

แบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม AQUA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทย



นางสาวพรวิไลย์ ค่ายชัยภูมิ

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AQUA Satellite  
for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation in Thailand



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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม AQUA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทย

โดย

นางสาวพรวิไล ค่ายชัยภูมิ

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พลະการ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

.....กรรมการ

(ดร.ชัยโชค ไวกาษา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน)

พรวิสัย ค่ายชัยภูมิ : แบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม AQUA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทย (Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AQUA Satellite for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation in Thailand) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์, หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการหาแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากข้อมูลดาวเทียม AQUA ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี Extended Kalman Filter (EKF) เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor, PWV) จากสถานี GNSS Continuously Operating Reference Station (CORS) ในประเทศไทย

ในกระบวนการศึกษาประการแรก นำข้อมูลของ Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) จากดาวเทียม NASA's Aqua satellite (Aqua) ประมวลผลด้วยกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean Temperature,  $T_m$ ) จากวิธีการประมวลผลแบบ EKF โดยในงานวิจัยจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นระดับระดับประเทศ ระดับภูมิภาค และ 11 สถานี COR ทั่วประเทศ

กระบวนการศึกษาประการที่สอง นำแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นที่ได้นำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากการคำนวณการประมาณค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay, ZTD) ด้วยกระบวนการรังวัดจุดเดี่ยวความแม่นยำสูง (Precise Point Positioning, PPP) โดยมีค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศอ้างอิงที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU จากดาวเทียม Aqua

จากการศึกษาพบว่า การหารูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สามารถนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีความแม่นยำได้ในระดับบางสถานี ได้แก่ สถานี DPT9, PJRK, SISK, SOKA, SRTN และ UTTD แต่มีบางสถานีที่ไม่สามารถใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้ อย่างไรก็ตาม สถานี COR บางสถานีสามารถใช้ข้อมูล GNSS สำหรับประมวลผลเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้โดยไม่ต้องใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5770578021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: PRECIPITABLE WATER VAPOUR (PWV), MEAN TEMPERATURE(TM)

PHORNWILAI KHAICHAİYAPHUM: Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AQUA Satellite for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation in Thailand. ADVISOR: PROF. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D., pp.

This research aims to derive the mean temperature model in troposphere obtained from AQUA satellite using Extended Kalman Filter (EKF) approach to estimate Precipitable Water Vapour (PWV) in GNSS observables from GNSS Continuously Operating Reference Stations (GNSS CORS) in Thailand.

First is to study the observed AIRS and AMSU from AQUA satellites to determine the parameters in the mean temperature introduced in the tropospheric Zenith Wet Delay (ZWD) model using EKF strategy; hence, the mean temperature of the 11 studied GNSS CORS are derived. These temperature models represent the regional and national mean temperature model for Thailand.

Second is to apply the determined local mean temperatures to improve the estimation of PWV in the GNSS-derived PWV from Zenith Tropospheric Delay (ZTD) using Precise Point Positioning (PPP) algorithm. The estimated results are compared with the determined PWV using global mean temperature and PWV using local mean temperature where as the measured AMSU is used as reference values.

The results show that the derived local mean temperature model can be used to estimate PWV from GNSS observations as less bias occurs in the GNSS-derived PWV at estimated results at GNSS CORS, namely, DPT9, PJRK, SISK, SOKA, SRTN and UTTD. The derived global mean temperature model of the GNSS-derived PWV produces less bias than local mean temperature in PWV determinations of other GNSS CORS stations.

Department: Survey Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ แนวทาง การแก้ไข รวมไปถึงการแนะนำให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย จนสามารถทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ และผู้ปกครองของข้าพเจ้า ที่เป็นผู้สนับสนุนทุกด้านและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าตลอดมา ทั้งเรื่องค่าใช้จ่ายทุกอย่างที่ใช้ในงานทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนทำให้งานวิจัยบรรลุเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT) ที่เมตตาให้คำแนะนำ และแนวคิด รวมถึงแนวทางแก้ปัญหาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร.ภาณุ เศรษฐเสถียร จาก สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่เมตตาให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงการแก้ปัญหาในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนทำให้งานวิจัยบรรลุเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บรรเจิด พละการ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้คำแนะนำ และแนวคิด รวมถึงคำติชมต่างๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณกรมโยธาธิการและผังเมืองสำหรับข้อมูล GNSS ที่ข้าพเจ้าใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้บรรลุเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 .....	6
บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ .....	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	7
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา .....	7
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	8
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย .....	9
1.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย .....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 .....	10
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	10
2.1 ระบบนำหนด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS).....	10
2.2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 .....	26
วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 การดำเนินงานวิจัย.....	26

3.2 แผนผังการดำเนินงาน .....	31
3.3 การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F-test Statistic).....	32
บทที่ 4 .....	34
ผลการศึกษา .....	34
4.2 ผลจากการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิ เฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับสถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ สถานี UTTD .....	48
บทที่ 5 .....	58
อภิปราย สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผล สรุปผลการของดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆของ งานวิจัย ตลอดจนถึงกระบวนการงานวิจัยและผลที่ได้จากงานวิจัยนี้.....	58
5.1 อภิปรายผล .....	58
5.2 สรุปผล.....	59
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	60
.....	61
รายการอ้างอิง .....	61
ภาคผนวก ก. กราฟแสดง Correlation ของ 11 สถานี COR.....	65
ภาคผนวก ข. รายละเอียดการประมวลผลและจัดคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพส เฟียร์.....	94
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS โดย ใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 11 สถานี COR.....	96
ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น และแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล แบ่งตามระยะเวลา โดยกำหนดให้.....	97
ภาคผนวก ง. ตารางคุณลักษณะของดาวเทียม AQUA.....	103

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 106



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1 แสดงค่าพิกัดสถานีต่างๆของกรมโยธาธิการและผังเมือง.....	27
ตารางที่ 4. 1 แสดงค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R Square) ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) .....	43
ตารางที่ 4. 2 แสดงการทดสอบทางสถิติ 11 สถานี CORS ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU.....	47
ตารางที่ 4. 3 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี DPT9 .....	49
ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี PJRK.....	51
ตารางที่ 4. 5 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SISK.....	52
ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SOKA .....	54
ตารางที่ 4. 7 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SRTN.....	55
ตารางที่ 4. 8 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี UTTD.....	57



## สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 1. 1 แสดงตำแหน่งสถานี COR ทั่วประเทศ.....	8
รูปที่ 2. 1 แสดงภาพสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง .....	12
รูปที่ 2. 2 แสดงภาพดาวเทียม AQUA .....	13
รูปที่ 2. 3 แสดงส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของดาวเทียม AQUA.....	14
รูปที่ 2. 4 แสดงขั้นตอนการประมวลผลด้วย Extended Kalman Filter ที่เวลา $tk$ ใดๆ (ที่มา : กฤษฎา (2555)).....	18
รูปที่ 2. 5 แสดงการเปรียบเทียบการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก แบบจำลอง GAMIT และแบบจำลอง EHBT .....	23
รูปที่ 2. 6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลและอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล AIRS และ AMSU (ที่มา : Suwantong et al., (2016)).....	24
รูปที่ 3. 1 แสดงการรวบรวมข้อมูลจากดาวเทียม AQUA จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU .....	26
รูปที่ 3. 2 แสดงตัวอย่างข้อมูล AIRX2RET ที่ได้จากเครื่องรับ AIRS, AMSU .....	27
รูปที่ 3. 3 แสดงแบบจำลองการประมวลผล EKF และพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	28
รูปที่ 3. 4 แสดงการประมวลผลเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS.....	29
รูปที่ 3. 5 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	31
รูปที่ 4. 1 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 เดือน.....	35
รูปที่ 4. 2 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 ปี.....	36
รูปที่ 4. 3 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 2 ปี.....	36



รูปที่ 4. 18 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่า อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SOKA.....	53
รูปที่ 4. 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์ กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SRTN....	54
รูปที่ 4. 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่า อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SRTN .....	55
รูปที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์ กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี UTTD...	56
รูปที่ 4. 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่า อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี UTTD .....	57
รูปที่ ข. 1 แสดงรายละเอียดการขจัดค่าคลาดเคลื่อน ชัยพร (2015) .....	95
รูปที่ ง. 1 แสดงการทำงานของ AIRS สํารวจและเก็บข้อมูลอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ .....	104
รูปที่ ง. 2 แสดงการทำงานของ AMSU สํารวจและเก็บข้อมูลปริมาณความชื้น, เมฆในชั้น บรรยากาศโทรโพสเฟียร์.....	105



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบนำหนด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) ทำหน้าที่นำทางและให้ข้อมูลพิกัดบนผิวโลก โดยใช้อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณเพื่อคำนวณและแสดงค่าพิกัดต่างๆ ณ จุดตัวรับสัญญาณ ซึ่งได้แก่ ระบบดาวเทียมนำหน Global Positioning System (GPS) ที่สหรัฐอเมริกาเป็นผู้ดูแล และนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาระบบดาวเทียมนำหนขึ้นในประเทศต่างๆ เช่น ระบบนำหน GLONASS ที่เป็นของรัสเซีย Galileo เป็นดูแลโดยกลุ่มสหภาพยุโรป และ Beidou ของประเทศจีน อีกทั้งยังมีการพัฒนาขึ้นมาในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของดาวเทียมที่ดีขึ้น และไม่ว่าจะเป็นระบบดาวเทียมนำหนชนิดใดในข้อมูล GNSS จะประกอบไปด้วย ค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศต่างๆ ได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นต้น ซึ่งจำเป็นจะต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยเฉพาะค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งยังไม่สามารถขจัดได้อย่างสมบูรณ์ด้วยแบบจำลองในปัจจุบัน

สำหรับค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่จำเป็นจะต้องขจัดให้ได้อย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์พิกัดที่มีความถูกต้องมากขึ้นจากการประมวลผลข้อมูล GNSS ยังสามารถนำมาประยุกต์ในด้านอุตุนิยมวิทยาได้ โดยการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้ (Precipitable Water Vapor, PWV) โดยปริมาณไอน้ำในบรรยากาศคือปริมาณของไอน้ำในแนวตั้ง ในหน่วย  $Kg/m^2$  หรือเป็นความสูงเทียบเท่ากับน้ำในสถานะของเหลวในหน่วยมิลลิเมตร ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานอุตุนิยมวิทยาในการคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนในอนาคต ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำจาก GNSS โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศซึ่งการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GNSS นั้นจะคำนวณได้จากแบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้ง (Zenith Total Delay, ZTD) ที่มีความแม่นยำสูงที่ได้จากการประมวลผลรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง หรือ Precise Point Positioning, PPP (P. Héroux, 2001) จะประกอบไปด้วย ส่วนเปียก (ZWD) และส่วนแห้ง (ZHD) โดย ZWD เป็นองค์ประกอบของการประมาณค่าไอน้ำในบรรยากาศที่ได้ การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะแม่นยำหรือไม่ นั้น แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีผลอย่างยิ่งที่ใช้ในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

นอกจากนี้ยังได้มีข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จาก ZTD ของ GNSS เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ แต่ทว่ายังไม่มีความแม่นยำสำหรับประเทศไทย ทั้งนี้จึงควรมีการหาแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นในประเทศไทย และในปัจจุบันได้มีดาวเทียมที่สามารถหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้จากเครื่องวัดที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยตรงและประหยัดค่าใช้จ่ายจากการใช้ข้อมูลในเว็บไซต์ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) เรียกเครื่องวัดทั้ง 2 เครื่องวัดนี้ว่า Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) จากดาวเทียม AQUA ที่ดูแลโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติหรือนาซ่า National Aeronautics and Space Administration (NASA) ซึ่งทั้ง 2 เครื่องวัดนี้เป็นการทำงานและบันทึกข้อมูลร่วมกัน มีทั้งข้อมูลของค่าอุณหภูมิและค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ทำให้สามารถนำข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากดาวเทียมมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประเทศไทยและนำมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสัญญาณ GNSS ได้ดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับในประเทศไทย ด้วยวิธีการ Extended Kalman Filter เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเชิงเส้นที่ประมวลผลได้จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าอุณหภูมิพื้นผิวจากข้อมูลดาวเทียม AQUA ด้วยวิธีการ EKF จากนั้นนำแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้มาทดสอบการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (PWV) ทั้ง 11 Continuously Operating Reference Stations, CORS ทั่วประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อหาแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 11 สถานี COR สำหรับประเทศไทย สำหรับนำไปใช้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ให้มีความแม่นยำขึ้น

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

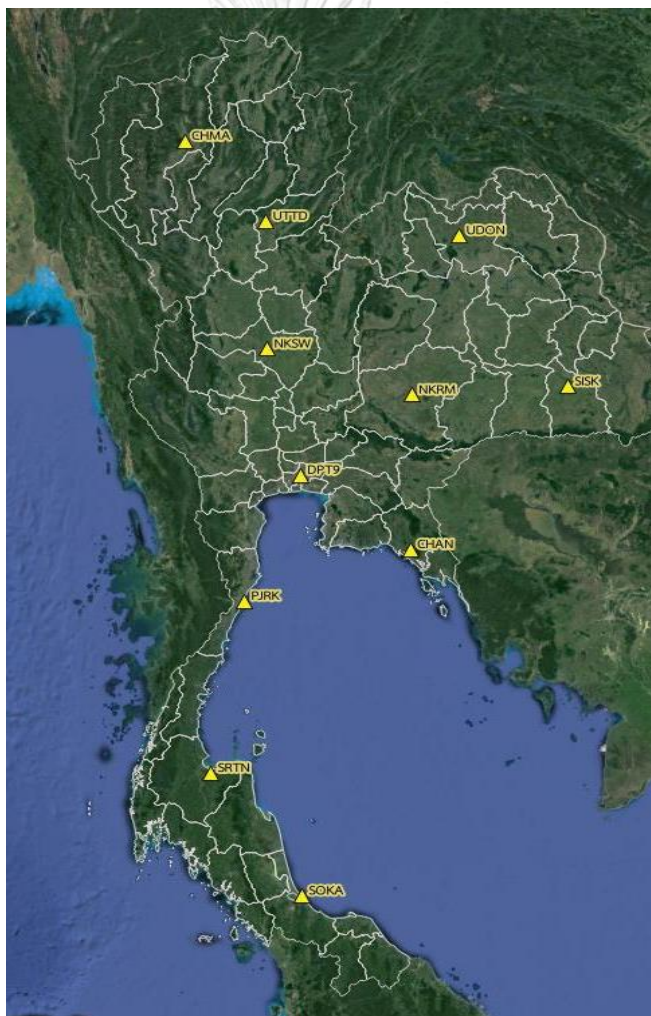
### 1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับ 11 สถานี COR ทั่วประเทศ แบ่งออกเป็น ระดับจังหวัด ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ นำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS เพื่อให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีความแม่นยำขึ้น

### 1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษาทั้งหมด 11 สถานี COR จากกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยจะมีทั้งหมด 11 สถานีทั่วประเทศ ได้แก่ จันทบุรี (CHAN) เชียงใหม่ (CHMA) กรุงเทพมหานคร (DPT9) นครราชสีมา (NKRM) นครสวรรค์ (NKSW) ประจวบคีรีขันธ์ (PJK) ศรีสะเกษ (SISK) สงขลา (SOKA) สุราษฎร์ธานี (SRTD) อุตรธานี (UDON) และ อุตรดิตถ์ (UTTD)

- พื้นที่ทำการวิจัยที่ 11 สถานี COR ทั่วประเทศ โดยรอบพื้นที่สถานีเพื่อหลีกเลี่ยงสำหรับบางสถานีที่มีอาณาเขตติดต่อกับทะเลซึ่งจะเป็นผลทำให้กระทบกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงบริเวณโดยรอบสถานี



รูปที่ 1. 1 แสดงตำแหน่งสถานี COR ทั่วประเทศ

### 1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3.3.1 ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม AQUA ที่มีการเก็บข้อมูลร่วมกันระหว่าง AIRS และ AMSU ชื่อว่า “AIRX2RET” สำหรับพื้นที่ประเทศไทย ณ ข้อมูลระยะเวลา 1 เดือน (มกราคม 2014) ข้อมูลระยะเวลา 3 เดือน (มกราคม-มีนาคม 2014) ข้อมูลระยะเวลา 6 เดือน (มกราคม-มิถุนายน 2014) ข้อมูลระยะเวลา 1 ปี (มกราคม-ธันวาคม 2014) และข้อมูลระยะเวลา 2 ปี (มกราคม 2014 - ธันวาคม 2015)

1.3.3.2 ข้อมูลที่นำมาประมวลผลอีก 1 ชุดคือ ข้อมูล GNSS ที่ดูแลโดยกรมโยธาธิการ และผังเมืองทั้งหมด 11 สถานี COR ระยะเวลาของข้อมูล เดือนมกราคม 2557 ถึง ธันวาคม 2558

### 1.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย ได้แก่ Positioning and Navigation Data Analyst (PANDA) ซึ่งพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยวูฮั่น ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และ Matrix Laboratory (MATLAB) คือ โปรแกรมสำหรับการคำนวณและแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ โปรแกรม MATLAB สร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสมการเชิงเส้น

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับสถานี COR ในประเทศไทยได้ เพื่อนำมาประมาณค่าค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (Precipitable Water Vapour, PWV) ที่แม่นยำขึ้นสำหรับมาประยุกต์ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยา

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบนำหนด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS)

ระบบนำทางด้วยดาวเทียม Global Navigation Satellite System (GNSS) เป็นระบบดาวเทียมนำหนที่ให้ข้อมูลพิกัดบนพื้นผิวโลก ที่มีความต่อเนื่องในการกระจายสัญญาณแบบหลายความถี่ (L-Band) ซึ่ง L1 มีความยาวคลื่นประมาณ 19 เซนติเมตร L2 มีความยาวคลื่นประมาณ 24.4 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาความถี่เพิ่มขึ้นสำหรับดาวเทียมรุ่นใหม่คือ L2C ที่เพิ่มในความถี่ L2 และอีกหนึ่งความถี่คือ L5 ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 25.5 เซนติเมตร ปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมเกิดขึ้นหลายระบบเช่น GLONASS ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS โดยการทำงานของระบบดาวเทียมนำหนจะส่งสัญญาณจากดาวเทียมส่งมายังอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณเพื่อนำค่ามาหาพิกัดต่างๆ เป็นต้น (Shuanggen Jin, 2014)

##### ระบบดาวเทียม GPS

ระบบดาวเทียม GPS เป็นระบบดาวเทียมนำหนอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยทั่วไปแล้วระบบดาวเทียม GPS จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนอวกาศ (Space segment) เป็นส่วนของดาวเทียม ส่วนควบคุม (Control segment) เป็นส่วนควบคุมภาคพื้นซึ่งดูแลการทำงานของดาวเทียมนำหน และส่วนผู้ใช้ (User segment) เป็นผู้ที่ต้องการใช้ตำแหน่ง ซึ่งระบบดาวเทียมนำหน GPS ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

##### - ส่วนอวกาศ (Space Segment)

ส่วนอวกาศประกอบด้วยดาวเทียมและสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียมมีทั้งหมด 24 ดวง ซึ่งโคจรอยู่ในวงโคจร 6 ระนาบแต่ละระนาบมีดาวเทียม 4 ดวง ดาวเทียมแต่ละดวงจะมีนาฬิกาที่มีความแม่นยำสูง โดยทุกระนาบทำมุมกับระนาบศูนย์สูตร 55 องศาและมีมุมระหว่างกัน 60 องศา โดยที่มีวงโคจรเหนือพื้นโลกประมาณ 20,000 กิโลเมตร และมีคาบการโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 58 นาทีที่คลื่นสัญญาณที่ดาวเทียมจีเอสเอสส่งออกมาในปัจจุบันนั้นเป็นคลื่นวิทยุที่มีสองความถี่คือ L1 มีความถี่ 1572.42 เมกะเฮิรตซ์ ความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร L2 มีความถี่ 1227.60 เมกะเฮิรตซ์ ความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร และ L5 มีความถี่ 1176.45 เมกะเฮิรตซ์ ความยาวคลื่น 25.48 เซนติเมตร คลื่นวิทยุดังกล่าวนั้นถูกผสมผสานรหัสและข้อมูลดาวเทียมไปกับคลื่นหรือเรียกสั้นๆว่าการกล้ำสัญญาณ (Modulation) โดยคลื่น L1 นั้นจะถูกกล้ำสัญญาณด้วย

C/A แต่คลื่น L2 จะถูกกล้ำสัญญาณเพียงรหัส P ส่วนข้อมูลดาวเทียมจะมีทั้งในคลื่น L1 L2 และ L5 โดยการนำข้อมูลการนำหนดาวเทียม (Navigation message) จะประกอบไปด้วยข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (Satellite ephemerides) ค่าแก้เวลาดาวเทียม (Satellite clock correction) และสถานภาพของดาวเทียม (Satellite status)

- ส่วนควบคุมภาคพื้น (Control Segment)

ส่วนควบคุมประกอบไปด้วยสถานีภาคพื้นดินที่จำเป็นต่อการติดตามดาวเทียมทั่วโลก ที่ดูแลโดยกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา งานส่วนควบคุมภาคพื้นนั้นจะเป็นการคำนวณวงโคจรดาวเทียมและการดูแลและควบคุมส่วนอวกาศ คำนวณของวงโคจรดาวเทียมและข้อมูลค่าแก้เวลาดาวเทียม โดยที่ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมจะเป็นค่าพิกัดฉากแบบคาร์ทีเซียนบนพื้นหลักฐาน WGS84

- ส่วนผู้ใช้ (User Segment)

ส่วนของผู้ใช้นั้นสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ในงานหรือสิ่งต่างๆในชีวิตประจำวันได้ เช่น การหาตำแหน่ง การติดตาม ซึ่งการประมวลผลของข้อมูลมีประสิทธิภาพมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นฝ่ายทหารหรือประชาชน เป็นต้น

ระบบดาวเทียม GLONASS

ระบบดาวเทียม GLONASS, Global Navigation Satellite System ที่ถูกพัฒนาโดยสหภาพโซเวียต แต่ในปัจจุบันสหภาพโซเวียตนั้นได้ล่มสลายจึงถูกดูแลโดยประเทศรัสเซีย อยู่ห่างจากพื้นโลกโดยประมาณ 25,500 กิโลเมตร สถานีภาคพื้นดินส่วนกลางตั้งอยู่ที่กรุงมอสโกและสถานีติดตามดาวเทียมจะกระจายอยู่ทั่วประเทศ มีโคจรรูปทรงรีที่มีมุมเอียงประมาณ 64.8 องศาและมีคาบวงโคจรประมาณ 11 ชั่วโมง 15 นาที ส่วนประกอบของดาวเทียมจะมี 3 ส่วนดังระบบนำทางดาวเทียม GPS ข้างต้น โดยดาวเทียมใช้สัญญาณ 2 คลื่นความถี่ของสัญญาณวิทยุ L1 และ L2 (Shuanggen Jin, 2014)

### 2.1.1 ข้อมูล GPS

ข้อมูล GPS สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลตั้งแต่ เดือนมกราคม 2557 ถึง เดือน ธันวาคม 2558 รวมระยะเวลา 2 ปี โดยจะใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ LEICA รุ่น GRX1200 PRO ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้เพียง GPS ระบบเดียว โดยใช้เสาอากาศ LEIAT504 แบบ Choke-Ring Antenna รับสัญญาณตลอด 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลทุก 5 วินาที และมุมกั้นขอบฟ้า 10 องศา แบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง



รูปที่ 2. 1 แสดงภาพสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องของกรมโยธาธิการและผังเมือง

(ที่มา : <http://www.dpt.go.th/>)

### 2.1.2 AQUA Satellite, AIRS and AMSU

ดาวเทียม AQUA (Nasa's Aqua Satellite) หรือชื่อเดิมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า EOS PM-1 เป็นดาวเทียมทางวิทยาศาสตร์ที่ดูแลโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (Nasa-Center international Earth Observing System) ลักษณะวงโคจรใกล้ขั้วโลก (Near Polar Orbit) ซึ่งดาวเทียม AQUA จะใช้สำรวจและสำหรับเก็บข้อมูลเกี่ยวกับวงจรรน้ำของโลก ได้แก่ การระเหยจากมหาสมุทร ปริมาณไอน้ำในอากาศ เมฆ ฝน ความชื้นในดิน ปริมาณน้ำแข็งที่ปกคลุมทั้งทะเลและพื้นดิน นอกจากนี้ยังสามารถวัดพืชที่ปกคลุมดิน แพลงก์ตอนพืช สารอินทรีย์ในมหาสมุทรและพื้นดิน และอุณหภูมิของน้ำ เป็นต้น



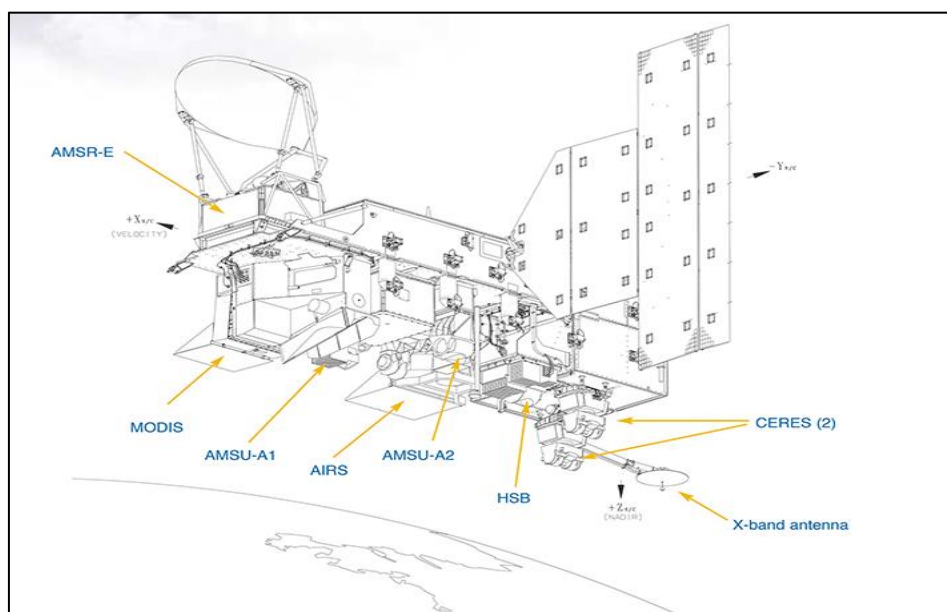
รูปที่ 2. 2 แสดงภาพดาวเทียม AQUA

ที่มา : <http://aqua.nasa.gov/content/about-aqua>

โดยดาวเทียม AQUA มีการสำรวจและให้บริการข้อมูลทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A), Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E), Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) and Humidity Sounder for Brazil (HSB) แต่ข้อมูลที่สามารถประยุกต์ใช้กับ GPS เพื่อใช้หาปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศได้ใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ของดาวเทียม AQUA จำนวน 2 ข้อมูลคือ



Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) และ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A) โดยดาวเทียมนี้จะสำรวจครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกและเก็บข้อมูล 2 รอบต่อวันเป็นการเก็บข้อมูลที่มีลักษณะการทำงานร่วมกันระหว่างอินฟราเรดและคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลของ AIRS และ AMSU ได้ทุกประเทศทั่วโลก ข้อมูลที่อยู่ร่วมกันทั้งสองชนิดมีชื่อเรียกว่า AIRX2RET สามารถดาวน์โหลดฟรีได้จากเว็บไซต์ (<https://mirador.gsfc.nasa.gov/>) ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ



รูปที่ 2. 3 แสดงส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของดาวเทียม AQUA (ที่มา: <https://aqua.nasa.gov/content/instruments>)

Atmospheric Infrared Sounder, AIRS ประกอบไปด้วยช่วงคลื่นอินฟราเรดจำนวน 2,378 ช่วงคลื่นและช่วงคลื่นที่มองเห็นและใกล้อินฟราเรดจำนวน 4 ช่วงคลื่น เพื่อตรวจจับความเร็วของการวัด ความแม่นยำ และความถูกต้อง เป็นการสำรวจแบบ cross-track ตามแนวบินของดาวเทียม ความเอียงจากจุดต่ำสุดประมาณ 49 องศา ครอบคลุมตามแนวยาวซึ่งกวาดพื้นที่ประมาณ 700 กิโลเมตร และสแกนซ้ำประมาณทุกๆ 8 วินาที โดยที่ช่วงคลื่นอินฟราเรดจะถูกแบ่งเป็นความยาวของแต่ละช่วงคลื่นและถูกส่งกลับมายังดาวเทียมและส่งมายังภาคพื้นดิน สามารถคำนวณอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำในชั้นบรรยากาศ โดยเครื่องมือ AIRS เป็นเครื่องมือที่มีคุณภาพสูงที่สุดจากหนึ่งในสามของเครื่องมือทั้งหมดนอกเหนือจาก AMSU และ HSB ในการดูบรรยากาศชั้นที่ต่ำกว่าสตราโตสเฟียร์ ความละเอียดของพื้นที่ในแนวตั้งจะอยู่ที่ประมาณ 13.5 กิโลเมตร

Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU ประกอบด้วยช่วงคลื่นไมโครเวฟจำนวน 15 ช่วงคลื่น ที่ออกแบบเพื่อรองรับอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยการวัดจะแบ่งออกเป็น AMSU-A1 มี 12 ช่วงคลื่นตั้งแต่ 50-58 GHz สำหรับดูดซึมออกซิเจนที่ให้ค่าอุณหภูมิ อีกจำนวน 1 ช่วงคลื่นหรือ 89 GHz วัดอุณหภูมิพื้นผิวและความชื้นในบรรยากาศ ส่วน AMSU-A2 และอีก 2 ช่วงคลื่น ที่ 23.8 GHz และ 31.4 GHz ที่วัดอุณหภูมิพื้นผิวและความชื้นในบรรยากาศ (รวมถึงปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและปริมาณเมฆในบรรยากาศ) เพื่อให้มีความสามารถในการกรองเมฆและอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ได้อย่างแม่นยำ โดยการสำรวจจะเป็นแบบ cross-track แบบเดียวกับ AIRS โดยความละเอียดของพื้นที่ในแนวตั้งจะอยู่ที่ประมาณ 45 กิโลเมตร (Parkinson et al., 2006)

## 2.2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 กระบวนการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากดาวเทียม AQUA โดยเครื่องรับ AIRS และ AMSU

ความสำคัญของการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับปริมาณไอน้ำในอากาศนั้นชี้ให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าแปรผันที่สูงสำหรับการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (Awange, 2011) นอกจากนี้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นต้องใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศจาก GNSS (Sapucci, 2014) ซึ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จาก AIRS, AMSU นั้นจะได้ เป็นข้อมูล 2 ข้อมูลที่อยู่ร่วมกัน ชื่อว่า AIRX2RET (Olsen et al., (2017)) ที่ประกอบไปด้วยข้อมูล TAirStd (ค่าความกดอากาศ, ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย) H2OMMRLevStd (ค่าความดันไอน้ำจากชั้นบรรยากาศ) และ PressH2O (ค่าความกดอากาศทั้งหมด) สามารถดาวน์โหลดฟรีได้จากเว็บไซต์องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) ลักษณะการเก็บรวบรวมข้อมูลจะเป็นการสำรวจความกดอากาศทั้งหมด 28 ชั้นและปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทั้งหมด 15 ชั้นจากพื้นผิวโลก ซึ่งจะให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิพื้นผิวให้ค่าความถูกต้อง 1K ต่อ 1 กิโลเมตรในชั้นบรรยากาศ ค่าความกว้างตัวอยู่ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 2 กิโลเมตรในชั้นบรรยากาศทั้งในมหาสมุทรและพื้นดิน (Divakarla et al., 2006) ซึ่งการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศ (Tm) จะได้จากการเฉลี่ยในแต่ละชั้นบรรยากาศได้ดังสมการ

$$T_m = \frac{\sum_{T_i} e_i}{\sum_{T_i} T_i} \quad (1)$$

โดยที่  $T_i$  ได้จากการวัดอุณหภูมิจากชั้นความกดอากาศในแต่ละชั้นบรรยากาศและ  $i$  จาก TAirStd ข้อมูลความกดอากาศจากข้อมูล AIRX2RET ในหน่วยเคลวิน (K)  $e_i$  คือค่าความดันไอน้ำในแต่ละชั้นของ  $i(w_i)$  ที่ได้จากข้อมูล H2OMMRLevStd จากข้อมูล AIRX2RET มวลของอัตราส่วนเปียกและส่วนแห้งในบรรยากาศ ซึ่งแบบจำลองระหว่าง  $e_i$  และ  $w_i$  ดังนี้ Wallace and Hobbs (2006)

$$e_i = \frac{w_i}{w_i + \varepsilon} P_i \quad (2)$$

$\varepsilon = M_w/M_d = 0.622$  โดยที่  $M_w$  แทนโมเลกุลของในบรรยากาศ และ  $M_d$  แทนมวลโมเลกุลของส่วนอากาศแห้ง ให้  $P_i$  แทนค่าความกดอากาศทั้งหมดในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจาก PressH2O จากข้อมูล AIRX2RET ซึ่งอยู่ในหน่วย กรัม/กิโลกรัม ต้องแปลงไปหน่วยให้อยู่ในรูปหน่วย มิลลิเมตรจะต้องนำไปคูณด้วย  $10^{-3}$  เพื่อสามารถนำไปเข้าสมการข้างต้นพารามิเตอร์นั้นจะสัมพันธ์กับตำแหน่ง ความสูง ฤดูกาล และสภาพอากาศ

ในสมการ Bevis et al. (1992) ได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

$$T_m = 0.72T_s + 70.2 \quad (3)$$

Mendes et al., (2000) ได้แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยไว้โดยรวบรวมข้อมูลจากวิทยุหึ่งอากาศ 32,500 ข้อมูล ที่ได้จาก 50 สถานี ครอบคลุม  $60^\circ S$  ถึง  $83^\circ N$  ไว้ได้ดังนี้

$$T_m = 0.789T_s + 50.4 \quad (4)$$

Suwantong et al., (2016) ได้ประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยใช้ข้อมูล AIRS และ AMSU ทั้ง 2 ช่วงเวลา ทั้งกลางวันและกลางคืนที่กรุงเทพมหานคร ได้ค่าความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

ช่วงกลางวัน

$$T_m = 0.6066T_s + 113.2914 \quad (5)$$

ช่วงเวลากลางคืน

$$T_m = 0.7938T_s + 57.4856 \quad (6)$$

จากการนำค่าของ  $T_m$  และ  $T_s$  จาก National Center of Environmental Prediction (NCEP/NOAA) ตั้งแต่ กรกฎาคม ปี ค.ศ.1999 จนถึง กรกฎาคม ปี ค.ศ.2001 ในการใช้ 6 สถานีวิทยุห้วงอากาศจากประเทศเยอรมนี ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ถึง กรกฎาคม ปี ค.ศ.2001 มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Schueler, Pósfay, Hein, & Biberger, 2001) ดังนี้

$$T_m = 0.647T_s + 86.9 \quad (7)$$

จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากชั้นบรรยากาศมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น Suwantong et al., (2016) จึงได้ใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$T_m = aT_s + b \quad (8)$$

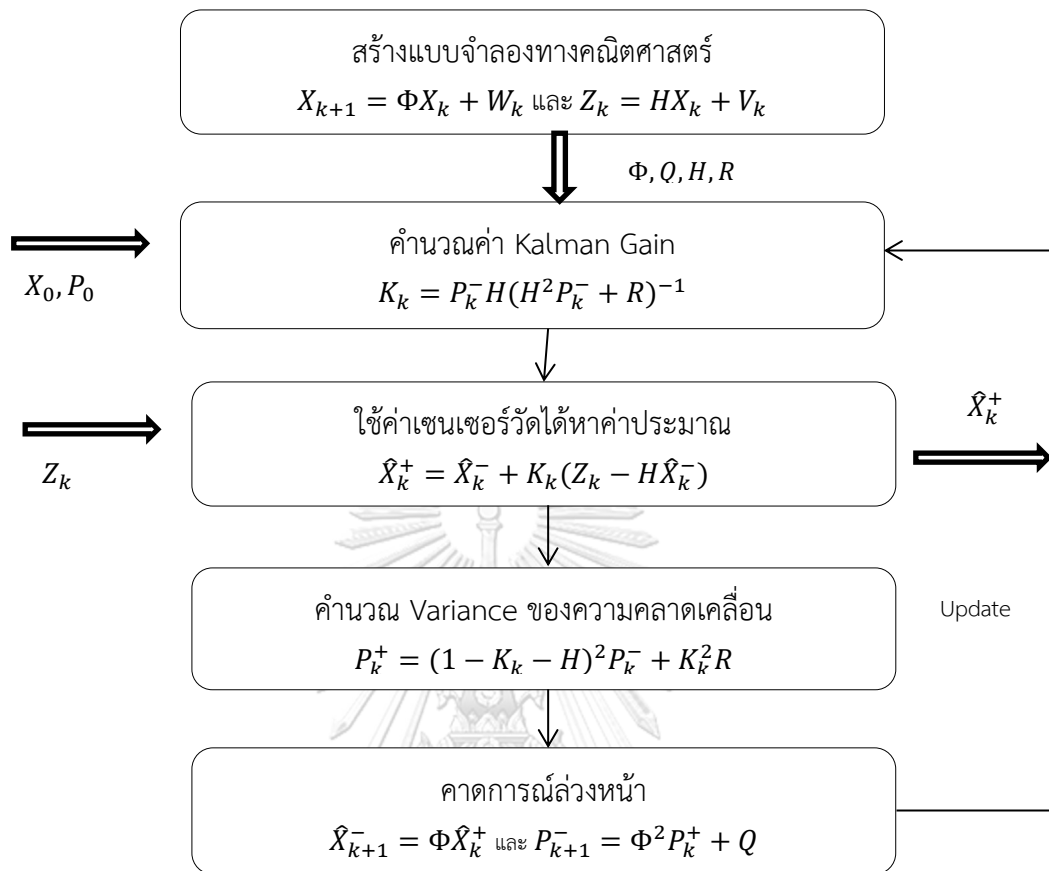
$T_m$  คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย มีหน่วยเป็น K

$T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิพื้นผิว มีหน่วยเป็น K

ให้  $a$  และ  $b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการประมวลผลข้อมูล

2.2.2 การประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม AQUA โดยนำมาเข้ากระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ Extended Kalman Filter (EKF) ร่วมกับโปรแกรม Matlab

การประมวลผลแบบ EKF เป็นกระบวนการประมาณค่าชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์มากต่อการประมาณค่าสถานะ (states) ของระบบพลวัต (Dynamic system) ที่มีสัญญาณรบกวนเพื่อนำมาประมาณค่าของข้อมูลที่ไม่คงที่ หรือมีสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลาหลักการทำงานของ EKF นั้นจะเป็นการทำงานในลักษณะของวงจรและไม่เป็นเชิงเส้น โดยการคาดการณ์หรือการประมาณค่าที่เรียกว่าส่วนของ Prediction และส่วน Update ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยส่วน Update เพื่อให้มีความแม่นยำขึ้น Mohiner S. Grewal (2001) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น ดังสมการที่ 8



รูปที่ 2. 4 แสดงขั้นตอนการประมวลผลด้วย Extended Kalman Filter ที่เวลา  $t_k$  ใดๆ

(ที่มา : กฤษฎา (2555))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$X_0$  คือ ค่าเริ่มต้นของสถานะระบบ

$P_0$  คือ Covariance ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

$Q$  คือ noise covariance ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

$Z_k$  คือ ค่ารังวัดที่ได้จากเซนเซอร์

$R$  คือ sensor noise

### 2.2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง Precise Point Positioning (PPP) สำหรับนำมาใช้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS

ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงนั้น มีพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ ค่าพิกัดตำแหน่งเครื่องรับ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ PANDA (Position And Navigation Data Analyst) ในการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศ (Zenith Total Delay, ZTD) โดยต้องแปลงข้อมูลให้เป็นรูปแบบ RINEX (Receiver-Independent Exchange Format) ก่อนทำการประมวลผล นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง Final Orbit จากหน่วยงาน GNSS Research Center, Wuhan University (WUM) ในกรณีที่ต้องการประมวลผล GNSS หลายระบบ ซึ่งจะแสดงสมการได้ดังนี้ (P. Héroux, 2001)

$$P_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M * ZTD) + \varepsilon_p)_{L3} \quad (9)$$

$$\varphi_{L3} = (\rho + c(dt - dT) + (M * ZTD)N\lambda + \varepsilon_\varphi)_{L3} \quad (10)$$

$P$  คือ สมการค่ารังวัดแบบซูโดเรนจ์ (Pseudo range) มีหน่วยเป็นเมตร

$\varphi$  คือ แบบเฟสคลื่นส่ง (Carrier phase) มีหน่วยเป็นเมตร

$\rho$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ มีหน่วยเป็นเมตร

$dt$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ มีหน่วยเป็นวินาที

$dT$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม มีหน่วยเป็นวินาที

$c$  คือ ความเร็วแสง มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที

$M$  คือ Mapping Function ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมสูงดาวเทียม มีหน่วยเป็นองศา

$N$  คือ ค่าเลขปริศนาของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (Ionosphere free ambiguity) มีหน่วยเป็นเมตร

$ZTD$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Zenith Total Delay) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ฟรี (Ionosphere free) มีหน่วยเป็นเมตร

$\varepsilon_p$  และ  $\varepsilon_\varphi$  คือค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีและการรบกวนของข้อมูลสำหรับข้อมูลซูโดเรนจ์และแบบเฟสคลื่นส่ง ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเมตร

#### 2.2.4 ค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay)

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ระหว่างพื้นผิวโลกขึ้นไปตั้งแต่ 8 กิโลเมตรบริเวณขั้วโลก และ 17 กิโลเมตรบริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งส่งผลให้สัญญาณ GNSS เกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูลมายังเครื่องรับสัญญาณ ความล่าช้านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความกดอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดจนเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองในการหาค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ได้ดังนี้ (Shuanggen Jin, 2014)

$$ZTD = ct - 10^{-6} \int_0^{\infty} N(s) ds \quad (11)$$

โดยที่  $n$  คือ ดัชนีหักเหของอากาศ

$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที

$\tau$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนในหน่วยเวลา

$N = 10^{-6}(n - 1)$  เรียกว่า refractivity โดยที่  $n$  คือดัชนีหักเหของอากาศ และ  $N$  แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ Dry Part และ Wet Part ( $N = N_{dry} + N_{wet}$ )

ซึ่งจากการหาค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ Dry part ประกอบไปด้วย ก๊าซ ( $N_2, O_2$ ) และ Wet part ประกอบด้วย ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ เป็นต้น การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถคำนวณได้จากค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่ง Zenith Total Delay (ZTD) โดยได้จากวิธีการรังวัดตำแหน่งจุดเดียว Precise Point Positioning (PPP) แบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) และ Zenith Wet Delay (ZWD) โดยค่า ZHD จะหาได้ดังสมการ (Saastamoinen (2013))

$$ZHD = \frac{2.2768 P_s}{1 - 0.00266 \cos(2\theta) - 0.00000028H} \quad (12)$$

$ZHD$  คือ Zenith Hydrostatics Delay มีหน่วยเป็นเมตร

$P_s$  คือ ค่าความกดอากาศพื้นผิว มีหน่วย มิลลิบาร์

$\theta$  คือ ละติจูดของเครื่องรับสัญญาณ มีหน่วย องศา

$H$  คือ ความสูงเหนือ ellipsoid มีหน่วย เมตร

$ZWD$  เป็นองค์ประกอบของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นสามารถคำนวณการหาไอน้ำในบรรยากาศได้โดยสมการดังนี้

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (13)$$

$ZTD$  คือ Zenith total delay มีหน่วยเป็นเมตร

$ZHD$  คือ Zenith Hydrostatics Delay มีหน่วยเป็นเมตร

### 2.2.5 ปริมาณไอน้ำในอากาศ Precipitable Water vapour (PWV)

โดยทั่วไปปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ Precipitable Water vapour (PWV) จะเรียกว่าปริมาณน้ำในสถานะของเหลวจากไอน้ำควบแน่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นตัววัดความหนาแน่นของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางแนวตั้งหรือชั้นบรรยากาศตามแนวตั้ง ปริมาณไอน้ำนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนโลก เช่น โดยปกติแล้วปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่พื้นที่เส้นศูนย์สูตรจะอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรที่พื้นที่ใกล้ขั้วโลก Brutsaert (2005) การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศจากการรับสัญญาณ  $ZTD$  และการคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศสามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$PWV = \frac{10^{-6}}{R_w} \cdot \frac{1}{k'_2 + \frac{k_3}{T_m}} ZWD \quad (14)$$

$PWV$  คือ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$k'_2$  คือ 0.221 K/P<sub>a</sub>

$k_3$  คือ 3739 K/P<sub>a</sub><sup>2</sup>

$R_w$  คือ 461.525 L/kg\*K

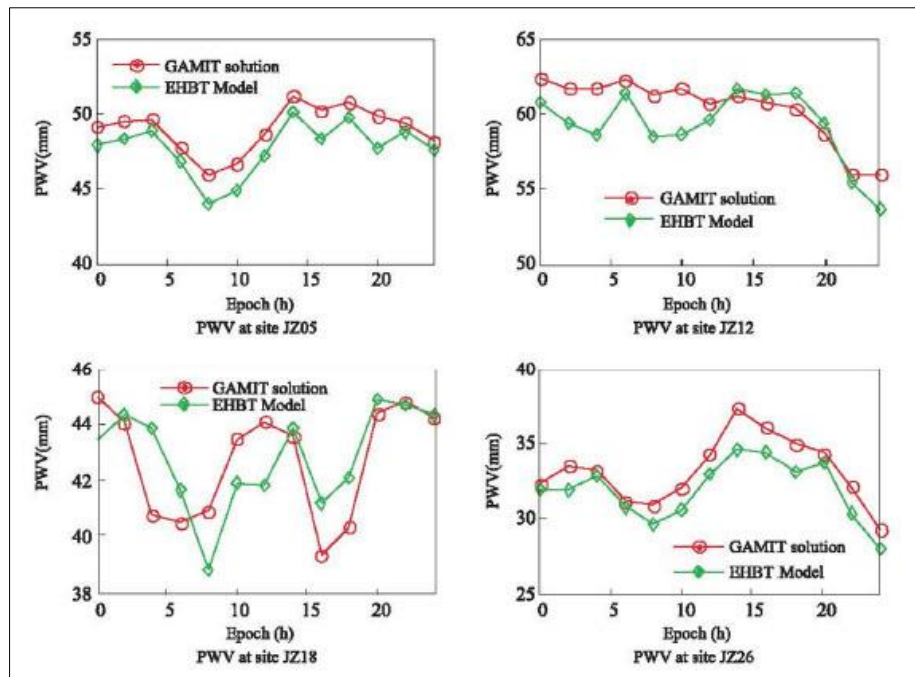
$T_m$  คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย มีหน่วยเป็น เคลวิน



### 2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Héroux (2001) ในปัจจุบันหน่วยงาน International GNSS Service, IGS ได้ให้บริการวงโคจรดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงและความแม่นยำของนาฬิกา การรังวัดการรับสัญญาณแบบหลายความถี่ คือข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นเป็นการรังวัดแบบจุดเดี่ยว หลังจากการประมวลผลในรูปแบบสถิติและแบบจลน์แล้วผู้ใช้สามารถได้ค่าความถูกต้องจากรับเซนติเมตรถึงระดับเดซิเมตร ซึ่งค่าความถูกต้องระดับนี้เป็นผลมาจากใช้ประโยชน์จากความแม่นยำของการโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียม แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบนั้นทำก็มีผลต่อการรังวัดด้วย จึงได้มีการใช้วิธีการประมวลผลการกำหนดตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) ซึ่งพัฒนาโดย The Geodetic Survey Division (GSD) ขององค์การทรัพยากรธรรมชาติ พลังงาน และเหมืองแร่ของแคนาดา (NRCan) โดยการใช้ข้อมูลวงโคจรความละเอียดสูงและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงและยังสามารถแสดงค่าพิกัดบนพื้นหลักฐานอ้างอิงได้ โดยงานวิจัยได้อธิบายการประมวลผลการกำหนดตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูงโดยการใช้ข้อมูลวงโคจรจาก International GNSS Service, IGS นั้น โดยการปรับแก้จำเป็นจะต้องเป็นขั้นตอนกระบวนการ โดยหลังจากการปรับแก้แล้วจะเห็นว่าค่าความถูกต้องจากการคำนวณแบบสถิติและแบบจลน์นั้น มีค่าความถูกต้องรับดับ 1-10 เซนติเมตรสามารถนำไปประยุกต์กับระยะจุด ลองจิจูดและความสูงได้ ส่วนค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ประมาณด้วยค่าความถูกต้องระดับ 1 เซนติเมตร และสถานีนาฬิกาดาวเทียมอยู่ที่ระดับที่ 0.1-0.2 นาโนวินาที และเมื่อคำนวณจากวงโคจรและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมแบบเรียลไทม์จะมีค่าความถูกต้องที่ระดับ 10-30 เซนติเมตร

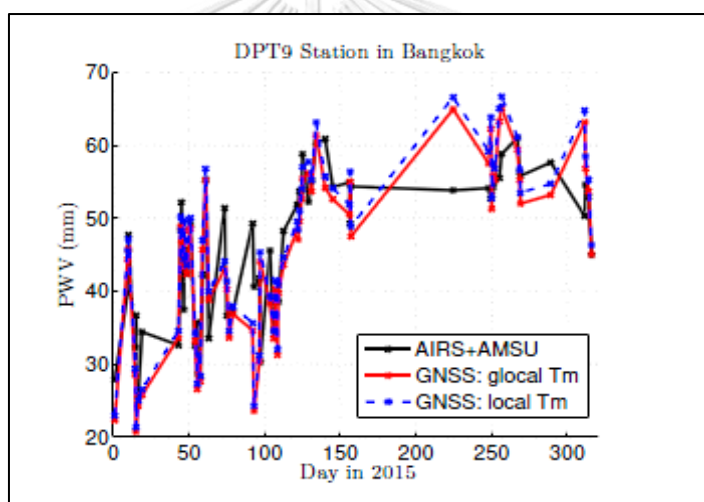
Huang Liangke (2012) งานวิจัยนี้ได้แสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศ โทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นลำดับต้นๆของการสำรวจในการรังวัด โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่ง (ZTD) และความสูงและลองจิจูดของสถานีที่วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจากหน่วยงาน international GNSS Service, IGS) โดยผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองมีการประมาณค่าคลาดเคลื่อน ZTD ของสถานีข้อมูลภูมิภาค Guangxi มีความแม่นยำในการคำนวณ ซึ่งค่า RMSE ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นถูกใช้ในการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ มีค่าน้อยกว่า 2 มิลลิเมตรที่สถานีภูมิภาค



รูปที่ 2. 5 แสดงการเปรียบเทียบการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก  
แบบจำลอง GAMIT และแบบจำลอง EHTB  
(ที่มา : Huang Liangke (2012))

Bevis et al. (1992) งานวิจัยนี้ได้แสดงแนวทางการสำรวจระยะไกลของปริมาณไอน้ำจากจีพีเอสนักยอเดติกและนักภูมิศาสตร์ได้คิดค้นกระบวนการของการประมาณค่าความยาวที่เพิ่มขึ้นที่แพร่จากดาวเทียมของสัญญาณจีพีเอสถึงเครื่องรับที่เกิดจากปริมาณน้ำในบรรยากาศแล้วค่าความคลาดเคลื่อนในนี้จะถูกจัดให้เป็นตัวแปรในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศส่วนเปียก (Zenith wet delay, ZWD) และทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ผ่านแบบจำลองค่าน้ำหนัก Stochastic filtering ของข้อมูลจีพีเอส โดยใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิพื้นผิวและความกดอากาศที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส ค่าของ ZWD สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องรับจีพีเอสสัญญาณจากเครื่องรับนั้นถูกพัฒนาโดยนักยอเดติก นักภูมิศาสตร์และรัฐบาล หน่วยงานทางทหาร พร้อมทั้งหน่วยงานอื่นๆ เพื่อเพิ่มความถูกต้องทางตำแหน่งมากขึ้น ทั้งนี้สัญญาณจีพีเอสได้หาความเป็นไปได้ของวัดการกระจายของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในระดับแนวนอน โดยการวัดนี้สามารถนำไปพยากรณ์เกี่ยวกับการเกิดพายุในชั้นบรรยากาศ อุทกวิทยา เคมีในชั้นบรรยากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก และยังสามารถใช้วัดปริมาณน้ำในบรรยากาศแนวตั้งได้อีกด้วย สามารถวิเคราะห์ข้อมูลจีพีเอสภาคพื้นดินได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมโคจรในแนวขั้วโลก

Suwantong et al., (2016) งานวิจัยนี้ได้แสดง ความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่กรุงเทพมหานครที่ได้จากข้อมูลเครื่องวัด 2 เครื่องวัดที่ชื่อว่า AIRS และ AMSU จากดาวเทียม AQUA ที่เป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าอุณหภูมิโดยตรง โดยการใช้ระบบการแก้ปัญหาพารามิเตอร์ด้วยวิธี Extended Kalman filter เพื่อนำพารามิเตอร์มาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น V. B. Mendes, G. Prates, and Langley (2000) เนื่องจากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น (Bevis et al., 1992) ของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องจากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลและแบบจำลองค่าเฉลี่ยอุณหภูมิท้องถิ่นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ค่า RMSE อยู่ในระดับเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามค่า bias จากการใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแบบสากลนั้นจะเท่ากับ -1.06 มิลลิเมตร แต่การใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นดีกว่าที่ระดับค่า bias เท่ากับ 0.20 มิลลิเมตร



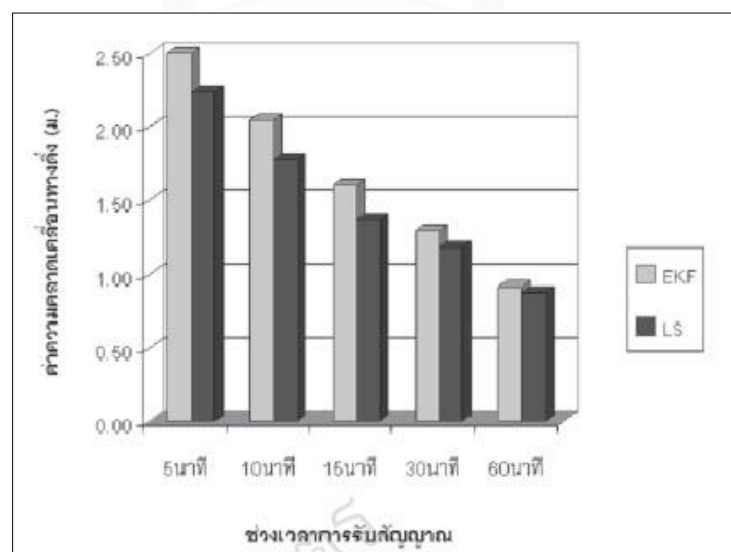
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2. 6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU

(ที่มา : Suwantong et al., (2016))

Mohiner S. Grewal (2001) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Extended Kalman filter เป็นกระบวนการสร้างอย่างหนึ่งที่มีประโยชน์มากต่อการประมาณของระบบสถานะ (State) ระบบการรบกวนของสัญญาณ (Noise) เพื่อนำมาประมาณค่าของข้อมูลที่ไม่คงที่ หรือมีสถานะเปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่การหาสถานะของระบบไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะมีข้อจำกัดหลายอย่างเช่นความไม่สมบูรณ์ของ Noise sensors ประกอบไปด้วย เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เครื่องมือการตรวจความจับการเคลื่อนที่ หรือจะประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดความเร่งเป็นต้น State System ประกอบไปด้วย ตำแหน่ง ความเร็วของสัญญาณ การเพิ่มความเร็วของสัญญาณ ลักษณะของสัญญาณ Uncertain dynamics ประกอบไปด้วย การรบกวนของสัญญาณที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ของเครื่องมือสภาพอากาศ และมนุษย์ เป็นต้น

สิทธิระพจน์ และ ล้วนเส็ง (2550) การประมวลผลข้อมูลสำหรับการหาดำแหน่งด้วยจีพีเอสแบบสถิติที่ให้ความละเอียดสูงโดยปกติจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในขณะที่วิธี Extended Kalman Filter (EKF) นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่มีการแปรผันตามเวลาหรือข้อมูลจีพีเอสแบบจลน์ ทั้งสองวิธีนี้มีนัยต่างกันในการประมวลผลโดยจะทำการเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองจากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งในด้านทฤษฎีและการคำนวณเชิงเลขที่ใช้ในการหาดำแหน่งจีพีเอสแบบจุดเดี่ยวที่ให้ความละเอียดสูง ผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่าสำหรับข้อมูลการรับสัญญาณที่สั้น (น้อยกว่า 15 นาที) ซึ่งวิธีการ EKF นั้นให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสูงกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในกรณีข้อมูลการรับสัญญาณนั้นยาววิธีการทั้งสองให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นวิธี EKF จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง



รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบการประมวลผลจีพีเอสโดยใช้วิธีการประมวลผล EKF และการประมวลผลวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

## บทที่ 3

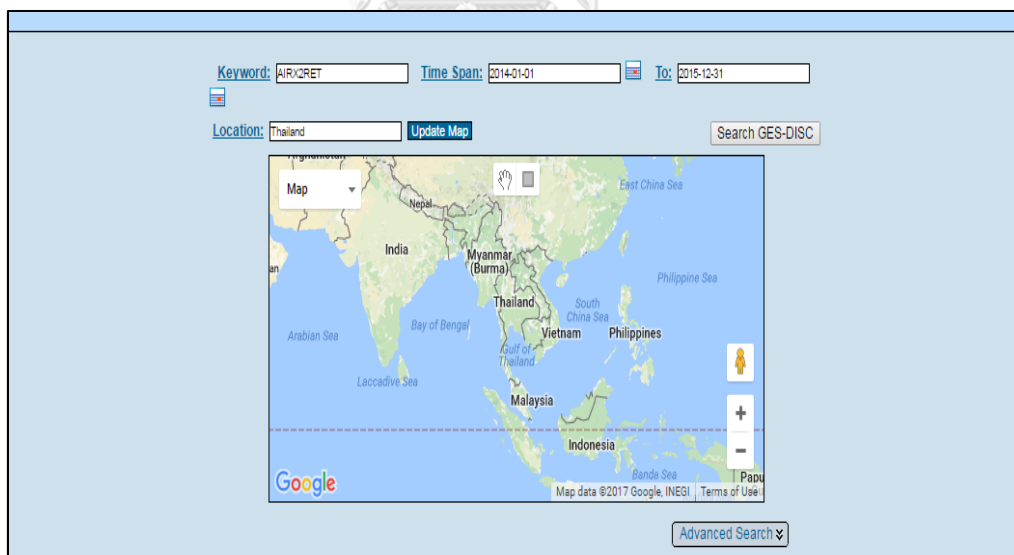
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การดำเนินงานวิจัย

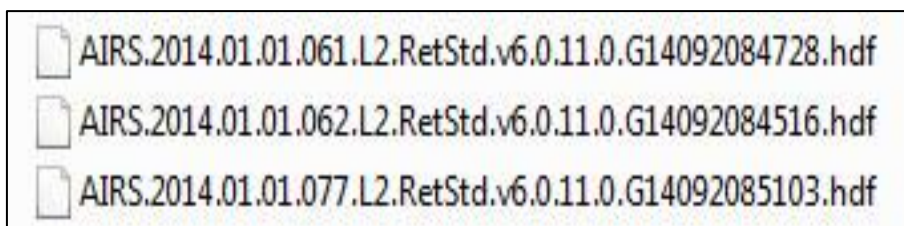
จากวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้เพื่อหาแบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับ 11 สถานี CORS ทั่วประเทศ มีการรวบรวมข้อมูลและการประมวลผล โดยการประมวลผลจะแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ การประมวลผลจากข้อมูลดาวเทียม AQUA และการประมวลผลจากข้อมูล GNSS ของกรมโยธาธิการและผังเมือง

##### 3.1.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม AQUA

3.1.1.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลจากดาวเทียม AQUA จากเว็บไซต์ (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>) กำหนดขอบเขตเป็น Thailand รวมระยะเวลาทั้งหมด 2 ปี โดยสกุลไฟล์จะเป็น .hdf ข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลราสเตอร์ที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศที่เราได้กำหนดไว้ และแบ่งพื้นที่ตามงานวิจัยที่ศึกษา โดยจะแบ่งเป็น ระดับสถานี พื้นที่ครอบคลุมสถานีประมาณ 33x33 ตารางกิโลเมตร ระดับภาค และทั่วประเทศ



รูปที่ 3. 1 แสดงการรวบรวมข้อมูลจากดาวเทียม AQUA จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU  
(ที่มา : <https://mirador.gsfc.nasa.gov/#>)



รูปที่ 3. 2 แสดงตัวอย่างข้อมูล AIRX2RET ที่ได้จากเครื่องวัด AIRS, AMSU

### 3.1.1.2 การแบ่งพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลดาวเทียม AQUA

- แบ่งพื้นที่ศึกษาจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 11 สถานี COR ทั่วประเทศ โดยจะกำหนดให้พื้นที่แต่ละสถานีประมาณ 33x33 ตารางกิโลเมตร เพื่อครอบคลุมที่ตั้งสถานี COR แต่ละสถานี

- แบ่งพื้นที่ออกเป็นภูมิภาค
- พื้นที่ทั่วประเทศไทย

Name	Code	Latitude	Longitude	Height
Chanthaburi	CHAN	12.6103103	102.1024105	8.004
Chiang Mai	CHMA	18.82683368	98.97050218	310.447
DPT Rama9	DPT9	13.75678101	100.5731998	38.169
Nakhon Ratchasima	NKRM	14.98749457	102.1218182	166.145
NaKhon Sawan	NKSW	15.6903706	100.1141121	21.406
Prachuap Khirikhan	PJRK	11.81162084	99.79634708	-11.737
Srisaket	SISK	15.11612212	104.2856759	105.105
Songkhla	SOKA	7.206693775	100.5961213	18.437
Surat Thani	SRTN	9.132225222	99.33136107	9.949
Udon Thani	UDON	17.41273174	102.7807045	150.235
Uttaradit	UTTD	17.63009359	100.0963431	51.262

ตารางที่ 3. 1 แสดงค่าพิกัดสถานี 11 COR ของกรมโยธาธิการและผังเมือง

### 3.1.1.2 การประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยด้วยวิธีการ Extended Kalman Filter (EKF)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจะแบ่งออกเป็นระดับสถานีระดับภูมิภาค และระดับประเทศ โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้มาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสำหรับ 11 สถานี COR ทั่วประเทศ

ส่วน Prediction

$$\hat{X}_k^- = f(\hat{X}_{k-1})$$

$$P_k^- = Q_{k-1} + \hat{F}_{k-1} P_{k-1} \hat{F}_{k-1}^T$$

ส่วน Update

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{X}_k^-))$$

$$P_k = P_k^- - K_k S_k K_k^T$$

โดยที่

$$S_k = \hat{H}_k \hat{P}_k^- \hat{H}_k^T + R_k$$

$$K_k = P_k^- \hat{H}_k^T S_k^{-1}$$

$\hat{F}_{k-1} = \frac{df}{dx}$  ที่  $\hat{X}_{k-1}$  คือ จาคอเบียนของ  $f$  ที่  $\hat{X}_{k-1}$  และ  $\hat{H}_k = \frac{dh}{dx}$  ที่  $\hat{X}_{k-1}$  คือ จาคอเบียนของ  $h$  ที่  $\hat{X}_k^-$  ในการเริ่มต้นการประมาณพารามิเตอร์  $\hat{X}_0^-$

กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นเป็นดังนี้

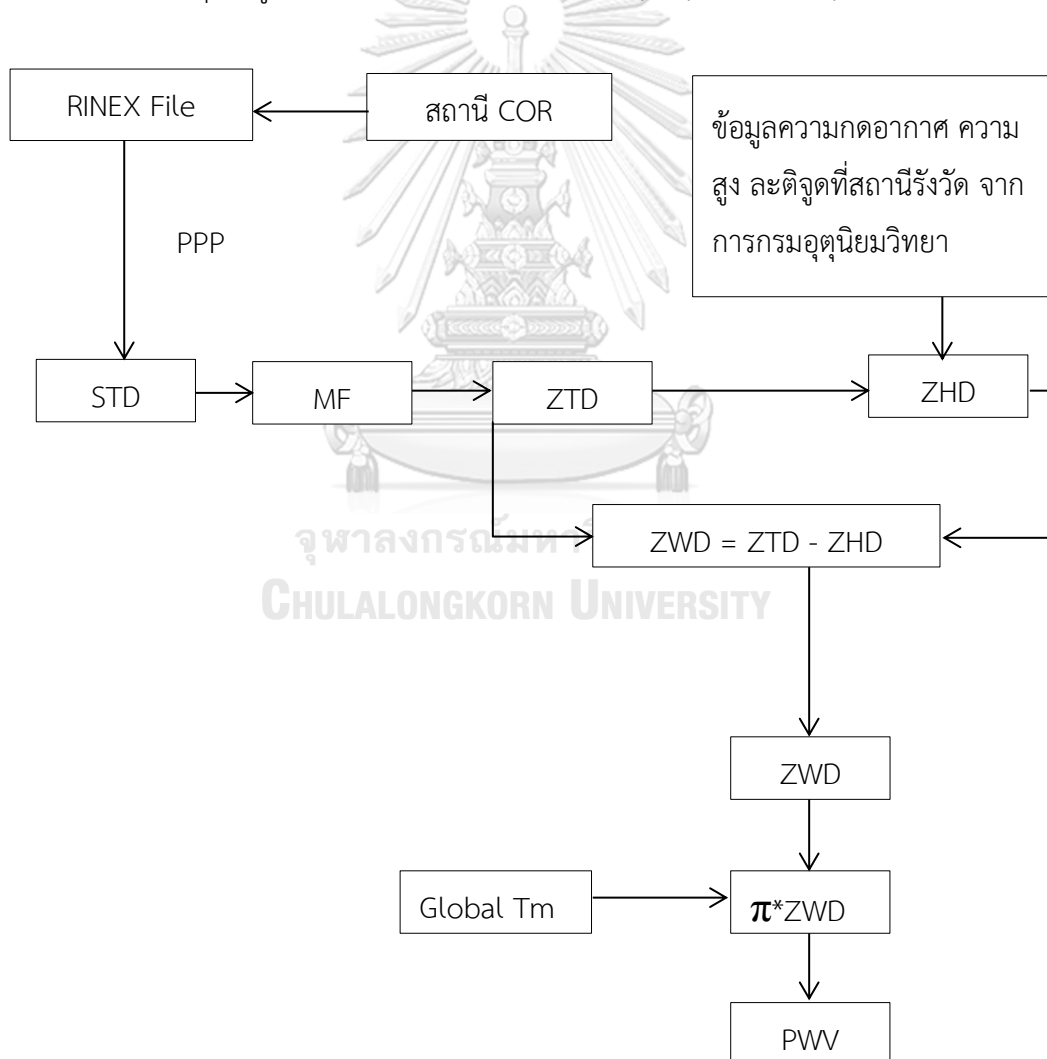
$$\hat{X}_0^- = (0.789 \quad 50.4 \quad \bar{T}_s \quad 5 \quad -67.5\pi/180)^T$$

$$P_0^- = \text{diag}(1 \quad 20 \quad 5 \quad 5 \quad 5\pi/180)^T$$

รูปที่ 3. 3 แสดงแบบจำลองการประมวลผล EKF และพารามิเตอร์เริ่มต้น  
(ที่มา : Suwanton et al., (2016))

3.1.2 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล GNSS และการประมวลผลด้วยวิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) ใช้ในประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

3.1.2.1 การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากการประมวลผลข้อมูล GNSS จากกรมโยธาธิการและผังเมือง ทั้งหมด 2 ปี (พ.ศ.2557-2558) ทั้ง 11 สถานีทั่วประเทศ โดยข้อมูลจากการรังวัด (Observation) ที่ใช้ต้องแปลงให้เป็นรูปแบบ RINEX files ก่อนการประมวลผล จากนั้นประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ Global Mapping function (GMF) ในการหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่ง (ZTD) เพื่อใช้ในการหา Zenith Wet Delay เพื่อนำไปใช้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำจากแบบจำลองการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (Saastamonien, 1972) จากการ ใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล (Global Mean Tropospheric Temperature,  $T_m$ )



รูปที่ 3. 4 แสดงการประมวลผลเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS



CORS คือ Continuously Operating Reference Stations

RINEX คือ Receiver Independent Exchange Format

PWV คือ Precipitable Water Vapor

ZTD คือ Zenith Total Delay

ZWD คือ Zenith Wet Delay

ZHD คือ Zenith Hydrostatic Delay

Tm คือ Mean Tropospheric Temperature

STD คือ Slant Total Delay

MF คือ Global Mapping Function

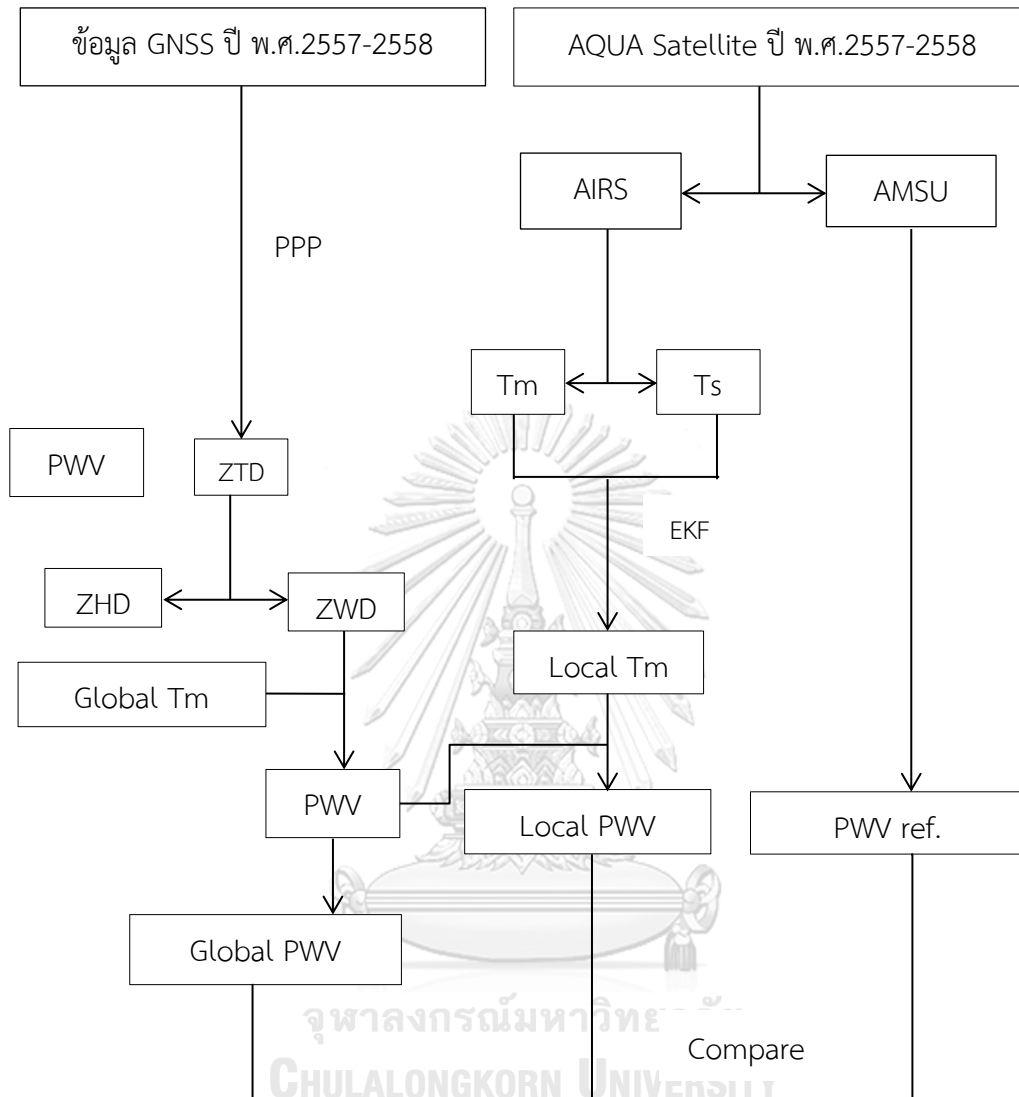
### 3.1.3 การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

จากรูปที่ 3.4 ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลนั้น จะประมวลผลจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็น RINEX file จาก 11 สถานี COR ทั่วประเทศ จากนั้นทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบและทำการประมวลผลด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อคำนวณพารามิเตอร์ เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ZTD จากสมการที่ 11 จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ GNSS คือ ZHD และ ZWD โดย ZHD ที่ถูกคำนวณมาจากค่าอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ Global Pressure Temperature Model (GPT) และนำค่า ZTD มาลบกับค่า ZHD เพื่อให้ได้ค่า ZWD และนำไปหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยที่ต้องนำสัมประสิทธิ์  $\pi$  ไปคูณเข้าไปโดยค่า  $\pi$  นั้นมีแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยสากล หรือ Tm ที่ถูกคำนวณจาก Global mean Tropospheric temperature จากหน่วยงาน Global Geodesy Observation System (GGOS Atmosphere)

### 3.1.4 การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ในการประมวลผลเพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นนั้นทำตามขั้นตอนจากรูปที่ 3.4 แต่ใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์จากนั้นนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS แทนแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

### 3.2 แผนผังการดำเนินงาน



รูปที่ 3. 5 แผนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3.5 แผนผังการดำเนินงาน ประการแรกนำเข้าสู่ข้อมูลดาวเทียม AQUA ที่ดาวิน โหลดจากเว็บไซต์องค์การบริหารการบินและอวกาศ ข้อมูลมีชื่อว่า AIRX2RET ระยะเวลา 2 ปีโดย แบ่งออกตามระยะเวลาของข้อมูล 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี ทั้งหมด 11 สถานี จากนั้นนำมาเข้า กระบวนการ EKF ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เพื่อนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS

ประการที่สอง นำข้อมูลที่ได้ GNSS ระยะเวลา 2 ปี จากกรมโยธาธิการและผังเมืองมา ประมวลผลด้วยวิธีการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP) เพื่อคำนวณค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้ง (ZTD) ในการนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยการประมาณค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล โดยหลังจากที่ได้ผลลัพธ์ของค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศของแต่ละการประมวลผลแล้ว นำผลลัพธ์ทั้งสองข้อมูลมาเปรียบเทียบโดยให้ค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องรับ AMSU เป็นตัวอ้างอิง ซึ่งจะวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยใช้ ค่าค่าเฉลี่ยค่า ความแตกต่าง (Mean Error) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และ ทดสอบค่าสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F-test Statistic) เพื่อนำมาสรุปผลของ ความเหมาะสมในการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศตามระยะเวลาข้อมูลในแต่ละสถานี

### 3.3 การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร (F-test Statistic)

การทดสอบสมมติฐานของสองประชากรเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยกรณีตัวอย่างของปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศที่ได้จาก GNSS และค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ท้องถิ่น เมื่อให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AMSU ใช้อ้างอิง เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของ ประชากรทั้งสองข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

#### 3.3.1 การแจกแจงเอฟ (F-distribution)

ในการทดสอบสมมติฐานความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศที่ได้จาก 2 วิธี โดยให้  $S_1^2$  และ  $S_2^2$  คือค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากค่า ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น และการใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยสากล ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน และมีขนาดเท่า  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับ ทั้งสองกลุ่ม ตัวอย่างนี้สุ่มมาจากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีการแจกแจงแบบปกติ และมีจำนวนตัวอย่างที่ สุ่มมาจากแต่ละสถานี เลือกสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบสมมติฐาน เพื่อคำนวณค่า  $f = \frac{S_1^2}{S_2^2}$  ที่เป็น ตัวแทนในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบเอฟ

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ความแตกต่างของค่าการกระจายของกลุ่มตัวอย่างจาก 2 วิธีการ

3.2.2.1. ทำการตรวจสอบตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากรของกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน

3.2.2.2 กำหนดสมมติฐานทางสถิติสำหรับการทดสอบ

3.2.2.3 กำหนดค่าระดับความเชื่อมั่น

3.2.2.4 คำนวณค่า  $f = \frac{S_1^2}{S_2^2}$  ที่เป็นตัวแทนในการทดสอบสมมติฐาน

3.2.2.5 กำหนดขอบเขตวิกฤตโดยให้ค่า F วิกฤตจากค่าระดับความเชื่อมั่นและองศาเสรีของประชากร ( $df$ ) เมื่อ  $df_1 = n_1 - 1, df_2 = n_2 - 1$

3.2.2.6 สรุปผลทดสอบสมมติฐาน

3.2.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล (Correlation)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิพื้นผิวเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล จะแสดงโดยกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ซึ่งจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใช้วัดขนาดของความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร มี 2 ลักษณะ คือ  $-1 \leq r \leq 1$  หรือ  $0 \leq r \leq 1$

การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงการมีความสัมพันธ์ในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์ในระดับน้อย หรือไม่มีเลย โดยมีเกณฑ์การพิจารณาดังนี้ (Hinkle, Wiersma, & Jurs, 2003)

ค่า r ระดับความสัมพันธ์ของข้อมูล

0.90 - 1.00 มีความสัมพันธ์สูงมาก

0.70 - 0.90 มีความสัมพันธ์ระดับสูง

0.50 - 0.70 มีความสัมพันธ์ระดับปานกลาง

0.30 - 0.50 มีความสัมพันธ์ระดับต่ำ

0.00 - 0.30 มีความสัมพันธ์ระดับต่ำมาก

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

ผลจากการศึกษางานวิจัยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

#### 4.1 ผลการศึกษา

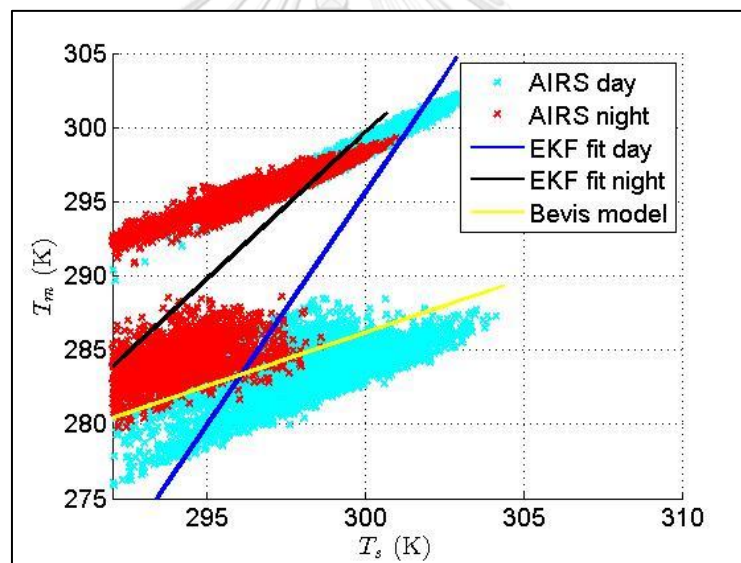
ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาได้แก่ กระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อสร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทยนั้น ผลปรากฏว่าไม่สามารถประมวลผลด้วยวิธีการ Extended Kalman Filter (EKF) เพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับภูมิภาคและทั่วประเทศ เนื่องจากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต้องอิงจากการประมวลผลด้วยวิธีการ EKF ไม่เหมาะสมกับคุณลักษณะของข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากดาวเทียม AQUA ที่ครอบคลุมในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์แตกต่างกันและอุณหภูมิเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความสูงของพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ โดยจากกราฟผลการศึกษา ลักษณะของข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากดาวเทียม AQUA สามารถแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มข้อมูล ดังรูปที่ 4.3 ทำให้การสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต้องอิงด้วยวิธีการ EKF ไม่เหมาะสมในการสร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับพื้นที่ดังกล่าวได้

จากการวิจัย พื้นที่ที่สามารถสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต้องอิงเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ได้นั้น เหมาะสมมากกว่ากับพื้นที่ในระดับสถานี และจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS นั้นสามารถนำไปใช้ได้บางพื้นที่ เมื่อนำแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้ จะมีความใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำจากข้อมูลค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่ใช้อ้างอิงได้แก่ สถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ UTTD ส่วนสถานีอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไอน้ำจากบรรยากาศจาก GNSS ที่ได้จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต้องอิงและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

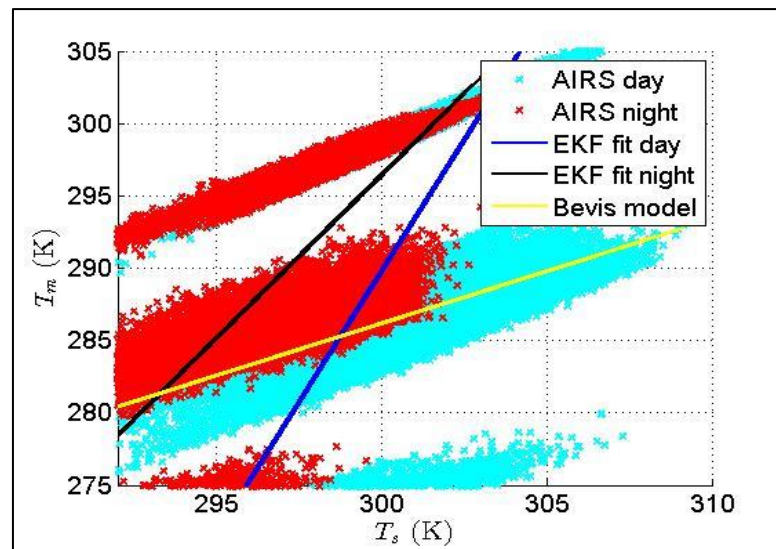
4.1.1 ผลการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทย

พบว่าทั้งข้อมูลที่ระยะเวลา 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี และ 2 ปี นั้นไม่สามารถนำข้อมูลจากดาวเทียมมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นได้ เนื่องจากพื้นที่ขนาดใหญ่และภูมิประเทศที่แตกต่างในแต่ละพื้นที่เป็นอย่างมาก จึงทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากดาวเทียม AQUA นั้นมีความแปรปรวนอย่างสูงจึงไม่เหมาะกับการนำมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ดังภาพตัวอย่างดังต่อไปนี้

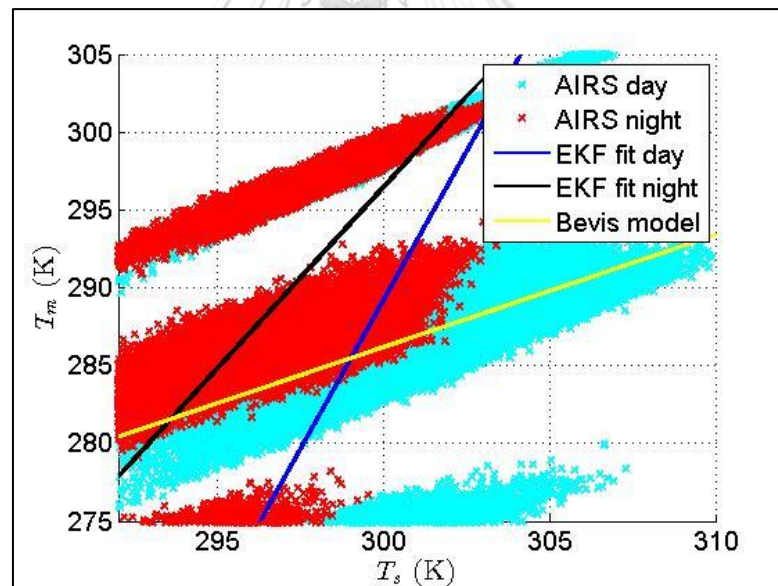
จากคำอธิบายสัญลักษณ์รูปภาพแสดงกราฟค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จาก AIRS และ AMSU ได้แก่ จุดอุณหภูมิเฉลี่ยกลางวันและกลางคืน (จุดสีฟ้าและสีแดง) แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นจากการประมวลผล EKF แบ่งเป็นกลางวันและกลางคืน (เส้นสีน้ำเงินและสีดำ) และแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล (เส้นสีเหลือง)



รูปที่ 4. 1 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 เดือน



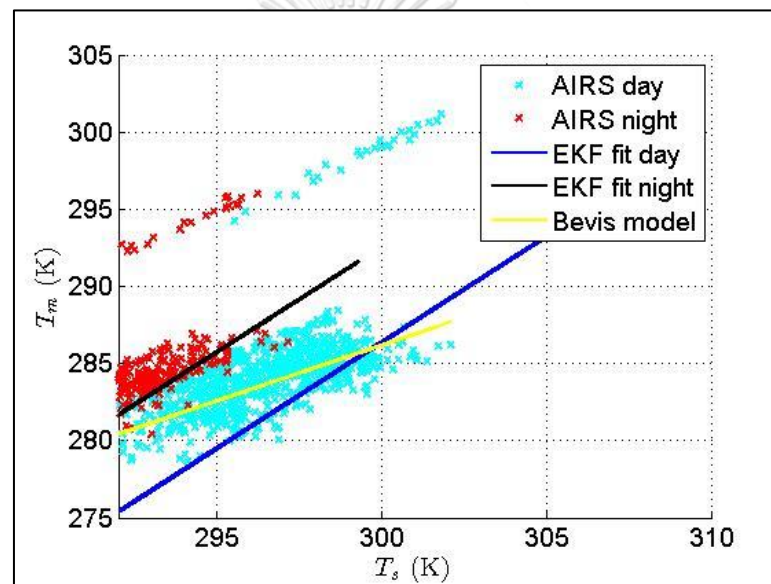
รูปที่ 4. 2 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 ปี



รูปที่ 4. 3 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ทั่วประเทศเมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 2 ปี

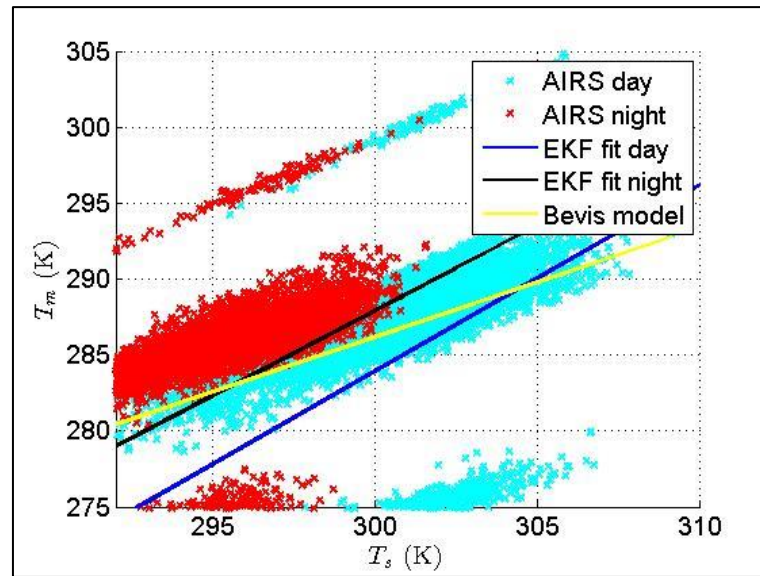
#### 4.1.2 ผลการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ในระดับภูมิภาค

พบว่าทั้งข้อมูลที่ระยะเวลา 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี และ 2 ปี นั้นไม่สามารถนำข้อมูลจากดาวเทียมมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นได้เช่นเดียวกับระดับประเทศ เนื่องจากมีพื้นที่ขนาดใหญ่และภูมิประเทศที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่เป็นอย่างมาก จึงทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากดาวเทียม Aqua ไม่เหมาะกับการนำมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ดังภาพตัวอย่างในบางภูมิภาค ดังต่อไปนี้

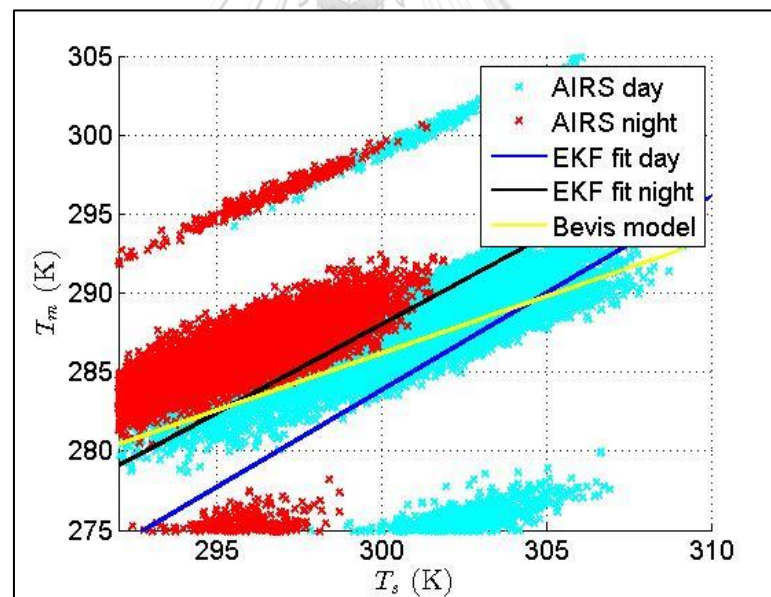


รูปที่ 4. 4 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคกลาง เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 เดือน

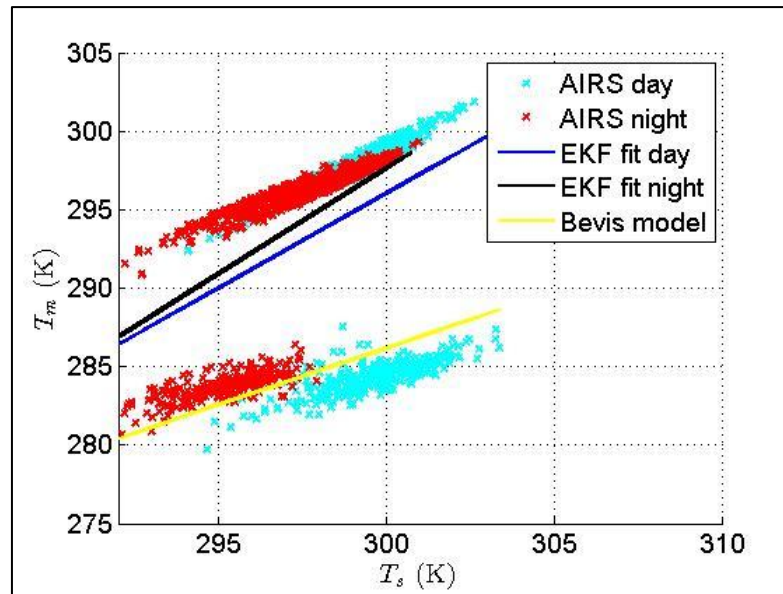




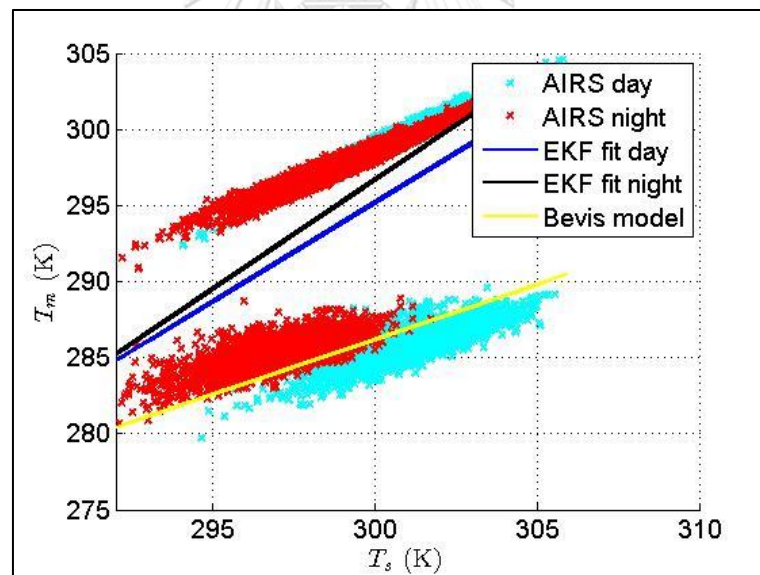
รูปที่ 4. 5 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคกลาง เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 ปี



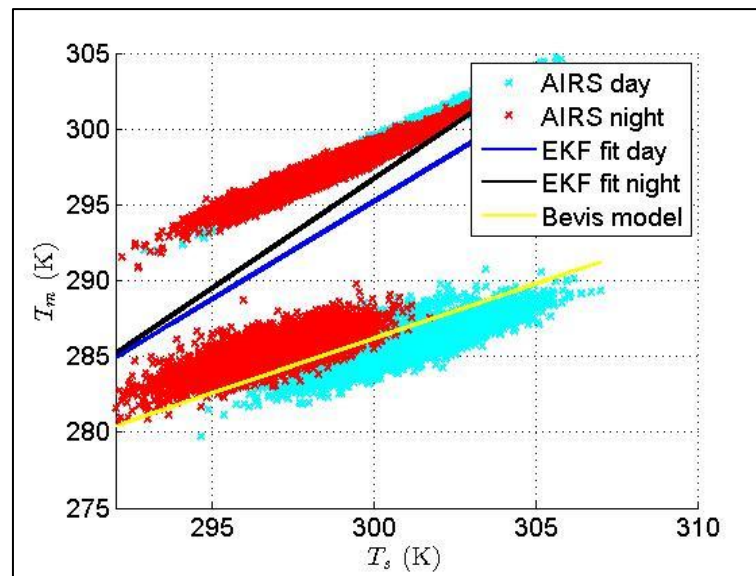
รูปที่ 4. 6 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคกลาง เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 2 ปี



รูปที่ 4. 7 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 เดือน

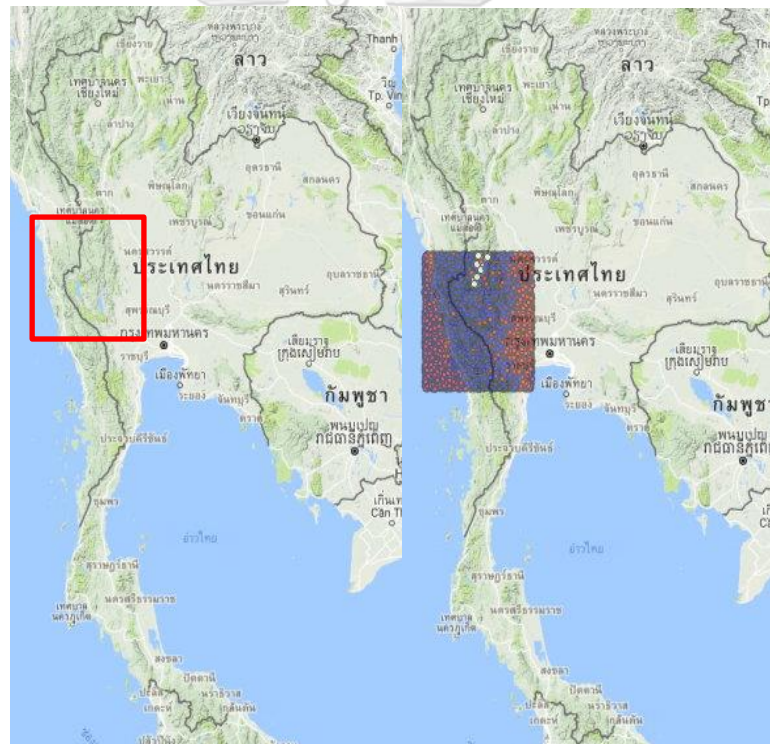


รูปที่ 4. 8 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 1 ปี



รูปที่ 4. 9 แสดงข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ระยะเวลา 2 ปี

จากการประมวลผลการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับประเทศไทย จากการแสดงผลพีธีในการนำข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากดาวเทียม AQUA ลักษณะของข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากดาวเทียม AQUA แบ่งออกเป็นลักษณะหลายกลุ่มข้อมูล ดังรูปที่ 4.3 จากรูปแสดงให้เห็นว่า บริเวณดังกล่าวจะเห็นความแตกต่างของข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยขึ้นอยู่กับสภาพอุณหภูมิของแต่ละพื้นที่และความสูงตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันของพื้นที่นั้นๆ จากจากรูปที่ 4.10 แสดงสัญลักษณ์ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย โดยจะแบ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ จุดสีแดง แสดงอุณหภูมิที่สูง (มากกว่า 290 เคลวิน) จุดสีน้ำเงิน (ตั้งแต่ 275-290 เคลวิน) แสดงค่าอุณหภูมิปานกลาง และจุดสีขาว แสดงค่าอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 275 เคลวิน) ข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยอ้างอิงตัวอย่างจากพื้นที่ภาคกลางจากรูปที่ 4.3 ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4. 10 แสดงลักษณะภูมิประเทศที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตัวอย่างของพื้นที่ภาคกลาง

#### 4.1.3 ผลการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ในระดับ 11 สถานี CORS

พบว่าทั้งข้อมูลที่ระยะเวลา 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี นั้นไม่สามารถนำข้อมูลจากดาวเทียมมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น แต่อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากดาวเทียม Aqua ระยะเวลา 2 ปี พบว่า สามารถนำมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นได้ โดยตารางที่ 4.1 อธิบายว่า แถวแรกของตารางคือชื่อของสถานีทั้งหมด 11 สถานีที่ใช้ในงานวิจัย แถวที่ 2 แสดงแบบจำลองของแต่ละสถานีได้แก่ แบบจำลองท้องถิ่นและแบบจำลองสากล แถวที่ 3 ถึงท้ายสุดของตาราง คือ ระยะเวลาข้อมูล 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี และ 2 ปี ตามลำดับจากข้อมูลของดาวเทียม AQUA ที่นำมาประมวลผลในงานวิจัย โดยจะแสดงค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของแต่ละสถานีตามระยะเวลาข้อมูล (R Square) แสดงค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) เมื่อนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS

ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R Square) ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทั้งหมด 11 สถานีโดยแบ่งตามระยะเวลาของข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ตามระยะเวลา 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี และ 2 ปี เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล โดยให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากเครื่องรับ AIS และ AMSU เป็นตัวอ้างอิง ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ความแม่นยำของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นนั้นให้ค่าเฉลี่ยความแตกต่างที่ใกล้เคียงกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จาก GNSS เมื่อใช้รูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

ตารางที่ 4. 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R Square) ค่าเฉลี่ยค่าความแตกต่าง (Mean Error) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

Station	Model	1 month (Jan2014)				3 months (Jan-Mar 2014)				6 months (Jan-Jun2014)				1 year (Jan-Dec 2014)				2 years (Jan2014-Dec2015)							
		R Square		M.Err		RMSE		M.Err		RMSE		M.Err		RMSE		M.Err		RMSE		M.Err		RMSE			
		day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night		
CHAN	Local	0.66	0.99	8.65	2.37	0.91	0.99	10.15	4.09	0.96	0.99	11.89	3.61	0.95	0.95	13.61	4.11	0.95	0.95	13.52	2.21	0.95	0.95	13.08	1.44
	Global	0.97	0.92	5.66	4.47	0.97	0.96	5.85	1.55	0.96	0.80	16.28	1.79	0.96	0.83	16.54	2.68	0.95	0.88	16.75	1.86	0.95	0.88	16.61	1.51
CHMA	Local	0.94	0.93	6.90	3.89	0.95	0.97	10.02	-2.64	0.96	0.97	15.21	-1.80	0.96	0.96	14.96	-0.93	0.96	0.96	14.36	-1.68	0.96	0.96	13.95	-2.42
	Global	0.90	0.92	6.88	3.87	0.96	0.95	9.90	-2.89	0.97	0.94	14.47	-2.39	0.96	0.94	14.55	-1.66	0.97	0.94	14.30	-0.61	0.97	0.94	14.43	0.16
NKRM	Local	0.64	1.00	4.49	-1.76	0.96	0.91	7.04	-0.75	0.89	0.92	13.31	3.90	0.92	0.92	12.99	3.60	0.92	0.88	12.86	3.35	0.92	0.88	12.92	4.42
	Global	0.99	0.96	4.53	-1.51	0.98	0.61	7.06	0.06	0.97	0.80	13.47	5.00	0.95	0.68	13.07	4.63	0.95	0.77	14.31	-1.80	0.95	0.77	14.57	-0.57
SISK	Local	0.96	0.86	4.46	-3.32	0.98	0.95	7.96	-4.86	0.97	0.98	14.98	-2.10	0.98	0.96	15.46	-0.89	0.98	0.96	11.62	2.23	0.98	0.96	11.62	2.23
	Global	0.99	0.96	4.47	-2.82	0.98	0.95	8.25	-3.99	0.97	0.96	15.41	-0.82	0.98	0.86	15.82	0.39	0.97	0.96	11.04	0.73	0.97	0.96	11.04	0.73
SOKA	Local	0.93	0.99	10.32	6.60	0.98	0.94	10.78	5.71	0.98	0.96	11.60	6.01	0.98	0.96	11.60	6.02	0.97	0.95	11.96	8.73	0.97	0.95	11.96	8.73
	Global	0.97	0.93	10.06	6.17	0.98	0.96	10.42	5.16	0.97	0.93	11.26	5.29	0.97	0.93	11.26	5.29	0.97	0.93	11.51	7.76	0.97	0.93	11.51	7.76
UDON	Local	0.97	0.93	5.97	-2.16	0.98	0.96	6.82	-3.13	0.97	0.93	14.30	-1.27	0.97	0.93	15.56	-0.50	0.97	0.93	15.59	-0.73	0.97	0.93	15.59	-0.73
	Global	0.97	0.93	6.21	-1.51	0.98	0.96	7.10	-2.15	0.97	0.93	14.63	0.0006	0.97	0.93	15.78	0.76	0.97	0.93	15.82	0.54	0.97	0.93	15.82	0.54
UTTD	Local	0.97	0.95	6.20	0.32	0.97	0.93	6.35	-1.96	0.98	0.92	14.20	-1.05	0.97	0.83	14.71	-0.76	0.97	0.84	15.67	-0.78	0.97	0.84	15.67	-0.78
	Global	0.97	0.95	6.42	0.81	0.97	0.93	6.52	-1.29	0.98	0.92	14.32	-0.31	0.97	0.83	14.84	0.01	0.97	0.84	15.74	-0.03	0.97	0.84	15.74	-0.03

จากตารางผลลัพธ์ที่ 4.1 ทั้งหมด 11 สถานี CORS ตามระยะเวลาต่างๆ ในการนำข้อมูลจากดาวเทียมมาสร้างสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล GNSS เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 4.2 โดยตารางแถวแรกคือ ชื่อสถานีและระยะเวลาของข้อมูลดาวเทียม แถวลัดมาคือระยะเวลาข้อมูลดาวเทียม โดยการทดสอบ เป็นการทดสอบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศอ้างอิงต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

จากการประมวลผลค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อนำมาประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ระยะเวลาของข้อมูล 1 เดือน 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี และ 2 ปี จากการทดสอบทางสถิติแล้ว พบว่า ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ในสถานี DPT9 และ สถานี SRTN นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสถานี PJRK SISK SOKA และ UTTD พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางต่อไปนี้

### ผลการทดสอบทางสถิติ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการของปัจจัยมีผลกระทบต่อความถูกต้องเนื่องจากค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ด้วยการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของสองประชากร โดยกำหนดการทดสอบสมมติฐานของความแปรปรวนของสองประชากรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สถานีตัวอย่างการทดสอบทางสถิติ สถานี DPT9 ระยะเวลา 2 ปี

กรณีที่ 1 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่า  
อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

กรณีที่ 2 ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่า  
อุณหภูมิเฉลี่ยสากล

ตัวอย่างจากประชากรที่ 1

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่า  
อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ตัวอย่างจากประชากรที่ 2

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่า  
อุณหภูมิเฉลี่ยสากล

กำหนดให้  $F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$  ที่เป็นตัวแทนในการทดสอบสมมติฐานกรณีที่ 1 เท่ากับ 0.73

กำหนดให้  $F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$  ที่เป็นตัวแทนในการทดสอบสมมติฐานกรณีที่ 2 เท่ากับ 0.77

กำหนดขอบเขตวิกฤตโดยให้ค่า  $F_{Critical}$  เป็นจุดวิกฤตจากค่าระดับความเชื่อมั่นและองศาเสรีของประชากร ( $df$ ) เมื่อ  $df_1 = n_1 - 1, df_2 = n_2 - 1$  เท่ากับ 0.75 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



สมมติฐานหลักของการทดสอบ

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองเท่ากับ  
ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU

$H_0$  : ยอมรับสมมติฐานหลัก

$H_1$  : ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

กรณีที่ 1  $F_{0.05,133,133} = 0.73 < F_{Critical}$  ดังนั้นจึงยอมรับ  $H_0$

กรณีที่ 2  $F_{0.05,133,133} = 0.77 > F_{Critical}$  ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและจาก  
แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล โดยมีค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศอ้างอิงจาก AIRS และ AMSU  
ทั้งหมด 11 สถานี สามารถดูผลการทดสอบทางสถิติได้จากภาคผนวก ค.

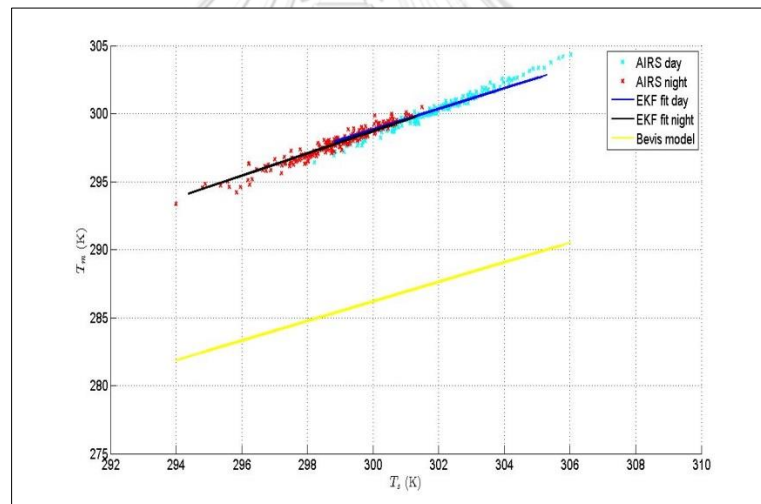




#### 4.2 ผลจากการประมวลผลหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ท้องถิ่นเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับสถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ สถานี UTTD

จากตารางข้างต้นที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทยนั้น จากการประมวลผลโดยนำข้อมูลจากดาวเทียม AQUA มาประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับการประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสำหรับข้อมูล GNSS นั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองคือที่ระยะเวลาของข้อมูลเวลา 2 ปีนั้น มี 6 สถานีได้แก่ สถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ สถานี UTTD โดยผลลัพธ์ที่ทดลองนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ได้ทั้งหมด 6 สถานี แสดงได้ดังต่อไปนี้

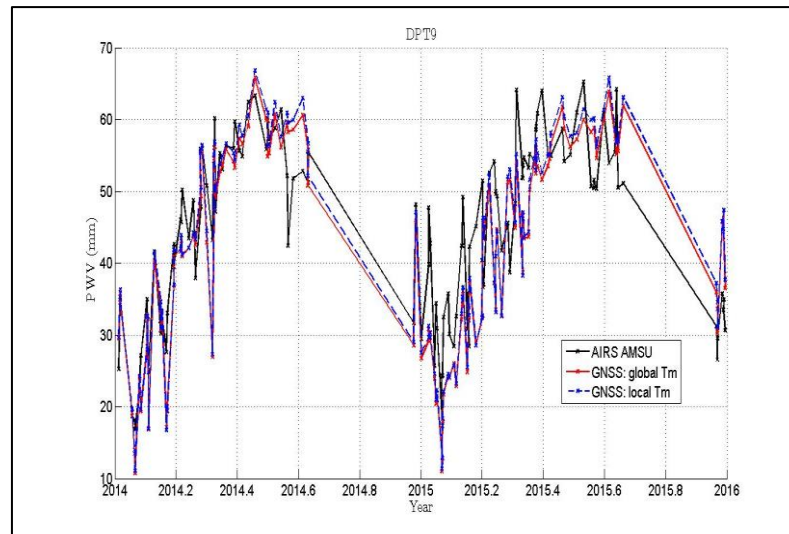
##### 4.2.1 สถานี DPT9



รูปที่ 4. 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU เมื่อใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี DPT9

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.76T_s + 71.67 \quad (14)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.82T_s + 53.22 \quad (15)$$

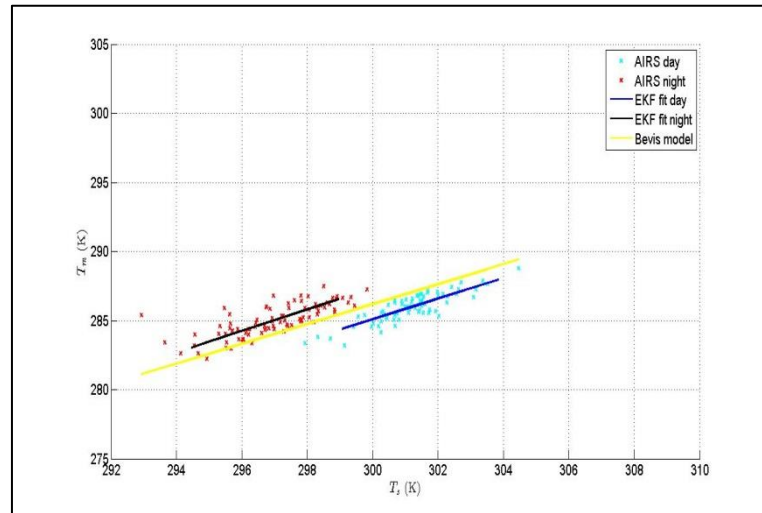


รูปที่ 4. 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี DPT9

ตารางที่ 4. 3 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี DPT9

Station	Model	RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
DPT9	Local	2.1	-1.7	2.1
	Global	1.7	-2.4	1.7

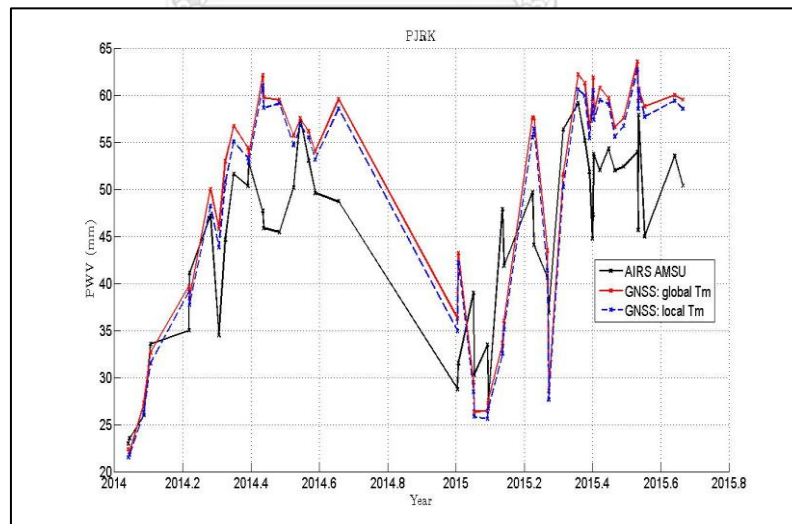
## 4.2.2 สถานี PJRK



รูปที่ 4. 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี PJRK

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.75T_s + 60.58 \quad (16)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.77T_s + 54.96 \quad (17)$$

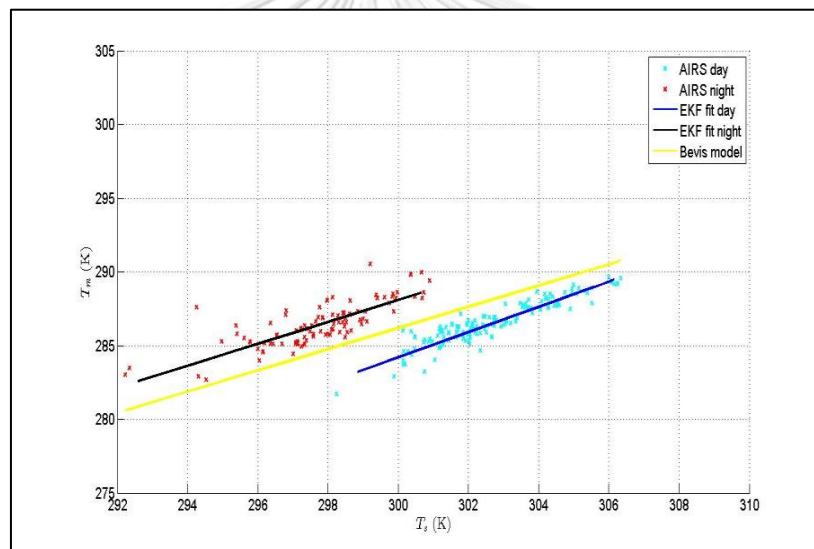


รูปที่ 4. 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี PJRK

ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี PJRK

Station	Model	RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
PJRK	Local	3.2	3.3	3.2
	Global	3.3	4.4	3.3

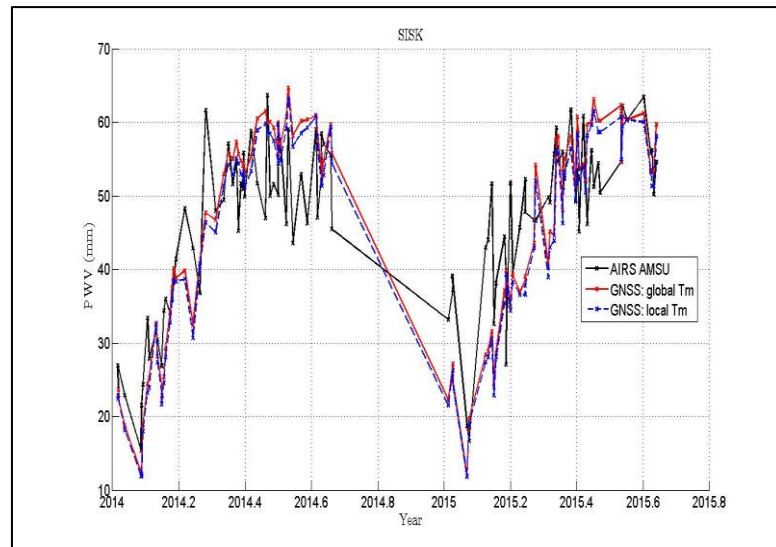
#### 4.2.3 สถานี SISK



รูปที่ 4. 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SISK

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.82T_s + 27.49 \quad (18)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.74T_s + 64.76 \quad (19)$$

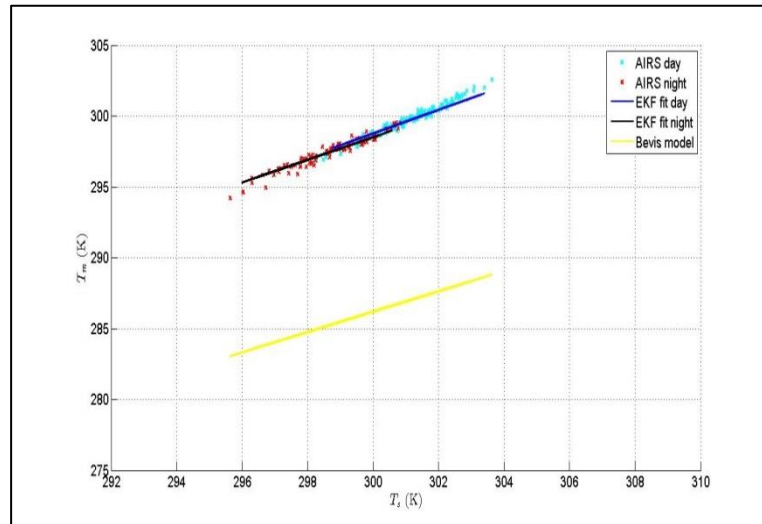


รูปที่ 4. 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SISK

ตารางที่ 4. 5 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SISK

Station	Model	RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
SISK	Local	2.7	-1.8	2.8
	Global	3.0	-0.5	3.0

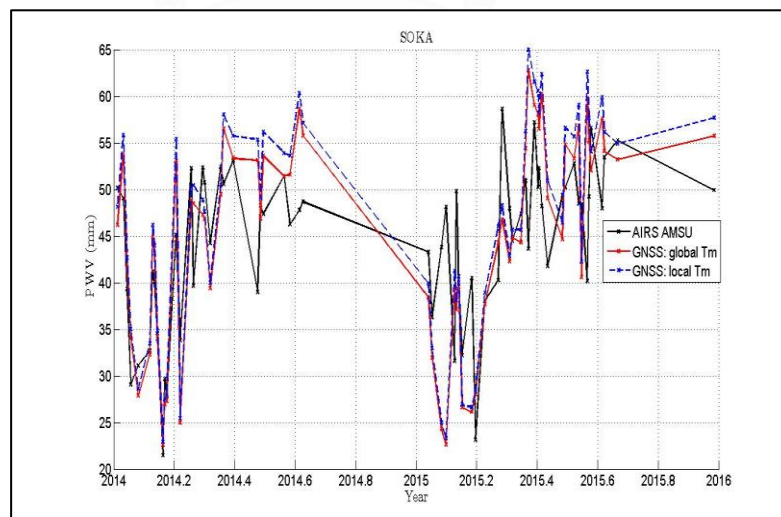
## 4.2.4 สถานี SOKA



รูปที่ 4. 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SOKA

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.83T_s + 49.37 \quad (20)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.79T_s + 60.25 \quad (21)$$



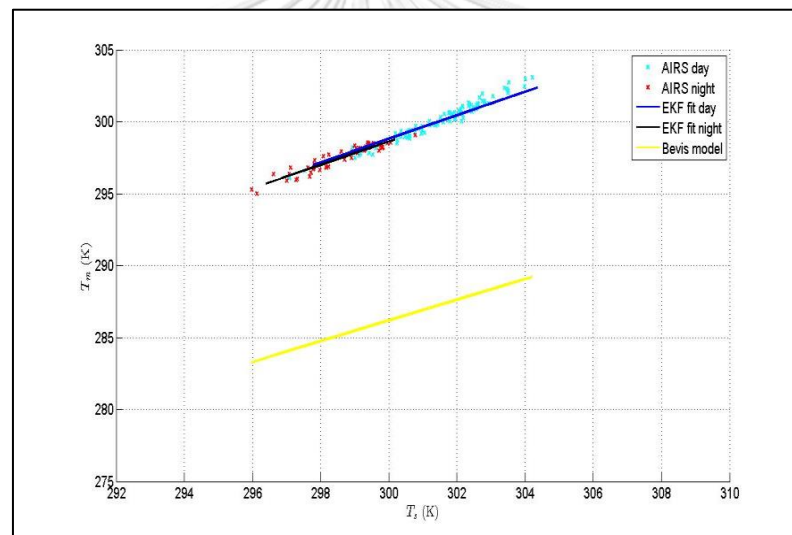
รูปที่ 4. 18 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SOKA



ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SOKA

Station	Model	RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
SISK	Local	3.2	2.2	3.2
	Global	2.6	0.7	2.6

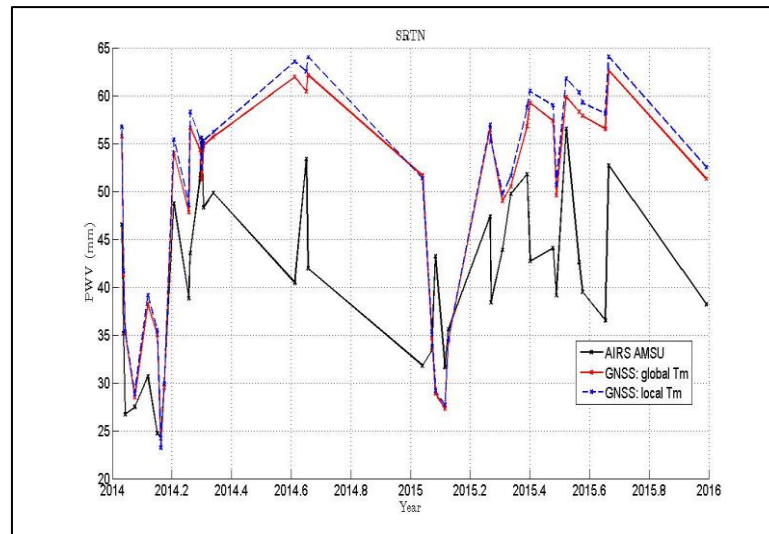
#### 4.2.5 สถานี SRTN



รูปที่ 4. 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SRTN

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.81T_s + 55.28 \quad (22)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.81T_s + 54.40 \quad (23)$$

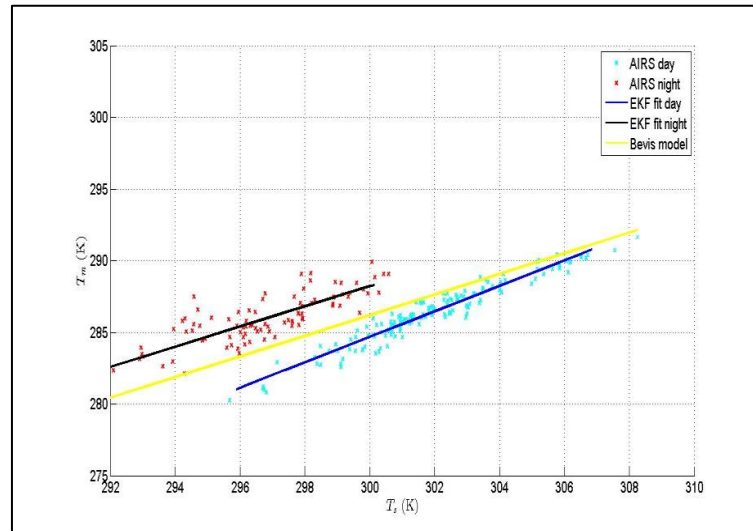


รูปที่ 4. 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี SRTN

ตารางที่ 4. 7 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี SRTN

Station		RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
SRTN	Local	3.2	8.7	3.2
	Global	2.7	7.8	2.8

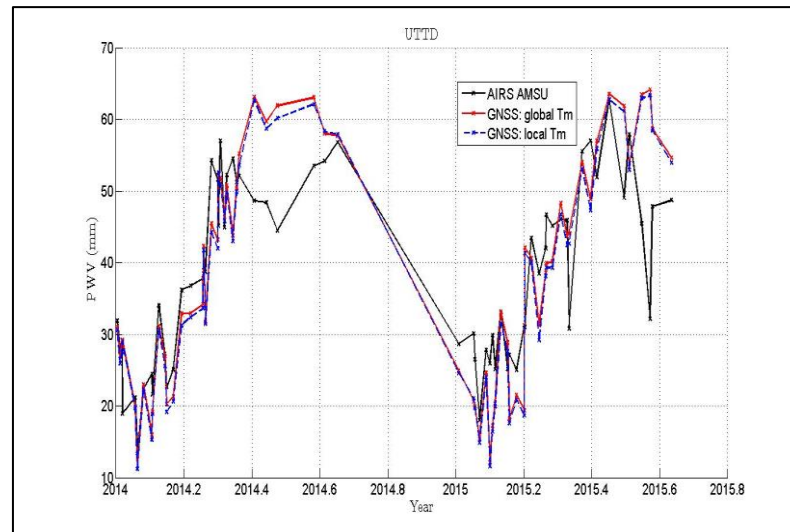
## 4.2.6 สถานี UTTD



รูปที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องรับ AIRS และ AMSU ที่สัมพันธ์กับแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นมากกว่าแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี UTTD

$$\text{ช่วงกลางวัน} \quad T_m = 0.89T_s + 18.17 \quad (24)$$

$$\text{ช่วงกลางคืน} \quad T_m = 0.71T_s + 76.49 \quad (25)$$



รูปที่ 4. 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS จากแบบจำลองค่า  
อุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลที่สถานี UTTD

ตารางที่ 4. 8 แสดงค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง Mean Error และ  
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่องวัด AIRS และ AMSU ที่สถานี  
UTTD

Station		RMSE	Mean Error	STD
		mm	mm	mm
UTTD	Local	3.3	-0.7	3.3
	Global	3.4	-0.03	3.4

## บทที่ 5

### อภิปราย สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผล สรุปผลการของดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆ ของงานวิจัย ตลอดจนถึงกระบวนการงานวิจัยและผลที่ได้จากงานวิจัยนี้

#### 5.1 อภิปรายผล

จากการวิจัยที่ผ่านมา การสร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จากข้อมูลดาวเทียม AQUA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก GNSS นั้น มีจุดประสงค์ ในการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศ (Precipitable Water Vapor) ในประเทศไทยมากขึ้นสำหรับการพยากรณ์หรือ คาดการณ์ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะประมาณค่าด้วยวิธีการประมวลผล EKF (Extended Kalman Filter) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean Temperature) เพื่อนำไปใช้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากการประมวลผลทาง ตำแหน่งโดยใช้การรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning) ใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย PANDA

ผลการศึกษา จากการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อสร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ท้องถิ่น และได้นำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ของแต่ละสถานี จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่า อุณหภูมิเฉลี่ยสากล โดยมีค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่องรับ AIRS และ AMSU เป็น ตัวอ้างอิง

จากผลการวิเคราะห์จากกราฟแสดงผลการวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณไอน้ำใน บรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล ทั้งหมด 11 สถานี COR ข้อมูลจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระยะเวลา 2 ปี สามารถนำมาประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อนำไป ประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS สำหรับบางสถานี ได้แก่ สถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ สถานี UTDD

## 5.2 สรุปผล

จากการดำเนินงานวิจัย ผลจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า สามารถใช้ข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากดาวเทียม AQUA มาประมวลผลเพื่อสร้างรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับระดับสถานี เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ได้ในเฉพาะบางพื้นที่สำหรับสถานี CORS ในประเทศไทย ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานในบางประการ ได้แก่ ระดับภูมิภาคและทั่วประเทศ ไม่สามารถสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นจากการประมาณค่าด้วยวิธีการ EKF สำหรับประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ได้ เนื่องจากลักษณะพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีการกระจายตัวเป็นหลายกลุ่มข้อมูล ในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะในการใช้วิธีการ EKF ในสร้างประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

เมื่อได้ทำการวิจัยในระดับสถานีแล้ว พบว่า ระยะเวลาข้อมูลของดาวเทียม 2 ปีนั้น สามารถสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นเพื่อนำไปประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ได้ในบางสถานี ได้แก่ สถานี DPT9 PJRK SISK SOKA SRTN และ สถานี UTTD

จากการประมวลผลข้อมูลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากดาวเทียม ระยะเวลา 2 ปี ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล จากการทดสอบทางสถิติจากทั้งหมด 11 สถานี พบว่า สถานีที่กล่าวข้างต้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสถานีอื่นๆ ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองนั้นให้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก และจากการทดสอบทางสถิตินั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากดาวเทียม AQUA นั้นอาจจะมีข้อจำกัดในบางประการ เช่น ความละเอียดของภาพมีขนาดใหญ่ ฤดูกาล ช่วงมรสุม หรือการบดบังของเมฆ ซึ่งจะมีผลกระทบที่ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากการกำหนดขอบเขตพื้นที่ในการทำวิจัย แสดงให้เห็นว่า การสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับงานวิจัยนี้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประเทศไทยพื้นที่ที่มีบริเวณกว้างได้ จึงควรมีงานวิจัยต่อไปในศึกษาการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับประเทศไทยได้

5.3.2 เนื่องด้วยค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้จากเครื่องรับสัญญาณของ GPS เท่านั้น ในอนาคตควรเปรียบเทียบกับระบบดาวเทียมอื่นๆร่วมด้วย เช่น ระบบ GLONASS และ BEIDOU ต้นเป็น

5.3.3 จากผลการวิจัยข้างต้นเพื่อต้องการค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นนั้น ควรมีระยะเวลาของดาวเทียม AQUA เป็นเวลายาวนานขึ้นสำหรับสถานีอื่นๆที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นได้ (เช่น ระยะเวลาข้อมูลของดาวเทียมควรมีระยะเวลามากกว่า 2 ปีขึ้นไป) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการนำมาใช้ประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการพยากรณ์หาแนวโน้มของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในอนาคตได้

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

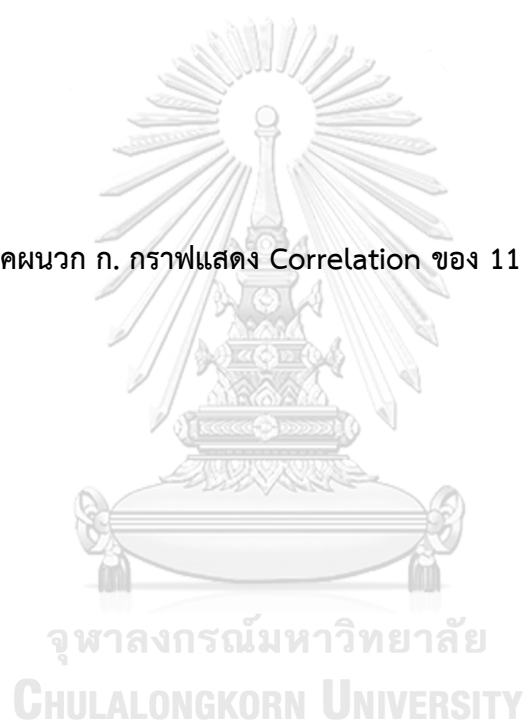


- Awange, J. L. (2011). Environmental Monitoring Using GNSS : Global Navigation Satellite Systems.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801. doi:10.1029/92JD01517
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: an introduction*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press.
- Divakarla, M. G., Barnett, C. D., Goldberg, M. D., McMillin, L. M., Maddy, E., Wolf, W., . . . Liu, X. (2006). Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D9), n/a-n/a. doi:10.1029/2005JD006116
- Edward T. Olsen Eric Fetzer, G. H., Peter Kalmus, Evan Manning, and, Wong, S., Jet Propulsion Laboratory, C. I. o. T., John Blaisdell, L. I., SAIC/GSFC, Joel Suskind, GSFC, Juying Warner, Z. W., UMCP, William Blackwell, M., & Eric Maddy, S., Inc. at NOAA/NESDIS/STAR. (2017). AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product User Guide. 134.
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., & Jurs, S. G. (2003). Applied statistics for the behavioral sciences. Retrieved from <http://catalog.hathitrust.org/api/volumes/oclc/50716608.html>
- Huang Liangke, L. L. a. Y. C. (2012). A zenith tropospheric delay correction model based on the regional CORS network.
- Mohiner S. Grewal, L. R. W., Angus P. Andrews. (2001). Global Positioning Systems Inertial Navigation, and Intergration. 179-213.
- P. Héroux, J. K., P. Collins and F. Lahaye. (2001). GPS Carrier-Phase Point Positioning with Precise Orbit Products.
- Parkinson, C. L., Ward, A., & King, M. D. (2006). Earth Science Reference Handbook A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions. (National Aeronautics and Space Administration).

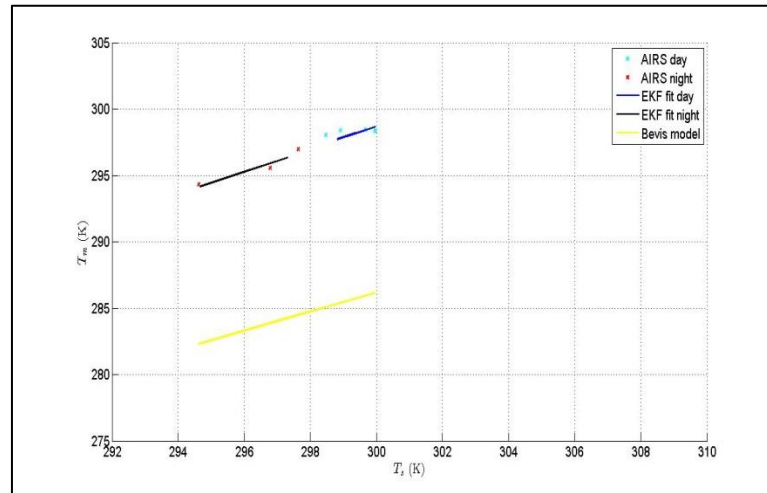
- Saastamoinen, J. (2013). Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. In *The Use of Artificial Satellites for Geodesy* (pp. 247-251): American Geophysical Union.
- Sapucci, L. F. (2014). Evaluation of Modeling Water-Vapor-Weighted Mean Tropospheric Temperature for GNSS-Integrated Water Vapor Estimates in Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(3), 715-730. doi:doi:10.1175/JAMC-D-13-048.1
- Schueler, T., Pósfay, A., Hein, G. W., & Biberger, R. (2001). A global analysis of the mean atmospheric temperature for GPS water vapor estimation.
- Shuanggen Jin, E. C., Feiqin Xie. (2014). *GNSS Remote Sensing*: Springer Netherlands.
- Suwantong, R., Satirapod, C., Srestasathien, P., & Kitpracha, C. (2016). *Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AIRS and AMSU for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation*. Paper presented at the Institute of Navigation, Portland, Oregon.
- V. B. Mendes, G. Prates, & Langley, R. B. (2000). An Evaluation of the Accuracy of Models for the Determination of the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). 7 - Atmospheric Dynamics. In *Atmospheric Science (Second Edition)* (pp. 271-311). San Diego: Academic Press.
- กฤษฎา , แ. (2555). แนะนำ Kalman Filter Algorithm. 126-137.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์, และ ล้วนแสง, ม. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบวิธี Extended Kalman filter และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่ใช้ในการหาตำแหน่งด้วยจีพีเอสแบบจุดเดี่ยวที่ให้ความละเอียดสูง. (2007-04).
- ชัยพร, ก. (2558). การวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากการใช้นาฬิกาเครื่องรับความเสถียรภาพสูงในการประมวลผลข้อมูล GNSS สำหรับการรังวัดจุดเดี่ยวความละเอียดสูง.



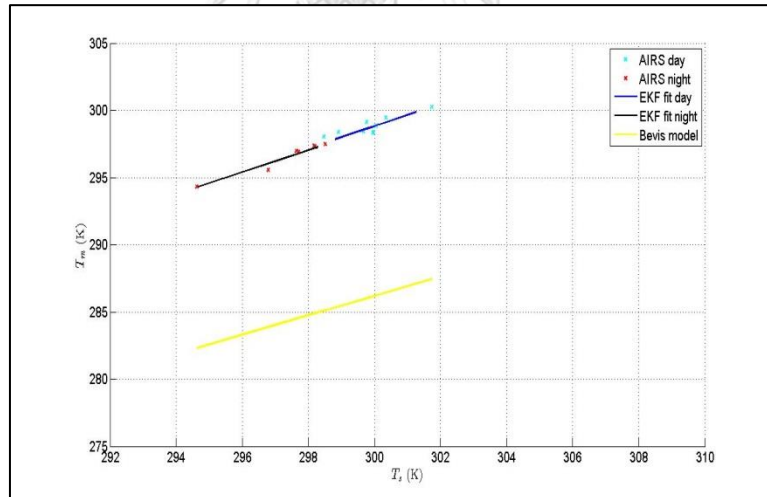
ภาคผนวก ก. กราฟแสดง Correlation ของ 11 สถาบัน COR



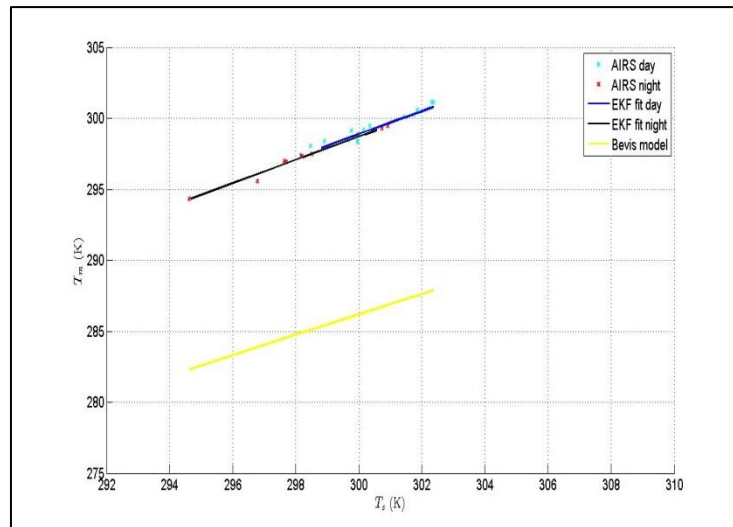
## สถานี CHAN



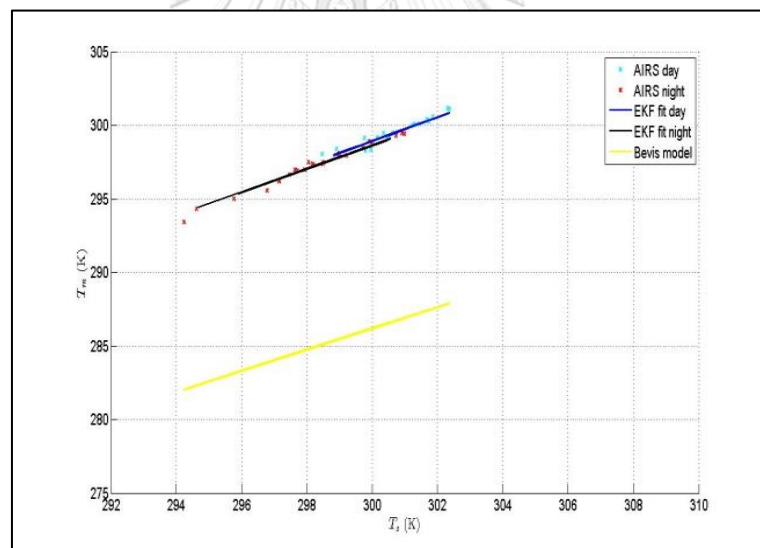
รูปที่ ก. 1 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี CHAN



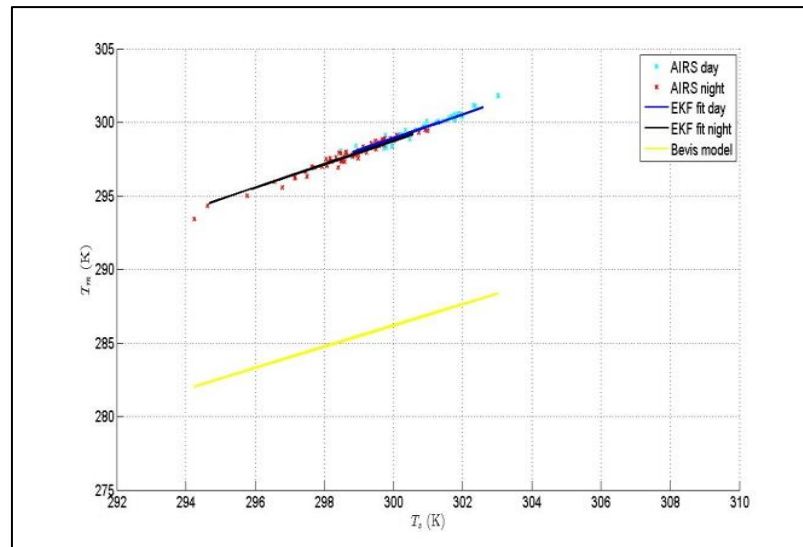
รูปที่ ก. 2 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี CHAN



รูปที่ ก. 3 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี CHAN

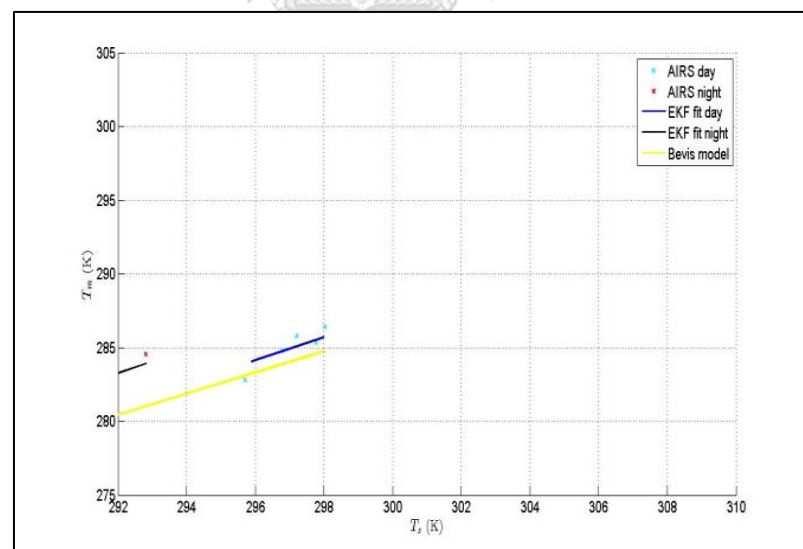


รูปที่ ก. 4 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี CHAN

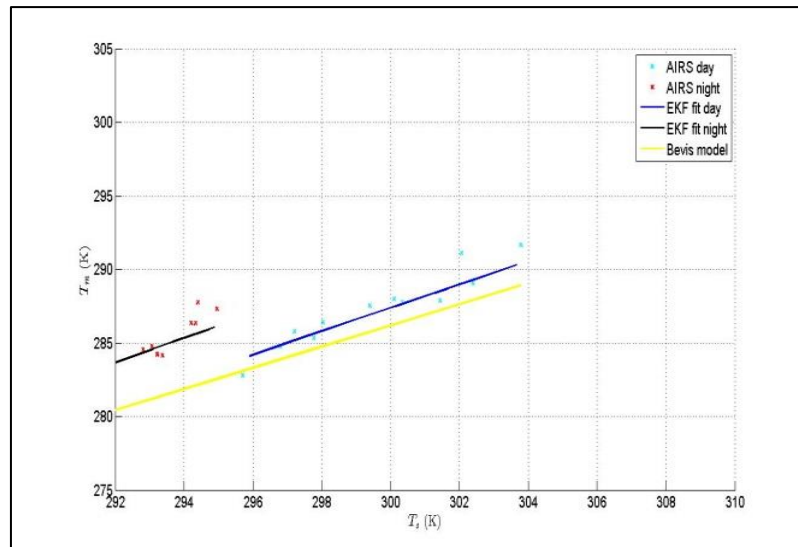


รูปที่ ก. 5 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี CHAN

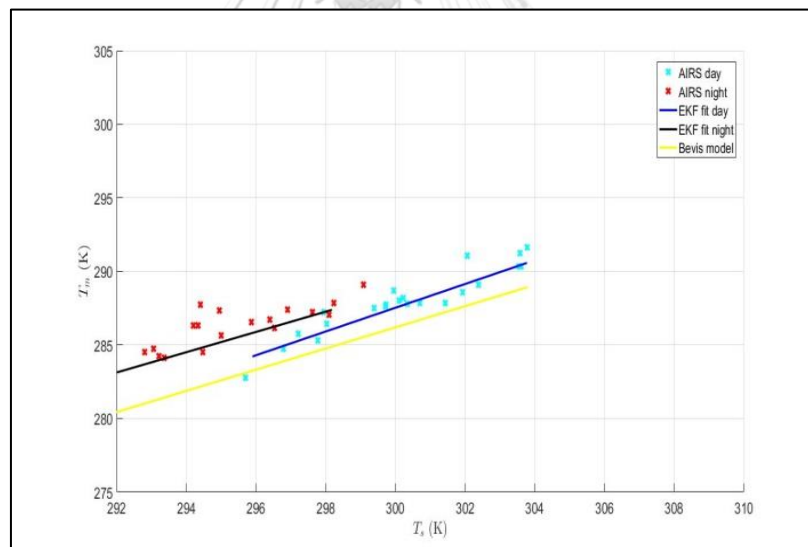
สถานี CHMA



รูปที่ ก. 6 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี CHMA

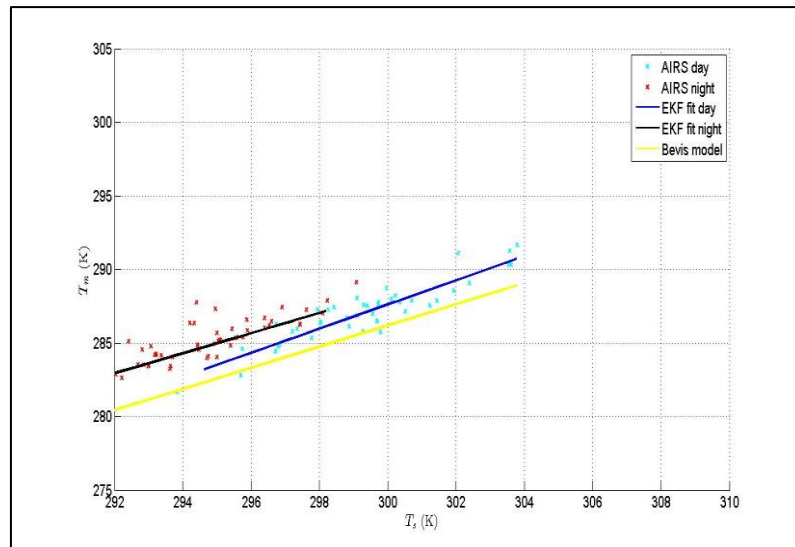


รูปที่ ก. 7 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี CHMA

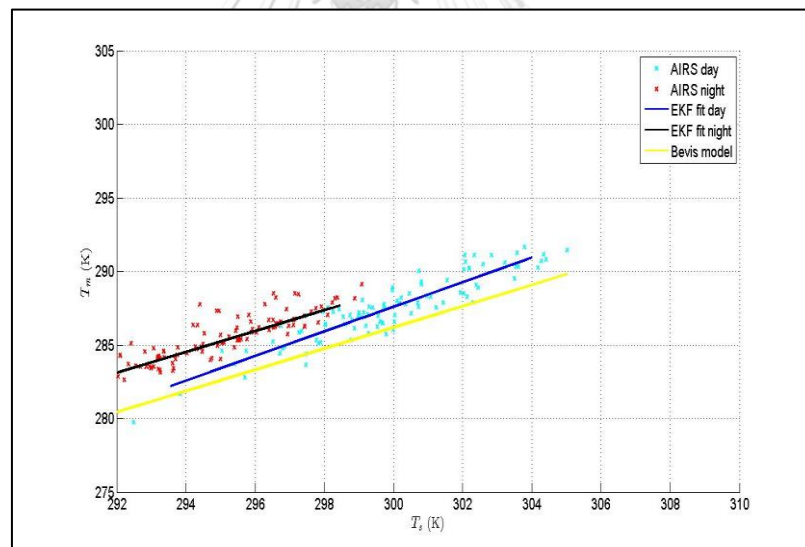


รูปที่ ก. 8 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี CHMA



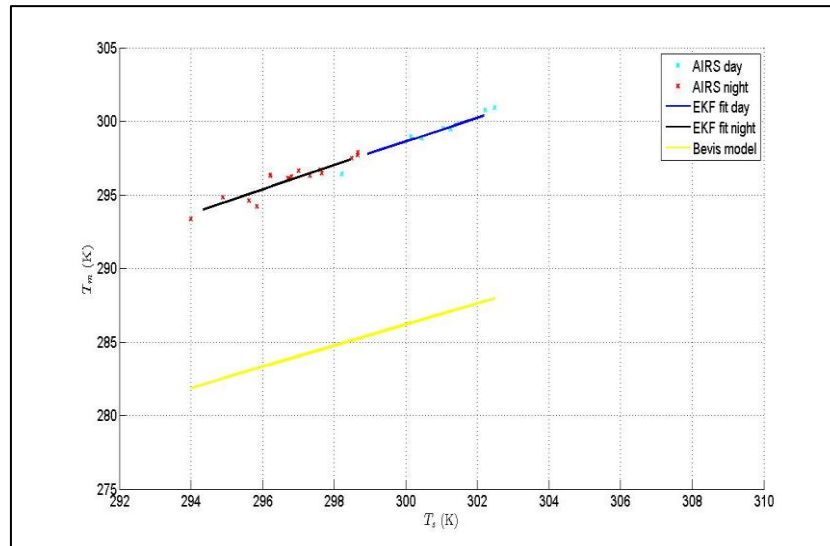


รูปที่ ก. 9 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถาบัน CHMA

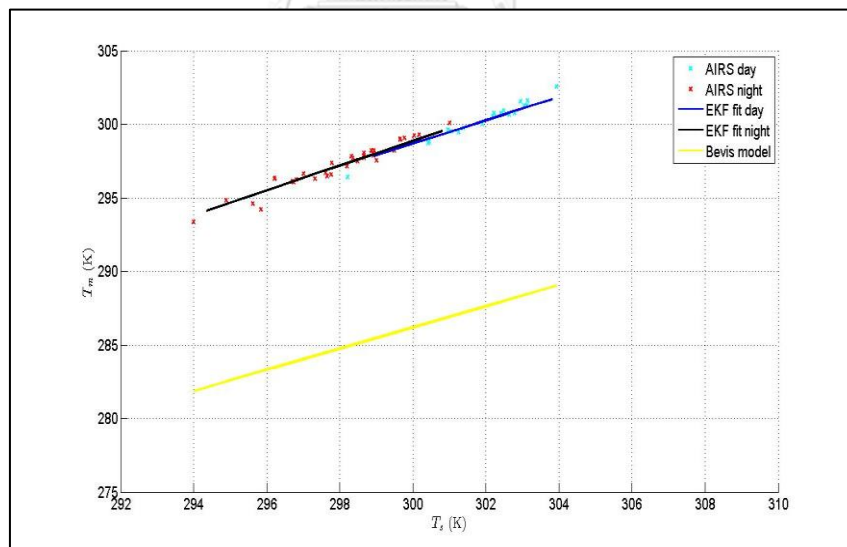


รูปที่ ก. 10 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถาบัน CHMA

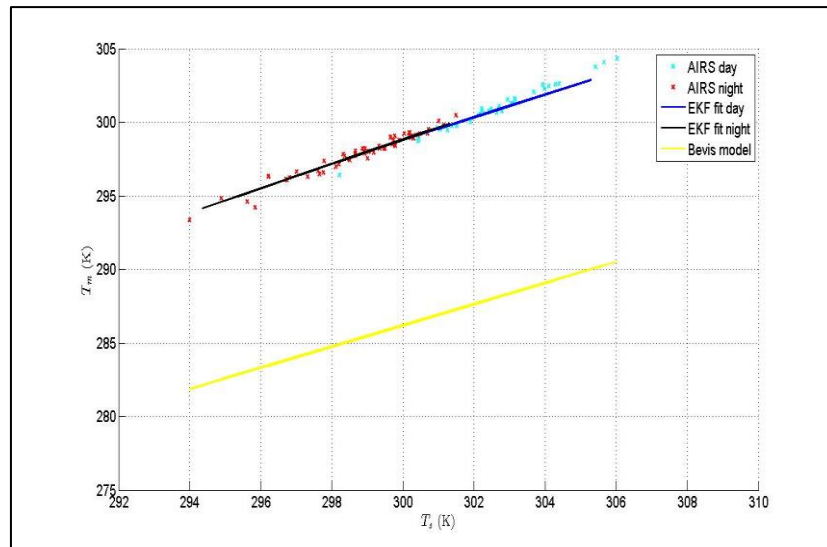
## สถานี DPT9



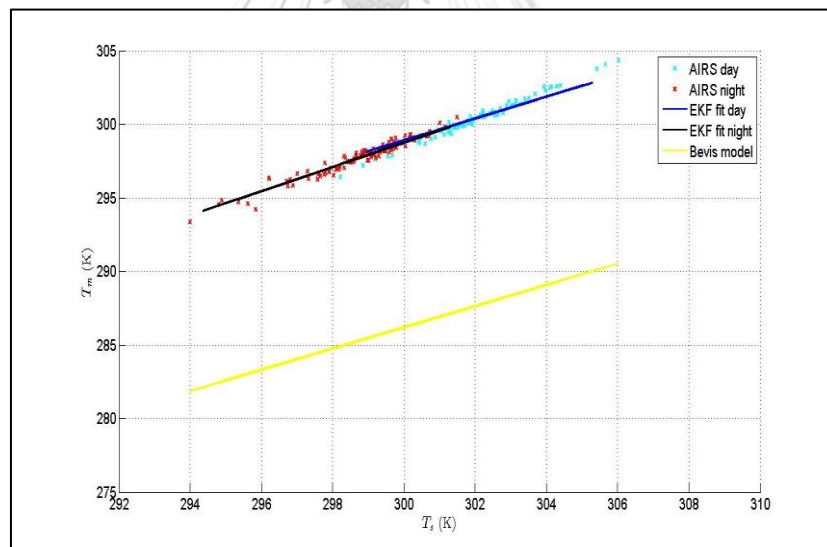
รูปที่ ก. 11 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี DPT9



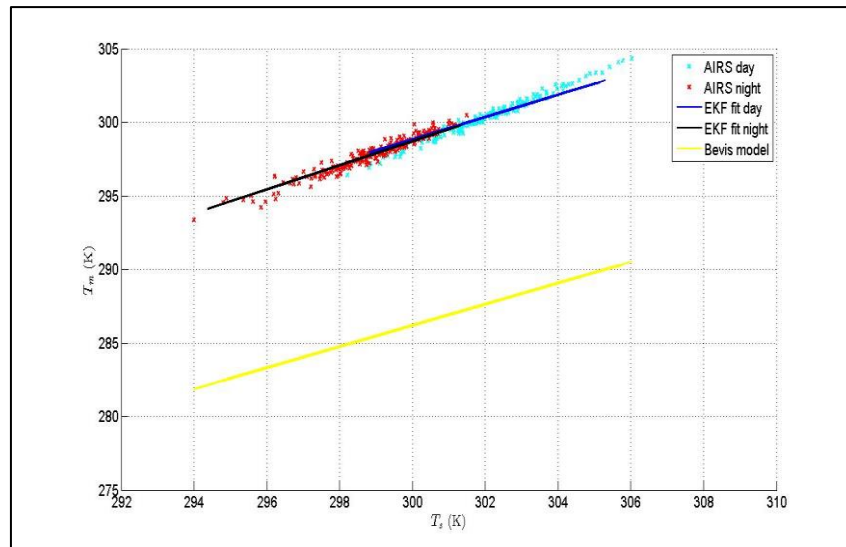
รูปที่ ก. 12 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี DPT9



รูปที่ ก. 13 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี DPT9

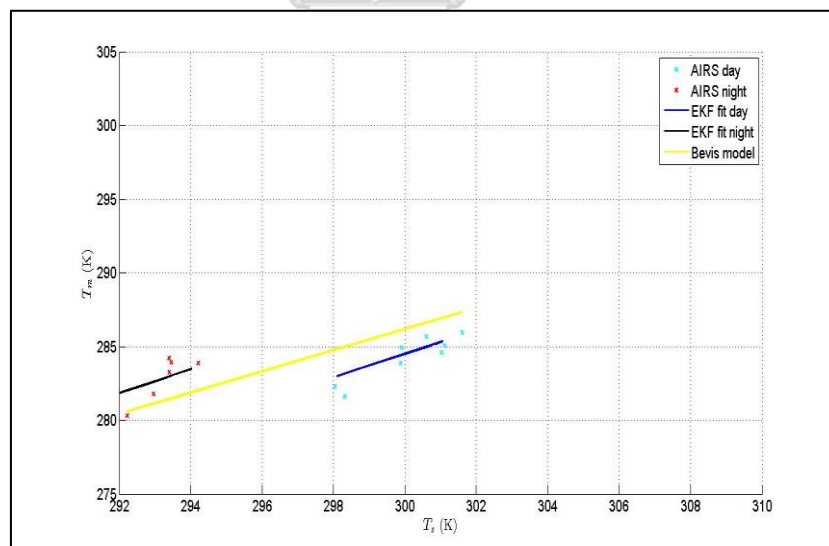


รูปที่ ก. 14 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี DPT9

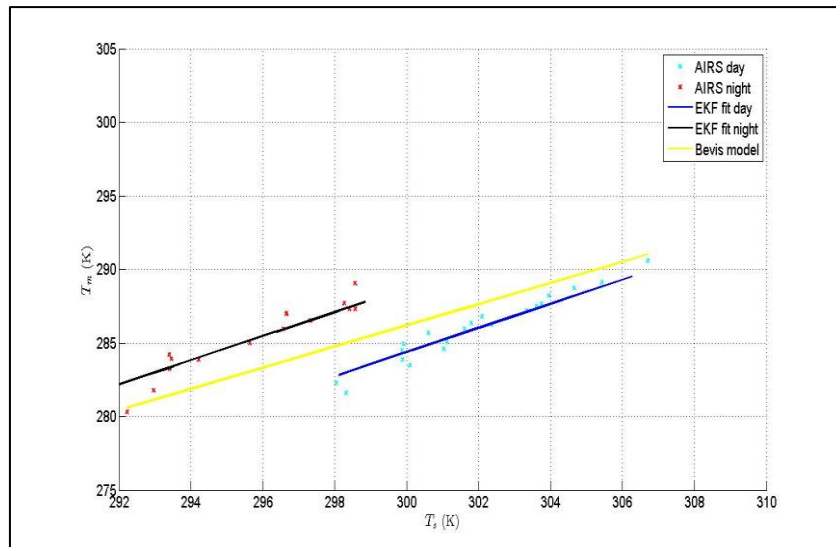


รูปที่ ก. 15 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี DPT9

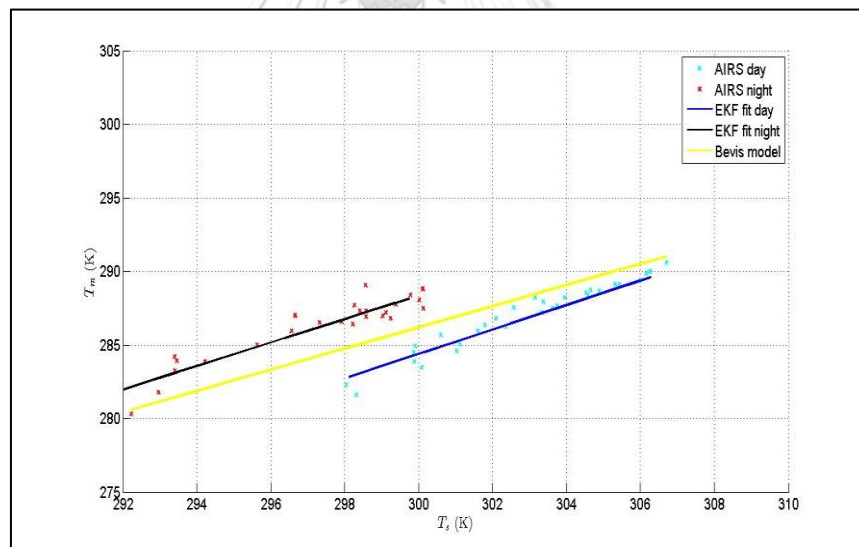
สถานี NKRM



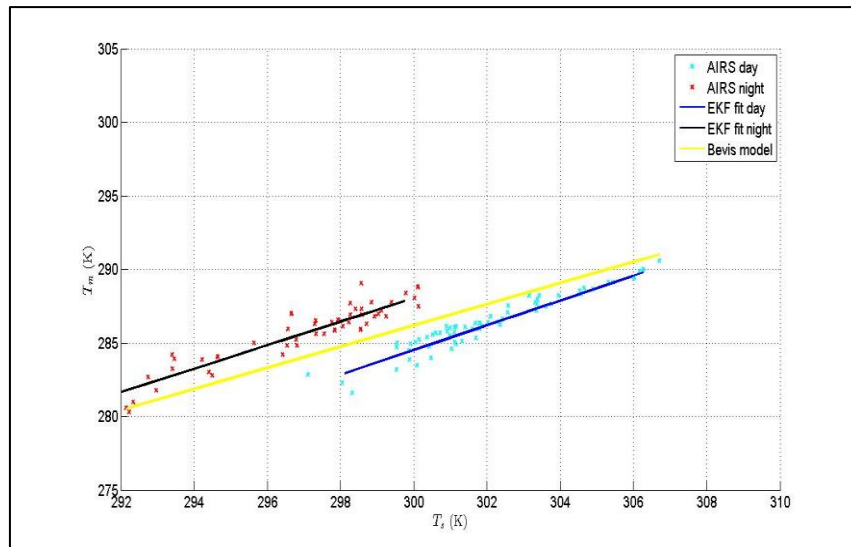
รูปที่ ก. 16 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี NKRM



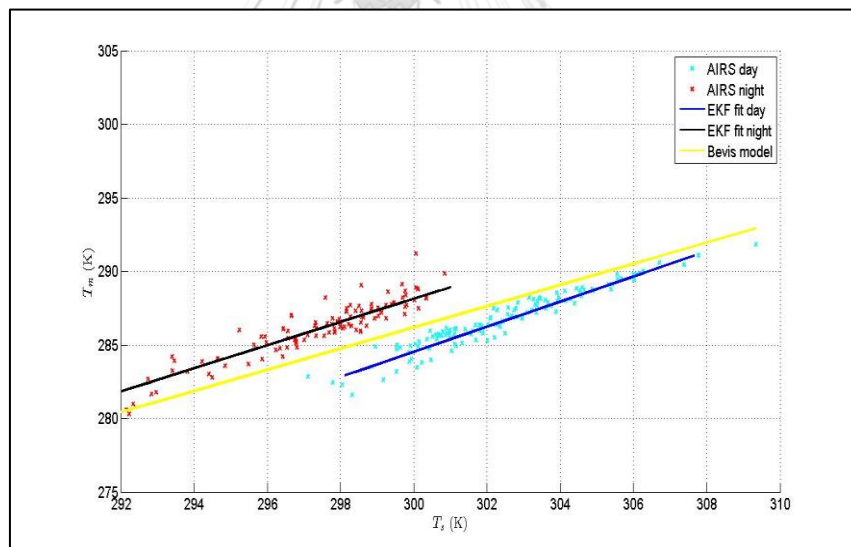
รูปที่ ก. 17 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี NKRM



รูปที่ ก. 18 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี NKRM

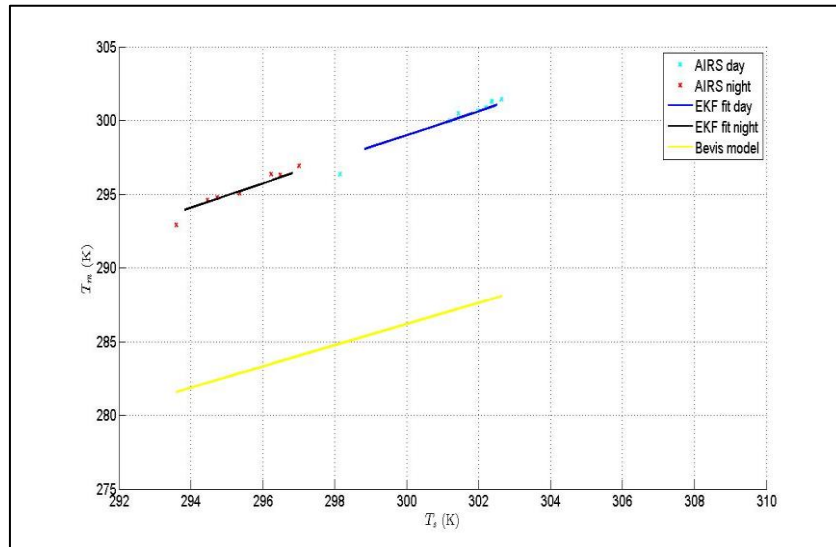


รูปที่ ก. 19 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี NKRM

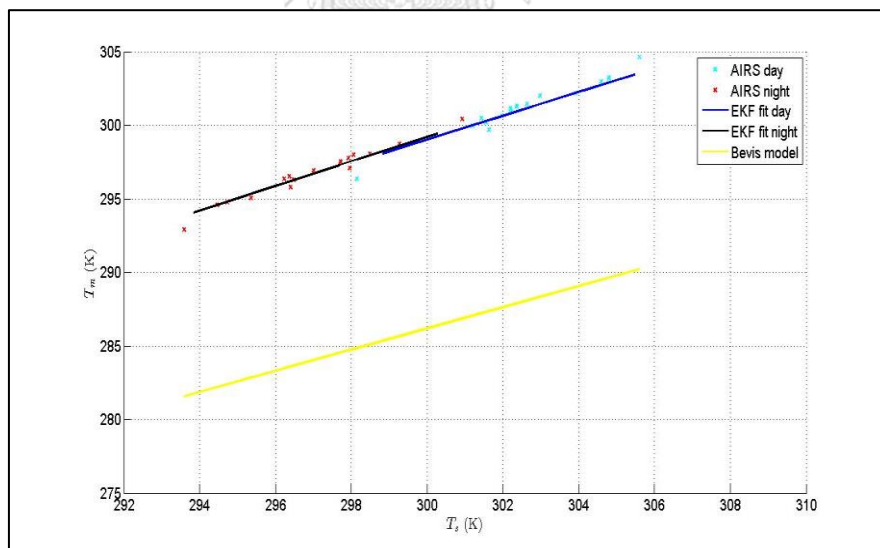


รูปที่ ก. 20 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี NKRM

## สถานี NKSU

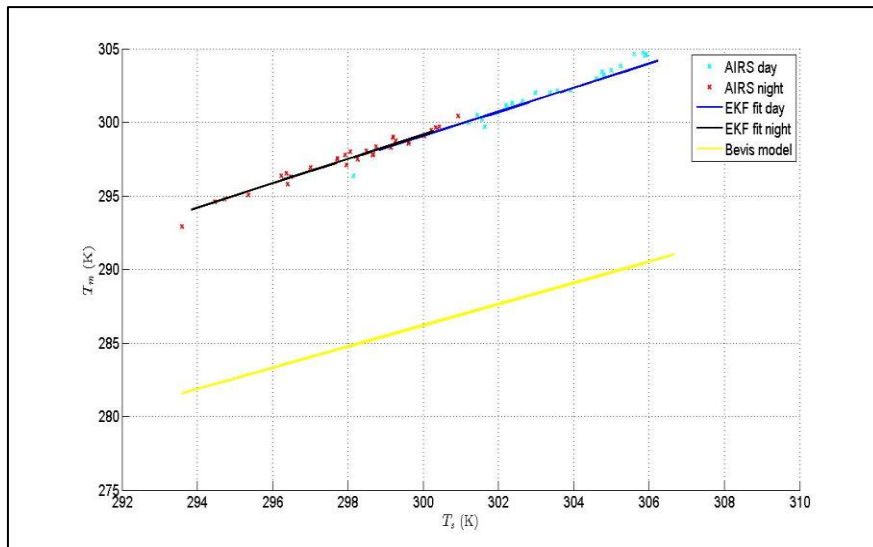


รูปที่ ก. 21 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี NKSU

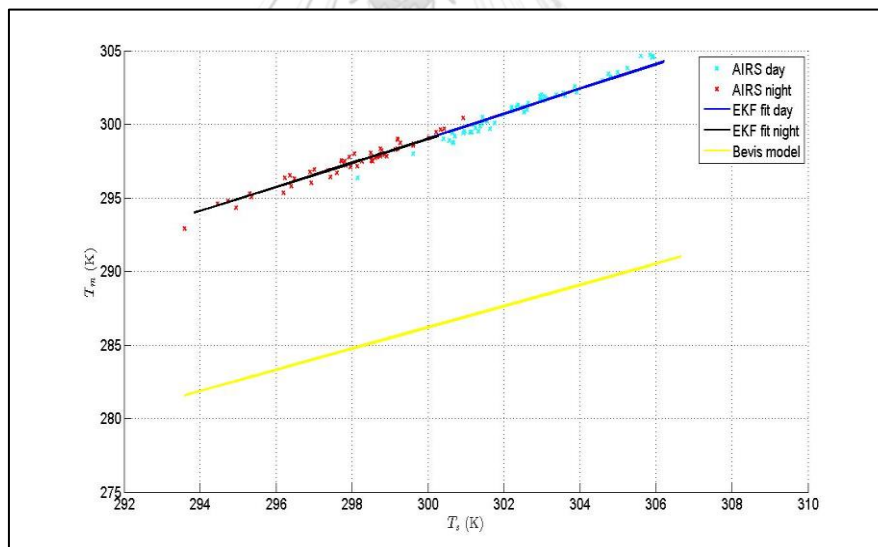


รูปที่ ก. 22 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี NKSU



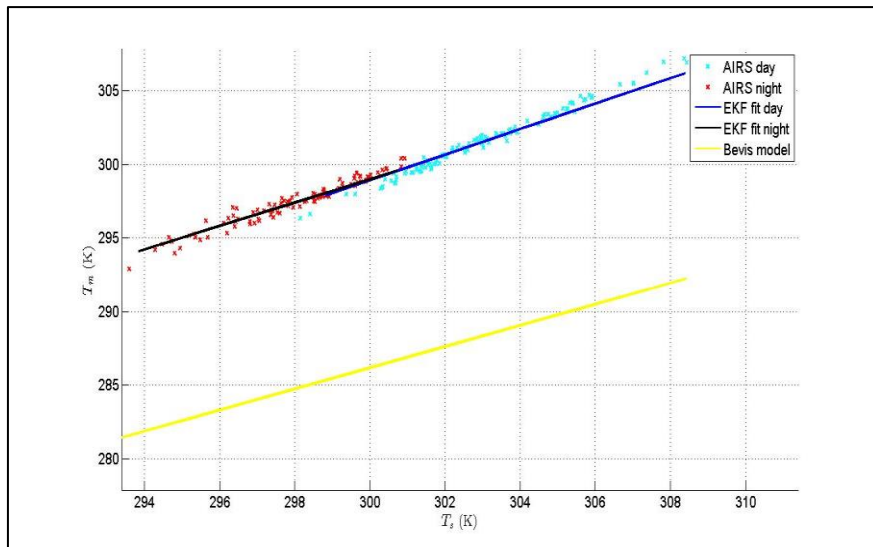


รูปที่ ก. 23 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี NKSU



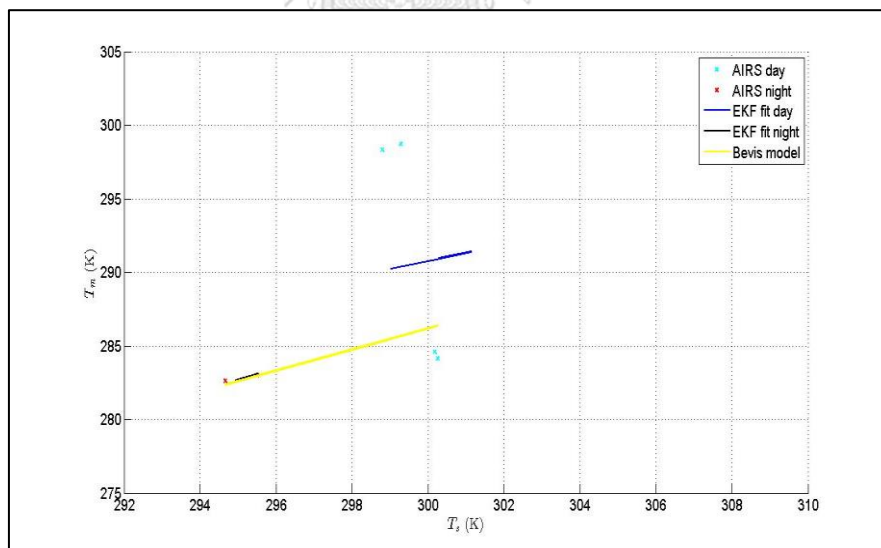
รูปที่ ก. 24 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี NKSU



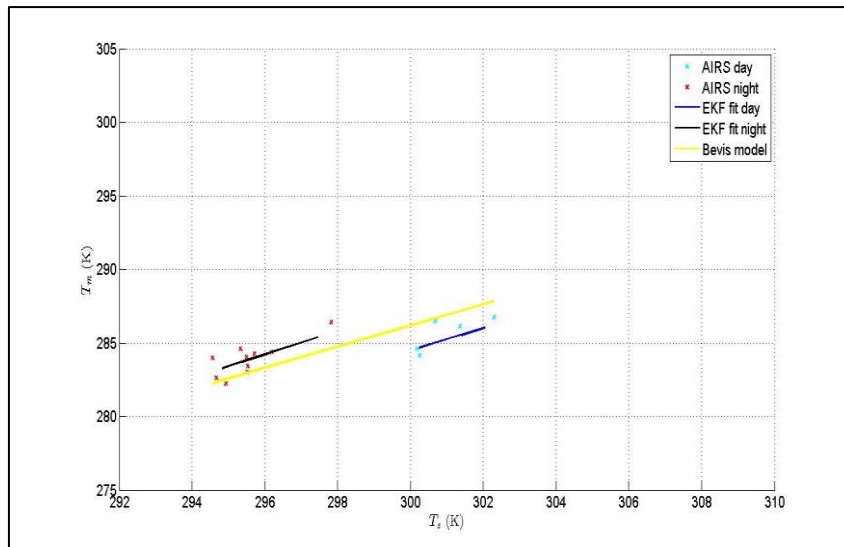


รูปที่ ก. 25 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี NKSW

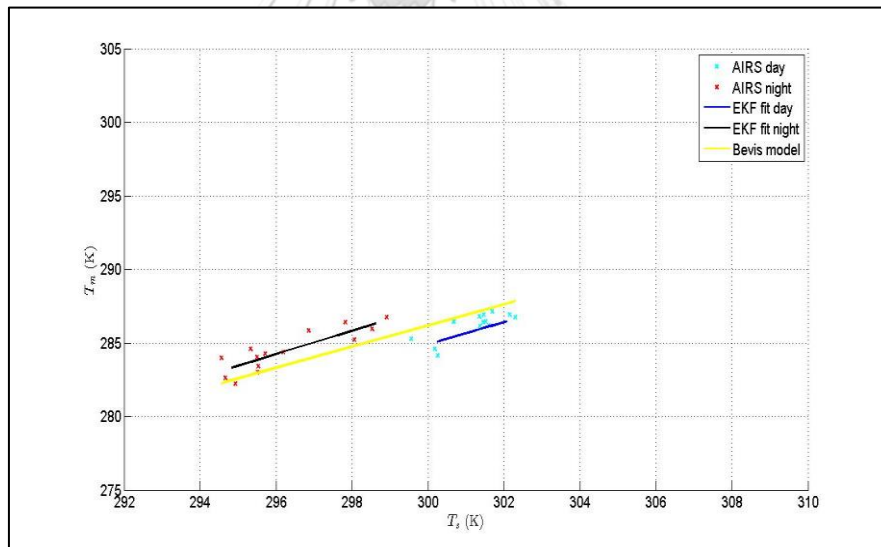
สถานี PJRK



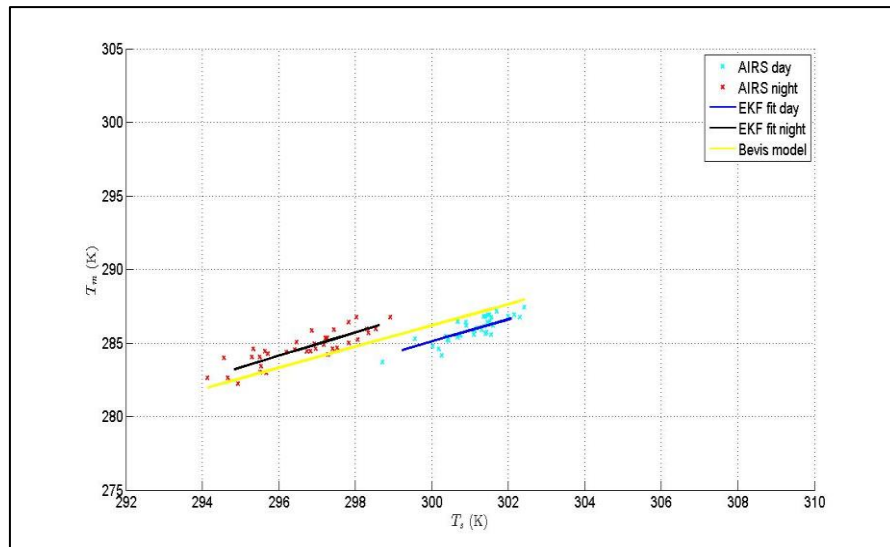
รูปที่ ก. 26 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี PJRK



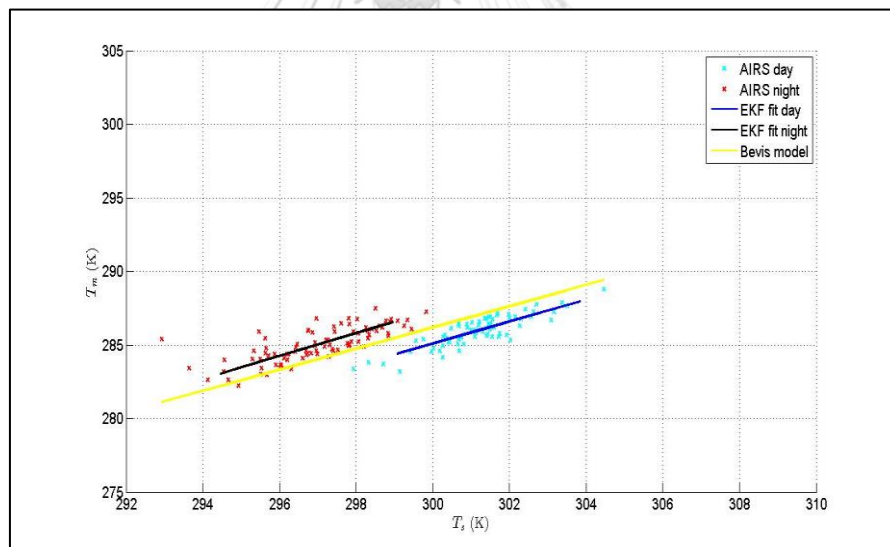
รูปที่ ก. 27 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี PJRK



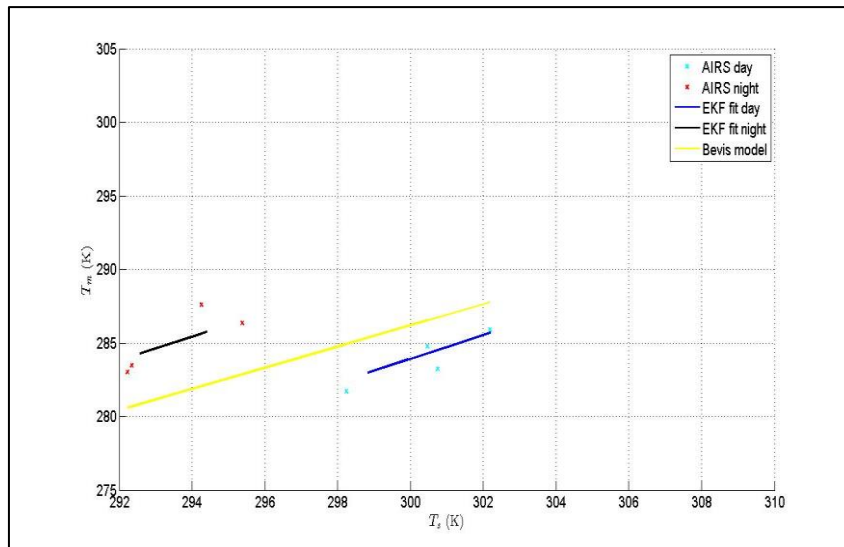
รูปที่ ก. 28 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี PJRK



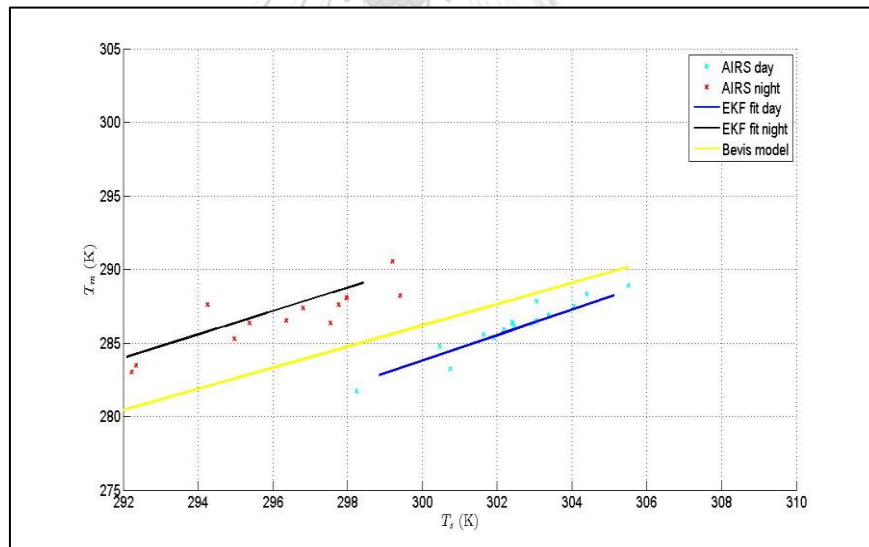
รูปที่ ก. 29 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี PJRK



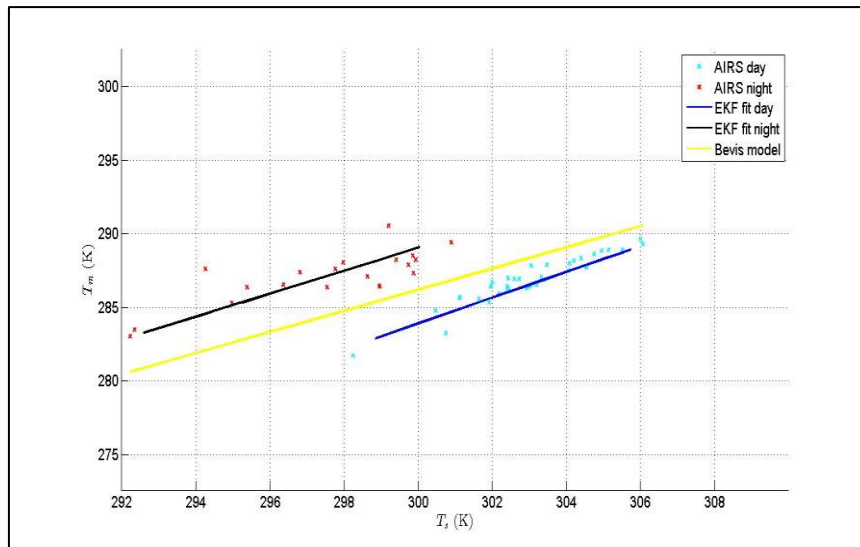
รูปที่ ก. 30 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี PJRK



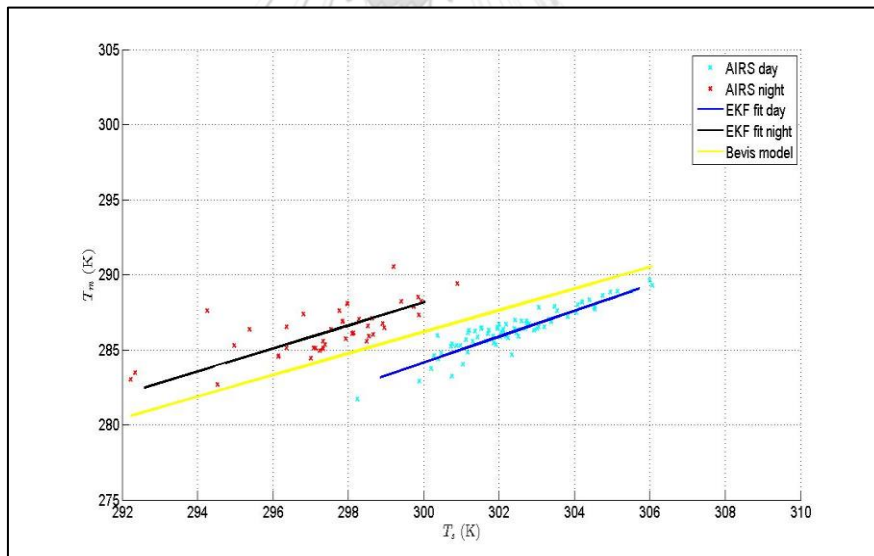
รูปที่ ก. 31 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี SISK



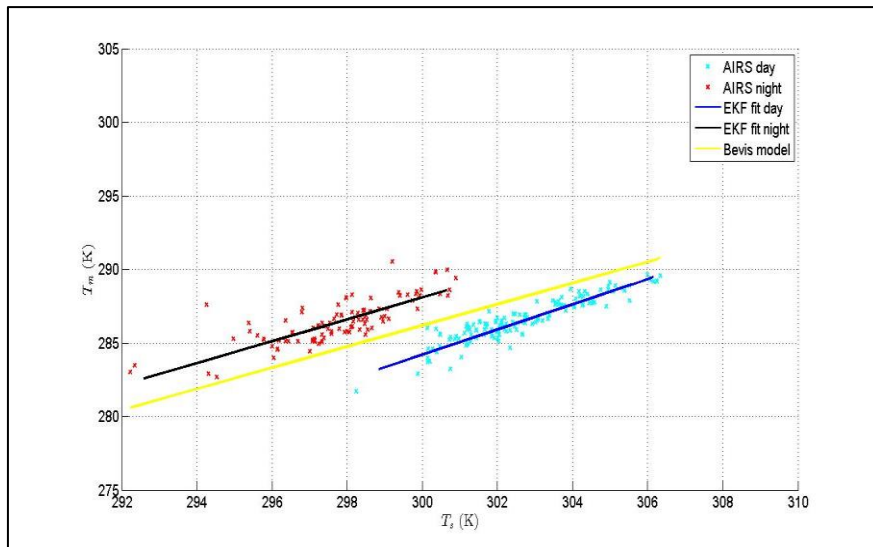
รูปที่ ก. 32 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี SISK



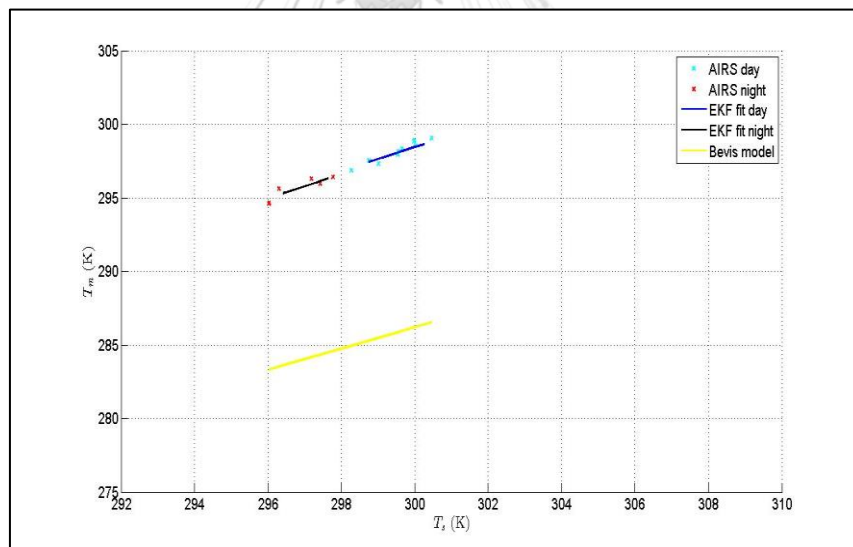
รูปที่ ก. 33 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี SISK



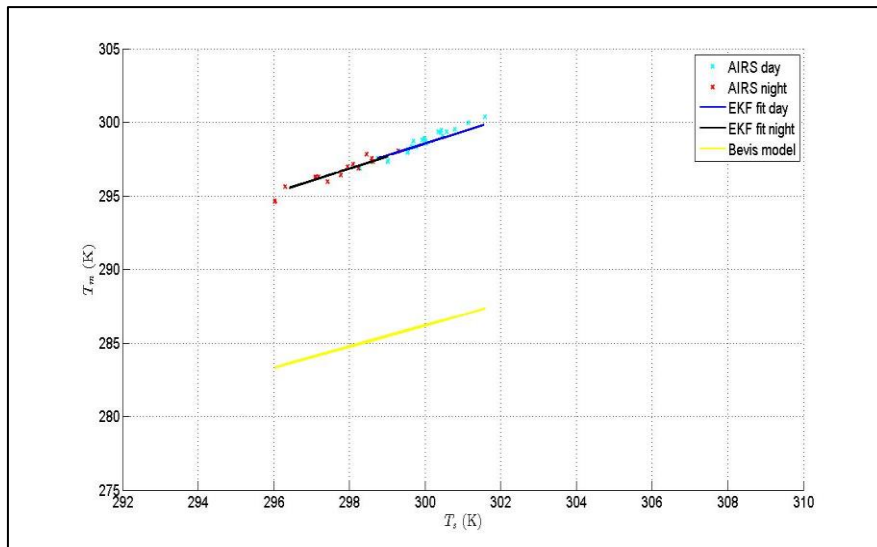
รูปที่ ก. 34 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี SISK



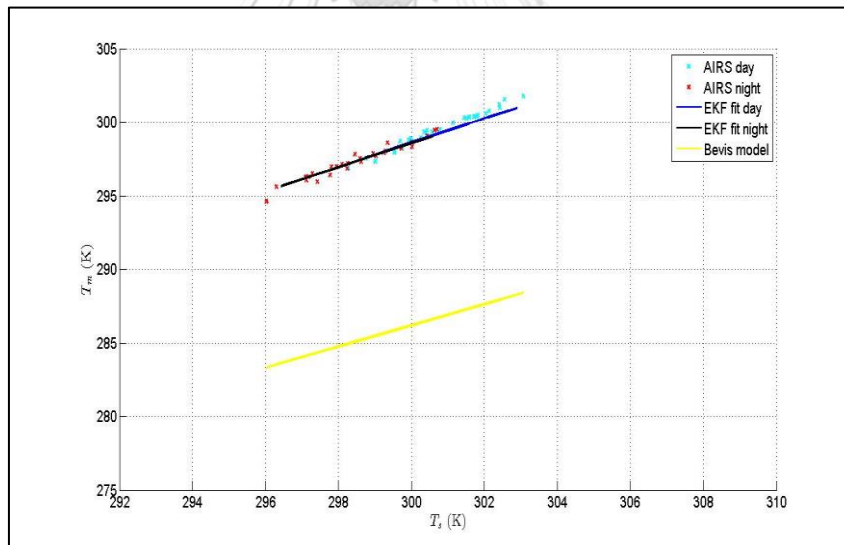
รูปที่ ก. 35 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี SISK



รูปที่ ก. 36 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี SOKA

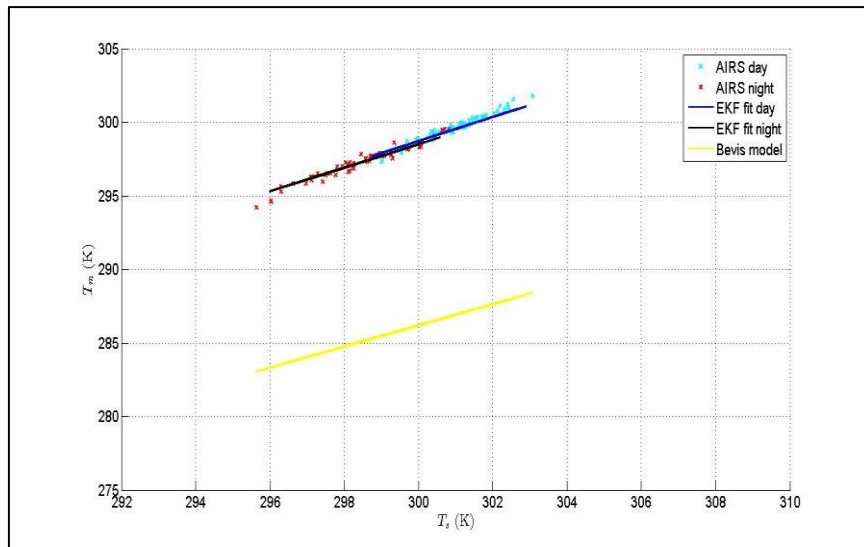


รูปที่ ก. 37 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี SOKA

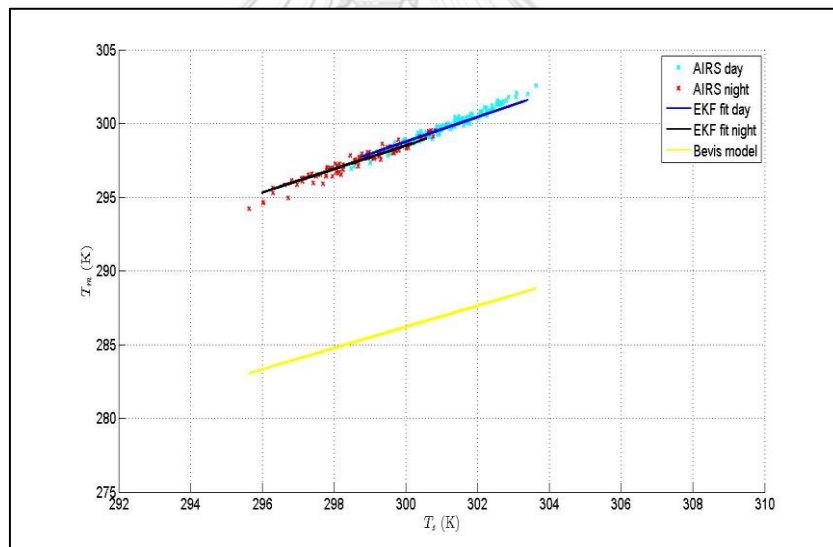


รูปที่ ก. 38 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี SOKA



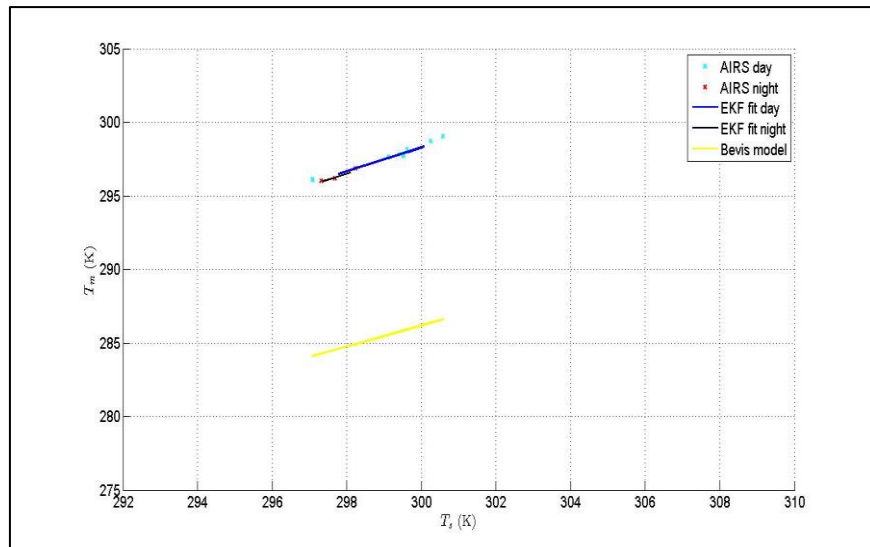


รูปที่ ก. 39 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี SOKA

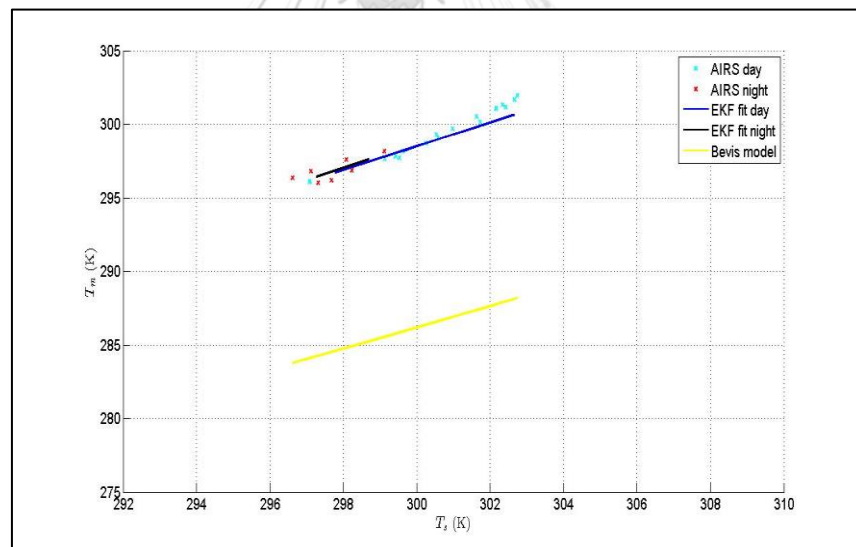


รูปที่ ก. 40 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี SOKA

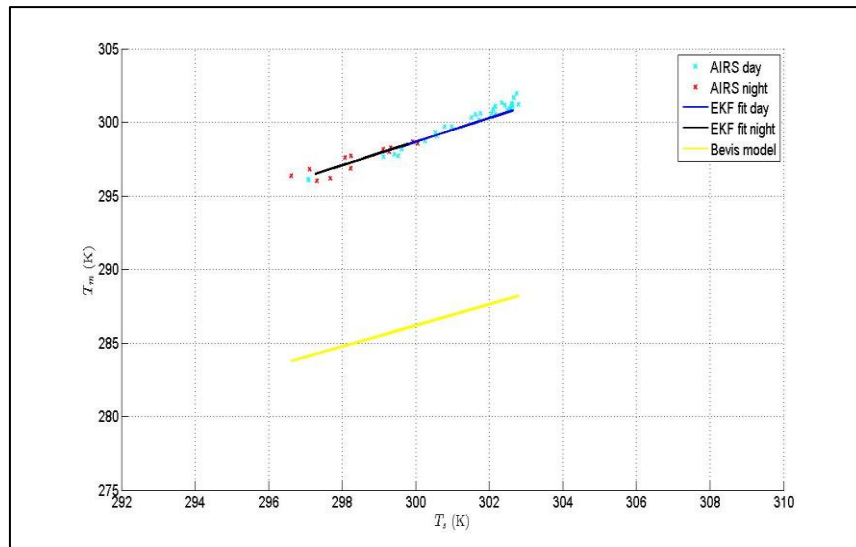




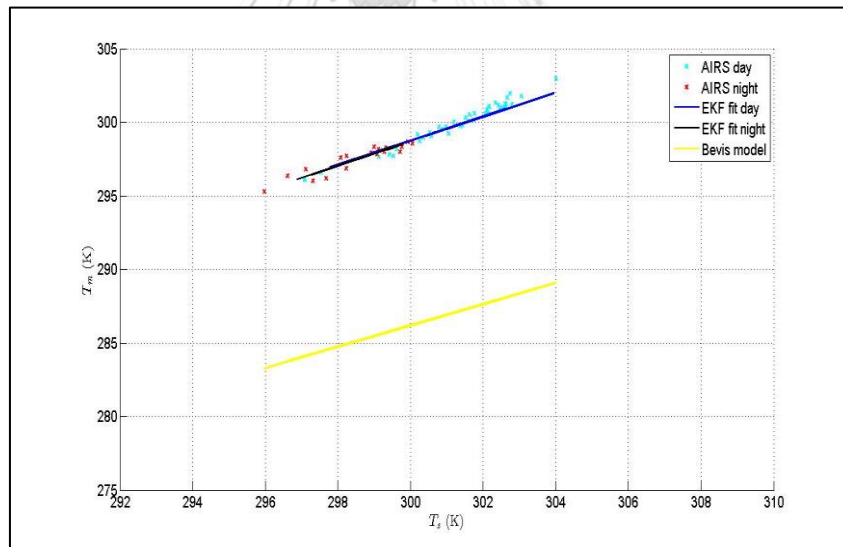
รูปที่ ก. 41 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี SRTN



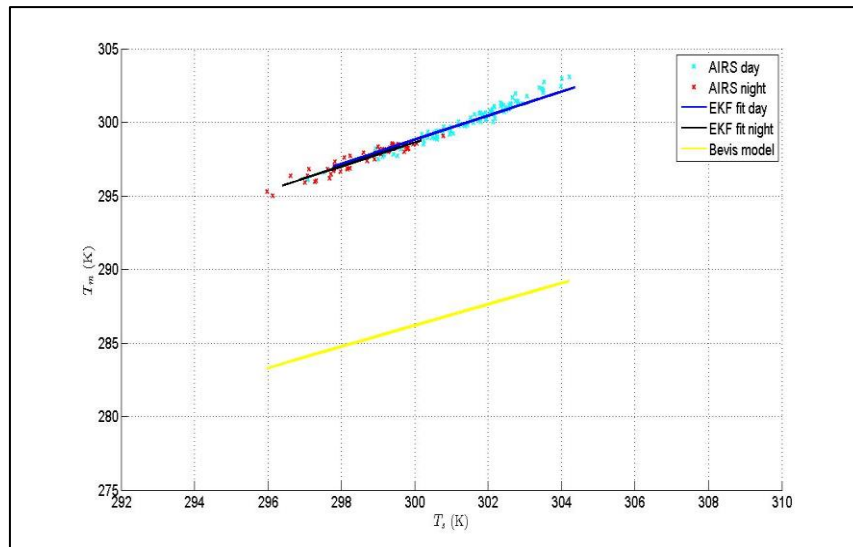
รูปที่ ก. 42 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี SRTN



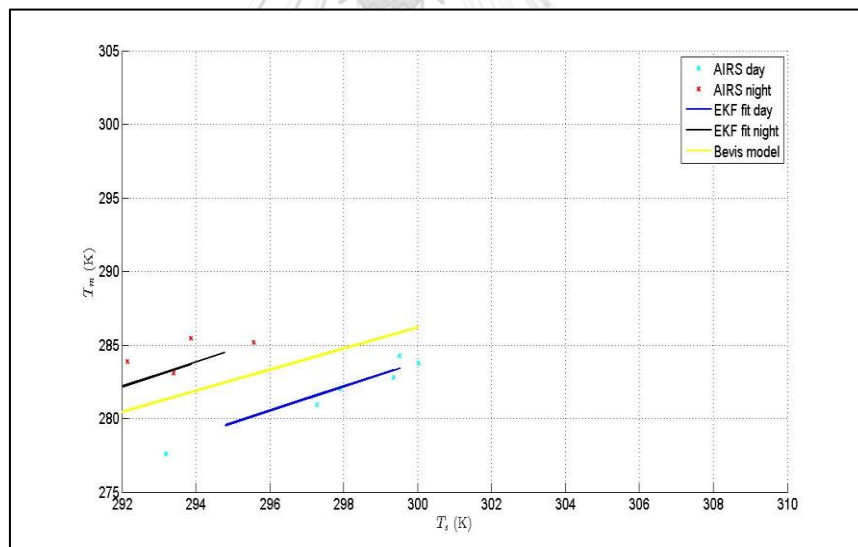
รูปที่ ก. 43 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี SRTN



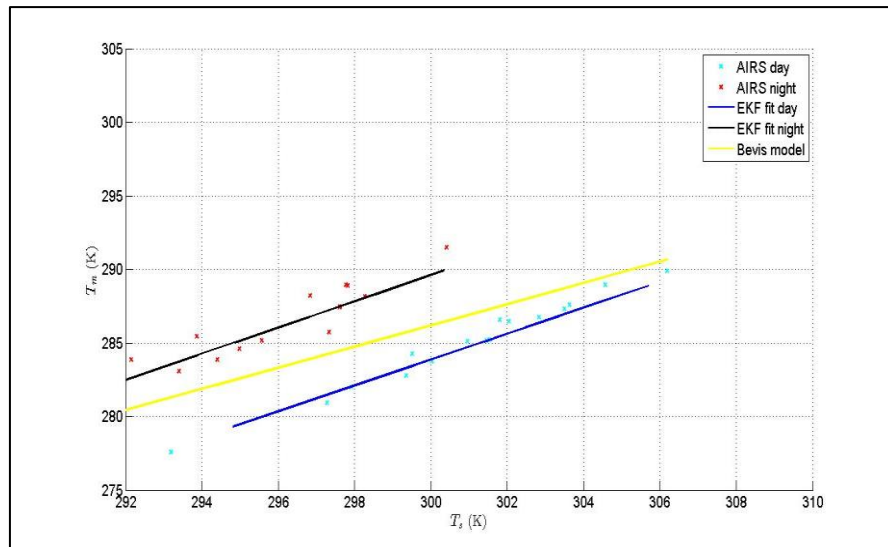
รูปที่ ก. 44 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี SRTN



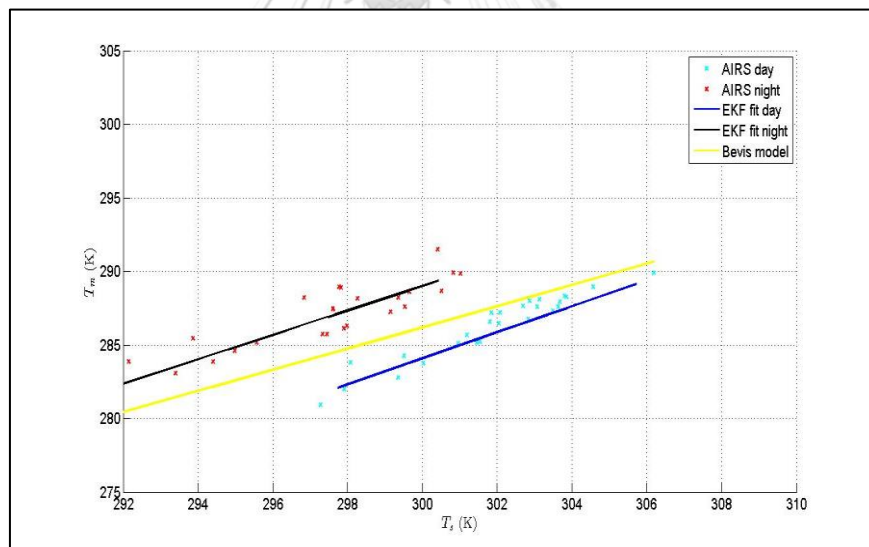
รูปที่ ก. 45 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี SRTN



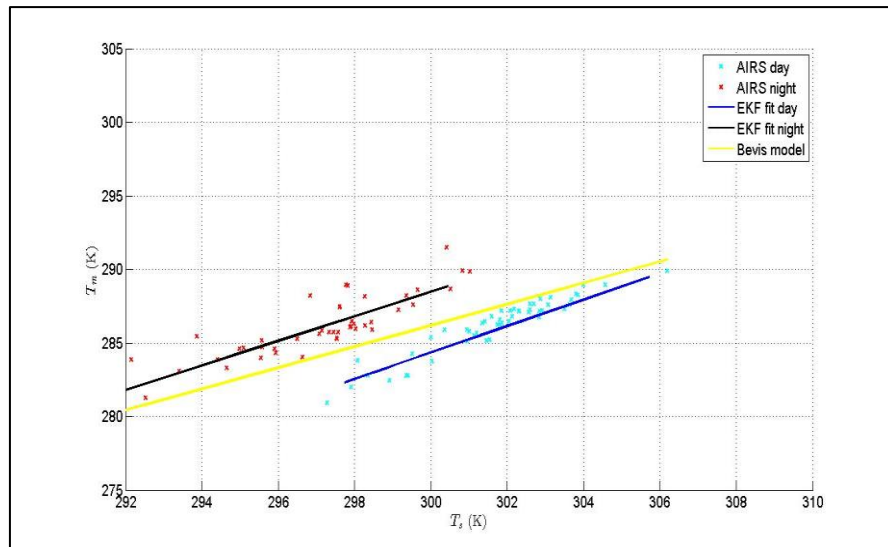
รูปที่ ก. 46 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี UDON



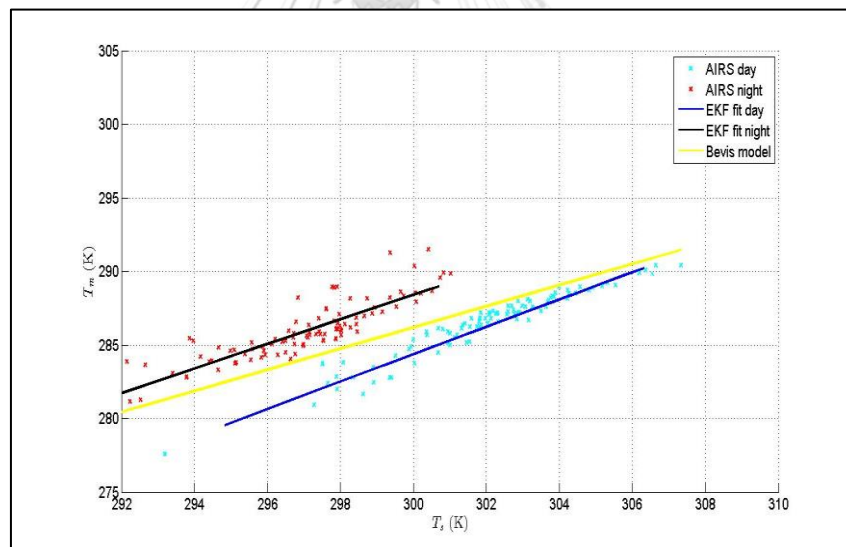
รูปที่ ก. 47 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี UDON



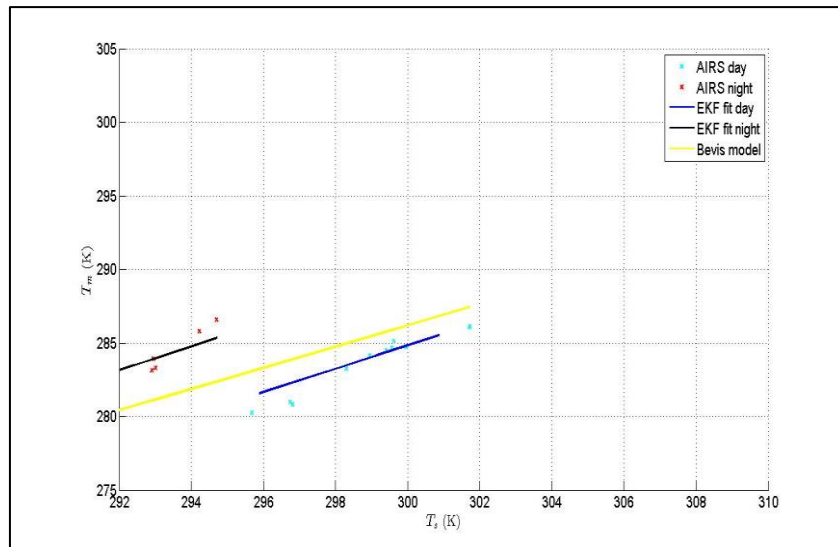
รูปที่ ก. 48 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี UDON



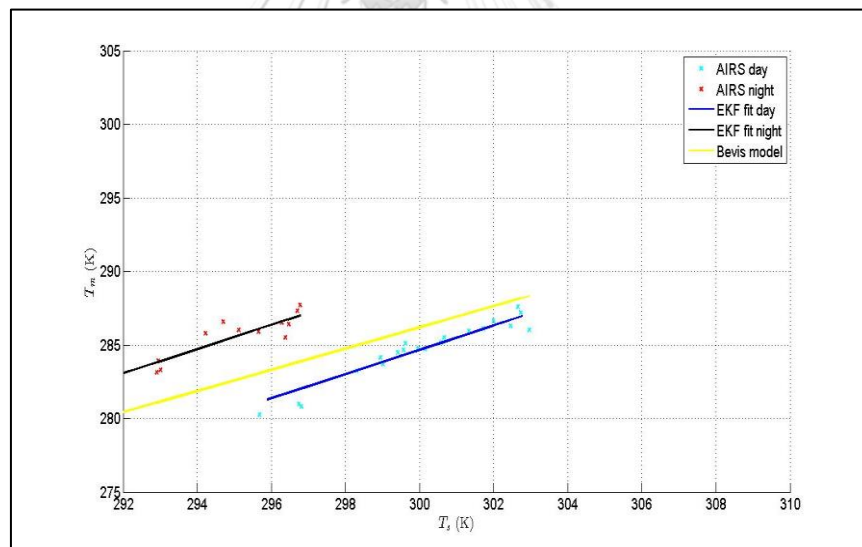
รูปที่ ก. 49 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี UDON



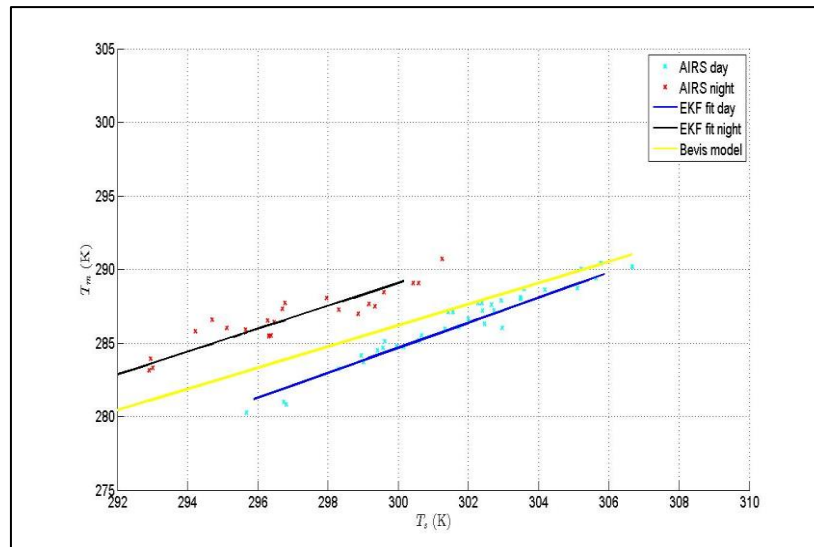
รูปที่ ก. 50 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี UDON



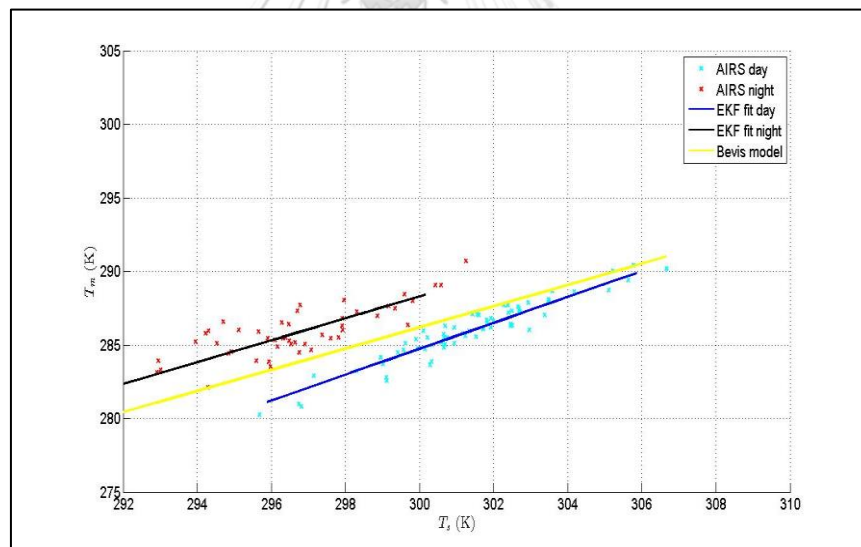
รูปที่ ก. 51 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 เดือน สถานี UTTD



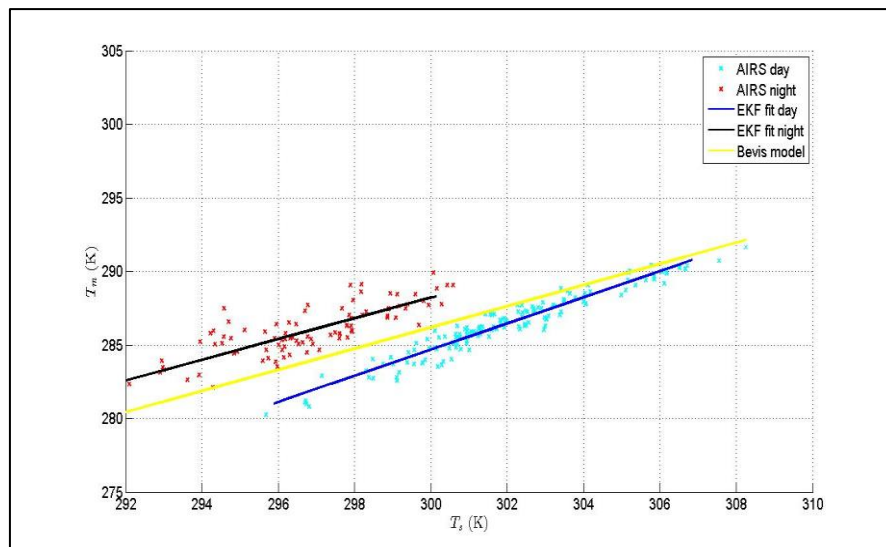
รูปที่ ก. 52 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 3 เดือน สถานี UTTD



รูปที่ ก. 53 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 6 เดือน สถานี UTTD



รูปที่ ก. 54 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 1 ปี สถานี UTTD



รูปที่ ก. 55 แสดงกราฟ correlation ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก AIRS และ AMSU โดยใช้แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 2 ปี สถานี UTDD





ภาคผนวก ข. รายละเอียดการประมวลผลและขจัดคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์



### การประมวลผลและขจัดคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ZTD)

การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning) ใช้ข้อมูลชุดโดเรนจ์ (Pseudo range) และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) โดยก่อนการประมวลผลทั้งสองข้อมูล ต้องมีการขจัดค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ (Systematic Error) จะได้แก่ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delay) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Delay) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม (Satellite orbit error and Satellite clock offset) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากเสาอากาศและความแปรปรวน Phase Center offset and Phase Center Variation (PCO & PCV) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและมหาสมุทร (Solid earth tide, Ocean loading) และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Phase wind-up ที่เกิดจากการหมุนของดาวเทียม

รายละเอียด	แบบจำลองและการแก้ไข
มุมสูงดาวเทียม (Cut-off elevation angle)	5 องศา
ช่วงเวลาข้อมูล	30 วินาที
ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม และค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม	German Research Centre for Geosciences (GFZ) โดยช่วงเวลาข้อมูลวงโคจรคือ ทุกๆ 15 นาที
ค่าคลาดเคลื่อนศูนย์กลางเสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Offset)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแปรปรวนศูนย์กลางเสาอากาศดาวเทียม (Phase Center Variation)	ตามค่าปกติจาก IGS MGEX
ค่าแก้เนื่องจากการหมุนของเสาอากาศดาวเทียม (Phase Wind-up Effect)	ใช้หลักการเฟสโพลาริเซชัน (WU, 1993)
แบบจำลองค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere Model)	แบบจำลอง Saastamonien ทั้ง Wet และ Dry ร่วมกับ Global Mapping function
ค่าคลาดเคลื่อนไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere model)	แบบจำลอง Ionosphere free combination
ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวโลกและแรงมหาสมุทร (Ocean loading, Ocean tide, Solid Earth Tide)	ใช้แบบจำลอง IERS 2003
พื้นหลักฐาน	ITRF2008

รูปที่ ข. 1 แสดงรายละเอียดการขจัดค่าคลาดเคลื่อน ชัยพร (2015)

ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS โดยใช้  
แบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล 11 สถานี COR



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากรูปแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล แบ่งตามระยะเวลา โดยกำหนดให้

ตัวอย่างจากประชากรที่ 1

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น

ตัวอย่างจากประชากรที่ 2

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากล

กำหนดให้  $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$  ที่เป็นตัวแทนในการทดสอบสมมติฐาน

กำหนดขอบเขตวิกฤตโดยให้ค่า F Critical เป็นจุดวิกฤตจากค่าระดับความเชื่อมั่นและองศาเสรีของประชากร ( $df$ ) เมื่อ  $df_1 = n_1 - 1, df_2 = n_2 - 1$  ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

สมมติฐานหลักของการทดสอบ

ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองเท่ากับค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจาก AIRS และ AMSU

$H_0$  : ยอมรับสมมติฐานหลัก

$H_1$  : ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

### สถานี CHAN

ตารางที่ ค. 1 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี CHAN

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
CHAN	1	Local	4	1.05	9.28	✓	
		Global	4	1.09		✓	
CHAN	3	Local	8	0.80	0.26		✓
		Global	8	0.83			✓
CHAN	6	Local	12	0.89	0.35		✓
		Global	12	0.94			✓
CHAN	12	Local	14	0.83	0.39		✓
		Global	14	0.89			✓
CHAN	24	Local	32	0.67	0.55		✓
		Global	32	0.72			✓

### สถานี CHMA

ตารางที่ ค. 2 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี CHMA

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
CHMA	1	Local	5	0.43	0.16		√
		Global	5	0.42			√
CHMA	3	Local	13	0.66	0.37		√
		Global	13	0.68			√
CHMA	6	Local	22	0.83	0.48		√
		Global	22	0.84			√
CHMA	12	Local	33	0.76	0.55		√
		Global	33	0.76			√
CHMA	24	Local	79	0.72	0.69		√
		Global	79	0.74			√

### สถานี DPT9

ตารางที่ ค. 3 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี DPT9

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
DPT9	1	Local	6	0.65	0.20		√
		Global	6	0.65			√
DPT9	3	Local	23	0.84	0.49		√
		Global	23	0.86			√
DPT9	6	Local	57	0.72	0.64		√
		Global	57	0.80			√
DPT9	12	Local	55	0.76	0.64		√
		Global	55	0.81			√
DPT9	24	Local	133	0.73	0.75	√	
		Global	133	0.77			√

### สถานี NKRM

ตารางที่ ค. 4 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี NKRM

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
NKRM	1	Local	6	0.72	0.20		✓
		Global	6	0.66			✓
NKRM	3	Local	16	0.96	0.42		✓
		Global	16	0.90			✓
NKRM	6	Local	27	0.83	0.52		✓
		Global	27	0.81			✓
NKRM	12	Local	31	0.79	0.54		✓
		Global	31	0.77			✓
NKRM	24	Local	70	0.70	0.67		✓
		Global	70	0.68			✓

### สถานี NKSW

ตารางที่ ค. 5 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี NKSW

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
NKSW	1	Local	3	79.82	19.00		✓
		Global	3	88.62			✓
NKSW	3	Local	12	0.91	0.35		✓
		Global	12	0.90			✓
NKSW	6	Local	24	0.93	2.01		✓
		Global	24	1.02			✓
NKSW	12	Local	30	0.90	1.86		✓
		Global	30	1.00		✓	
NKSW	24	Local	79	0.70	0.69		✓
		Global	79	0.78			✓

### สถานี PJRK

ตารางที่ ค. 6 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี PJRK

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
PJKR	1	Local	5	0.52	0.16		√
		Global	5	0.51			√
PJKR	3	Local	6	0.90	0.20		√
		Global	6	0.89			√
PJKR	6	Local	14	0.53	0.39		√
		Global	14	0.52			√
PJKR	12	Local	17	0.64	0.43		√
		Global	17	0.64			√
PJKR	24	Local	49	0.56	0.62	√	
		Global	49	0.55		√	

### สถานี SISK

ตารางที่ ค. 7 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี SISK

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
SISK	1	Local	4	0.90	0.11		√
		Global	4	0.90			√
SISK	3	Local	21	1.00	0.47		√
		Global	21	0.93			√
SISK	6	Local	38	0.70	0.58		√
		Global	38	0.67			√
SISK	12	Local	45	0.65	0.61		√
		Global	45	0.62			√
SISK	24	Local	102	0.65	0.72	√	
		Global	102	0.63		√	

### สถานี SOKA

ตารางที่ ค. 8 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี SOKA

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
SOKA	1	Local	5	0.84	0.16		✓
		Global	5	0.94			✓
SOKA	3	Local	14	0.58	0.39		✓
		Global	14	0.65			✓
SOKA	6	Local	25	0.71	0.50		✓
		Global	25	0.79			✓
SOKA	12	Local	27	0.70	0.52		✓
		Global	27	0.79			✓
SOKA	24	Local	64	0.52	0.58	✓	
		Global	64	0.58		✓	

### สถานี SRTN

ตารางที่ ค. 9 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี SRTN

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
SRTN	1	Local	4	0.60	0.11		✓
		Global	4	0.63			✓
SRTN	3	Local	9	0.64	0.29		✓
		Global	9	0.68			✓
SRTN	6	Local	15	0.83	0.40		✓
		Global	15	0.88			✓
SRTN	12	Local	15	0.83			✓
		Global	15	0.88			✓
SRTN	24	Local	37	0.54	0.57	✓	
		Global	37	0.58			✓



**สถานี UDON**

ตารางที่ ค. 10 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี UDON

Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
UDON	1	Local	8	1.09	3.79	√	
		Global	8	1.01		√	
UDON	3	Local	20	1.29	2.17	√	
		Global	20	1.19		√	
UDON	6	Local	33	0.74	0.55		√
		Global	33	0.71			√
UDON	12	Local	38	0.72	0.58		√
		Global	38	0.70			√
UDON	24	Local	74	0.73	0.68		√
		Global	74	0.71			√

**สถานี UTTD**

ตารางที่ ค. 11 แสดงผลการทดสอบทางสถิติของค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GNSS จากแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นและแบบจำลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสากลสถานี UTTD

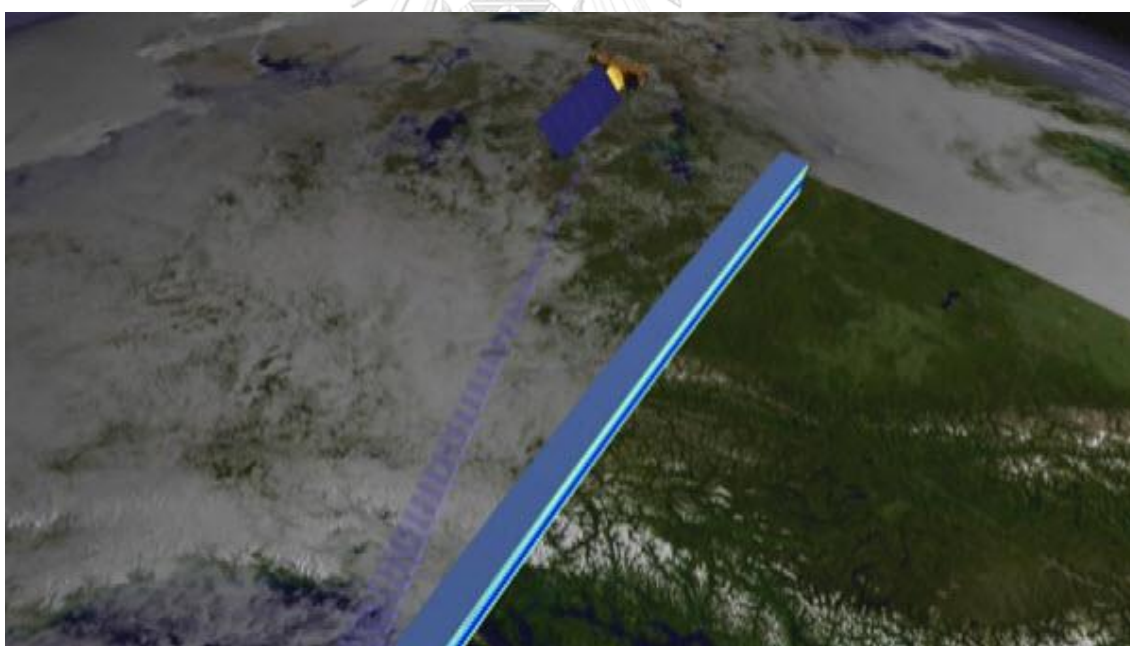
Sta.	Time(Mon.)	Model	Obs.	F	F.Crit.	H0	H1
UTTD	1	Local	7	0.93	0.23		√
		Global	7	0.86			√
UTTD	3	Local	14	1.08	2.58	√	
		Global	14	1.03		√	
UTTD	6	Local	30	0.78	0.54		√
		Global	30	0.77			√
UTTD	12	Local	31	0.74	0.54		√
		Global	31	0.73			√
UTTD	24	Local	65	0.62	0.66	√	
		Global	65	0.62		√	

ภาคผนวก ง. ตารางคุณลักษณะของดาวเทียม AQUA



ตารางที่ ง. 1 แสดงคุณลักษณะของ AIRS

Characteristics	
Swath	1650 km
Spatial Resolution	13.5 km at horizontal at nadir, 1 km vertical
Mass	156 kg
Duty Cycle	100%
Field of View (FOV)	$\pm 49.5^\circ$
Thermal Operating Range	20-25°C
channels	2378 infrared and four visible/near-infrared channels

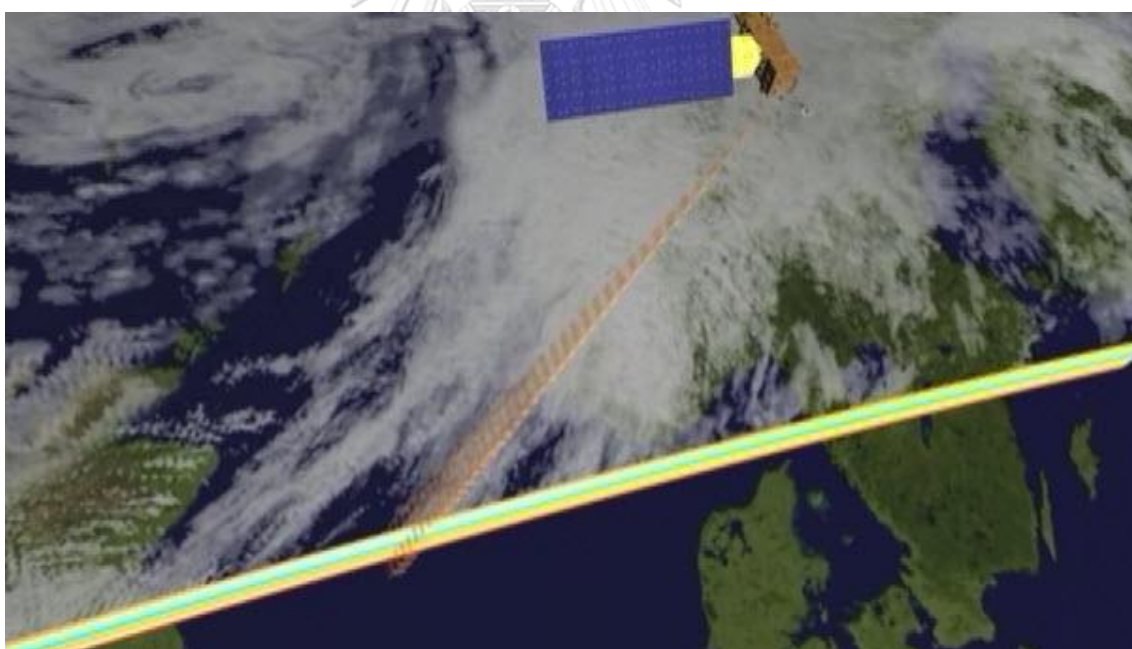


รูปที่ ง. 1 แสดงการทำงานของ AIRS สํารวจและเก็บข้อมูลอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ  
โทรโพสเฟียร์

(<https://aqua.nasa.gov/content/airs>)

ตารางที่ ง. 2 แสดงคุณลักษณะของ AMSU

Characteristics	
Swath	1650 km
Spatial Resolution	40 km horizontal at nadir
Mass	100 kg
Duty Cycle	100%
Field of View (FOV)	$\pm 49.5^\circ$
Thermal Operating Range	0 to $20^\circ$
channels	15 channel microwave with frequency range of 15-90 GHz.



รูปที่ ง. 2 แสดงการทำงานของ AMSU สํารวจและเก็บข้อมูลปริมาณความชื้น, เมฆในชั้นบรรยากาศ  
โทรโพสเฟียร์

(<https://aqua.nasa.gov/content/amsu>)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ : นางสาวพรวิไลย์ ค่ายชัยภูมิ

วัน เดือน ปี เกิด : 25 กรกฎาคม 2534

คุณวุฒิทางการศึกษา :

พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ.) สาขาภูมิสารสนเทศ คณะภูมิสารสนเทศ  
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ผลงานทางวิชาการ :

พรวิไลย์ ค่ายชัยภูมิ, เฉลิมชนม์ สติระพจน์, ทยาทิพย์ ทองตัน, ภาณุ เศรษฐ์เสถียร  
(2560) “แบบจำลองการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม  
AQUA เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากข้อมูล GNSS สำหรับประเทศไทย” การ  
ประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี 2560 : GEOINFOTECH  
2017 ระหว่างวันที่

9-10 กุมภาพันธ์ 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**