



การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัดความดัน
บรรยากาศ และอุณหภูมิกับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสากล

A COMPARISON OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM THE GNSS CORS
BETWEEN METEOROLOGICAL SENSOR AND GPT MODEL

รวีรัช กองเมือง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัด
ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิกับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ
สากล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A COMPARISON OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM THE GNSS CORS
BETWEEN METEOROLOGICAL SENSOR AND GPT MODEL



RAWITHAT KONGMUANG

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Geoinformatics)
Faculty of Social Sciences Srinakharinwirot University

2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัดความดัน
บรรยากาศ และอุณหภูมิกับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสากล

ของ

วีรวิรัช กองเมือง

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย พันธะนันทิ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดิบุญ เมธากุลชาติ)

ที่ปรึกษาร่วม

กรรมการ

(พันตรี ดร.ธาวีสิทธิ์ เสวกคุณธร)

(อาจารย์ ดร.สถาพร มนต์ประภัสสร)

ชื่อเรื่อง	การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัดความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิกับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสากล
ผู้วิจัย	รวิรัช กองเมือง
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิชัย พันธนะหิรัญ

จุดประสงค์การวิจัย เพื่อเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัดความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ (วิธีที่ 1) กับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสากล (วิธีที่ 2) การศึกษาใช้ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากสถานีรังวัดดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations: CORS) ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 10 สถานี คือ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ อุดรดิตถ์ นครสวรรค์ นครราชสีมา อุตรธานี ศรีสะเกษ จันทบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี โดยนำข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 วิธี ของสถานีนครราชสีมา และข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องมือวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ที่สถานีพิมาย จังหวัดนครราชสีมา มาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ การศึกษาพบว่า ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากวิธีที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และการเรียงตัวของข้อมูลคล้ายคลึงกับข้อมูลจากเครื่องมือวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มากกว่าข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากวิธีที่ 1 ซึ่งมีการกระจายตัวของข้อมูลที่ผิดปกติ อาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จำนวน 9 สถานี พบว่าข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากทั้ง 2 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ระหว่าง 0.84 - 0.99 และมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ที่ 0.95 ซึ่งให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความสัมพันธ์กันสูงมากทำให้ในอนาคตการติดตั้งเครื่องมือวัดทางอุตุนิยมวิทยาเพิ่มเติมในสถานีรังวัดดาวเทียม ของแต่ละหน่วยงาน อาจจะไม่มีความจำเป็น ก็สามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้

คำสำคัญ : ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ, เครื่องตรวจวัดความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ



Title	A COMPARISON OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FROM THE GNSS CORS BETWEEN METEOROLOGICAL SENSOR AND GPT MODEL
Author	RAWITHAT KONGMUANG
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Associate Professor Wichai Pantanahiran , Ph.D.

The objective was to compare the precipitable water vapor (PWV) calculated from the zenith total delay (ZTD) from GNSS (Global Navigation Satellite System) with the meteorological sensors (Method I) and the zenith total delay (ZTD) with the Global Pressure and Temperature model or GPT model (Method II). The GNSS of Continuously Operating Reference Stations (CORS) of the Department of Public Works and Town & Country Planning were used. Ten GNSS-CORS in the different provinces were selected including Bangkok, Chiang Mai, Chanthaburi, Nakhon Sawan, Nakhon Ratchasima, Prachuabkirikhan, Sisaket, Surat Thani, Uttaradit, and Udon Thani. In addition, the direct measurement of PWV in Pimai station, Nakhon Ratchasima Province was measured by a microwave radiometer. Then, only PWV from two methods from Nakhon Ratchasima station were compared with the direct measurement of PWV from Pimai station to calculate the relationship of PWV. In Pimai station, it was found that the PWV from the Method II and microwave radiometer method showed higher correlation than the PWV from Method I and microwave radiometer method. The data from Method I presented the abnormal distribution of data which probably caused by the instrumental error. The correlation of PWV between method I and II of ten stations were studied. It was found that the correlation PWV from both methods were similar. The correlation coefficients were between 0.84-0.99 and the average of the correlation coefficient was 0.95. It showed that the relationship between the both methods was highly significant. It should be concluded that the additional meteorological instruments to the GNSS-CORS in the future might not be necessary because the PWV could be

calculated from the GNSS-CORS.

Keyword : Precipitable water vapor, Meteorological sensor



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากผู้มีอุปการคุณที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย พันธนะหิรัญ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ปริญญานิพนธ์ และ พันตรี ดร.ธาวีสิทธิ์ เสวกตรุทร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวคิด ความรู้ รวมถึงคำปรึกษาต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ ในการทำวิจัย จนสามารถทำงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ดิบุญ เมธากุลชาติ และอาจารย์ ดร.สถาพร มนต์ประภัสสร ที่สละเวลาอันมีค่าให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่มีค่าสำหรับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาคภูมิศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้อบรมสั่งสอนให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง ที่เป็นประโยชน์ในการทำปริญญานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ สำนักวิศวกรรมผังเมือง กรมโยธาธิการและผังเมือง และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้อิทธิพล อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์ อีกทั้งขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ สนับสนุนและช่วยเหลือ ด้วยดีเสมอมา

รวีรัช กองเมือง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฒ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	5
บทที่ 2.....	6
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System).....	6
1.2.1 สถานีควบคุมหลัก (Master control station).....	8
1.2.2 สถานีติดตามระยะไกล (AFSCN Remote Tracking Stations).....	8
1.2.3 สถานีตรวจสอบ (Monitor Station).....	8
2. ชั้นบรรยากาศของโลก (Layers of Atmosphere).....	10

3. การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA และการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP)	13
4. ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ	15
5. แบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (Global Pressure and Temperature model: GPT)	21
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3.....	30
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	30
1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	30
2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล	36
4. การประมวลผลข้อมูล.....	36
5. การวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
บทที่ 4.....	42
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	42
4.1 การวิเคราะห์การหาปริมาณไอน้ำ และความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จาก จากทั้ง 2 วิธีกับเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์	42
4.2 การวิเคราะห์การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และโดยวิธีที่ 2 รายสถานี	50
4.3 การหาความสัมพันธ์ ของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด) และโดยวิธีที่ 2 (GPT) รายสถานี	80
บทที่ 5.....	86
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	86
1. สรุปผลการศึกษา.....	86

2. อภิปรายผลการศึกษา	86
3. ข้อเสนอแนะ.....	87
บรรณานุกรม.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	92



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนหนึ่งของ Niell Mapping Function.....	19
ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนเป็ยกของ Niell Mapping Function	20
ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เมื่อเปรียบเทียบกับ Radiosonde (มม.).....	25
ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU (มม.)	27
ตาราง 5 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก เครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ ปี 2014 (มม.).....	29
ตาราง 6 ค่าพิกัดของสถานีต่างๆ	32
ตาราง 7 ขั้นตอนการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วย(วิธีที่ 1) และ (วิธีที่ 2)	37
ตาราง 8 ระดับของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	41
ตาราง 9 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกประมวลผลโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 (มม.).....	46
ตาราง 10 ค่าต่างของค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 (มม.).....	47
ตาราง 11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2	49

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี จันทบุรี (มม.)	53
ตาราง 13 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีเชียงใหม่ (มม.)	56
ตาราง 14 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี กรมโยธาธิการฯ พระราม9 (มม.)	59
ตาราง 15 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี นครราชสีมา (มม.).....	62
ตาราง 16 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี นครสวรรค์ (มม.)	65
ตาราง 17 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี ประจวบคีรีขันธ์ (มม.)	68
ตาราง 18 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ (มม.)	71
ตาราง 19 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ ธานี (มม.).....	74
ตาราง 20 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี (มม.).....	77

ตาราง 21 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรดิตถ์ (มม.).....	80
ตาราง 23 แสดงสมการถดถอย ค่าความสอดคล้องกับข้อมูล(R^2) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน และระดับของความสัมพันธ์ ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1	85



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แนวคิดการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในแนวดิ่ง	1
ภาพประกอบ 2 แนวคิดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวดิ่งจากความคลาดเคลื่อนทั้งหมด	4
ภาพประกอบ 3 ตำแหน่งและการโคจรของดาวเทียม GPS รอบโลก	7
ภาพประกอบ 4 สถานีควบคุมระบบดาวเทียม	9
ภาพประกอบ 5 การแบ่งชั้นบรรยากาศ ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	11
ภาพประกอบ 6 กราฟค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS, WVR, NHM, และ Radiosonde	23
ภาพประกอบ 7 กราฟ Cross Correlation ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS และ WVR	24
ภาพประกอบ 8 กราฟค่าความแตกต่างของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เปรียบเทียบกับ Radiosonde ในเวลา 6 เดือน ตั้งแต่ กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2013...	25
ภาพประกอบ 9 กราฟค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS ในการอ้างอิง	26
ภาพประกอบ 10 กราฟค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าจาก AIRS และ AMSU	28
ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ ปี 2014.....	29
ภาพประกอบ 12 แผนที่สถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกแบบต่อเนื่อง CORS ของกรมโยธาธิการและผังเมือง 11 สถานี.....	31
ภาพประกอบ 13 MET3A ที่ติดตั้งตามสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS)	33
ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัดรุ่น MET3A โดยถูกจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบของ Mfile	34

ภาพประกอบ 15 ข้อมูลแบบจำลองความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิสากลที่ทำการดาวนโหลด	34
ภาพประกอบ 16 กราฟปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์	43
ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีนครราชสีมา	44
ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีนครราชสีมา	44
ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (MWR) จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2	45
ภาพประกอบ 20 กราฟการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1	48
ภาพประกอบ 21 กราฟการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2	48
ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีจันทบุรี	51
ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีจันทบุรี	51
ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีจันทบุรี	52
ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีเชียงใหม่	54
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีเชียงใหม่	54

ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีศรีสะเกษ.....	69
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ.....	69
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัด ระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ.....	70
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีสุราษฎร์ธานี.....	72
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ธานี.....	72
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัด ระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ธานี.....	73
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีอุดรธานี.....	75
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี.....	75
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัด ระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี.....	76
ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีอุตรดิตถ์.....	78
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีอุตรดิตถ์.....	78
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัด ระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด) และวิธีที่ 2 (GPT) สถานีอุตรดิตถ์.....	79
ภาพประกอบ 52 กราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณ รังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1.....	81

ภาพประกอบ 53 แผนที่แสดงสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมฯ และกราฟการวิเคราะห์ถดถอย
ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1

..... 83



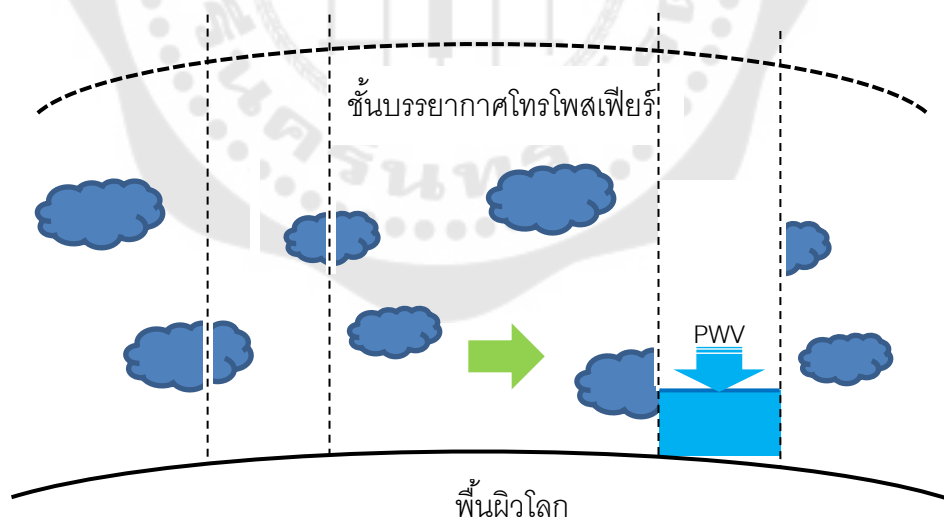
บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ หรือ ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากกระบวนการระเหยของน้ำจากแหล่งต่างๆ ทั้งจากแหล่งน้ำ คน พืชและสัตว์ ไอน้ำนี้จะอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) โดยมีความสูงจากพื้นผิวโลกอยู่ที่ 10-15 กิโลเมตร เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ด้านลม พายุ อากาศ ถูกใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการศึกษาภูมิอากาศในระดับท้องถิ่น ระดับภูมิภาค และระดับสากล (Lu et al., 2015) มีบทบาทสำคัญต่อการดัดแปรสภาพอากาศ การคาดการณ์สภาพอากาศ การเปลี่ยนแปลงของอากาศ และเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก ถือว่าเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่สุด ซึ่งมีคุณลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (NASA, 2017)

ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง (Precipitable Water Vapor: PWV) คือ ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวที่จะได้จากไอน้ำทั้งหมดในบรรยากาศภายในคอลัมน์แนวตั้งที่ถูกบีบอัดจนถึงจุดควบแน่น (Dupont, Haeffelin, Drobinski, & Besnard, 2008)



ภาพประกอบ 1 แนวคิดการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง

(Precipitable Water Vapor: PWV)

ปัจจุบันนอกจากการใช้เครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยาในการวัด เช่น เครื่องมือวัดที่ให้ค่าความถูกต้องสูงในการวัดค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ คือ เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave Radiometer: MWR) แต่เครื่องมือวัดนี้มีราคาที่สูงมาก เช่น เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Radiometrics มีราคาอยู่ที่ 4.8 ถึง 8 ล้านบาทต่อเครื่อง ในประเทศไทยมีการติดตั้งเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์เพียงเครื่องเดียวโดยติดตั้งที่ สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย หมู่ 11 เขตนิคมสร้างตนเอง เทศบาลวังน้ำเขียว อ.พิมาย จ.นครราชสีมา (ละติจูด 15.184 องศาเหนือ ลองจิจูด 102.564 องศาตะวันออก) การใช้เครื่องส่งวิทยุหึ่งอากาศ (Radiosonde: RS) ให้ผลไม่ครอบคลุมพื้นที่ มีความละเอียดเพียงชั่วคราว หรือมีข้อมูลแค่ในขนาดที่ทำการวัด จึงไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่เกิดขึ้น และดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Satellite) แล้วยังสามารถใช้ข้อมูลจากการสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้

บวิสและคณะ (1992) ได้นำเสนอการตรวจหาไอน้ำจากระยะไกลโดยอาศัยระบบดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) (Bevis et al., 1992) โดยอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้ง (Zenith Total Delay: ZTD) ของสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ที่ส่งจากดาวเทียม กับเครื่องรับสัญญาณภาคพื้นดิน โดยเป็นความล่าช้าเนื่องจากไอน้ำในบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere delay) ถือเป็นค่าพารามิเตอร์ความคลาดเคลื่อนหนึ่งที่จะถูกกำจัดออกในกระบวนการประมาณค่าพิกัดของสถานีรังวัด การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก มีความใกล้เคียงกับเครื่องวัดรังสีช่วงคลื่นไมโครเวฟ (Lu et al., 2015) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการจัดสถานีสูงกว่า และให้ผลครอบคลุมกว่าเครื่องวิทยุหึ่งอากาศ ซึ่งการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศดังกล่าวนี้ ต้องอาศัยข้อมูลความกดอากาศ และอุณหภูมิมาใช้ในการประมวลผลร่วมด้วย

สำหรับการศึกษาการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ที่ผ่านมามีการใช้ข้อมูลความกดอากาศ และอุณหภูมิ ทั้งที่ได้จากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิสากล (Global Pressure and Temperature model: GPT) และการใช้ข้อมูลความกดอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องวัด ที่ติดตั้งเพิ่มเติมในสถานีรับสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยการศึกษาในประเทศไทย การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก มีการใช้ข้อมูลความกดอากาศ และอุณหภูมิ ทั้งที่ได้จากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิสากล (Global Pressure and Temperature model:

GPT) และการใช้ข้อมูลความกดอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องวัด ที่ติดตั้งเพิ่มเติมที่สถานี ซึ่งเป็นงบประมาณเพิ่มเติมในการติดตั้งอีกด้วย

ขณะเดียวกันประเทศไทย มีการจัดตั้งสถานีรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียมแบบต่อเนื่อง เพิ่มมากขึ้นจากหลายหน่วยงาน อาทิ กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดิน กรมโยธาธิการ และผังเมือง เป็นต้น แต่เป็นเพียงการมุ่งเน้นการนำข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก มาใช้ด้านงานสำรวจ และทำแผนที่จึงไม่ได้มีงบประมาณรองรับการติดตั้งเครื่องมือวัดดังกล่าวด้วย

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์การหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งที่สถานี และข้อมูลความดันอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศ และอุณหภูมิสากล เพื่อเปรียบเทียบ และดูความแตกต่างของค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการ โดยใช้ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations: CORS) ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ว่ามีความต่างหรือใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีรังวัดแบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัดทางอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศ และอุณหภูมิโลก
2. เปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีรังวัดแบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัดทางอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศ และอุณหภูมิสากล

ขอบเขตของการวิจัย

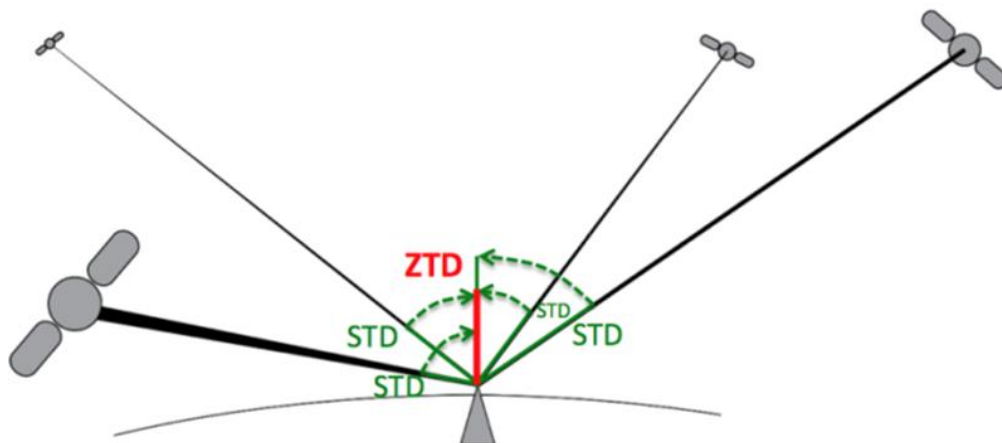
ศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้งของสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก แบบต่อเนื่องของ กรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 11 สถานี ทำการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP) โดยใช้ Mapping

Function เพื่อแปลงค่ารับสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกให้อยู่ในแนวตั้งด้วย Global Mapping Function (GMF) เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนในแนวตั้งทำการคำนวณประกอบกับ ข้อมูลความดันอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากเครื่องมือวัดตามตำแหน่งที่ตั้งสถานี และข้อมูล ความดันอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว ที่ได้จากแบบจำลองความดันอากาศ และอุณหภูมิโลกเพื่อ เปรียบเทียบความต่างของข้อมูล

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง คือ ปริมาณไอน้ำที่รวมในแนวตั้งและ สามารถแสดงเป็นความสูงของคอลัมน์ที่เทียบเท่าของน้ำเหลวเป็นเซนติเมตร หรือ เป็นกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร (g/cm^2) การกระจายตัวแบบ spatiotemporal เป็นสิ่งสำคัญในการทำ ความเข้าใจวงจรอุทกวิทยา (Lu et al., 2015)

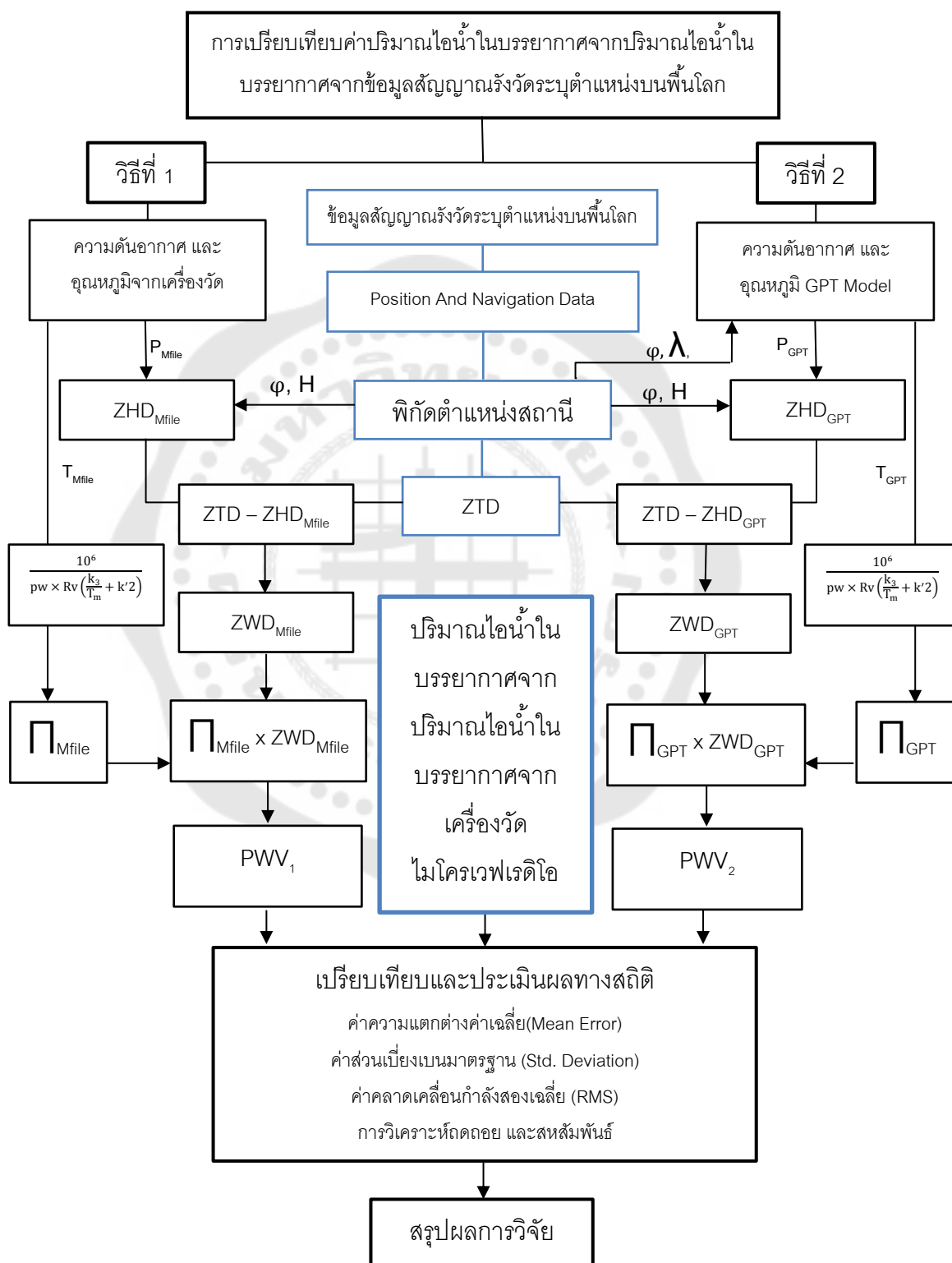
2. Zenith Total Delay (ZTD) ค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้งของสัญญาณรังวัด ระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียมที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยทำการ ประมวลผลจากสัญญาณดาวเทียมที่เครื่องรับ รับสัญญาณได้ให้อยู่ในแนวตั้งโดยใช้รูปแบบ สมการที่เรียกว่า Mapping Function



ภาพประกอบ 2 แนวคิดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้งจากความคลาดเคลื่อนทั้งหมด
เพื่อใช้ในการหาปริมาณไอน้ำที่รวมในแนวตั้ง

ที่มา: (Ivan Reguzzoni, 2015). GNSS meteorology.

กรอบแนวคิดในการวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

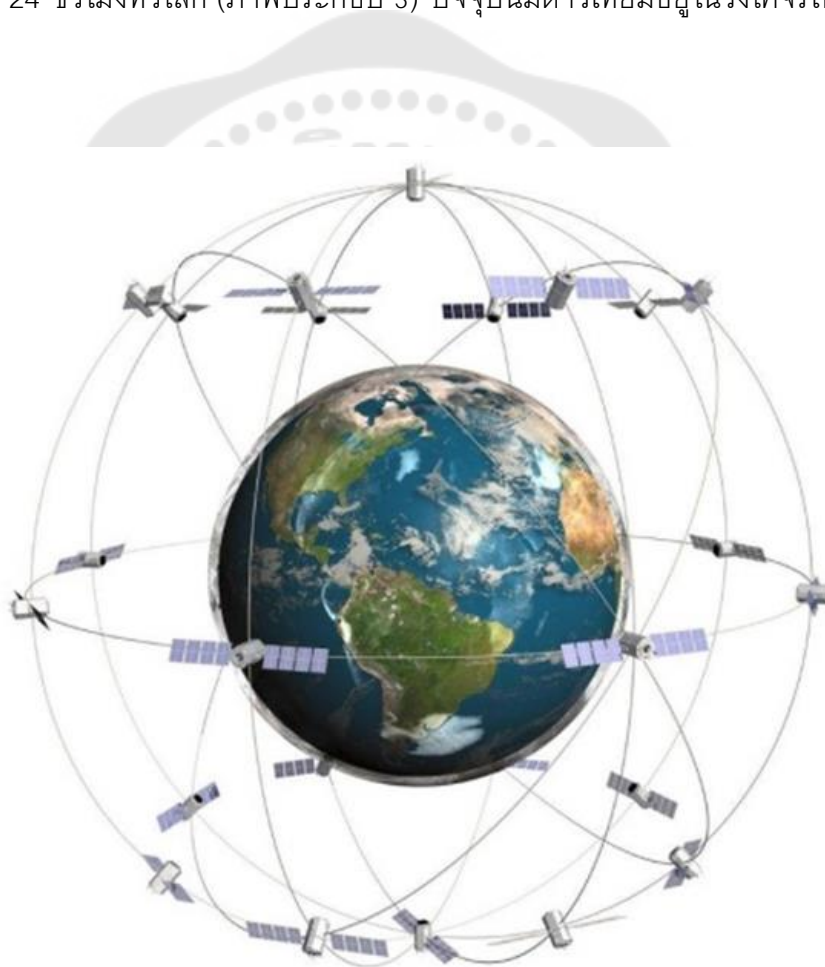
1. ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS)
2. ชั้นบรรยากาศของโลก (Layers of Atmosphere)
3. การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) และการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning: PPP)
4. ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay)
5. แบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (Global Pressure and Temperature model: GPT)
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System)

ระบบดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลกเป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลก ถูกพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหมประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2516 โดยถูกออกแบบให้ใช้ประโยชน์ทางด้านการทหารเป็นหลัก แต่ก็ยอมให้พลเรือนใช้ได้บางส่วน ระบบดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลกนั้นถูกพัฒนามาจากระบบทรานซิท (Transit) ซึ่งเป็นระบบเดิม ที่ช่วยในการเดินเรือโดยอาศัยดาวเทียม และเลิกใช้ไปเมื่อปีพ.ศ. 2538 โดยระบบดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจีพีเอสให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าระบบทรานซิท และยังสามารถใช้หาตำแหน่งได้ทั่วโลกในทุกสภาพอากาศ ตลอด 24 ชั่วโมง ทั้งยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งทางด้านเทคโนโลยี และวิธีการทำงานในสนาม ทำให้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านต่างๆ ของฝ่ายพลเรือนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านสำรวจจริงวัดและทำแผนที่ที่ต้องการค่าความถูกต้องสูง ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนอวกาศ (Space segment) ส่วนควบคุม (Control segment) และส่วนผู้ใช้ (User segment)

1.1 ส่วนอวกาศ (Space segment)

ส่วนอวกาศประกอบด้วยดาวเทียมที่ส่งสัญญาณออกมาจากดาวเทียม ในช่วงแรกมีดาวเทียมจำนวนทั้งหมด 24 ดวง (ดวงเทียมใช้งานจริง 21 ดวง และดาวเทียมสำรอง 3 ดวง) มีวงโคจรอยู่ใน 6 ระนาบวงโคจร ในแต่ละระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 55 องศาและมีมุมระหว่างกัน 60 องศา และใน 1 ระนาบจะประกอบด้วยดาวเทียม 4 ดวง มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 20,200 กิโลเมตร มีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาที (หรือประมาณครึ่งวันดาราคติ) ซึ่งการจัดลักษณะของวงโคจรที่กล่าวมาทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวง ตลอด 24 ชั่วโมงทั่วโลก (ภาพประกอบ 3) ปัจจุบันมีดาวเทียมอยู่ในวงโคจรเพิ่มขึ้นเป็น 32 ดวง



ภาพประกอบ 3 ตำแหน่งและการโคจรของดาวเทียม GPS รอบโลก

ที่มา: (WordlessTech, 2013). How GPS works.

1.2 ส่วนควบคุม (Control segment)

เป็นสถานีภาคพื้นดินเพื่อการติดตามดาวเทียม การคำนวณวงโคจรดาวเทียม การดูแลและควบคุมส่วนอวกาศ ถูกควบคุมและดูแลโดยกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วย

1.2.1 สถานีควบคุมหลัก (Master control station)

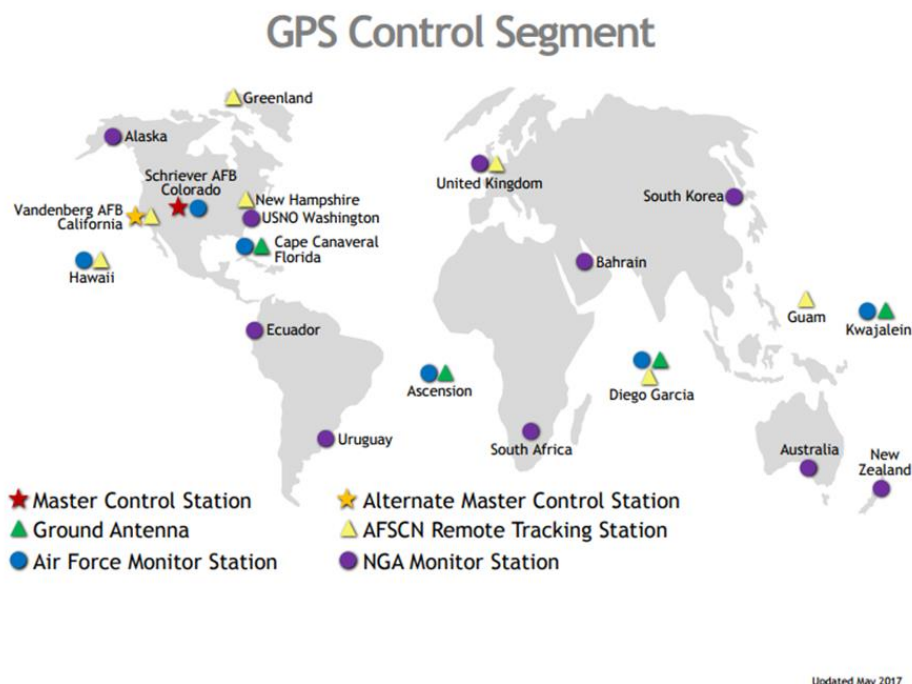
ประกอบด้วย 2 สถานี คือ สถานีควบคุมหลัก (Master control station) ตั้งอยู่ที่เมือง Colorado Springs ทำหน้าที่ประมวลผลการวัดที่ได้รับจากสถานีตรวจสอบ (MS) เพื่อประมาณวงโคจรดาวเทียม (ephemerides) และข้อผิดพลาดของนาฬิกา รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ และ สถานีควบคุมการรับส่งข้อมูลหลัก (Alternate Master control station) ทำหน้าที่ควบคุมการรับส่งข้อมูลโดยรวม ของสถานีรับส่งข้อมูล (Ground Antenna) ส่งข้อมูลที่คำนวณได้จากสถานีควบคุมหลักไปยังดาวเทียมหรือเรียกว่า สถานีอัปโหลด (Upload station)

1.2.2 สถานีติดตามระยะไกล (AFSCN Remote Tracking Stations)

เป็นสถานีที่อยู่ภายใต้การดูแลของกองทัพอากาศสหรัฐภายใต้ชื่อ Air Force Satellite Control Network มีหน้าที่คอยติดตามและคอยติดต่อสื่อสาร (Tracking) ทำการคำนวณผล (Computation) เพื่อบอกตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวงและส่งข้อมูลที่ได้ไปยังดาวเทียมอยู่ตลอดเวลา พร้อมทั้งออกแบบวิจัยพัฒนาระบบต่อไป อีกทั้งมีหน้าที่รับผิดชอบในการควบคุมและสั่งการระบบดาวเทียมที่ได้รับมอบหมาย จากศูนย์ปฏิบัติการทางอากาศ (Satellite Operations Centers: SOCS)

1.2.3 สถานีตรวจสอบ (Monitor Station)

จะตั้งกระจายอยู่ทั่วโลก มีการติดตั้งมาตรฐานนาฬิกาอะตอมและเครื่องรับ GPS เพื่อรวบรวมข้อมูล GPS เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล ส่งไปยังสถานีควบคุมหลักเพื่อประมวลผลประมาณวงโคจรของดาวเทียม (ephemerides) และข้อผิดพลาดของนาฬิกา รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ สถานีตรวจสอบของกองทัพอากาศ (Air Force Monitor Station) และสถานีตรวจสอบสากล (The National Geospatial-Intelligence Agency: NGA Monitor Station)



ภาพประกอบ 4 สถานีควบคุมระบบดาวเทียม

ที่มา: (GPS SPS Performance Standard, 2008). GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard.

1.3 ส่วนผู้ใช้ (User segment)

ประกอบด้วยตัวเครื่องรับสัญญาณ วิธีการประมวลผลที่อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ในด้านต่างๆ หรือการประยุกต์ใช้งาน โดยมีการพัฒนาในส่วนของเครื่องรับสัญญาณและวิธีการประมวลผลทั้งในส่วนของการทหารและพลเรือน โดยทางทหารมุ่งเน้นให้เครื่องรับสัญญาณและวิธีการประมวลผลมีความน่าเชื่อถือสูง ในขณะที่บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณได้พยายามที่จะทำให้ขนาดของเครื่องรับสัญญาณมีขนาดเล็กลง และมีราคาที่ถูกลง ทั้งยังมีคุณลักษณะที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ที่หลากหลาย การเลือกใช้เครื่องรับสัญญาณและวิธีการประมวลผลที่เหมาะสมจะทำให้เกิดความถูกต้องสูงโดยส่วนประกอบของเครื่องรับสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยทั่วไปเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1. ตัวเครื่อง (Body)
2. ส่วนให้พลังงาน (Power Supply)
3. ส่วนเสาอากาศ (Antenna)

2. ชั้นบรรยากาศของโลก (Layers of Atmosphere)

บรรยากาศของโลก หมายถึง บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกประกอบด้วย ไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% อาร์กอน 0.9% ที่เหลือเป็น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอื่นๆ นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งโครงสร้างแนวตั้งของบรรยากาศออกเป็นชั้นๆ เรียกว่า ชั้นบรรยากาศ (Layers of Atmosphere) สามารถแบ่งออกได้ 4 แบบ คือ

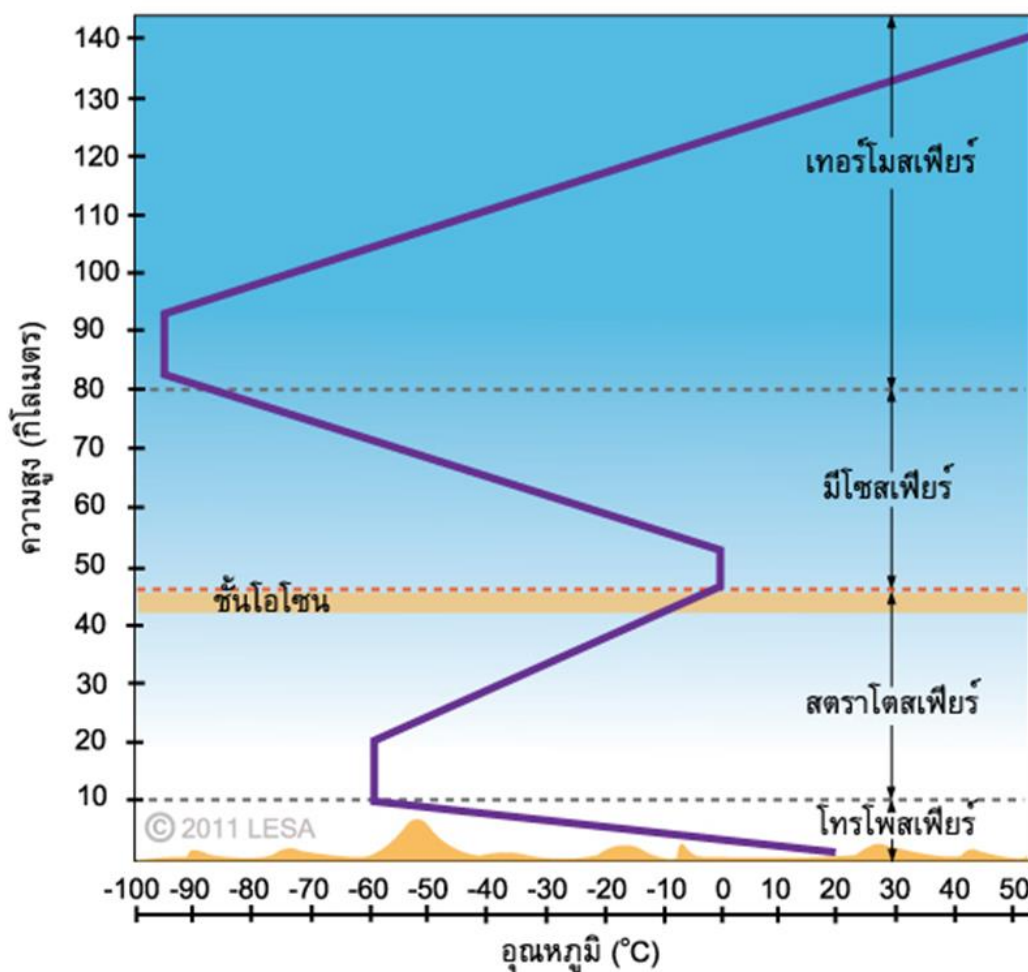
1. แบ่งชั้นบรรยากาศตามลักษณะและระดับความสูง
2. แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์
3. แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์
4. แบ่งชั้นบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยา

สำหรับในการศึกษาด้านอุตุนิยมวิทยานั้น จะใช้การแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1 โทรโพสเฟียร์ (Troposphere)

มีความหนาประมาณ 10 - 15 กิโลเมตร ถือเป็นบรรยากาศชั้นล่างสุดที่ติดกับพื้นผิวโลก ร้อยละ 80 ของมวลอากาศทั้งหมดอยู่ในบรรยากาศชั้นนี้ การดูดกลืนแสงแดดจากดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกแล้วแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา ถือเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของโทรโพสเฟียร์ ดังนั้นยิ่งสูงขึ้นไปอุณหภูมิจะยิ่งลดต่ำลงในอัตรา 6.5 องศาเซลเซียส ต่อ 1 กิโลเมตร จนกระทั่งถึงระยะสูงประมาณ 12 กิโลเมตร อุณหภูมิจะคงที่ประมาณ -60 องศาเซลเซียส ที่รอยต่อชั้นบนซึ่งเรียกว่า โทรโปพอส (Tropopause) เนื่องจากสภาพอากาศสงบนิ่ง และบรรยากาศมีความหนาแน่นมากพอสำหรับการสันดาปภายในเครื่องยนต์ เครื่องบินไอพ่นนิยมบินที่ระดับนี้

บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์มีไอน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำฟ้าต่างๆ เช่น เมฆ พายุ ฝน เป็นต้น บรรยากาศชั้นนี้มักปรากฏสภาพอากาศรุนแรง เนื่องจากมีมวลอากาศหนาแน่น การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ทำให้เกิดการดูดและคายความร้อนแฝง นอกจากนั้นอิทธิพลทางภูมิศาสตร์ของพื้นผิวโลก เช่น ภูเขา ทะเลทราย มหาสมุทร ยังส่งผลกระทบต่อตัวแปรต่างๆ ของอากาศด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น กระแสลม และความกดอากาศ เป็นต้น



ภาพประกอบ 5 การแบ่งชั้นบรรยากาศ ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่มา: (ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลก และดาราศาสตร์ LESA, 2016). ชั้นบรรยากาศ.

2.2 สตราโตสเฟียร์ (Stratosphere)

อยู่เหนือระดับโทรโพพอสขึ้นไป อุณหภูมิจะสูงขึ้นในอัตรา 2 องศาเซลเซียส ต่อ 1 กิโลเมตร เนื่องจากโอโซนที่ระยะสูง 48 กิโลเมตร ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ เอาไว้จึงทำให้มีอุณหภูมิสูง มวลอากาศในชั้นนี้มีร้อยละ 19.9 ของมวลอากาศทั้งหมด บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์มีความสงบมากกว่าชั้นโทรโพสเฟียร์ บอลลูนตรวจอากาศสามารถลอยสูงได้เพียงบรรยากาศชั้นนี้ เมื่อบอลลูนลอยสูงขึ้นไปอีกก็จะแตกเนื่องจากความดันอากาศภายในและภายนอกแตกต่างกันมากจนเกินไป

2.3 มีโซสเฟียร์ (Mesosphere)

อยู่เหนือบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ขึ้นไป อุณหภูมิต่ำลงอีกครั้ง จนถึง -90 องศาเซลเซียส ที่ระยะสูง 80 กิโลเมตร เนื่องจากห่างจากแหล่งความร้อนในชั้นโอโซนออกไป มวลอากาศในชั้นมีโซสเฟียร์นี้มีไม่ถึงร้อยละ 0.1 ของมวลอากาศทั้งหมด แต่ก็มีความหนาแน่นมากพอที่จะสร้างความเสียดทานทำให้อุกกาบาตที่ตกลงมาจากอวกาศ เกิดการลุกไหม้

2.4 เทอร์โมสเฟียร์ (Themosphere)

อยู่เหนือระดับ 80 กิโลเมตรขึ้นไป อุณหภูมิกลับสูงขึ้นอีก มวลอากาศในชั้นเทอร์โมสเฟียร์จะอยู่ในสถานะพลาสมา (Plasma) จะไม่ได้อยู่ในสถานะแก๊ส เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจนในบรรยากาศชั้นบน ได้รับรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์จึงแตกตัวเป็นประจุ (Ion) บรรยากาศชั้นนี้มีอุณหภูมิสูงมาก อย่างไรก็ตามการที่มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นไม่ได้หมายความว่าต้องมีความร้อนมากขึ้นด้วย เนื่องจากโมเลกุลของอากาศในชั้นนี้อยู่ห่างกันมาก และมีอยู่เบาบางมาก อุณหภูมิคือระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัว แต่ปริมาณความร้อนขึ้นอยู่กับมวลทั้งหมดของสสาร ที่ระดับความสูงประมาณ 80 - 400 กิโลเมตร โมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนในบรรยากาศชั้นบนสุด ดูดกลืนรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ จนทำให้อะตอมของแก๊สมีอุณหภูมิสูงมากจนแตกตัวและสูญเสียอิเล็กตรอน กลายเป็นประจุ (Ion) ทำให้มีสมบัติในการสะท้อนคลื่นวิทยุ ทำให้เกิดประโยชน์ในการสื่อสารโทรคมนาคมระยะไกล หรือเรียกบรรยากาศชั้นนี้ว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เหนือชั้นไอโอโนสเฟียร์ขึ้นไป ไม่มีขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างบรรยากาศและอวกาศ โดยเรียกเขตติดต่อยกหว่างบรรยากาศและอวกาศ ที่ระดับความสูง 400 - 1000 กิโลเมตร ว่า เอ็กโซสเฟียร์ (Exosphere) ซึ่งโมเลกุลของอากาศจะมีอยู่เบาบางและอยู่ห่างกันมาก แต่ก็มีความหนาแน่นมากพอที่จะสร้างแรงเสียดทานให้กับดาวเทียมและยานอวกาศซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

การศึกษางานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับชั้นบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ เนื่องจากเป็น การศึกษาหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ซึ่งในชั้นบรรยากาศนี้มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีอยู่เป็นจำนวนมาก มีความสำคัญอย่างมากในด้านอุทกวิทยา เป็นตัวแปรหนึ่งในการศึกษาสภาพภูมิอากาศโลก

3. การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA และการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP)

3.1 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ PANDA

ซอฟต์แวร์ Position And Navigation Data Analyst (PANDA) ถูกออกแบบมาสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งดาวเทียมและระบบนำทางต่างๆ โดยได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ที่ศูนย์วิจัย GPS ของมหาวิทยาลัยหยู๋นัน (Jing-nan & Mao-rong, 2003) เป็นเครื่องมืออเนกประสงค์สำหรับการวิเคราะห์ ข้อมูลตำแหน่งและการนำทาง ถือเป็นซอฟต์แวร์หลักสำหรับการศึกษาในประเทศจีน ถูกใช้ในงานวิจัยของสถาบันวิจัยที่มีชื่อเสียงระดับนานาชาติหลายแห่ง เช่น สถาบันวิจัยอวกาศโลกเดลท์ (Delft-Institute of Earth-Oriented Space Research: DEOS) มหาวิทยาลัยแห่งชาติเจียวตง (National Chiao Tung University: NCTU) ของไต้หวัน และ สถาบันวิจัยวิศวกรรมสำรวจ และยี่ห้ออวกาศ (Insitute of Engineering Surveying and Space Geodesy: IESSG). เป็นต้น (Geng, 2011) เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่ทันสมัยที่สุดในการประมวลผลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก สามารถประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อย ทำการประมวลผลบนระบบปฏิบัติการ LINUX โดยทำการจัดเก็บข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียมให้อยู่ในรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลที่เรียกว่า Receiver-Independent Exchange Format (RINEX) คือ ข้อมูลรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ที่อยู่ในรูป Text File ที่เป็นมาตรฐานของข้อมูลรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก

3.2 การกำหนดตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP)

การกำหนดตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง เป็นวิธีการประมวลผลข้อมูลจากการรังวัดดาวเทียมวิธีหนึ่ง หลักการประมวลผลข้อมูลนั้น จะเกี่ยวข้องกับการลดความคลาดเคลื่อนต่างๆ ได้แก่

3.2.1 ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนของวงโคจรดาวเทียม ใช้ค่าแก้จากนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงและวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง ซึ่งมีความถูกต้องของวงโคจรดาวเทียม ระดับต่ำกว่า 5 เซนติเมตร และมีความถูกต้องของค่าแก้ นาฬิกาดาวเทียมต่ำกว่า 0.1 นาโนวินาที

3.2.2 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric delay) จะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (Hernandez-Pajares, Zomoza, Subirana, & Colombo,

2003) โดยใช้ Mapping function เป็น Global mapping function (GMF) เพื่อทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแต่ละมุมสูงของดาวเทียมให้อยู่ในแนวตั้ง แล้วนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านั้น มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

3.2.3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง จะใช้แบบจำลองของ Ionosphere-Free Combination (L3) จากการผสมกันระหว่างข้อมูล L1 และ L2 การกำหนดตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง จะอาศัยข้อมูลพิวโดเรนจ์ (Pseudo Range) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) และเมื่อทำการจัดค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแบบจำลอง Ionosphere-Free Combination (L3) จากการผสมกันระหว่างข้อมูล L1 และ L2 ลดค่าความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมด้วยข้อมูลวงโคจรความละเอียดสูง (Final Orbit) และลดค่าคลาดเคลื่อนหลายวิถี (Multipath) จากการใช้เสาอากาศที่ป้องกันคลื่นหลายวิถี จากกระบวนการดังกล่าวนี้ จะได้ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีความถูกต้องสูงสามารถนำไปใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไปซึ่งการกำหนดตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูงจะประกอบด้วยสมการพิวโดเรนจ์ (2.1) และสมการเฟสของคลื่นส่ง (2.2) ดังนี้ (Kouba & Héroux, 2001)

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + \epsilon\rho)_{L3} \quad (2.1)$$

$$\phi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M \times ZTD) + N\lambda + \epsilon\phi)_{L3} \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- P = สมการค่ารังวัดพิวโดเรนจ์ (Pseudo rang) (เมตร)
 - ϕ = สมการค่ารังวัดเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) (เมตร)
 - P = ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (เมตร)
 - Dt = ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
 - dT = ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
 - c = ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)
 - M = Mapping ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม (องศา)

ZTD = ค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Zenith Total Delay (มิลลิเมตร)

N = เลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

λ = ความยาวคลื่นของข้อมูลแบบไอโอโนสเฟียร์ฟรี (เมตร)

ϵ_p และ ϵ_q คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก คลื่นหลายวิถี (Multipath) และ สัญญาณรบกวนของข้อมูล (Observation noise) (เมตร)

ซึ่งจากสมการข้างต้นทำให้เราทราบค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป

4. ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นบรรยากาศชั้นล่างสุด ที่อยู่สูงจากพื้นโลกขึ้นไป มีระยะความสูงประมาณ 10-12 กม. ประกอบด้วยส่วนผสมของก๊าซชนิดต่าง ๆ และไอน้ำ อุณหภูมิของอากาศจะลดลง ตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น จนถึงระดับที่เรียกว่า โทรโพพอส ซึ่งเป็นระดับสูงสุดของบรรยากาศชั้นนี้ บรรยากาศชั้นชั้นนี้จะมีไอน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำฟ้าต่างๆ เช่น เมฆ พายุ ฝน เป็นต้น บรรยากาศชั้นนี้มักปรากฏสภาพอากาศรุนแรง เนื่องจากมีมวลอากาศหนาแน่น การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ทำให้เกิดการดูดและคายความร้อนแฝง นอกจากนั้นอิทธิพลทางภูมิศาสตร์ของพื้นผิวโลก เช่น ภูเขา ทะเลทราย มหาสมุทร ยังส่งผลกระทบต่อตัวแปรต่างๆ ของอากาศด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น กระแสลม และความกดอากาศ เป็นต้น

องค์ประกอบเหล่านี้ มีผลต่อการเดินทางของคลื่นสัญญาณรังวัดดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ทำให้เกิดการหักเหของคลื่นสัญญาณ จากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสัญญาณรังวัดดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก มีระยะยาวเกินความเป็นจริง ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนนี้ จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดันอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยเราสามารถ หาความเกี่ยวข้องดังกล่าวได้เป็นสมการ 2.3

$$Tr = \int (n - 1) dl = 10^{-6} \int N dl \quad (2.3)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเหของอากาศ

N คือ $106(n-1)$ เรียกว่า Refractivity สามารถแบ่ง เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแห้ง (Dry part) และ ส่วนเปียก (Wet part) ($N = N_{dry} + N_{wet}$)

Tr คือ ระยะทางที่คลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้ง

ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (Subirana, Zornoza, & Hernández-Pajares, 2013)

โดยแบบจำลองที่สามารถใช้หาค่าความคลาดเคลื่อนนี้ได้แก่ แบบจำลองของ Hopfield (John Hopfield, 1969) แบบจำลองของ Saastamoinen (Saastamoinen, 1972) แบบจำลอง Modified Hopfield (Goad, 1974) แบบจำลอง Essen and Froome (Essen & Froome, 1951) สำหรับบริเวณประเทศไทยนั้นแบบจำลองของ Saastamoinen มีความเหมาะสมมากที่สุด (Satirapod, 2005) ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ซึ่งค่าที่มีผลกระทบกับสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หรือค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สามารถเขียนเป็นสมการ 2.4

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (2.4)$$

เมื่อ ZTD คือ ค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

ZHD คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่แห้ง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

ZWD คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่เปียก มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

และสามารถอธิบายองค์ประกอบของค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่แห้ง และค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่เปียกได้ดังนี้

4.1 ส่วนแห้งหรือฝุ่นละอองและก๊าซ (Dry part)

โดยส่วนนี้จะประกอบด้วยก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (ไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% อาร์กอน 0.9%) โดยจะแปรผันตามอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดย Dry part สามารถเขียนได้เป็นสมการ 2.5 (Bevis et al., 1992)

$$ZHD = \frac{2.2768 \times Ps}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00000028H} \quad (2.5)$$

เมื่อ Ps คือ ค่าความกดอากาศพื้นผิวในหน่วย มิลลิบาร์
 φ คือ ละติจูดสถานีรังวัดดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน
 H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง MSL ในหน่วย เมตร
 ZHD คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่แห้ง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

4.2 ส่วนเปียกหรือความชื้น (Wet part)

คือ ส่วนที่มีไอน้ำอยู่ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการรับสัญญาณ ค่าของความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ และสภาพอากาศ ขณะที่ทำการรับสัญญาณ แม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนอาจจะมีขนาดเล็ก แต่ถ้ามีความแปรปรวนสูงก็จะทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงนั้นจำเป็นต้องมีการประมาณค่าพร้อมกับการหาค่าพิกัด เรียกส่วนนี้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนที่เปียก Zenith Wet Delay (ZWD) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์กับงานอุตุนิยมวิทยา โดยทำการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนส่วนนี้ไปเป็นปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Bevis et al., 1992) จะได้ค่า Zenith Wet Delay, ZWD ในหน่วย มิลลิเมตร ดังสมการ 2.6

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2.6)$$

แบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้น เป็นการประมาณการค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้ง ซึ่งในความเป็นจริงการรับสัญญาณดาวเทียมจะไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง จึงต้องอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า Mapping Function เพื่อปรับสัญญาณดาวเทียมให้อยู่ในแนวตั้ง โดย Mapping Function ที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่ Global Mapping Function (J. Boehm, Niell, Tregoning, & Schuh, 2006) และ Niell Mapping Function (NMF) (Niell, 1996) เป็นต้น โดยสามารถเขียนในรูปแบบของสมการ เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ได้ดังสมการ (Johannes Boehm & Schuh, 2007) เมื่อ E คือ ค่ามุมสูงของดาวเทียม (Elevation angle) มีหน่วยเป็นองศา ดังสมการ 2.7

$$ZTD \times E = ZHD \times M_{dry}(E) + ZWD \times M_{wet}(E) \quad (2.7)$$

Niell Mapping Function มีองค์ประกอบด้วยกัน 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแห้ง และส่วนเปียก
ทำการประมวลผลโดยอาศัยตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเครื่องรับสัญญาณ และเวลาที่ทำการ
รังวัดสามารถเขียนแสดงในรูปสมการ Hydrostatic mapping function ในส่วนแห้งได้แก่สมการ
2.8 และ 2.9

$$M_{dry}(E, H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \Delta m(E, H) \quad (2.8)$$

$$\Delta m(E, H) = \left[\frac{1}{\sin E} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] H \quad (2.9)$$

เมื่อ E คือ มุมสูงของดาวเทียม

H คือ ความสูงเหนือระดับทะเลมีหน่วยเป็น กิโลเมตร

สมการ Wet Mapping Function ในส่วนเปียกดังสมการ 2.10

$$M_{wet}(E) = m(E, a_w, b_w, c_w) \quad (2.10)$$

เมื่อ $m(E, a, b, c)$ คือ การทำ mapping ของสัญญาณรังวัดดาวเทียมให้อยู่ในแนวตั้ง (W. Marini, 1972) สมการ 2.11

$$M_{wet}(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin E + \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} \quad (2.11)$$

a_d, b_d, c_d คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณประมาณค่าของส่วนแห้งประกอบด้วยเวลา
(t) และ ละติจูด (φ) โดยหาได้จาก สมการ 2.12

$$\xi(\varphi, t) = \xi_{avg}(\varphi) - \xi_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ t คือเวลานับจากเดือนมกราคมมีหน่วยเป็นวัน และกำหนดให้ T_0 เป็น Day of Year ที่ 28 และใช้การประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) เพื่อหา $\xi_{\text{avg}}(\varphi)$ และ $\xi_{\text{amp}}(\varphi)$ จากตาราง 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนหนึ่งของ Niell Mapping Function

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนหนึ่งของ Niell Mapping Function

Coefficient	Latitude (φ)				
ξ	15°	30°	45°	60°	75°
Average					
a	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-2	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
Amplitude					
a	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
Height Correction					
a_{ht}	2.53e-5				
b_{ht}	5.49e-5				
c_{ht}	1.14e-5				

ที่มา: (J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zomoza , & M. Hernández-Pajares, 2011)

สำหรับส่วนแยก พารามิเตอร์ a_w, b_w, c_w สามารถหาจากการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (linear interpolated) จากตาราง 2

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ในส่วนเปียกของ Niell Mapping Function

Coefficient ξ	Latitude (ϕ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
<i>a</i>	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
<i>b</i>	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
<i>c</i>	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

ที่มา: (J. Sanz Subirana et al., 2011)

Global Mapping Function ถือได้ว่าเป็น Mapping Function ที่พัฒนามาจาก Niell Mapping Function โดย ค่าพารามิเตอร์ *a*, *b* และ *c* ในส่วนแห้ง และส่วนเปียกนั้น ค่าพารามิเตอร์ *b* และ *c* ยังคงใช้ค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกับ Niell Mapping Function ตามตาราง แต่สำหรับพารามิเตอร์ *a* เพื่อที่จะให้เกิดความแม่นยำตามตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ที่ประมวลผลจะใช้การคำนวณจากอนุกรมฮาร์โมนิกเชิงพื้นผิว (Spherical Harmonic) ดังสมการ 2.13

$$a = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \phi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] + A \cos\left(\frac{day-28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (2.13)$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ *a* จากการคำนวณจากสมการข้างต้น แล้วจึงนำค่านี้ไปคำนวณในสมการของ Niell Mapping Function เพื่อประมวลผลต่อไป

ซึ่งการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในหน่วย มิลลิเมตร (Bevis et al., 1992) โดยจะทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการประมาณค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ สามารถหาได้โดยใช้สมการ 2.14

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (2.14)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ Π คำนวณจากฟังก์ชันของอุณหภูมิพื้นผิว โดยใช้แบบจำลองสภาพอากาศเชิงตัวเลข (Bevis et al., 1994) โดยใช้สมการ 2.15

$$\Pi = \frac{10^6}{pw \times Rv \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (2.15)$$

เมื่อ pw คือ ความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว (999.97 กก/ลบ.ม.)
 Rv คือ ค่าคงที่ของไอน้ำ (461.525 จูล/กก.เคลวิน)
 k'_2 คือ ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (22.1 เคลวิน/มิลลิบาร์)
 k_3 คือ ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (3,739 เคลวิน²/มิลลิบาร์)
 T_m คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น มีหน่วยเป็น เคลวิน

โดยการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับประเทศไทย โดยสมการ 2.16 (Rata, Chalermchon, Panu, & Chaiyaporn, 2016)

$$T_m = 0.6066 \times T_s + 113.2914 \quad (2.16)$$

5. แบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (Global Pressure and Temperature model: GPT)

แบบจำลองความดันและอุณหภูมิของโลก (GPT) เป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ (The empirical model) โดยการกำหนด GPT คล้ายคลึงกับการพัฒนา Global Mapping Function ข้อมูลจะอยู่บนพื้นฐานของทรงกลมแบ่งเป็นตารางกริดขนาด 15 x 15 องศา โดยอิงจาก 3 ปี (กันยายน 2542 ถึงสิงหาคม 2545) ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนสำหรับความดันและอุณหภูมิจาก ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts : ศูนย์พยากรณ์อากาศในช่วงกลางของยุโรป) 40 ปีข้อมูล ให้ความดันและอุณหภูมิที่บริเวณใดๆ ในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้งานทางภูมิศาสตร์ ช่วยลดปัญหาการขาดแคลนข้อมูลความดันและอุณหภูมิของโลก (SHI Hongkai, HE Xiufeng, & Junjie, 2017) ในแนวตั้งค่าความดันและอุณหภูมิจะถูกกำหนดลงบนพื้นผิวที่ความสูงระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยค่าความดันจะอยู่ในรูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียลสามารถเขียนเป็นสมการ 2.17 ดังนี้

$$p = p_r (1 - 0.0000226(h - h_r))^{5.225} \quad (2.17)$$

เมื่อ p คือ ค่าความดันที่ความสูง h

p_r คือ ค่าความดันที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง h_r

ในขณะที่อุณหภูมินั้นจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการ 2.18

$$dT/dh = -0.0065 \text{ }^{\circ}\text{C/m} \quad (2.18)$$

กล่าวคือเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เมตร อุณหภูมิจะลดลง $0.0065 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับในแต่ละจุดกริดจึงมีค่าความดันและอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง 36 ค่าใน 1 เดือนโดยประมาณด้วยเฟสซัดเซยระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 28 มกราคม (Niell, 1996) สามารถเขียนเป็นสมการ 2.19

$$a = a_0 + A \cos\left(\frac{day-28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (2.19)$$

และค่าเฉลี่ยของความดันและอุณหภูมิในทุกๆ 4 ช่องกริด จะขยายเป็นอนุกรมฮาร์โมนิกเชิงพื้นผิว (Spherical Harmonic) เพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำทางภูมิศาสตร์ สามารถเขียนเป็นสมการ 2.20

$$a_0 = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \varphi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] \quad (2.20)$$

โดยที่ φ และ λ คือละติจูด และลองจิจูด A_{nm} และ B_{nm} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในการศึกษาอันดับ n และ m ซึ่งกำหนดไว้ในการปรับค่าอย่างน้อยที่สุดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ P_{nm} เป็นชื่อย่อของ Legendre polynomials (Heiskanen WA, 1967) สามารถรวมสมการได้ตาม สมการที่ 2.13 ซึ่งเป็นสมการเช่นเดียวกับสมการที่ใช้ใน Global Mapping Function

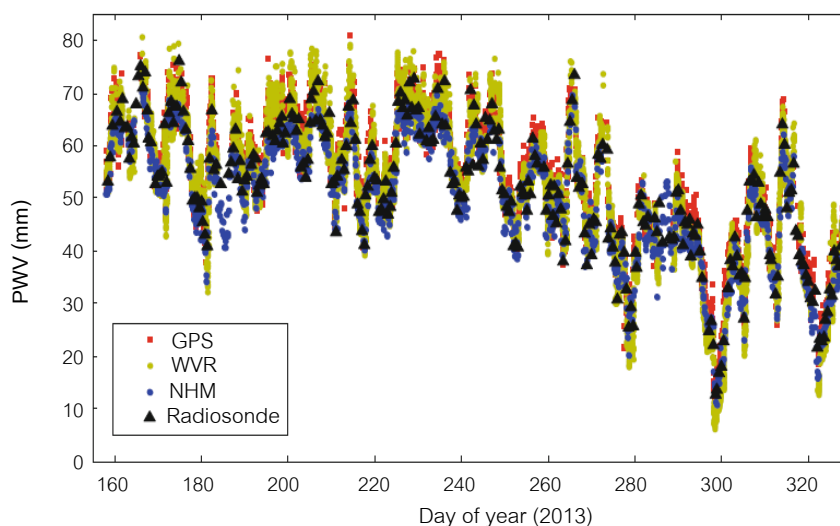
แบบจำลองความดันและอุณหภูมิของโลกที่นำมาใช้นี้จะอยู่ในรูปแบบของชุดคำสั่งที่สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE> และนำมาติดตั้งเพิ่มเติมลงบนซอฟต์แวร์ PANDA เพื่อใช้ในการประมวลต่อไป

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากเทคนิคหลายวิธี: GPS, WVR, Radiosonde และ NHM ในฮ่องกง

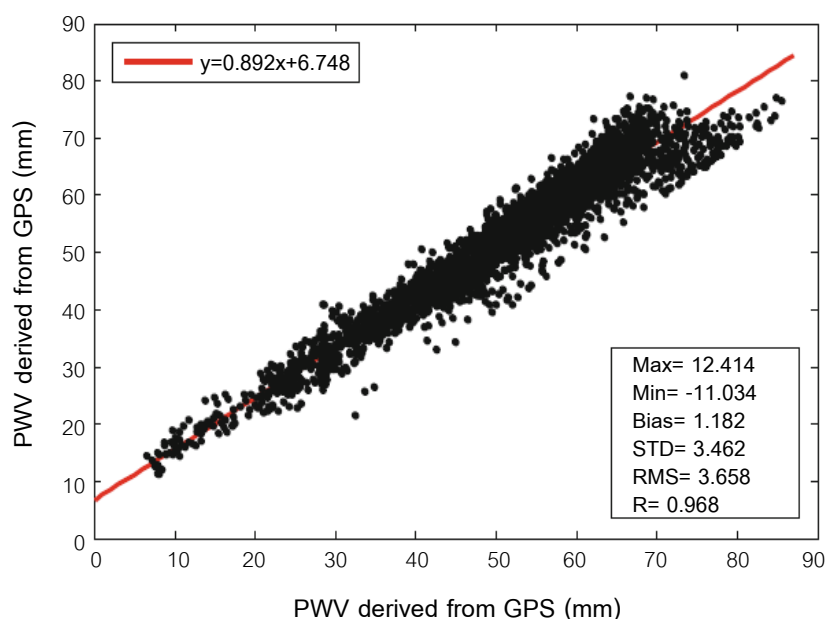
งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศบริเวณฮ่องกง (Chen & Liu, 2014) โดยใช้เทคนิค ได้แก่ การใช้แบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงเลข (NHM), (Water Vapor Radiometer: WVR), Radiosonde และ GPS ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ BERNES 5.0 โดยใช้ข้อมูล ตั้งแต่เดือนมิถุนายน ถึงพฤศจิกายน 2013 หรือ 6 เดือน และใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลจาก Bevis Equation ช่วยในการประมวลผล และทำการประเมินคุณภาพของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลของเทคนิคต่างๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์และหาวิธีการที่เหมาะสมกับการพยากรณ์อากาศระยะสั้นในฮ่องกง

การศึกษการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศบริเวณฮ่องกง โดยวิธีการนี้แสดงให้เห็นว่าในการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศการใช้ GPS มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ การใช้ Water Vapor Radiometer อีกทั้ง GPS สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ดี และยังมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า เห็นได้ว่า การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศการใช้ GPS จึงเป็นอีกเทคนิคที่มีบทบาทสำคัญในการพยากรณ์อากาศในระยะสั้น และการวิจัยการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศระยะยาวในฮ่องกง (ภาพประกอบ 6 และภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 6 กราฟค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS, WVR, NHM, และ Radiosonde

ที่มา: (Chen & Liu, 2014)



ภาพประกอบ 7 กราฟ Cross Correlation ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GPS และ WVR

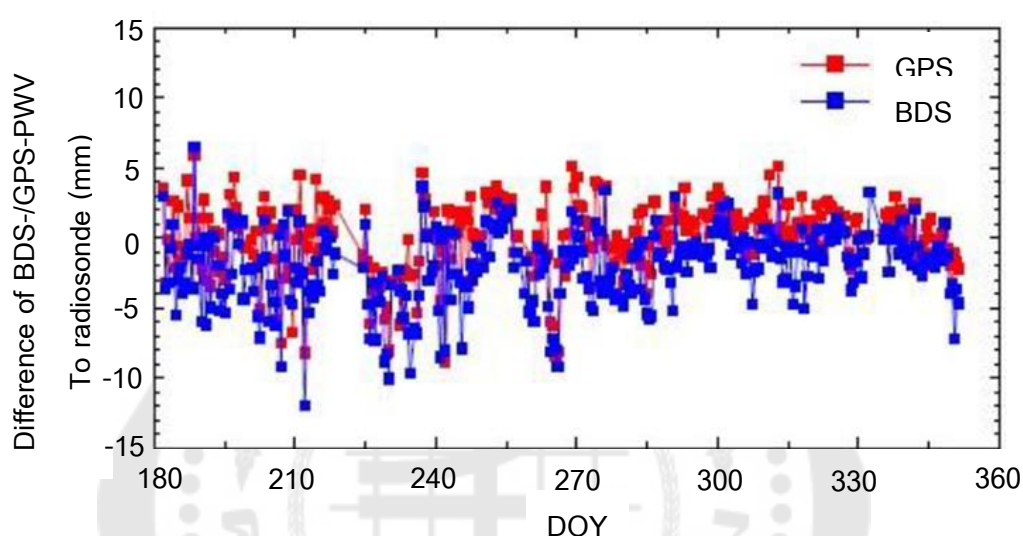
ที่มา: (Chen & Liu, 2014)

6.2 การประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใน ซอฟต์แวร์

PANDA (Position And Navigation Data Analyst)

การหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากการรังวัดดาวเทียม GPS ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ในงานอุตุนิยมวิทยา สำหรับงานวิจัยที่ใช้ซอฟต์แวร์ PANDA ในการศึกษาประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศแบบเรียลไทม์ด้วยสัญญาณรังวัดระบบดาวเทียม GPS และระบบดาวเทียม BEIDOU (Li et al., 2015) ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลระบบดาวเทียม BEIDOU และ GPS จำนวน 10 สถานี ที่กระจายในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และทางด้านทิศตะวันตกของมหาสมุทร ช่วงปี 2013 แต่อย่างไรก็ตามระบบดาวเทียม BEIDOU ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของวงโคจรดาวเทียมที่ยังไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มระบบ โดยใช้ซอฟต์แวร์ PANDA ในการประมวลผลหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากระบบดาวเทียม BEIDOU และ GPS ที่สถานี HKTU (ฮ่องกง) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากสถานี

Radiosonde ช่วงเวลา 6 เดือน จากผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS และจาก Radiosonde นั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่าง 0.002 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.49 มิลลิเมตร และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากระบบดาวเทียม BEIDOU มีค่าเฉลี่ยความแตกต่าง -2.04 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.68 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 8 และตาราง 3)



ภาพประกอบ 8 กราฟค่าความแตกต่างของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เปรียบเทียบกับ Radiosonde ในเวลา 6 เดือน ตั้งแต่ กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2013

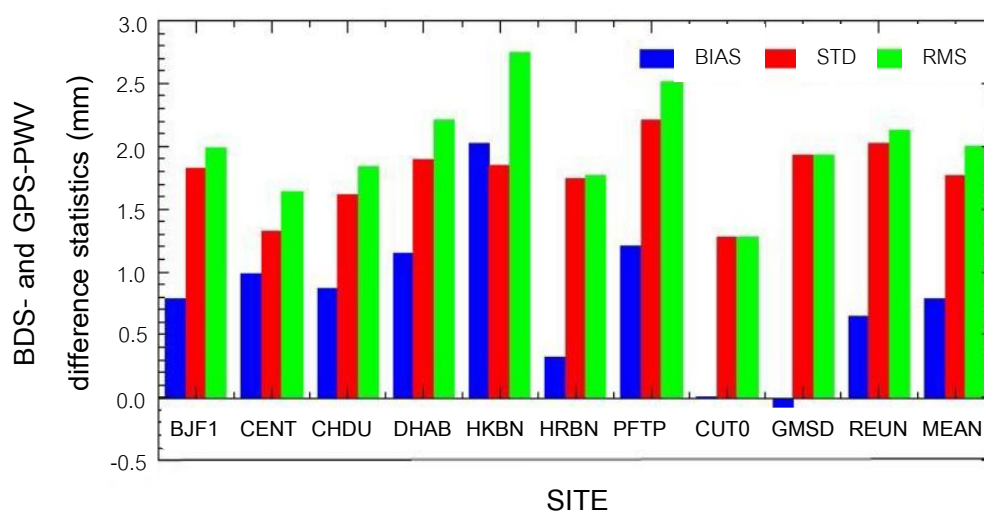
ที่มา: (Li et al., 2015)

ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS และ BEIDOU เมื่อเปรียบเทียบกับ Radiosonde (มม.)

ไอน้ำจาก	Mean error	STD	RMSE
GPS-PWV	0.002	2.49	2.49
BDS-PWV	-2.04	2.68	3.37

ที่มา: (Li et al., 2015)

ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากระบบดาวเทียม GPS กับ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม BEIDOU จำนวน 10 สถานี มีค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง เท่ากับ 0.78 มิลลิเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.77 มิลลิเมตร และมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(RMSE) เท่ากับ 2.00 มิลลิเมตร โดยให้ค่าที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS เป็นค่าอ้างอิงนั้นมีความใกล้เคียงกัน จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม BEIDOU นั้นสามารถนำมาใช้ในการศึกษาทางอุตุนิยมวิทยา ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และทางด้านตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย (ภาพประกอบ 9) (Li et al., 2015)



ภาพประกอบ 9 กราฟค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยใช้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GPS ในการอ้างอิง

ที่มา: (Li et al., 2015)

6.3 แบบจำลองประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น (Local Mean Temperature)

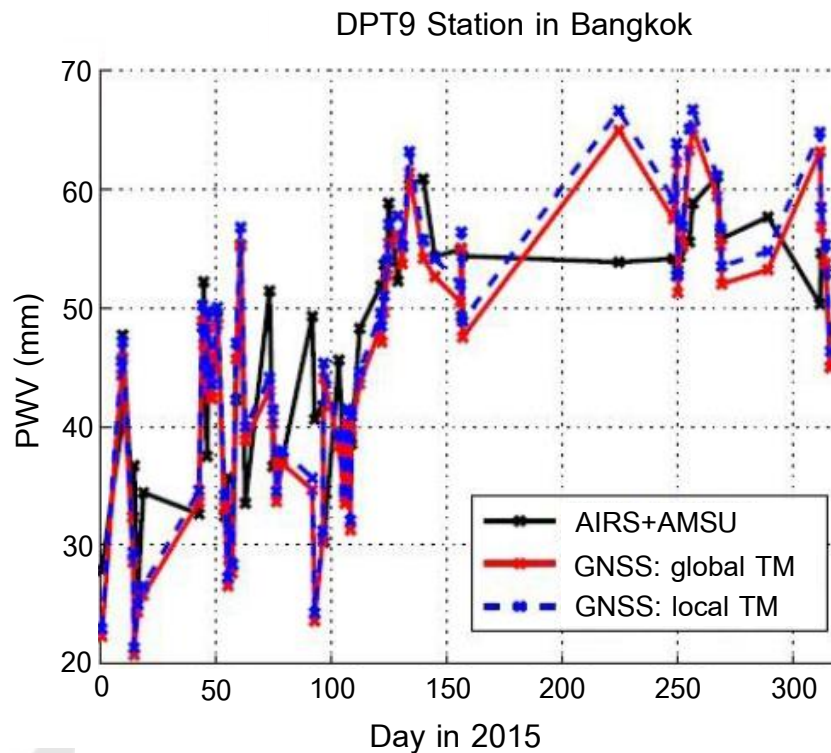
การหาค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จากข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม จากระบบดาวเทียม GPS เพื่อนำมาหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ Mean Tropospheric Temperature (T_m) ซึ่งค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยปัจจุบัน คือ Global Mean Temperature และ Bevis Equation สำหรับการศึกษานี้ในประเทศไทย งานวิจัยการหาค่า

อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ข้อมูลจากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ของ (Rata et al., 2016) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาการหาปริมาณไอน้ำในอากาศแบบต่อเนื่อง ถูกต้อง และแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถใช้ได้ทุกสภาพอากาศ และใช้ในแบบเรียลไทม์ได้ โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของงานวิจัยนี้มีรูปแบบเป็นแบบฟังก์ชันเชิงเส้น อ้างอิงจากอุณหภูมิพื้นผิว โดยข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ย เป็นข้อมูล Radiosondes ซึ่งครอบคลุมเฉพาะพื้นที่ มีขนาดเล็ก และมีราคาแพง โดยงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอ การใช้ Extended Kalman Filter (EKF) เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ย โดยแบ่งอุณหภูมิพื้นผิวเป็นช่วงๆ โดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมโครงการ The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ The Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) โดยองค์การ NASA ซึ่งเปิดบริการใช้ได้ฟรี โดยดาวเทียมจะเคลื่อนที่ผ่าน 2 ครั้งในหนึ่งวัน ในแต่ละพื้นที่บนโลก ครอบคลุมอยู่เหนือผิวโลก อีกทั้ง ผลของงานวิจัยนี้ บ่งชี้ว่า การใช้แบบจำลองประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ในการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2015 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2015 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศลดลง (ตาราง 4 และภาพประกอบ 12)

ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU (มม.)

T_m model	Mean error	RMSE
Local	0.20	6.29
Global	-1.06	6.12

ที่มา: (Rata et al., 2016)



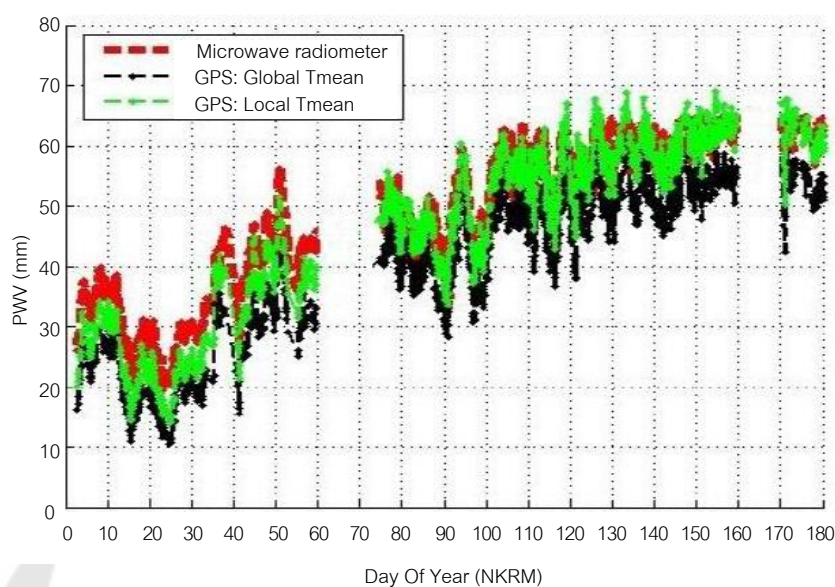
ภาพประกอบ 10 กราฟค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่า
 คุณภูมิเฉลี่ยสากล และคุณภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เปรียบเทียบกับค่าจาก AIRS และ AMSU

ที่มา: (Rata et al., 2016)

6.4 การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสโดยใช้ค่าคุณภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ธนพัทธ์ จงรักชอบ. 2559 ศึกษาการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสโดยใช้ค่าคุณภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เป็นการแสดงผลการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่คำนวณจากข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบต่อเนื่อง โดย ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลระบบดาวเทียม GPS ที่สถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดนครราชสีมา (NKRM) กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้จากเครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ จาก สถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา พบว่าการประมวลผลเพื่อหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากการใช้ข้อมูล GPS โดยใช้ค่าคุณภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสามารถใช้

ทดแทนเครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ ในการพยากรณ์อุตุนิยมวิทยาได้ (ภาพประกอบ 11 และตาราง 5)



ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ ปี 2014

ที่มา: (ธนพัทธ์ จงรักชอบ. 2559)

ตาราง 5 ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และ ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เปรียบเทียบกับ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก เครื่องวัดรังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟ ปี 2014 (มม.)

T_m Model	Mean error	RMSE
Local	1.5	3.7
Global	8.1	8.6

ที่มา: (ธนพัทธ์ จงรักชอบ, 2559)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา
2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การนำเข้าและประมวลผล
5. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลก แบบต่อเนื่อง ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่มีการติดตั้งเครื่องมือในการวัดความดัน และ อุณหภูมิร่วมด้วย โดยเลือกใช้ข้อมูลทั้งหมด 11 สถานี เพื่อให้เห็นผลการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมทั่วประเทศไทย

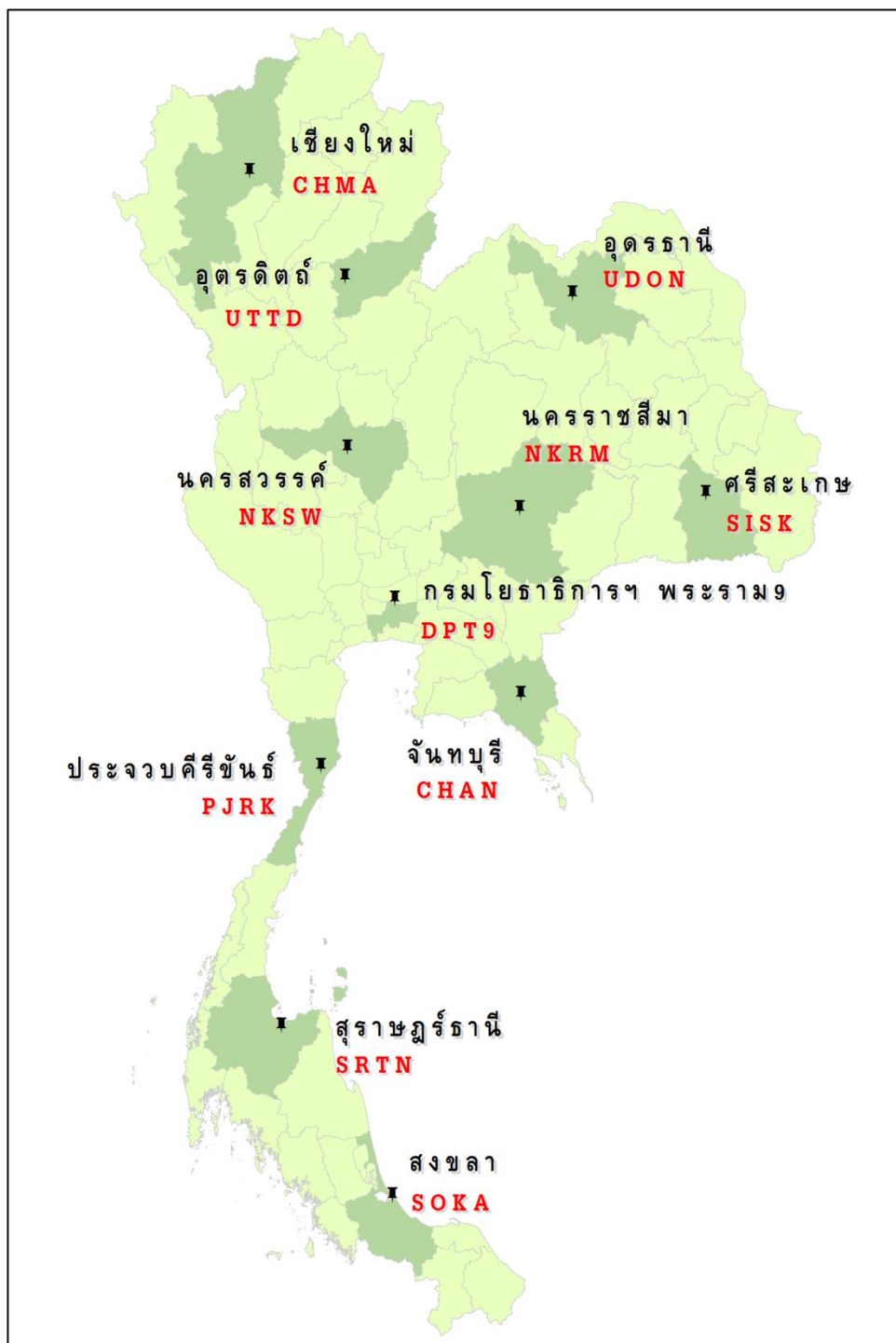
1.1 สัญญาณรังวัดดาวเทียม GPS

ใช้ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก แบบต่อเนื่อง (CORS) กรมโยธาธิการ ในปี 2015 จากเครื่องรับสัญญาณ LEICA รุ่น GRX1200 PRO ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้เพียง GPS ระบบ เดียว โดยใช้เสาอากาศ LEIAT504 แบบ Choke - Ring Antenna รับสัญญาณ ตลอด 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลทุก 15 วินาที มุมกันขอบฟ้า 10 องศา ให้ค่าความถูกต้องระดับ 1-3 เมตร รัศมี 200 กม. ครอบคลุมพื้นที่ 90% ทั่วทุกภาคของประเทศไทย ทั้ง 11 สถานี (ภาพประกอบ 12 และตาราง 4) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1.1.1 สถานีรังวัดจำนวน 11 สถานี ได้แก่ จังหวัด กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ อุดรดิตถ์ นครสวรรค์ นครราชสีมา อุดรธานี ศรีสะเกษ จันทบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี และ สงขลา

1.1.2 ระบบคอมพิวเตอร์ศูนย์กลางข้อมูล ประกอบด้วย เซิร์ฟเวอร์จำนวน 3 เครื่อง ทำหน้าที่ควบคุม และจัดเก็บข้อมูลของแต่ละสถานี ให้บริการข้อมูลรังวัดของแต่ละสถานีแก่ผู้ใช้งาน และกระจายข้อมูลปรับแก้ค่าพิกัดให้แก่ผู้ใช้

1.1.3 ระบบอินเทอร์เน็ต ที่เชื่อมต่อระหว่างสถานีควบคุมส่วนกลางกับ สถานี
 รั้งวัด 11 สถานี และผู้ใช้งานระบบฯ



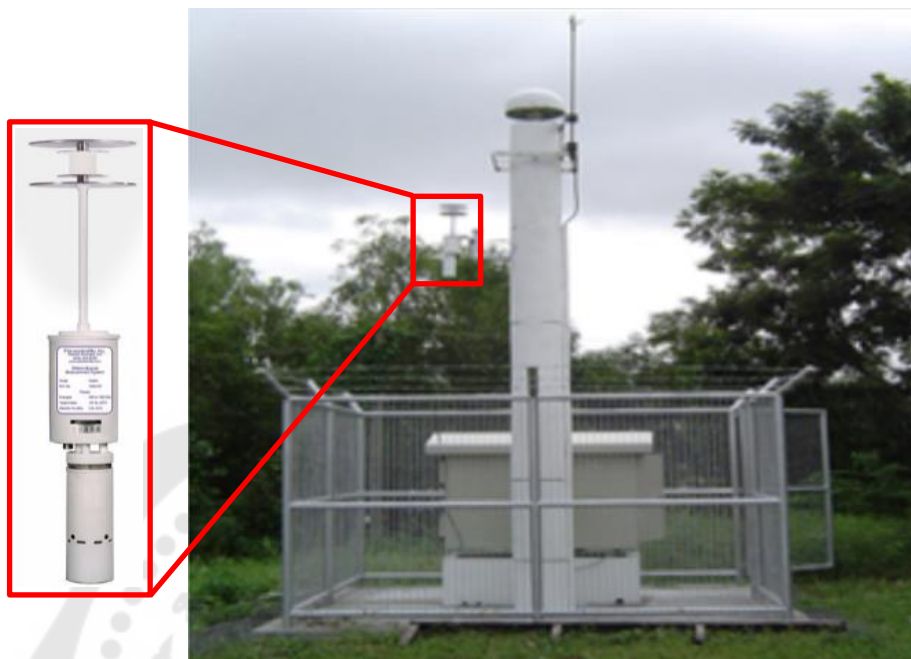
ภาพประกอบ 12 แผนที่สถานีโครงข่ายหลักรั้งวัดดาวเทียมรั้งวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก
 แบบต่อเนื่อง CORS ของกรมโยธาธิการและผังเมือง 11 สถานี

ตาราง 6 ค่าพิกัดของสถานีต่างๆ

จังหวัด	รหัส สถานี	ละติจูด (N)	ลองจิจูด (E)	ความสูง (ม.)
จันทบุรี	CHAN	12°36'37.11708"	102°6'8.6778"	8.004
เชียงใหม่	CHMA	18°50'12.60123"	98°58'13.80785"	310.447
กรมโยธาธิการฯ พระราม9	DPT9	13°45'24.41165"	100°34'23.51926"	38.169
นครราชสีมา	NKRM	14°59'14.98044"	102°7'18.54564"	166.145
นครสวรรค์	NKSW	15°41'26.2934"	100°6'50.80343"	21.406
ประจวบคีรีขันธ์	PJRK	11°48'41.83502"	99°47'46.84947"	11.735
ศรีสะเกษ	SISK	15°6'58.03962"	104°17'8.43333"	105.105
สงขลา	SOKA	7°12'24.09759"	100°35'46.03675"	18.437
สุราษฎร์ธานี	SRTN	9°7'56.0108"	99°19'52.89986"	9.949
อุดรธานี	UDON	17°24'45.83426"	102°46'50.53614"	150.235
อุตรดิตถ์	UTTD	17°37'48.33693"	100°5'46.83525"	51.262

ที่มา: กรมโยธากรมโยธาธิการและผังเมือง

1.2 ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวเครื่องมือวัด รุ่น MET3A (MET3A)



ภาพประกอบ 13 MET3A ที่ติดตั้งตามสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS)

ที่มา: (Paroscientific, 2014). Meteorological Measurement System.

เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นรุ่น MET3A มีความสามารถเก็บข้อมูลที่มีความถูกต้องสูงสามารถวัดความดันบรรยากาศได้ละเอียดมากกว่า 1 ไมโครบาร์ และความถูกต้องรวมมากกว่า 0.08 hPa ในช่วง 620 - 1100 hPa สามารถวัดอุณหภูมิได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -50 ถึง +60 องศาเซลเซียส และสามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ละเอียด 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและเวลาการฟื้นตัวของความชื้นสำหรับ MET3A หลังจากที่มีความอิ่มตัวของน้ำ 100% น้อยลงมากกว่า 2 นาที สามารถติดตั้งแบบสแตนด์อโลนในร่มหรือกลางแจ้ง มีโล่ป้องกันรังสี ช่วยปกป้องอุณหภูมิและความชื้นจากการตกตะกอนและการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงสามารถปรับพอร์ตความดัน barometric เพื่อลดข้อผิดพลาดของแรงดันแบบไดนามิกที่เกิดจากลม มีอินเทอร์เฟซแบบอนุกรมช่วยให้สามารถกำหนดค่าระยะไกลได้อย่างสมบูรณ์และควบคุมพารามิเตอร์การทำงานทั้งหมดรวมถึงความละเอียด สามารถเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เครื่องรับ GPS และเครื่องบันทึกข้อมูล (ภาพประกอบ 13)

โดยข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวที่วัดได้จะถูกจัดเก็บให้อยู่ในไฟล์ที่เรียกว่า Mfile และจะถูกรวบรวมอยู่ในรูปแบบการจัดเก็บเดียวกับข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกที่ได้จากสถานีวัด(ภาพประกอบ 14)

```

3.02 METEOROLOGICAL DATA RINEX
Spider V5.3.0.6216 20160215 085644 UTC PGM /
Measurements recorded in GPS time COMMEN
Chiangmai MARKER
CHMA MARKER
# / TY
3 PR TD HR PR SENSOR
Paroscientific *Met3A TD SENSOR
Paroscientific *Met3A HR SENSOR
Paroscientific *Met3A
-941576.6439 5965123.7476 2046196.2340 0.0000 PR SENSOR
-941576.6439 5965123.7476 2046196.2340 0.0000 TD SENSOR
-941576.6439 5965123.7476 2046196.2340 0.0000 HR SENSOR
END OF

2016 2 2 1 0 1 978.4 13.6 91.3
2016 2 2 1 0 6 978.4 13.6 91.3
2016 2 2 1 0 10 978.4 13.6 91.3
2016 2 2 1 0 14 978.4 13.6 91.3
2016 2 2 1 0 17 978.4 13.7 91.3
2016 2 2 1 0 21 978.4 13.6 91.3
2016 2 2 1 0 25 978.4 13.7 91.3
2016 2 2 1 0 29 978.4 13.7 91.3

```

ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัดรุ่น MET3A โดยถูกจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบของ Mfile

1.3 แบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (Global Pressure and Temperature model: GPT)

Index of /DELAY/SOURCE

Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory		-	
GPT2_C.cpp	28-Jun-2017 19:55	26K	
GPT2_C.h	28-Jun-2017 19:55	1.5K	
GPT2w/	24-Dec-2014 13:31	-	
GPT2w_ALARO/	20-Aug-2014 14:55	-	
Lagler etal 2013 GPT2 GRL.pdf	28-Apr-2013 07:38	444K	
Simplified BSD license.txt	19-Jun-2014 21:04	1.3K	
apg.f	21-Jul-2011 08:44	5.8K	
gmff	21-Jul-2011 08:44	9.8K	
gmff.hu	21-Jul-2011 08:46	11K	
gmff_deriv.f.hu	21-Jul-2011 08:47	11K	
gmff.f.hu.m	21-Jul-2011 08:50	9.6K	
gpt.f	21-Jul-2011 08:56	11K	
gpt.f.hu	21-Jul-2011 08:58	12K	

ภาพประกอบ 15 ข้อมูลแบบจำลองความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิสากลที่ทำกราดาวนโหลด

โดยทำการดาวน์โหลดแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก เพื่อใช้ในการประมวลผลสามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE> (ภาพประกอบ 15) แล้วถูกนำมาติดตั้งลงบนซอฟต์แวร์ PANDA

1.3 ข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอ มิเตอร์

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอ มิเตอร์ โดยทำการดาวน์โหลดข้อมูลจากเว็บไซต์ของ SKYNET เป็นการเผยแพร่ งานวิจัยของศูนย์การตรวจจากระยะไกลด้านสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยชิบะ (Center for Environmental Remote Sensing: CERse) (<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/phimai/phimai.html>) โดยเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอ มิเตอร์ตั้งอยู่ที่สถานีเรดาร์ฝนหลวงพินาย เป็นเครื่องรุ่น WVR-1100 ซึ่งประเทศไทยมีการติดตั้งเครื่องนี้เพียงเครื่องเดียว เก็บข้อมูลทุกๆ 75 วินาที โดยทำการเก็บข้อมูลทำมุมกับแนวราบตั้งแต่ 30, 45, 60, 120, 135, และ 150 องศา ซึ่งในการศึกษา งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลที่ทำมุมกับแนวราบ 90 องศา ในการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำที่ได้ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยได้ใช้เครื่องมือประกอบการศึกษา เพื่อค้นคว้า รวบรวม และ วิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

2.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer) ภายใต้ระบบปฏิบัติการ LINUX ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่เป็น open source software โดยตามความหมายของ Linux หมายถึง Linux kernel หรือ operating system kernel ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่าง hardware และ application เพื่อบริหารจัดการ resource ที่มีอยู่ให้เหมาะสม มีความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังสามารถที่จะพัฒนาและปรับปรุงจากผู้ใช้งานได้ทันที

2.2 ซอฟต์แวร์ PANDA ในการประมวลผลข้อมูล เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง

3. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีโครงข่ายหลักของกรมโยธาธิการและผังเมือง ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจากเครื่องมือวัดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากเครื่องวัดรุ่น MET3A ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ของแต่ละสถานี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก และข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว จากเครื่องมือวัด ของแต่ละสถานี จากกรมโยธาธิการและผังเมือง

3.2 ทำการจัดเก็บข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ให้อยู่ในรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ RINEX เพื่อนำมาใช้ประมวลผลข้อมูลต่อไป

3.3 ทำการดาวน์โหลดแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลกจากเว็บไซต์ของระบบสังเกตการณ์ทางธรณีวิทยาทั่วโลก (Global Geodetic Observing System: GGOS) เพื่อใช้ในการประมวลผลสามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE>

3.4 ทำการดาวน์โหลดข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ สถานีนครราชสีมา จาก <http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/phimai/phimai.html>

3.5 ทำการดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit จากศูนย์วิเคราะห์ห้วงโคจร International GNSS Service (IGS) ให้บริการตำแหน่งวงโคจรดาวเทียมโคจรจากเว็บไซต์ <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/115003935351> เพื่อนำมาใช้ในการประมวลผล

4. การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ด้วยสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีรายละเอียดดังตาราง 7

ตาราง 7 ขั้นตอนการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วย(วิธีที่ 1) และ (วิธีที่ 2)

ขั้นตอน	วิธีการที่ 1	วิธีการที่ 2
1. ค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ	เครื่องวัดที่ติดตั้งที่สถานีจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบของ Mfile	จากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก GPT Model
2. เตรียม ข้อมูล ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก	ทำการจัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของ RINEX	
3. หาค่าพิกัด และ ZTD	ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม PANDA โดยทำการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง จากข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในรูปแบบของ RINEX	
4. หาค่า ZHD	ข้อมูลที่ใช้คือ ละติจูดของสถานีรังวัดโดยมี หน่วยเป็นเรเดียน ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง MSL ในหน่วย เมตร ของสถานีรังวัด และค่าความดันอากาศที่ได้จากเครื่องวัด โดยจัดเก็บในรูปแบบของ Mfile	ข้อมูลที่ใช้คือ ละติจูดของสถานีรังวัดโดย มีหน่วยเป็นเรเดียน ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง MSL ในหน่วย เมตร ของสถานีรังวัด และค่าความดันอากาศที่ได้จาก GPT Model
5. การหาค่า ZWD	นำค่า ZHD หรือค่าความคลาดเคลื่อนส่วนหนึ่ง นำมาลบกับ ZTD หรือ ค่า ความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้ง ของสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จะได้ค่า ZWD_{Mfile} หรือค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนเปียกหรือความชื้น	นำค่า ZHD หรือค่าความคลาดเคลื่อนส่วนหนึ่ง นำมาลบกับ ZTD หรือ ค่า ความคลาดเคลื่อนรวมในแนวตั้ง ของสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จะได้ค่า ZWD_{GPT} หรือค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนเปียกหรือความชื้น

ตาราง 7 (ต่อ)

ขั้นตอน	วิธีการที่ 1	วิธีการที่ 2
6. หาค่า Π	นำค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากเครื่องวัด และถูกจัดเก็บใน Mfile มาคำนวณหาค่าอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ จากสมการที่ 2.16 แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา Π จากสมการที่ 2.15 จะได้ Π_{Mfile}	ใช้การคำนวณหาอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ จาก GPT Model ในรูปแบบของอนุกรมฮาร์โมนิกเชิงพหุคูณ (Spherical Harmonic) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา Π จากสมการที่ 2.15 จะได้ Π_{GPT}
7. หาค่า PWV	นำค่า ZWD_{Mfile} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 และ Π_{Mfile} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันอากาศและอุณหภูมิจาก Mfile หรือ PWV_{Mfile} ด้วยสมการที่ 2.14	นำค่า ZWD_{GPT} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 และ Π_{GPT} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันอากาศและอุณหภูมิจาก GPT Model หรือ PWV_{GPT} ด้วยสมการที่ 2.14
8. วิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติ	นำค่า PWV ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างกับค่า PWV ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์	
9. วิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์	วิเคราะห์การถดถอยและศึกษาระดับ หรือขนาดความสัมพันธ์ของค่า PWV ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน	

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการการวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำ และความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้ง 2 วิธี ของสถานีนครราชสีมา กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ โดยนำค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์มาจัดคู่กับช่วงเวลาของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากทั้ง 2 วิธี เพื่อหาว่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากวิธีใดมีความใกล้เคียงกับ ปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และกำหนดให้เป็นชุดข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ และชุดข้อมูลที่มีความใกล้เคียงน้อยกว่าเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อพิสูจน์ความแปรปรวนของทั้ง 2 ประชากร ว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

5.1 ค่าเฉลี่ย ใช้สัญลักษณ์ (อ่านว่า เอ็กซ์บาร์) คำนวณได้โดยหาผลรวมของข้อมูลทุกค่า แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด เป็นการหาค่ากลางหรือที่เรียกว่า การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (measure of central tendency) ของข้อมูล โดยหาค่าเฉลี่ยของ 2 ชุดข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อดูความแตกต่าง หรือ ค่าความแตกต่างค่าเฉลี่ยของ 2 ชุดข้อมูล ในแต่ละสถานี

5.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นวิธีวัดการกระจาย (measure of dispersion) ใช้อธิบายการกระจายของข้อมูลเนื่องจากมีหน่วยเดียวกับข้อมูล ทำการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้ง 2 ชุดข้อมูลเปรียบเทียบเพื่อดูความแตกต่าง

5.3 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) หรือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นวิธีการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่พยากรณ์กับค่าจริงที่ทำการคำนวณ ซึ่งถ้าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง ยิ่งมีค่าน้อย หรือมีค่าใกล้ศูนย์ แสดงว่าค่าจริงที่ทำการคำนวณนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อย โดยสำหรับในงานวิจัยค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์เป็นตัวเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

5.4 การวิเคราะห์ถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติที่ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทราบค่า เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent variation) แทนค่าด้วย X และใช้เป็นเกณฑ์ในการประมาณค่า Y หรือ ตัวแปรตาม (Dependent variation) ซึ่งความสัมพันธ์ ของตัวแปรทั้งสองจะอยู่ในรูปแบบใดๆ เช่นเส้นตรง เส้นโค้ง ฯลฯ ในการศึกษาครั้งนี้ จะดูความสัมพันธ์ลักษณะเส้นตรงเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นหรือเส้นตรง โดยมีรูปแบบของสมการเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่

สหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นการศึกษาระดับ หรือขนาดความสัมพันธ์ของค่าปริมาณใด ๆ ในบรรายากาศระหว่างการใช้ข้อมูลความดันบรรายากาศและอุณหภูมิจาก Mfile และความดันบรรายากาศและอุณหภูมิจาก GPT Model โดยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยการศึกษา งานวิจัยนี้ได้ใช้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson product-moment correlation coefficient) หรือบางครั้งเรียกว่า สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation) เป็นการศึกษา ความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่มีขนาดและทิศทางของ ความสัมพันธ์อย่างไร โดยใช้สัญลักษณ์ r สามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการ 3.1

$$r = \frac{\text{cov}(x,y)}{S_x S_y} \quad (3.1)$$

เมื่อ $\text{cov}(x,y)$ คือ ความแปรปรวนร่วมของตัวแปร X และ Y
 $S_x S_y$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร X และ Y

โดยถ้า r มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อย หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังตาราง 8 (Hinkle, 1998)

ตาราง 8 ระดับของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่า r	ระดับของความสัมพันธ์
0.90 - 1.00	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
0.07 - 0.90	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
0.50 - 0.07	มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
0.30 - 0.50	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
0.00 - 0.30	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก

ที่มา: (Hinkle, 1998)

เครื่องหมาย $+$, $-$ หน้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงทิศทางของความสัมพันธ์

r มีเครื่องหมาย $+$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน
(ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูง อีกตัวหนึ่งจะมีค่าสูงไปด้วย)

r มีเครื่องหมาย $-$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางตรงกันข้าม
(ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูง ตัวแปรอีกตัวหนึ่งจะมีค่าต่ำ)

บทที่ 4

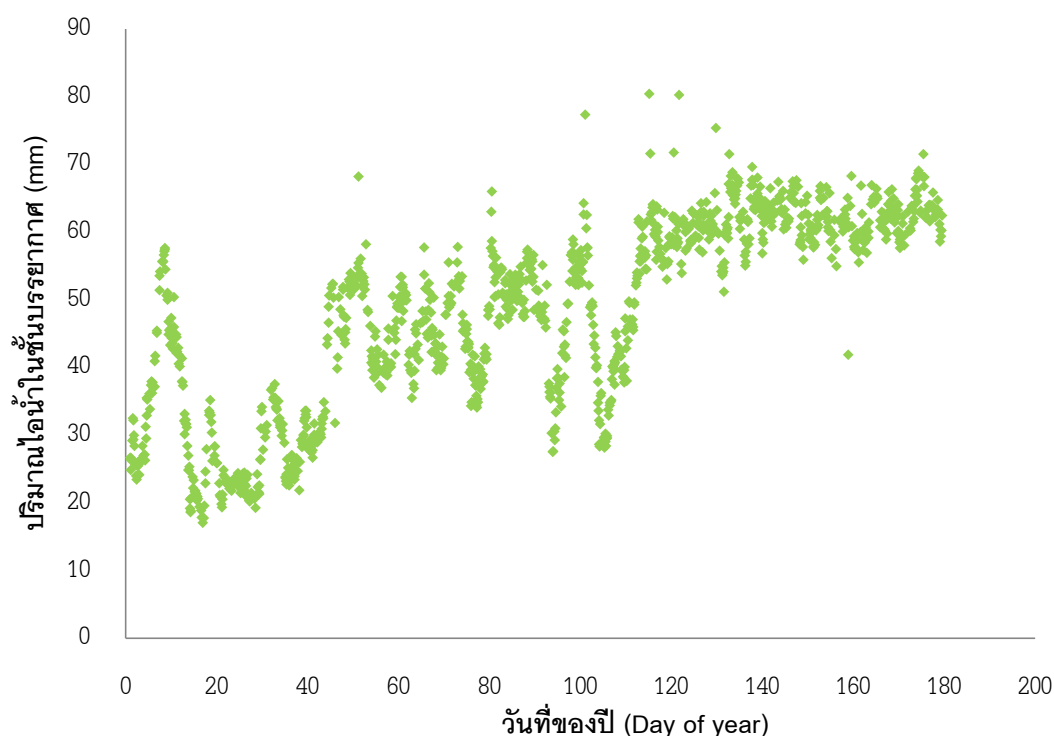
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีรังวัดแบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) จำนวน 11 สถานี สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 10 สถานี คือ จันทบุรี เชียงใหม่ กรมโยธาฯพระราม 9 นครราชสีมา นครสวรรค์ ประจวบคีรีขันธ์ ศรีสะเกษ สุราษฎร์ธานี อุตรธานี และอุตรดิตถ์ สำหรับข้อมูลของสงขลา มีข้อมูลไม่ครบถ้วนจึงไม่นำมาคำนวณ มีผลการดำเนินงานดังนี้

4.1 การวิเคราะห์การหาปริมาณไอน้ำ และความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจาก จากทั้ง 2 วิธีกับเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์

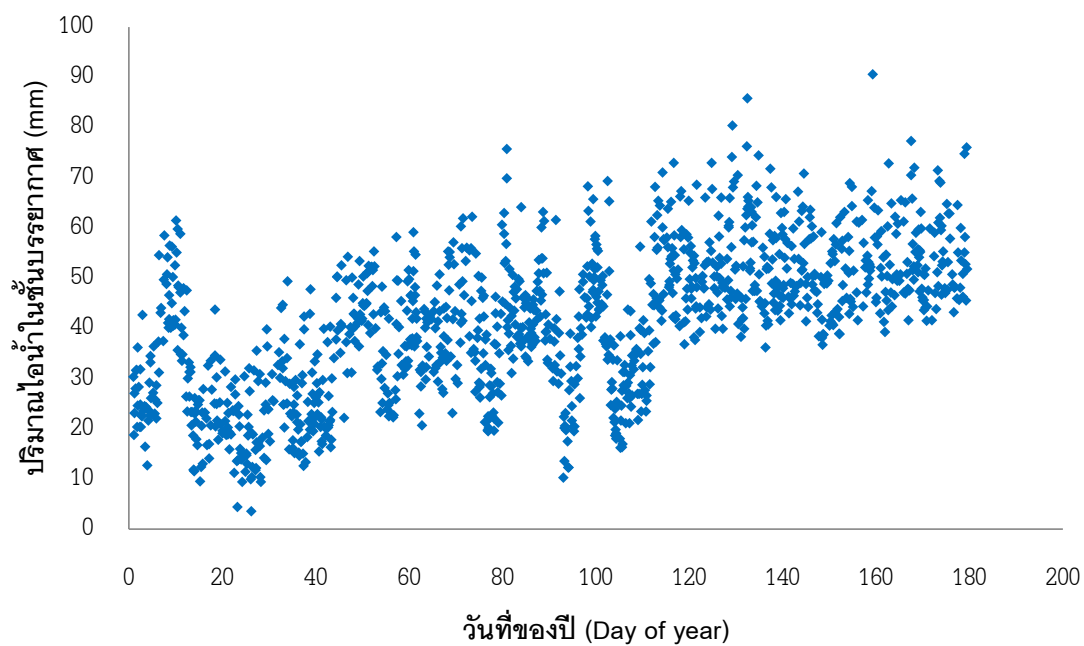
สัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้ง 2 วิธี กับเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ทำการหาความสัมพันธ์ ของปริมาณไอน้ำที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้ง 2 วิธี โดยทำการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์กับปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้ จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่สถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย โดยใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้ง 2 วิธี ของสถานีนครราชสีมา ซึ่งมีระยะห่างจากสถานีเรดาร์ฝนหลวงพิมาย 52 กิโลเมตรโดยมีผลของข้อมูลดังนี้

4.1.1 ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ประมวลผลของข้อมูลระหว่าง วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 30 มิถุนายน 2015 โดยทำการดาวน์โหลดข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ จากเว็บไซต์ <http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/phimai/phimai.html> แล้วนำมาจัดคู่กับช่วงเวลาของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้งวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ได้ข้อมูลอยู่ระหว่าง วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 30 มิถุนายน 2015 (วันที่ 1 ถึง 181 ของปี) ระยะเวลา 181 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,417 ชุด แสดงข้อมูลลงบนกราฟกำหนดให้แกน Y เป็นปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป (ภาพประกอบ 16)

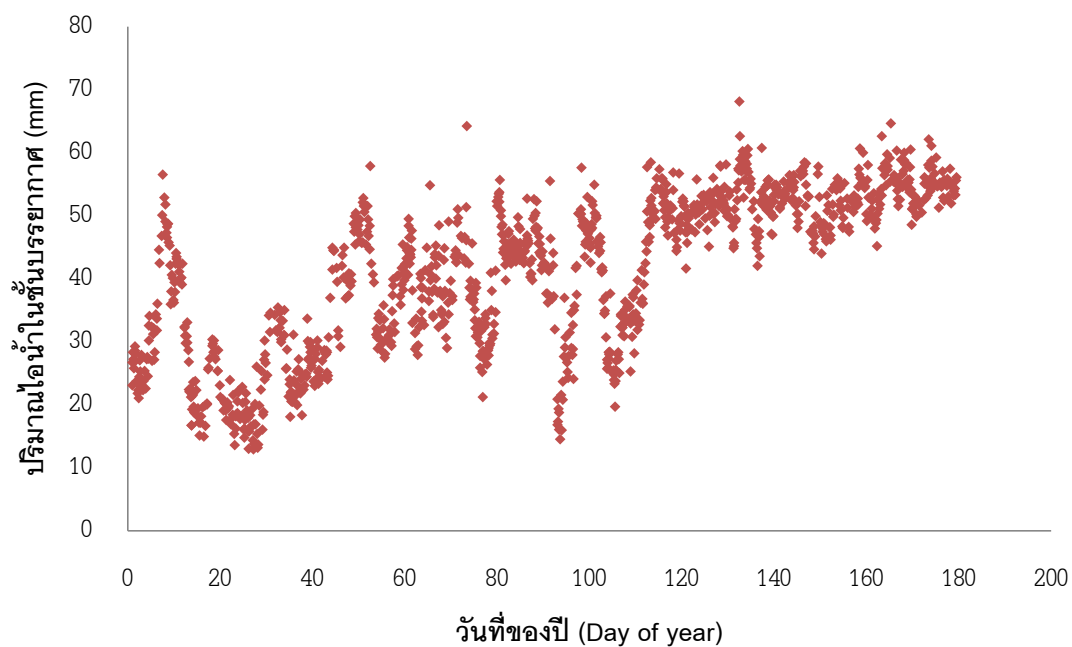


ภาพประกอบ 16 กราฟปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์

4.1.2 ปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของ สถานีนครราชสีมา ทำการประมวลผลของข้อมูล ให้ผลอยู่ระหว่าง วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 30 มิถุนายน 2015 (วันที่ 1 ถึง 181ของปี) ระยะเวลา 181 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,417 ชุด ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้มาแสดงลงบนแสดงบนกราฟโดยกำหนดให้ แกน Y เป็นจำนวนปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศที่ประมวลได้จากทั้งวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วย เป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป เมื่อประเมินการกระจายของข้อมูลที่ได้จาก กราฟจะพบว่ารูปร่างของกราฟปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน พื้นโลกจากวิธีที่ 2 มีการกระจายตัวคล้ายคลึงกับปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากเครื่องวัด ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ ในขณะที่กราฟปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุ ตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 นั้นจะมีการกระจายตัวมากกว่า (ภาพประกอบ 17 และ ภาพประกอบ 18)

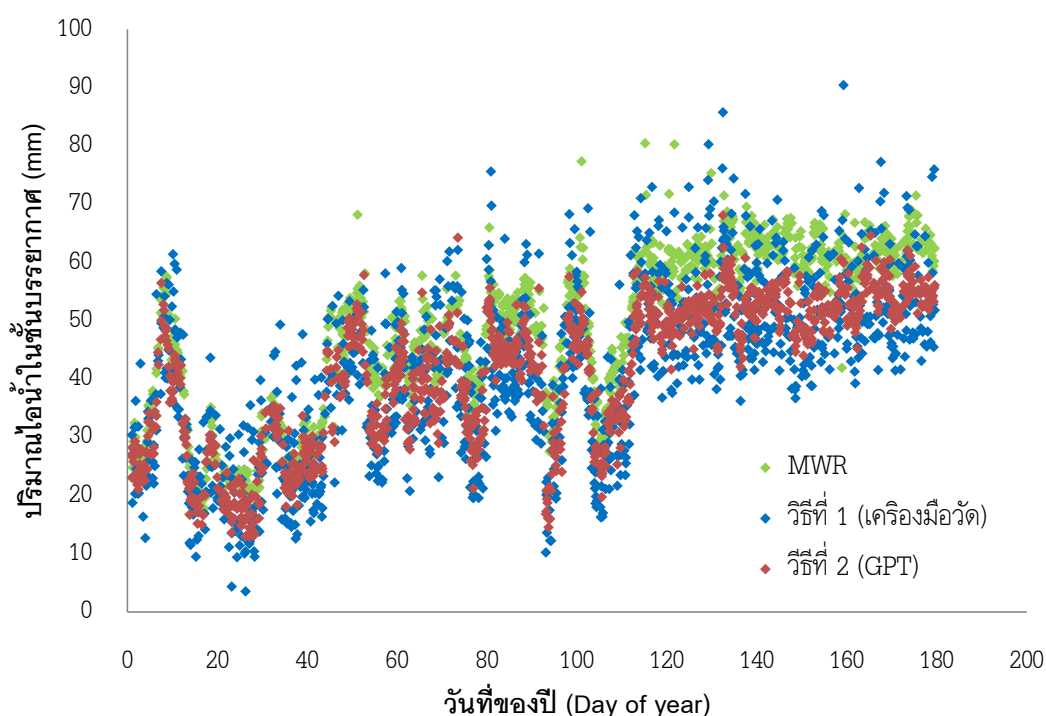


ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีนครราชสีมา



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีนครราชสีมา

เมื่อนำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาทำการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (MWR) โดยเปรียบเทียบในแต่ละช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป แสดงข้อมูลลงบนกราฟโดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไปพบว่าข้อมูลที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 2 โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวสากล มีการเรียงตัวที่คล้ายคลึงกับ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มากกว่าข้อมูลที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด ซึ่งข้อมูลมีการกระจายตัวมากกว่าทั้ง 2 ชุดข้อมูลข้างต้น ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว ที่อาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ข้างเคียงที่ส่งผลต่อค่าวัดที่ได้ หรืออุปกรณ์บางส่วนอาจเกิดการชำรุด จึงทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง (ภาพประกอบ 19)



ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (MWR) จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2

4.1.1 นำค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 วิธีที่ 2 และจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์มาเปรียบเทียบทางสถิติ โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย หรือเป็นการหาค่ากลางของข้อมูล และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ โดยค่าที่ได้จากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 กับค่าที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (ตาราง 9)

ตาราง 9 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกประมวลผลโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 (มม.)

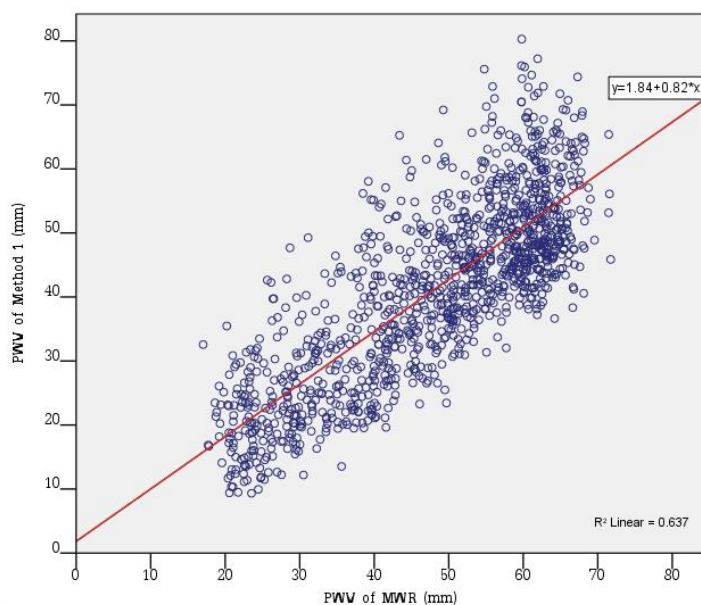
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
MWR	48.14	13.85
วิธีที่ 1	41.21	14.21
วิธีที่ 2	41.24	12.18

เมื่อนำค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 วิธีที่ 2 และจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มาหาค่าต่างของค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 พบว่าวิธีที่ 2 จะมีการกระจายตัวมากกว่าวิธีที่ 1 แต่ค่าเฉลี่ย และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของวิธีที่ 2 มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ 1 (ตาราง 10)

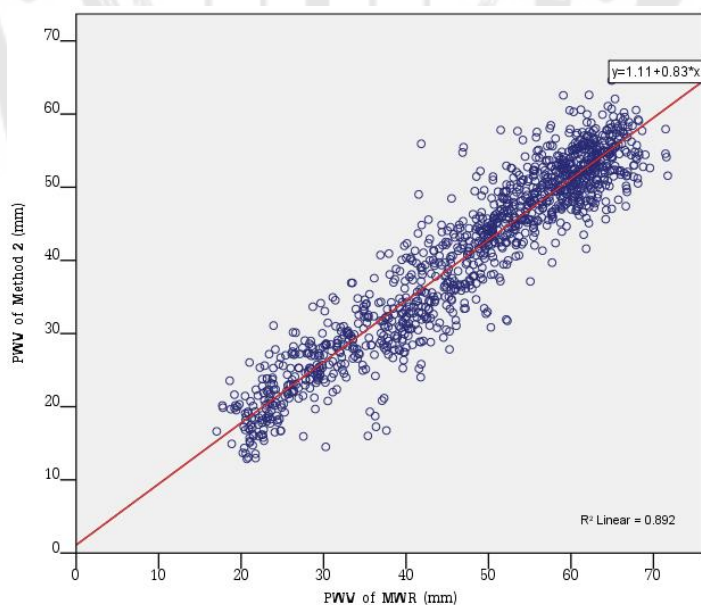
ตาราง 10 ค่าต่างของค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 (มม.)

ข้อมูล	ค่าต่างของค่าเฉลี่ย	ค่าต่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	6.93	0.36	11.20
วิธีที่ 2	6.9	1.67	8.25

4.1.4 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้จากทั้ง 3 กรณี โดยใช้ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์เป็นเกณฑ์ หา ค่าความสัมพันธ์ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 โดยการวิเคราะห์ถดถอย กำหนดให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ แทนค่าด้วย X เป็นตัวแปรอิสระและใช้เป็นเกณฑ์ในการประมาณค่า Y ที่แทนกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลภายในกราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 มีการกระจายตัวมากกว่า กราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ต่างกันระหว่าง 2 ชุดข้อมูล (ภาพประกอบ 20 และภาพประกอบ 21)



ภาพประกอบ 20 กราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก
เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุ
ตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1



ภาพประกอบ 21 กราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก
เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุ
ตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2

เมื่อได้รูปแบบของการกระจายตัวโดยการวิเคราะห์ถดถอยแล้ว สามารถนำชุดข้อมูลดังกล่าวมาหาระดับของความสัมพันธ์จากการหาค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 โดยให้ผลดังนี้ (ตาราง 11)

ตาราง 11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2

ข้อมูล	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ระดับของความสัมพันธ์
MWR กับ วิธีที่ 1	0.798	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
MWR กับ วิธีที่ 2	0.945	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

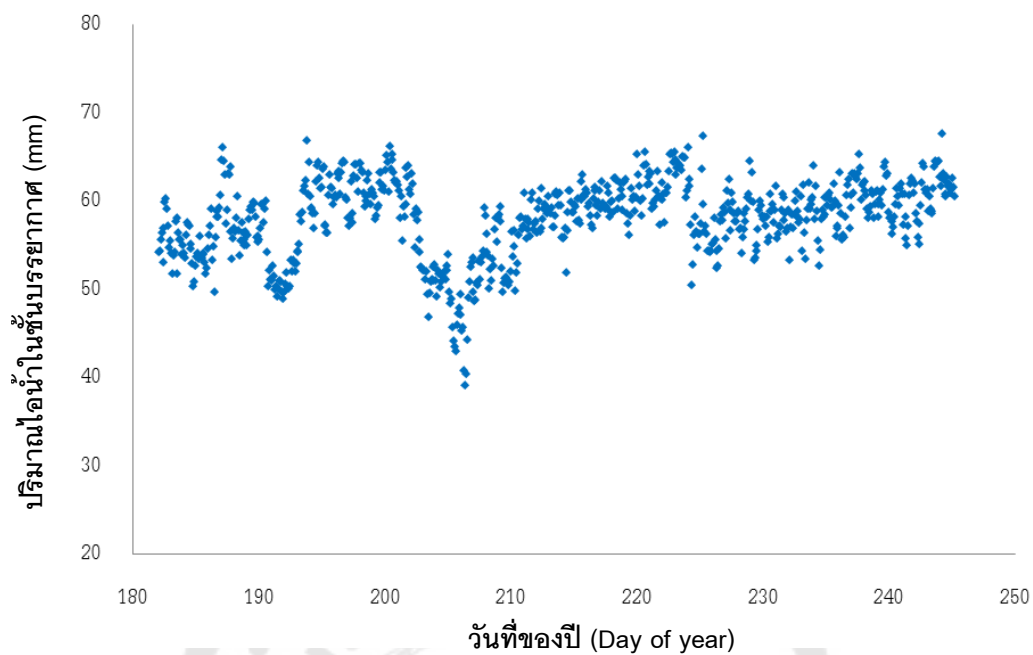
จากการหาค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 เห็นได้ว่าค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 นั้นมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มากกว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 อาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว ที่อาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ข้างเคียงที่ส่งผลต่อค่าวัดที่ได้ หรืออุปกรณ์บางส่วนอาจเกิดการชำรุด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงทำให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 ที่ได้มีการกระจายตัวของข้อมูลที่ผิดปกติ

4.2 การวิเคราะห์การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และโดยวิธีที่ 2 รายสถานี

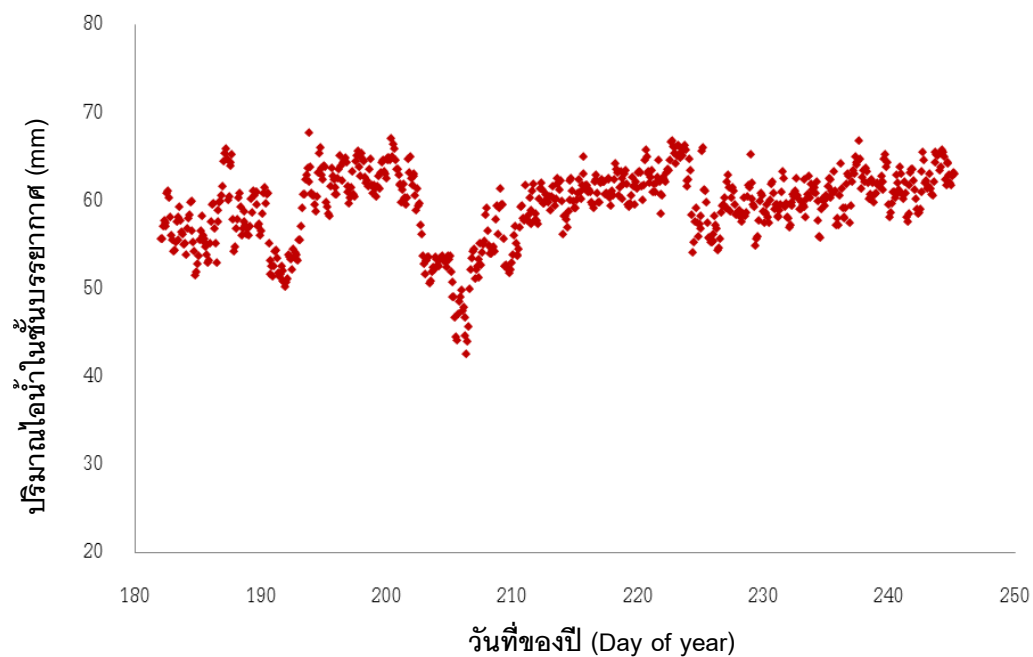
นอกจากทำการหาวิเคราะห์การหาปริมาณไอน้ำ และความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 กับเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์แล้ว เพื่อเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เป็นรายสถานี โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.2.1 สถานีจันทบุรี

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีจันทบุรี โดยทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง แต่เนื่องจากความพร้อมของข้อมูล ที่ต้องทำการตัดในส่วน of ค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวดิ่ง ที่เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในขณะที่ฝนตก จึงไม่สามารถทำการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้ ในขณะที่ฝนตก โดยสามารถประมวลผลข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ได้ผลอยู่ระหว่าง วันที่ 1 กรกฎาคม 2015 ถึง วันที่ 1 กันยายน 2015 (วันที่ 182 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 65 วัน จำนวนข้อมูลทั้งหมด 759 ชุด และเมื่อนำมาแสดงผลบนกราฟเพื่อดูขนาดและรูปร่างของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงโดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยวิธีที่ 1 มีค่าต่ำสุดของข้อมูล 39.08 มิลลิเมตร วันที่ 25 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 67.63 มิลลิเมตร วันที่ 1 กันยายน 2015 และมีค่าเฉลี่ยของข้อมูล เท่ากับ 58.01 มิลลิเมตร และปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 42.54 มิลลิเมตร วันที่ 25 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 67.72 มิลลิเมตร วันที่ 12 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยของข้อมูลอยู่ที่ 59.40 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 22 และภาพประกอบ 23)

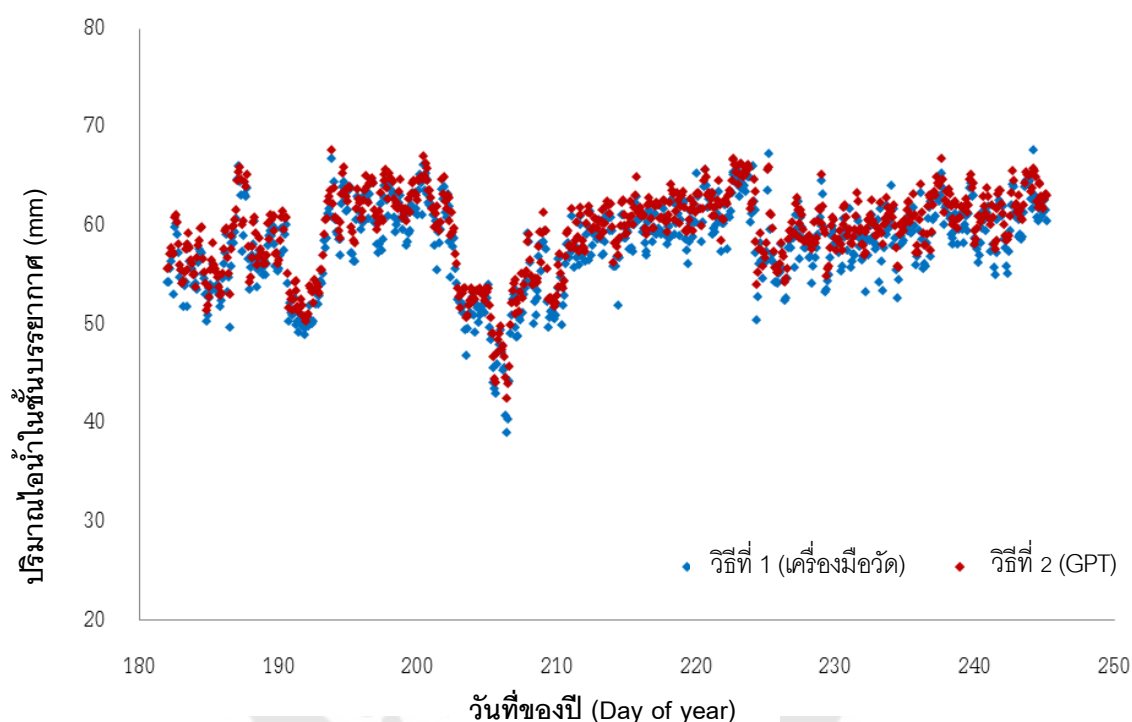


ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีจันทบุรี



ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีจันทบุรี

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไปจะเห็นได้ว่าในบางค่าของข้อมูลมีจำนวนที่ซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 24)



ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีจันทบุรี

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 12) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.384 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานอยู่ที่ 0.232 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 1.741 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 24)

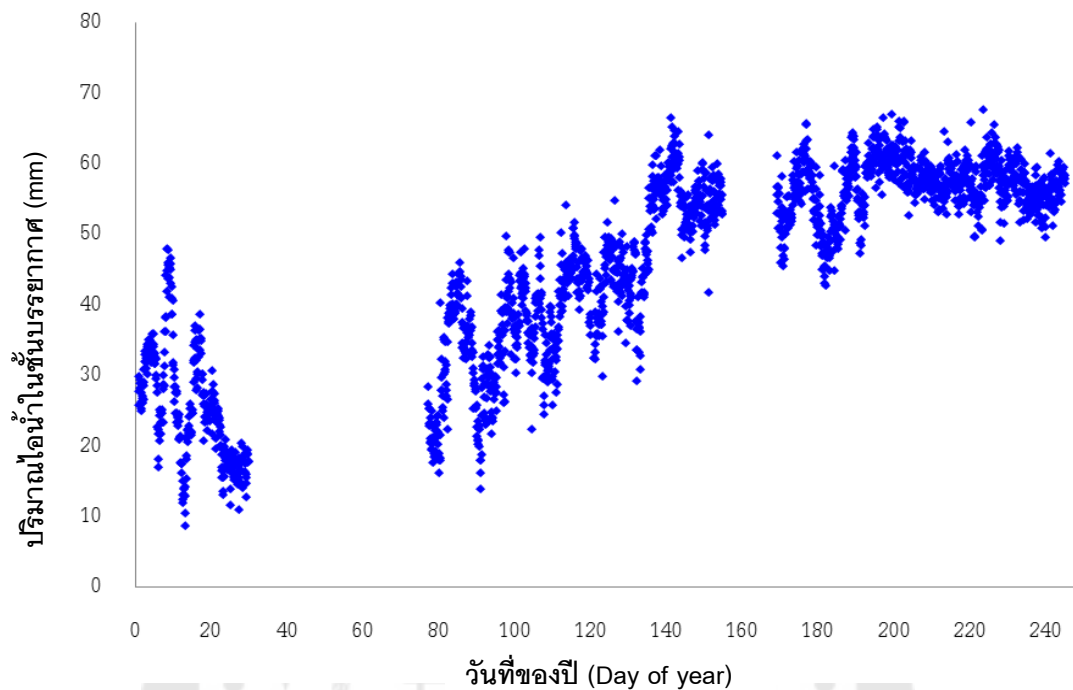
ตาราง 12 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีจันทบุรี (มม.)

ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	58.013	4.388	
วิธีที่ 2	59.397	4.156	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	1.384	0.232	1.741

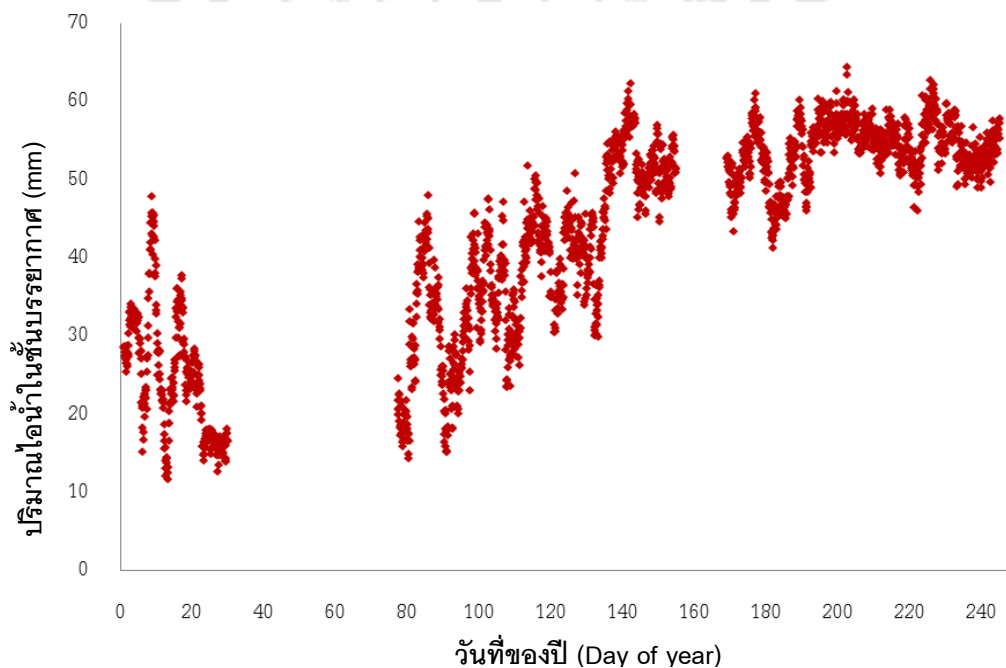
4.2.2 สถานีเชียงใหม่

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีเชียงใหม่ สามารถประมวลผลข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ แบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่ วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 29 มกราคม 2015 (วันที่ 1 ถึง 29 ของปี) ระยะเวลา 29 วัน มีจำนวนข้อมูล 348 ชุด ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ วันที่ 18 มีนาคม 2015 ถึง วันที่ 3 มิถุนายน 2015 (วันที่ 77 ถึง 154 ของปี) ระยะเวลา 78 วัน มีจำนวนข้อมูล 922 ชุด และช่วงที่ 3 ตั้งแต่ วันที่ 18 มิถุนายน 2015 ถึง วันที่ 2 กันยายน 2015 (วันที่ 169 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 77 วัน มีจำนวนข้อมูล 914 ชุด ระยะเวลารวม 184 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2184 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 8.65 มิลลิเมตร วันที่ 13 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 67.59 มิลลิเมตร วันที่ 11 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 45.55 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 11.63

มิลลิเมตร วันที่ 13 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 64.37 มิลลิเมตร วันที่ 21 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 43.28 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 25 และภาพประกอบ 26)

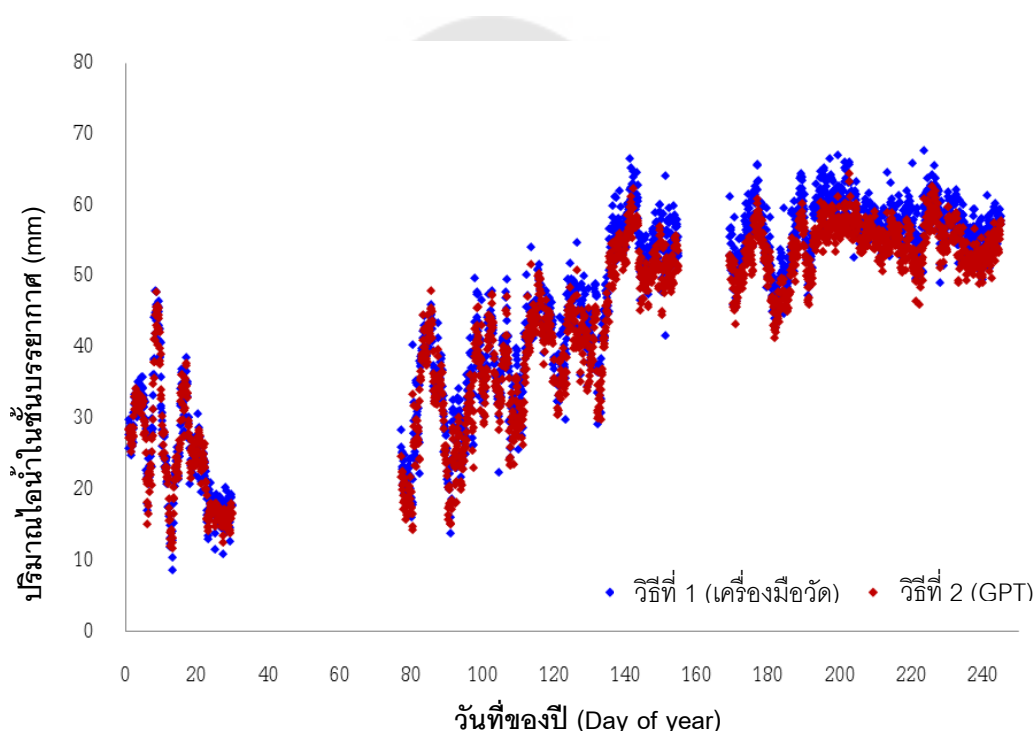


ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีเชียงใหม่



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีเชียงใหม่

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และบางค่าของข้อมูลที่มีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 27)



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีเชียงใหม่

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 13) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.274 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานอยู่ที่ 0.747 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 3.008 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 27)

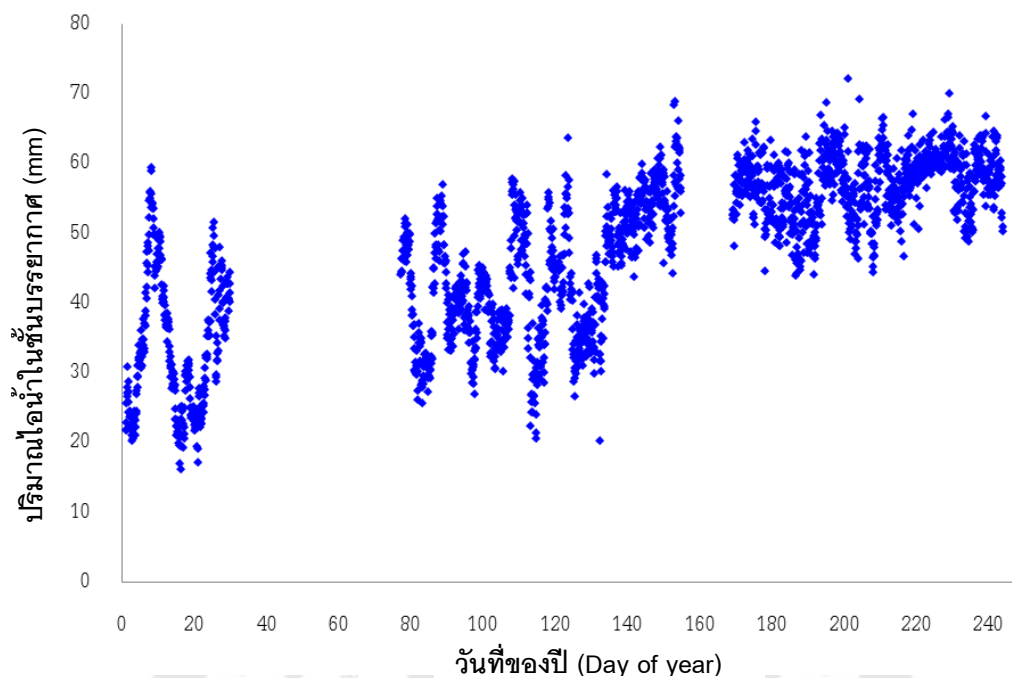
ตาราง 13 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีเชียงใหม่ (มม.)

ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	45.553	13.796	
วิธีที่ 2	43.279	13.049	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	2.274	0.747	3.008

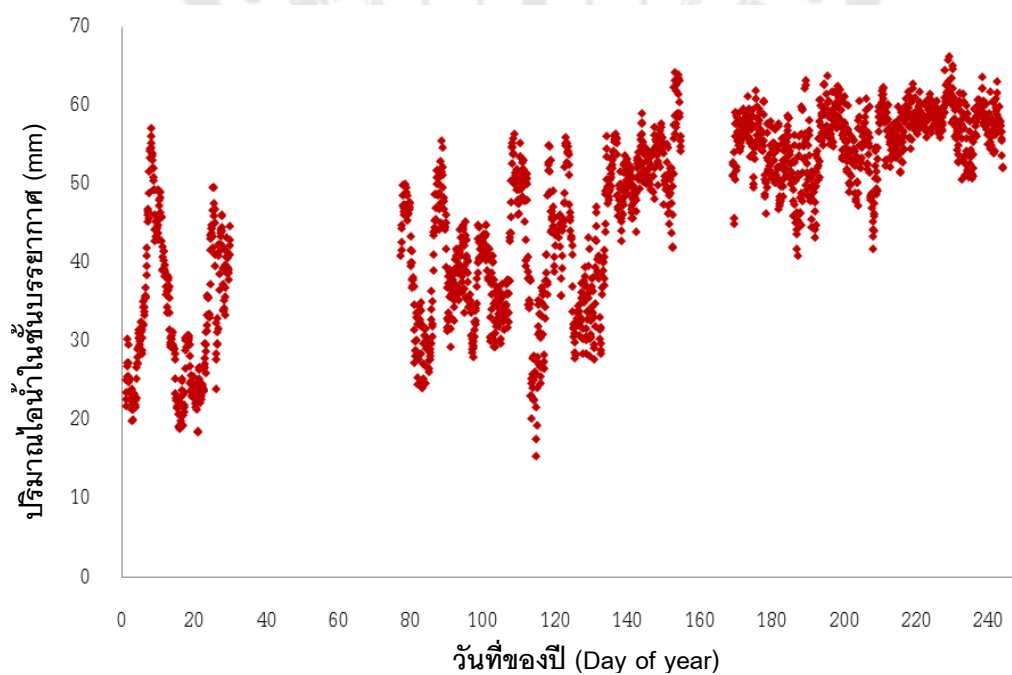
4.2.3 สถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9 ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูลแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 29 มกราคม 2015 (วันที่ 1 ถึง 29 ของปี) ระยะเวลา 29 วัน มีจำนวนข้อมูล 348 ชุด ช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 18 มีนาคม 2015 ถึง วันที่ 3 มิถุนายน 2015 (วันที่ 77 ถึง 154 ของปี) ระยะเวลา 78 วัน มีจำนวนข้อมูล 917 ชุด และช่วงที่ 3 ตั้งแต่วันที่ 18 มิถุนายน 2015 ถึง วันที่ 31 สิงหาคม 2015 (วันที่ 169 ถึง 243 ของปี) ระยะเวลา 75 วัน มีจำนวนข้อมูล 897 ชุด รวมระยะเวลาทั้งหมด 182 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2,162 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 16.13 มิลลิเมตร วันที่ 16 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 70.04 มิลลิเมตร วันที่ 17 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 47.59 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 15.41 มิลลิเมตร วันที่ 24 เมษายน 2015 มีค่าสูงสุด มีค่าสูงสุด 66.11 มิลลิเมตร วันที่

17 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 46.48 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 28 และภาพประกอบ 29)

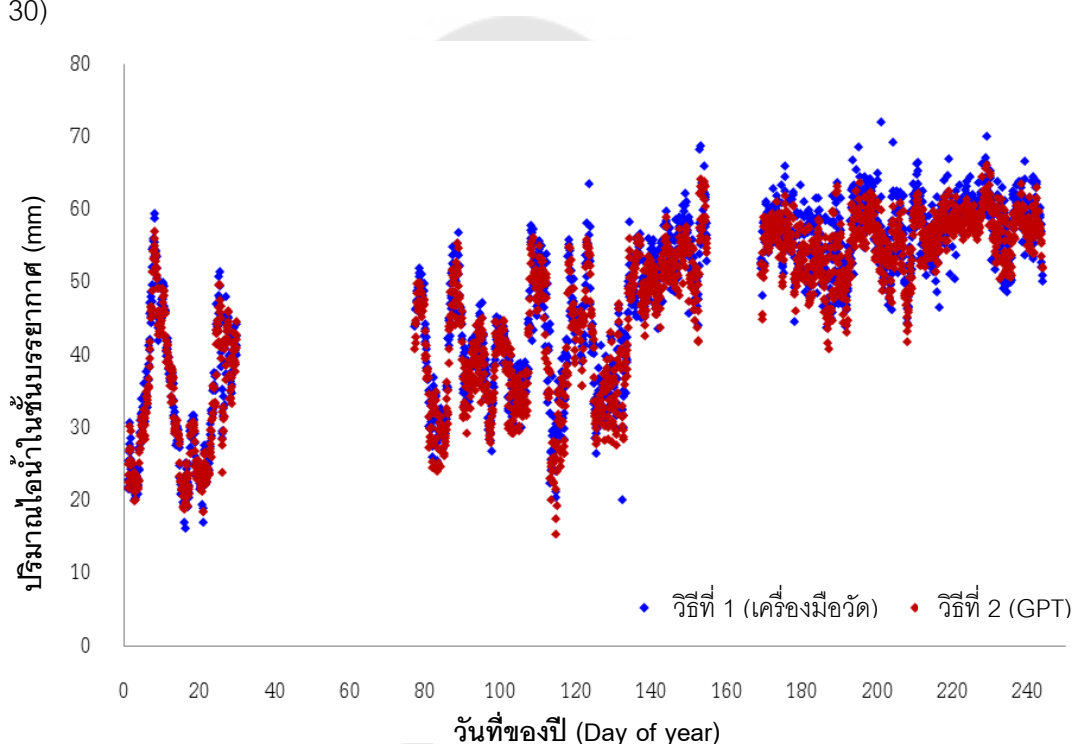


ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9



ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และบางค่าของข้อมูลที่ค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน แต่ก็จะมีบางช่วงเวลาที่ข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 มีค่าที่ต่างออกไปจากกลุ่มของข้อมูลมาก (ภาพประกอบ 30)



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 14) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้น

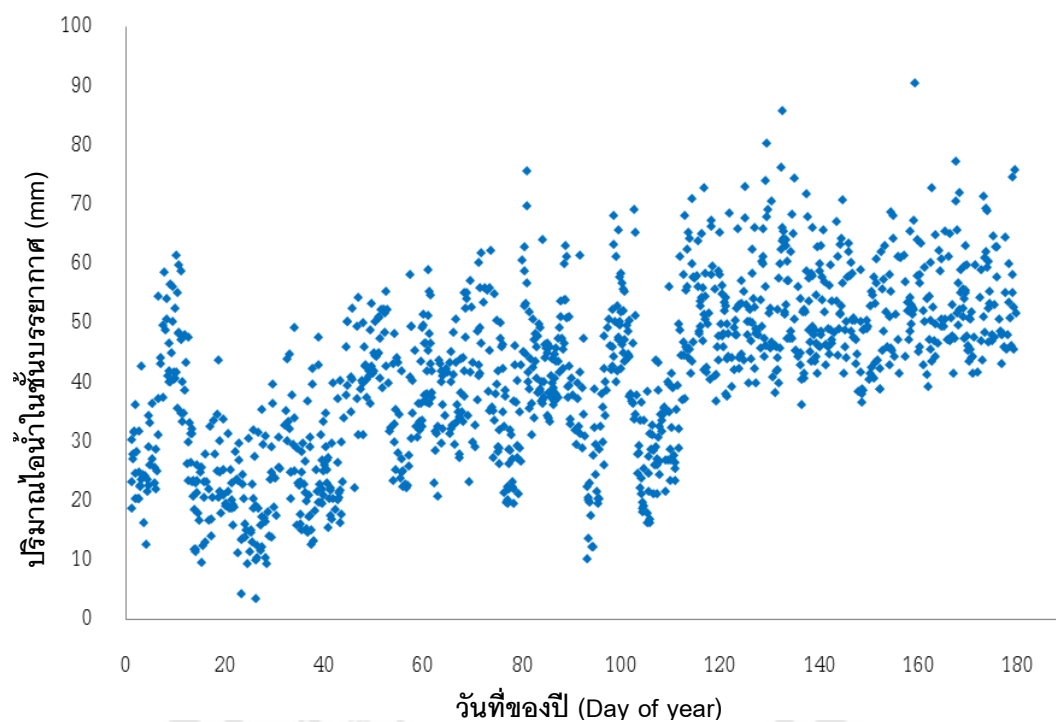
โลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.115 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.123 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.560 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 30)

ตาราง 14 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีกรมโยธาธิการฯ พระราม 9 (มม.)

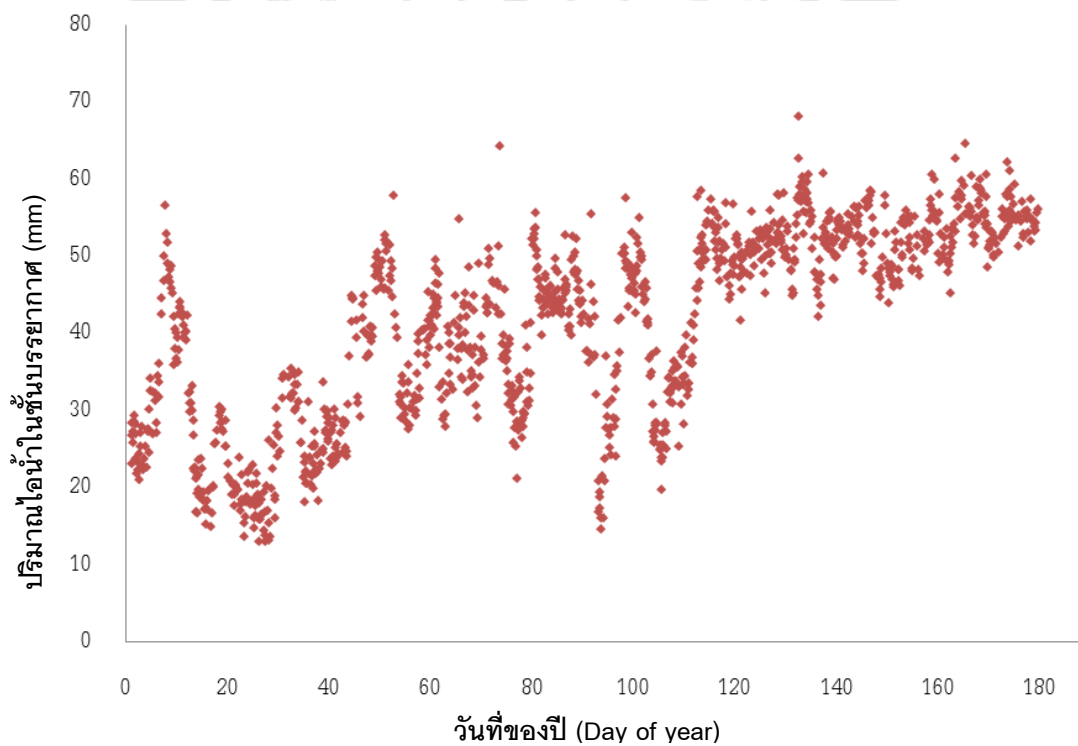
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	47.593	11.548	
วิธีที่ 2	46.478	11.425	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	1.115	0.123	2.560

4.2.4 สถานีนครราชสีมา

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีนครราชสีมา ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูล ได้ผลอยู่ระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 30 มิถุนายน 2015 (วันที่ 1 ถึง 181 ของปี) ระยะเวลา 181 วัน ต่อเนื่อง มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,417 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 3.54 มิลลิเมตร วันที่ 26 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 90.45 มิลลิเมตร วันที่ 8 มิถุนายน 2015 และมีค่าเฉลี่ย 41.39 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 12.88 มิลลิเมตร วันที่ 26 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด มีค่าสูงสุด 68.06 มิลลิเมตร วันที่ 12 พฤษภาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.36 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 31 และภาพประกอบ 32)

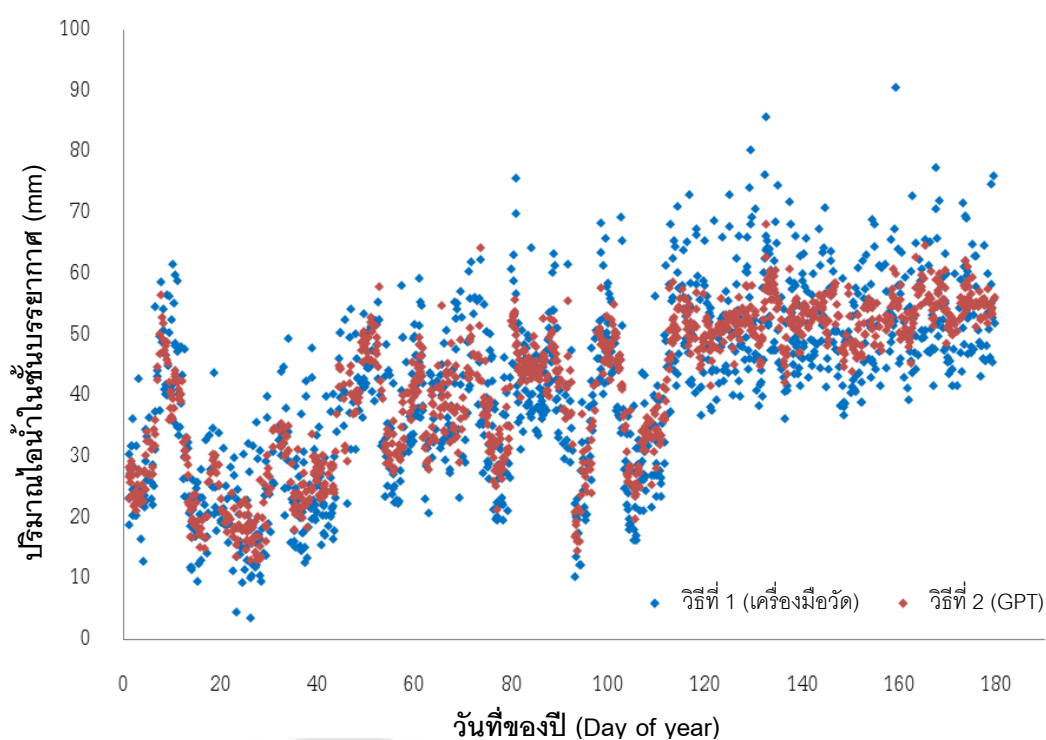


ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีนครราชสีมา



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีนครราชสีมา

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าวิธีที่ 2 อย่างเห็นได้ชัด (ภาพประกอบ 33)



ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีนครราชสีมา

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 15) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.025 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

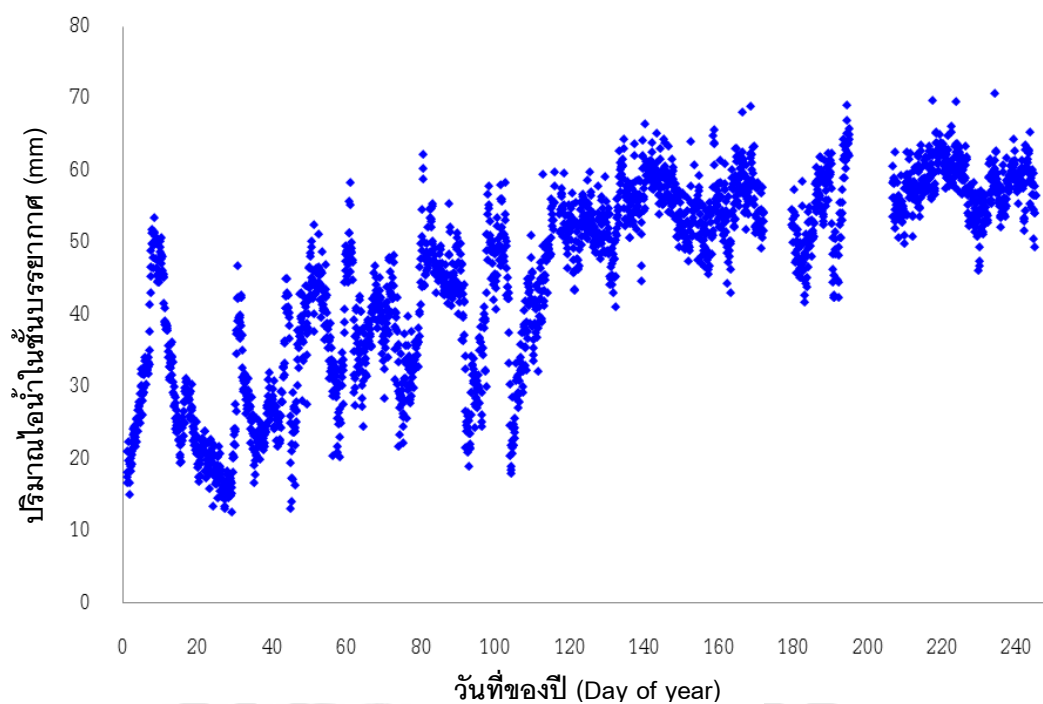
มาตรฐานอยู่ที่ 2.002 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 7.647 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 33)

ตาราง 15 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีนครราชสีมา (มม.)

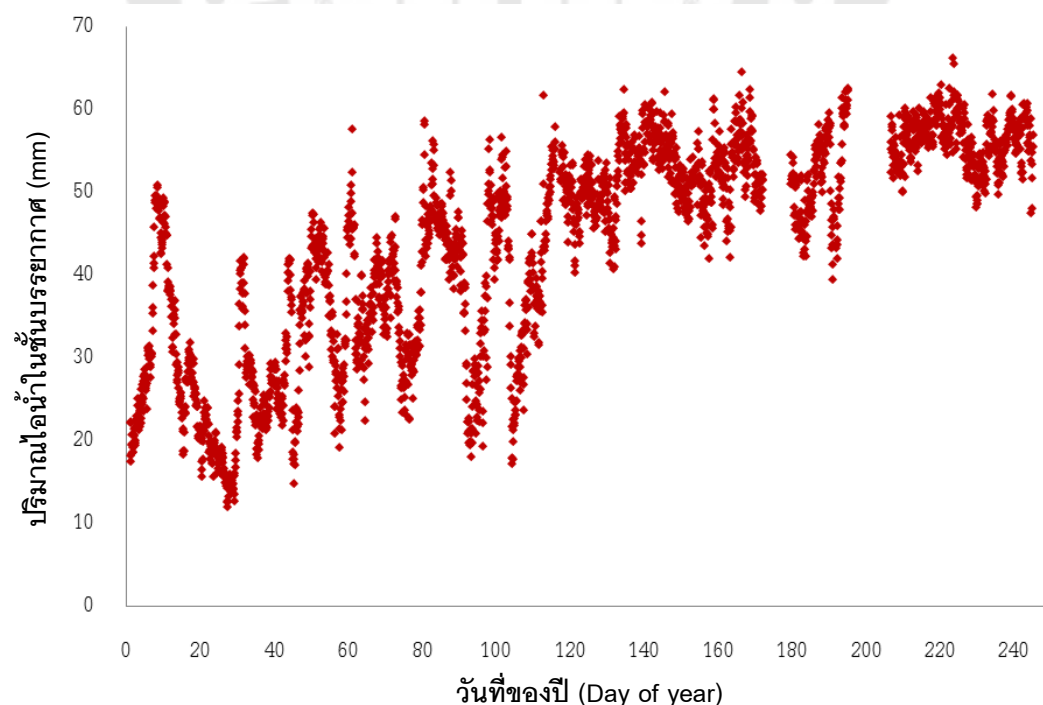
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	41.229	12.092	
วิธีที่ 2	41.204	14.094	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	0.025	2.002	7.647

4.2.5 สถานีนครสวรรค์

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีนครสวรรค์ ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูลแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 14 กรกฎาคม 2015 (วันที่ 1 ถึง 195 ของปี) ระยะเวลา 194 วัน มีจำนวนข้อมูล 2,214 ชุด และช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 18 มีนาคม 2015 ถึง วันที่ 3 มิถุนายน 2015 (วันที่ 206 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 40 วัน มีจำนวนข้อมูล 464 ชุด รวมระยะเวลาทั้งหมด 234 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2,678 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก วิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 12.59 มิลลิเมตร วันที่ 29 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 70.66 มิลลิเมตร วันที่ 22 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 44.99 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 11.92 มิลลิเมตร วันที่ 27 มกราคม 2015 มีค่าสูงสุด 66.23 มิลลิเมตร วันที่ 11 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 43.29 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 34 และภาพประกอบ 35)

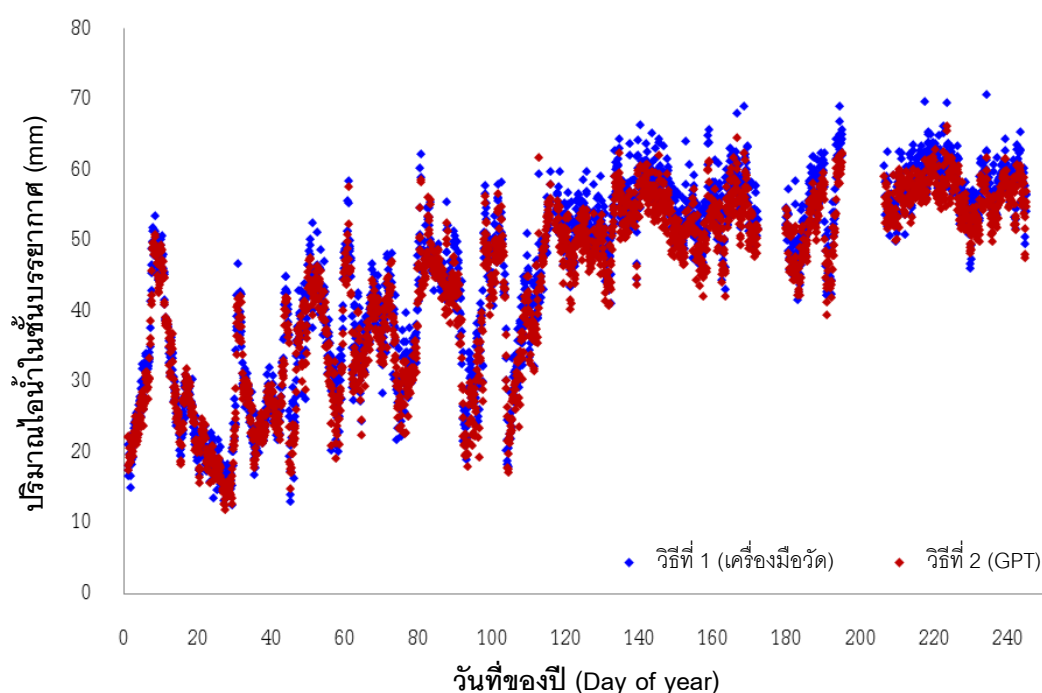


ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีนครสวรรค์



ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีนครสวรรค์

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และบางค่าของข้อมูลที่ค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน แต่ก็จะมีบางช่วงเวลาที่ข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 มีค่าสูงกว่ากลุ่มของข้อมูลโดยรวม (ภาพประกอบ 36)



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีนครสวรรค์

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 16) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.703 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

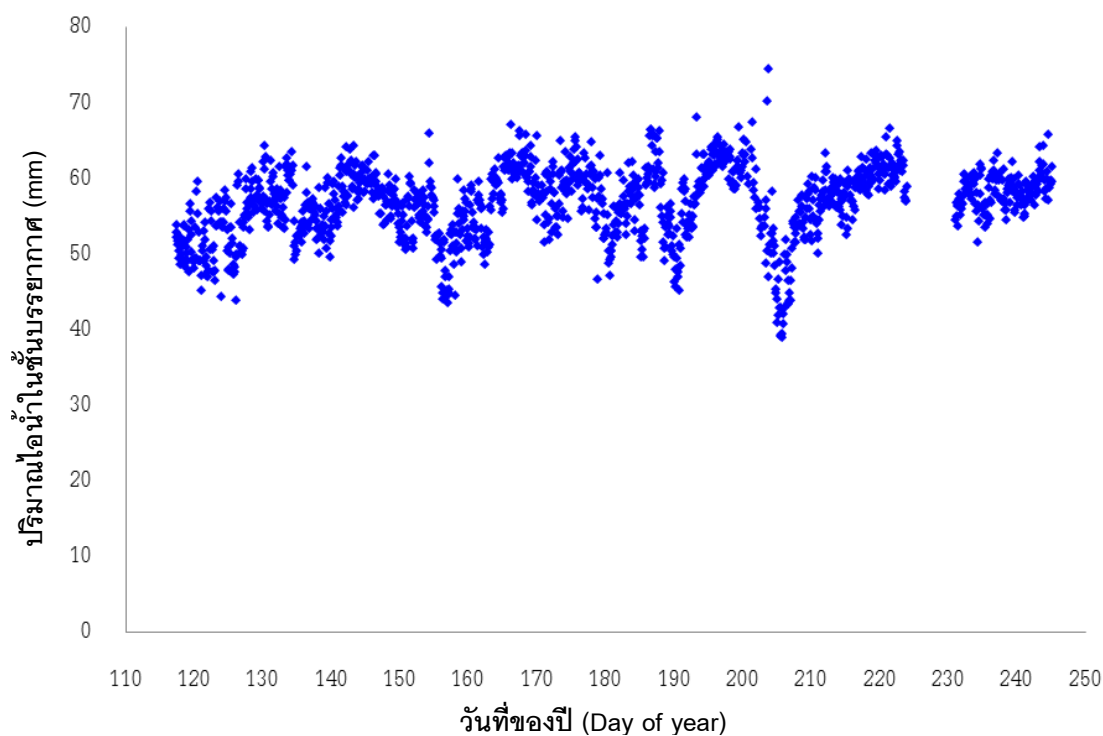
มาตรฐานอยู่ที่ 0.454 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.923 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 36)

ตาราง 16 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานี นครสวรรค์ (มม.)

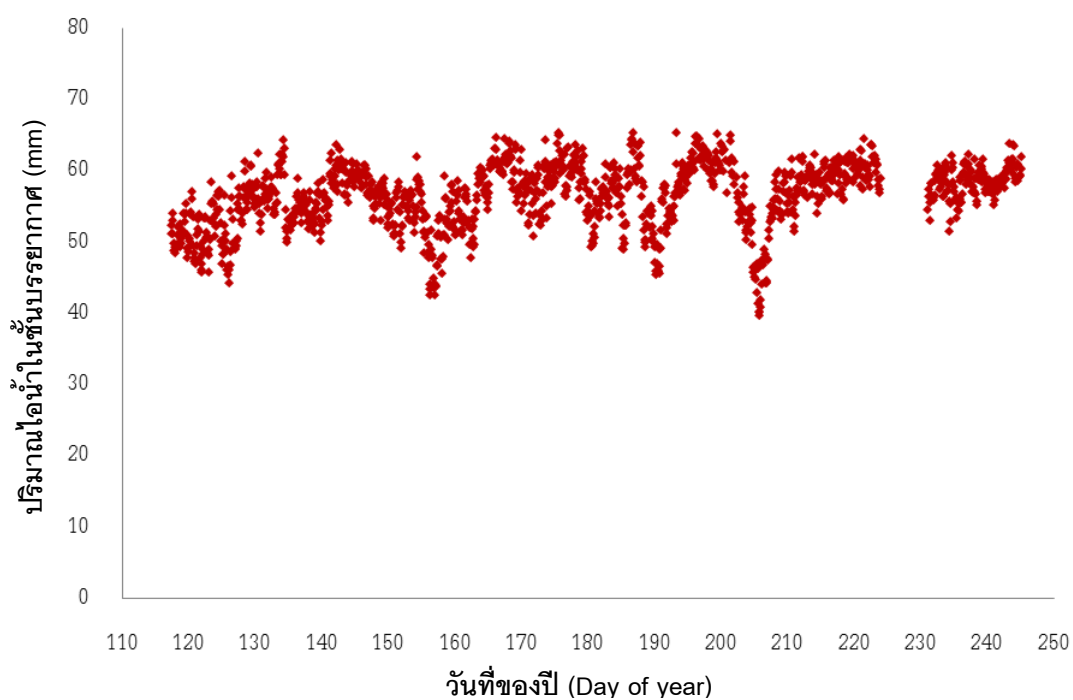
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	44.991	13.275	
วิธีที่ 2	43.288	12.821	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	1.703	0.454	2.923

4.2.5 สถานีประจวบคีรีขันธ์

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีประจวบคีรีขันธ์ ทำการประมาณค่าทุก ๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูล แบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 27 เมษายน 2015 ถึง วันที่ 11 สิงหาคม 2015 (วันที่ 117 ถึง 223 ของปี) ระยะเวลา 107 วัน มีจำนวนข้อมูล 1,253 ชุด และช่วงที่ 2 อยู่ระหว่าง วันที่ 19 สิงหาคม 2015 ถึง วันที่ 2 กันยายน 2015 (วันที่ 231 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 15 วัน มีจำนวนข้อมูล 168 ชุด รวมระยะเวลาทั้งหมด 122 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,421 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก วิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 38.95 มิลลิเมตร วันที่ 24 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 74.41 มิลลิเมตร วันที่ 22 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 56.78 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 39.56 มิลลิเมตร วันที่ 24 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 65.29 มิลลิเมตร วันที่ 12 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 56.44 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 37 และภาพประกอบ 38)

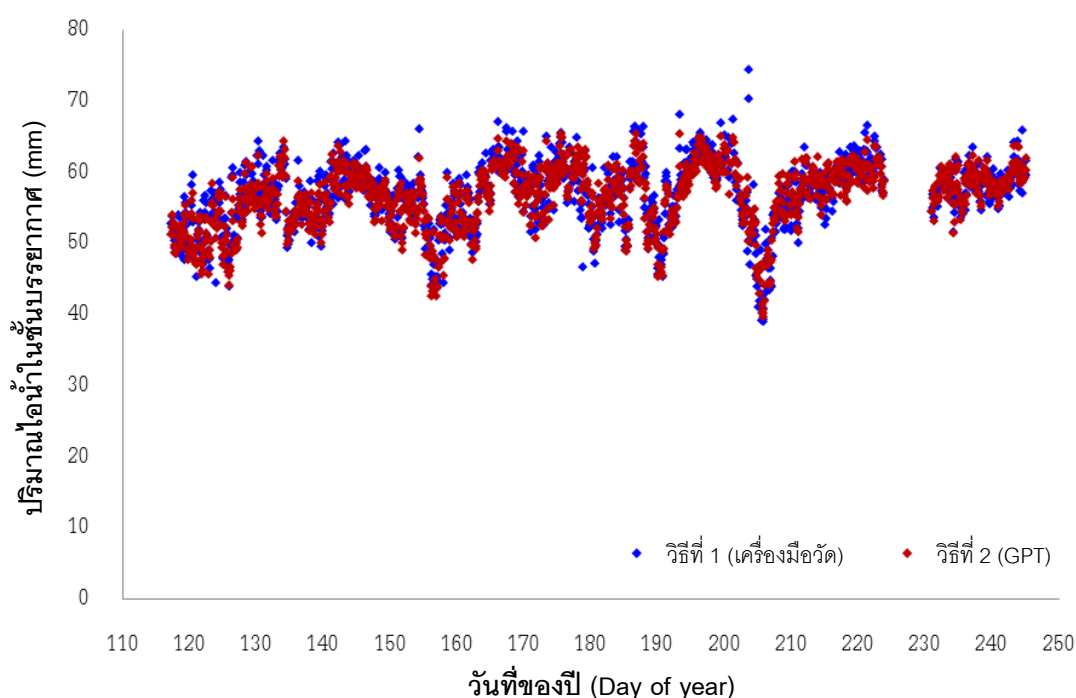


ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีประจวบคีรีขันธ์



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีประจวบคีรีขันธ์

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และบางค่าของข้อมูลที่ค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน แต่ก็จะมีบางช่วงเวลาที่ข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 มีค่าสูงกว่ากลุ่มของข้อมูลโดยรวม (ภาพประกอบ 39)



ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีประจวบคีรีขันธ์

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 17) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.365 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

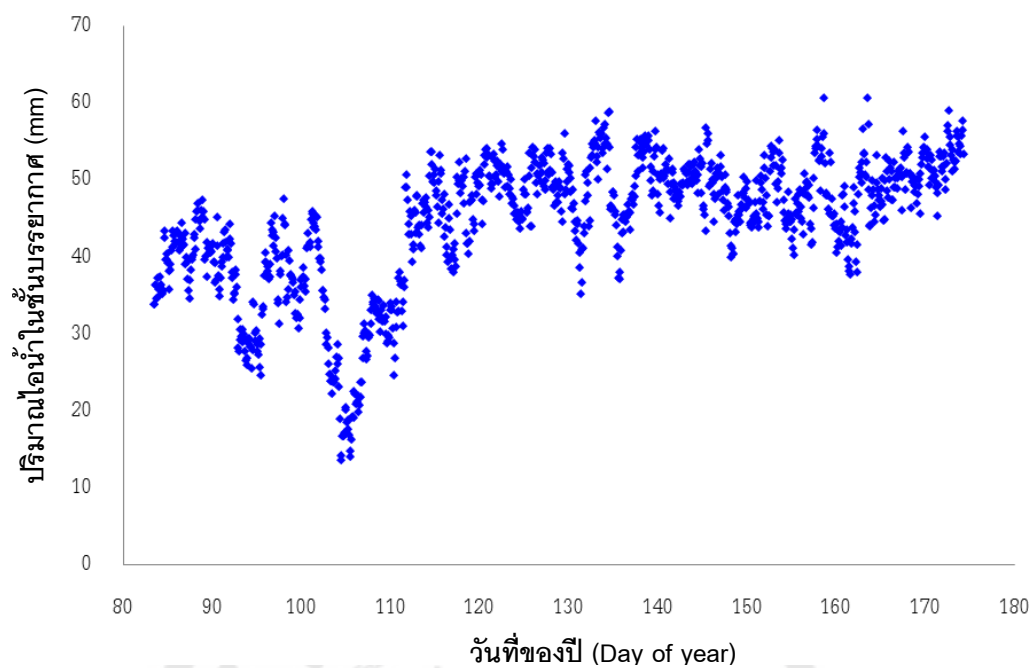
มาตรฐานอยู่ที่ 0.179 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 1.858 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 39)

ตาราง 17 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีประจวบคีรีขันธ์ (มม.)

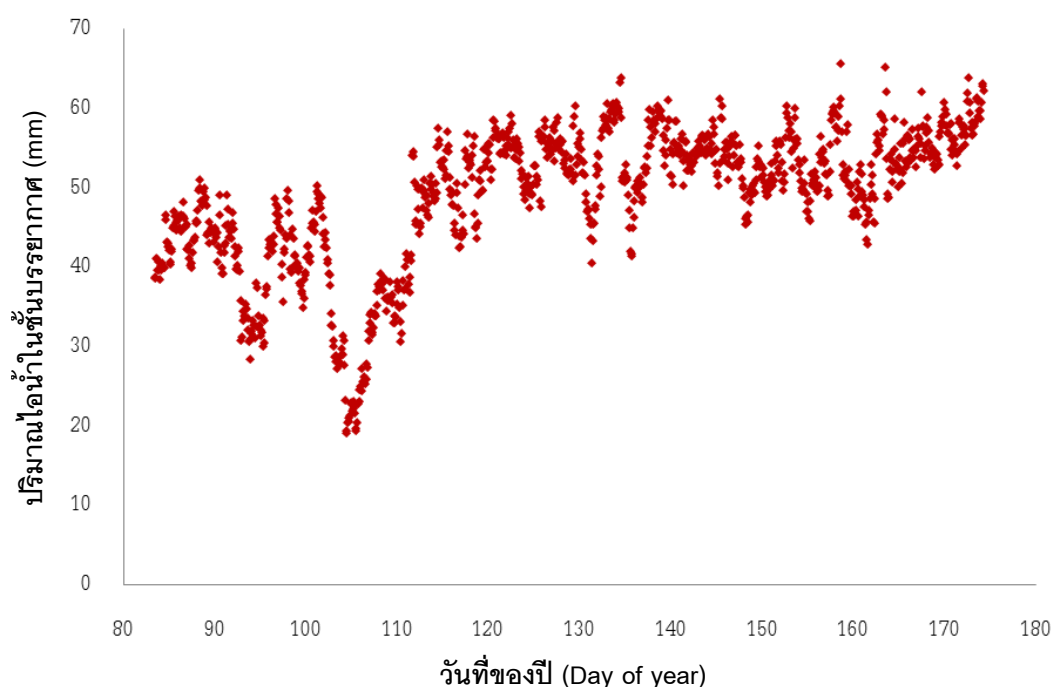
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	56.819	4.576	
วิธีที่ 2	56.454	4.397	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	0.365	0.179	1.858

4.2.6 สถานีศรีสะเกษ

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีศรีสะเกษ ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูลได้ผลอยู่ระหว่างวันที่ 24 มีนาคม 2015 ถึง วันที่ 23 มิถุนายน 2015 (วันที่ 117 ถึง 174 ของปี) ระยะเวลา 64 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,092 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 13.57 มิลลิเมตร วันที่ 14 เมษายน 2015 มีค่าสูงสุด 60.66 มิลลิเมตร วันที่ 7 มิถุนายน 2015 และมีค่าเฉลี่ย 44.35 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 18.98 มิลลิเมตร วันที่ 14 เมษายน 2015 มีค่าสูงสุด 65.49 มิลลิเมตร วันที่ 7 มิถุนายน 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 48.78 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 40 และภาพประกอบ 41)

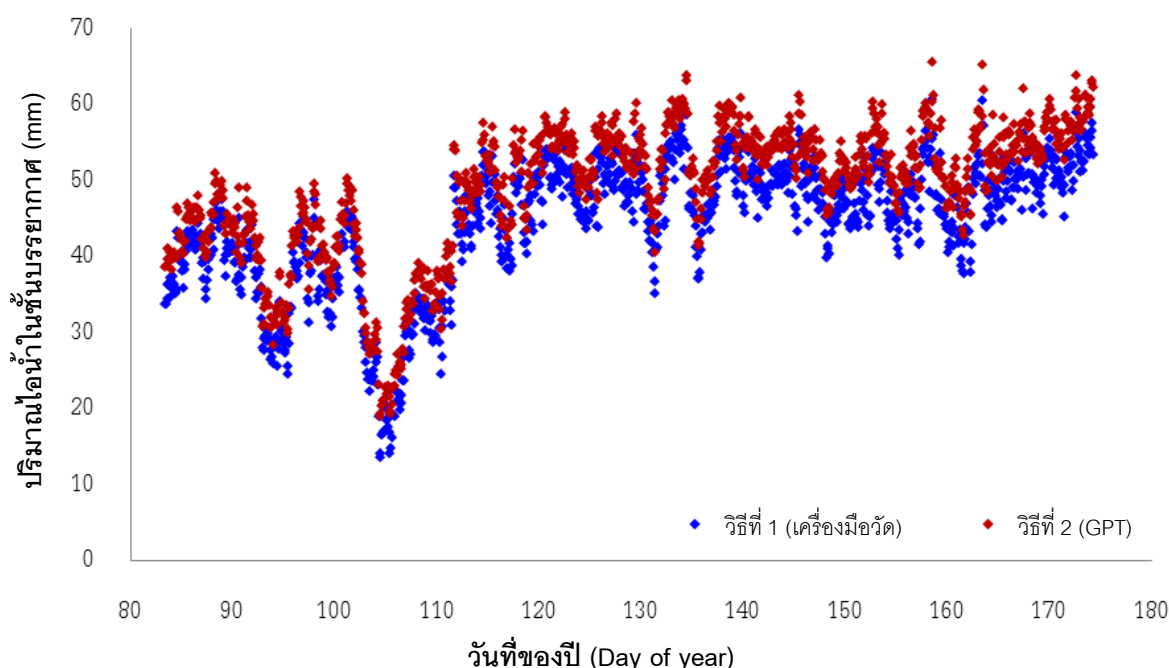


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีศรีสะเกษ



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าสำหรับสถานีนี้ในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 2 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 1 และบางค่าของข้อมูลก็ค่าเท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากสถานีอื่น แต่ลักษณะการกระจายตัวของทั้งสองชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 42)



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 18) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.434 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

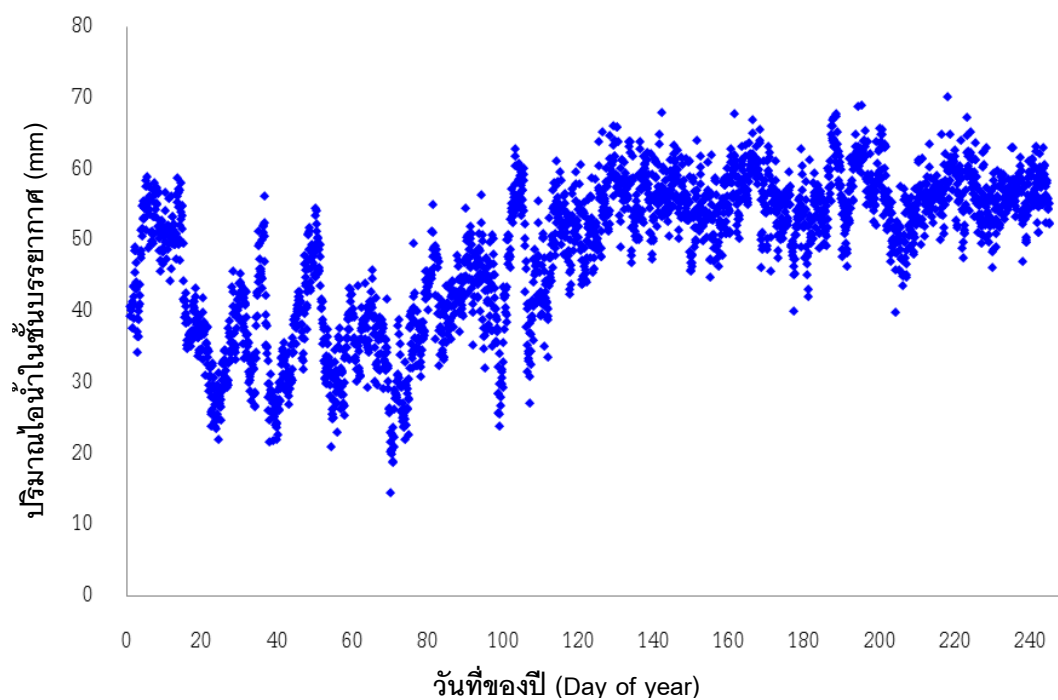
มาตรฐานอยู่ที่ 0.198 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 4.563 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 42)

ตาราง 18 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีศรีสะเกษ (มม.)

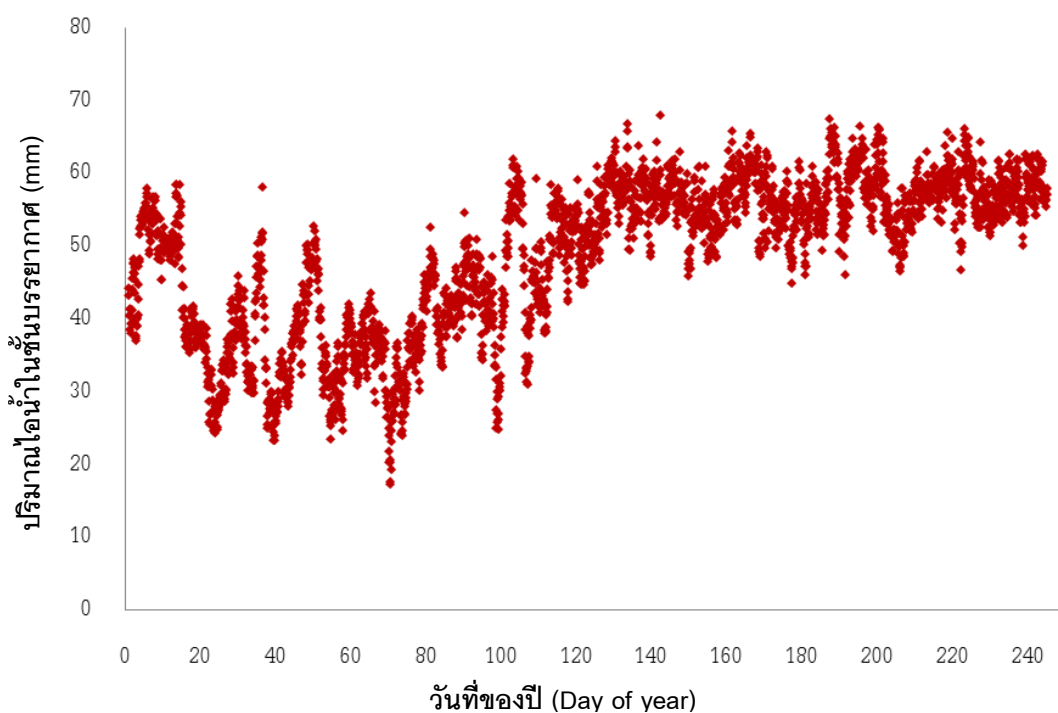
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	44.349	8.540	
วิธีที่ 2	48.783	8.738	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	-4.434	-0.198	4.563

4.2.7 สถานีสุราษฎร์ธานี

การหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีสุราษฎร์ธานี ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ได้ผลอยู่ระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2015 ถึง วันที่ 2 กันยายน 2015 (วันที่ 1 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 245 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2,923 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก วิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 14.35 มิลลิเมตร วันที่ 11 มีนาคม 2015 มีค่าสูงสุด 70.12 มิลลิเมตร วันที่ 6 สิงหาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 48.28 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 17.24 มิลลิเมตร โดยเป็นข้อมูลในวันที่ 11 มีนาคม 2015 มีค่าสูงสุด 67.85 มิลลิเมตร โดยเป็นข้อมูลในวันที่ 22 พฤษภาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 48.68 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 43 และภาพประกอบ 44)

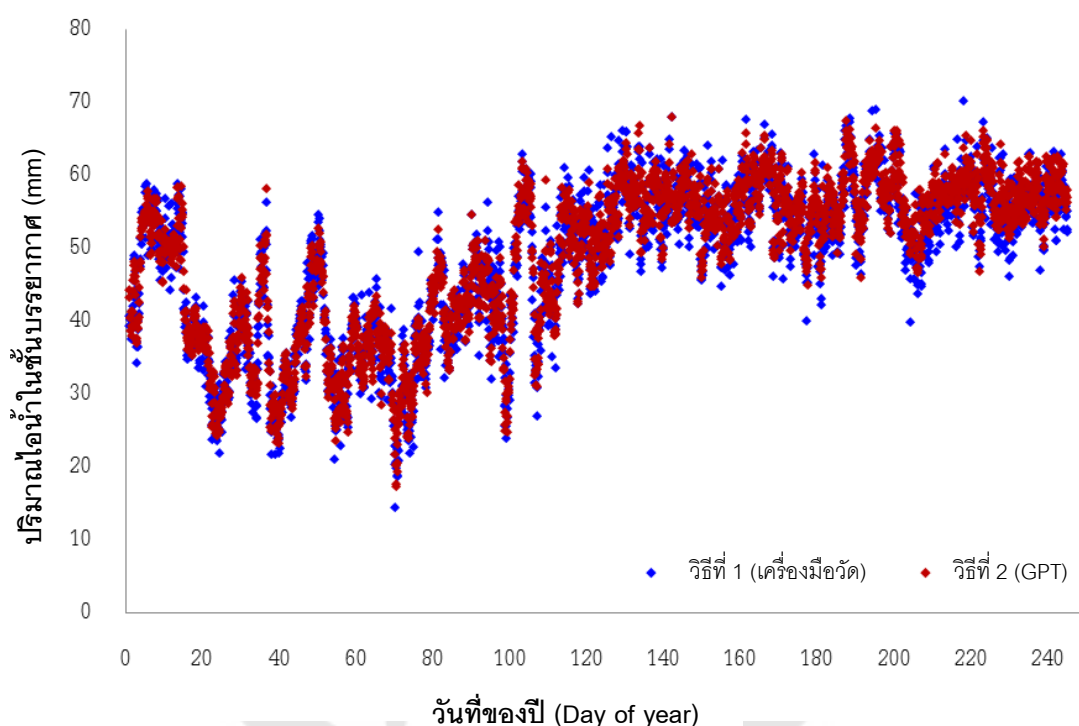


ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีสุราษฎร์ธานี



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ธานี

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าสำหรับสถานีนี้ในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีลักษณะการกระจายตัวข้อมูลออกจากค่ากลางของชุดข้อมูลมากกว่าวิธีที่ 2 (ภาพประกอบ 45)



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ธานี

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 19) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.398 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

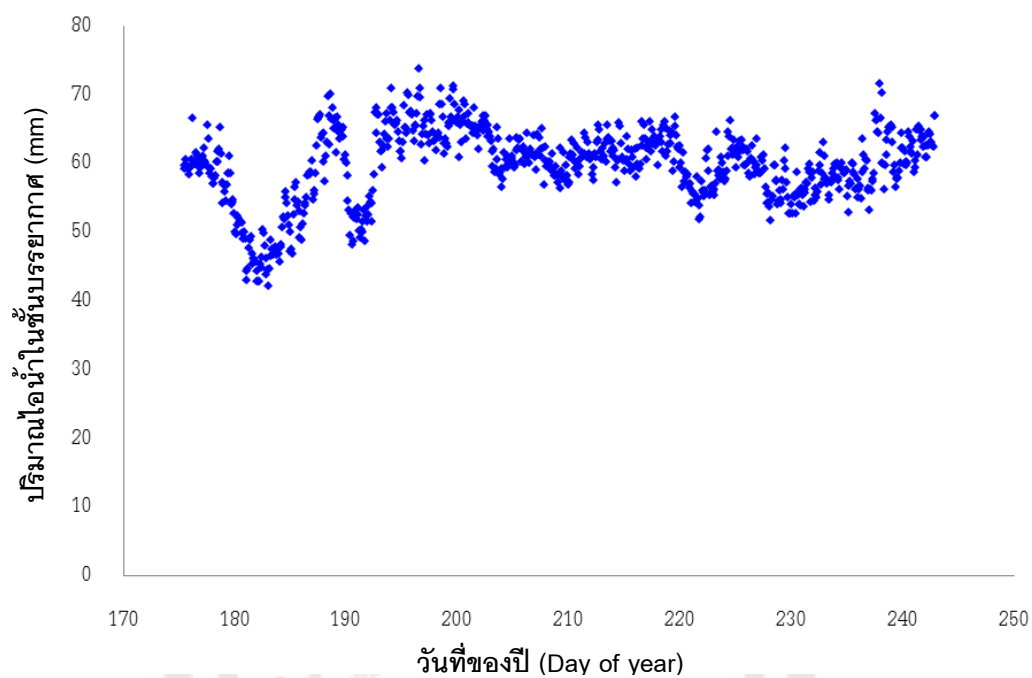
มาตรฐานอยู่ที่ 0.029 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.062 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 45)

ตาราง 19 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีสุราษฎร์ธานี (มม.)

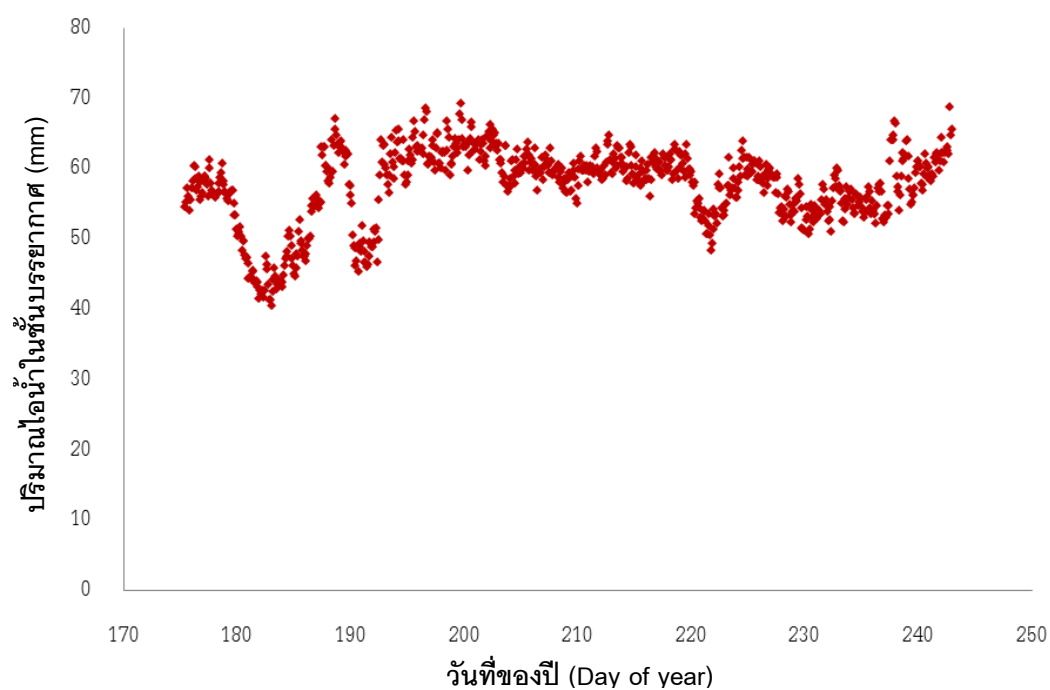
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	48.313	10.373	
วิธีที่ 2	48.711	10.402	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	0.398	0.029	2.062

4.2.8 สถานีอุดรธานี

ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีอุดรธานี ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง แต่เนื่องจากความพร้อมของข้อมูล ที่ต้องทำการตัดในส่วน of ค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวดิ่ง ที่เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในขณะที่ฝนตกจึงไม่สามารถทำการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้ โดยสามารถประมวลผลข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ได้ผลอยู่ระหว่างวันที่ 24 มิถุนายน 2015 ถึง วันที่ 2 กันยายน 2015 (วันที่ 175 ถึง 242 ของปี) ระยะเวลา 68 วัน จำนวนข้อมูลทั้งหมด 810 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่ย้ายไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 42.20 มิลลิเมตร วันที่ 2 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 73.68 มิลลิเมตร วันที่ 15 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 59.64 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 40.25 มิลลิเมตร วันที่ 2 กรกฎาคม 2015 มีค่าสูงสุด 69.21 มิลลิเมตร วันที่ 18 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 57.47 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 46 และภาพประกอบ 47)

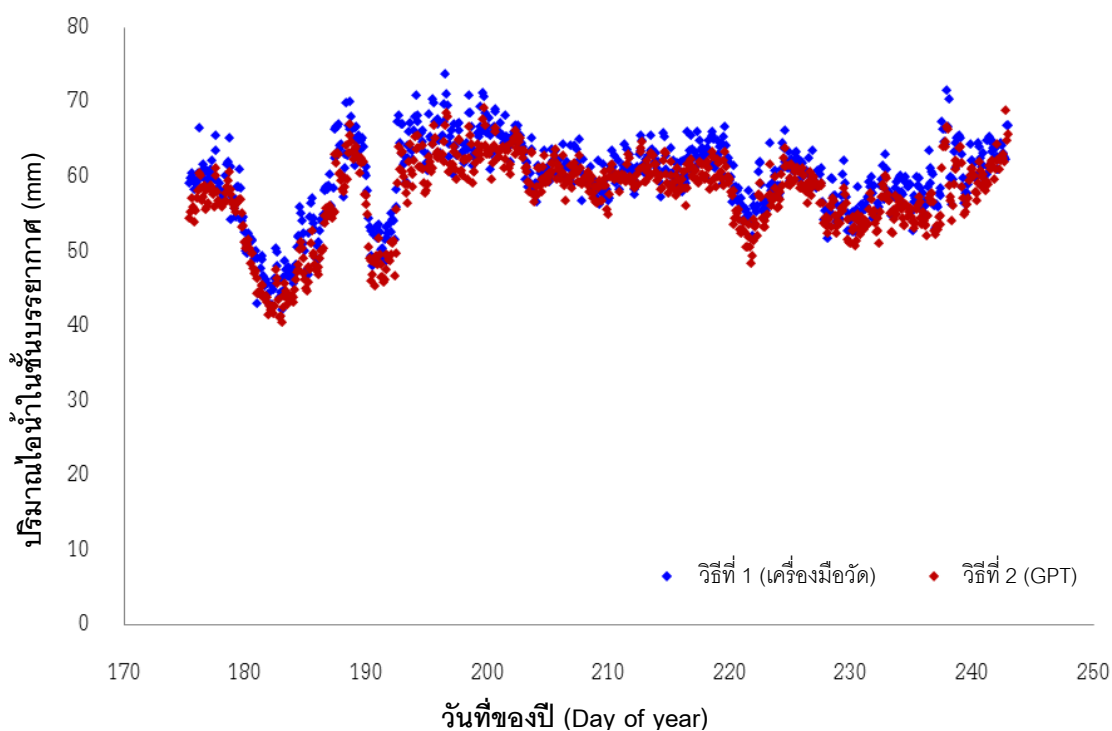


ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีอุดรธานี



ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 เกือบทั้งหมดของชุดข้อมูล (ภาพประกอบ 48)



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 20) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.162 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

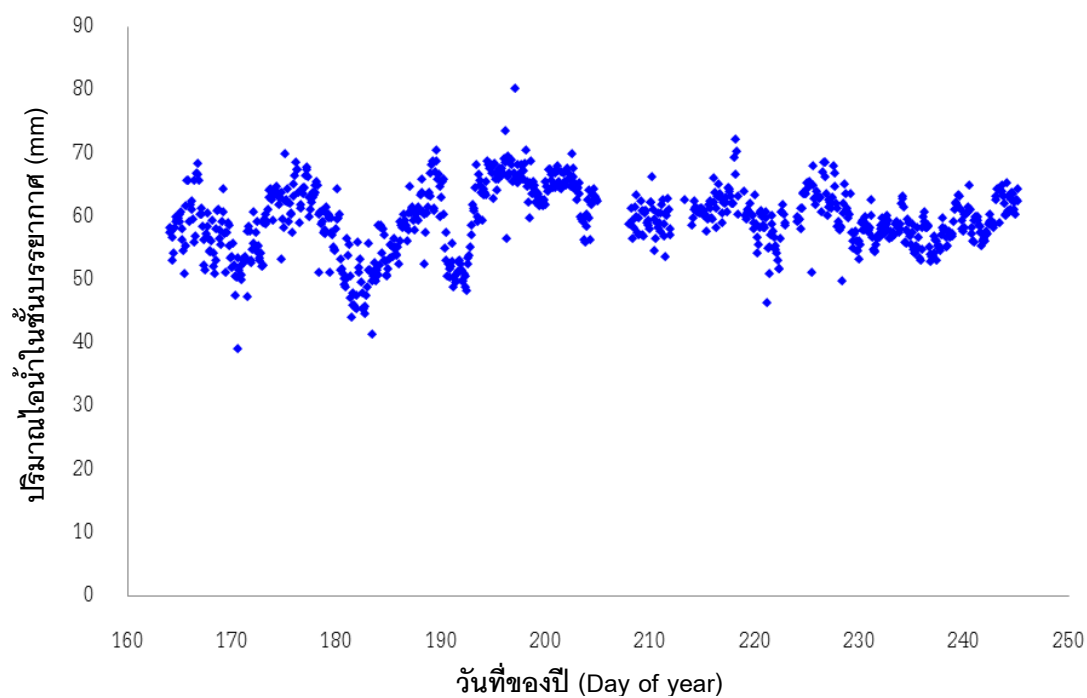
มาตรฐานอยู่ที่ 0.062 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.745 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 48)

ตาราง 20 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรธานี (มม.)

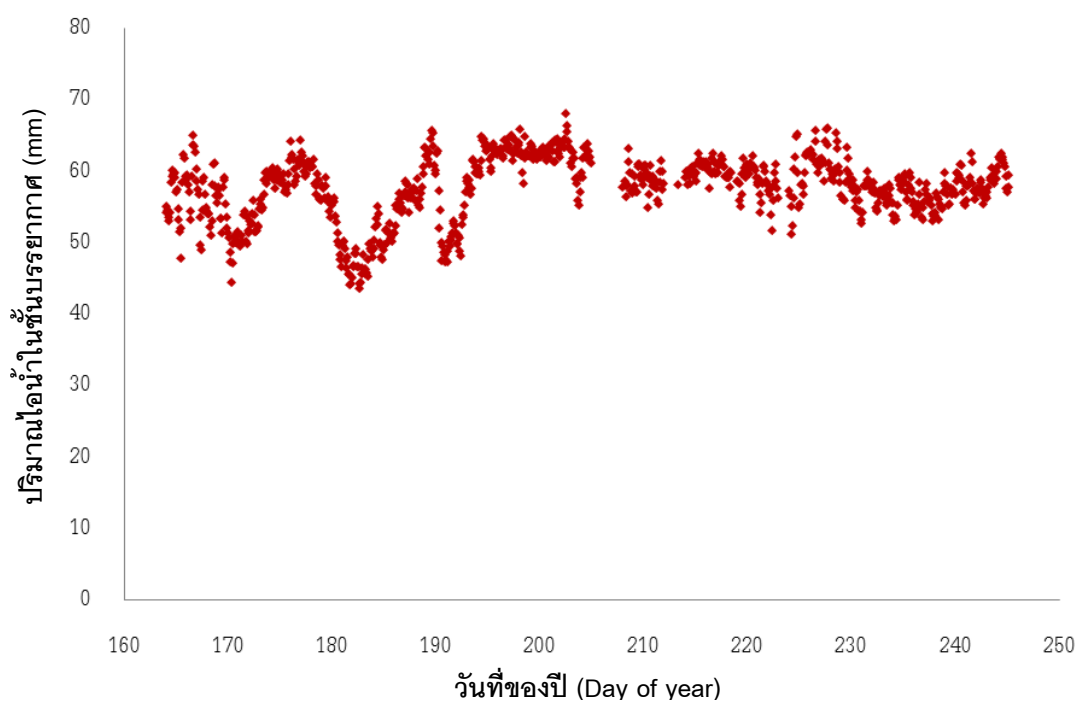
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด)	59.608	5.312	
วิธีที่ 2 (GPT)	57.461	5.374	
วิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด) - วิธีที่ 2 (GPT)	2.162	-0.062	2.745

4.2.10 สถานีอุดรดิตถ์

ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) ของสถานีอุดรดิตถ์ ทำการประมาณค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถประมวลผลข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ แบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 13 มิถุนายน 2015 ถึง วันที่ 23 กรกฎาคม 2015 (วันที่ 164 ถึง 204 ของปี) ระยะเวลา 41 วัน มีจำนวนข้อมูล 490 ชุด และช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 27 มิถุนายน 2015 ถึง วันที่ 2 กันยายน 2015 (วันที่ 208 ถึง 245 ของปี) ระยะเวลา 38 วัน มีจำนวนข้อมูล 398 ชุด รวมระยะเวลาทั้งหมด 79 วัน มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 888 ชุด นำมาแสดงผลลงบนกราฟ โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และแกน x เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกวิธีที่ 1 ค่าต่ำสุด 38.97 มิลลิเมตร วันที่ 19 มิถุนายน 2015 มีค่าสูงสุด 80.24 มิลลิเมตร วันที่ 16 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ย 59.50 มิลลิเมตร และวิธีที่ 2 มีค่าต่ำสุด 43.38 มิลลิเมตร วันที่ 1 มิถุนายน 2015 มีค่าสูงสุด 68.06 มิลลิเมตร วันที่ 21 กรกฎาคม 2015 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57.56 มิลลิเมตร (ภาพประกอบ 49 และภาพประกอบ 50)

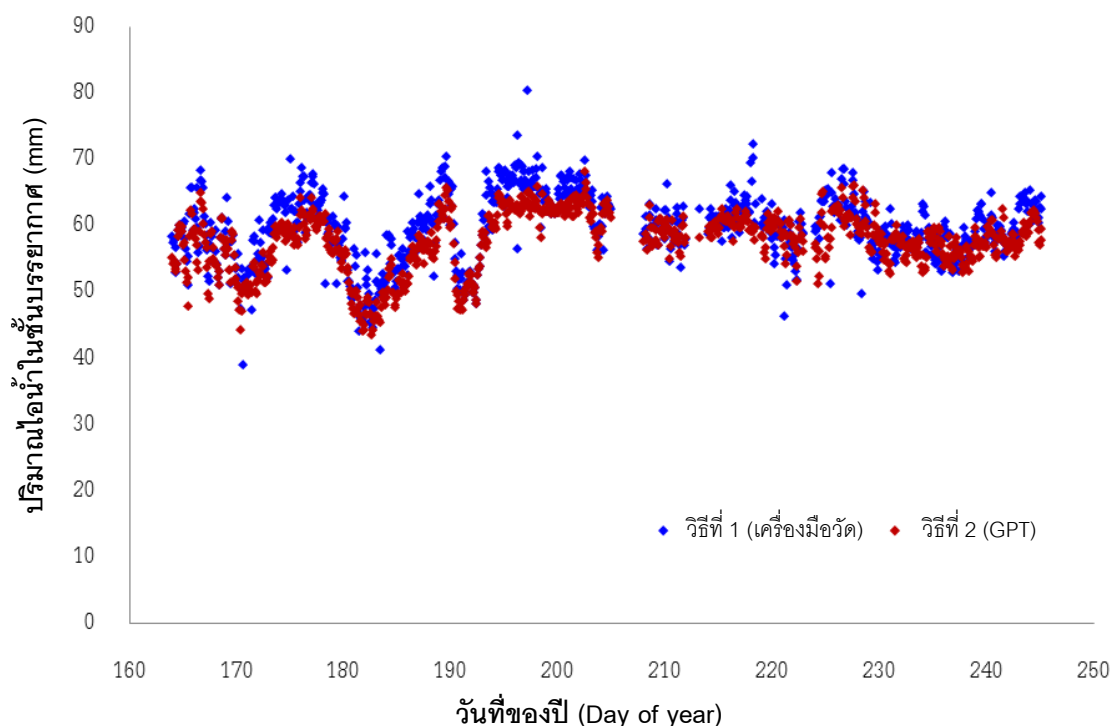


ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 1 สถานีอุตรดิตถ์



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงปริมาณน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบน
พื้นโลกโดยวิธีที่ 2 สถานีอุตรดิตถ์

นำข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มาแสดงข้อมูลลงบนกราฟร่วมกัน เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูล โดยกำหนดให้แกน Y เป็นจำนวนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และแกน X เป็นช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่าวิธีที่ 2 และมีบ้างค่าที่มีการกระจายตัวแบบผิดปกติ (ภาพประกอบ 51)



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด) และวิธีที่ 2 (GPT) สถานีอุตรดิตถ์

จากข้อมูลข้างต้นนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่ากลางของชุดข้อมูล ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่าการกระจายตัวของชุดข้อมูล และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) หรือการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 2 (ตาราง 21) โดยปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.956 มิลลิเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบน

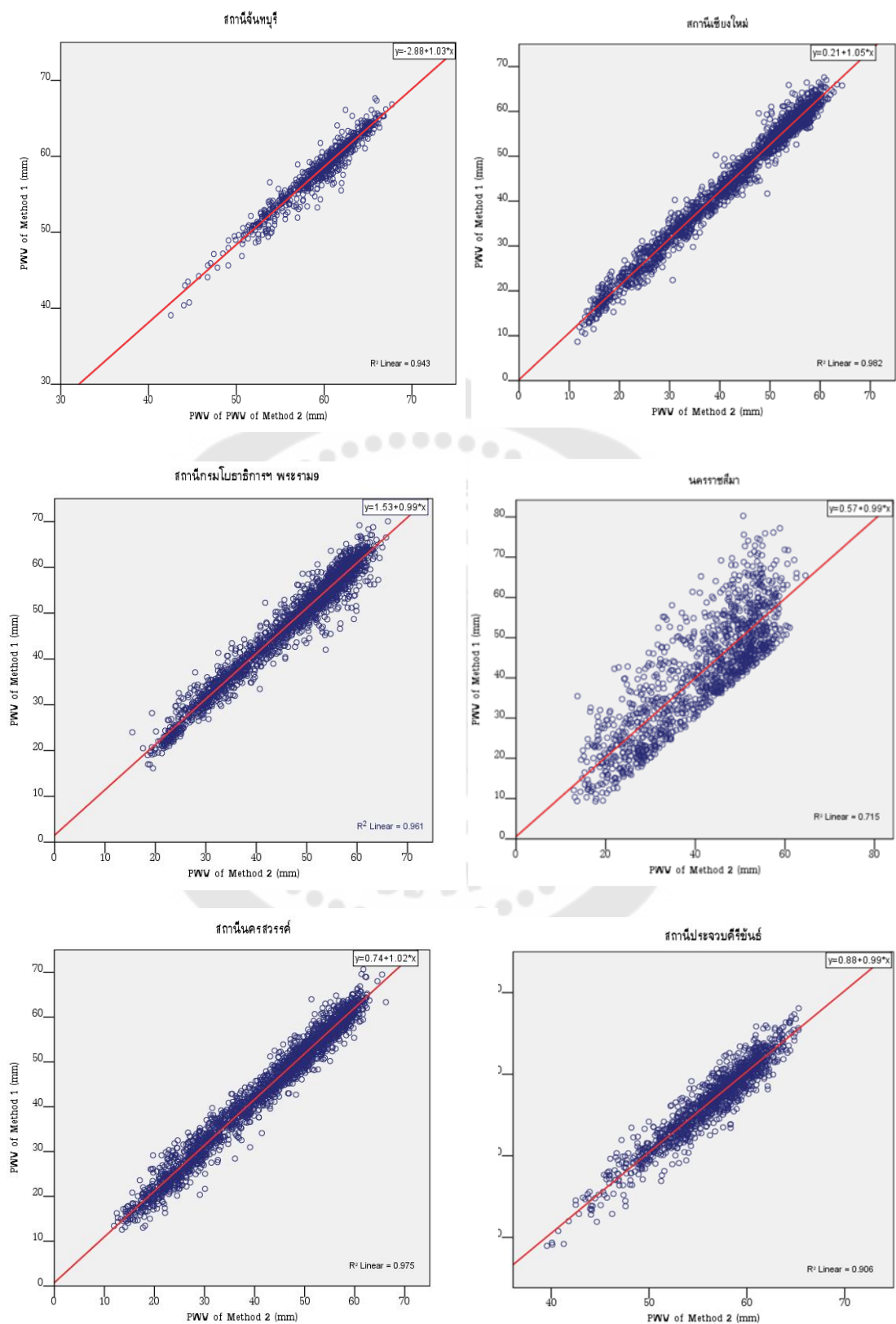
มาตรฐานอยู่ที่ 0.470 มิลลิเมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 3.398 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงลงบนกราฟ (ภาพประกอบ 51)

ตาราง 21 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สถานีอุดรดิตถ์ (มม.)

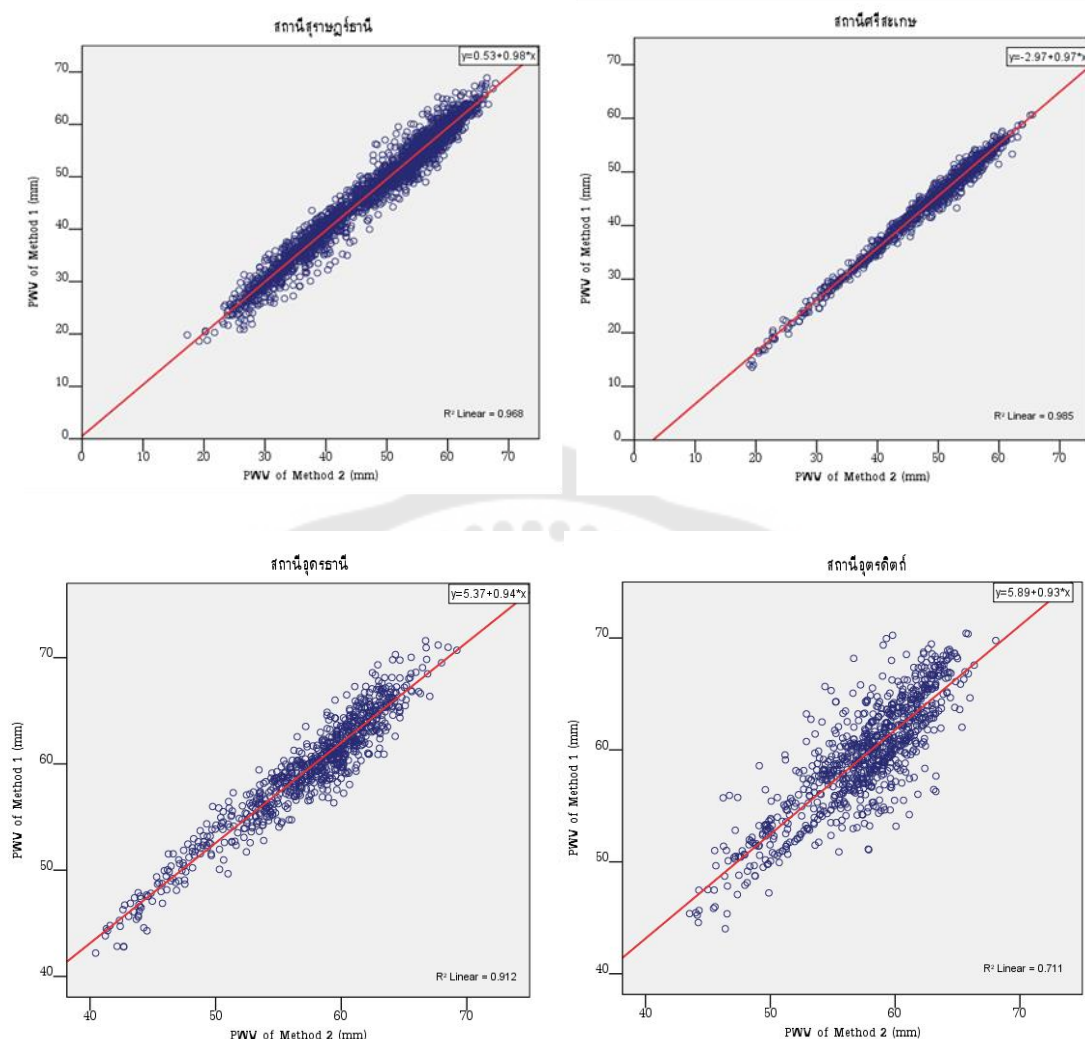
ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	RMSE
วิธีที่ 1	59.523	4.942	
วิธีที่ 2	57.567	4.472	
วิธีที่ 1 - วิธีที่ 2	1.956	0.470	3.398

4.3 การหาความสัมพันธ์ ของปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 (เครื่องมือวัด) และโดยวิธีที่ 2 (GPT) รายสถานี

ทำการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ โดยหาค่าความสัมพันธ์ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 จำนวน 10 สถานี ข้างต้น โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอย ตามผลการหาความสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากทั้ง 2 วิธี กับเครื่องมือไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ข้างต้นผลที่ได้คือค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 มีลักษณะความสัมพันธ์กับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก เครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มากกว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 แทนค่าในแกน X เป็นตัวแปรอิสระและใช้เป็นเกณฑ์ ในการประมาณค่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 ที่แทนค่าในแกน Y เพื่อดูลักษณะของความสัมพันธ์ และการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละสถานี สามารถแสดงดังนี้ (ภาพประกอบ 52)

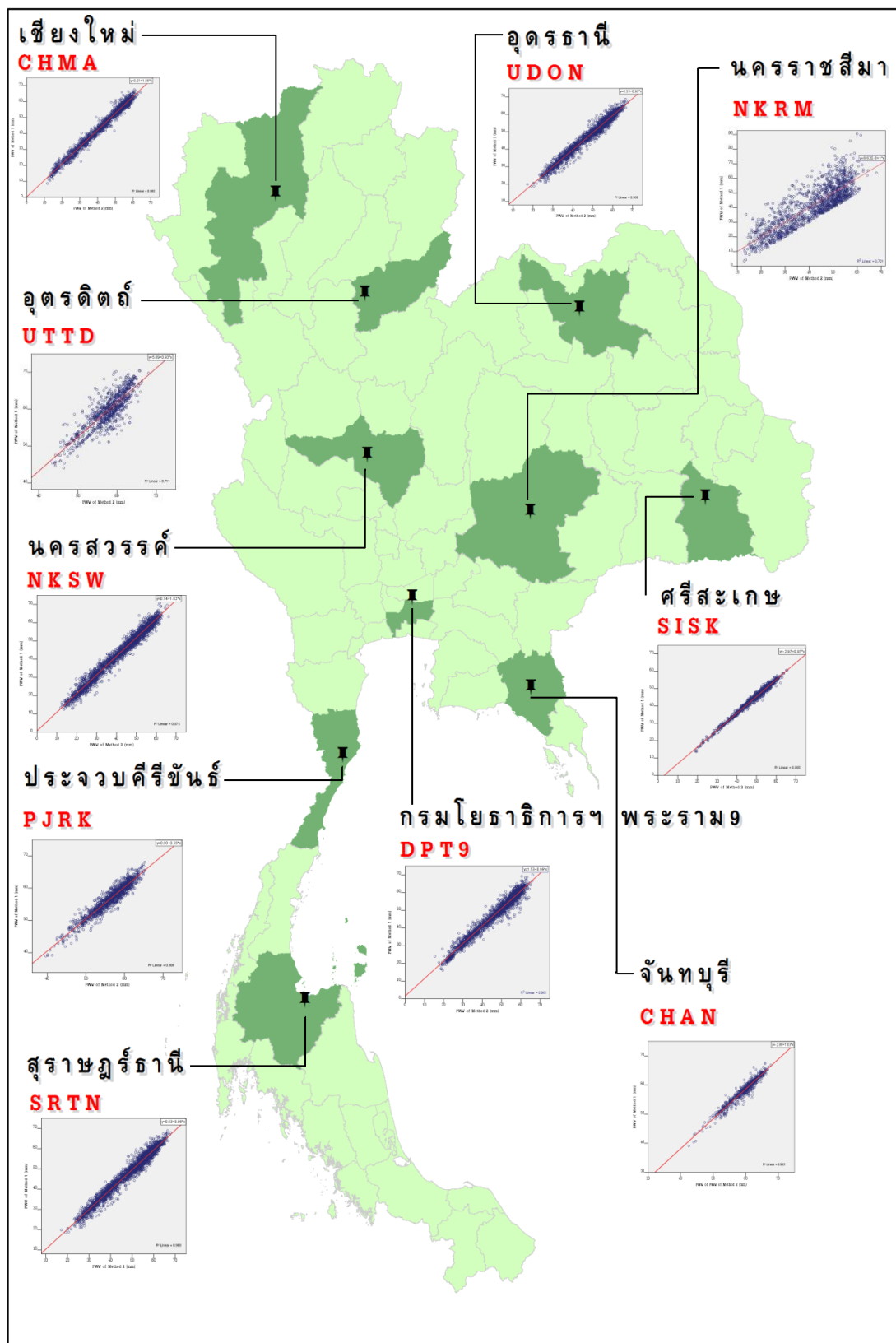


ภาพประกอบ 52 กราฟการวิเคราะห์หัตถถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณ
รังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1



ภาพประกอบ 52 กราฟการวิเคราะห์หัตถดอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณ
รังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 (ต่อ)

จากการวิเคราะห์หัตถดอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 พบว่าทั้ง 9 สถานี ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 มีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นเชิงบวก หรือความสัมพันธ์แบบแปรตามกัน (ภาพประกอบ 53) โดยข้อมูลที่ได้จากสถานีจันทบุรี ประจวบคีรีขันธ์ อุตรธานี และอุตรดิตถ์ จะมีช่วงในการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในช่วง 40-70 มิลลิเมตร ซึ่งมีช่วงที่แคบกว่า สถานีเชียงใหม่ กรมโยธาฯพระราม9 10-80 มิลลิเมตร โดยสามารถนำมาแสดงบนแผนที่ได้ดังนี้ (ภาพประกอบ 53)



ภาพประกอบ 53 แผนที่แสดงสถานีโครงข่ายหลักจังหวัดดาวเทียมฯ และกราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1

จากภาพประกอบ 53 แผนทีแสดงสถานีโครงข่ายหลักจังหวัดดาวเทียมฯ และกราฟการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 จะเห็นได้ว่าบริเวณตอนกลางของประเทศมีการกระจายตัวของความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 สูงกว่าบริเวณอื่น ได้แก่ สถานีนครราชสีมา และอุดรดิตถ์ โดยมีระดับของความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์กันของข้อมูลในระดับสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 อยู่ที่ 0.846 และ 0.843 ตามลำดับ และสถานีบริเวณโดยรอบ ได้แก่ จันทบุรี เชียงใหม่ กรมโยธาพระราม9 นครสวรรค์ประจวบคีรีขันธ์ ศรีสะเกษ สุราษฎร์ธานี และอุดรธานี มีการกระจายตัวของความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 ที่น้อยกว่า และมีระดับความสัมพันธ์กันสูงมาก มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 อยู่ระหว่าง 0.993 – 0.952 มีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากจำนวน 10 สถานี อยู่ที่ 0.95 ซึ่งให้เห็นถึงระดับของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 กับวิธีที่ 2 มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

นอกจากนี้จากการจับคู่ข้อมูลตามช่วงเวลาที่ทำกรวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 เพื่อดูการกระจายตัวของความสัมพันธ์ของข้อมูล และระดับของความสัมพันธ์ ยังได้สมการถดถอยระหว่างค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1 โดยค่าในแกน y คือค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 1 และค่าในแกน x คือค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 ซึ่งในอนาคตสมการนี้เราอาจสามารถนำมาพัฒนาต่อไปเพื่อให้เกิดวิธีการที่ให้ผลของข้อมูลมีความละเอียด ความถูกต้อง และแม่นยำเทียบเท่าเครื่องมือวัดโดยตรง โดยสามารถสรุปผลความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (ตาราง 23)

ตาราง 22 แสดงสมการถดถอย ค่าความสอดคล้องกับข้อมูล(R^2) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน และระดับของความสัมพันธ์ ของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยวิธีที่ 2 กับวิธีที่ 1

สถานี	สมการถดถอย	R^2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ระดับของความสัมพันธ์
จันทบุรี	$Y = 2.88 + 1.03X$	0.943	0.971	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
เชียงใหม่	$Y = 0.21 + 1.05X$	0.982	0.991	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
กรมโยธาฯ	$Y = 1.53 + 0.99X$	0.961	0.980	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
พระราม9				
นครราชสีมา	$Y = 8.62 + 1X$	0.721	0.846	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
นครสวรรค์	$Y = 0.74 + 1.02X$	0.975	0.987	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
ประจวบคีรีขันธ์	$Y = 0.88 + 0.99X$	0.906	0.952	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
ศรีสะเกษ	$Y = 2.97 + 0.97X$	0.985	0.993	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
สุราษฎร์ธานี	$Y = 0.53 + 0.98X$	0.968	0.984	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
อุดรธานี	$Y = 5.37 + 0.94X$	0.912	0.955	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
อุตรดิตถ์	$Y = 5.89 + 0.93X$	0.711	0.843	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ของสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลกแบบต่อเนื่อง กรมโยธาธิการและผังเมือง โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) จากผลการศึกษาที่ได้ สามารถนำมาสรุปผลได้ดังนี้

1. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) นำมาเปรียบเทียบ กับปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้ จากเครื่องมือไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ เพื่อดูความสัมพันธ์ ผลที่ได้คือ ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากวิธีที่ 2 มีความใกล้เคียง และมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้ จากเครื่องมือไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.945 ซึ่งมีความสัมพันธ์ในระดับสูง มากกว่า วิธีที่ 1 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพียง 0.798 ถึงแม้ว่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ วิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ในแต่ละสถานี พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แตกต่างกันอยู่ที่ 0.991 ถึง 0.843 มีระดับความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับสูงระดับ และสูงมาก เมื่อพิจารณาแต่ละค่าของข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จะเห็นว่าข้อมูลจากวิธีที่ 1 มีการกระจายตัว มากกว่าจากวิธีที่ 2 อย่างผิดปกติ เป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากค่าความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว ที่ได้จากเครื่องมือวัดมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ข้างเคียงที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องมือวัด หรืออุปกรณ์บางส่วน ของเครื่องมือวัดอาจเกิดการชำรุด

2. อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยการหาค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) และ

ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศ และอุณหภูมิโลก (วิธีที่ 2) นำมาเปรียบเทียบ และหาความสัมพันธ์กับปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้ จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ พบว่าค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก วิธีที่ 2 มีความใกล้เคียง และมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้ จากเครื่องวัดไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ มากกว่า วิธีที่ 1 ถึงแม้ว่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความใกล้เคียงกัน และมีระดับความสัมพันธ์อยู่ในระดับ มีความสัมพันธ์กันสูงมาก หรือในระดับสูง ก็ตาม เมื่อพิจารณาในแต่ละค่าของข้อมูลที่ได้จากวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จะเห็นได้ว่า ข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัด (วิธีที่ 1) มีการกระจายตัวอย่างผิดปกติ อาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด ในการวัดค่าความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว ที่อาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ข้างเคียงที่ส่งผลต่อเครื่องมือวัด หรืออุปกรณ์บางส่วนอาจเกิดการชำรุด ทำให้ในอนาคต การจัดตั้งสถานีรังวัดสัญญาณระบุตำแหน่งบนพื้นโลกแบบต่อเนื่อง อาจจะไม่มีความจำเป็นต้องทำการติดตั้ง เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวเพิ่มเติม ก็สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศได้

3. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ จากสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก จากสถานีโครงข่ายหลัก โดยใช้ข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากเครื่องมือวัดที่สถานี และข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวจากแบบจำลองความดันอากาศและอุณหภูมิโลก และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศที่ได้จาก 2 วิธี โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

3.1 การศึกษาครั้งนี้เป็นการหาปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจาก 2 วิธีเท่านั้น สำหรับการศึกษเพิ่มเติมในอนาคต อาจเพิ่มกระบวนการอื่น

3.2 การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลสัญญาณรังวัดระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ที่ในการศึกษาระยะเวลา 1 ปี เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล สำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตอาจเพิ่มระยะเวลาของข้อมูลที่นำมาใช้ในการประมวลผล

3.3 สำหรับการศึกษเพิ่มเติมในอนาคตอาจใช้ข้อมูลจากสถานีโครงข่ายหลักรังวัดดาวเทียมระบุตำแหน่งบนพื้นโลกแบบต่อเนื่อง ที่มีความพร้อมทางด้านข้อมูลสอดคล้องกัน จากหน่วยงานอื่นๆ เพื่อให้ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศ และให้ผลของงานวิจัยมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

บรรณานุกรม

- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., & Ware, R. H. (1994). GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology*, 33(3), 379-386. doi:10.1175/1520-0450(1994)033<0379:gmmzwd>2.0.co;2
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801. doi: 10.1029/92JD01517
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7). doi:10.1029/2005GL025546
- Boehm, J., & Schuh, H. (2007). Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis. *Journal of Geodesy*, 81(6), 403-408. doi:10.1007/s00190-007-0144-2
- Chen, B., & Liu, Z. (2014). *Analysis of Precipitable Water Vapor (PWV) data derived from multiple techniques: GPS, WVR, radiosonde and NHM in Hong Kong* (Vol. 303).
- Dupont, J.-C., Haeffelin, M., Drobinski, P., & Besnard, T. (2008). Parametric model to estimate clear-sky longwave irradiance at the surface on the basis of vertical distribution of humidity and temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D7). doi:10.1029/2007JD009046
- Essen, L., & Froome, K. D. (1951). The refractive indices and dielectric constants of air and its principal Constituents at 24 GHz. *Proc Phys Soc (London)*(B-64:862-875).
- Geng, J. (2011). Rapid integer ambiguity resolution in GPS precise point positioning.
- Goad, C. C. a. G., L. (1974). *A modified Hopfield tropospheric refraction correction model*. Sanfrancisco, California
- GPS SPS Performance Standard. (2008). GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard. 4th edition. Retrieved from [http: www.gps.gov](http://www.gps.gov)
- Heiskanen WA, M. H. (1967). Physical geodesy. Retrieved from

<https://rd.springer.com/article/10.1007%2FBF02525647?LI=true#citeas>

Hernandez-Pajares, M., Zomoza, J. M. J., Subirana, J. S., & Colombo, O. L. (2003).

Feasibility of wide-area subdecimeter navigation with GALILEO and Modernized GPS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9), 2128-2131. doi:10.1109/TGRS.2003.817209

Hinkle, D. E., William ,W. and Stephen G. J. (1998). *Applied Statistics for the Behavior Sciences*. 4th ed. New York :Houghton Mifflin.

Ivan Reguzzoni. (2015). GNSS meteorology. Retrieved from <http://www.g-red.eu/techniques-methods/gnss-meteorology/>

J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza , & M. Hernández-Pajares. (2011). Mapping of Niell. Retrieved from https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Mapping_of_Niell

Jing-nan, L., & Mao-rong, G. (2003). PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 8(2), 603. doi:10.1007/bf02899825

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. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.10.010>

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

NASA. (2017). Climate Roles of H₂O, CH₄ and CO. Retrieved from <https://tes.jpl.nasa.gov/mission/climateroles>

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

Paroscientific, I. (2014). Meteorological Measurement System. Retrieved from

<https://www.yumpu.com/en/document/view/37726419/met3a-fan-aspirated-meteorological-paroscientific-inc>

- Rata, S., Chalermchon, S., Panu, S., & Chaiyaporn, K. (2016). *Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AIRS and AMSU for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation*. Portland, Oregon.
- Saastamoinen, J. (1972) Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites. *Vol. 15. The Use of Artificial Satellites for Geodesy* (pp. 247).
- Satirapod. (2005). Impact of Different Tropospheric Models on GPS Baseline Accuracy: Case Study in Thailand. *Journal of Global Positioning Systems* (2005), 4, 36-40.
- SHI Hongkai, HE Xiufeng, & Junjie, W. (2017). Accuracy Analyses of Global Pressure and Temperature Model in China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 412.
- Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J., & Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS Data Processing, Vol. 1: Fundamentals and Algorithms* (Vol. 1).
- W. Marini, J. (1972). *Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile* (Vol. 7).
- WordlessTech. (2013). How GPS works. Retrieved from <https://wordlesstech.com/how-gps-works/>
- ธนพัทธ์ จงรักชอบ. (2559). การหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น. *Journal of RESGAT*, Volume 18, หน้า 34-42.
- ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลก และดาราศาสตร์ LESA. (2016). *ชั้นบรรยากาศ*. Retrieved from <http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/atm-structure>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร้อยเอกรวิรัช กองเมือง
วัน เดือน ปี เกิด	13 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสำรวจ) โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ประเทศไทย 2553
ที่อยู่ปัจจุบัน	49/127 หมู่บ้านส้มผักร ชัยพฤกษ์-วงแหวน หมู่6 ตำบลลำไผ อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110
ผลงานตีพิมพ์	Journal of RESGAT วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย เรื่อง การเปรียบเทียบการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ระหว่างการใช้เครื่องตรวจวัดความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ กับแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสากล