายุดีเปรสชันในช่วงต้นเดือนที่เคลื่อนตัวขึ้นฝั่งประเทศเวียดนามอ่อนกำลังเป็นหย่อมความกดอากาศต่ำและปกคลุมประเทศกัมพูชาในช่วงต้นเดือน คลื่นกระแสลมได้เคลื่อนผ่านบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนกลางรวมถึงภาคกลาง ทำให้บริเวณประเทศไทยมีฝนในช่วงดังกล่าว ต่อมาปลายเดือนธันวาคมมีอากาศที่เย็นเกือบทั่วไปในภาคกลาง เนื่องจากความกดอากาศสูงจากประเทศจีนที่แผ่คลุมประเทศไทย แสดงให้เห็นว่าค่า PWV ลดลงจากเดือนพฤศจิกายนและสำหรับช่วงเดือนกุมภาพันธ์ จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2559 ซึ่งเห็นได้จากกราฟว่าค่า PWV แสดงเป็นสีแดงในเดือนกุมภาพันธ์ เป็นเพียงเดือนเดียวในปีที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2559)

ดังนั้นทำให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในงานอุตุนิยมวิทยา เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งมีความได้เปรียบทางด้านความถี่ในการรังวัดสัญญาณรวมทั้งในช่วงเวลาที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่า การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS มีระดับความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา (Lu et al., 2015)



รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือนของปีพ.ศ.2559

4.2 การเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โปรแกรม PANDA ทั้งหมด 10 สถานีถูกนำมาคำนวณเพื่อดูการกระจายตัวของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยจับคู่ข้อมูลที่เวลาตรงกันของแต่ละสถานี ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปแบบของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ซึ่งตารางที่ 6 จะแสดงให้เห็นถึงระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของแต่ละคู่สถานี โดยเรียงลำดับจากระยะทางที่ใกล้ไปถึงไกล เพื่อให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลตามระยะทางที่มากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้จะแบ่งตามกรณีที่กำหนดไว้ สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางนี้

สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	ระยะทาง (กม.)	S.D. (มม.)
กรณีที่ 1 ระยะทางตั้งแต่ 1-20 กิโลเมตร			
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	4.76	2.36
กรุงเทพมหานคร (DTP9)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	17.54	2.90
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	19.09	1.35
กรณีที่ 2 ระยะทาง 21-80 กิโลเมตร			
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (CUUT)	29.52	1.79
กรุงเทพมหานคร (DTP9)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	33.17	2.92
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	33.89	2.79

สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	ระยะทาง (กม.)	S.D. (มม.)
ระหว่างสถานี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	สำนักงานที่ดินจังหวัด สมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	37.11	2.00
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	41.22	2.42
สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	41.51	2.21
ระหว่างสถานี สำนักงานที่ดินจังหวัด สมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	42.90	2.35
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	47.60	2.40
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (CUUT)	48.17	2.62
สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	50.41	2.37
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	50.48	3.57
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองครักษ์ (OKRK)	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	51.68	2.67
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	51.69	3.02
สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองครักษ์ (OKRK)	53.48	2.43

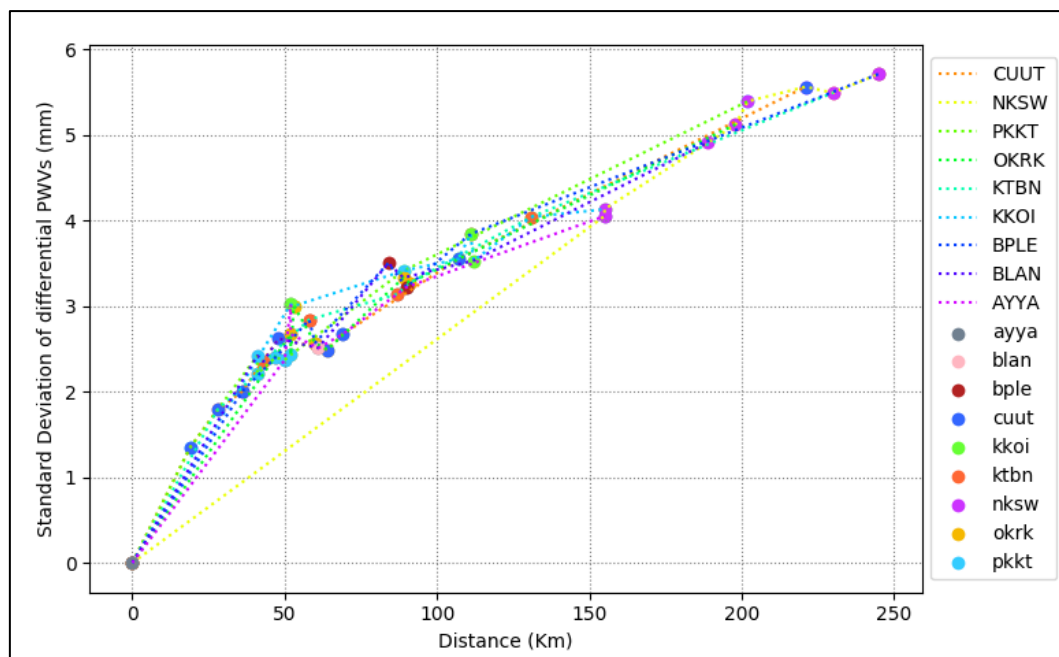
สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	ระยะทาง (กม.)	S.D. (มม.)
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	52.88	3.00
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	57.95	2.84
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	58.97	3.25
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	60.23	3.33
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	60.91	2.51
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (CUUT)	63.69	2.49
สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	67.27	3.63
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	69.77	2.67
กรณีที่ 3 ระยะทางตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป			
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	สำนักงานที่ดินจังหวัด สมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	86.28	3.50
สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	87.77	3.14
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	88.73	3.33

สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	ระยะทาง (กม.)	S.D. (มม.)
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขา แก่งคอย (KKOI)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	89.78	3.41
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	90.21	3.22
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	91.46	3.27
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	102.91	4.41
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (CUUT)	106.92	3.55
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	111.67	3.53
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	สำนักงานที่ดินจังหวัด สมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	112.05	3.84
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	131.13	4.04
สำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)	นครสวรรค์ (NKSW)	155.68	4.13
สำนักงานที่ดินจังหวัด พระนครศรีอยุธยา (AYYA)	นครสวรรค์ (NKSW)	156.31	4.05
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขาบางเลน (BLAN)	นครสวรรค์ (NKSW)	189.98	4.91
สำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก	นครสวรรค์ (NKSW)	199.78	5.12

สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	ระยะทาง (กม.)	S.D. (มม.)
สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)			
สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT)	นครสวรรค์ (NKSW)	203.39	5.39
นครสวรรค์ (NKSW)	กรุงเทพมหานคร (DTP9)	220.67	6.43
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)	นครสวรรค์ (NKSW)	222.93	5.56
นครสวรรค์ (NKSW)	สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)	231.11	5.49
สำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)	นครสวรรค์ (NKSW)	246.21	5.71

ตารางที่ 6 การแสดงระยะห่างระหว่างสถานีและค่า S.D. แต่ละคู่สถานี

จากการคำนวณระยะห่างระหว่างสถานี และค่า S.D. เพื่อแสดงถึงการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล ทำให้เห็นว่า “ระยะห่างระหว่างสถานีที่มากขึ้นจะมีการกระจายตัวของข้อมูลมากขึ้นตามระยะทาง” แต่อาจมีค่าโดดของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้ เนื่องจากข้อมูล GNSS ที่ได้มามีจำนวนน้อย ทำให้ค่าที่ควรจะเป็น ผิดพลาดไป เช่น สถานีกรุงเทพมหานคร (DTP9) มีข้อมูลเพียง 180 วัน จาก 366 วัน เป็นต้น ดังนั้นสถานีใดๆที่ถูกจับคู่กับสถานีกรุงเทพมหานคร (DTP9) อาจส่งผลให้ค่าปริมาณไอน้ำที่คำนวณได้คลาดเคลื่อน เมื่อสังเกตเห็นได้จากค่าของปริมาณไอน้ำที่ได้จากกรณีเดียวกัน ซึ่งข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปแสดงเป็นกราฟระยะห่างระหว่างสถานี (กม.) และค่า S.D. (มม.) ได้ เพื่อดูความสัมพันธ์ของทั้งสองข้อมูล ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี

สำหรับการวิเคราะห์ เรากำหนดให้เส้นประเป็นสถานีอ้างอิงหนึ่ง ซึ่งในกรณีนี้มีจำนวน 10 สถานี และให้สถานีอ้างอิงนั้นจับคู่เปรียบเทียบกับสถานีอื่นๆที่เหลืออีกจำนวน 9 สถานี โดยจะทำการวิเคราะห์เช่นนี้เหมือนกันทั้ง 10 สถานี ได้แก่ CUUT, AYYA, OKRK, BLAN, PKKT, KTBN, KKOI, BPLE, DTP9 และ NKSU

จากรูปที่ 15 กำหนดสัญลักษณ์วงกลมคือ สถานีรังวัดสัญญาณ โดยกำหนดขึ้นเพื่อให้ทราบว่าเส้นประ (สถานีอ้างอิง) ได้จับคู่เปรียบเทียบกับสถานีใดบ้าง และจะแสดงผลลัพธ์ทางแกน x เป็นระยะห่างระหว่างสถานี มีหน่วยเป็น กิโลเมตร ส่วนแกน y แสดงเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานีที่มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

ดังนั้นเมื่อเราทำเปรียบเทียบทุกสถานีทั้งหมดเข้าด้วยกัน แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของกราฟมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีที่เพิ่มมากขึ้น แต่อาจจะมีข้อมูลบางส่วนที่เป็นค่าโดดที่ผิดปกติขึ้นมาในระยะทางต่ำกว่า 100 กม. เนื่องจากข้อมูลในขั้นตอนการประมวลบางสถานีมีจำนวนข้อมูลน้อย ทำให้ค่าที่ได้อาจคลาดเคลื่อน แต่ถ้าเราตัดข้อมูลส่วนนั้นทิ้งไป กราฟที่ได้จะ

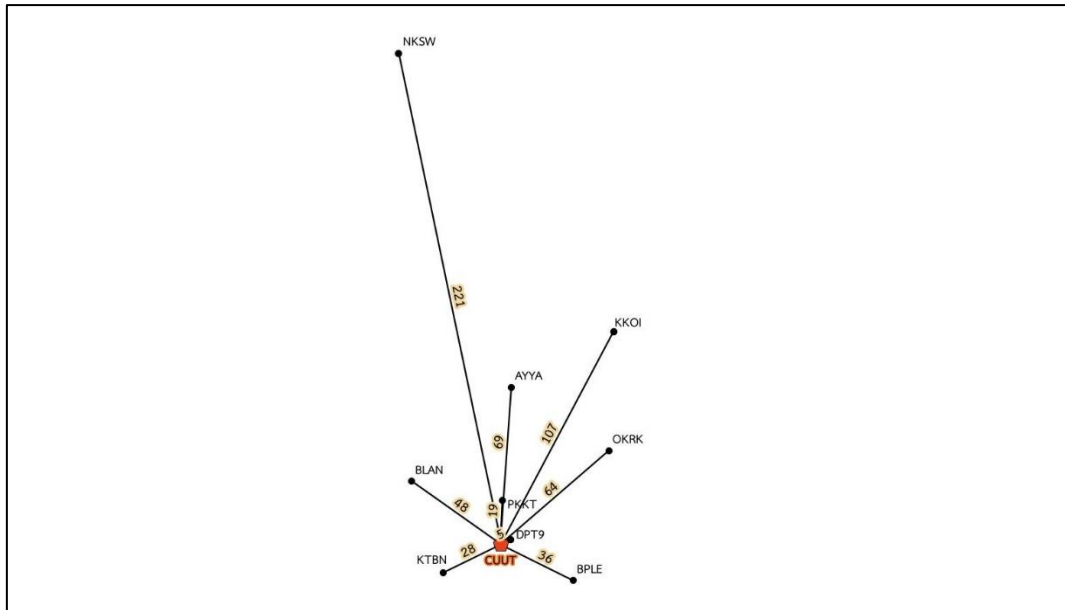
มีลักษณะของค่าข้อมูลระหว่างตัวแปร ทั้งในเรื่องระยะทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คล้อยตามกันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหมายความว่า สถานีที่มีระยะทางห่างกันไกลออกไปมีการกระจายตัวของข้อมูลระหว่างสถานีเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบได้กับระยะห่างระหว่างสถานีอยู่ใกล้กัน จะมีลักษณะของข้อมูลที่กระจุกตัวกันมากกว่า โดยระยะห่างระหว่างสถานีที่ไกลออกไปจะแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่กระจายตัวมากขึ้น ซึ่งเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนในระยะห่างระหว่างสถานีที่ตั้งแต่ 100 กม.ขึ้นไป จะได้ค่า S.D. ที่เพิ่มขึ้น การกระจุกตัวของข้อมูลน้อยลง

จากนั้นเมื่อทดลองนำสถานีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) เป็นสถานีอ้างอิง เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบให้เห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น โดยที่ตารางที่ 7 และรูปที่ 16 ได้ทำการจับคู่สถานีเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของระยะห่างระหว่างสถานี และค่า S.D. กับสถานีที่เหลือทั้ง 9 สถานี

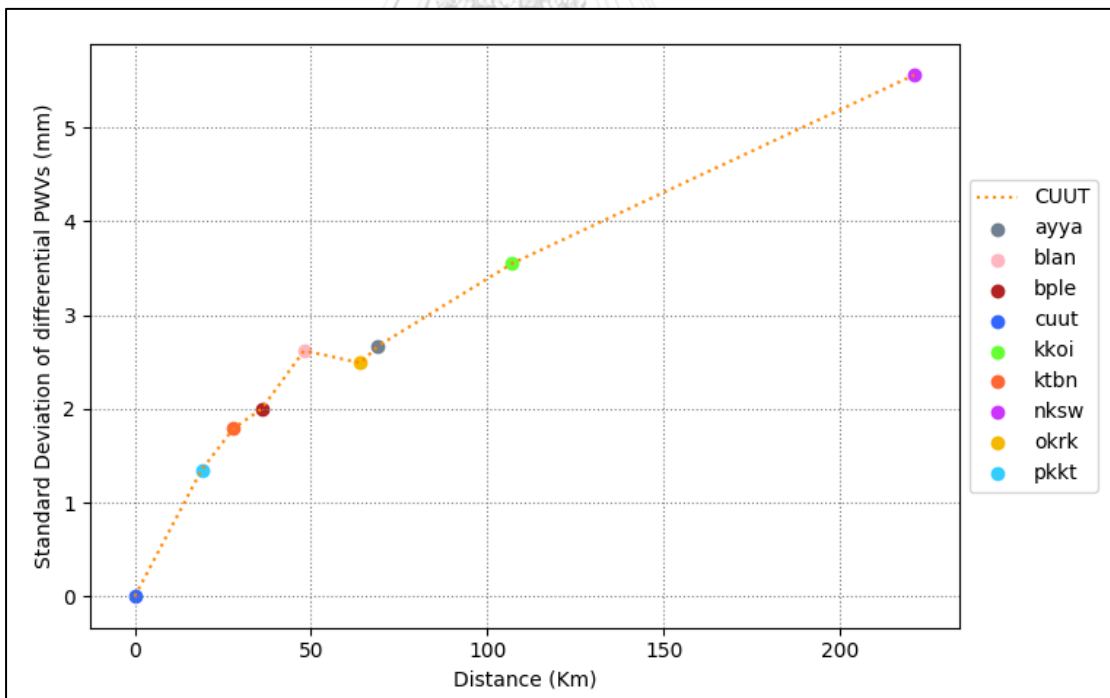
สถานีรังวัด	ระยะห่าง (กม.)	ค่า S.D.	
สถานีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) (สถานีอ้างอิง)	DPT9	5	2.36
	PKKT	19	1.35
	KTBN	28	1.79
	BPLE	36	2.00
	BLAN	48	2.62
	OKRK	64	2.49
	AYYA	69	2.67
	KKOI	107	3.55
	NKSW	221	5.56

ตารางที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของสถานี CUUT (สถานีอ้างอิง) กับสถานีรังวัดอื่นๆ

ด้วยระยะทางและค่า S.D.



รูปที่ 16 แสดงระยะห่างระหว่างสถานี CUUT (สถานีอ้างอิง) และสถานีรังวัดอื่นๆ หน่วย กม.

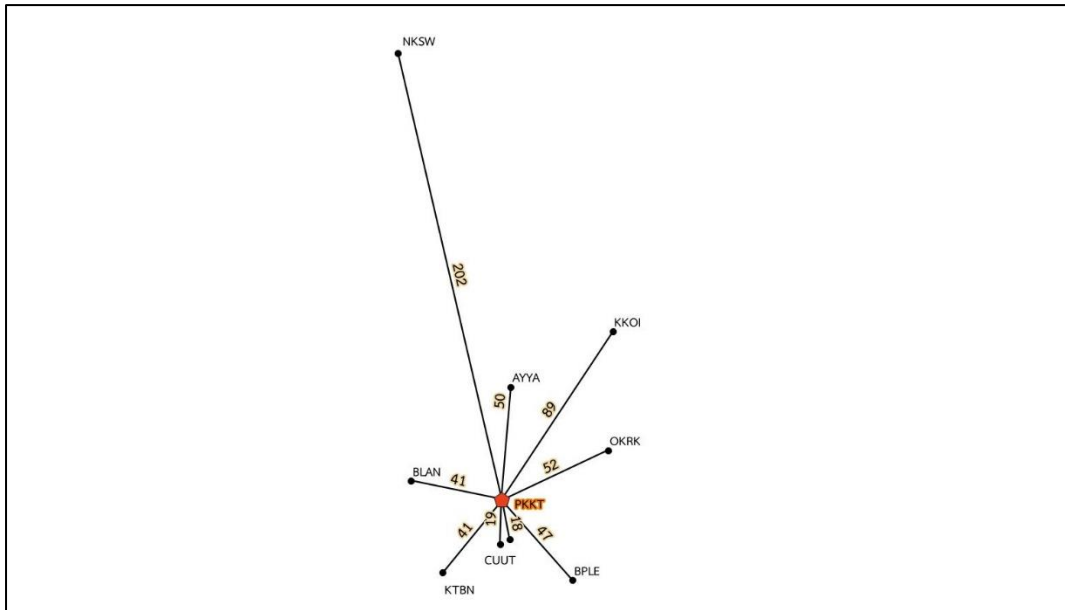


รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยใช้สถานี CUUT เป็นสถานีอ้างอิง กับสถานีรังวัดอื่นๆ

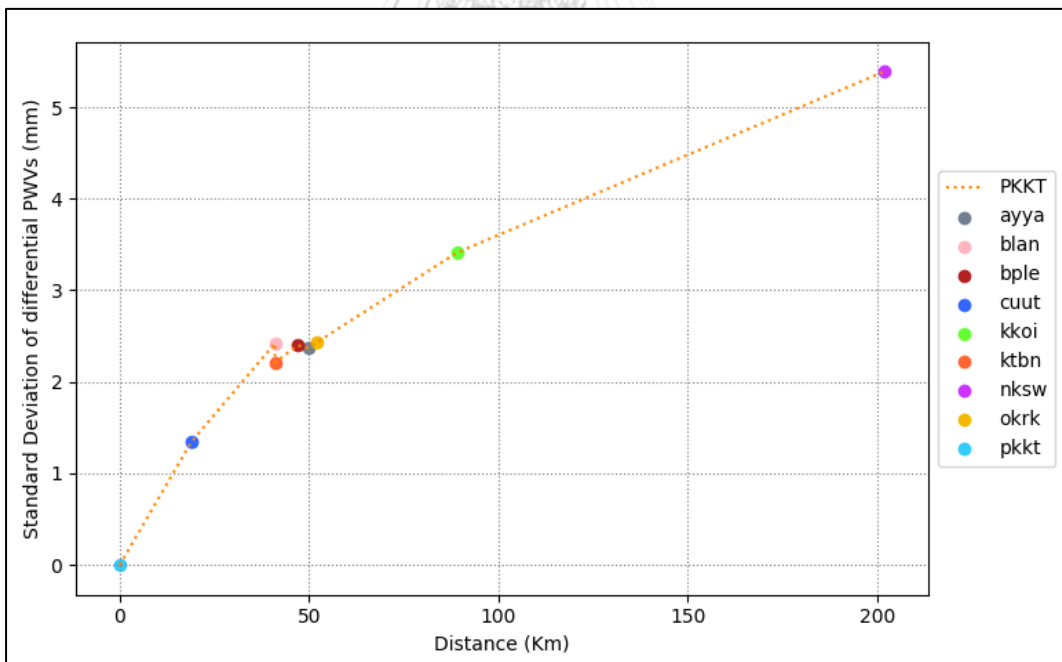
เมื่อทดสอบให้กราฟนี้มาแสดงให้เห็นถึงสถานีอ้างอิงเพียงเส้นเดียว ในที่นี้ใช้สถานีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT) จับคู่เปรียบเทียบกับสถานีอื่นๆที่เหลือทั้ง 9 สถานี โดยใช้ข้อมูล GNSS เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 31 ธันวาคม พ.ศ. 2559 โดยจะแสดงความสัมพันธ์กันของระยะห่างระหว่างสถานี และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ซึ่งจะเห็นว่าระยะทางตั้งแต่ 100 กม. ขึ้นไป ข้อมูลเริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกับระยะทางที่ต่ำลงมา ความห่างของค่าที่ระยะทางน้อยจะมีความถี่มากกว่าระยะทางที่ไกลออกไป และค่าข้อมูลมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

สถานีรังวัด	ระยะห่าง (กม.)	ค่า S.D.	
สำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด (PKKT) (สถานีอ้างอิง)	DPT9	18	2.90
	CUUT	19	1.35
	BLAN	41	2.42
	KTBN	41	2.21
	BPLE	47	2.40
	AYYA	50	2.37
	OKRK	52	2.43
	KKOI	89	3.41
	NKSW	202	5.39

ตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของสถานี PKKT (สถานีอ้างอิง) กับสถานีรังวัดอื่นๆ
ด้วยระยะทางและค่า S.D.

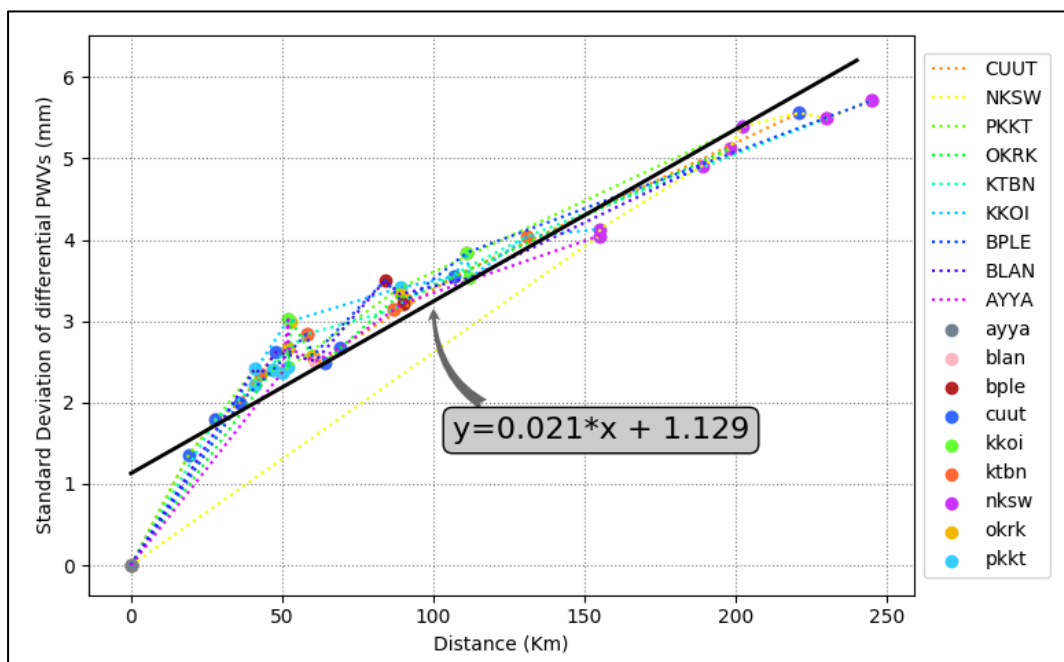


รูปที่ 18 แสดงระยะห่างระหว่างสถานี PKKT (สถานีอ้างอิง) และสถานีรังวัดอื่นๆ หน่วย กม.



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสถานี PKKT (สถานีอ้างอิง) กับสถานีรังวัดอื่นๆ

จากรูปที่ 19 เป็นตัวอย่างที่ 2 สมมติให้สถานี PKKT (สถานีอ้างอิง) และแสดงให้เห็นว่าค่ากระจายตัวของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีค่าที่เป็นไปตามระยะห่างระหว่างสถานีที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นตามระยะทาง เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะทางตั้งแต่ 50 กม. ขึ้นไป ข้อมูลเริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกับระยะทางที่ต่ำลงมา ความห่างของค่าที่ระยะทางน้อยจะมีความถี่มากกว่าระยะทางที่ไกลออกไป และค่าข้อมูลมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 20 กราฟแสดงการวิเคราะห์แบบการถดถอย (linear regression analysis)

ขั้นตอนสุดท้ายจะใช้หลักวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) โดยเริ่มจากการตรวจสอบว่าเส้นตรงนี้เป็นตัวแบบที่เหมาะสมหรือไม่ โดยการพลอตกราฟ ตัวแปรอิสระ (x) แทน ระยะห่างระหว่างสถานี มีหน่วยเป็น กิโลเมตร กับตัวแปรตาม (y) แทน ค่า S.D. ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร การแสดงกราฟนี้เพื่อดูว่ารูปแบบความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นหรือไม่ แล้วจึงคำนวณหาสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดกับข้อมูล ทำให้ต้องมีการทดสอบความเหมาะสมของเส้นถดถอยเชิงเส้นที่ได้มา โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

(R-Squared) เพื่อดูตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการนี้ ว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากน้อยเพียงใด ผลลัพธ์ที่ได้คือ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่กระจายตัวของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ซึ่งจะได้เป็นสมการดังรูปที่ 20 คือ $y = (0.021*x)+1.129$ โดยแทนค่า x (แนวราบ) เป็นระยะห่างระหว่างสถานี มีหน่วยเป็น กิโลเมตร และเมื่อต้องการทราบค่าปริมาณไอน้ำในระยะเวลาที่เท่าไร ให้แทนค่าลงใน x ตามสมการ จึงจะได้ผลลัพธ์เป็นค่า y (แนวตั้ง) ที่เป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

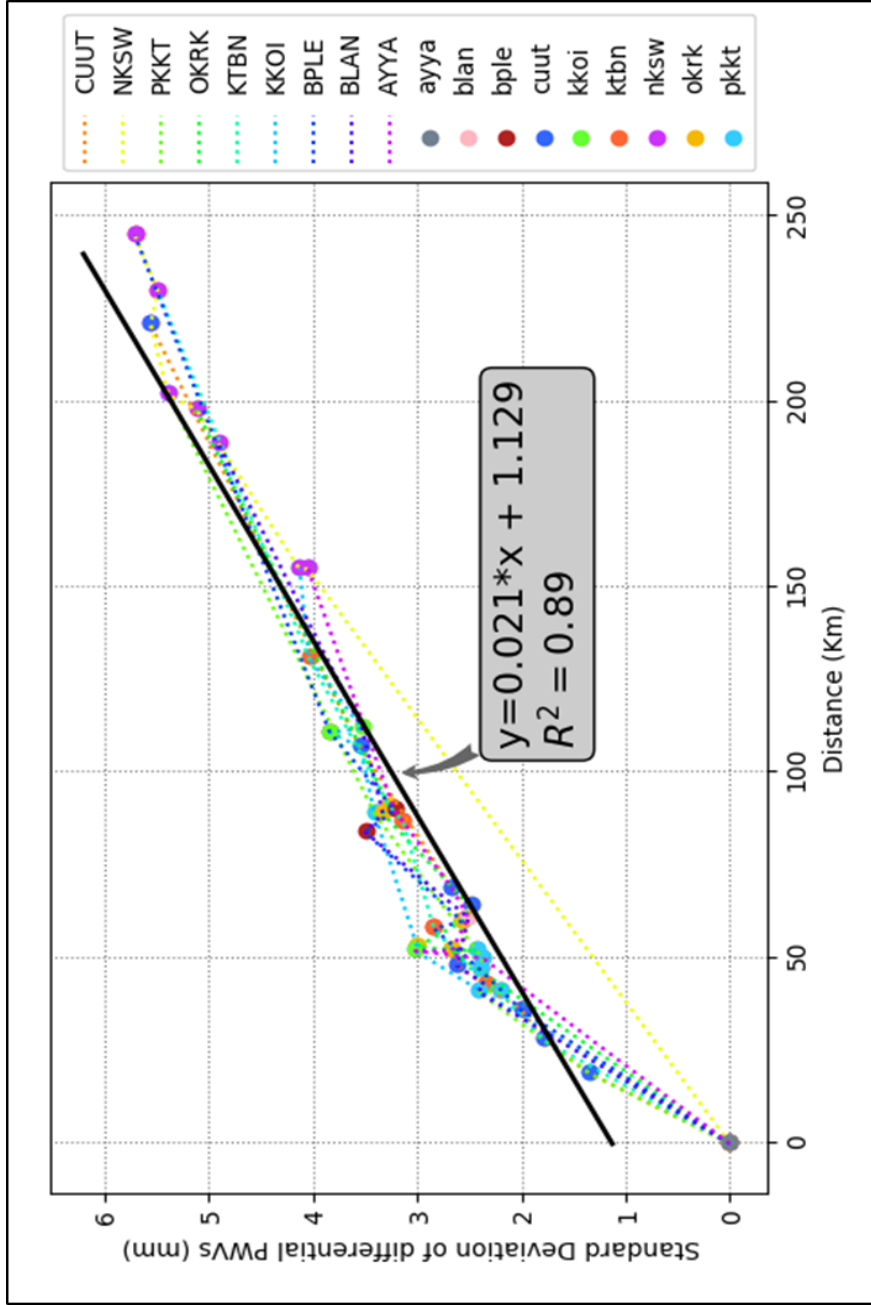
เมื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแล้ว จะนำมาหาค่า R-Squared ซึ่ง R-Squared มีค่าที่สูงย่อมแสดงให้เห็นว่าการทำนายค่าตัวแปรมีความแม่นยำสูงหรือเหมาะสมกับข้อมูลสูง โดยค่า R-Squared นั้น ถือว่าเป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มา มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ และจากการคำนวณหาค่า R-Squared ในที่นี้อยู่ที่ 0.89 หรือ 89% จึงกล่าวได้ว่า ตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมต่อการนำมาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

จากการศึกษางานวิจัยของ (Haan, 2006) กล่าวว่าไว้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสำหรับการพยากรณ์อากาศในระยะสั้นต้องการค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ไม่เกิน 3 มม. จึงกำหนดให้เป็นเกณฑ์สำหรับงานวิจัยนี้ว่า ความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ยอมรับได้ คือ ไม่ควรเกิน 3 มม.

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงระยะห่างระหว่างสถานีที่ค่าไอน้ำในบรรยากาศได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ได้ข้อสรุปว่า การจัดตั้งสถานีรังวัดดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ควรตั้งสถานีรังวัดในระยะห่างกันที่ไม่เกิน 89.1 กม. ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการเชิงเส้นข้างต้น โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสถานีเท่ากับ 89.1 กม. จะได้เป็น $y = (0.021*100)+1.129 = \pm 3$ มม. กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างสถานีที่ 89.1 กม. จะให้ค่าไอน้ำในบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไปประมาณ ± 3 มม. ซึ่งอยู่ในค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้ จึงเป็นข้อสรุปของงานวิจัยนี้ว่า ในการจัดตั้งสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ควรจัดตั้งสถานีรังวัดห่างกันอยู่ที่ประมาณ 89 กม. และในรัศมีที่ระยะ 89 กม. สามารถนำข้อมูลไอน้ำในบรรยากาศของพื้นที่ที่อยู่ในรัศมีมาใช้แทนกันได้ แต่ถ้าระยะห่างของสถานีมากกว่า 89 กม. ค่าที่ได้จะเกินค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้ จึงไม่สามารถนำค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของสถานีมาใช้แทนกันได้ แต่จะมีประโยชน์ด้านจัดตั้งสถานี เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งกับสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง เนื่องจากการจัดตั้งสถานีจะไม่หนาแน่นจนเกินไป

เมื่อได้สมการที่สัมพันธ์กับข้อมูลดังรูปที่ 20 จึงนำมาทดสอบให้เห็นว่าสมการที่นำมาใช้เป็นตัวแทนเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศนั้น ตัวแทนสมการแบบเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ด้วยค่า R-Squared ซึ่งให้ผลลัพธ์เท่ากับ 89% ดังรูปที่ 21

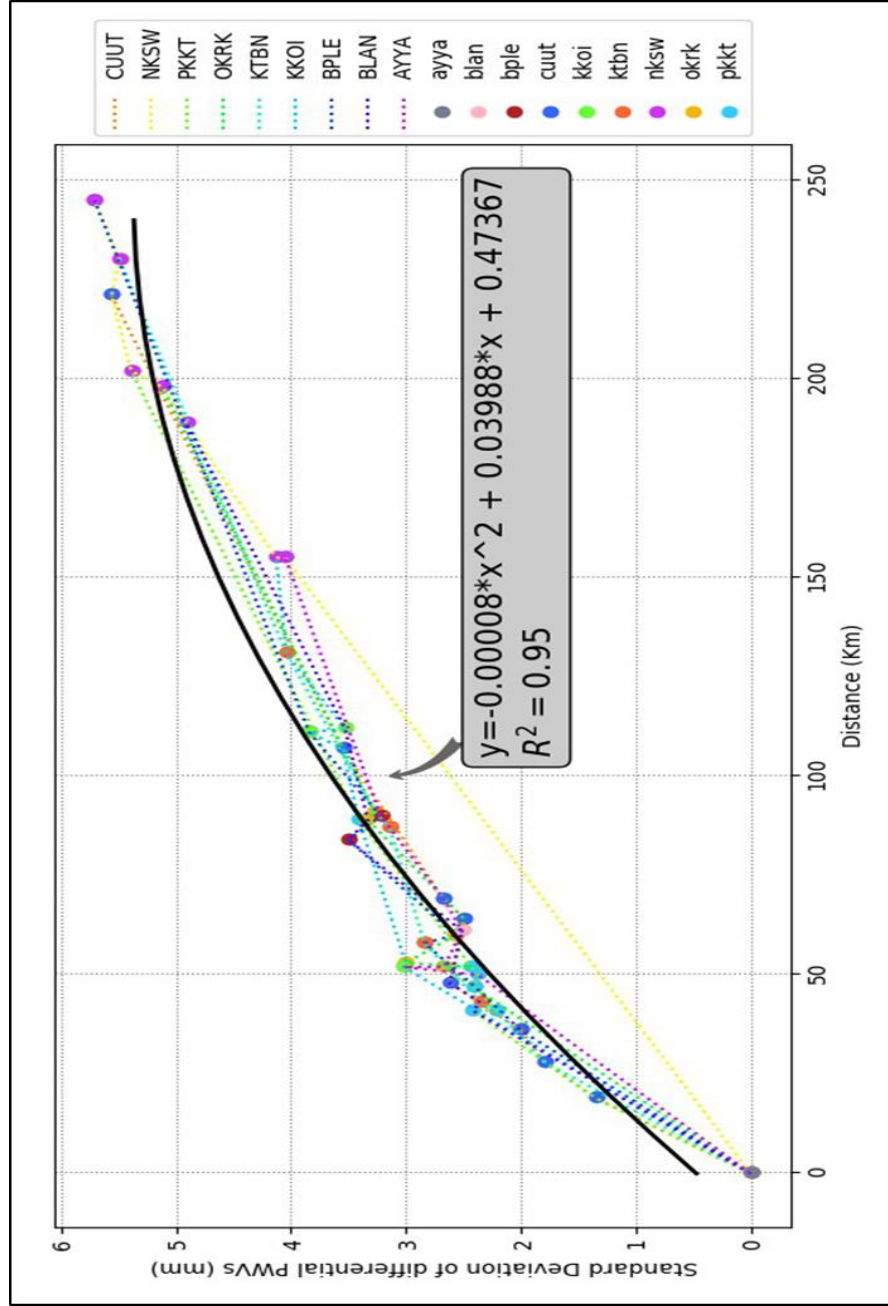




รูปที่ 21 แสดงค่า R-Squared

นอกจากการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่า S.D. ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศแบบเชิงเส้นที่แสดงให้เห็นถึงตัวแบบของสมการที่นำไปคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้ โดยค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับข้อมูลในระดับหนึ่ง จึงทำการทดสอบแบบด้วยสมการถดถอยแบบพหุนามกำลังสอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรในอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งจะได้ $y = 0.00008x^2 + 0.03988x + 0.47367$ และให้ค่า R-Squared ในที่นี้อยู่ที่ 0.95 หรือ 95% ดังรูปที่ 22





รูปที่ 22 กราฟแสดงการวิเคราะห์แบบพหุนามกำลังสอง

เนื่องจากทดสอบความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง ซึ่งสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ของสมการที่ได้มากถึง 95% ดังนั้นสมการจึงเหมาะสมกับข้อมูลมากกว่าสมการแบบเชิงเส้น ดังนั้นจาก $y = 0.00008x^2 + 0.03988x + 0.47367$ โดยกำหนดค่าไอน้ำในบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ ± 3 มม. ซึ่งค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ยอมรับได้ จึงแทนได้ว่า $3 = 0.00008x^2 + 0.03988x + 0.47367$ และระยะทางที่มีหน่วยเป็น กม. แทนด้วยตัวแปร x จะได้ 74.47 จึงเป็นข้อสรุปของงานวิจัยนี้ว่า ในการจัดตั้งสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง ควรจัดตั้งสถานีรังวัดห่างกันอยู่ที่ประมาณ 74 กม. จากการหาด้วยสมการพหุนามกำลังสองสอง คือ $y = 0.00008x^2 + 0.03988x + 0.47367$ กล่าวได้ว่า ระยะห่างระหว่างสถานีที่รัศมีภายใน 74 กม. จะให้ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้ไม่เกิน 3 มม. ดังนั้นการเลือกสถานีที่ระยะรัศมีภายใน 74 กม. จึงสามารถนำค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของสถานีที่อยู่ใกล้เคียงมาใช้แทนกันได้ และสำหรับการจัดตั้งสถานีจึงควรห่างกันอยู่ที่ประมาณ 74 กม. ขึ้นไป เพื่อไม่ให้เกิดการตั้งสถานีมีความแออัดมากเกินไปรวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการตั้งสถานีรังวัดอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยในประเด็นต่างๆ และข้อจำกัดของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอนำเสนอผลการวิจัยที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 จากการศึกษาโดยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงด้วยโปรแกรม PANDA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ข้อมูล GNSS ที่ได้จากสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องทั้งหมด 10 สถานี ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรมที่ดิน และกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นระยะเวลา 1 ปี คือระหว่างวันที่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ.2559 โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันของแต่ละสถานี ซึ่งเป็นข้อมูลของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศก่อนที่จะทำการคำนวณให้ได้ค่า S.D. ของค่า PWV เพื่อดูการกระจายตัวของค่า PWV จากการนำไปเปรียบเทียบกับตามระยะห่างระหว่างสถานี โดยแบ่งระยะทางเป็น 3 กรณี คือ 1) ระยะทางตั้งแต่ 1-20 กิโลเมตร 2) ระยะทาง 21-80 กิโลเมตร 3) ระยะทางตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป เพื่อที่จะทดสอบว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงเท่าใดเมื่อมีระยะห่างระหว่างสถานีไกลออกไป

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันที่ได้จะทำการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) เพื่อแสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล ว่าค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเริ่มมีเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่ระยะทางใด ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า

- 1) กรณีแรก คือ ระยะทางตั้งแต่ 1-20 กิโลเมตร ให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรูปแบบของค่า S.D. เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.20 มม. ซึ่งค่า S.D. ที่ได้จากกรณีแรกนั้นมีข้อมูลที่ได้จากสถานีกรุงเทพมหานคร (DTP9) มาพิจารณาร่วมอยู่ด้วย ซึ่งสถานี DTP9 มีจำนวนข้อมูลน้อย อาจทำให้ค่า S.D. ที่ได้เมื่อใช้ข้อมูลจากสถานี DTP9 จับคู่กับสถานีใดๆ อาจเกิดทำให้ข้อมูลเกิดความถูกต้องน้อยลง แต่เมื่อสังเกตค่าของ

สถานีที่ไม่มี DPT9 ความสมบูรณ์ของข้อมูลสำหรับการประมวลผลของสถานีอื่นๆที่มีมากกว่า จะได้ค่า S.D. ที่น้อยลง แสดงให้เห็นว่าระยะทางที่ไม่เกิน 20 กม. ข้อมูลของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก

2) ส่วนกรณีที่สอง ระยะทาง 21-80 กิโลเมตร ให้ค่า S.D. ที่กระจายตัว แต่ส่วนใหญ่ค่า S.D. ที่ได้จะมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีแรก โดยค่า S.D. ที่ได้จะประมาณ 2.69 มม. แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ข้อมูลของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานีเริ่มที่จะแตกต่างกันมากขึ้น

3) และกรณีที่สาม ระยะทางตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป ข้อมูลกระจายตัวสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีมากขึ้นเช่นเดียวกับกรณีที่สอง ซึ่งความแตกต่างของข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 4.3 มม.

เมื่อนำระยะห่างระหว่างสถานีมาเปรียบเทียบกับค่า S.D. ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปแบบกราฟ ดังรูปที่ 21 และ 22 ที่แสดงความสัมพันธ์กันของตัวแบบในรูปแบบสมการเส้นตรงและพหุนามกำลังสอง สำหรับกราฟที่กำหนดให้แกนราบ (x) คือ ระยะห่างระหว่างสถานี ในหน่วยกม. และแกนตั้ง (y) คือ ค่า S.D. ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในหน่วย มม. ซึ่งตัวแบบของสมการในรูปแบบเชิงเส้น จะได้ $y = (0.021 * x) + 1.129$ ส่วนตัวแบบสมการในรูปแบบพหุนามกำลังสอง จะได้ $y = 0.00008 * x^2 + 0.03988 * x + 0.47367$ และทั้งสองสมการที่ได้จะให้ค่า R-Squared ที่แสดงถึงความเหมาะสมของตัวแบบที่มีความสัมพันธ์ต่อข้อมูล เท่ากับ 89% และ 95% ตามลำดับ

5.1.2 ผลการศึกษาวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทยอย่างไร พบว่าความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS กับการกระจายตัวของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ด้วยตัวแบบสมการพหุนามกำลังสอง ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้คือ $0.00008 * x^2 + 0.03988 * x + 0.47367$ ทดสอบด้วยการแทนค่า $y = 3$ หมายถึง ค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำที่ยอมรับได้ที่ไม่เกิน 3 มม. จะได้ระยะห่างระหว่างสถานีที่เท่ากับ 74.47 กม. จึงเป็นที่มาในการตัดสินใจเรื่องระยะทางของสถานีที่ควรจัดตั้งอยู่ที่ประมาณ 74 กม.

5.1.3 สำหรับการทดสอบตัวแบบของสมการเชิงเส้นและพหุนามกำลังสอง ที่นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างสถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS กับค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี GNSS ข้างต้น จะใช้ค่า R-Squared ในการพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูล จึงถือว่าเป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ผลลัพธ์ที่ได้คือ 89% สำหรับตัวแบบของสมการเชิงเส้น และ 95% ตัวแบบของสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง กล่าวคือตัวแบบสมการโพลีโนเมียลกำลังสองที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลมากกว่าสมการเชิงเส้น ทำให้สมการโพลีโนเมียลกำลังสองมาเป็นตัวแทนในการคำนวณเพื่อหาค่า S.D. ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานีสำหรับพื้นที่ภาคกลาง

5.2 ประโยชน์ของงานวิจัย

5.2.1 ทำให้ทราบถึงระยะทางหรือระยะห่างระหว่างสถานีสำหรับการจัดตั้งสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องได้เหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้ระยะห่างของสถานีที่ควรจัดตั้งคือไม่เกิน 74 กิโลเมตร เนื่องจากค่าความถูกต้องของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสำหรับการติดตามสภาพอากาศในระยะสั้น ต้องมีความถูกต้องไม่เกิน 3 มม. (Haan, 2006) ซึ่งระยะห่างระหว่างสถานีที่ 74 กม. ให้ค่าถูกต้องอยู่ที่ ± 3 มม. จึงเป็นเหตุผลทำให้ระยะห่างในการจัดตั้งสถานีรับวัดดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องต้องห่างกันประมาณ 74 กม.

5.2.2 ทำให้ทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS กับการกระจายตัวของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในพื้นที่ภาคกลางของประเทศ สามารถแทนความสัมพันธ์ได้ด้วยระบบสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง $y = 0.00008x^2 + 0.03988x + 0.47367$ โดยที่ x คือ ระยะห่างระหว่างสถานี (กม.) และ y คือ ค่า S.D. ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (มม.)

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูล GNSS จากสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียมถาวร จำนวน 10 สถานี เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ทั้งนี้ตำแหน่งที่ตั้งของสถานี GNSS ที่ใช้ในงานวิจัยครอบคลุมเฉพาะพื้นที่บริเวณภาคกลางของประเทศเท่านั้น ทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้ถูกจำกัดอยู่เฉพาะในพื้นที่บริเวณภาคกลาง เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่ชัดเจนในการวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย ควรที่จะเพิ่มจำนวนสถานีที่ใช้ในการวิเคราะห์และขอบเขตพื้นที่ให้

ครอบคลุมทั้งประเทศ ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่หลากหลาย ซึ่งจากการที่ประเทศไทยได้เริ่มมีการจัดสร้างโครงข่ายสถานี GNSS ถาวรตั้งตั้งแต่ปี 2551 เพื่อติดตั้งระบบรับวัดพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที ซึ่งกำลังดำเนินงานติดตั้งทั่วประเทศซึ่งคาดว่าจะแล้วเสร็จในปี 2562 จำนวน 222 สถานี จะเห็นได้ว่าข้อมูล GNSS จากสถานีโครงข่ายเหล่านี้สามารถนำไปเพื่อการวิจัยในอนาคตได้เป็นอย่างดี

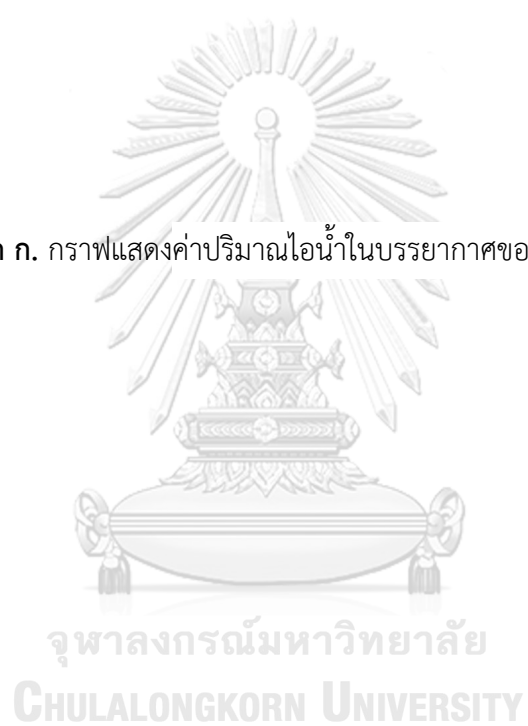
5.3.2 งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อหาระยะห่างระหว่างสถานีรับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย ซึ่งพิจารณาเฉพาะระยะทางในทิศทางราบ ซึ่งจากงานวิจัยของ Jin, Park, Cho, and Park (2007); Yao et al. (2015) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าไอน้ำในบรรยากาศมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระยะทางในทิศทางตั้ง โดยใช้ประโยชน์จากสถานีโครงข่าย GNSS ถาวร มาใช้ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในทิศทางตั้งในพื้นที่ประเทศไทยได้

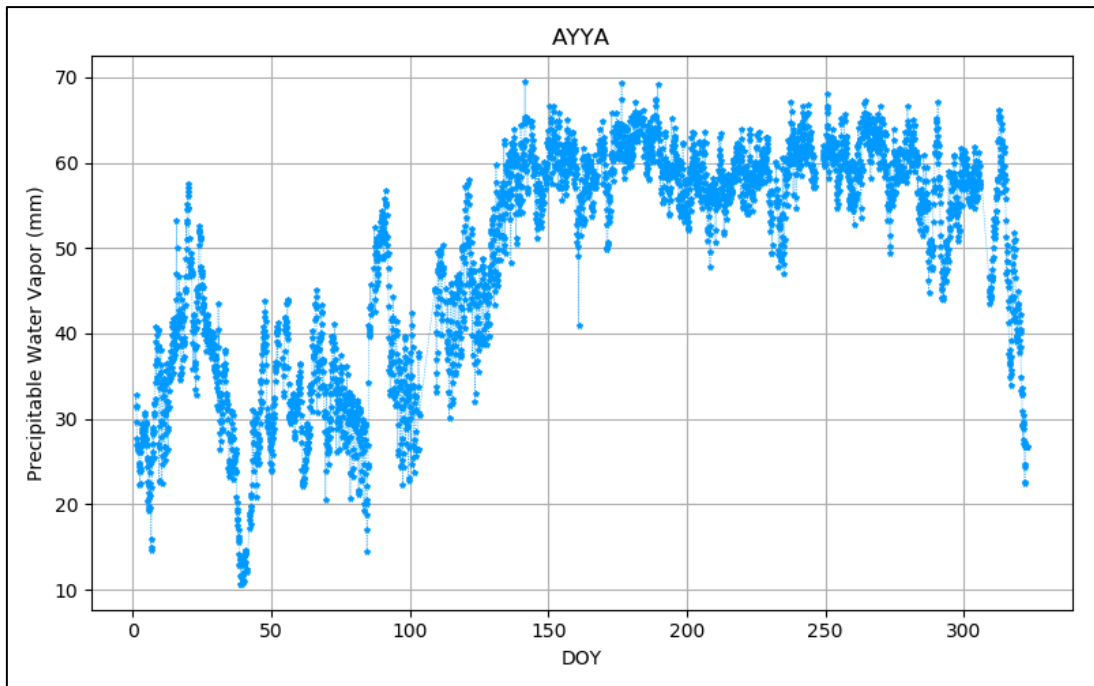


ภาคผนวก

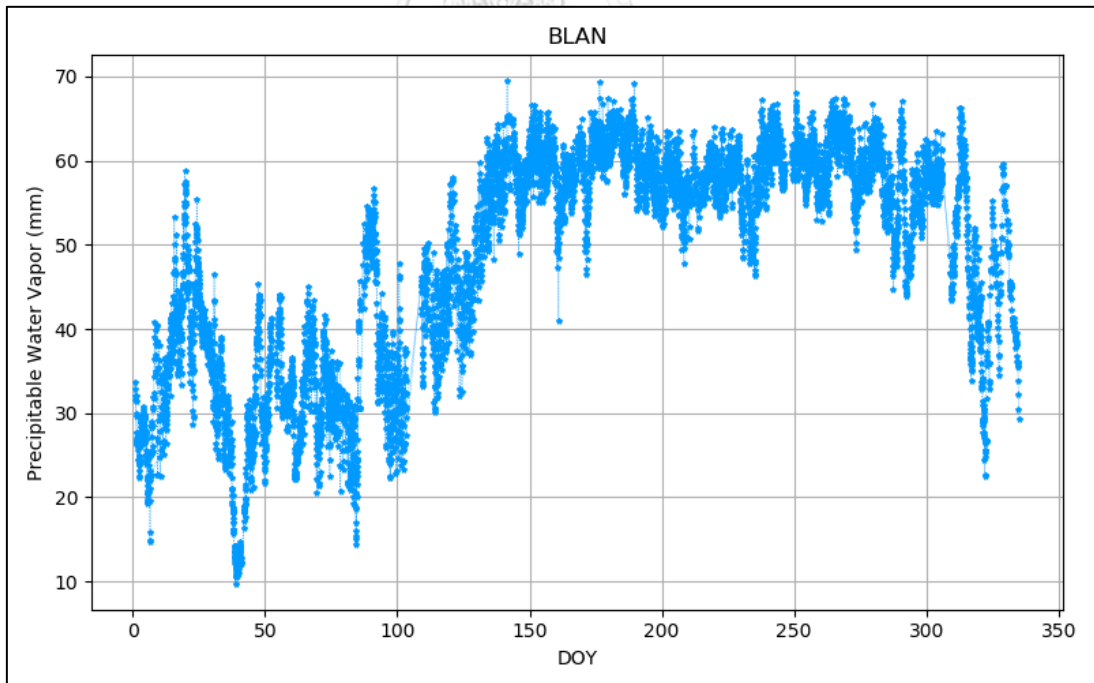
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของแต่ละสถานีรายวัน

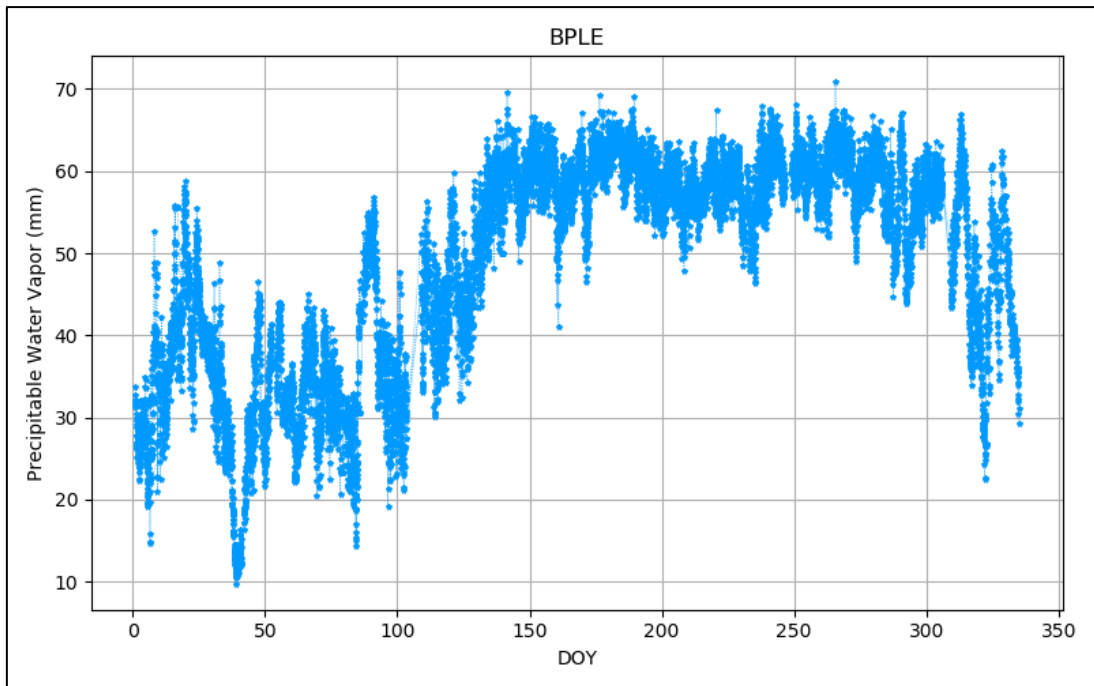




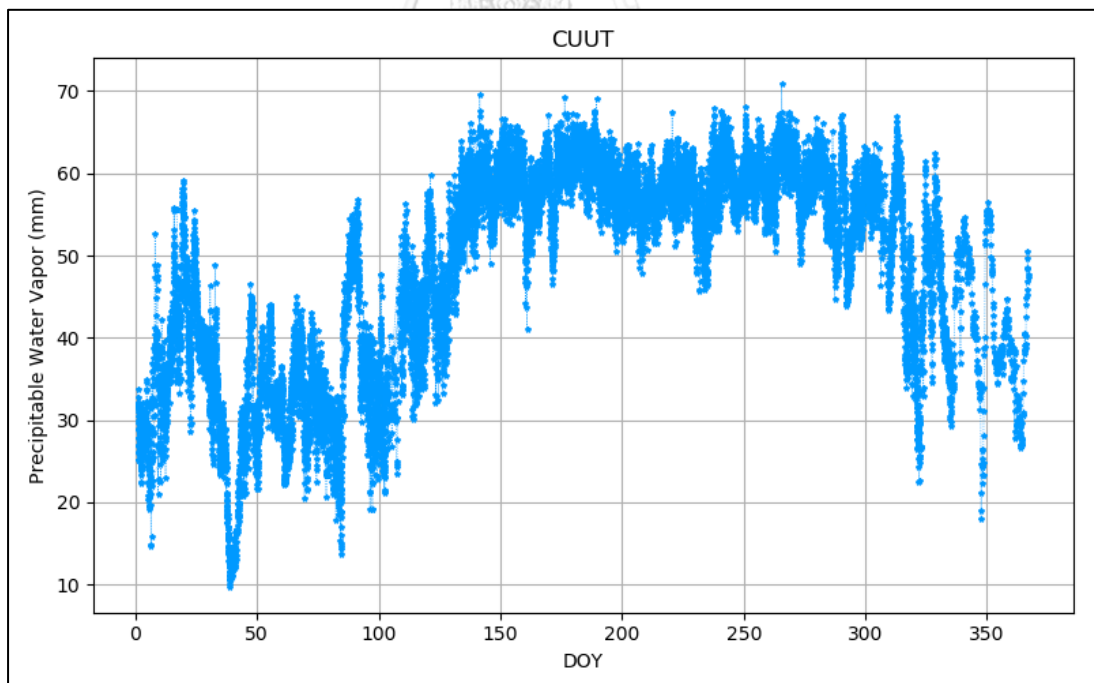
รูปที่ 1 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดิน
จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA)



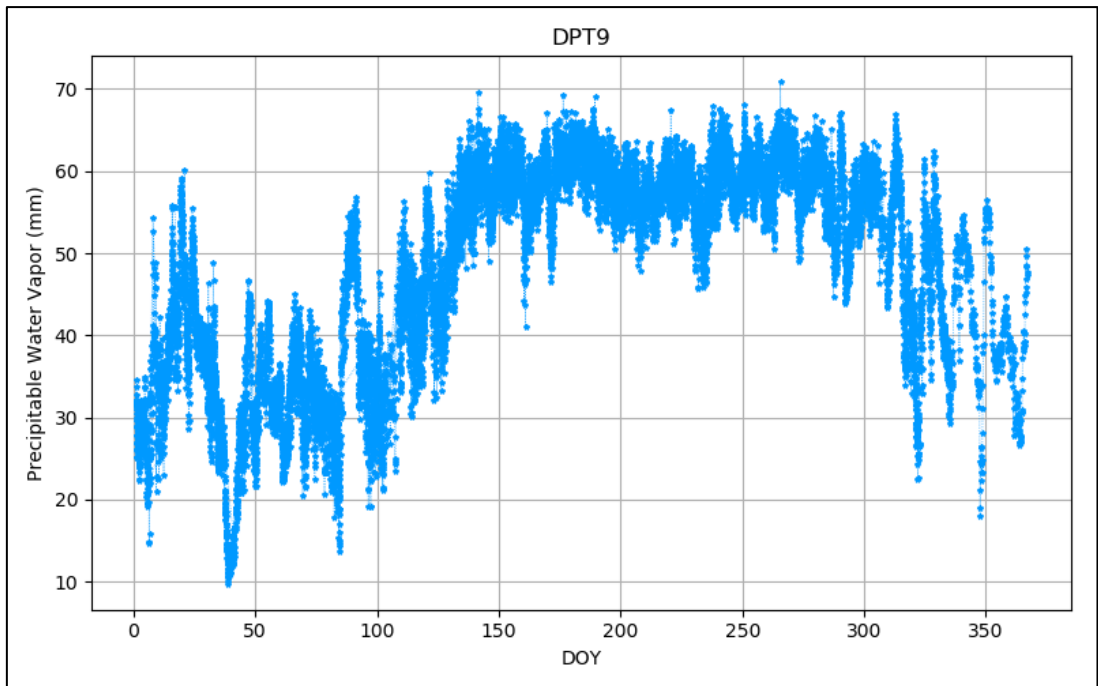
รูปที่ 2 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม
สาขาบางเลน (BLAN)



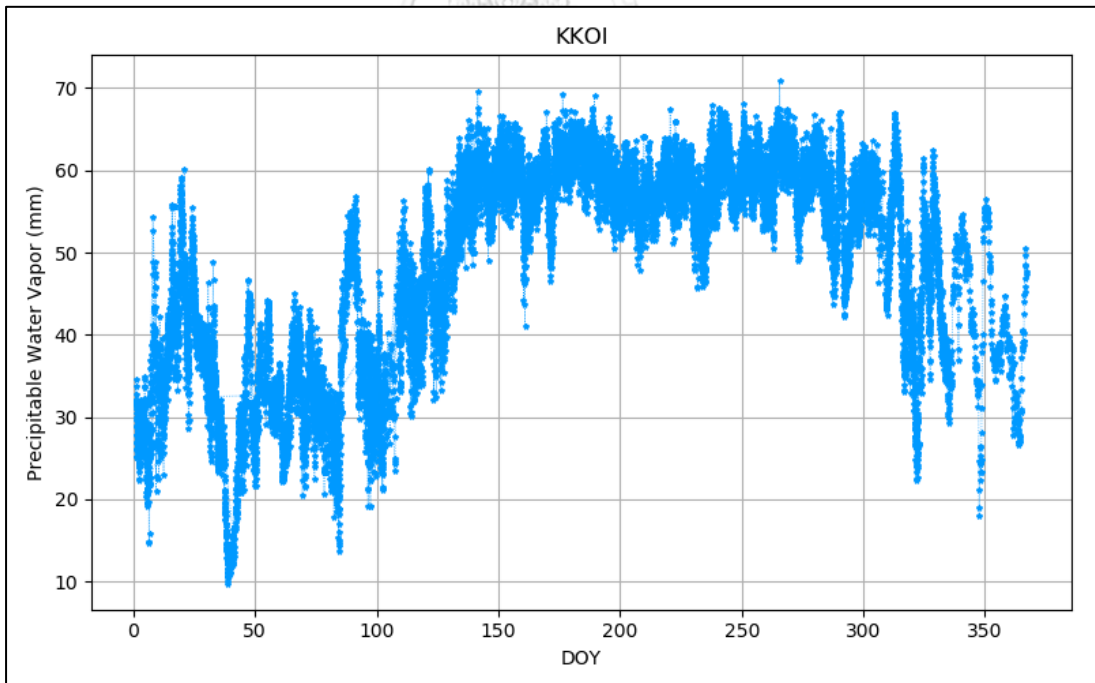
รูปที่ 3 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัด
สมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE)



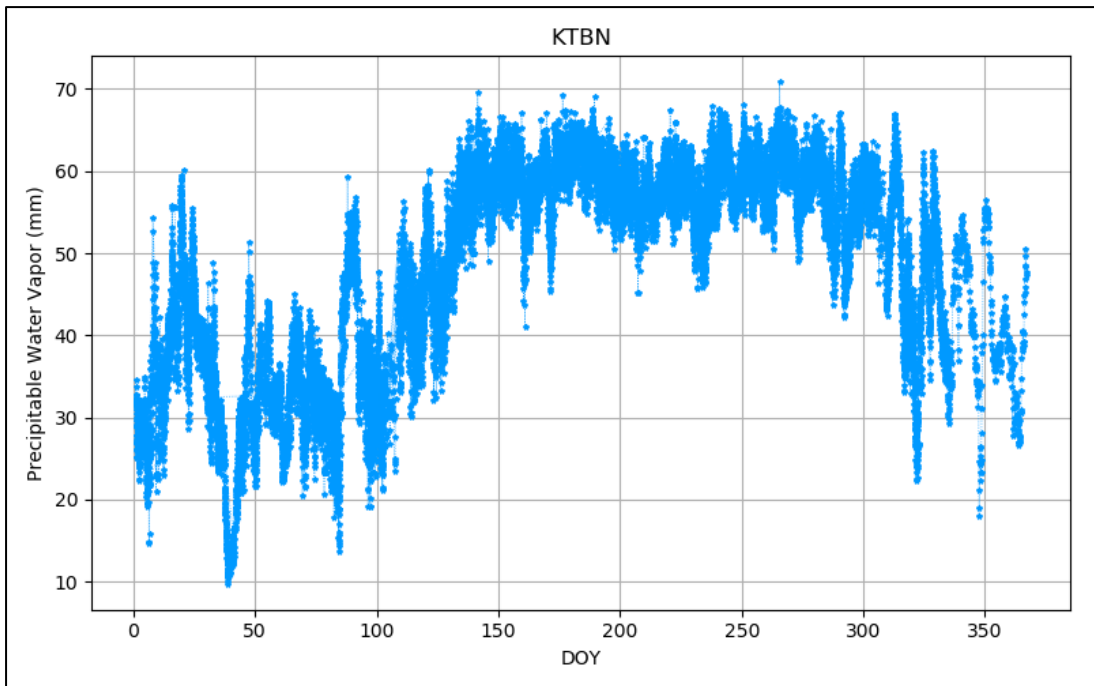
รูปที่ 4 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUUT)



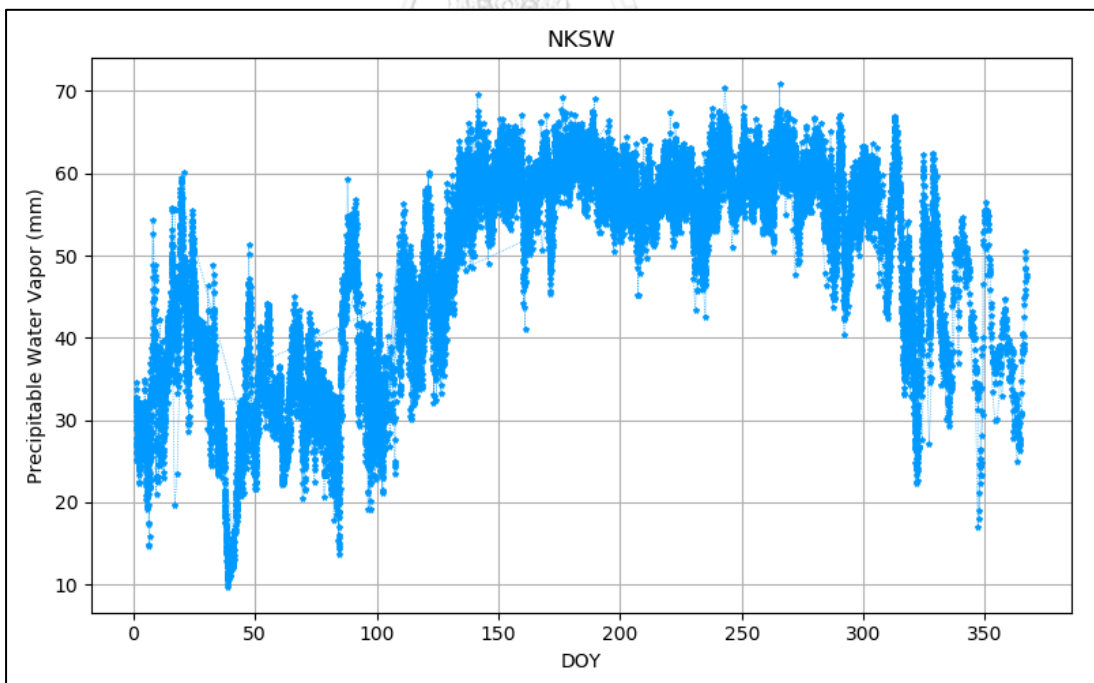
รูปที่ 5 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีกรุงเทพมหานคร (DPT9)



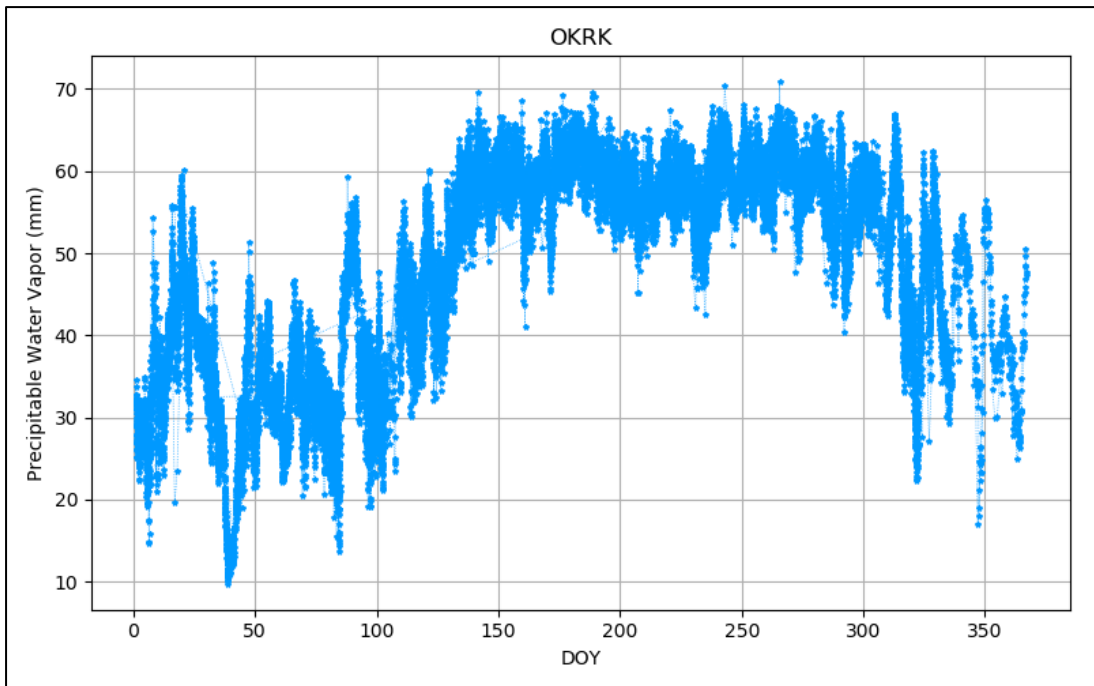
รูปที่ 6 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดสระบุรี สาขาแก่งคอย (KKOI)



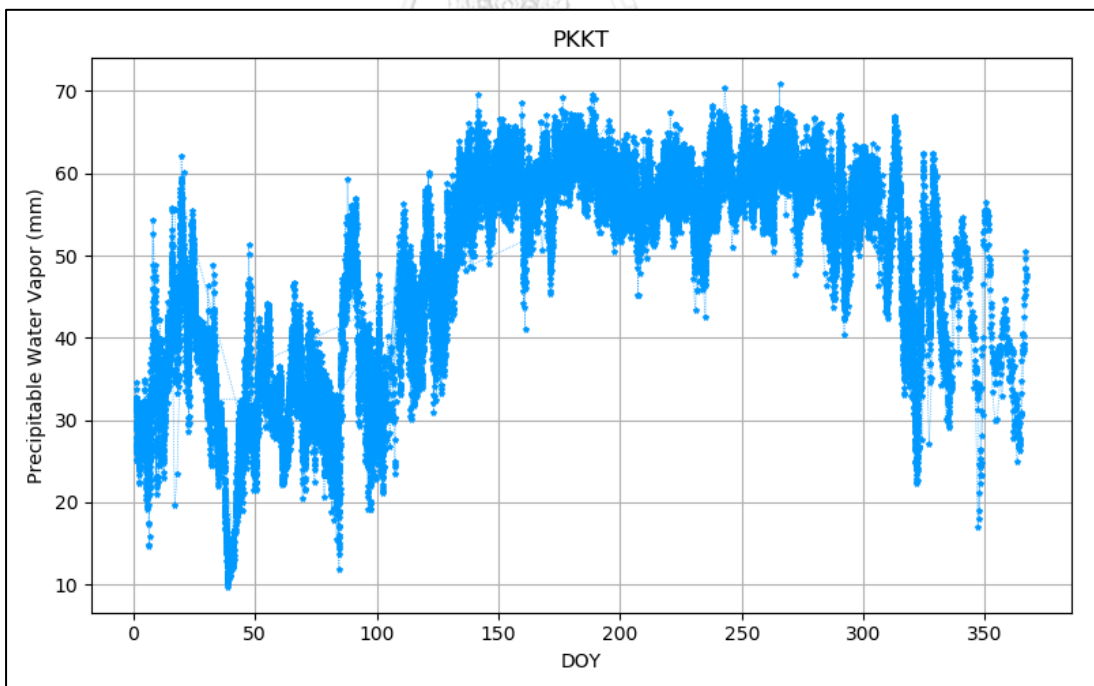
รูปที่ 7 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (KTBN)



รูปที่ 8 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีนครสวรรค์ (NKSW)



รูปที่ 9 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดนครนายก
สาขาองค์กรักษ์ (OKRK)

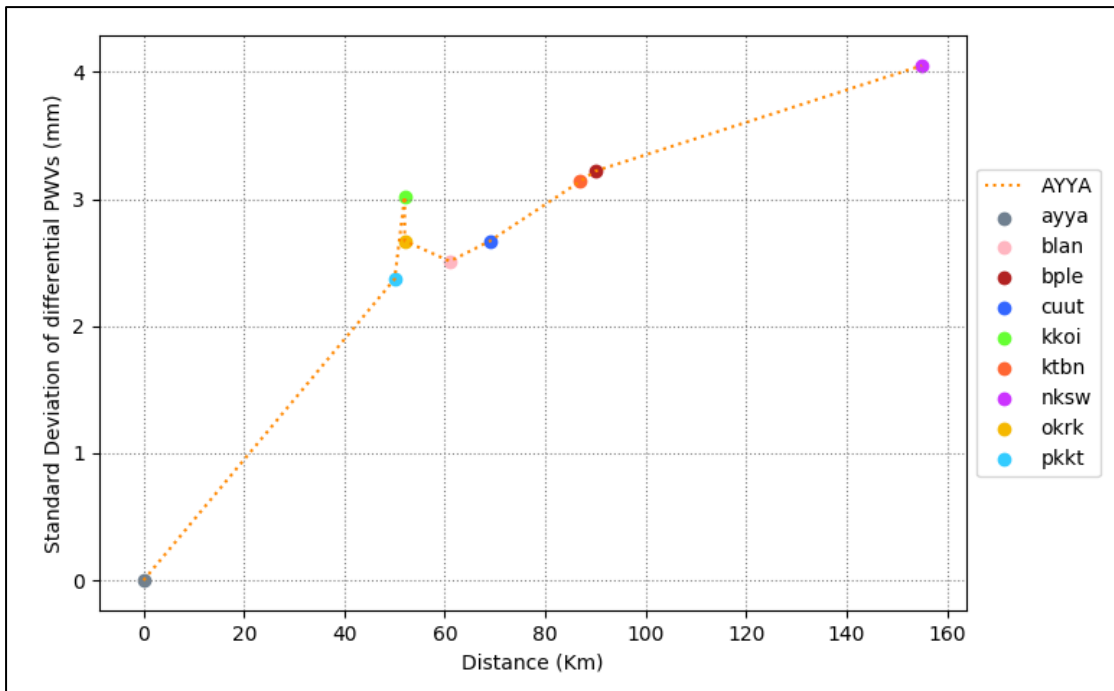


รูปที่ 10 แสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) รายวันของสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี
สาขาปากเกร็ด (PKKT)

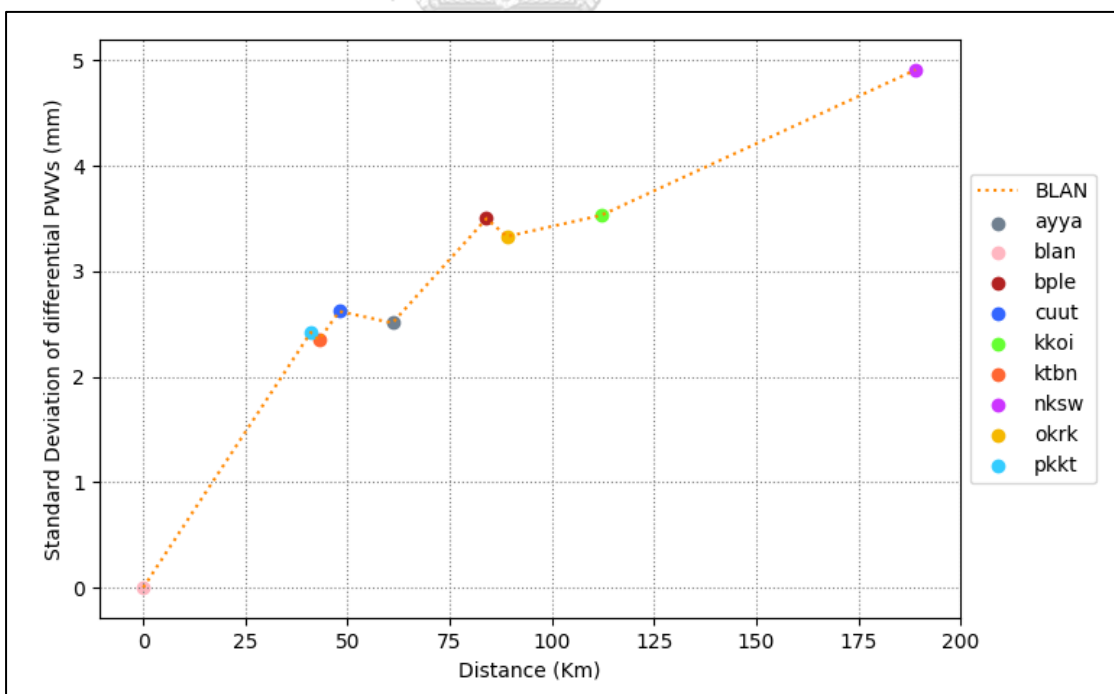
ภาคผนวก ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างสถานี กับการกระจายตัวของค่าต่าง
ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยแสดงด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



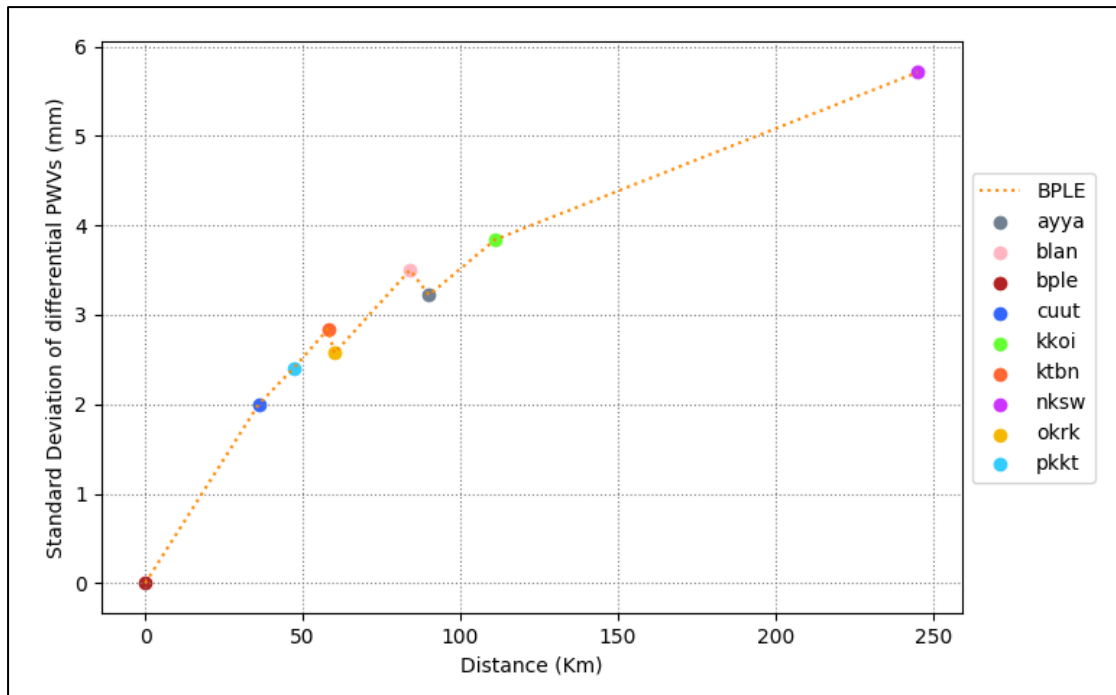
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



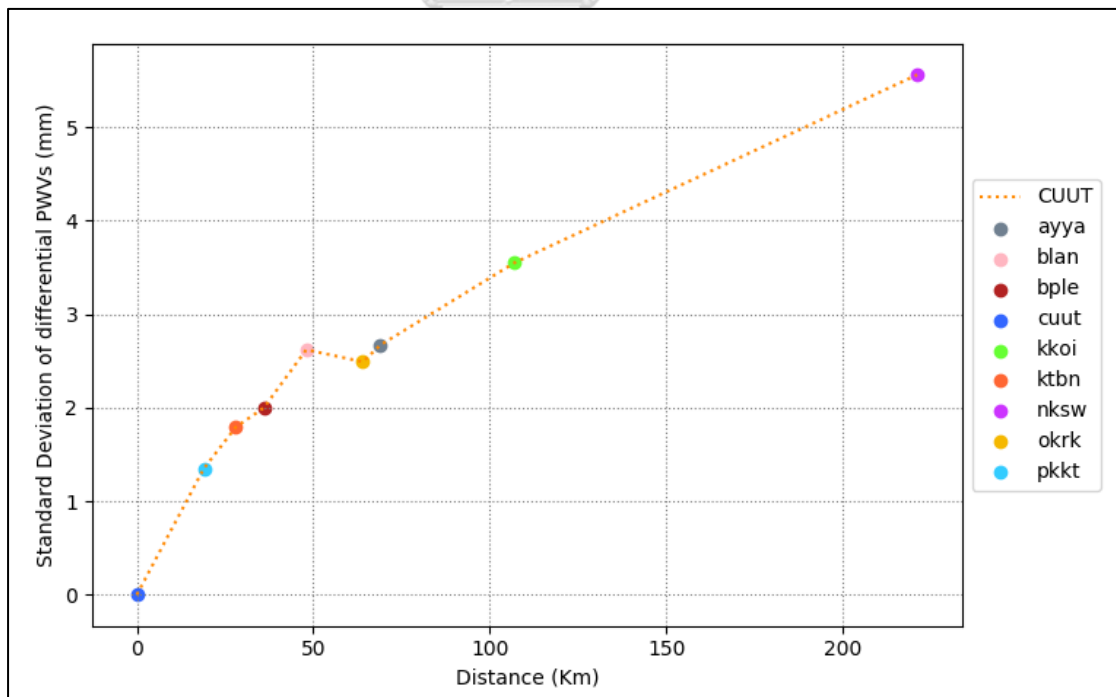
รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี AYYA เป็นสถานีอ้างอิง



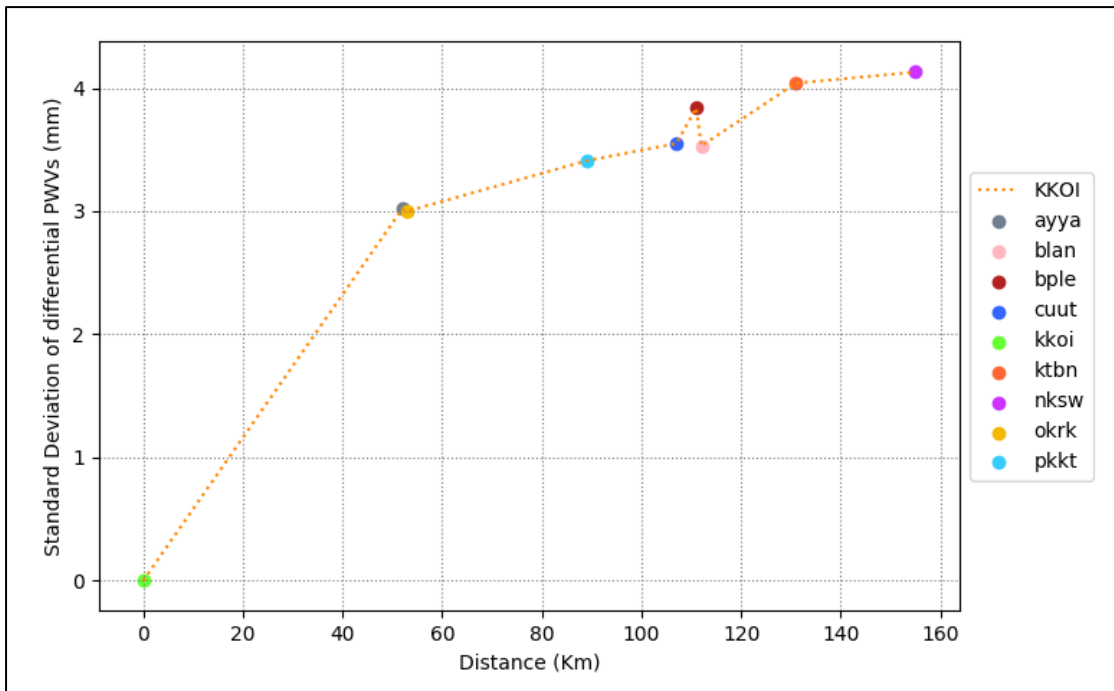
รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี BLAN เป็นสถานีอ้างอิง



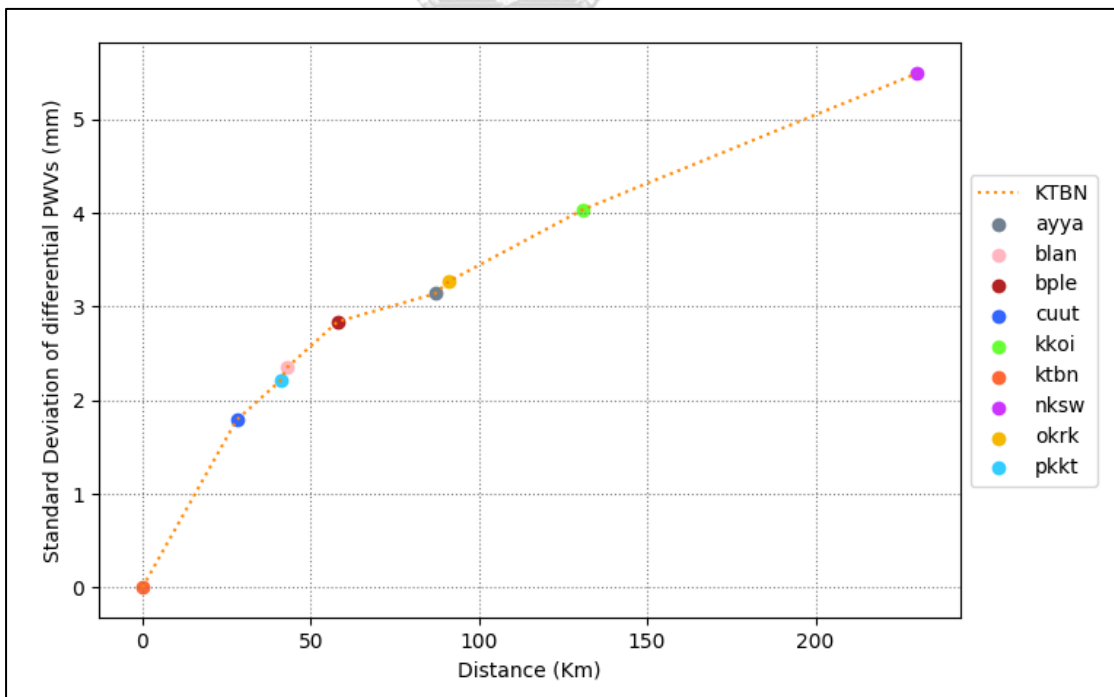
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี BPLE เป็นสถานีอ้างอิง



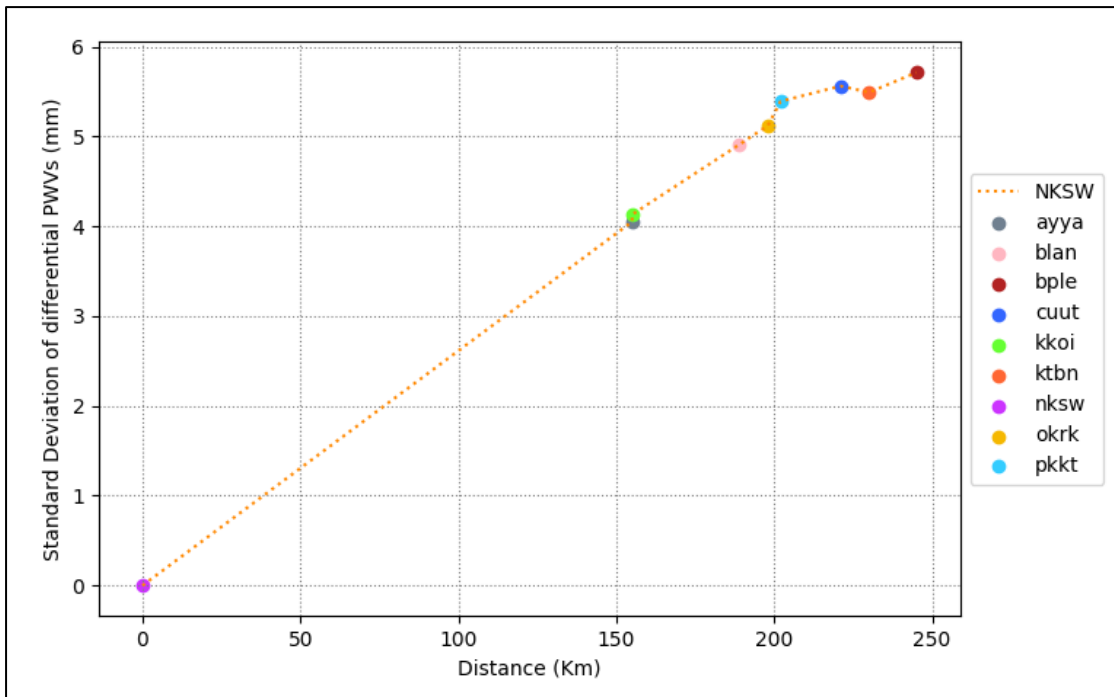
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี CUUT เป็นสถานีอ้างอิง



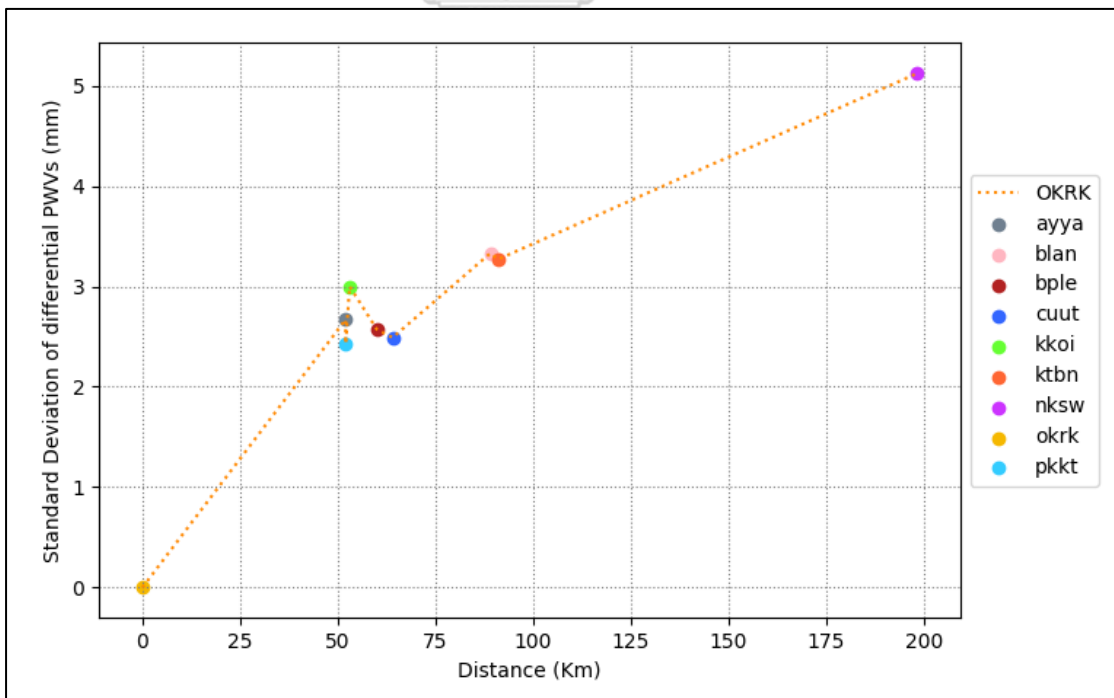
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี KKOI เป็นสถานีอ้างอิง



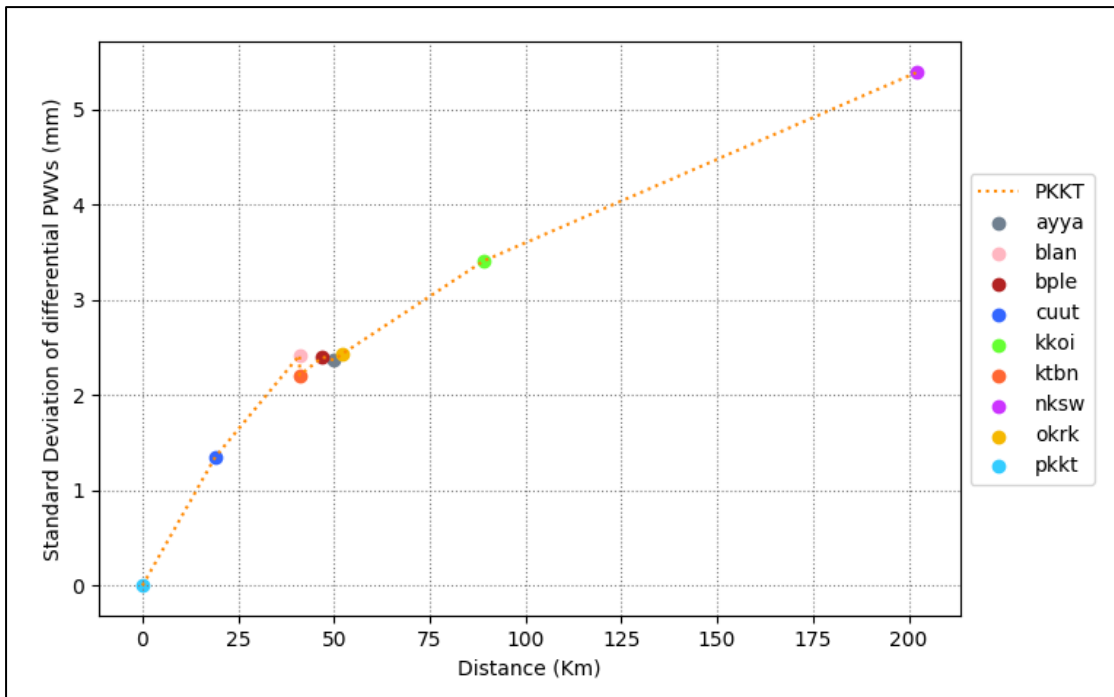
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี KTBN เป็นสถานีอ้างอิง



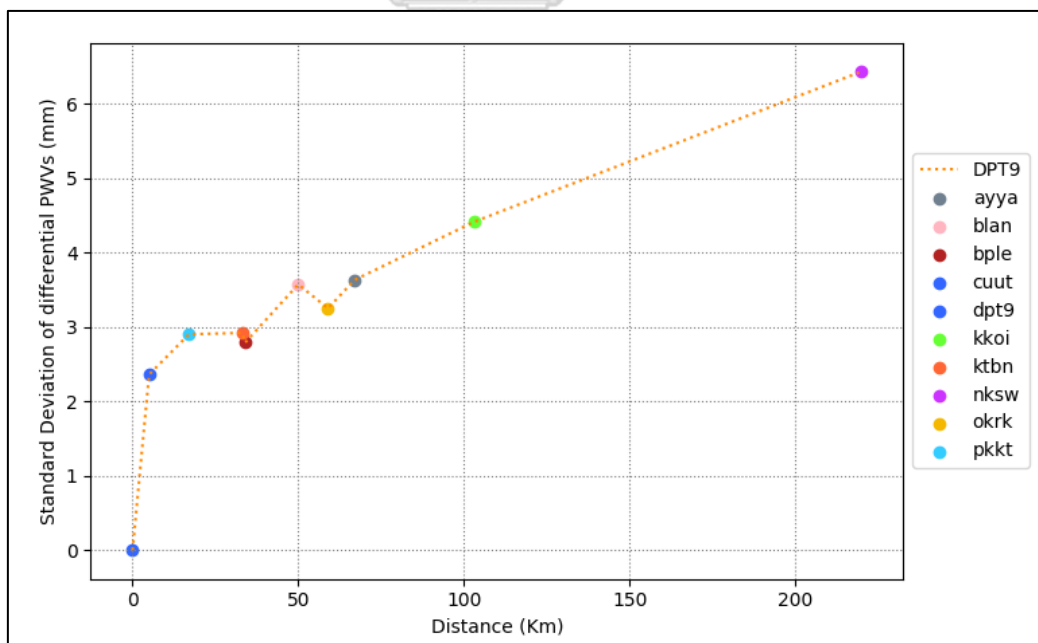
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี NKSW เป็นสถานีอ้างอิง



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี OKRK เป็นสถานีอ้างอิง



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี PKKT เป็นสถานีอ้างอิง



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างสถานีและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศระหว่างสถานี โดยมีสถานี DPT9 เป็นสถานีอ้างอิง

ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียด source code ไพทอนสคริปต์ เพื่อรวมไฟล์ RINEX จากข้อมูลราย
ชั่วโมงเป็นรายวัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

rinex_concatenate.py x
1 import os
2 import fnmatch
3 import datetime
4 from datetime import timedelta, date
5 from math import floor
6 import time
7
8 def mkdir(directory):
9     if not os.path.exists(directory):
10        os.makedirs(directory)
11
12 def daterange(start_date='%Y-%m-%d', end_date='%Y-%m-%d'):
13     for n in range(int((end_date - start_date).days)):
14         yield start_date + timedelta(n)
15
16 def date2doy(date='%Y-%m-%d %H:%M:%S'):
17     # input y,m,d,hh,mm,ss : integer
18     # output doy decimal : float
19     datetimeformat = '%Y-%m-%d %H:%M:%S'
20     dd = datetime.datetime.strptime(date, datetimeformat)
21     doy = dd.strftime('%j')
22     dec = (dd.hour + dd.minute/60.0 + dd.second/3600.0)/24.0
23     doyday = int(doy) + dec
24     DOY = doyday
25     return DOY
26
27 def getObsData(workdir):
28     data = {}
29     for root, dirs, files in os.walk(workdir, topdown=True):
30         for rinex in fnmatch.filter(files, '*.16o'):
31             rinexfile = os.path.join(root, rinex)
32             filename = rinex.split('.')[0]
33             data[filename] = rinexfile
34     return data
35
36 def doy2str(doy):
37     doy = '%02' + str(doy)
38     n = len(doy)-3
39     doy = doy[n:]
40     return doy
41
42 def getData(sta, doy, obsJSON):
43     label1 = ['R', 'I', 'J', 'K', 'L', 'M', 'N', 'O', 'P', 'Q', 'R', 'S', 'T', 'U', 'V', 'W', 'X']
44     label2 = ['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G']
45     cc = [sta +doy2str(doy) + x for x in label1] + [sta +doy2str(doy+1) + x for x in label2]
46     data = []
47     for aa in cc:
48         try:
49             data.append(obsJSON[aa])
50         except:
51             pass
52     return ' '.join(data)
53
54 tic = time.clock()
55 directory = 'E:\RefData\16'
56 teqc = 'C:\teqc\teqc.exe'
57 obsJSON = getObsData(directory) # Make sure that all files's name are lowercase.
58 #print(obsJSON)
59 stations = ['PKKT'] #, 'BLAN', 'BLMG', 'BPLE', 'KTSN', 'OKRK', 'PKKT', 'STHP', 'Ephm', 'KKOI', 'PLDG', 'PNNK']
60 for sta in stations:
61     for single_date in daterange(date(2016, 10, 1), date(2016, 11, 30)):
62         doy = floor(date2doy(single_date.strftime('%Y-%m-%d') + ' 00:00:00'))
63         print('Station : ', sta + str(doy))
64         outfile = 'D:\TERM_3\THESIS\JOL_data' + '\\ ' + sta + '\\ ' + sta + doy2str(doy) + '.16o'
65         arg = getData(sta, doy, obsJSON)
66         #print(arg)
67
68         os.system( teqc + ' -O.int 1 -O.dec 30 ' + arg + ' > ' + outfile)
69
70 toc = time.clock()
71 dt = toc-tic
72 print('Time (s) -', dt)
73

```

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- Bevis, M. (1992). GPS METEOROLOGY - REMOTE-SENSING OF ATMOSPHERIC WATER-VAPOR USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*.
- 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-Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801.
- Boehm, J. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1). doi:10.1029/2003gl018984
- Chen, B., & Liu, Z. (2016). A Comprehensive Evaluation and Analysis of the Performance of Multiple Tropospheric Models in China Region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 663-678. doi:10.1109/Tgrs.2015.2456099
- Denghui Wang, C. G. P. Y. W. (2014). Extraction and Application of Un-differenced Atmospheric Delays with Un-combined Precise Point Positioning Technique. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014*, 2, 399-413.
- Haan, S. d. (2006). NATIONAL/REGIONAL OPERATIONAL PROCEDURES OF GPS WATER VAPOUR NETWORKS AND AGREED INTERNATIONAL PROCEDURES Retrieved from
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Austria: Springer-Verlag Wien.
- J. Boehm, A. N., P. Tregoning, H. Schuh. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function
3 based on numerical weather model data. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 33. doi:10.1029/2005GL025546
- J. Boehm, R. H., H. Schuh. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *J Geod.* doi:10.1007/s00190-007-0135-3

- Jongrukchob, T. (2016). *Determination of precipitable water vapor from GNSS signal using local mean temperature*. (Master), Chulalongkorn University, Chulalongkorn University.
- K. Lagler, M. S., J. Böhm, H. Krásná, T. Nilsson. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 40, 1069-1073. doi:10.1002/grl.50288
- Kitpracha, C. (2015a). Estimation of Precise Tropospheric Delay using GNSS Precise Point Positioning Technique: First Tropospheric Delay Map of Thailand. *Geo-informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA) 6*.
- Kitpracha, C. (2015b). Estimation of Precise Tropospheric Delay using GNSS Precise Point Positioning Technique: First Tropospheric Delay Map of Thailand. *Geo-informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA)*.
- 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
- Louis H. Estey, C. M. M. (July 1999). TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3(1), 42-49. doi:10.1007/PL00012778
- 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
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3227-3246. doi:10.1029/95JB03048
- Niell, A. E. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 699-702. doi:10.1186/bf03352267
- P., K. J. H. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 12-28.

- Shi, J., Xu, C., Li, Y., & Gao, Y. (2015). Impacts of real-time satellite clock errors on GPS precise point positioning-based troposphere zenith delay estimation. *Journal of Geodesy*, 89(8), 747-756. doi:10.1007/s00190-015-0811-7
- WU. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 91-98.
- Younes, S. A., & Elmezayen, A. G. (2012). A comprehensive comparison of atmospheric mapping functions for GPS measurements in Egypt. *Journal of Geodetic Science*, 2(3). doi:10.2478/v10156-011-0042-7
- Yubin Yuan, K. Z., Witold Rohm, Suelynn Choy, Robert Norman, Chuan-Sheng Wang. (2014). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. *Geophysical Research: Atmospheres*, 119(16). doi:10.1002/2014JD021486
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2559). สรุปสภาวะอากาศของประเทศไทย พ.ศ.2559.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: นางสาวปารมี หมื่นราม

วันเกิดปีเกิด: 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2535

ภูมิลำเนา: สุพรรณบุรี

คุณวุฒิทางการศึกษา: พ.ศ. 2556 ศิลปศาสตรบัณฑิต (ศศ.บ.)

สาขาภูมิศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ: ปารมี หมื่นราม, สรวีศ สุขเวชัย, และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2561) "การวิเคราะห์ค่าปริมาณไอน้ำจากเทคนิคการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GNSS จากสถานีฐานแบบทำงานต่อเนื่องในประเทศไทย" การประชุมวิชาการ เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ Geoinfotech 2018, 1-2 กุมภาพันธ์ 2561



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY