

การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในทันทีด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส แบบจุด  
เดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

Real-time estimation of precipitable water vapor using GNSS precise point positioning  
in Thailand



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

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในทันทีด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในประเทศไทย
โดย	นายชัยยุทธ เจริญผล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ศรีสิริสัตยวงศ์)

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

..... กรรมการ  
(ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ภาณุ เศรษฐฐเสถียร)

ชัชยุทธ เจริญผล : การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในทันทีด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส แบบจุดเดียวความละเอียดสูงในประเทศไทย. ( Real-time estimation of precipitable water vapor using GNSS precise point positioning in Thailand) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการและเทคนิคการประมวลผลแบบ PPP (Precise Point Positioning) เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ หรือ PWV (Precipitable Water Vapor) แบบทันที (Real-Time) ที่มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลขและการพยากรณ์อากาศระยะสั้น (Weather Nowcasting) ด้วยซอฟต์แวร์ BNC (Federal Agency of Cartography and Geodesy (BKG) NTRIP Client) ซึ่งได้ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประมวลผลข้อมูล GNSS ประกอบไปด้วย การปรับปรุงแบบจำลองและค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนให้เหมาะสมในกระบวนการประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และพัฒนาฟังก์ชันปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร โดยจะประมวลผลร่วมกับค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที ผลการศึกษาพบว่าค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หรือ ZTD (Zenith Tropospheric Delay) แบบทันทีมีค่า RMSE ของค่าต่าง ZTD ระหว่างค่าที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จาก CSRS (Canadian Spatial Reference System PPP tool) มีค่าน้อยกว่า 15 มม. ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานในแบบจำลอง NWP และการแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV แบบทันทีด้วยแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นที่พัฒนาขึ้นในงานศึกษาวิจัยพบว่าค่า RMSE ของ PWV เปรียบเทียบกับชุดข้อมูล ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis) เฉลี่ยทุกสถานีมีค่าน้อยกว่า 3 มม. ซึ่งมีค่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เพียงพอสำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงเลขสำหรับการพยากรณ์อากาศระยะสั้น

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5871405321 : MAJOR GEOMATIC ENGINEERING

KEYWORD: Furious series, spherical-harmonics function, Kalman filtering

Chaiyut Charoenphon : Real-time estimation of precipitable water vapor using GNSS precise point positioning in Thailand. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

This study aims to investigate the real-time Precipitable Water Vapor (PWV) is derived from the PPP (Precise Point Positioning) approach to support a wide range of applications in meteorology such as improving the Numerical Weather Prediction (NWP) model and weather nowcasting using the modified Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG) NTRIP Client (BNC) software with real-time orbit and clock corrections. The modifications include the tropospheric noise adjustment, the modeling of tropospheric delay, and the corrections of ocean tide loading. The Root Mean Square Error (RMSE) of the ZTD derived from the GNSS at most stations with respect to an online GNSS processing service from the Canadian Spatial Reference System (CSRS) PPP tool is less than 15 mm, which meets a threshold of 15 mm as input to NWP model. To precisely convert the Zenith Tropospheric Delay (ZTD) to PWV, the Country-wide Pressure and Temperature (CPT) model is applied. The average RMSE of the PPP-PWV with respect to the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis (ERA5) data set is less than 3 mm, which is accurate enough for PWV in weather nowcasting. As a result of the investigation, the quality of ZTD/PWV is satisfied with an input to the NWP model for weather nowcasting.

Field of Study: Geomatic Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นที่เรียบร้อยได้ต้องขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำให้คำปรึกษาและให้แนวทางที่เป็นประโยชน์ในงานศึกษาวิจัย รวมทั้งให้การสนับสนุนทางวิชาการและกิจกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ รศ.ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชรินทร์ ทินนโชติ และ อ.ดร.ธีทัต เจริญกมลคุณดา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนเสียสละเวลาในการพิจารณาความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมด้านเนื้อหามากยิ่งขึ้น และ ขอขอบคุณ ดร. ภาณุ เศรษฐฐิติกร กรรมการภายนอกในการช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี จนเสร็จสมบูรณ์

และต้องขอขอบคุณหน่วยงาน กรมโยธาธิการและผังเมืองที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจีเอ็นเอสเอส, หน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณพ่อ-แม่ และ พี่-น้อง ที่มีส่วนสนับสนุนไม่ว่าจะโดยทางตรงหรือทางอ้อม รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่เอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดระยะเวลาในการศึกษาและวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชัยยุทธ เจริญผล

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.5.1 พื้นที่ศึกษา.....	6
1.5.2 การพัฒนาโปรแกรมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	6
1.6 โครงร่างเนื้อหาของวิทยานิพนธ์และขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	8
บทที่ 2 การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการศึกษาวิจัย.....	10
2.1 ข้อมูล GNSS.....	10
2.2 ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที.....	11
2.3 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สำหรับประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร.....	14



2.4 ข้อมูล ZTD จากหน่วยงาน CSRS.....	16
2.5 ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิว .....	18
2.6 ข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 จากหน่วยงาน ECMWF .....	20
บทที่ 3 การประมาณค่า ZTD แบบทันที ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง .....	24
3.1 วิธีการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS แบบ PPP .....	26
3.1.1 สมการค่าสังเกตของการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS .....	26
3.1.2 สมการค่าสังเกต Ionosphere-Free linear combination (L3) .....	27
3.1.3 การประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ .....	28
3.1.4 Mapping Function .....	30
3.1.5 ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร (Ocean tide loading) .....	31
3.2 ปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง .....	33
3.2.1 ปรับแก้ค่า Tropospheric Noise .....	34
3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function .....	35
3.2.3 การพัฒนาฟังก์ชันปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร .....	36
3.3 ประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ BNC และการตั้งค่า .....	36
3.4 ผลลัพธ์การศึกษาวิจัยเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันที .....	37
3.4.1 ผลการประมวลผลเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยซอฟต์แวร์ Modified BNC ..	37
3.4.2 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ก่อนและหลังการปรับปรุง .....	42
บทที่ 4 การประมาณค่า PWV แบบทันที .....	44
4.1 พัฒนาแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวท้องถิ่น .....	45
4.1.1 หาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ที่เข้ากันได้กับข้อมูลอนุกรมเวลา ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีอุตุวิทยวิทยา.....	47
4.1.2 สร้างสมการพื้นผิวที่เหมาะสมกับข้อมูลค่าเฉลี่ยและแอมพลิจูดของความดันและอุณหภูมิ .....	48

4.1.3	สร้างแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น.....	50
4.1.4	สรุปผลการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น .....	51
4.2	การแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV แบบทันที.....	55
4.3	ผลการศึกษาวิจัยการประมาณค่า PWV แบบทันที.....	57
4.3.1	เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่า PWV แบบทันที .....	57
4.3.2	การกระจายตัวของค่า PWV ในประเทศไทย .....	59
บทที่ 5	อภิปรายและวิจารณ์ผล สรุป และข้อเสนอแนะ .....	61
5.1	อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัยสำหรับการประมาณค่า ZTD แบบทันที.....	61
5.1.1	อภิปรายและสรุปผลการประมาณค่า ZTD แบบทันที.....	61
5.1.2	ข้อเสนอแนะการประมาณค่า ZTD แบบทันที ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC.....	63
5.2	อภิปรายและสรุปผลการวิจัยสำหรับการประมาณค่า PWV แบบทันที.....	64
5.2.1	อภิปรายผลการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น.....	64
5.2.2	อภิปรายและสรุปผลการประมาณค่า PWV แบบทันที.....	65
5.2.3	ข้อเสนอแนะสำหรับการประมาณค่า PWV แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP... ..	65
ภาคผนวก ก	คำสั่ง Python และ MatLab.....	67
ก.1	ประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ BNC (Python).....	67
ก.2	คำสั่งดาวนโหลดข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 .....	68
ก.3	แบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น.....	68
ก.4	การแก้ปัญหาอินเวอร์สด้วยวิธี Tikhonov Regularization และ SVD (Matlab).....	75
บรรณานุกรม.....		77
ประวัติผู้เขียน.....		86

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงหน่วยวิจัยระดับสากลที่ให้บริการค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียม.....	12
ตารางที่ 2-2 แสดงผลิตภัณฑ์ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมที่ให้บริการโดย IGS.....	12
ตารางที่ 2-3 แสดงประเภทข้อมูลที่ถูกใช้เพื่อประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันทีตามมาตรฐาน RTCM3.....	13
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมากที่สุดในรอบช่วงเวลา 1 ปี ในทิศทางตะวันออก (E), เหนือ (N) และทางดิ่ง (U) ที่เกิดจากแรงมหาสมุทรในพื้นที่ประเทศไทย.....	32
ตารางที่ 3-2 แสดงการตั้งซอฟต์แวร์ BNC ที่ใช้ในการประมวลผล.....	37
ตารางที่ 3-3 แสดงค่าทางสถิติของค่าต่างของค่า ZTD ของการพัฒนาฟังก์ชันต่างๆ ในซอฟต์แวร์ BNC ระหว่าง PPP-ZTD กับค่าอ้างอิงจาก CSRS-ZTD .....	39
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวที่ประมาณค่าได้จาก 4 แบบจำลอง ได้แก่ CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา.....	53
ตารางที่ 4-2 แสดงการทดสอบความแตกต่างของความถูกต้องของแบบจำลอง CPT กับแบบจำลองสากล GPT, GPT2w และ GPT3.....	54
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าเฉลี่ยและ RMSE (หน่วยมิลลิเมตร) ของค่า PWV ระหว่างข้อมูล PWV ที่ประมาณค่าได้จากข้อมูล GNSS โดยใช้แบบจำลองอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง ERA5.....	58
ตารางที่ 5-1 ผลการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC ก่อนและหลังการพัฒนา .....	62

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1-1 (a) แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานี GNSS ถาวรจากกรมโยธาธิการและผังเมือง สำหรับทดสอบการประมวลผล, (b) แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอู่ตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นจากหน่วยงานสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) กากบาทสีน้ำเงิน แสดงตำแหน่งที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองและจุดวงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งสถานีใช้สำหรับทดสอบแบบจำลอง .....	7
รูปที่ 1-2 แสดงขั้นตอนการนำเสนอโครงร่างของวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนการศึกษาวิจัยในแต่ละส่วน .....	9
รูปที่ 2-1 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการสำหรับดาวน์โหลดข้อมูล GNSS จากหน่วยงานกรมที่ดิน ( <a href="http://www.dol-rtknetwork.com:8090/login.aspx">http://www.dol-rtknetwork.com:8090/login.aspx</a> ) .....	11
รูปที่ 2-2 แสดงการใช้ซอฟต์แวร์ BNC เพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงแบบทันที CLK91 ที่ถูกส่งผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต.....	14
รูปที่ 2-3 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ประมาณค่าปรับแก้เนื่องจากแรงมหาสมุทร .....	15
รูปที่ 2-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดและเฟส (Phase) สำหรับใช้ประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทรที่ได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสถานี CUUT .....	15
รูปที่ 2-5 แสดงการตั้งค่าของซอฟต์แวร์ PPP direct เพื่อส่งข้อมูล GNSS ไปประมวลผลยังบริการประมวลผลออนไลน์ของ CSRS .....	16
รูปที่ 2-6 แสดงเว็บไซต์ให้บริการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงของหน่วยงาน CSRS <a href="https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php">https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php</a> .....	17
รูปที่ 2-7 แสดงขั้นตอนการเตรียมข้อมูลความดันและอุณหภูมิสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ..	19
รูปที่ 2-8 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการข้อมูลอู่ตุนิยมวิทยาจากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา <a href="http://www.awsobservation.tmd.go.th/web/main/index.asp">http://www.awsobservation.tmd.go.th/web/main/index.asp</a> .....	19
รูปที่ 2-9 แสดงการเตรียมข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 ของหน่วยงาน ECMWF.....	21
รูปที่ 2-10 แสดงการประมาณค่ารอบจุดจากจุดข้อมูลที่ทราบค่า 4 จุดด้วยวิธี Bilinear.....	22

รูปที่ 2-11 แสดงเว็บไซต์ดาวนิโพลดข้อมูลจากคลังข้อมูล ECMWF .....	23
รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการประมวลผลค่า ZTD แบบทันทีและการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC .....	26
รูปที่ 3-2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงแสมทธรในทิศทางราบและตั้ง ในช่วงเวลา 1 ปี บริเวณ จังหวัดภูเก็ต .....	32
รูปที่ 3-3 ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่เกิดจากแรงแสมทธร ในทิศทางเหนือ, ใต้ และทางตั้งที่ ส่งผลกระทบต่อ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ประเทศไทย .....	33
รูปที่ 3-4 แสดงการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC เพื่อการประมาณค่า ZTD แบบทันที .....	34
รูปที่ 3-5 แสดงการกำหนดค่า Tropospheric noise .....	35
รูปที่ 3-6 แสดงผลลัพธ์ค่า ZTD แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง .....	36
รูปที่ 3-7 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าต่าง ZTD ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC.....	40
รูปที่ 3-8 แสดงค่า RMSE ของค่าต่าง ZTD ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC.	40
รูปที่ 3-9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าต่าง ZTD ที่น้อยกว่า 20 มม. ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุง ซอฟต์แวร์ BNC .....	41
รูปที่ 3-10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าต่าง ZTD แบบทันทีรวมทุกสถานีที่ได้จากการประมวลผล แบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC ที่ถูกปรับปรุงประสิทธิภาพเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ผลลัพธ์ ที่มีค่าต่างน้อยกว่า 20 มม. (แสดงด้วยจุดสีดำ) และทางด้านซ้ายแสดงฮิสโตแกรมของการกระจายตัว ของค่าต่าง ZTD ในแต่ละช่วง .....	42
รูปที่ 3-11 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย, RMSE, และค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าต่าง < 20 มม. ของค่า ZTD ระหว่าง PPP-ZTD กับค่าอ้างอิงจาก CSRS-ZTD.....	42
รูปที่ 4-1 แสดงขั้นตอนดำเนินการประมาณค่า PWV แบบทันที.....	45
รูปที่ 4-2 แสดงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น .....	46
รูปที่ 4-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลอนุกรมเวลาของความดันและอุณหภูมิ ระหว่างปี 2555-2562.....	46
รูปที่ 4-4 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยประยุกต์ใช้อุณหภูมิเรย์รี่ 47	
รูปที่ 4-5 แสดงการประยุกต์ใช้อุณหภูมิฮาร์มอนิกทรงกลมสร้างสมการค่าสังเกตเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิและความดันท้องถิ่น.....	48

รูปที่ 4-6 แสดงตัวอย่างการสร้างสมการค่าสังเกตของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเพื่อสร้างสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม..... 50

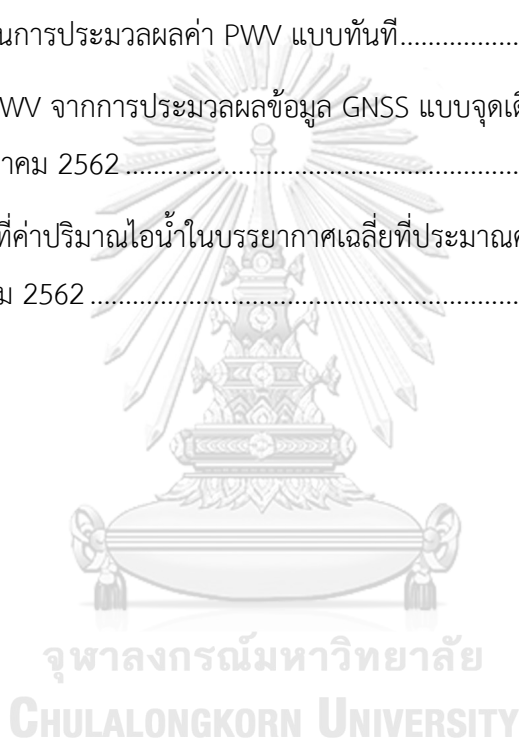
รูปที่ 4-7 แสดงตัวอย่างการใช้ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อคำนวณค่าความดันและอุณหภูมิจากการประยุกต์ใช้ออนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมร่วมกับอนุกรมฟูเรียร์..... 51

รูปที่ 4-8 แสดงค่าเฉลี่ย(•) และ ค่า RMSE (I) ของค่าต่าง (a) ข้อมูลความดันพื้นผิว และ (b) ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จาก 4 แบบจำลอง ได้แก่ CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 ของแต่ละจุดทดสอบเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา ..... 53

รูปที่ 4-9 แสดงขั้นตอนการประมวลผลค่า PWV แบบทันที..... 55

รูปที่ 4-10 แสดงค่า PWV จากการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบทันทีในช่วงวันที่ 1-31 มกราคม 2562..... 59

รูปที่ 4-11 แสดงแผนที่ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเฉลี่ยที่ประมาณค่าได้จากสถานี GNSS ทั้ง 11 สถานี ในเดือนมกราคม 2562..... 60



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นบรรยากาศชั้นต่ำสุดของโลก ในชั้นบรรยากาศนี้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงและแปรปรวนได้ง่ายเป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ มีมวลประมาณ 75% ของชั้นบรรยากาศทั้งหมด และประกอบด้วยอากาศแห้ง ( $H_2$ ,  $O_2$  และก๊าซอื่นๆ), ฝุ่นละออง, และไอน้ำ (Precipitable Water Vapor, PWV) มีระยะจากพื้นโลกจนถึงความสูงประมาณ 7-17 กิโลเมตร ในชั้นบรรยากาศนี้ไอน้ำเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ, การก่อตัวของเมฆ และการเกิดฝน เป็นต้น นอกจากนี้ไอน้ำในบรรยากาศยังทำหน้าที่ดูดซับความร้อน ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้น ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) ในด้านงานวิจัย ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศยังถูกใช้เพื่อศึกษาการเกิดของพายุ, วัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของน้ำ และในแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลข (Numerical Weather Prediction, NWP) (Bevis et al. 1992) นอกจากนี้ปริมาณไอน้ำจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศแล้ว ยังมีผลต่อการรับสัญญาณของเครื่องรับสัญญาณ GNSS (Global Navigation Satellite System) ในการรังวัดเพื่อหาค่าพิกัดตำแหน่งโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS นั้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งจากระบบดาวเทียม GNSS ผ่านชั้นบรรยากาศมายังเครื่องรับสัญญาณที่พื้นผิวโลก คลื่นสัญญาณจะถูกรบกวนจากชั้นบรรยากาศทำให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นสัญญาณซึ่งผลกระทบหลักมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Satirapod C. & P. 2005) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นความคลาดเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณ (Frequency-dependent) สามารถขจัดออกไปได้ด้วยการใช้เทคนิคการประมวลผลแบบ Ionosphere-free linear combination ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณแต่ขึ้นอยู่กับระยะทาง, ชนิดของก๊าซ และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คลื่นเดินทางผ่าน โดยค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ถูกรวมไว้ในทิศทางตั้งเหนือเครื่องรับสัญญาณ (Zenith Tropospheric Delay, ZTD) สามารถขจัดออกได้ด้วยการประมาณค่าจากแบบจำลอง ซึ่งมีความถูกต้องประมาณ 13-17 เซนติเมตร (S. Katsougiannopoulos 2006) ตัวอย่างเช่นแบบจำลองของ Hopfield (1971) และ Saastamoinen (1972a) สำหรับการประมวลผลที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงนั้นค่า ZTD จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในระบบสมการค่าสังเกต โดยค่า ZTD ประกอบไปด้วยความคลาดเคลื่อนทางตั้งที่เกิดจากอากาศแห้ง (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) และจากอากาศชื้น (Zenith Wet Delay, ZWD) ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนทางตั้งที่เกิดจาก

อากาศชั้นโดยได้รับอิทธิพลหลักมาจากไอน้ำในบรรยากาศ ค่า ZWD สามารถนำมาคำนวณเป็นค่า PWV ได้ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิและความดันอากาศ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ด้วยความสัมพันธ์ข้างต้น เราจึงสามารถประมาณค่า PWV ได้โดยใช้ข้อมูลที่รับได้จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS

การประยุกต์ใช้ข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่า PWV ในงานอุตุนิยมวิทยา หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ GNSS-Meteorology ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลายาวนานมากกว่าสองทศวรรษ และยังคงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง (Bevis et al. 1992; Elgered et al. 1991; Shi, Xu, et al. 2015) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่า PWV ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีค่าใช้จ่ายต่ำ อีกทั้งมีความได้เปรียบทางด้านความถี่ในการรังวัดและการครอบคลุมเชิงพื้นที่ นอกจากนี้การหาค่า PWV ด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS นั้นมีระดับความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา (Lu et al. 2015) เช่น เครื่องวิทยุหยั่งอากาศ (Radiosonde), เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave Radiometer) หรือจากข้อมูลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น ซึ่งด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในปัจจุบัน มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและรุนแรงในพื้นที่ขนาดเล็กและระดับภูมิภาค ในการพยากรณ์อากาศสมัยใหม่เพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว การพยากรณ์มีความต้องการข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน, ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและครอบคลุมทั่วถึงทุกพื้นที่ การประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูล GNSS สามารถตอบสนองความต้องการในได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถช่วยให้การพยากรณ์อากาศระยะสั้น (Short-Term Weather Forecasts or Nowcasting) ช่วง 0 – 16 ชั่วโมง มีความถูกต้องมากขึ้น จากงานวิจัยเหล่านี้ Bennitt and Jupp (2012); Dousa and Vaclavovic (2014); (Gendt et al. 2004); Gutman and Benjamin (2001); Rohm et al. (2014); Vedel and Huang (2004) แสดงให้เห็นว่าเมื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GPS (Global Position System) ในแบบจำลอง NWP ให้ผลลัพธ์ในเชิงบวกต่อการพยากรณ์ค่าความชื้นในอากาศ (Humidity) และหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) มีความถูกต้องมากขึ้น

ในช่วง 3-5 ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีทางการสำรวจด้วยระบบดาวเทียม GNSS มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งในเรื่องของการเพิ่มขึ้นของจำนวนดาวเทียม, เทคนิคการประมวลผลข้อมูลที่รวดเร็วและถูกต้องสูง, การเพิ่มขึ้นของสถานีโครงข่ายสถานี GNSS ดาว และอุปกรณ์ที่ช่วยให้การหาพิกัดตำแหน่งได้สะดวกง่ายและรวดเร็วขึ้น อีกทั้งด้วยการจัดตั้งโครงการ Real-Time Pilot Project ของหน่วยงาน IGS (International GNSS Service) (Weber et al. 2016) เพื่อให้บริการข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดถูกต้องสูงแบบทันที (Real-Time) ผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ซึ่งเปิดให้ใช้งานในปี 2556 โดยมีหน่วยวิจัยนานาชาติมากกว่า 10 หน่วยวิจัยเข้าร่วม การพัฒนาเหล่านี้มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้การประยุกต์ใช้ระบบ GNSS เพื่อหาค่าพิกัด



ตำแหน่งและประมาณค่าปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแบบทันที มีความถูกต้องสูงมากขึ้น และด้วยประเทศไทยเริ่มมีการจัดสร้างโครงข่ายสถานี GNSS ถาวรตั้งแต่ปี 2559 เพื่อติดตั้งระบบรับวัดพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที ซึ่งกำลังดำเนินงานติดตั้งทั่วประเทศ เพื่อขยายขีดความสามารถและการใช้ทรัพยากรโครงข่าย GNSS อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้นจึงเป็นโอกาสอันดีของประเทศไทย ที่จะประยุกต์ใช้ข้อมูล GNSS จากโครงข่ายเหล่านั้นนอกจากใช้สำหรับการหาพิกัดตำแหน่งแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยาเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, งานด้านการพยากรณ์อากาศ, งานติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศเพื่อการทำฝนเทียม, หรือการให้บริการค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เป็นต้น

เพื่อประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีจุดเดี่ยวความละเอียดสูงและเพื่อทดสอบค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที หน่วยงาน IAG (International Association of Geodesy) ได้ร่วมมือกับหน่วยงาน IGS พัฒนาซอฟต์แวร์รหัสเปิดสามารถใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย BKG (Federal Agency for Cartography and Geodesy) NTRIP Client หรือ ซอฟต์แวร์ BNC (Weber et al. 2016) เพื่อการรับส่งข้อมูล, เข้ารหัสข้อมูล, ตรวจสอบคุณภาพข้อมูล และประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง หรือ PPP (Precise Point Positioning) ร่วมกับข้อมูลค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที โดยรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางโครงข่ายอินเทอร์เน็ต รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จาก Georg et al. (2020) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ BNC ชัยยุทธ เจริญผล และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2560) ได้ศึกษาวิจัยเบื้องต้นโดยใช้ข้อมูลจากสถานี CUUT ซึ่งเป็นหนึ่งในสถานีที่อยู่ในโครงข่าย GNSS ระดับสากลเป็นสถานีทดสอบเพื่อประมาณค่าไอน้ำในบรรยากาศจากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงร่วมกับข้อมูลค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงแบบทันทีจาก CLK91 ของหน่วยวิจัย CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความถูกต้องของค่า ZTD เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงมีความถูกต้องโดยค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย หรือ RMSE (Route Mean Square Error) อยู่ในระดับ 16 มม. และค่า PWV ที่ได้จากการประมวลผลมีค่า RMSE อยู่ที่ 2.8 มม. อ้างอิงงานวิจัยของ De Haan (2006) ตามเอกสาร WMO (World Meteorological Organization) ค่า RMSE ของค่า ZTD เพื่อใช้ในแบบจำลอง NWP ควรน้อยกว่า 15 มม. และค่า RMSE ของค่า PWV ควรน้อยกว่า 3 มม. เพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศระยะสั้น (Weather Nowcasting) เพื่อคาดการณ์สภาพอากาศในช่วงเวลาสั้นๆ จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นค่า ZTD มีค่าสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย จำเป็นต้องปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและสำหรับผลลัพธ์ของค่า PWV ที่ได้มีความถูกต้องเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในงานการพยากรณ์อากาศระยะสั้น และจากงานศึกษาวิจัยเพิ่มเติมของ Charoenphon and Satirapod (2019) ได้ใช้ข้อมูลจากสถานีโครงข่ายสถานี GNSS

ถาวรในประเทศไทย จำนวน 11 สถานี โดยเป็นการประมวลผลแบบแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ท้องถิ่น (weighted mean tropospheric temperature) หรือ  $T_m$  ที่ได้จากงานวิจัยของ (Suwanton et al. 2016) เพื่อประมาณค่า PWV แบบทันที ผลการวิจัยพบว่าค่าความถูกต้องเฉลี่ยของค่า PWV ของทุกสถานีอยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องเพียงพอที่สามารถนำไปใช้เพื่อการพยากรณ์อากาศระยะสั้น อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง ข้อมูลผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ความถูกต้อง (ค่าต่าง ZTD เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง มีค่าไม่เกิน 20 มม. (Yuan et al. 2014) ที่สามารถนำมาใช้ได้คิดเป็น 78% ของข้อมูลผลลัพธ์ทั้งหมด ซึ่งจากงานวิจัยของ Dousa and Bennitt (2013) สถานี GNSS ที่ติดตั้งอยู่ในแถบภูมิอากาศอบอุ่นและชั้นแถบละติจูดกลาง (mid-latitude) ซึ่งได้รับอิทธิพลของลมมรสุม มีฝนตกในฤดูร้อนจะมีการแกว่งตัวของค่า PWV ค่อนข้างสูงทำให้ยากต่อการประมาณค่าให้ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่แถบภูมิอากาศหนาวเย็นและมีความชื้นในอากาศต่ำ ทำให้พื้นที่บริเวณแถบร้อนขึ้นยังคงมีความท้าทายในการประมาณค่า ZTD และ PWV ให้ถูกต้องที่ดี จากงานวิจัยของ Yuan et al. (2014) เมื่อเทียบผลวิจัยกับสถานีที่อยู่ในแถบละติจูดเดียวกัน พบว่า 88-93% ของข้อมูลผลลัพธ์อยู่เกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เพื่อการพยากรณ์อากาศระยะสั้น (ในภูมิภาคอื่นอยู่ที่ 96-100%) เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์งานวิจัยข้างต้นกับผลลัพธ์งานวิจัยในพื้นที่ประเทศไทยพบว่ามีค่ามากกว่าประมาณ 10-15%

จากผลการศึกษาวิจัยดังกล่าว ในงานศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า ZTD และ PWV แบบทันทีด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูล GNSS จากสถานีโครงข่ายของประเทศไทยด้วยซอฟต์แวร์ BNC เนื่องด้วยซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้ง่าย ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดยังคงไม่ได้ถูกขจัดออกไปหรือใช้แบบจำลองที่มีความละเอียดไม่ดีพอ เช่น แบบจำลองประมาณค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการแกว่งตัวของแกนโลก (Polar tide) มีขนาดน้อยกว่า 2 เซนติเมตร และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร (Ocean Tide Loading) มีขนาดได้ถึง 10 เซนติเมตรบริเวณสถานีใกล้ชายฝั่ง จากงานวิจัยของ Dragert et al. (2000) ในการหาค่า ZTD จำเป็นต้องปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร ซึ่งความคลาดเคลื่อนเหล่านี้มีผลต่อความถูกต้องที่ได้รับจากการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า ZTD และ PWV

ในงานศึกษาวิจัยนี้มีแนวทางในการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า PWV ด้วยการพัฒนาฟังก์ชันเพิ่มเติมดังนี้

- 1) ปรับปรุงระบบสมการเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยการแยกค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากอากาศแห้งและอากาศชื้นออกจากกัน คูณด้วยค่า Mapping Function เพื่อแปลงค่าคลาดเคลื่อนในทิศทางตั้งให้เป็นค่าคลาดเคลื่อนตามทิศทางแนว

เอียงที่คลื่นสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศสำหรับอากาศแห้ง (hydrostatic delay) และชั้น (Wet delay) โดยจะประยุกต์ใช้แบบจำลอง GPT3 (Global Pressure and Temperature 3) (Landskron & Bohm 2018) เพื่อประมาณค่า Mapping Function ในทิศทางที่คลื่นสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ

2) พัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร

3) ประยุกต์แบบจำลอง  $T_m$  ของ Suwanton et al. (2016) ซึ่งจากงานวิจัยของ Yuan et al. (2014) แสดงให้เห็นว่าบริเวณภูมิภาคแถบภูมิอากาศอบอุ่นชั้นแถบละติจูดกลาง เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง  $T_m$  ของ Bevis et al. (1992) แสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องไม่เพียงพอเพื่อแปลงค่า ZTD เป็น PWV ดังนั้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประมาณค่าไอน้ำในบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นที่ได้พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยของ Suwanton et al. (2016)

4) การแปลงค่า ZTD ให้เป็นค่า PWV จำเป็นต้องใช้ข้อมูลอุณหภูมิและความดันอากาศ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ทั้งนี้ในโครงข่ายสถานี GNSS ของประเทศไทยไม่ได้มีการติดตั้งเครื่องมืออุตุนิยมวิทยาไว้ด้วยกัน ทางเลือกอื่นที่สามารถดำเนินการได้คือการใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้เคียง, ข้อมูลจากพยากรณ์, หรือใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Empirical Model) ในงานวิจัยเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากสามารถประมวลผลได้รวดเร็วและใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่ำเหมาะสมกับการประมวลผล PWV แบบทันที เพื่อประมาณค่าความดันอากาศและอุณหภูมิ ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองท้องถิ่นเพื่อประมาณค่าความดันอากาศและอุณหภูมิทั่วประเทศโดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics) แทนการใช้แบบจำลองสากล (Global model)

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อให้ได้กระบวนการและเทคนิคการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว ความละเอียดสูงเพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีที่มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลขและการพยากรณ์อากาศระยะสั้น

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1) การปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC ด้วยการปรับปรุงระบบสมการเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์รวมทั้งการพัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทร จะช่วยให้ความถูกต้องให้กับการประมาณค่า ZTD แบบทันทีให้ความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและเพิ่มจำนวนข้อมูลผลสำเร็จของผลลัพธ์ให้มากขึ้นด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP
- 2) การพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความถูกต้องในการประมาณค่า PWV แบบทันที ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองสากล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ข้อมูล PWV แบบทันทีสำหรับงานศึกษาวิจัยหรือใช้ในงานด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น การพยากรณ์อากาศ, ข้อมูลประกอบร่วมกับงานวางแผนเพื่อการทำฝนเทียม, ข้อมูลติดตามการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลหรือสภาพอากาศ, การหาความสัมพันธ์ของการเกิดฝนตกหรือภัยแล้ง
- 2) ผลลัพธ์ของค่า ZTD สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อให้บริการค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP แบบทันทีซึ่งมีส่วนช่วยลดเวลาในการลู่เข้า (Convergence) หาค่าที่ถูกต้องได้เร็วขึ้น
- 3) ทำให้ได้แนวทางการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธี PPP เพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีที่มีความถูกต้องเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยา

#### 1.5 ขอบเขตการศึกษา

ในงานศึกษาวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีประมวลผลแบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีและพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นเพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาวิจัยไว้ดังนี้

##### 1.5.1 พื้นที่ศึกษา

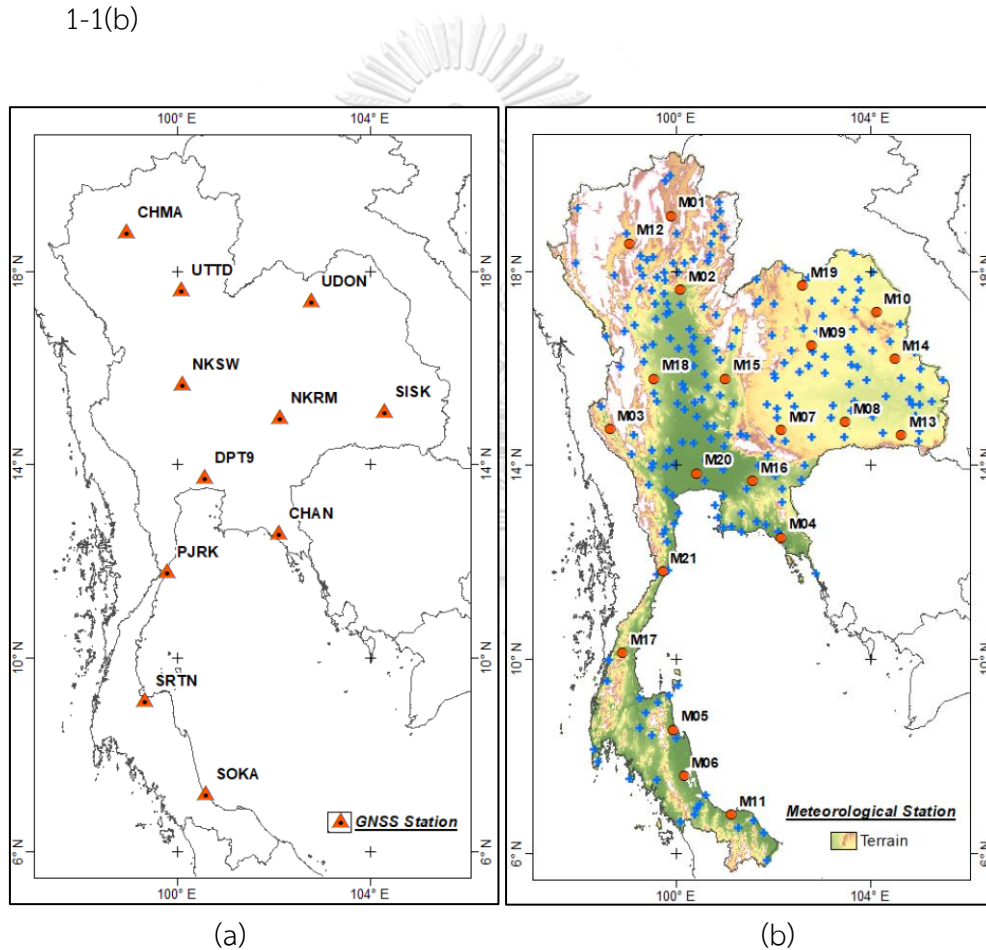
พื้นที่ศึกษาเพื่อติดตามการเปลี่ยนของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีจะใช้ข้อมูลจากสถานี GNSS ถาวรที่อยู่ในโครงข่ายงานรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ที่ได้ดำเนินการติดตั้งและจะพร้อมใช้งานครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศไทยประมาณ 222 สถานีในปี 2563 จากความร่วมมือของหน่วยงานหลักดังนี้ หน่วยงานกรมที่ดิน, กรมแผนที่ทหาร, และกรมโยธาธิการและผังเมือง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ข้อมูล GNSS จาก 11 สถานีจากหน่วยงานกรมโยธาธิการและผังเมืองถูกเลือกเพื่อใช้ในการทดสอบการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบทันทีเนื่องด้วยข้อมูลค่อนข้างมีความสมบูรณ์ โดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 1-31 มกราคม 2562 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานี GNSS แสดงดังรูปที่ 1-1(a)

##### 1.5.2 การพัฒนาโปรแกรมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ BNC ถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลของซอฟต์แวร์ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงซอร์สโค้ดเดิมของซอฟต์แวร์ด้วยภาษา C++ ทั้งนี้การพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันและแบบจำลองเพิ่มเติมประกอบไปด้วย

- 1) ปรับปรุงระบบสมการเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

- 2) พัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทร อ้างอิง IERS 2010 (International Earth Rotation and Reference Systems Service) แนะนำแบบจำลองปรับปรุงล่าสุดคือ TPXO.9-Atlas สำหรับประมาณค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทร
- 3) การพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นเฉลี่ยรายวัน ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม โดยใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดสภาพอากาศอัตโนมัติของหน่วยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (สสน.) และจากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 180 สถานี เป็นระยะเวลาจำนวน 11 (2551-2561) ปี แสดงตำแหน่งที่ตั้งดังรูปที่ 1-1(b)

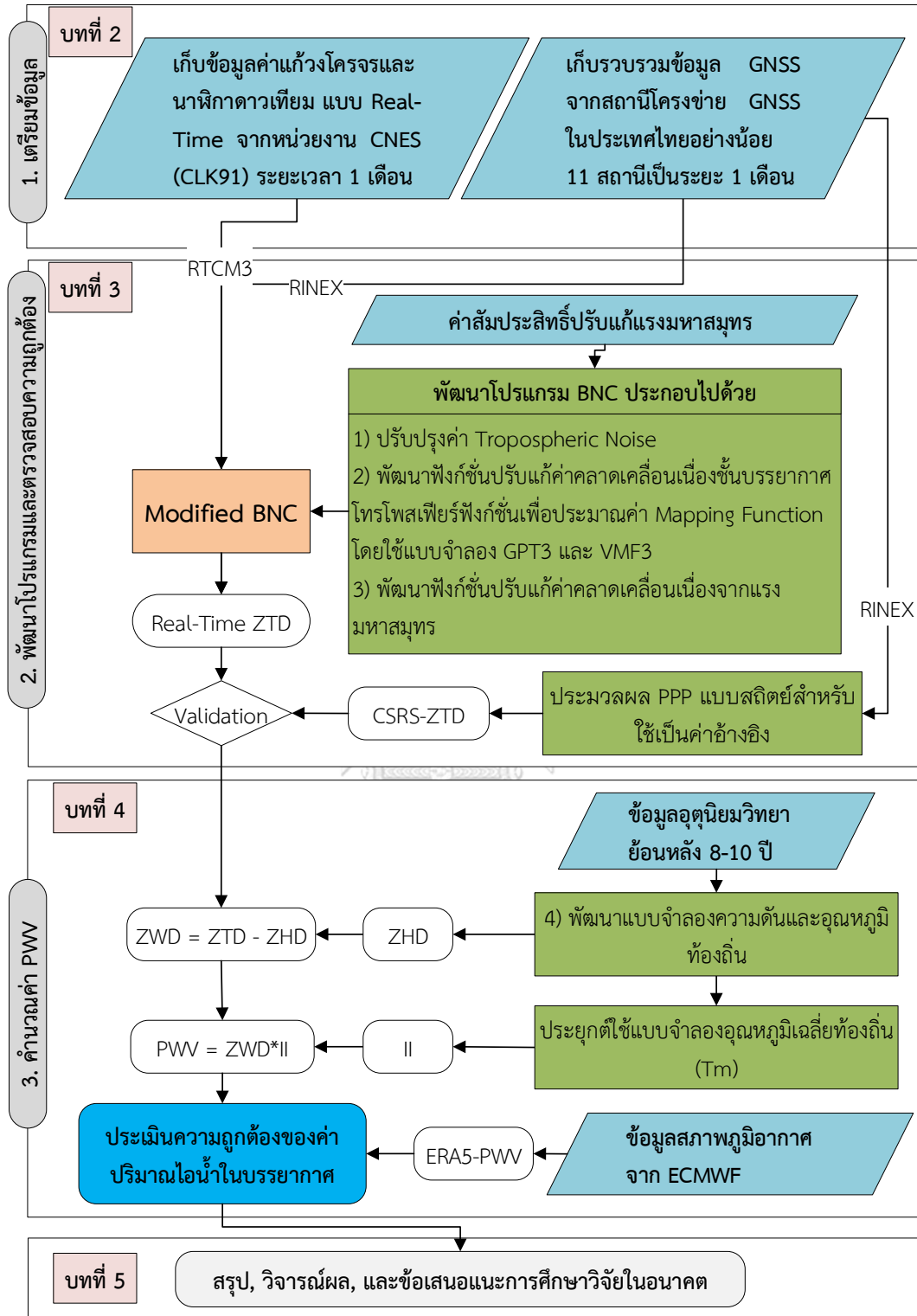


รูปที่ 1-1 (a) แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานี GNSS ดาวเทียมจากกรมโยธาธิการและผังเมือง สำหรับทดสอบการประมวลผล, (b) แสดงตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นจากหน่วยงานสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) กากบาทสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองและจุดวงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งสถานีใช้สำหรับทดสอบแบบจำลอง

## 1.6 โครงร่างเนื้อหาของวิทยานิพนธ์และขั้นตอนการศึกษาวิจัย

เพื่อนำเสนอเนื้อหาโครงร่างของวิทยานิพนธ์และขั้นตอนการศึกษาในแต่ละหัวข้อที่ได้ศึกษาวิจัย โดยเนื้อหาของการศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็นบทต่างๆ ประกอบไปด้วย

- บทที่ 2 จะเป็นการนำเสนอข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัย ประกอบไปด้วยวิธีเตรียมข้อมูล ความเป็นมาของข้อมูล, ความถูกต้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อมูล GNSS, ข้อมูลความดันและข้อมูลอุณหภูมิ, ข้อมูล ZTD และ PWV สำหรับใช้เป็นค่าเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล
- บทที่ 3 นำเสนอการประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงร่วมกับข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีจาก CLK91 ด้วยซอฟต์แวร์ BNC ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมวลผลเพื่อประมาณค่า ZTD ซอฟต์แวร์ BNC ได้ถูกปรับปรุง ประกอบไปด้วย 1) ปรับแต่งค่า Tropospheric noise 2) ปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function 3) ฟังก์ชันปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร และผลลัพธ์ของค่า ZTD ถูกเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยเนื้อหาภายในประกอบไปด้วย ขั้นตอนการดำเนินงาน, งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, ทฤษฎี, และผลการศึกษา
- บทที่ 4 นำเสนอการประมาณค่า PWV แบบทันที โดยใช้ข้อมูล ZTD ที่ประมาณค่าได้จากบทที่ 3 เพื่อแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความดันและอุณหภูมิ ซึ่งถูกประมาณค่าได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานศึกษาวิจัยนี้ ร่วมกับแบบจำลองสากล และผลลัพธ์ของค่า PWV ถูกเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยเนื้อหาภายในประกอบไปด้วย ขั้นตอนการดำเนินงาน, งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, ทฤษฎี, และผลการศึกษา
- บทที่ 5 สรุป, วิเคราะห์ผล, และข้อเสนอแนะการศึกษาวิจัยการประมาณค่า PWV แบบทันที ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP โดยใช้ข้อมูล GNSS



รูปที่ 1-2 แสดงขั้นตอนการนำเสนอโครงร่างของวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนการศึกษาวิจัยในแต่ละส่วน

## บทที่ 2

### การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย

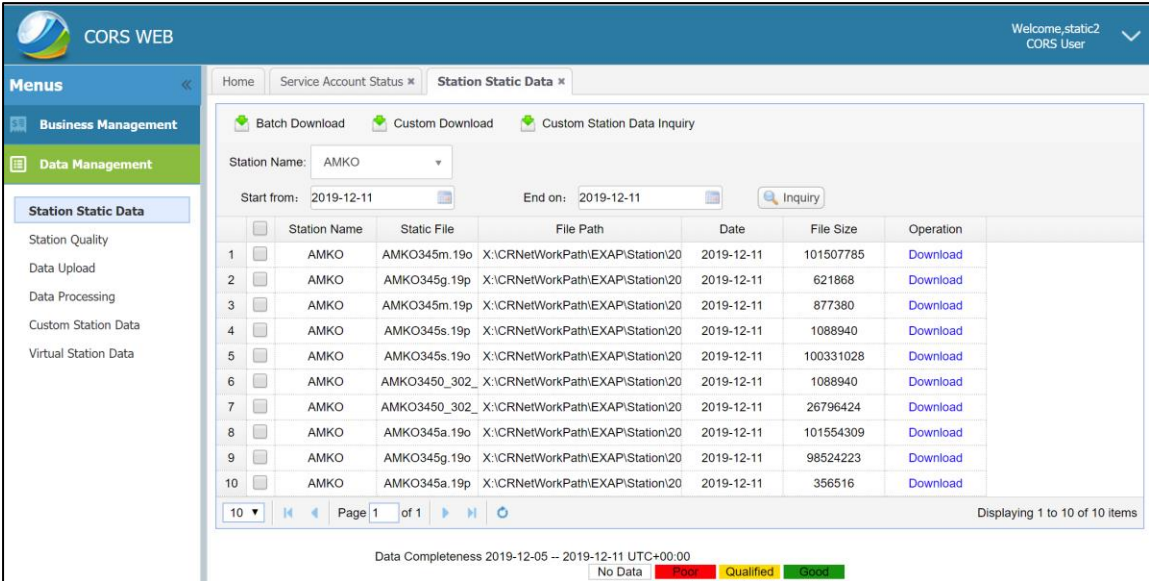
เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวข้องกับรายการข้อมูลและการจัดเตรียมข้อมูลที่ใช้ประมาณค่า PWV แบบทันที ด้วยการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ประกอบไปด้วย

- 1) ข้อมูล GNSS
- 2) ข้อมูลค่าปรับแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที
- 3) ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สำหรับประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร
- 4) ข้อมูล ZTD จากหน่วยงาน CSRS (Canadian Spatial Reference System) สำหรับใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบเพื่อทดสอบความถูกต้องของการประมาณค่า ZTD ที่ได้จากการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันที
- 5) ข้อมูลอนุกรมเวลาความดันและอุณหภูมิจากสถานีอุตุนิยมวิทยา
- 6) ข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis) สำหรับใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบเพื่อทดสอบความถูกต้องของการประมาณค่า PWV ที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPP

#### 2.1 ข้อมูล GNSS

ข้อมูล GNSS เพื่อใช้ในการทดสอบจัดเก็บอยู่ในรูปแบบ RINEX (Receiver Independent Exchange Format) เวอร์ชัน 3.02 ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้เฉพาะข้อมูลจากสถานี CORS ของหน่วยงานกรมโยธาธิการและผังเมืองจำนวน 11 สถานี ข้อมูลมีความถี่ในการจัดเก็บทุกๆ 1 วินาที ในช่วงวันที่ 1-31 มกราคม 2562 ประกอบไปด้วย สถานี CHAN, CHMA, DPT9, NKRM, NKSW, PJRK, SISK, SOKA, SRTN, UDON, และ UTTD ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานกรมที่ดินให้ดาวน์โหลดข้อมูลผ่านทางเว็บไซต์ <http://www.dol-rtknetwork.com:8090/login.aspx> ข้อมูลที่ดาวน์โหลดได้ใน 1 วันของแต่ละสถานีจะถูกแบ่งออกเป็นไฟล์ย่อย 4 ไฟล์ ไฟล์ละ 6 ชั่วโมง ก่อนนำข้อมูลไปใช้งานประมวลผลจำเป็นต้องรวมไฟล์ให้เป็น 1 ไฟล์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ gfrnx ซึ่งทำงานในรูปแบบคอมมานด์ไลน์ (Command Line) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยหน่วยวิจัย GFZ Research Center เพื่อจัดการไฟล์ข้อมูล RINEX สามารถดาวน์โหลดซอฟต์แวร์และวิธีการใช้งานเพิ่มเติมได้ที่ <http://semisys.gfz-potsdam.de/semisys/scripts/download/index.php>





Station Name	Static File	File Path	Date	File Size	Operation
AMKO	AMKO345m.19o	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	101507785	Download
AMKO	AMKO345g.19p	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	621868	Download
AMKO	AMKO345m.19p	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	877380	Download
AMKO	AMKO345s.19p	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	1088940	Download
AMKO	AMKO345s.19o	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	100331028	Download
AMKO	AMKO3450_302_X	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	1088940	Download
AMKO	AMKO3450_302_X	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	26796424	Download
AMKO	AMKO345a.19o	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	101554309	Download
AMKO	AMKO345g.19o	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	98524223	Download
AMKO	AMKO345a.19p	X:\CRNetWorkPath\EXAPI\Station\20	2019-12-11	356516	Download

รูปที่ 2-1 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการสำหรับดาวน์โหลดข้อมูล GNSS จากหน่วยงานกรมที่ดิน  
(<http://www.dol-rtknetwork.com:8090/login.aspx>)

## 2.2 ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที

ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีที่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงาน IGS แบบไม่มีค่าใช้จ่าย ปัจจุบันมีหน่วยงานวิจัยระดับสากลเปิดให้ใช้งานค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียม ความถูกต้องสูงแบบทันทีเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยประกอบไปด้วย 12 หน่วยวิจัย ดังตารางที่ 2-1 ซึ่งสามารถติดตามตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลอย่างต่อเนื่องร่วมกับข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที ได้ที่เว็บไซต์ <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/ppp> ในงานศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีของหน่วยงาน CNES จาก mountpoint CLK91 (หลังจากวันที่ 31 สิงหาคม 2563 จะเปลี่ยนไปเป็น SSRA00CNE0) (Laurichesse 2011) เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือของการปล่อยสัญญาณ, ให้ค่าความถูกต้องที่ดีเทียบเท่า IGS Ultra Rapid และให้บริการอย่างต่อเนื่องสำหรับกลุ่มดาวเทียม GPS, GLONASS, Baiduo และ Galileo โดยค่าความถูกต้องของข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีให้บริการโดยหน่วยงาน IGS แสดงดังตารางที่ 2-2 และรายละเอียดข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีสำหรับประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแสดงดังตารางที่ 2-3 สำหรับรายละเอียดข้อมูลที่ให้บริการตามมาตรฐาน RTCM (Radio Technical Commission of Maritime Services)

ตารางที่ 2-1 แสดงหน่วยวิจัยระดับสากลที่ให้บริการค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียม

ชื่อย่อหน่วยวิจัย	ชื่อเต็ม
BKG	Federal Agency for Cartography and Geodesy
CNES	The National Centre for Space Studies
CODE	Center for Orbit Determination in Europe, AIUB, Switzerland
ESOC	European Space Operations Center, ESA, Germany
GFZ	GeoForschungsZentrum, Germany
GRGS	GRGS-CNES/CLS, Toulouse, France
JPL	Jet Propulsion Laboratory, USA
MIT	Massachusetts Institute of Technology, USA
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration / NGS, USA
NRCan	Natural Resources Canada, Canada
USNO	US Naval Observatory, USA
WHU	Wuhan University, China

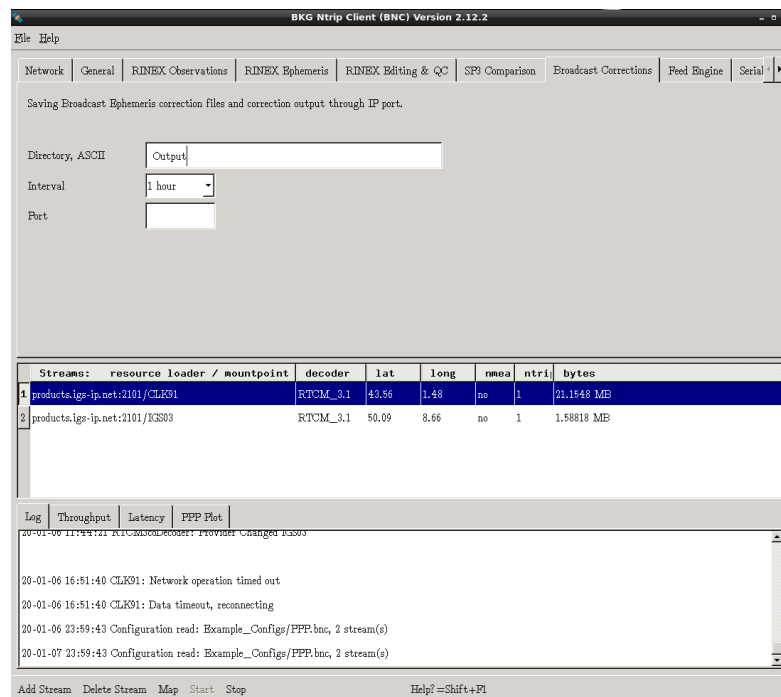
ตารางที่ 2-2 แสดงผลิตภัณฑ์ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมที่ให้บริการโดย IGS

		ความถูกต้อง	ความล่าช้า	ปรับปรุงข้อมูล	ช่วงข้อมูล
GPS Satellite Ephemerides & Clocks	Broadcast Orbits	~100 cm	Real-time	--	daily
	Broadcast Clocks	~5 ns	Real-time	--	daily
	IGU Predicted Orbits	~5 cm	Real-time	6-hourly	15 min
	IGU Predicted Clocks	~3 ns	Real-time	6-hourly	15 min
	Rapid Orbits	~2.5 cm	17-41 hours	daily	15 min
	Rapid Clocks	~75 ps	17-41 hours	daily	5 min
	Final Orbits	~2.5 cm	12-18 days	weekly	15 min
	Final Clocks	~75 ps	12-18 days	weekly	30 s
GLONASS Satellite Ephemerides	Final Orbits	~3 cm	12-18 days	weekly	15 min

ตารางที่ 2-3 แสดงประเภทข้อมูลที่ถูกใช้เพื่อประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันทีตามมาตรฐาน RTCM3

รหัส Message	รายละเอียด
1004	Extended L1&L2 GPS RTK Observables for GPS RTK Use
1005	Stationary RTK Reference Station ARP
1006	Stationary RTK Reference Station ARP plus the Antenna Height
1007	Antenna Descriptor (msg 1008 is also commonly used)
1012	Extended L1&L2 GLONASS RTK Observables
1013	System Parameters, time offsets, lists of messages sent
1017	GPS Combined Geometric and Ionospheric Correction Differences
1019	GPS Broadcast Ephemeris (orbits)
1020	GLONASS Broadcast Ephemeris (orbits)
1033	Receiver and Antenna Descriptors
1045	Galileo Broadcast Ephemeris
1057	SSR GPS orbit corrections to Broadcast Ephemeris
1058	SSR GPS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1059	SSR GPS code biases
1060	SSR Combined orbit and clock corrections to GPS Broadcast Ephemeris
1061	SSR GPS User Range Accuracy
1062	SSR High-rate GPS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1063	SSR GLONASS orbit corrections for Broadcast Ephemeris
1064	SSR GLONASS clock corrections for Broadcast Ephemeris
1065	SSR GLONASS code biases
1066	SSR Combined orbit and clock corrections to GLONASS Broadcast Ephemeris
1067	SSR GLONASS User Range Accuracy (URA)
1068	High-rate GLONASS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1057	SSR GPS orbit corrections to Broadcast Ephemeris

ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที CLK91 ให้บริการผ่านทางอินเทอร์เน็ตตามมาตรฐาน RTCM ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานที่จัดเก็บในรูปแบบไฟล์ ในงานศึกษาวิจัยนี้ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมจะถูกจัดเก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ไบนารีซึ่งเป็นฟอร์แมตเฉพาะของซอฟต์แวร์ BNC โดยจะต้องเปิดซอฟต์แวร์ให้รับข้อมูลต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยจัดเก็บแยกเป็นรายวัน ดังรูปที่ 2-2 แสดงการตั้งค่าซอฟต์แวร์ BNC เพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีถูกส่งผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต



รูปที่ 2-2 แสดงการใช้ซอฟต์แวร์ BNC เพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงแบบทันที CLK91 ที่ถูกส่งผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต

### 2.3 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สำหรับประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร

ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้คำนวณเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทรสามารถประมาณค่าได้จากเว็บไซต์ <http://holt.oso.chalmers.se/loading> ดังรูปที่ 2-3 ที่ให้บริการโดยไม่มีค่าใช้จ่าย (Bos & Scherneck 2019) โดยการระบุพิกัดที่ตั้งของตำแหน่งสถานี GNSS โปรแกรมจะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์และส่งผลลัพธ์กลับมายังอีเมลที่ระบุ ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี CUUT โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นล่าสุด TPXO.9-Atlas แสดงดังรูปที่ 2-4 โดยผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของฟอร์แมต BLQ ไฟล์

**Welcome to the free ocean tide loading provider**

[Skip intro](#)

**NEWS**

---

**March 7, 2020: Error in our copies of GOT4.10c, K<sub>2</sub> and Q<sub>1</sub> amplitudes, corrected.**  
**For high-precision applications, the set of loading coefficients should be recomputed.**

---

**January 6, 2019: New model TPXO.9-Atlas**  
 A high-resolution model, 30x30 cells per square-degree. Loading jobs are carried out at SEGAL at UBI/IDL in Portugal.

---

**February 05, 2018: Alternative loading Greens function available**  
 For decades the load convolution used an elastic Greens function ased on the Gutenberg-Bullen earth model. You can choose an alternative, a Green's function for an anelastic Earth based on PREM assuming a flat Q-factor spectrum. We call it STW105. It has been computed with Machiel Bos' program Astyanax. Presently, the PREM option is not available yet with ocean models FES2014b, FES2012 and TPXO8-Atlas; we are working on it. [Further reading: Bos and Scherneck \(2013\)](#)

---

**February 05, 2018: A pro-memoriam on BLQ files (updated)**  
 with emphasis on phase and its conversion for reckoning with respect to the local solid earth tide.

---

**February 05, 2018: Revision of service for gravity and tilt**  
 Today the service goes official with tilt parameters. We had to bring scaling and signs at both computing sites into consistency first. Still, please read the header information in the result mail carefully!  
**We kindly urge all users who used our service for tilt before Feb. 05, 2018, to issue their requests again.**

รูปที่ 2-3 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ประมาณค่ารับแก้เนื่องจากแรง  
 มหาสมุทร

```

$$ Ocean loading displacement
$$
$$ OTL provider: http://holt.oso.chalmers.se/loading/
$$ Created by Scherneck & Bos
$$
$$ COLUMN ORDER: M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 MF MM SSA

$$ Displacement is defined positive in upwards, South and West direction.
$$ The phase lag is relative to Greenwich and lags positive. The PREM
$$ Green's function is used. The deficit of tidal water mass in the tide
$$ model has been corrected by subtracting a uniform layer of water with
$$ a certain phase lag globally.
$$
$$ FES2014b_comp: m2 s2 n2 k2 k1 o1 p1 q1 Mf Mm Ssa
$$
$$ END HEADER
$$
CUUT
$$ FES2014b ID:2017-05-10 18:24:51
$$ Computed using CARGA at SEGAL (UBI/IDL)
$$ CUUT          RADI TANG lon/lat: 100.5339 13.7360 105.658
.00184 .00055 .00048 .00015 .00241 .00194 .00089 .00050 .00078 .00057 .00042
.00378 .00174 .00074 .00046 .00256 .00138 .00081 .00022 .00041 .00018 .00019
.00227 .00078 .00050 .00020 .00391 .00273 .00121 .00046 .00051 .00030 .00022
-106.7 -52.4 -111.5 -121.5 -55.7 -88.1 -53.2 -109.8 -170.7 -171.0 178.3
137.6 173.7 126.9 176.0 -125.6 -128.8 -128.1 -134.3 115.7 71.4 6.5
29.4 51.1 8.9 46.7 -75.4 -79.2 -78.7 -74.8 9.0 0.3 -0.3
$$ END TABLE

```

รูปที่ 2-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดและเฟส (Phase) สำหรับใช้ประมาณค่าคลาดเคลื่อน  
 เนื่องจากแรงมหาสมุทรที่ได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสถานี CUUT

## 2.4 ข้อมูล ZTD จากหน่วยงาน CSRS

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า ZTD แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธี PPP จากซอฟต์แวร์ BNC โดยเปรียบเทียบกับข้อมูล ZTD ที่มีความถูกต้องที่สูงกว่า ซึ่งสามารถทำได้โดยการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์ที่มีความถูกต้องสูงที่ได้รับการยอมรับและร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความถูกต้องสูงแบบ Final ในงานศึกษาวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ประมวลผลออนไลน์ (online) โดยหน่วยงาน CSRS ถูกใช้เพื่อประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อประมาณค่า ZTD สำหรับใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง จากงานวิจัยของ [Abdelazeem and Celik \(2014\)](#) ทำการทดสอบความถูกต้องของการประมวลผลค่าพิกัดเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากซอฟต์แวร์ Bernese พบว่ามีค่า RMSE อยู่ในระดับ 1-4 มม. และจากงานวิจัยของ [Mendez Astudillo et al. \(2018\)](#) ได้ทำการเปรียบเทียบค่า ZTD ที่ได้จาก CSRS กับข้อมูลจากหน่วยงาน IGS พบว่ามีค่า RMSE อยู่ 5.5-7.8 มม. และอีกหลายงานวิจัย ([Abd-Elazeem et al. 2011](#); [Arabi & Nankali 2017](#); [Ebner & Featherstone 2008](#)) ที่ได้ทำการทดสอบผลลัพธ์ของบริการประมวลผลออนไลน์ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP ร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมแบบ Final จาก CSRS ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องเพียงสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิง

การส่งข้อมูล GNSS เพื่อประมวลผลสามารถส่งได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ PPP direct เพื่ออำนวยความสะดวกในการส่งข้อมูลและรับข้อมูลผลลัพธ์ดังรูปที่ 2-5 แสดงการใช้ซอฟต์แวร์ PPP direct เพื่อส่งข้อมูลไปประมวลผลยังระบบประมวลผลออนไลน์ของ CSRS หรือสามารถส่งข้อมูลทางเว็บไซต์

PPP direct 2.2

Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada

Configuration: default

CSRS User ID: chaiyut.c@gmail.com

Results:

- Send to this email: chaiyut.c@gmail.com
- Download to this folder: E:\RTSD\_Rinex\CSRS\_Result

Processing mode:


- Static
- Kinematic

Reference frame:

- NAD83(CSRS)
- ITRF

Buttons: Cancel, OK, Proxy

รูปที่ 2-5 แสดงการตั้งค่าของซอฟต์แวร์ PPP direct เพื่อส่งข้อมูล GNSS ไปประมวลผลยังบริการประมวลผลออนไลน์ของ CSRS

Natural Resources Canada  Canada

Search

Our Natural Resources | Climate Change | Energy Efficiency | Maps, Tools and Publications | Public Consultations | Science and Data

Home → Maps, Tools and Publications → Tools → Geodetic Reference Systems → Tools and Applications → Precise Point Positioning

## Precise Point Positioning

**i Update to CSRS-PPP outputs: addition of uncertainties related to epoch transformation**

The Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada updated the CSRS-PPP service on Thursday, October 17, 2019. This update affects the CSRS-PPP outputs if users request to have the results in NAD83(CSRS) at an epoch other than the epoch of GNSS data. In this case, a coordinate transformation is applied using the predicted velocities from the [Canadian Velocity Grid](#) and the uncertainty associated with the epoch transformation will be added to the uncertainty associated with the PPP coordinate estimation. The [output files have been updated](#) to show both the uncertainty associated with PPP estimations as well as the total uncertainty including the uncertainty due to epoch transformations, if any.

**i New velocity grid NAD83(CSRS)v7**

[View documentation](#) about the new NAD83(CSRS) v7.0 velocity grid.

CSRS-PPP Files Processed (Last Updated: 2020-04-24 15:05:01 GMT)

▶ Help for CSRS PPP (Updated 2020-04-07) Profile Sign out

Email for results (required)

Processing mode

Static  Kinematic

NAD83  ITRF

Epoch (Adopted)

Vertical datum

Contribute to passive control maintenance? ([What is this?](#))

Authorize the Canadian Geodetic Survey (CGS) to archive and publish CSRS-PPP submission and solution

Official marker station name

▶ More options

RINEX observation file (required) (.zip, .gzip, .gz, .Z, .??O)

No file chosen

รูปที่ 2-6 แสดงเว็บไซต์ให้บริการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงของหน่วยงาน CSRS

<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php>

## 2.5 ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิว

ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวแบบเฉลี่ยรายวัน ถูกรวบรวมเป็นระยะเวลาจำนวน 8-10 ปี สำหรับใช้พัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิและสำหรับทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จำนวน 201 สถานี สำหรับขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับพัฒนาแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2-7 โดยแบ่งเป็นข้อมูลได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (สสน.) จำนวน 117 สถานีซึ่งสามารถทำหนังสือขออนุเคราะห์ข้อมูลได้โดยตรงไปยังหน่วยงาน และจากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 78 สถานี สามารถติดต่อขอข้อมูลโดยตรงได้ที่หน่วยงานหรือสามารถดาวน์โหลดข้อมูลโดยตรงได้จากเว็บไซต์ดังรูปที่ 2-8 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา

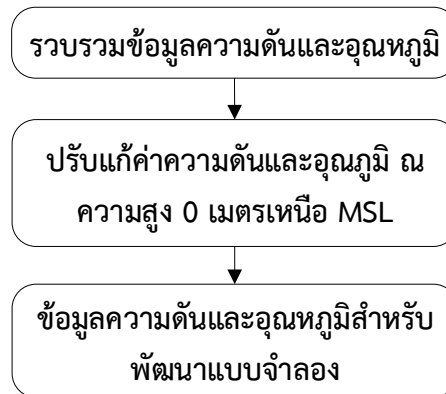
เนื่องจากข้อมูลที่ได้แต่ละสถานีมีความสูงที่แตกต่างกัน ก่อนนำข้อมูลไปใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองข้อมูลจะถูกปรับค่า ให้มีค่าอยู่ที่ระดับความสูงเดียวกันที่ระดับความสูง 0 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยข้อมูลความสูงของสถานีที่อ้างอิงความสูงอยู่เหนือทรงรี (Ellipsoidal height) จะถูกคำนวณเพื่อหาค่าความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level, MSL) ที่อ้างอิงอยู่บนอีออยด์ โดยสามารถคำนวณได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง EGM2008 (Earth Gravitation Model) ความสูงที่ได้จะถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าของข้อมูลให้มีค่าอยู่ที่ระดับความสูง 0 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง วิธีการคำนวณเพื่อปรับค่าความดันและอุณหภูมิเมื่อเปลี่ยนความสูง อ้างอิงวิธีการคำนวณจากแบบจำลอง GPT (Boehm et al. 2007) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$p = p_0 \cdot (1.0 - 0.0000226 \cdot hort)^{5.225} \quad (2.1)$$

$$T = T_0 - 0.065 \cdot hort \quad (2.2)$$

โดยที่  $p$  คือความดัน ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี หน่วยเฮกโตปาสกาล,  $p_0$  คือความดัน ณ พื้นผิวอีออยด์ หน่วยเฮกโตปาสกาล,  $T$  คืออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี หน่วยเคลวิน,  $T_0$  คืออุณหภูมิ ณ พื้นผิวอีออยด์ หน่วยเคลวิน, และ  $hort$  คือความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง หน่วยเมตร





รูปที่ 2-7 แสดงขั้นตอนการเตรียมข้อมูลความดันและอุณหภูมิสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

The screenshot displays the TMD AWS web interface. At the top, there are navigation tabs for Weather, Climate Data, AWS, and Reports. The main content area is divided into several sections:

- GMT :** A map of Thailand showing the locations of weather stations. A legend indicates 'On Line (0)' and 'Off Line'.
- WEATHER CLASSIFIED BY CITY:** A dropdown menu for 'Region' (Central) and 'Station' (0037. BANGNA Agrometeorological Station). Below this is a table of weather data:
 

Data Time	
Sun Rise / Set	Rise : 06:34:54 / Set : 18:28:13
Wind Direction	deg
Wind Speed	km/h
Temperature	°C
Precipitation	mm
Pressure	hPa
Humidity	%
Visibility	m
Weather	
- WEATHER:** A section with a sun icon and links to 'Weather classified by City' and 'Weather Calendar'.
- LINK ZONE:** A section with icons and links to 'Reports', 'Wind Roses', 'Alphanumeric', 'Distribution Map', 'Time Series', and 'Weather Calendar'.
- RELATED GOVERNMENT LINKS:** A section with a dropdown menu for 'Thailand government'.

At the bottom, there is a footer with the Thai Meteorological Department logo and the text 'Thai Meteorological Department Automatic Weather System' and 'Copyright © 2008 METEOROLOGICAL DEPARTMENT. All Rights Reserved.' The local time is shown as 'Local Time : 2020/04/22 00:55'.

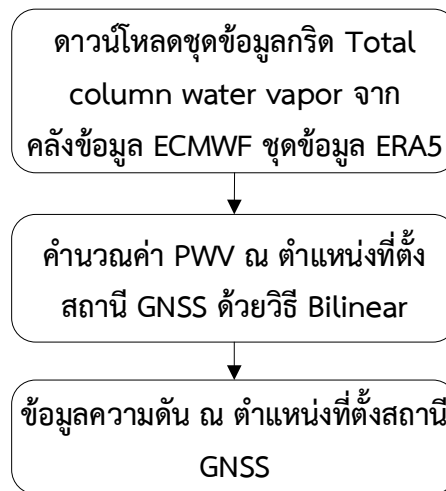
รูปที่ 2-8 แสดงเว็บไซต์ที่ให้บริการข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากหน่วยงานกรมอุตุนิยมวิทยา

<http://www.awsobservation.tmd.go.th/web/main/index.asp>

## 2.6 ข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 จากหน่วยงาน ECMWF

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า PWV แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล ZTD ด้วยวิธีจุดเดี่ยวความละเอียดสูง ชุดข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis) จาก ECMWF ถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง ทั้งนี้ข้อมูล ERA5 ถูกพัฒนาขึ้นใหม่ล่าสุดเพื่อแทนที่ข้อมูล ERA-Interim ซึ่งหยุดให้บริการเมื่อวันที่ 31 สิงหาคม 2562 ข้อมูล ERA5 ที่ให้บริการมีความละเอียดในการอัปเดตข้อมูลภายใน 5 วัน (ข้อมูลแบบรายวัน) เป็นข้อมูลกริดที่มีความละเอียดทางราบ  $0.25^{\circ} \times 25^{\circ}$  (ประมาณ 30 กม.) แบบรายชั่วโมง ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลตัวแปรสภาพภูมิอากาศ, พื้นดินและมหาสมุทรมากกว่า 100 ตัวแปร (Karl 2020) จากงานวิจัยของ Q. Zhang et al. (2018) ได้เปรียบเทียบข้อมูล PWV ที่ประมาณค่าได้จากชุดข้อมูล ERA5 กับข้อมูล GNSS และเครื่องวิทยุห้วงอากาศ ผลทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย หรือ RMSE (Route mean square error) อยู่ที่ 1.8 และ 2.7 มม. ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าข้อมูล ERA5 มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับข้อมูล GNSS และเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการวิจัยหรือตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทยมาก่อนซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของข้อมูล ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทยให้เห็นผลอย่างชัดเจนเห็นควรที่จะทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบข้อมูล ERA5-PWV กับข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลที่ให้ความถูกต้องสูงด้วยการประมวลผลแบบภายหลังด้วยซอฟต์แวร์ทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อประเมินความถูกต้องของค่า ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทย

สามารถดาวน์โหลดข้อมูลกริด PWV จากชุดข้อมูล ERA5 ผ่านทางเว็บไซต์ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset> หรือกรณีดาวน์โหลดข้อมูลเป็นจำนวนมากสามารถดาวน์โหลดผ่านทาง CDS API (Copernicus Climate Data Store, Application Programming Interface) โดยใช้ภาษาไพทอนสคริปต์สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก <https://cds.climate.copernicus.eu/api-how-to>



รูปที่ 2-9 แสดงการเตรียมข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5 ของหน่วยงาน ECMWF

การประมาณค่า PWV ด้วยข้อมูล ERA5 ได้จากผลิตภัณฑ์ Total column water vapour หรือจากข้อมูลความชื้นจำเพาะ (specific humidity) และความดันบรรยากาศ จำนวน 31 ชั้น จากพื้นผิวที่ความดันบรรยากาศ 1,013.25 เฮกโตปาสกาล (hPa) ขึ้นไปยังชั้นบนสุดที่ความดันบรรยากาศ 0 เฮกโตปาสกาล ประมาณ 80 กิโลเมตร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3) (Jiang et al. 2016)

$$PWV = \sum_i^{n-1} \frac{(q_i + q_{i+1}) \cdot (p_{i+1} - p_i)}{2 \cdot \rho_w \cdot g} \quad (2.3)$$

$$g = 9.780325 \cdot \left( \frac{1 + 0.00193185 \cdot \sin(\varphi)^2}{1 - 0.00669435 \cdot \sin(\varphi)^2} \right)^{0.5} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนชั้นของข้อมูล,  $q_i$  คือ ความชื้นจำเพาะ หน่วย กิโลกรัมต่อกิโลกรัม,  $p_i$  คือความดันบรรยากาศ หน่วย เฮกโตปาสกาล ณ ชั้นที่  $i$ ,  $g$  หน่วยค่าแรงโน้มถ่วง หน่วย เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>, และ  $\varphi$  คือละติจูดหน่วย เรเดียน

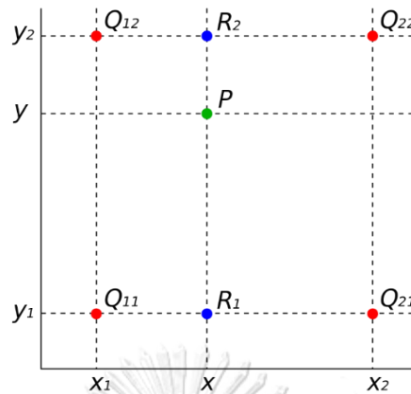
การหาค่า PWV ณ จุดใดๆ  $f(x, y)$  บนกริดแสดงดังรูปที่ 2-10 จะใช้การประมาณค่า PWV ที่อยู่รอบๆ จุด 4 จุดด้วยวิธีการแบบ Bilinear interpolation ดังสมการที่ (2.5)-(2.7)

$$f(x, y_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \quad (2.5)$$

$$f(x, y_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}) \quad (2.6)$$

$$f(x, y) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(x, y_2) \quad (2.7)$$

โดยที่  $f(Q_{11}), f(Q_{12}), f(Q_{21})$ , และ  $f(Q_{22})$  คือค่า PWV ที่อยู่รอบจุดใดๆ บนกริด และ  $x_1, y_1, x_2, y_2$  เป็นค่าพิกัด ณ จุดกึ่งกลางกริด



รูปที่ 2-10 แสดงการประมาณค่ารอบจุดจากจุดข้อมูลที่ทราบค่า 4 จุดด้วยวิธี Bilinear ค่า PWV ขึ้นอยู่กับระดับความสูง ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับข้อมูลกริด ERA5 ที่ระดับค่าสูงที่ต่างกันได้ จึงจำเป็นต้องแก้ไขค่า PWV ให้ตรงกับระดับความสูงของ ERA5 โดยที่ข้อมูล ERA5 ใช้พื้นหลักฐานทางดิ่ง EGM2008 ในการอ้างอิงความสูง ก่อนการปรับแก้ค่า PWV ข้อมูลทั้งสองแหล่งจำเป็นต้องปรับค่าความสูงอ้างอิงพื้นหลักฐานทางดิ่งเดียวกันก่อน โดยแปลงค่าความสูงของสถานี GNSS ที่อ้างอิงอยู่บนทรงรี เป็นความสูงอยู่บนพื้นผิว EGM2008 การปรับแก้ค่า PWV เนื่องจากความต่างความสูงได้ดังสมการที่ (2.8) (Jiang et al. 2019)

$$PWV = PWV_0 \cdot \exp\left(\frac{C_2 \Delta h}{1,000}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $PWV_0$  คือปริมาณไอน้ำก่อนการปรับแก้ความสูง,  $C_2$  คือ ค่าคงที่ 0.439,  $\Delta h$  คือค่าต่างความสูงระหว่างสถานี GNSS กับความสูงกริด

The screenshot shows the Copernicus website interface for selecting ERA5 data. At the top, there are logos for the European Commission, Copernicus, ECMWF, and Climate Change Service. A navigation bar includes links for Home, Search, Datasets, Applications, Your requests, Toolbox, FAQ, and Live. The main heading is "ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present". Below this, there are tabs for Overview, Download data (selected), Documentation, and View. The "Product type" section includes a list of data products with checkboxes. The "Reanalysis" option is checked. Other options include Ensemble members, Ensemble mean, and Ensemble spread. A large list of specific data products follows, such as "Eastward gravity wave surface stress", "Friction velocity", "Instantaneous moisture flux", etc. The "Total column water vapour" option is checked. At the bottom right of the list, there are "Select all" and "Clear all" buttons.

Product type

Reanalysis  Ensemble members  Ensemble mean  
 Ensemble spread

Select all Clear all

Eastward gravity wave surface stress  Eastward turbulent surface stress  Forecast albedo  
 Friction velocity  Gravity wave dissipation  Forecast surface roughness  
 Instantaneous moisture flux  Instantaneous northward turbulent surface stress  Instantaneous eastward turbulent surface stress  
 Mean vertical gradient of refractivity inside trapping layer  Minimum vertical gradient of refractivity inside trapping layer  K index  
 Northward turbulent surface stress  Orography  Land-sea mask  
 Standard deviation of filtered subgrid orography  Skin reservoir content  Model bathymetry  
 Total column water  Standard deviation of orography  Northward gravity wave surface stress  
 Trapping layer base height  Total column ozone  Sea-ice cover  
 V-component stokes drift  Total column supercooled liquid water  Slope of sub-gridscale orography  
 Total column water vapour  Total totals index  
 Trapping layer top height  U-component stokes drift  
 Zero degree level

Select all Clear all

รูปที่ 2-11 แสดงเว็บไซต์ดาวน์โหลดข้อมูลจากคลังข้อมูล ECMWF

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

### บทที่ 3

#### การประมาณค่า ZTD แบบทันที ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS นอกจากค่าพิกัดตำแหน่งแล้วค่า ZTD ก็เป็นอีกหนึ่งผลลัพธ์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะงานทางด้านอุตุนิยมวิทยา การประมาณค่า ZTD สามารถทำได้ด้วยวิธีการประมวลผลแบบเส้นฐาน (Base-line) หรือแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูง หรือ PPP ซึ่งการศึกษาวิจัยในปัจจุบันนิยมวิธีการประมวลผลแบบ PPP เนื่องจากมีความถูกต้องเทียบเท่าการประมวลผลแบบเส้นฐาน แต่มีความซับซ้อนในขั้นตอนการประมวลผลและใช้ทรัพยากรเครื่องมือในการประมวลผลที่น้อยกว่า จากหลายการศึกษาวิจัย (Jiang et al. 2016; Mendez Astudillo et al. 2018; Xu et al. 2013; ZHANG Xiaohong 2013; Zus et al. 2019) แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP แบบสถิตย์ (static) ด้วยการประมวลผลข้อมูลภายหลัง (Post processing) หรือใกล้ปัจจุบัน (Near real-time) ร่วมกับข้อมูลวงโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบ Final (แสดงดัง

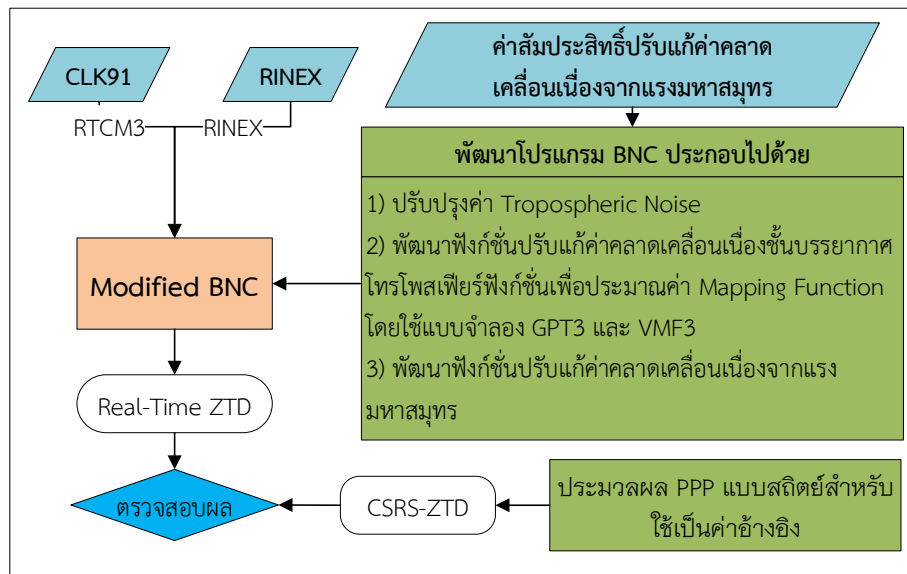
ตารางที่ 2-2) หรือเทียบเท่า ผลลัพธ์ที่ได้ให้ค่าความถูกต้องที่ดีเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยา, การพยากรณ์อากาศ, และ การติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ หลายงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงการพยากรณ์อากาศมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นเมื่อใช้ค่า ZTD ในแบบจำลอง NWP (Bennitt & Jupp 2012; Rohm et al. 2014; Vedel & Huang 2004) อย่างไรก็ตามซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ใช้วิธีการประมวลผลข้อมูลแบบภายหลัง เพื่อรอข้อมูลวงโคจรและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความถูกต้องสูงระดับ Ultra-Rapid ซึ่งมีความล่าช้าในระดับหลายชั่วโมง แต่ด้วยสภาพอากาศในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและรุนแรงมากยิ่งขึ้น จึงมีความต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศรวมทั้งการพยากรณ์อากาศแบบทันทีหรือสามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในช่วงเวลาสั้นๆ จึงมีความต้องการค่า ZTD ที่มีความถูกต้องและมีความล่าช้าน้อย จึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อประมาณค่า ZTD ในแบบทันที (Shi, Wang, et al. 2015) จากการศึกษาที่หน่วยงาน IGS ได้จัดตั้งโครงการ IGS-RTTP (IGS Real-Time Pilot Project) วัตถุประสงค์ก็เพื่อให้บริการข้อมูลค่าแกว่งโคจรและค่าแก่นาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงในแบบทันทีผ่านโครงข่ายเน็ตเวิร์ก (Network) ตามมาตรฐาน RTCM (Weber et al. 2005) ซึ่งมีหน่วยวิจัยในขณะนั้นเข้าร่วมมากกว่า 10 หน่วยวิจัยทั่วโลก โดยเริ่มให้บริการตั้งแต่ปี 2556 ด้วยการจัดตั้งโครงการวิจัยนี้ขึ้นทำให้เริ่มมีการศึกษาวิจัยประยุกต์ใช้ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงแบบทันทีต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน (Ahmed et al. 2014; Elsobeiey & Al-Harbi 2015; Wang & Zhao 2012; L. Zhang et al. 2018) จากงานศึกษาวิจัยของ Dousa and Vaclavovic

(2014) ได้ทำการประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP เพื่อใช้ในแบบจำลอง NWP สำหรับพยากรณ์อากาศระยะสั้นพบว่าค่าคลาดเคลื่อนการประมวลผลค่า ZTD แบบทันทีมีค่า RMSE อยู่ที่ระดับ 6-10 มม. แต่ยังมีค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่หลงเหลืออยู่ซึ่งมีขนาดมากกว่า 20 มม. เนื่องจากซอฟต์แวร์ยังขาดแบบจำลองที่ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนในสมการค่าสังเกต อีกทั้งซอฟต์แวร์ยังอยู่ในช่วงที่กำลังพัฒนา อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมมีความถูกต้องที่ดีและมีความน่าเชื่อถือสำหรับใช้ในแบบจำลอง NWP เพื่อการพยากรณ์อากาศระยะสั้น และหากย้อนหลังไปในช่วงที่โครงการ IGS-RTTPP เริ่มต้น ระหว่างนั้นได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC ขึ้นเพื่อทดสอบการรับส่งข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง, การเข้ารหัสข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธี PPP แบบจลน์ (Kinematic) ร่วมกับข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที (Weber et al. 2016) จากงานศึกษาวิจัยของ Ahmed et al. (2014) ทำเปรียบเทียบความถูกต้องของการประมวลผล PPP เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีระหว่างซอฟต์แวร์ BNC2.7, G-NUT/Tufnut และ PPP-Wizard ผลลัพธ์ค่า ZTD ที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลผลิตภัณฑ์ของ IGS และเครื่อง MWR (Microwave Radiometer) โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานของ NWP (<15 มม.) พบว่าค่า ZTD ที่ได้จากซอฟต์แวร์ G-NUT/Tufnut มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ซอฟต์แวร์ BNC2.7 และ PPP-Wizard เกินเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องด้วยซอฟต์แวร์ BNC ถูกพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้ง่าย ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดยังคงไม่ได้ถูกขจัดออกไปหรือใช้แบบจำลองที่มีความละเอียดไม่ดีพอ

ในงานศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความถูกต้องให้กับซอฟต์แวร์ BNC เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบ PPP ร่วมกับค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง CLK91 ของหน่วยวิจัย CNES โดยใช้ข้อมูล GNSS จากสถานีโครงข่ายของประเทศไทย เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประมาณค่า ZTD แบบทันทีและเพิ่มเปอร์เซ็นต์จำนวนข้อมูลผลลัพธ์ตามเกณฑ์มาตรฐาน การปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC ประกอบไปด้วย

- 1) ปรับแต่งค่า Tropospheric noise ให้เหมาะสมกับการสภาพการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีผลโดยตรงต่อการประมาณค่า ZTD
- 2) พัฒนาแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function
- 3) พัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแมกเนติก จากการศึกษาวิจัยของ Vey et al. (2002) การไม่ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแมกเนติก จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการประมาณค่า ZTD เพื่อให้มีความถูกต้องเพียงพอตามเกณฑ์ต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยา

ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์และประมวลผลข้อมูล GNSS แบบ PPP แสดงรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการประมวลผลค่า ZTD แบบทันทีและการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC

### 3.1 วิธีการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS แบบ PPP

การหาพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS ที่แม่นยำนั้นเกี่ยวข้องกับการวัดด้วยรหัส (Code) และการวัดด้วยเฟส (Phase) ของ 2 ความถี่หรือมากกว่า การวัดด้วยรหัสจะถูกบันทึกเป็นเมตรในขณะที่การวัดเฟสจะถูกบันทึกในหน่วยของจำนวนลูกคลื่น การวัดเฟสนั้นซับซ้อนกว่าเนื่องจากประกอบด้วยจำนวนเต็มและส่วนที่เป็นเศษส่วนของเฟส สมการการคำนวณการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS ระหว่างเครื่องรับและดาวเทียมสำหรับเครื่อง 2 ความถี่ สามารถแสดงได้ดังนี้ (Hofmann-Wellenhop et al. 2008; Xu 2007)

#### 3.1.1 สมการการคำนวณการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS

$$\Phi_1^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + d_{windup} + T^p - I^p + \frac{c}{f_1} N_1^p + \epsilon_{\phi_1}^p \quad (3.1)$$

$$\Phi_2^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + d_{windup} + T^p - \frac{f_1^2}{f_2^2} I^p + \frac{c}{f_2} N_2^p + \epsilon_{\phi_2}^p \quad (3.2)$$

$$P_1^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + T^p + I^p + \epsilon_{P_1}^p \quad (3.3)$$

$$P_2^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + T^p + \frac{f_1^2}{f_2^2} I^p + \epsilon_{P_2}^p \quad (3.4)$$

โดยที่

$P$  คือ การวัดระยะทางด้วยรหัส หน่วย เมตร

$\Phi$  คือ การวัดระยะทางด้วยเฟส หน่วย เมตร



ตัวยก  $p$  คือ หมายเลข PRN ของดวงเทียม

$f_1^p f_2^p$  คือ ความถี่ L1 และ L2

$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

$dt$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณ

$dt^p$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาของดาวเทียม

$\Phi_1^p \Phi_2^p$  คือ การวัดระยะทางด้วยเฟสของคลื่น L1 และ L2

$P_1^p P_2^p$  คือ การวัดระยะทางด้วยรหัสของคลื่น L1 และ L2

$\rho^p$  คือ ระยะทางจีโอมेटริกกระหว่างเคลื่อนรับสัญญาณกับดาวเทียม

$d_{ant}^p$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากงานรับสัญญาณของดาวเทียม (จุดศูนย์กลางเฟสและการแกว่งตัว)

$d_{rot}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการแกว่งตัวของขั้วโลก (Polar motion)

$d_{rel}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณภาคพื้นดิน เช่น ความเร็ว และแรงโน้มถ่วง (Relative)

$d_{otl}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทรที่กระทำต่อตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ

$d_{set}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นดินต่อตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างดาวดาว เช่น ดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ เป็นต้น

$d_{windup}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากทิศทางการวางตัวหรือหมุนของเสาส่งสัญญาณของดาวเทียมซึ่งมีผลต่อเฟสของคลื่น จากการปิดตัวของดาวเทียมเพื่อปรับแอมพลิจูดรับพลังงานแสงอาทิตย์

$T^p$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

$I^p$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

$N_1^p N_2^p$  คือ เลขจำนวนเต็มลูกคลื่นของเฟสของความถี่ L1 และ L2

$\epsilon_{\Phi_1}^p \epsilon_{\Phi_2}^p \epsilon_{P_1}^p \epsilon_{P_2}^p$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ เช่น คลื่นหลายวิถี, วงโคจรดาวเทียม, สัญญาณรบกวน, หรืออื่นๆ

### 3.1.2 สมการค่าสังเกต Ionosphere-Free linear combination (L3)

การประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูงสมการ Ionosphere-Free combination หรือ L3 ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างข้อมูลเฟสและรหัสของความถี่ L1 และ L2 ดังสมการ

$$\Phi_{IF}^p = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1^p - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2^p \quad (3.5)$$

$$P_{IF}^p = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1^p - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2^p \quad (3.6)$$

โดยที่  $\Phi_{IF}^p$  และ  $P_{IF}^p$  คือ Ionosphere-Free combination ของเฟสและรหัสของดาวเทียม  $p$  สามารถเขียนสมการที่ (3.5) และ (3.6) ใหม่ได้เป็น

$$\Phi_{IF}^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + T^p + d_{windup} + N_{IF}^{*p} + \varepsilon_{\phi 1 \phi 2}^p \quad (3.7)$$

$$P_{IF}^p = \rho^p + cdt - cdt^p + d_{ant}^p + d_{rot} + d_{rel} + d_{otl} + d_{set} + T^p + \varepsilon_{P1P2}^p \quad (3.8)$$

โดยที่  $N_{IF}^{*p} = \frac{c}{f_1^2 - f_2^2} (f_1 N_1^p - f_2 N_2^p)$  ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนทศนิยม

สมการค่าสังเกตในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความถูกต้องสูง โดยอาศัยทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์และเฟสของคลื่นส่งจากเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ (L1 และ L2) เพื่อขจัดค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบจำลองสมการค่าสังเกต Ionosphere-free combination ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการประมวลผลเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยการประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งถูกต้องระดับเซนติเมตรหรือเดซิเมตร จำเป็นจะต้องพิจารณาความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ (Kouba & Héroux 2001) ได้แก่ 1) ผลกระทบเนื่องจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ (Solid earth tides), 2) แรงแมทสมุท (Ocean tide loading), 3) การเคลื่อนที่ของแกนโลก (Polar motion), 4) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเฟส (Phase Center Offset, PCO) และความแปรปรวนของการเปลี่ยนตำแหน่งของเฟสของงานเครื่องรับสัญญาณภาคพื้นดินและดาวเทียม (Phase Center Variation, PCV) และ 5) ทิศทางการวางตัวหรือหมุนของเสาส่งสัญญาณของดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ (Phase windup) โดยการใช้ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูงจากหน่วยงาน IGS ทำให้สามารถขจัดเทอม  $dt^p$  ในสมการที่ (2.7) และ (2.8) ออกไปได้ จากการใช้แบบจำลองสมการค่าสังเกตข้างต้น เทอมค่าพิกัดเครื่องรับสัญญาณซึ่งแฝงอยู่ในเทอมของระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ, ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับสัญญาณ, ค่าเลขปริศนาของดาวเทียมแต่ละดวง และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ การแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรดังกล่าวจะใช้การประมาณค่าด้วยวิธี Extended Kalman Filter (EKF)

### 3.1.3 การประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศของโลกชั้นต่ำสุดและมีความสำคัญต่อมนุษย์ มีมวลประมาณ 75% ของชั้นบรรยากาศทั้งหมด มีระยะจากพื้นผิวโลกจนถึงความสูงประมาณ 7-17 กิโลเมตร มีค่ามากที่สุดบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรและลดลงเมื่อละติจูดสูงขึ้น ชั้นบรรยากาศโทรโพส

เพียร์ประกอบด้วย กลุ่มก๊าซแบบแห้ง (Dry or hydrostatic), กลุ่มก๊าซแบบชื้น (Wet or non-hydrostatic) หรือไอน้ำ และฝุ่นละออง กลุ่มก๊าซแบบแห้งในบรรยากาศประกอบไปด้วย ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) และก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) รวมกันมีปริมาณร้อยละ 99 โดยปริมาตรของอากาศแห้ง และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 1 กลุ่มก๊าซแบบชื้นหรือไอน้ำในบรรยากาศเป็นส่วนประกอบของบรรยากาศที่สำคัญเกิดจากการระเหยของน้ำบนพื้นโลกมีส่วนในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ต่างๆ ของผิวโลก ไอน้ำในบรรยากาศเป็นตัวแปรสำคัญของการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น ฝน, เมฆหมอก และหิมะ เป็นต้น นอกจากนี้ไอน้ำยังทำหน้าที่ดูดซับความร้อน ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้น เมื่อคลื่นสัญญาณไมโครเวฟจากระบบดาวเทียม GNSS เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ คลื่นสัญญาณจะถูกหักเหผลทำให้ระยะทางที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณมีความยาวมากขึ้น ปริมาณความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับเส้นทางและชนิดของก๊าซที่คลื่นเดินทางผ่าน ซึ่งผลกระทบหลักมาจากอากาศแห้งประมาณ 90% และจากไอน้ำในบรรยากาศประมาณ 10% คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเหนือเครื่องรับสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากอากาศแห้งและจากไอน้ำในบรรยากาศมีค่าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและความหนาของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ซึ่งมีประมาณ 2.0-2.3 จากอากาศแห้งและ 1-40 มิลลิเมตรจากไอน้ำ (Andrei & Ruizhi 2007) ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรและลดลงเมื่อละติจูดสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางที่คลื่นเดินทางผ่าน SPD (Slant Tropospheric Path Delay) ที่มุมสูงของดาวเทียมใดๆ สามารถนิยามในรูปแบบของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบแห้ง หรือ ZHD และค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบชื้น หรือ ZWD และ Mapping Function ของแต่ละส่วนเพื่อแปลงค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งให้อยู่ในทิศทางเอียง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.9) จาก Davis et al. (1985)

$$SPD = mf_h(E) \cdot ZHD + mf_w(E) \cdot ZWD \quad (3.9)$$

เมื่อ  $mf_h$  และ  $mf_w$  คือ Mapping function สำหรับอากาศแห้งและอากาศชื้น สามารถประมาณค่าได้จากแบบจำลอง GPT3, E คือมุมสูงของดาวเทียม (Elevation angle)

โดยทั่วไปการคำนวณหาค่า ZHD สามารถประมาณค่าได้อย่างถูกต้องในระดับมิลลิเมตรร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ในขณะที่ค่า ZWD ยากที่จะประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลา จึงถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ (Oliveira et al. 2016) มีหลากหลายงานวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นเพื่อประมาณค่า ZHD จากงานศึกษาวิจัยของ Chen and Liu (2016) ได้ทำการทดสอบแบบจำลอง ZHD จำนวน 9 แบบจำลอง พบว่าสำหรับการประมวลผลแบบทันทีเมื่อต้อง

คำนึงถึงทรัพยากรที่ต้องใช้เพื่อการประมวลผลและความซับซ้อน แบบจำลองของ Saastamoinen (1972b) และถูกปรับแก้โดย Davis et al. (1985) มีความถูกต้องที่สูงโดยคำนวณร่วมกับความดันอากาศ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี แบบจำลองนี้ถูกใช้งานในงานวิจัยนี้ ดังสมการที่ (3.10)

$$ZHD = \frac{2.2778 \cdot p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.0028 \cdot H)} \quad (3.10)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันอากาศพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี หน่วยเฮกโตปาสกาล (hPa),  $\varphi$  คือ ค่าพิกัดละติจูด หน่วยเรเดียน,  $H$  คือ ความสูงออร์โทเมตริก (กิโลเมตร)

### 3.1.4 Mapping Function

ค่า Mapping Function เป็นค่าคงที่เพื่อแปลงค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งให้อยู่ในทิศทางเอียงตามมุมสูงของดาวเทียม ซึ่งที่สามารถประมาณค่าได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ มีหลายแบบจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลากว่า 2 ทศวรรษ (Boehm 2004; Böhm et al. 2006; Niell 2000; Yao et al. 2014; Yao et al. 2013) เพื่อแปลงค่าคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางดิ่งไปยังมุมสูงใดๆ ของดาวเทียม ในงานศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นล่าสุดคือ GPT3 และ VMF3 (Vienna Mapping Function version 3) (Landskron & Bohm 2018) เพื่อประมาณค่า Mapping Function และข้อมูลตัวแปรสภาพภูมิอากาศ ทั้งนี้แบบจำลอง GPT3 ถูกพัฒนาขึ้นมาแทน GPT2w (Böhm et al. 2014) โดยเพิ่มเติมข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Mean Temperature) และแฟกเตอร์การลดลงของไอน้ำ (water vapor decrease factor) รวมทั้งยังจัดเตรียมข้อมูลอุณหภูมิ, ความดันบรรยากาศ, อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature lapse rate), ความกดอากาศของไอน้ำ (Water vapor pressure), แฟกเตอร์การลดลงของไอน้ำ (water vapor decrease factor) ทุกที่บนโลกที่ขนาดกริด  $1^\circ \times 1^\circ$  นอกจากนี้แบบจำลอง GPT3 ยังจัดเตรียมข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์  $a_w$  และ  $a_h$  (Hydrostatic and wet mapping function coefficients) และแบบจำลอง VMF3 สำหรับการคำนวณ  $b_w$ ,  $c_w$ ,  $b_h$  และ  $c_h$  เพื่อคำนวณค่า  $mf_h$  และ  $mf_w$  สำหรับอากาศแห้งและอากาศชื้น ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$mf_h(E) = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\sin E + \frac{a_h}{\sin E + \frac{b_h}{\sin E + c_h}}} \quad (3.11)$$

และ

$$mf_w(E) = \frac{1 + \frac{aw}{1 + \frac{bw}{1 + cw}}}{\sin E + \frac{bw}{\sin E + cw}} \quad (3.12)$$

แบบจำลอง GPT3 และ VMF3 ที่ถูกพัฒนาด้วยภาษาแมตแล็บ (Matlab) และฟอร์แทน (Fortan) รวมทั้งข้อมูลสัมประสิทธิ์ (coefficient) สำหรับประกอบการคำนวณ สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://vmf.geo.tuwien.ac.at/>

### 3.1.5 ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร (Ocean tide loading)

ขนาดของความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเนื่องมาจากแรงมหาสมุทรสามารถมีขนาดได้ถึง  $\pm 20$  มม. จากการศึกษาของ Dragert et al. (2000) ผลกระทบของแรงมหาสมุทรมีผลต่อการประมวลผลข้อมูล GPS เมื่อต้องการประมาณค่า ZTD (นอกเสียจากสถานีอยู่ห่างจากชายฝั่ง  $> 1,000$  กม.) จึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนนี้ การพัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนนี้เป็นไปตามวิธีคำนวณล่าสุดจาก IERS 2010 (Petit & Luzum 2010) การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทรซึ่งถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ ประกอบไป 11 คลื่น ประกอบไปด้วย

- 1) คลื่นส่วนย่อยของวัน (semidiurnal) ได้แก่  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ , และ  $K_2$
- 2) คลื่นช่วงวัน (diurnal) ได้แก่  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ , และ  $Q_1$
- 3) คลื่น long-period ได้แก่  $M_f$ ,  $M_m$ , และ  $S_{sa}$

$$\Delta C = \sum_{k=1}^{11} A_{ck} \cos(\chi_k(t) - \Phi_{ck}) \quad (3.13)$$

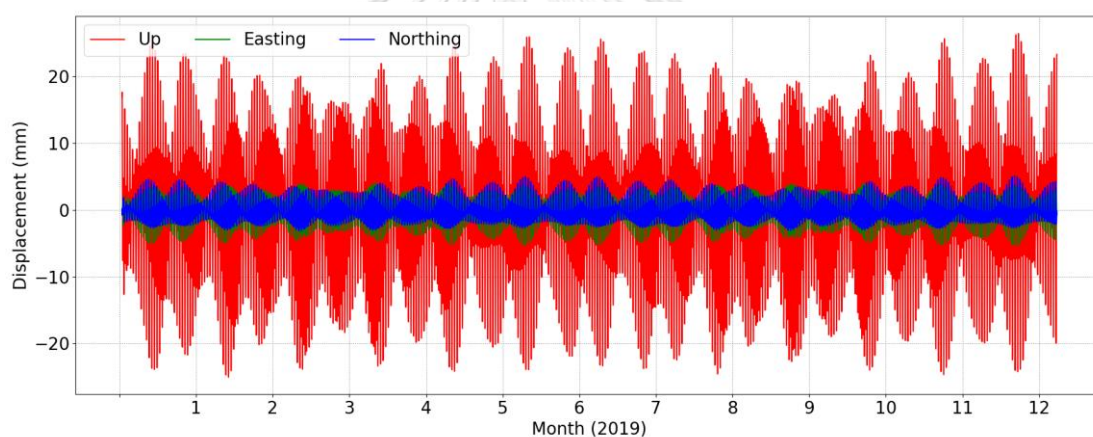
เมื่อ  $\Delta C$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทรในทิศทางตะวันตก, ใต้และรัศมีของโลก ณ เวลา  $t$ ,  $A_{ck}$  คือ แอมพลิจูด (amplitude),  $\Phi_{ck}$  เฟส (phase) ของแต่ละลูกคลื่น, และ  $\chi_k(t)$  คือ อาร์กิวเมนต์ทางดาราศาสตร์ (astronomical argument) ของ 11 คลื่น สามารถคำนวณได้จากฟอร์แทนสคริปต์ ARG2.f ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ของ IERS (<ftp://tai.bipm.org/iers/conv2010/chapter7/>)

การประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร ประกอบไปด้วย 11 คลื่น ทั้งนี้การพัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนนี้เป็นไปตามวิธีคำนวณล่าสุด โค้ดโปรแกรมถูกพัฒนาในรูปแบบภาษาซี โดยค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งประกอบไปด้วยค่าแอมพลิจูดและค่าเฟสของทั้ง 11 คลื่นเพื่อใช้ประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทรที่กระทบต่อตำแหน่งที่ตั้งสถานี GNSS ณ ตำแหน่งต่างๆ ในรูปแบบฟอร์แมต BLQ ในขั้นตอนการประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์จะต้องจัดเตรียมไว้ให้ครบ

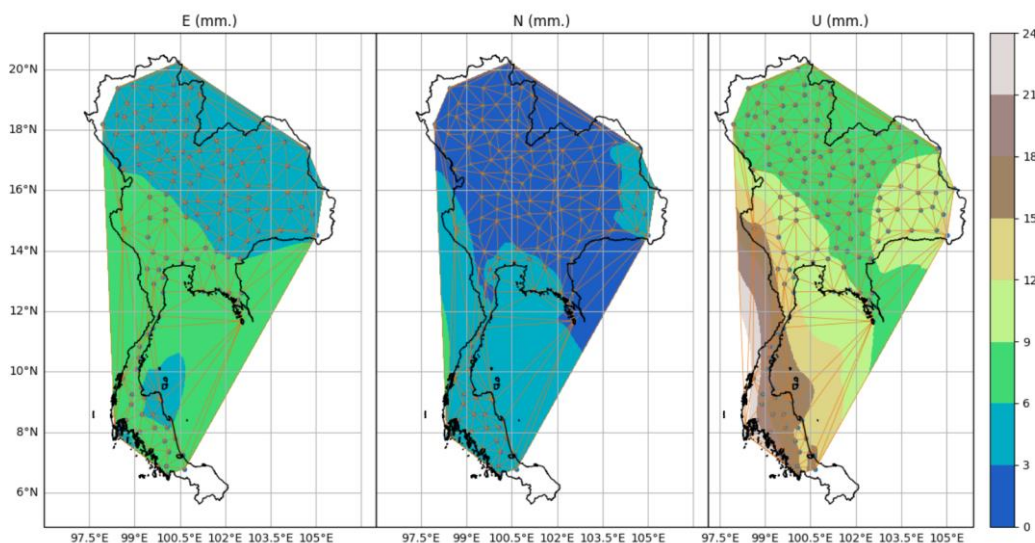
ทุกสถานี GNSS หรือทุกๆ ตำแหน่งที่ต้องการประมาณค่าคลาดเคลื่อน จากรูปที่ 3-2 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทรในทิศทางราบและดิ่ง ในพื้นที่ภาคใต้แถบชายฝั่งตะวันตก มีค่าอยู่ระหว่าง 3-24 มิลลิเมตร ในช่วงระยะเวลา 1 ปี เกิดขึ้นมากสุดในทิศทางดิ่งช่วงเดือนมกราคม, มิถุนายน, และ ธันวาคม รูปที่ 3-3 แสดงแผนที่ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทรที่ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ประเทศไทย และจากตารางที่ 3-1 พบว่าค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 24 มม. บริเวณพื้นที่ภาคใต้แถบชายฝั่งด้านตะวันตก

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมากที่สุดในรอบช่วงเวลา 1 ปี ในทิศทางตะวันออก (E), เหนือ (N) และทางดิ่ง (U) ที่เกิดจากแรงมหาสมุทรในพื้นที่ประเทศไทย

ค่าคลาดเคลื่อน (มม.)	ตะวันออก	เหนือ	ทางดิ่ง
ขนาดของค่าคลาดเคลื่อน	3 - 9	0 - 6	6 - 24



รูปที่ 3-2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงมหาสมุทรในทิศทางราบและดิ่ง ในช่วงเวลา 1 ปี บริเวณจังหวัดภูเก็ต

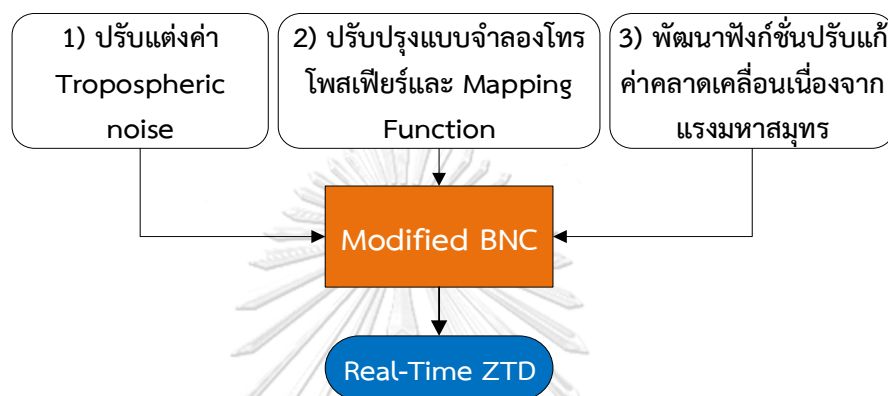


รูปที่ 3-3 ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่เกิดจากแรงแมกเนติก ในทิศทางเหนือ, ใต้ และทางตั้งที่ส่งผลกระทบต่อ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ประเทศไทย

### 3.2 ปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดียว ความละเอียดสูง

ซอฟต์แวร์ BNC เวอร์ชัน 2.12.12 ถูกพัฒนาโดย [Weber et al. \(2016\)](#) เป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open Source Software) ถูกพัฒนาเพื่อส่งเสริมการใช้งานมาตรฐาน RTCM เพื่อส่งผ่านข้อมูลทางโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งสามารถทำให้ใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูล GNSS แบบผลจุดเดียวความละเอียดสูงได้ในทันที คุณสมบัติของซอฟต์แวร์ BNC นอกจากสามารถประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดียวความละเอียดสูงพร้อมกันหลายสถานีแล้ว ยังสามารถรับข้อมูลและส่งข้อมูลค่าแก้วงโคจรและนาฬิกาดาวเทียม, แปลงฟอร์แมตข้อมูล RINEX และตรวจสอบคุณภาพของไฟล์ RINEX เป็นต้น ทั้งนี้ซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้โดยง่าย ไม่ซับซ้อน โดยค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดไม่ได้ถูกพิจารณาปรับแก้ในแบบจำลองสมการค่าสังเกต เช่น ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแมกเนติก, การเคลื่อนที่ของแกนโลก, ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ PCO (Phase Center Offset) และค่าการแก้วงตัวของจุดศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ PCV รวมทั้งแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ถูกใช้ในซอฟต์แวร์ ซึ่งประเด็นเหล่านี้มีผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่งและค่า ZTD ที่ได้รับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลหาค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และการประมาณค่า PWV ในการศึกษาวิจัยนี้ จะพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC เพิ่มเติมจากซอร์สโค้ดเดิมด้วยการพัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ประกอบไปด้วย

- 1) ปรับแต่งค่า Tropospheric noise
- 2) ปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ประยุกต์ใช้แบบจำลอง GPT3 ร่วมกับแบบจำลอง VMF3 เพื่อประมาณค่า Mapping Function สำหรับอากาศแห้งและชื้น
- 3) พัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร (Ocean tide loading)



รูปที่ 3-4 แสดงการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC เพื่อการประมาณค่า ZTD แบบทันที

### 3.2.1 ปรับแก้ค่า Tropospheric Noise

ในกระบวนการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดียวความละเอียดสูงแบบจลน์เพื่อประมาณค่าตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการค่าสังเกตจะใช้เทคนิคการคำนวณแบบ EKF หนึ่งในกระบวนการประมาณค่าความแปรปรวน (Variance) ของตัวแปรไม่ทราบค่า ในขั้นตอนของการคาดการณ์ล่วงหน้า (Predicted state) ต้องระบุขนาดของ Processing noise ของตัวแปรไม่ทราบค่า ซึ่งในที่นี้คือค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน จำเป็นทำการทดลองเพื่อให้ค่าที่เหมาะสมกับประมวลผลนั้นๆ สำหรับการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบทันที ซอฟต์แวร์ BNC ตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่  $3e-6$  หรือประมาณ  $3600 * 3e-6 = 3.6$  มิลลิเมตร/ชั่วโมง ในการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมจะทำการทดสอบที่ค่า  $3e-6$ ,  $5e-6$ ,  $10e-6$ ,  $15e-6$ , และ  $20e-6$  เพื่อค่า Tropospheric Noise ที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



Station	Sigma N	Sigma E	Sigma H	Noise N	Noise E	Noise H	Tropo Sigma	Tropo Noise	NMEA
1 CUUT	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.1	10e-6	0

รูปที่ 3-5 แสดงการกำหนดค่า Tropospheric noise

### 3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function

ในซอฟต์แวร์ BNC การประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในทิศทางที่คลื่นเดินทางผ่าน จะถูกคำนวณได้จากค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเหนือเครื่องรับสัญญาณ ZTD คูณด้วย Mapping Function ทั้งนี้แบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน ดังสมการที่ (3.14)

$$SPD = ZTD \cdot \frac{1}{\cos(Z)} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $Z$  คือ มุม Zenith angle หน่วยเรเดียน

จากการทดสอบประมวลผลด้วยสมการที่ (2.25) จากงานวิจัยของ Yuan et al. (2014) มีความละเอียดไม่เพียงพอสำหรับการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาปรับปรุงโค้ด (Source Code) ของซอฟต์แวร์ BNC ตามสมการที่ (3.9) โดยให้ ZWD เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในระบบสมการ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ Mapping Function สำหรับอากาศแห้งและอากาศชื้น สามารถคำนวณได้จากแบบจำลอง GPT3 และ VMF3

ซอฟต์แวร์ BNC เวอร์ชันดั้งเดิมได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function ดังสมการที่ 2.25 อย่างไรก็ตาม หลายงานวิจัยได้นำเสนอและพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์หลากหลายแบบจำลอง โดยการแยกค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ออกเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศแห้ง (เช่น ไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน) และค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศชื้นซึ่งเกิดจากไอน้ำในบรรยากาศ ซึ่งจากการศึกษาของ Chen and Liu (2016) ได้ทำการทดสอบแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จำนวน 9 แบบจำลอง พบว่าในการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงแบบทันที แบบจำลองของ Saastamoinen (1972a) มีความเหมาะสมเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศแห้ง สำหรับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศชื้นในขั้นตอนการประมวลผลกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในระบบสมการ การประมาณค่า Mapping Function สำหรับอากาศแห้งและอากาศ

ขึ้น เพื่อแปลงค่าคลาดเคลื่อนในทิศทางตั้งเป็นแนวเอียง แบบจำลอง GPT3 ถูกนำประยุกต์ใช้สำหรับ ประมาณค่า ah และ aw และแบบจำลอง VMF3 สำหรับประมาณค่า bh, ch, bw และ cw ทั้งนี้ทั้ง 2 แบบจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาแมตแล็บและฟอร์แทน เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าว โค้ดโปรแกรมจะถูกปรับให้อยู่ในรูปแบบภาษาซี สามารถดาวน์โหลดโค้ดโปรแกรมแบบจำลอง GPT3 และ VMF3 ได้ที่ <https://vmf.geo.tuwien.ac.at/codes/>

### 3.2.3 การพัฒนาฟังก์ชันปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร

การพัฒนาฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนนี้เป็นไปตามวิธีคำนวณล่าสุดจาก IERS 2010 ตามสมการที่ (3.13) ร่วมกันค่าสัมประสิทธิ์ที่จัดเตรียมไว้ (ในบทที่ 3)

### 3.3 ประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ BNC และการตั้งค่า

ซอฟต์แวร์ BNC ออกแบบให้รองรับการประมวลผลผ่านทาง GUI (Graphic user interface) และทาง command-line เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมวลผล ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้พัฒนา ฟังก์ชันขึ้นเพิ่มเติมเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ประกอบไปด้วยค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรง มหาสมุทรและค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีรายละเอียดที่ไว้ข้างต้น ทั้งนี้เพื่อความ สะดวกในการประมวลผลข้อมูลจำนวนหลายสถานีและหลายวัน คำสั่งในการประมวลจะใช้ภาษาไพ ทอนเพื่อควบคุมการประมวลผลและกำหนดค่าสำหรับการประมวลผล รายละเอียดการกำหนดค่าใน การประมวลผลแสดงดังตารางที่ 3-2 และสำหรับโค้ดโปรแกรมเพื่อควบคุมการประมวลผลแสดง รายละเอียดดังภาคผนวก ก

```
*SITE PT SOLN T STA_X STA_Y STA_Z SYSTEM REMARK
CHAN A P -1305191.120 6086920.583 1383367.989 ITRF14
-TROP/COORDINATES

+TROP/DESCRIPTION
*KEYWORD VALUE(S)
SAMPLING INTERVAL 1
SAMPLING TROP 1
ELEVATION CUTOFF ANGLE 7
TROP MAPPING FUNCTION Saastamoinen
SOLUTION_FIELDS_1 TROTOT STDEV
-TROP/DESCRIPTION

+TROP/SOLUTION
*SITE EPOCH TROTOT STDEV
CHAN 19:013:45630 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45631 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45632 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45633 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45634 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45635 2596.2 2.8
CHAN 19:013:45636 2596.3 2.8
CHAN 19:013:45637 2596.3 2.8
CHAN 19:013:45638 2596.3 2.8
CHAN 19:013:45639 2596.3 2.8
CHAN 19:013:45640 2596.3 2.8
CHAN 19:013:45641 2596.4 2.8
CHAN 19:013:45642 2596.4 2.8
```

รูปที่ 3-6 แสดงผลลัพธ์ค่า ZTD แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง

ตารางที่ 3-2 แสดงการตั้งซอฟต์แวร์ BNC ที่ใช้ในการประมวลผล

การตั้งค่า	รายละเอียด
Update cycle	Real-time
Output interval	1 second
GNSS data	GPS + GLONASS
Strategy	PPP
A Priori ZHD model	Saastamoinen*
Mapping Function from VMF3	mfh* and mfw*
Receiver and satellite PCO correction	Yes
Receiver and satellite PCV correction	No
Solid earth tide	Yes
Ocean tide loading	Yes*
Orbit/Clock correction format	RTCM-SSR
Broadcast ephemeris format	RTCM-SSR
Ambiguity resolution	Float
Tropospheric noise	$10e^{-6} \approx 0.036$ m/hr

\* ฟังก์ชันที่พัฒนาเพิ่มเติมในงานศึกษาวิจัยนี้

### 3.4 ผลลัพธ์การศึกษาวิจัยเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันที

#### 3.4.1 ผลการประมวลผลเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยซอฟต์แวร์ Modified BNC

ในงานศึกษาวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ BNC ถูกใช้งานเพื่อประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงร่วมกับค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีจากหน่วยงาน CNES (CLK91) ซึ่งซอฟต์แวร์ BNC ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีจากหลายหน่วยวิจัยในระดับสากล ให้ใช้งานโดยง่ายและใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประมวลผลของซอฟต์แวร์ ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดที่ยังไม่ได้ขจัดออกจากสมการค่าสังเกตจำเป็นต้องถูกพัฒนาเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านั้น เช่น ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร, แบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, และการปรับค่าพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการประมวลผล การปรับปรุงข้างต้นมีผลต่อการประมาณค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่ง และการประมาณค่า ZTD แบบทันทีซึ่งจะถูกแปลงให้เป็นค่า PWV ต่อไป

เพื่อประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ของทั้ง 11 สถานี จำนวน 30 วัน ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลแบบทุกๆ 15 วินาที จะถูกส่งไปยังหน่วยงาน CSRS ที่ให้บริการประมวลผลข้อมูลออนไลน์แบบ PPP แบบสถิติพร้อมกับข้อมูลค่าวงโคจรและนาฬิกาความละเอียดสูงแบบ Final ซึ่งมีความถูกต้องในการประมวลผลอยู่ในระดับมิลลิเมตร (Mendez Astudillo et al. 2018; Ocalan et al. 2013) ผลลัพธ์ค่า ZTD ที่ได้จากบริการของ CSRS หรือเรียกว่า CSRS-ZTD ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อประเมินความถูกต้องของค่า ZTD ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลแบบ PPP แบบทันทีหรือเรียกว่า PPP-ZTD เนื่องจากข้อมูล PPP-ZTD ถูกประมวลผลทุกๆ 1 วินาที ในขณะที่ข้อมูลอ้างอิง CSRS-ZTD ถูกประมวลผลทุกๆ 15 วินาที ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลข้อมูลที่เวลาตรงกันเท่านั้นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ในการเปรียบเทียบค่าต่าง ZTD อ้างอิงงานศึกษาวิจัยของ Yuan et al. (2014) ค่าคลาดเคลื่อน 20 มิลลิเมตรใน ZTD จะส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนใน PWV ประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ถ้าข้อมูล PWV ถูกใช้ในการพยากรณ์อากาศระยะสั้น (De Haan 2006) ดังนั้นเกณฑ์ความถูกต้อง 20 มิลลิเมตรนี้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบผลของการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC และความถูกต้องของค่า ZTD แบบทันทีผลการศึกษาวิจัยแสดงด้วยค่าสถิติของค่าต่าง ZTD ประกอบไปด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) ,รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE), และเปอร์เซ็นต์ค่าต่าง ZTD < 20 มิลลิเมตร พบว่าผลการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC แสดงดังตารางที่ 3-3 สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3-3 แสดงค่าทางสถิติของค่าต่างของค่า ZTD ของการพัฒนาฟังก์ชันต่างๆ ในซอฟต์แวร์ BNC ระหว่าง PPP-ZTD กับค่าอ้างอิงจาก CSRS-ZTD

สถานี	ค่าเฉลี่ย (มม.)			RMSE (มม.)			% < 20 มม.								
	Org <sup>a</sup>	Ocean <sup>b</sup>	Trop N <sup>c</sup>	MF <sup>d</sup>	All <sup>e</sup>	Org	Ocean	Trop N	MF	All					
CHAN	0.8	7.2	0.6	-0.5	-1	14.1	14	11.7	12.3	10.4	85	85	92	89	96
CHMA	7.1	4.7	6.2	-1.3	-1.7	15.3	15.2	14.6	14.2	14.4	81	81	84	85	86
DPT9	4.7	3.5	4	-3.8	-3.7	12.3	12.3	11.3	12.4	11.2	90	90	93	90	92
NKRM	3.5	4.8	3.4	-1.9	-2	14.5	14.6	14.5	14.4	14.2	84	84	84	84	84
NKSW	4.8	2.4	4.8	-4	-3.7	14.1	13.8	13.8	14.1	14	86	87	87	84	86
PJRK	2.4	7.2	2.3	-1	-1.4	16.4	16.4	15.2	14.9	14.1	78	77	82	83	85
SISK	7	5.3	6.2	-1.5	-1.2	13.1	13.3	13.2	12.2	12.3	89	88	88	90	91
SOKA	5.1	8.7	5.2	0	-0.9	15.7	15.7	14.8	13	11.8	81	81	82	89	92
SRTN	8.7	10.2	8.1	2.2	1.8	18.2	18.1	17.1	15.2	14.1	73	73	75	83	85
UDON	10.2	2.9	10	-3.9	-3.7	12	11.8	11.8	12	11.5	90	90	91	91	93
UTTD	3.2	6.4	3.3	-0.7	-0.4	12.3	12.3	12	10.4	9.9	90	90	91	95	95
เฉลี่ย	5.2	5.8	4.9	-1.5	-1.6	14.4	14.3	13.6	13.2	12.5	84	84	86	88	90

<sup>a</sup> ซอฟต์แวร์ BNC เวอร์ชันก่อนการพัฒนา

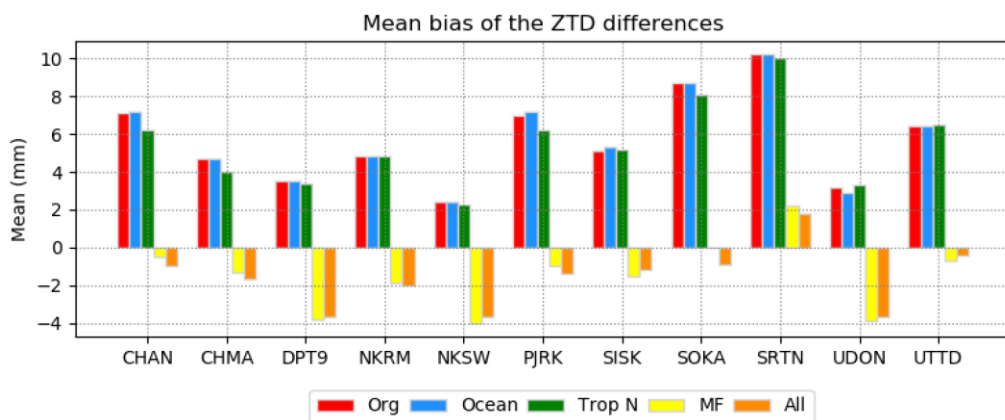
<sup>b</sup> ซอฟต์แวร์ BNC เพิ่มฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร

<sup>c</sup> ซอฟต์แวร์ BNC การปรับแก้ค่า Tropospheric Noise ( $3,600 \times 10e-6 \approx 36$  มิลลิเมตร/ชั่วโมง)

<sup>d</sup> ซอฟต์แวร์ BNC ปรับปรุงรูปแบบจำลองเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function ซึ่งเกิดจากอากาศแห้งและอากาศชื้น

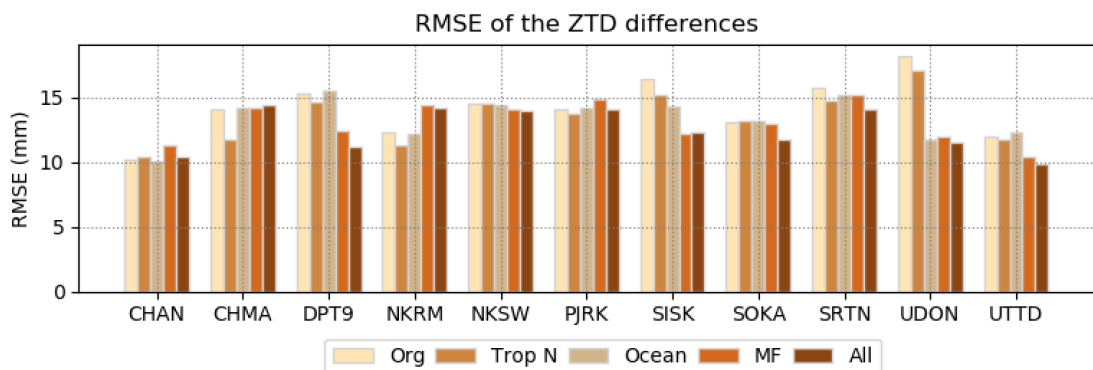
<sup>e</sup> ซอฟต์แวร์ BNC รวมการปรับทุก Trope N<sup>b</sup>, Ocean<sup>c</sup> และ M

- 1) ค่าเฉลี่ยของค่าต่าง ZTD เฉลี่ยรวมทุกสถานีก่อนปรับปรุงซอฟต์แวร์ (แทนด้วย Org), ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นมหาสมุทร (แทนด้วย Ocean), ปรับค่าสัญญาณรบกวนของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric noise หรือแทนด้วย Trop N), ปรับแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (แทนด้วย MF), และรวมทุกการปรับปรุง (แทนด้วย All) ค่าเฉลี่ยรวมทุกสถานีมีค่า 5.2, 5.8, 4.9, -1.5 และ -1.6 มม. ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าหลังการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC รวมทุกการปรับปรุงสามารถช่วยลดค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน (Mean bias) ลงได้  $|5.2| - |-1.6| = 3.6$  มม.



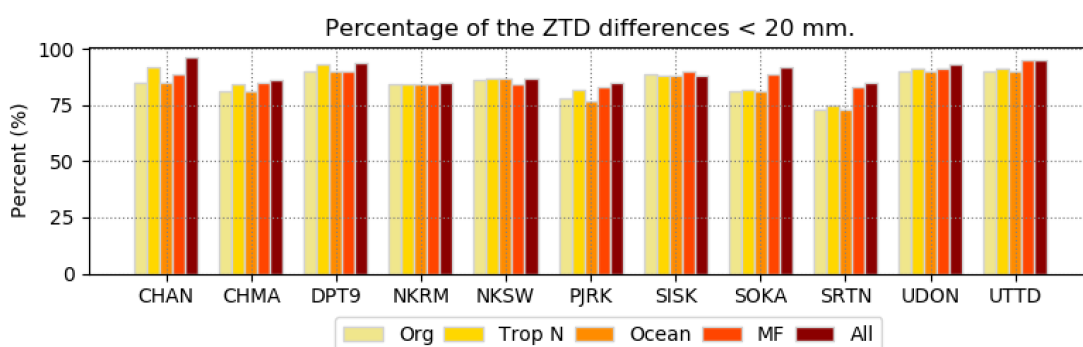
รูปที่ 3-7 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าต่าง ZTD ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC

- 2) ค่า RMSE ของค่าต่าง ZTD เฉลี่ยรวมทุกสถานีก่อนปรับปรุงซอฟต์แวร์, ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นมหาสมุทร, หลังปรับค่าสัญญาณรบกวนของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, ปรับแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, และรวมทุกการปรับปรุง เฉลี่ยรวมทุกสถานีมีค่า 14.4, 14.3, 13.6, 13.2, และ 12.5 มม. ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าหลังการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC รวมทุกการปรับปรุงสามารถช่วยลดค่าการกระจายตัวของข้อมูลลงได้จาก  $14.4 - 12.5 = 1.9$  มม.



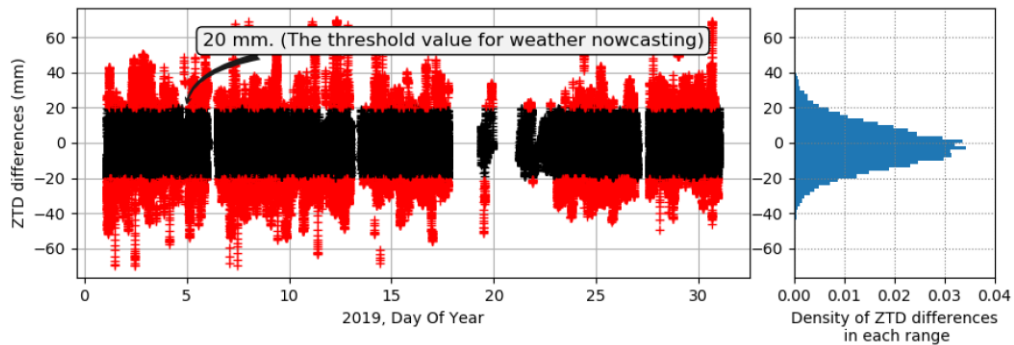
รูปที่ 3-8 แสดงค่า RMSE ของค่าต่าง ZTD ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC

- 3) เพอร์เซ็นต์ค่าต่าง ZTD ที่ < 20 มม. เฉลี่ยรวมทุกสถานี ก่อนปรับปรุงซอฟต์แวร์, ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นมหาสมุทร, หลังปรับค่าสัญญาณรบกวนของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, ปรับแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, และรวมทุกการปรับปรุง เฉลี่ยรวมทุกสถานีมีค่า 84, 86, 84, 88, และ 90 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าหลังการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC รวมทุกการปรับปรุงสามารถช่วยเพิ่มจำนวนเปอร์เซ็นต์ข้อมูลค่าต่าง ZTD ที่ < 20 มม. จาก 84% เป็น 90% เพิ่มขึ้นประมาณ 6% ของข้อมูลผลลัพธ์ทั้งหมด

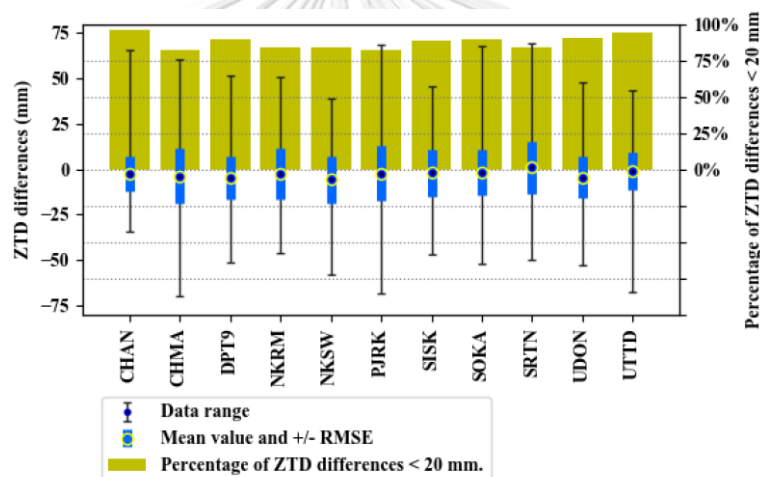


รูปที่ 3-9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าต่าง ZTD ที่น้อยกว่า 20 มม. ของแต่ละสถานีแยกตามการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC

ผลลัพธ์ของการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC แสดงให้เห็นว่าค่าต่าง ZTD ที่มีค่าน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร คิดเป็น 90% ของจำนวนข้อมูลที่ประมวลผลทั้งหมด และที่เหลืออีก 10% มีค่าต่างมากกว่า 20 มิลลิเมตร จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ายังมีข้อมูลประมาณ 10% ที่จำเป็นจะต้องเพิ่มความถูกต้องให้สูงขึ้น สำหรับค่าเฉลี่ยของค่าต่าง ZTD ทุกสถานีมีค่า < 15 มิลลิเมตร ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในงานแบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงเลข (De Haan 2006) จากรูปที่ 3-10 แสดงค่าต่าง ZTD ของทุกสถานี และฮีสโตแกรมของการกระจายตัวของค่าต่าง ZTD ในแต่ละช่วงมีรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ และรูปที่ 3-11 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์, ค่าเฉลี่ย, และการกระจายตัวของค่าต่าง ZTD รายสถานี



รูปที่ 3-10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าต่าง ZTD แบบทันทีรวมทุกสถานีที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC ที่ถูกปรับปรุงประสิทธิภาพเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ผลลัพธ์ที่มีค่าต่างน้อยกว่า 20 มม. (แสดงด้วยจุดสีดำ) และทางด้านซ้ายแสดงฮิสโตแกรมของการกระจายตัวของค่าต่าง ZTD ในแต่ละช่วง



รูปที่ 3-11 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย, RMSE, และค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าต่าง < 20 มม. ของค่า ZTD ระหว่าง PPP-ZTD กับค่าอ้างอิงจาก CSRS-ZTD

#### 3.4.2 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ก่อนและหลังการปรับปรุง

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ BNC หลังจากที่ได้พัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับก่อนได้รับการปรับปรุงมีความแตกต่างกันหรือไม่ ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 30 วัน ซึ่งมีความถี่ในการประมวลผล 1 วินาที จำนวน 11 สถานี โดยเลือกเฉพาะข้อมูลที่มีค่าต่าง ZTD < 20 มม. (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง) เนื่องจากในการทดลองนี้ได้เลือกสถานีจำนวน GNSS 11 สถานี เพื่อทดสอบประมวลผล จึงไม่ทราบความแปรปรวนของประชากรทั้งหมดจึงเลือกสถิติ t-test ในการทดสอบ จากสูตรของ (Welch 1947)



$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}}, \quad df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง,  $n_1, n_2$  คือจำนวนข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง และ  $s_1^2, s_2^2$  คือ ความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง

### สมมติฐาน

$H_0$ : ประสิทธิภาพการประมวลผลเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีไม่มีความแตกต่างกัน

$$\mu_1 = \mu_2$$

$H_1$ : ประสิทธิภาพการประมวลผลเพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีมีความแตกต่างกัน

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

กำหนดระดับนัยสำคัญ = 0.05 แต่เนื่องจากการกำหนดการทดสอบสมมติฐานแบบสองทางดังนั้นต้องใช้ระดับนัยสำคัญ = 0.025 และเปิดตารางช่วงค่าวิกฤติสำหรับทดสอบคือ  $t_{(ตาราง)}=1.96$

ผลการคำนวณได้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน (กำลังสองของค่า RMSE) ของค่า ZTD แบบทันทีที่ได้จากซอฟต์แวร์ก่อนการพัฒนาเป็น 5.2, 14.4<sup>2</sup> มม. และหลังการพัฒนาเป็น -1.6, 12.5<sup>2</sup> มม. (ดังตารางที่ 3-3)  $n_1$  และ  $n_2$  มีค่าเท่ากับจำนวนข้อมูล epoch ที่ประมวลผล ผลการคำนวณค่า  $t_{(คำนวณ)} = 148.1358$

### สรุปตัดสินใจ

สรุปได้ว่าเนื่องจาก  $t_{(คำนวณ)} = 148.1358 > t_{(ตาราง)}=1.96$  ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  ยอมรับ  $H_1$  นั่นคือประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ BNC หลังการพัฒนาสามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า ZTD แบบทันทีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

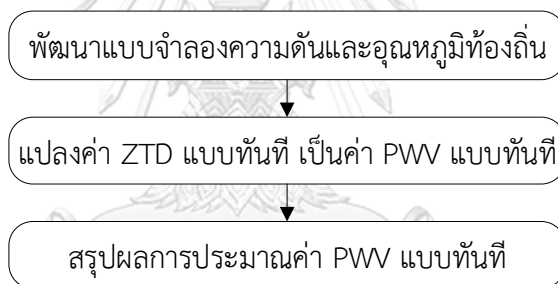
## บทที่ 4

### การประมาณค่า PWV แบบทันที

ข้อมูล ZTD แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะถูกแปลงให้เป็นค่า PWV แบบทันทีหรือเรียกว่า PPP-PWV แบบทันที ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ค่า PWV (Bennitt & Jupp 2012) แสดงให้เห็นว่าช่วยในการพยากรณ์อากาศมีความถูกต้องมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อประยุกต์ใช้ค่า PWV แบบจำลอง NWP ในอดีตจะใช้การประมวลผลแบบภายหลังซึ่งให้ค่าผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องสูงและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่จะประยุกต์ใช้ในแบบจำลอง NWP แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประมวลผลข้อมูลภายหลัง ทำให้ได้ข้อมูลล่าช้าเป็นหลายชั่วโมงหรือเป็นวัน ปัจจุบันระบบพยากรณ์อากาศสมัยใหม่มีต้องการของค่า PWV ที่รวดเร็วขึ้น มีความล่าช้าของข้อมูลที่ต่ำ และจำนวนสถานีที่ครอบคลุมพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อการพยากรณ์ระยะสั้น (Dousa & Vaclavovic 2014; Gendt et al. 2004) การประมวลผลเพื่อให้ค่า PWV แบบทันทีจะช่วยลดความล่าช้านี้ลง ซึ่งจะช่วยตอบสนองต่อความต้องการข้อมูล PWV ที่รวดเร็วขึ้น ทั้งนี้ความถูกต้องของการแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV นั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลความดันและอุณหภูมิ และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Weighted mean tropospheric temperature) หรือค่า  $T_m$  เนื่องจากการประมวลผลแบบทันที เพื่อลดความซับซ้อนและความล่าช้าในจัดหาข้อมูลโดยเฉพาะเมื่อต้องประมวลผลข้อมูลหลายสถานีพร้อมๆ กัน การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกนำมาใช้ในหลายงานวิจัย จากงานวิจัยของ Li et al. (2014) ได้ทำการศึกษาเพื่อประมาณค่า PWV แบบทันที ในพื้นที่รัฐบาวาเรียในประเทศเยอรมนีซึ่งมีภูมิอากาศแห่งความชื้นต่ำการเปลี่ยนแปลงของค่า PWV ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีความแปรปรวนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่แถบร้อนชื้น โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ ( $\Pi$ ) อย่างง่ายที่ประมาณ 0.15 สำหรับการแปลงค่าความคลาดเคลื่อนจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากอากาศขึ้นไปเป็นค่า PWV ซึ่งให้ผลลัพธ์ RMSE ของค่า PWV แบบทันทีอยู่ในระดับ 1-2 มม. (ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับงานทางด้านอุตุนิยมวิทยา < 3 มม.) ในขณะที่งานศึกษาวิจัยของ Yuan et al. (2014) เพื่อคำนวณค่าแฟกเตอร์  $\Pi$  ได้ใช้แบบจำลอง GPT2 ในการประมาณค่าความดันและอุณหภูมิร่วมกับแบบจำลอง  $T_m$  ของ Bevis et al. (1992) พบว่าค่า  $T_m$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง GPT2 และ Bevis model มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอสำหรับการแปลงค่า ZTD แบบทันทีเป็น PWV แบบทันทีในพื้นที่แถบร้อนชื้น (ประเทศที่อยู่ในแถบระหว่างละติจูดประมาณ 23.5 องศาเหนือถึง 23.5 องศาใต้) เนื่องจาก  $\Pi$  เป็นตัวแปรสำคัญที่ผลอย่างมากต่อการประมาณค่า PWV โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่แถบร้อนชื้น แบบจำลองเพื่อประมาณค่าข้อมูลความดันและอุณหภูมิ และ  $T_m$  จำเป็นต้องมีความถูกต้องสูงและจัดเตรียม

อย่างดี ดังนั้นในงานศึกษาวิจัยนี้เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้การประมาณค่า PWV แบบทันทีจึงเลือกใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นภายในท้องถิ่นโดยมีสมมติฐานที่ว่าแบบจำลองท้องถิ่นจะให้ความถูกต้องของค่า PWV ที่ดีกว่าการใช้แบบจำลองสากล

เพื่อประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ PPP-PWV ข้อมูลกริด PWV ขนาด 30x30 กิโลเมตร แบบราย 1 ชั่วโมง จาก ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis หรือเรียกว่า ERA5-PWV ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องของค่า PPP-PWV ซึ่งจากงานศึกษาวิจัยของ Zhang et al. (2019) และอีกหลายงานวิจัย (Jiang et al. 2016; Wang et al. 2016; Q. Zhang et al. 2018) แสดงให้เห็นว่าค่า ERA5-PWV มีความถูกต้องใกล้เคียงกับเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยา ดังนั้นข้อมูล ERA5-PWV ถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในงานศึกษาวิจัยนี้เพื่อประเมินความถูกต้องของค่า PPP-PWV แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC ซึ่งได้ถูกพัฒนาเพิ่มขีดความสามารถในการประมวลผลค่า ZTD แบบทันทีให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ขั้นตอนการดำเนินการเพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีแสดงดังรูปที่ 4-1

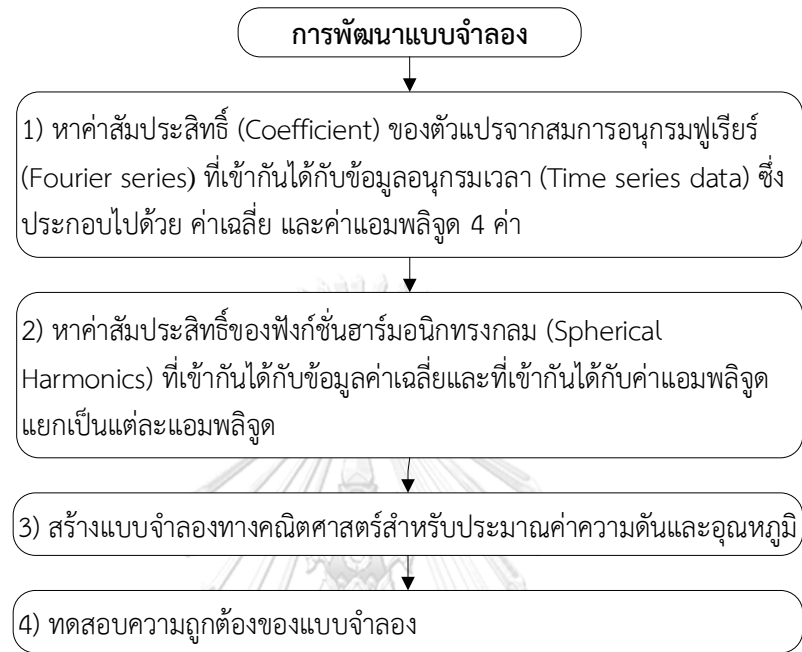


รูปที่ 4-1 แสดงขั้นตอนดำเนินการประมาณค่า PWV แบบทันที

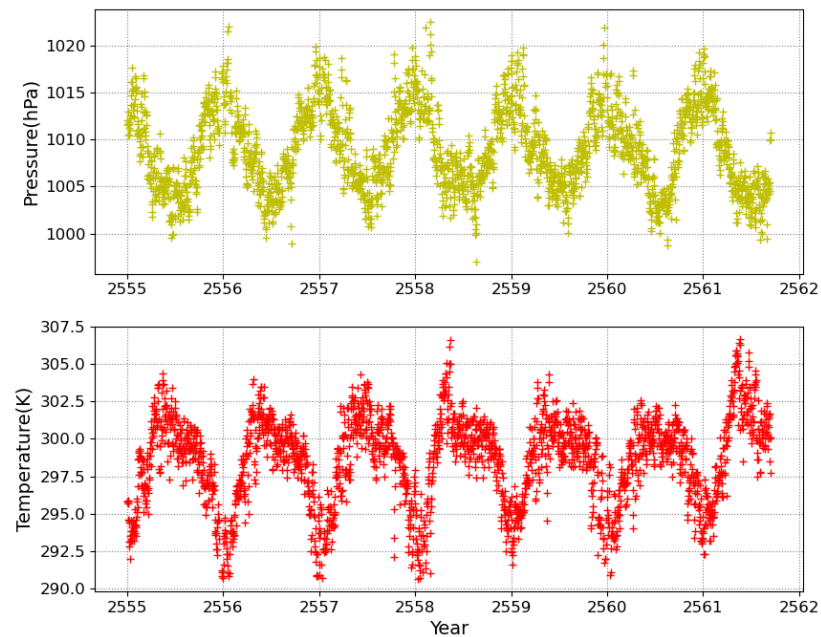
#### 4.1 พัฒนาแบบจำลองความดันบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิวท้องถิ่น

การแปลงค่า ZTD ให้เป็นค่า PWV จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี GNSS แต่เนื่องด้วยสถานีฐานในประเทศไทยจำนวนมากมิได้ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดข้อมูลความดันและอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ดังนั้นการให้มาซึ่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยาสามารถทำได้โดย เช่น ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้เคียง, ข้อมูลการพยากรณ์อากาศล่วงหน้าให้บริการทางออนไลน์ (Online) หรือจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากในงานศึกษาวิจัยนี้เป็นการประมวลผลข้อมูลแบบทันที เพื่อลดทรัพยากรและความซับซ้อนที่เกิดจากการประมวลผลและเตรียมข้อมูลอุตุนิยมวิทยา การใช้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิและความดันเป็นทางเลือกที่ทำได้สะดวก ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิและความดันขึ้นในพื้นที่ศึกษาโดยจะใช้ข้อมูล

อุณหภูมิและความดันที่ได้จากสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติจากการรวบรวมข้อมูลย้อนหลังเป็นเวลา 8-10 ปี ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เกี่ยวข้องกับการจัดเตรียมข้อมูลที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย สำหรับขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองมีรายละเอียดดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 แสดงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น



รูปที่ 4-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลอนุกรมเวลาของความดันและอุณหภูมิ ระหว่างปี 2555-2562

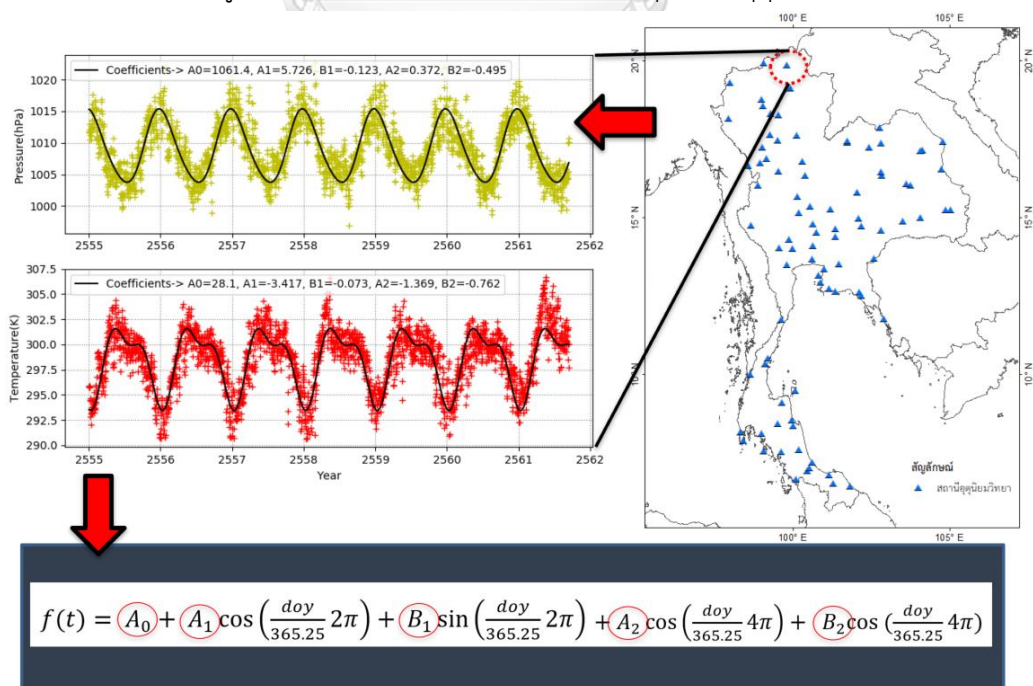
4.1.1 หาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ที่เข้ากันได้กับข้อมูลอนุกรมเวลา ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีอุตุนิยมวิทยา

นำข้อมูลอนุกรมเวลาของแต่ละสถานี ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลอุณหภูมิและความดันพื้นผิว มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fitting) โดยประยุกต์ใช้สมการอนุกรมฟูเรียร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ประกอบไปด้วยค่าเฉลี่ย  $A_0$  และค่าแอมพลิจูด  $A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  ดังรูปที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงข้อมูลความดันบรรยากาศและอุณหภูมิกับเวลา DOY (Day Of Year) แทนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วย  $f(t)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา  $t$  ในรูปแบบ DOY (Day Of Year) (Landskron & Bohm 2018) ดังสมการที่ (4.1)

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{t}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{t}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{t}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{t}{365.25} 4\pi\right) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ ค่าเฉลี่ยของความดันหรืออุณหภูมิ, เทอม  $A_1$  และ  $B_1$  คือขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากแอมพลิจูดหลัก (Annual amplitude), และเทอม  $A_2$  และ  $B_2$  คือขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการแอมพลิจูดย่อย (Semi-annual terms)

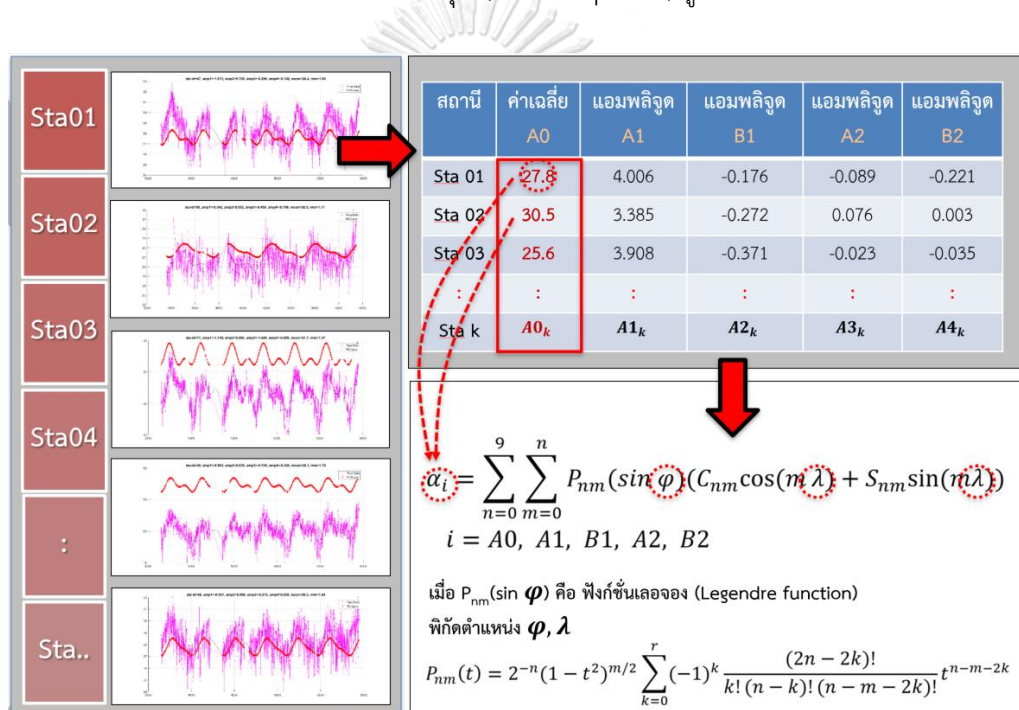
เทคนิคที่ใช้เพื่อประมวลผลหาค่าสัมประสิทธิ์จะใช้วิธี Iteratively reweighted least squares (IRLS) (Burrus 2012) เพื่อขจัดค่าที่ผิดปกติ (Outlier) ออกจากชุดข้อมูล ผลของการสร้างสมการเหมาะสมกับข้อมูลจะค่า  $A_0, A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  ของทุกสถานีอุตุนิยมวิทยา



รูปที่ 4-4 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยประยุกต์ใช้อนุกรมฟูเรียร์

4.1.2 สร้างสมการพื้นผิวที่เหมาะสมกับข้อมูลค่าเฉลี่ยและแอมพลิจูดของความดันและอุณหภูมิ ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลจากอนุกรมฟูเรียร์ของแต่ละสถานีจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองอุณหภูมิและความดันท้องถิ่น ค่าสัมประสิทธิ์  $A_0, A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  ของแต่ละสถานีจะถูกนำมาสร้างสมการพื้นผิวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ออนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมเพื่อสร้างสมการที่เหมาะสมกับข้อมูล โดยจะสร้างสมการแยกออกเป็นสำหรับแต่ละตัวแปร เริ่มต้นจาก

- 1) สมการค่าสังเกตในรูปแบบอนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมดังสมการที่ (4.2) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีตัวแปรต้นคือพิกัดตำแหน่งของแต่ละสถานี และตัวแปรตามค่า  $A_0, A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  ของแต่ละสถานี การหาค่าของตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการค่าสังเกตจะใช้เทคนิคการประมวลผลแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) รูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 แสดงการประยุกต์ใช้ออนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมสร้างสมการค่าสังเกตเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิและความดันท้องถิ่น

ค่าเฉลี่ยและขนาดของแอมพลิจูดของความดันหรืออุณหภูมิมีการเปลี่ยนไปในแต่ละพื้นที่ ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลมถูกใช้เพื่อสร้างสมการค่าสังเกตจากค่า  $A_0, A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  ของแต่ละสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ประมาณค่าได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ดังสมการที่ (4.2) (Heiskanen & Moritz 1967)

$$f(\varphi, \lambda)_i = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n a_{nm} C_{nm} + b_{nm} S_{nm}$$

$$i = 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\varphi, \lambda$  คือ พิกัดละติจูดและลองจิจูด,  $n$  และ  $m$  คือ ดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิก,  $a_{nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \cos(m\lambda)$ ,  $b_{nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \sin(m\lambda)$ ,  $P_{nm}(\sin \varphi)$  คือ ฟังก์ชันเลอจอง (Legendre function) แสดงดังสมการที่ (4.3), และ  $C_{nm}$  และ  $S_{nm}$  คือ ตัวแปรไม่ทราบค่า

$$P_{nm}(t) = 2^{-n} (1 - t^2)^{m/2} \sum_{k=0}^r (-1)^k \frac{(2n - 2k)!}{k! (n - k)! (n - m - 2k)!} t^{n-m-2k}$$

$$(4.3)$$

เมื่อ  $t = \sin \varphi$  และ  $r=2n+1$  เพิ่มค่าที่ละ 1

การประมวลผลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $C_{nm}$  และ  $S_{nm}$  ซึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการค่าสังเกตจะใช้เทคนิคการประมวลผลแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) ทั้งนี้เมื่อสร้างสมการค่าสังเกตของค่าความดันและอุณหภูมิดังรูปที่ 4-6 ขนาดของเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ (coefficient matrix)  $A$  จะมีขนาดเท่ากับจำนวนสถานี  $\times$  จำนวนพารามิเตอร์ โดยจำนวนพารามิเตอร์จะขึ้นอยู่กับดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่เลือกใช้ซึ่งถ้ามีดีกรีและลำดับฮาร์มอนิกที่สูงจะทำให้มีจำนวนพารามิเตอร์จำนวนมาก เมื่อทำการตรวจสอบค่าของเมทริกซ์  $N = A^T A$  พบว่าค่าของดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) ของเมทริกซ์  $N$  หรือ  $\det(N)$  มีค่าน้อยมาก (ใกล้ศูนย์) และจำนวนชี้ภาวะ (Condition Number) หรือ  $\text{cond}(N)$  มีขนาดที่ใหญ่มากดังสมการที่ (4.4) แสดงตัวอย่างของเมทริกซ์  $N$  เมื่อใช้ค่าดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่ 2 ( $n=m=2$ ) เมื่อทำการคำนวณหาค่า  $\det(N)=4.2742e-38$  และ  $\text{cond}(N)=5.7841e+09$  จะเห็นได้ว่าค่า  $\det(N)$  มีค่าใกล้ศูนย์เป็นอย่างมาก (ถ้า  $\det(N)$  มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเกิดจากการปิดเศษหรือความสามารถการจัดเก็บตัวเลขทศนิยมของคอมพิวเตอร์จะทำให้ไม่สามารถหาอินเวอร์สได้) และ  $\text{cond}(N)$  มีขนาดใหญ่มากซึ่งมีผลทำให้เมทริกซ์  $N$  อยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสม (Ill-condition) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เสถียร (unstable) ของเมทริกซ์  $N$  เมื่อนำไปหาค่าผลเฉลยของปัญหาจะพบว่าผลเฉลยมีความไม่เสถียรหรืออาจทำให้ไม่

สามารถหาผลเฉลยของระบบสมการได้ กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อผลเฉลยหรือเรียกว่า ill-posed problem เพื่อให้การหาผลเฉลยมีเสถียรภาพวิธีการ Regularization ถูกนำมาประยุกต์ใช้ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี ในงานศึกษาวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมของ Tikhonov regularization (Kress 1998) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาของระบบสมการที่มีพารามิเตอร์จำนวนมาก (เมื่อดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น) โดยการหาค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า lamda ( $\lambda$ ) บวกเข้าไปในระบบสมการที่ทำให้ค่าเศษเหลือ (Residual) ระหว่างค่าประมาณกับค่าที่ถูกต้องของผลเฉลยที่ค่าน้อยที่สุด ร่วมกับวิธี Singular Value Decomposition (SVD) เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการจับเก็บตัวเลขทศนิยมของคอมพิวเตอร์รวมทั้งปัญหาของเซตตัวเลขที่มีใหญ่มากๆ ให้อยู่ในเซตตัวเลขขนาดเล็กลงเป็นเมทริกซ์ 3 เมทริกซ์ แสดงตัวอย่างโค้ดในโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณหาค่าอินเวอร์ส (inverse) ของเมทริกซ์ที่ขาดเสถียรภาพ แสดงดังภาคผนวก ก.4

$$N = \begin{bmatrix} 0.0242 & -0.0167 & -0.0352 & -0.0134 & -0.2321 & 0.0853 & 0.0684 & -0.0947 \\ -0.0167 & 0.0125 & 0.0261 & 0.0096 & 0.1689 & -0.0621 & -0.0473 & 0.0706 \\ -0.0352 & 0.0261 & 0.0567 & 0.0196 & 0.3661 & -0.1339 & -0.0997 & 0.1484 \\ -0.0134 & 0.0096 & 0.0196 & 0.0077 & 0.1283 & -0.0473 & -0.0379 & 0.0540 \\ -0.2321 & 0.1689 & 0.3661 & 0.1283 & 2.3758 & -0.8694 & -0.6573 & 0.9594 \\ 0.0853 & -0.0621 & -0.1339 & -0.0473 & -0.8694 & 0.3183 & 0.2416 & -0.3525 \\ 0.0684 & -0.0473 & -0.0997 & -0.0379 & -0.6573 & 0.2416 & 0.1931 & -0.2679 \\ -0.0947 & 0.0706 & 0.1484 & 0.0540 & 0.9594 & -0.3525 & -0.2679 & 0.4006 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

**สมการค่าสังเกต**

$STA_1 \rightarrow 27.8 = 1.0000 * C_{mean}(1) + 0.0000 * S_{mean}(1) + 0.1319 * C_{mean}(2) + 0.000 * S_{mean}(2) + \dots -1.2e07 * C_{mean}(55) + 1.2e07 * S_{mean}(55)$   
 $STA_2 \rightarrow 30.5 = 1.0000 * C_{mean}(1) + 0.0000 * S_{mean}(1) + 0.1226 * C_{mean}(2) + 0.000 * S_{mean}(2) + \dots -1.6e07 * C_{mean}(55) + 1.0e07 * S_{mean}(55)$   
 $\vdots$   
 $STA_k \rightarrow 25.6 = 1.0000 * C_{mean}(1) + 0.0000 * S_{mean}(1) + 0.1886 * C_{mean}(2) + 0.000 * S_{mean}(2) + \dots -1.7e07 * C_{mean}(55) + 1.2e07 * S_{mean}(55)$

$$L_b = A * X$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเมตริก A มีขนาดเล็กและใหญ่มากที่ใกล้เคียงกัน

$$A = [a_{00} \ a_{10} \ a_{11} \ \dots \ b_{00} \ b_{10} \ b_{11} \ \dots]$$

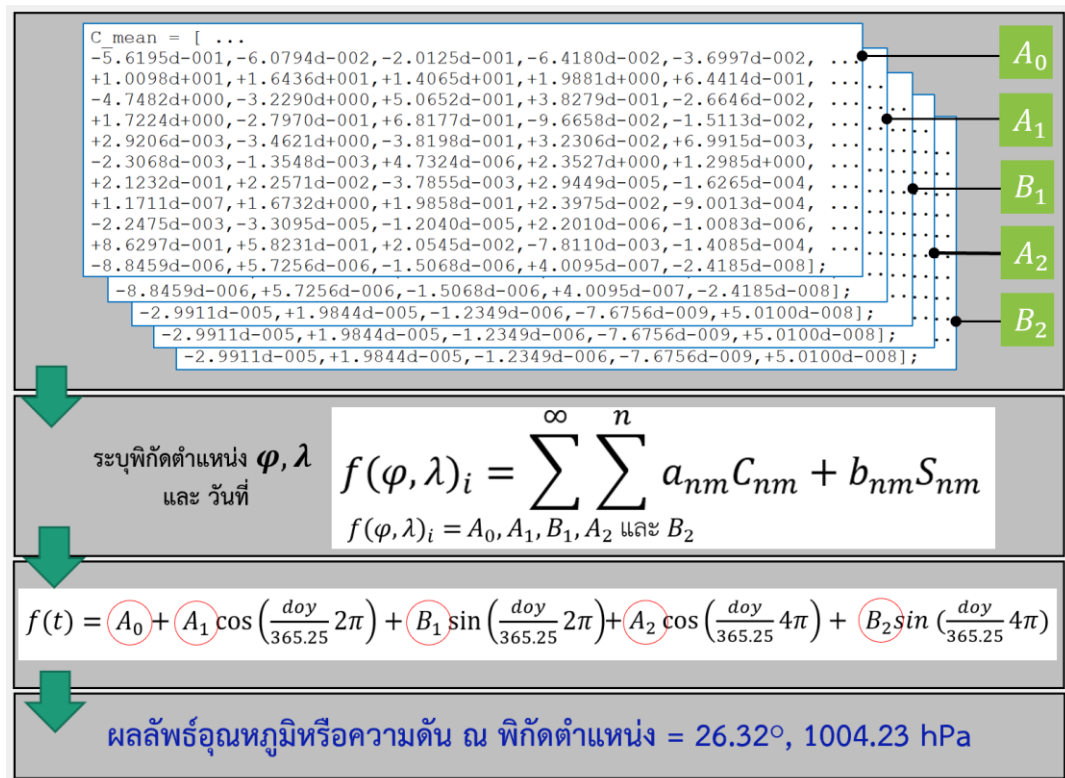
รูปที่ 4-6 แสดงตัวอย่างการสร้างสมการค่าสังเกตของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเพื่อสร้างสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม

#### 4.1.3 สร้างแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแก้สมการค่าสังเกตในรูปแบบของอนุกรมฮาร์มอนิกถูกนำมาพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิและความดันท้องถิ่น โดยการระบุพิกัดตำแหน่งที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ศึกษาแทน



ค่าลงในอนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมเพื่อคำนวณหาค่า  $A_0, A_1, B_1, A_2$  และ  $B_2$  จากนั้นจะแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ลงในอนุกรมฟูเรียร์กับวันที่ในรูปแบบ DOY เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิและความดัน ณ ตำแหน่งและวันที่ที่ระบุดังรูปที่ 4-7 สำหรับซอร์คโค้ดแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นแสดงดังภาคผนวก ก.3



รูปที่ 4-7 แสดงตัวอย่างการใช้ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อคำนวณค่าความดันและอุณหภูมิจากการประยุกต์ใช้อนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมร่วมกับอนุกรมฟูเรียร์

#### 4.1.4 สรุปผลการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น

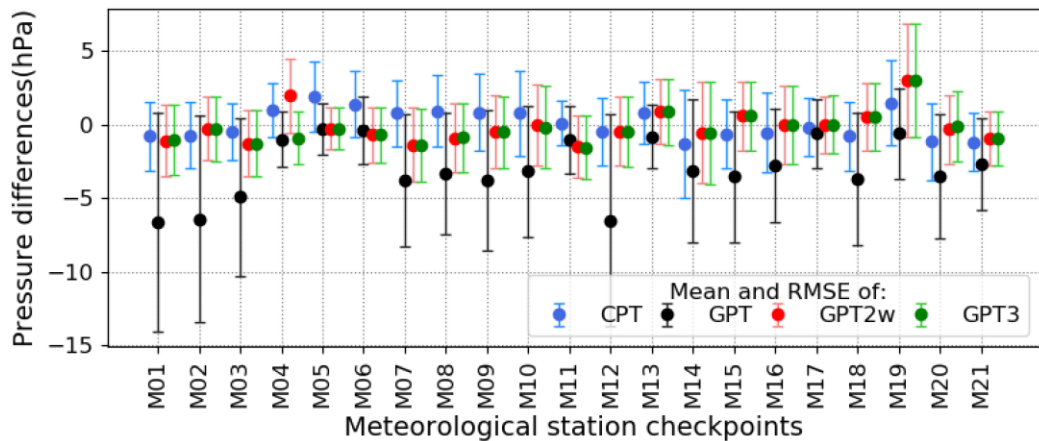
##### 1) ผลการพัฒนาแบบจำลอง

ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวจากสถานีอุตุนิยมวิทยาจำนวน 180 สถานี ระหว่างปี 2551-2561 ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น (Country-wide pressure and temperature) หรือเรียกว่า CPT ในพื้นที่ประเทศ โดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม ผลการพัฒนาแบบจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกทรงกลมที่ตรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่ 5 มีความเหมาะสมกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันและอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์จำนวน 42 ค่า เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CPT ข้อมูลความดันและอุณหภูมิในปี 2562 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาถูกใช้สำหรับทดสอบแบบจำลองจำนวน 21 สถานี

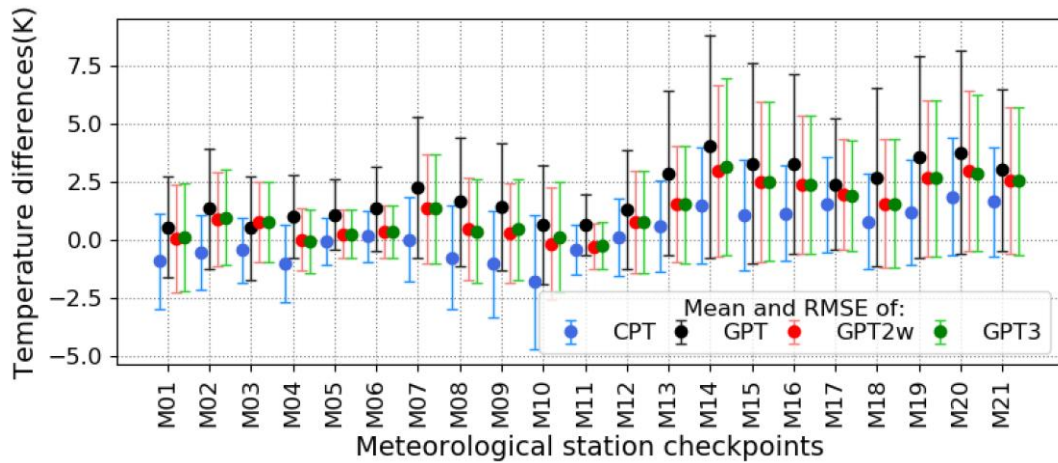
แสดงดังรูปที่ 1-1 เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง CPT และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองสากล ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลอง GPT (Global Pressure and Temperature) พัฒนาโดย Boehm et al. (2007) ได้ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงเลข (Numerical Weather Model) ซึ่งถูกพัฒนาจากชุดข้อมูล ERA-40 จากหน่วยงาน EMWF ด้วยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลมที่ดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่ 9, แบบจำลอง GPT2w ปรับปรุงเพิ่มเติมจากแบบจำลอง GPT โดยใช้ชุดข้อมูล ERA-Interim โดยเพิ่มส่วนของเทอมการเปลี่ยนแปลงย่อยรายครึ่งปี (semi-annual term) ด้วยกริดขนาด  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  และเพิ่มเติมพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยหลายชนิด เช่น  $T_m$ , แฟกเตอร์การลดลงของไอน้ำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น, และแบบจำลอง GPT3 เป็นแบบจำลองล่าสุด ปรับปรุงเพิ่มเติมจากแบบจำลอง GPT2w ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์สำหรับประมาณค่า Mapping Function

รูปที่ 4-8 แสดงค่าทางสถิติ (ค่าเฉลี่ยและ RMSE) ของค่าต่างความดันและอุณหภูมิ ระหว่างแบบจำลอง CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากสถานีอุตุนิยมหาวิทยาลัยแยกตามสถานี จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง GPT มีค่าเฉลี่ยและ RMSE สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆ ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลที่ถูกสำรวจจากดาวเทียมเพื่อใช้ติดตามสภาพบรรยากาศและข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมหาวิทยาลัยภาคพื้นดินได้ถูกนำมาประมวลผลร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมากซึ่งสามารถนำมาช่วยในการพยากรณ์อากาศและติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้การพัฒนาแบบจำลอง GPT2w และ GPT3 มีความถูกต้องเพิ่มสูงขึ้น ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่า

- ข้อมูลความดันพื้นผิวที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง CPT, GPT, GPT2w, และ GPT3 เปรียบเทียบกับข้อมูลความดัน ณ สถานีตรวจสอบ มีค่าเฉลี่ยของค่าต่างเท่ากับ 0.1, -3.0, -0.2, และ -0.3 เฮกโตปาสกาล ตามลำดับ และมีค่า RMSE ของค่าต่างเท่ากับ 2.4, 4.1, 2.4, และ 2.4 เฮกโตปาสกาล ตามลำดับ
- ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง CPT, GPT, GPT2w, และ GPT3 เปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิ ณ สถานีตรวจสอบ มีค่าเฉลี่ยของค่าต่างเท่ากับ 0.2, 2.1, 1.3, และ 1.3 เคลวินตามลำดับ และมีค่า RMSE ของค่าต่างเท่ากับ 2.0, 3.0, 2.4, และ 2.4 เคลวินตามลำดับ



(a)



(b)

รูปที่ 4-8 แสดงค่าเฉลี่ย (●) และ ค่า RMSE (I) ของค่าต่าง (a) ข้อมูลความดันพื้นผิว และ (b) ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จาก 4 แบบจำลอง ได้แก่ CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 ของแต่ละจุดทดสอบเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวที่ประมาณค่าได้จาก 4 แบบจำลอง ได้แก่ CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา

แบบจำลอง	ความดัน (hPa)		อุณหภูมิ (K)	
	ค่าเฉลี่ย	RMSE	ค่าเฉลี่ย	RMSE
CPT	0.1	2.4	0.2	2.0
GPT	-3.0	4.1	2.1	3.0
GPT2w	-0.2	2.4	1.3	2.4
GPT3	-0.3	2.4	1.3	2.4

2) เปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองอุณหภูมิตั้งกับความดันห้องเทียบกับแบบจำลองสากล เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความถูกต้องของแบบจำลอง CPT เปรียบเทียบกับแบบจำลองสากล GPT, GPT2w, และ GPT3 เนื่องจากการทดลองนี้ได้เลือกสถานีอุตุนิยมวิทยาจำนวน 21 สถานี เพื่อทดสอบแบบจำลองจึงไม่ทราบความแปรปรวนของประชากรทั้งหมดจึงเลือกสถิติ t-test ในการทดสอบ

### สมมติฐาน

$H_0$ : ประสิทธิภาพของแบบจำลอง CPT มีความไม่แตกต่างกันกับแบบจำลองสากล

$$\mu_1 = \mu_2$$

$H_1$ : ประสิทธิภาพของแบบจำลอง CPT มีความแตกต่างกันกับแบบจำลองสากล

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

กำหนดระดับนัยสำคัญ = 0.05 แต่เนื่องจากการเป็นการกำหนดการทดสอบสมมติฐานแบบสองทางดังนั้นต้องใช้ระดับนัยสำคัญ = 0.025 ในการเปิดตาราง โดย  $n_1$  และ  $n_2$  มีค่าเท่ากับจำนวนสถานี และเปิดตารางเพื่อหาค่าวิกฤตเมื่อ  $df = 40$  (จากสมการที่ 3.15) จะได้ค่าวิกฤตของค่า  $t_{\text{ตาราง}} = 2.0211$

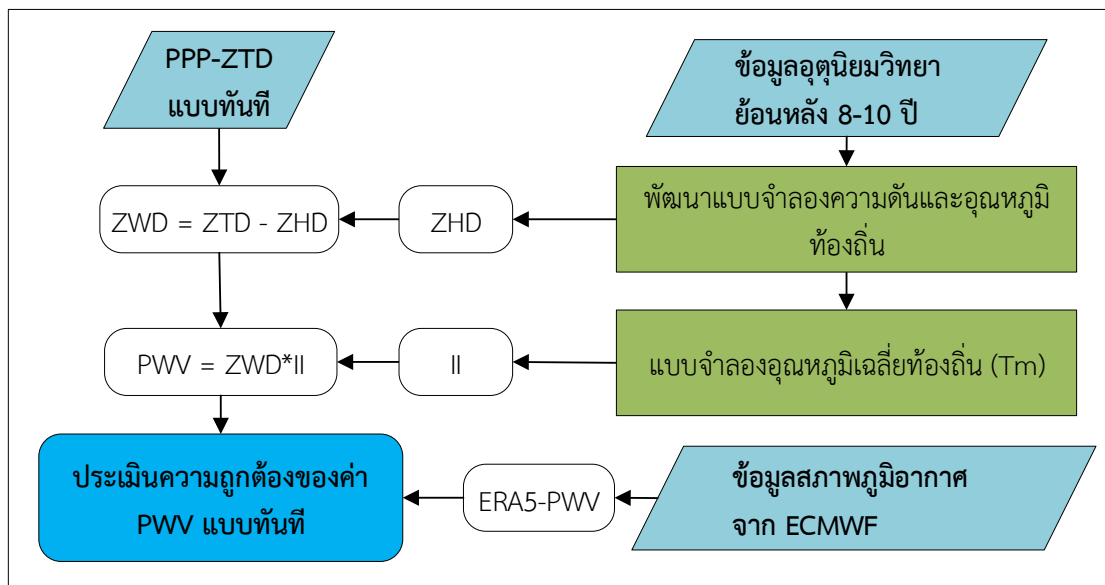
ผลการคำนวณได้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน (กำลังสองของค่า RMSE) ของค่าต่างความดันและอุณหภูมิของแต่ละแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงแสดงดังตารางที่ 4-1 ซึ่งจะถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อทดสอบทางสถิติแสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงการทดสอบความแตกต่างของความถูกต้องของแบบจำลอง CPT กับแบบจำลองสากล GPT, GPT2w และ GPT3

อุตุนิยมวิทยา	เปรียบเทียบแบบจำลอง	ระดับนัยสำคัญ	ค่าวิกฤต	ค่าสถิติ t-test	ตัดสินใจ
ความดัน	CPT กับ GPT	0.05	-2.0211 ถึง 2.0211	2.9902	ปฏิเสธ $H_0$
	CPT กับ GPT2w			0.405	ยอมรับ $H_0$
	CPT กับ GPT3			0.5401	ยอมรับ $H_0$
อุณหภูมิ	CPT กับ GPT			-2.4148	ปฏิเสธ $H_0$
	CPT กับ GPT2w			-1.6135	ยอมรับ $H_0$
	CPT กับ GPT3			-1.6135	ยอมรับ $H_0$

### สรุปตัดสินใจ

จากตารางที่ 4-2 จากทดสอบทางสถิติของค่าเฉลี่ยของแบบจำลอง CPT มีความแตกต่างกับแบบจำลอง GPT อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือแบบจำลอง CPT มีความถูกต้องในการประมาณค่าความดันและอุณหภูมิสูงกว่าแบบจำลองสากล GPT อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสากล GPT2w และ GPT3 ซึ่งถูกปรับปรุงเป็นเวอร์ชันล่าสุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ กล่าวคือแบบจำลอง CPT, GPT2w, GPT3 มีค่าความถูกต้องที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-9 แสดงขั้นตอนการประมวลผลค่า PWV แบบทันที

#### 4.2 การแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV แบบทันที

ขั้นตอนการแปรค่า ZTD เป็นค่า PWV แบบทันทีแสดงดังรูปที่ 4-9 ทั้งนี้ค่าประมาณ ZTD แบบทันทีเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบแห้ง (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) และค่าคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบชื้น (Zenith Wet Delay, ZWD) (Davis et al. 1991) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (4.5)

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (4.5)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งแบบแห้ง หรือ ZHD สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องที่ระดับ 1-5 มิลลิเมตร เมื่อคำนวณร่วมกับค่าความกดอากาศ ณ ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ มีหลากหลาย

แบบจำลองถูกเผยแพร่เพื่อคำนวณหาค่า ZHD เช่น จากงานวิจัยของ Hopfield (1971), Saastamoinen (1972b) และ Elgered et al. (1991) เป็นต้น ในงานศึกษานี้แบบจำลองของ Saastamoinen (1972b) มีความถูกต้องที่ดีมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนโดยจะคำนวณร่วมกับค่าความดันซึ่งเหมาะแก่การใช้ประมวลผลหาค่า PWV แบบทันที (Chen & Liu 2016) สำหรับค่า ZWD ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.6) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า PWV สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.20) (Yuan et al. 2014)

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (4.6)$$

โดยที่  $\Pi$  คือ ค่าแฟกเตอร์สำหรับการแปลงค่าความคลาดเคลื่อนจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากอากาศขึ้นไปเป็นค่า PWV สำหรับค่าที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) หรือ นิยมเรียกกันในหน่วยของระยะทางในหน่วยมิลลิเมตร เช่น ปริมาณไอน้ำ  $1 \text{ kg}/\text{m}^2$  หรือมีค่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งโดยถ้าทำการรวมปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทางตั้งเหนือตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณสูงขึ้นไปเป็นคอลัมน์จนสุดชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์กลับตัวรวมกันเป็นคอลัมน์ของน้ำในภาชนะขนาด  $1 \times 1$  เมตรจะมีความสูง 1 มิลลิเมตร ดังสมการที่ (4.7)

$$\Pi = \frac{10^6 \cdot M_w}{\rho_w R_w \cdot (k_2 - k_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} + \frac{k_3}{T_m})} \quad (4.7)$$

โดยที่  $\rho_w$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว ( $1,000$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร);  $R_w$  คือ ค่าคงที่ของไอน้ำ ( $461.51 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ );  $M_d, M_w$  คือ มวลโมเลกุลของอากาศแห้ง ( $0.00289644 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) และอากาศชื้น ( $0.018016 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ );  $k_1, k_2, k_3$  คือ ค่าคงที่การหักเหในบรรยากาศ  $77.6900 \text{ K}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ,  $71.2952 \text{ K}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ,  $375463 \text{ K}^2\cdot\text{hPa}^{-1}$  ตามลำดับ; ค่า  $T_m$  สามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยาตรวจวัด เช่น เครื่องวิทยุห้วงอากาศ, ข้อมูลจากดาวเทียม Aqua ของนาซ่า (NASA) ด้วยวิธี AIRS และ AMSU (The Atmospheric Infrared Sounder and the Advanced Microwave Sounding Unit) เป็นต้น ซึ่งเป็นการยากที่วัดค่าและจำเป็นต้องใช้เวลาในการประมวลผลซึ่งไม่สามารถคำนวณได้ในทันที อีกทางเลือกหนึ่งคือการประมาณค่าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่า  $T_m$  ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นกับข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ ( $T_s$ ) หน่วย เคลวิน (Kelvin, K) ทั้งนี้การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความถูกต้องที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือทางอุตุนิยมวิทยาหรือข้อมูลจากการพยากรณ์อากาศเชิงเลข โดยแบบจำลองจะแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ทั่วโลก เช่น จากงานวิจัย Bevis et al. (1992)  $T_m = 70.2 + 0.27 \cdot T_s$  พัฒนาโดยใช้ข้อมูลจากสถานีเครื่องวิทยุห้วงอากาศในพื้นที่สหรัฐอเมริกา จากงานวิจัย Mendes et al. (2000)  $T_m = 50.4 +$

$0.789 \cdot T_s$  เหมาะสำหรับใช้บริเวณละติจูดกลาง (mid-latitudes) หรือจากการศึกษาของ Yao et al. (2014) ได้พัฒนาแบบจำลอง GTm-III สำหรับคำนวณค่า  $T_m$  ทั่วโลก เป็นต้น จากงานวิจัยของ Suwanton et al. (2016) ได้แสดงให้เห็นการใช้แบบจำลอง  $T_m$  ท้องถิ่นจะให้ความถูกต้องที่สูงกว่า โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูงต่างๆ จากข้อมูล AIRS และ AMSU เพื่อหาค่า  $T_m$  ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีรายละเอียดดังนี้

จากสมการที่ (4.8) สำหรับกลางวัน (Day time)

$$T_m = 0.6066 \cdot T_s + 113.2914 \quad (4.8)$$

และสมการที่ (4.9) สำหรับช่วงเวลากลางคืน (Night time)

$$T_m = 0.7938 \cdot T_s + 57.4856 \quad (4.9)$$

#### 4.3 ผลการศึกษาวิจัยการประมาณค่า PWV แบบทันที

การศึกษาวิจัยเพื่อประมาณค่า PWV แบบทันทีด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประมวลผลในขั้นตอนการคำนวณหาค่า PWV แบบทันที ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นที่ได้พัฒนาขึ้นร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จากงานวิจัยของ Suwanton et al. (2016) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า PWV แบบทันที ข้อมูล ERA5 จากหน่วยงาน ECMWF ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง

##### 4.3.1 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่า PWV แบบทันที

เพื่อประเมินความถูกต้องของค่า PWV แบบทันทีจากการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP หรือเรียกว่า PPP-PWV ร่วมกับข้อมูลความดันและอุณหภูมิที่ประมาณค่าจากแบบจำลอง CPT ซึ่งพัฒนาขึ้นในงานศึกษาวิจัยนี้ ข้อมูล PPP-PWV จะถูกเปรียบเทียบกับค่า PWV ที่ประมาณค่าได้จากชุดข้อมูล ERA5 ทุกๆ 1 ชั่วโมง จาก ECMWF หรือเรียกว่า ERA5-PWV ซึ่งถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อประเมินความถูกต้องของค่า PWV ทั้งนี้เฉพาะข้อมูลที่มีช่วงเวลาเท่ากันถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลองท้องถิ่นที่พัฒนาขึ้นในงานศึกษาวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบผลเพิ่มเติมกับแบบจำลองสากลซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลอง GPT, GPT2w, และ GPT3 จาก

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า RMSE ของ PPP-PWV ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้ค่าความดันและอุณหภูมิที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง CPT, GPT, GPT2w และ GPT3 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าทั้ง 4 แบบจำลองให้ค่าความถูกต้องของค่า PWV ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากงานวิจัยของ De Haan

(2006) ตามเอกสาร WMO ถ้าข้อมูล PWV ถูกนำไปใช้ในงานด้านการพยากรณ์อากาศเชิงเลขจะต้องมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 มม.

ผลการเปรียบเทียบค่า PWV แบบทันทีที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง CPT ในแต่ละสถานีส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อน < 3 มม. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับประยุกต์ใช้ในงานพยากรณ์อากาศระยะสั้น ยกเว้นสถานี CHAN, PJRK, และ SRTN ที่มีค่าเกิดมาตรฐานอยู่เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบผลกับการใช้แบบจำลองสากล GPT, GPT2w และ GPT3 ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันกับการใช้แบบจำลอง CPT อย่างไรก็ตามเนื่องจากอยู่ข้อมูล ERA5-PWV ที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบเป็นข้อมูลที่เพิ่งเริ่มต้นเปิดให้บริการจากหน่วยงาน ECMWF ยังไม่เคยมีการวิจัยหรือตรวจสอบความถูกต้องที่ชัดเจนมาก่อนเมื่อนำข้อมูล ERA5-PWV มาใช้สำหรับเป็นค่าอ้างอิงในงานศึกษาวิจัยนี้ทำให้ไม่ผลสรุปยังคงไม่มีความชัดเจน เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของข้อมูล ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทยให้เห็นผลอย่างชัดเจน ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบข้อมูล ERA5-PWV กับข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลที่ให้ความถูกต้องสูงด้วยซอฟต์แวร์ทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อประเมินความถูกต้องของค่า ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทย

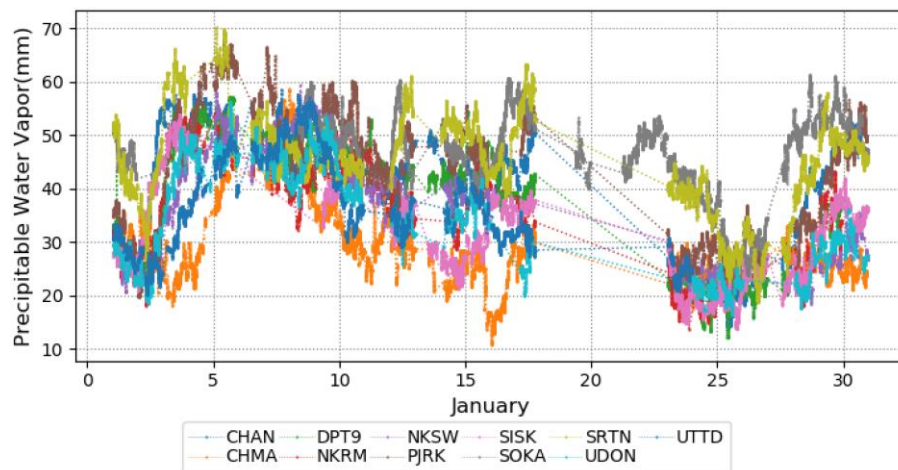
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าเฉลี่ยและ RMSE (หน่วยมิลลิเมตร) ของค่า PWV ระหว่างข้อมูล PWV ที่ประมาณค่าได้จากข้อมูล GNSS โดยใช้แบบจำลองอนุกรมและความดันที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง ERA5

สถานี	ค่าเฉลี่ย				RMSE			
	CPT	GPT	GPT2w	GPT3	CPT	GPT	GPT2w	GPT3
CHAN	0.0	0.7	-0.1	-0.1	3.0	3.0	3.0	3.0
CHMA	-3.0	-2.5	-3.7	-3.7	2.6	2.6	2.6	2.6
DPT9	2.2	2.9	2.0	2.0	2.4	2.4	2.4	2.4
NKRM	0.3	0.9	0.2	0.2	2.7	2.7	2.7	2.7
NKSW	1.4	2.0	0.9	0.9	2.8	2.8	2.7	2.7
PJRK	-3.4	-2.8	-3.5	-3.5	3.6	3.6	3.6	3.6
SISK	0.2	0.8	0.0	0.0	2.4	2.4	2.4	2.4
SOKA	0.1	0.4	0.1	0.1	2.2	2.2	2.2	2.2
SRTN	-0.6	0.0	-0.6	-0.6	3.0	3.0	3.0	3.0
UDON	-1.1	-0.9	-1.7	-1.7	2.0	2.1	2.0	2.0
UTTD	-1.2	-0.8	-2.0	-2.0	2.7	2.7	2.7	2.7

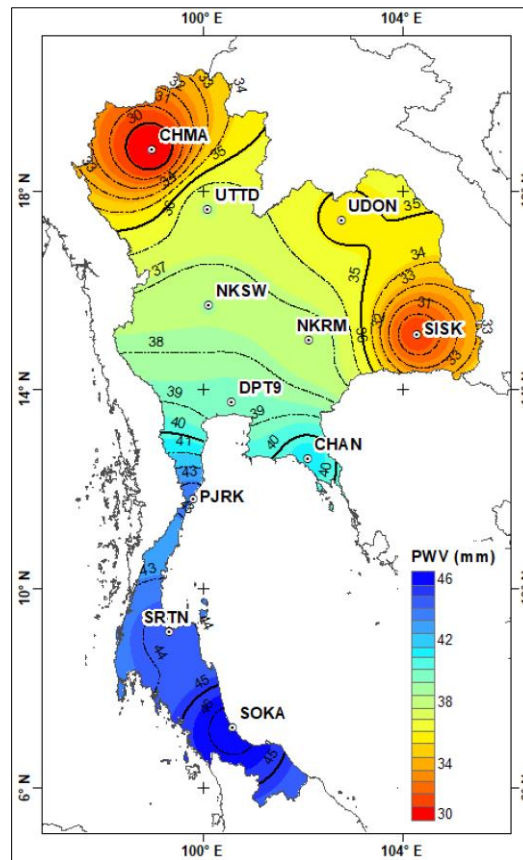


#### 4.3.2 การกระจายตัวของค่า PWV ในประเทศไทย

ค่า PWV แบบทันทีที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบ PPP จำนวน 11 สถานีในเดือนมกราคม 2562 แสดงดังรูปที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า PWV นั้นมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10 ถึง 70 มิลลิเมตร ค่า PWV ของแต่ละสถานีมีรูปแบบที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งและความสูงของสถานี รูปที่ 4-11 แสดงการกระจายตัวของค่า PWV ในพื้นที่ประเทศไทยจะเห็นได้ว่าสถานี SRTN และ SOKA ซึ่งอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทยมีค่า PWV ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่นๆ เนื่องจากภาคใต้ซึ่งมีลักษณะทางภูมิประเทศแตกต่างจากภาคอื่นๆ โดยในช่วงเดือนมกราคมอากาศไม่ค่อยหนาวเย็นนัก มีฝนตกในบางพื้นที่และโดยเฉพาะทางฝั่งตะวันออกของภาคใต้มีฝนตกชุก ในขณะที่ภูมิภาคอื่นของประเทศอยู่ในช่วงฤดูหนาว มีอากาศแห้งและค่อนข้างเย็นในบางพื้นที่



รูปที่ 4-10 แสดงค่า PWV จากการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันที ในช่วงวันที่ 1-31 มกราคม 2562



รูปที่ 4-11 แสดงแผนที่ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเฉลี่ยที่ประมาณค่าได้จากสถานี GNSS ทั้ง 11 สถานี ในเดือนมกราคม 2562

## บทที่ 5

### อภิปรายและวิจารณ์ผล สรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัยสำหรับการประมาณค่า ZTD แบบทันที

##### 5.1.1 อภิปรายและสรุปผลการประมาณค่า ZTD แบบทันที

ในงานศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่า PWV หรือค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศแบบทันที ร่วมกับแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น หรือ CPT ในประเทศไทย ด้วยวิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความละเอียดสูง โดยใช้ข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันที ข้อมูล GNSS จากหน่วยงานกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 11 สถานี ในเดือนมกราคม 2562 ถูกใช้เพื่อการทดสอบและถูกประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ BNC เนื่องจากซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบข้อมูลค่าแกว่งโคจรและนาฬิกาดาวเทียมแบบทันทีที่พัฒนาโดยหน่วยวิจัยระดับสากล ซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาให้ใช้งานได้โดยง่ายไม่ซับซ้อน ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนบางชนิดไม่ได้ถูกพิจารณาปรับแก้ในสมการค่าสังเกต เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมวลผลข้อมูลมากยิ่งขึ้นในงานศึกษาวิจัยนี้ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์เพิ่มเติม ประกอบไปด้วย 1) ปรับแก้ค่า Tropospheric noise ที่เหมาะสมในกระบวนการประมวลผลด้วยวิธี Extended Kalman Filter 2) พัฒนาฟังก์ชันขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแม่เหล็ก 3) ปรับปรุงแบบจำลองเพื่อประมาณค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ผลการปรับปรุงซอฟต์แวร์สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ปรับแก้ค่า Tropospheric noise ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของค่า ZTD ช่วงเดือนมกราคม พบว่าที่  $10e^{-6}$  หรือประมาณ 36 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ให้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามค่า Tropospheric noise มีการเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละพื้นที่ เช่น ในพื้นที่บริเวณที่มีอากาศหนาวเย็น แถบบริเวณขั้วโลกเหนือลักษณะสภาพอากาศจะแห้ง ความแปรปรวนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ซึ่งได้อธิพลหลักมาจากไอน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นที่อบอุ่น และ Tropospheric noise ยังขึ้นอยู่กับช่วงเวลาหรือฤดูกาล เช่น ช่วงการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล จากฤดูหนาวเข้าสู่ฤดูร้อนหรือฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน ความแปรปรวนจะเกิดขึ้นค่อนข้างสูงจากเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจและประมาณค่า Tropospheric noise ที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลาจึงควรทำการศึกษาในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้นอย่างน้อย 1 ปีเพื่อให้ครอบคลุมทุกฤดูกาล
- 2) การพัฒนาฟังก์ชันเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไม่ได้ช่วยเพิ่มค่าความถูกต้องในการประมาณค่า ZTD ที่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสถานีที่ถูกเลือกมาใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์ไม่ได้กระจายครอบคลุมพื้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลของ

แรงมหาสมุทรอย่างชัดเจนโดยเฉพาะบริเวณที่ติดกับภาคใต้ชายฝั่งตะวันตก เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านความพร้อมของข้อมูลสถานีที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้ไม่มีตำแหน่งสถานีเพื่อใช้ในการทดสอบบริเวณดังกล่าวในช่วงที่จัดเตรียมข้อมูล อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีตำแหน่งสถานีเพิ่มเติมจากกรมแผนที่ทหาร ทำให้มีความเป็นไปได้สำหรับการทดสอบประมวลผลข้อมูลบริเวณดังกล่าวเพิ่มเติม รวมทั้งขยายช่วงเวลาสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต

- 3) การปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นโดยการแยกค่าคลาดเคลื่อนออกเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศแห้งและค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอากาศชื้น และประยุกต์ใช้แบบจำลอง GPT3 และ VMF3 เพื่อประมาณค่า Mapping Function ที่มีความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้น พบว่ามีผลต่อการเพิ่มความถูกต้องให้กับการประมาณค่า ZTD มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการพัฒนาหรือปรับปรุงซอฟต์แวร์ส่วนอื่น ดังตารางที่ 3-3 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ Mapping Function สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณค่า ZTD เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ย, RMSE, และ เปอร์เซ็นต์ค่าต่าง ZTD น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามจากงานศึกษาวิจัยของ [Zus et al. \(2019\)](#) ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นอกจากจะขึ้นอยู่กับมุมสูงของดาวเทียมแล้วยังขึ้นอยู่กับทิศทางเหนือ-ตะวันออกของดาวเทียมอีกด้วย การปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยการเพิ่ม Tropospheric Gradients ในทิศทางแอสิมัท (Azimuth angle) ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับตำแหน่งค่าพิกัด และการประมาณค่า ZTD ซึ่งอาจทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพรวมผลการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC แสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณค่า ZTD เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก CSRS-ZTD แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ผลการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC ก่อนและหลังการพัฒนา

ผลลัพธ์	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
ค่าเฉลี่ย (มม.)	5.7	-1.6
ค่า RMSE (มม.)	14.4	12.5
% ค่าต่าง < 20 มม.	84	90

พบว่าค่าเฉลี่ยลดลงจาก 5.7 เป็น -1.6 มิลลิเมตร (ยิ่งใกล้ 0 ยิ่งดี) และ ค่า RMSE ลดลงจาก 15.4 เป็น 12.5 ลดลงประมาณ 2 มิลลิเมตร ผลจากการทดสอบทางสถิติ (แสดงดังหัวข้อ 3.4.2) แสดงให้พบว่าการพัฒนาซอฟต์แวร์ BNC ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้การประมาณค่า ZTD แบบทันที อย่างมีนัยสำคัญ และเปอร์เซ็นต์ค่าต่าง ZTD ที่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6% ผลลัพธ์ของการปรับปรุงซอฟต์แวร์ BNC แสดงให้เห็นว่าค่าต่าง ZTD ที่มีค่าน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร คิดเป็น 90% ของจำนวนข้อมูลที่ประมวลผลทั้งหมด และที่เหลืออีก 10% มีค่าต่างมากกว่า 20 มิลลิเมตร จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ายังมีข้อมูลอีกประมาณ 10% จำเป็นจะต้องพัฒนาโปรแกรม ให้มีความถูกต้องสูงขึ้นแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในข้อเสนอ สำหรับค่า RMSE ของค่าต่าง ZTD รวมทุกสถานีมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12.5 มิลลิเมตร และทุกสถานีมีค่า RMSE น้อยกว่า 15 มม. ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในงานแบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงเลข

#### 5.1.2 ข้อเสนอแนะการประมาณค่า ZTD แบบทันที ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP ด้วยซอฟต์แวร์ BNC

การประมาณค่า ZTD แบบทันทีด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบ PPP ยังคงมีหลายๆ ส่วนที่ยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้การประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ BNC เช่น

- 1) การเพิ่มฟังก์ชันเพื่อปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความแปรปรวนของตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศของเครื่องรับสัญญาณภาคพื้นดินและดาวเทียม หรือเรียกว่า PCV ซึ่งมีผลต่อค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง 8 ซม. และทางเหนือ 4 ซม. (El-Hattab 2019) และจากงานศึกษาวิจัยของ Thomas et al. (2011) การไม่ได้ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก PCV สามารถส่งผลกระทบต่อความถูกต้องการประมาณค่า ZTD ได้ถึง 2-10 มม.
- 2) การปรับแก้ค่าเลขปริศนาจากจำนวนทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม (Ambiguity Resolution, AR) และการประมวลผลข้อมูลจากหลายกลุ่มดาวเทียม GNSS จาก GPS, GLONAS, Galileo และ BeiDou ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้การประมาณค่า ZTD Lu et al. (2018) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการประมวลผลข้อมูล multi-GNSS กับ GPS-only ด้วยวิธี PPP-AR เพื่อประมาณค่า ZTD แบบทันทีเปรียบเทียบกับ ZTD จากหน่วยงาน IGS พบว่ามีความเมื่อประมวลผลด้วยข้อมูล multi-GNSS มีความถูกต้องอยู่ที่ 12.5 มม. ซึ่งดีกว่าการใช้ข้อมูล GPS-only ซึ่งความถูกต้องอยู่ที่ 13.3 มม. อีกทั้งการประยุกต์ใช้ multi-GNSS ยังช่วยลดเวลาในการลู่เข้าของผลเฉลยลงได้รวดเร็วขึ้น 50% เมื่อเทียบกับการใช้ GPS-only

- 3) การประมวลผลแบบ 3 ความถี่ (L1, L2, L5) ช่วยลดเวลาในการลู่เข้าของผลเฉลยได้เร็วขึ้น และให้ค่า ZTD ที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องที่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยา จากการศึกษาของ [D. Laurichesse and Blot \(2016\)](#) ทำการประมวลผลข้อมูล multi-GNSS ด้วยวิธี PPP-AR พบว่าเมื่อทำการประมวลผลด้วย triple-frequency ที่ความถูกต้องประมาณ 20 ซม. จะใช้เวลาประมาณ 2 นาที ในขณะที่การประมวลผลแบบ dual-frequency ต้องใช้เวลา 5 นาที ซึ่งจะมีผลดีต่อการประมาณค่า ZTD แบบทันทีสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยา
- 4) เพิ่มเวลาทำการศึกษาวิจัยอย่างน้อย 1 ปีเพื่อให้ครอบคลุมทุกฤดูกาล และเพิ่มจำนวนสถานี GNSS ให้ครอบคลุมทุกพื้นที่มากขึ้น เพื่อทำการศึกษาผลของการปรับแต่งค่า Tropospheric noise ให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่และเวลา
- 5) การปรับปรุงแบบจำลองชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยการเพิ่ม Tropospheric Gradients จากการศึกษาของ [Elsobeiey and El-Diasty \(2016\)](#) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของ Tropospheric Gradients ต่อการประมาณค่า ZTD ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ PPP พบว่าการเพิ่มการประมาณค่า gradients ในสมการค่าสังเกตช่วยลดค่าต่างของค่าเฉลี่ยลงได้ 30% และค่า RMSE ลงได้ 6%

## 5.2 อภิปรายและสรุปผลการวิจัยสำหรับการประมาณค่า PWV แบบทันที

### 5.2.1 อภิปรายผลการพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น

ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวจาก 180 สถานี ระหว่างปี 2551-2561 ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นในพื้นที่ประเทศ โดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลมที่ดีกรีและลำดับของฮาร์มอนิกที่ 5 มีความเหมาะสมเพียงพอกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันและอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์จำนวน 42 ค่า ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CPT เทียบกับค่าอ้างอิงจากสถานีอุตุนิยมวิทยาพบว่าค่ามีความถูกต้องของความดันและอุณหภูมิอยู่ที่  $\pm 2.4$  เฮกโตปาสกาล และ  $\pm 2.0$  เคลวิน ตามลำดับ ผลการตรวจสอบทางสถิติดังตารางที่ 4-2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง CPT กับแบบจำลองสากลพบว่าแบบจำลอง CPT มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองสากล GPT อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลอง CPT มีความถูกต้องที่ใกล้เคียงกันกับแบบจำลองสากล GPT2w และ GPT3 ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นล่าสุด เพื่อความถูกต้องให้กับแบบจำลอง CPT การพิจารณาเพิ่มการเปลี่ยนรายวัน (Diurnal cycle) จากการศึกษาของ [Yao et al. \(2015\)](#) มีส่วนช่วยเพิ่มความถูกต้องของค่าอุณหภูมิและความดันให้ดีขึ้นได้ ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

### 5.2.2 อภิปรายและสรุปผลการประมาณค่า PWV แบบทันที

การศึกษาวิจัยนี้ข้อมูล GNSS ถูกประมวลผลด้วยเทคนิคจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบทันที โดยใช้ข้อมูลจาก 11 สถานี ในเดือนมกราคม 2562 เพื่อประมาณค่า PWV ร่วมกับแบบจำลอง CPT ที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาวิจัยนี้ ผลการประมวลผลพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากชุดข้อมูล ERA5 ผลการศึกษาพบว่าค่า PWV ในแต่ละสถานีส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อน < 3 มิลลิเมตร ซึ่งมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับประยุกต์ใช้ในงานพยากรณ์อากาศระยะสั้นเพื่อคาดการณ์สภาพอากาศในช่วงเวลาสั้นๆ ยกเว้นสถานี CHAN, PJRK, และ SRTN นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลอง CPT ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับแบบจำลองระดับสากล GPT, GPT2w, และ GPT3 ถึงแม้การประมาณค่า PWV โดยใช้ข้อมูลความดันและอุณหภูมิที่ประมาณค่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะช่วยลดทรัพยากรและความซับซ้อนที่เกิดจากการประมวลผลและเตรียมข้อมูลอุตุนิยมวิทยา แต่ยังคงไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกพื้นที่ ดังเห็นได้จากบางสถานีมีความถูกต้องของค่า PWV  $\geq 3$  มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความถูกต้องเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ค่า PWV ในงานอุตุนิยมวิทยา กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์หรือสถานีอุตุนิยมวิทยาอยู่ใกล้เคียงสถานี GNSS เพื่อประมาณค่าข้อมูลความดันและอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Yuan et al. (2014) การประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์อากาศเชิงเลข VMF3-FC ทุกๆ 6 ชั่วโมงที่ขนาดกริด  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  ให้ค่าความถูกต้องที่สูงกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่จำเป็นจะต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลให้สูงขึ้นเนื่องจากข้อมูลที่ต้องดาวน์โหลดจากอินเทอร์เน็ต

### 5.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการประมาณค่า PWV แบบทันทีด้วยวิธีประมวลผลแบบ PPP

เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความดันและอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี GNSS ร่วมกับแบบจำลอง  $T_m$  ในงานศึกษาวิจัยนี้ข้อมูลความดันและอุณหภูมิพื้นผิวถูกประมาณค่าด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ท้องถิ่นซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดทรัพยากรในการประมวลผลเมื่อเทียบกับการใช้ข้อมูลจากการพยากรณ์อากาศเชิงเลขหรือจากสถานีอุตุนิยมวิทยาซึ่งต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและดาวน์โหลดข้อมูล สำหรับแบบจำลอง  $T_m$  นั้นได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองจากการศึกษาวิจัยของ Suwanton et al. (2016) ในงานศึกษาวิจัยนี้พบว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถประมาณค่า PWV ให้อยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องของการนำค่า PWV ไปประยุกต์ใช้สำหรับการพยากรณ์อากาศเชิงเลข แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีบางสถานีที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ความถูกต้อง เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการคำนวณ PWV แบบทันที สามารถทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดังนี้

- 1) ความถูกต้องของค่าแฟกเตอร์  $\Pi$  สำหรับแปลงค่า ZTD เป็นค่า PWV จะขึ้นอยู่กับแบบจำลอง  $T_m$  เป็นตัวแปรหลักสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องในการประมาณค่า PWV โดยเฉพาะในภูมิภาคเขตร้อน (Yuan et al. 2014) ซึ่งมีความแปรปรวนในชั้น

บรรยากาศโทรโพสเฟียร์ค่อนข้างสูงซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ การพัฒนาแบบจำลอง  $T_m$  ท้องถิ่นให้แม่นยำสูงขึ้นในแต่ละส่วนของประเทศ โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาจากสถานีอุตุนิยมวิทยาร่วมกับชุดข้อมูล ERA5 ซึ่งหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าชุดข้อมูล ERA5 มีความละเอียดและความถูกต้องสูงเมื่อเทียบกับชุดข้อมูลเดิมในอดีต (Jiang et al. 2019; Zhang et al. 2019; Zus et al. 2019) อีกทั้งมีหลายงานวิจัยได้พัฒนาและเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระดับสากล (Landskron & Bohm 2018; Wang et al. 2005; Wang et al. 2016; Yao et al. 2014) เพื่อประมาณค่า  $T_m$  เป็นที่น่าจะสนใจที่จะเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองเหล่านี้เพื่อประมาณค่า PPP ในพื้นที่ประเทศไทย

- 2) การประมาณค่า ZHD ที่ไม่ละเอียดเพียงพอค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับการประมาณค่า ZHD จะถูกส่งต่อไปยังการประมาณค่า PWV เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนนี้สามารถประยุกต์ข้อมูล ZHD ที่ได้จากแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงเลขจาก VMF3-FC แต่ทั้งนี้จะต้องแลกมาด้วยการเพิ่มเวลาและโหลดของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล (Yuan et al. 2014)
- 3) เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่นยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วยการพิจารณาเทอมเปลี่ยนแปลงรายวันเพิ่มเติมเข้าไปในสมการอนุกรมฟูเรียร์ (Yao et al. 2015)
- 4) ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่า PWV แบบทันที ข้อมูล ERA5-PWV ถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เนื่องจากข้อมูล ERA5 เป็นข้อมูลใหม่เปิดให้ใช้บริการเมื่อ 31 สิงหาคม 2562 จากงานวิจัยของ Zhang et al. (2019) ได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูล PWV ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล GNSS กับข้อมูล ERA5-PWV พบว่ามีค่า RMSE อยู่ที่ 1.8 มม. (อยู่ในเกณฑ์สำหรับประยุกต์ใช้งานอุตุนิยมวิทยาซึ่งต้อง < 3 มม.) และ Li et al. (2020) ได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูล PWV ที่ได้จากการประมวลผล GNSS แบบประมวลผลภายหลังด้วยซอฟต์แวร์ GAMIT กับข้อมูล ERA5-PWV ในพื้นที่สาธารณรัฐประชาชนจีนและเขตบริหารพิเศษฮ่องกงพบว่ามีค่า RMSE อยู่ที่ประมาณ 5 มม. (เกินเกณฑ์สำหรับประยุกต์ใช้งานอุตุนิยมวิทยา) ซึ่งทั้งสองงานวิจัยให้ค่าความถูกต้องที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากเทคนิคและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของข้อมูล ERA5-PWV ในพื้นที่ประเทศไทยซึ่งยังไม่ได้มีการทดสอบเพื่อประเมินความถูกต้องอย่างชัดเจน ซึ่งเห็นควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบข้อมูล ERA5-PWV กับข้อมูล GNSS ด้วยวิธีการประมวลผลที่ให้ความถูกต้องสูงด้วยซอฟต์แวร์ทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อประเมินความถูกต้องในพื้นที่ประเทศไทย



## ภาคผนวก ก

## คำสั่ง Python และ MatLab

## ก.1 ประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยซอฟต์แวร์ BNC (Python)

```

from cmnfunction import *
workdir = '/media/skycaptain/Data/GNSS_OBS_DATA/rinex_dol/2019'
for root, dirs,files in os.walk(workdir,topdown=True):
    for name in fnmatch.filter(files,'*.19o'):
        station = name[0:4]
        doy = name[4:7]
        yy = name[17:19]
        rinexObs = os.path.join(root,name)
        corrFile = '/media/skycaptain/Data/20'+ yy +'//CLK91'+ doy +'0.'+ yy +'C'
        rinexNav = '/media/skycaptain/Data/brdc/20'+ yy +'//brdc'+ doy +'0.'+ yy +'p'
        logFolder = '/media/skycaptain/Data/log' + '/' + station
        troFolder = '/media/skycaptain/Data/GNSS_OBS_DATA /trop' + '/' + station
        if not os.path.exists(logFolder):
            mkdir(logFolder)
        if not os.path.exists(troFolder):
            mkdir(troFolder)

        logFile = logFolder + '/' + station + doy + '0.log'
        if os.path.exists(rinexObs):
            if os.path.exists(rinexNav):
                if os.path.exists(corrFile):
                    tic = time.time()
                    bnc = r'/home/skycaptain/gnss/develop/bnc_ocean'
                    key = ' --conf /home/skycaptain/PPP_POST.bnc'
                    key += ' --key logFile ' + logFile
                    key += ' --key PPP/corrFile ' + corrFile
                    key += ' --key PPP/rinexNav ' + rinexNav
                    key += ' --key PPP/rinexObs ' + rinexObs
                    key += ' --key PPP/snxtroPath ' + troFolder
                    key += ' --key PPP/staTable "' + station.upper()
                    +',0.01,0.01,0.01,100.0,100.0,100.0,0.1,3e-6,'"
                    key += ' --key PPP/crdFile /home/APRIORI.CRD'
                    key += ' --key PPP/antexFile /home/Input/igs08.atx'
                    key += ' --key PPP/mapSpeedSlider 100'
                    key += ' --key autoStart 2'
                    key += ' --nw'
                    os.system( bnc + ' ' + key)

                    dt = time.time()-tic
                else:
                    print(' Missing Corr File: + doy + '0.'+ yy +'C')
            else:
                print(' Missing Nav File: brdc'+ doy +'0.'+ yy +'p')
        else:
            print(' Missing Obs File: ' + station + doy + '0.'+ yy +'o')

```

### ก.2 คำสั่งดาวน์โหลดข้อมูล PWV จากชุดข้อมูล ERA5

ภาษา Python

```
def load_total_pwv():
    c = cdsapi.Client()
    for single_date in daterange(date(2019, 1, 1), date(2020, 1, 1)):
        ymd = single_date.strftime("%Y-%m-%d")
        yy,mm,dd = ymd.split('-')
        outfld = r'E:\ECWMF\total_pwv_column\2019'
        outfile = os.path.join(outfld, ymd.replace('-', '') + '.grib')
        if os.path.exists(outfile):
            continue
        print(outfile)
        c.retrieve(
            'reanalysis-era5-single-levels',
            {
                'product_type': 'reanalysis',
                'format': 'grib',
                'variable': 'total_column_water_vapour',
                'year': yy,
                'month': mm,
                'day': dd,
                'area': [21, 97, 5, 106], # North, West, South, East.
                'time': [
                    '00:00', '01:00', '02:00',
                    '03:00', '04:00', '05:00',
                    '06:00', '07:00', '08:00',
                    '09:00', '10:00', '11:00',
                    '12:00', '13:00', '14:00',
                    '15:00', '16:00', '17:00',
                    '18:00', '19:00', '20:00',
                    '21:00', '22:00', '23:00',
                ],
            },outfile)
```

### ก.3 แบบจำลองความดันและอุณหภูมิท้องถิ่น

ภาษา Python

```
from math import pi, sqrt, sin, tan, cos, atan2, floor,exp,pow,fabs
import numpy as np
def sphericalHM (dlat,dlon):
    """
    %%%%%%%%%%%
    % Create by : Chaiyut Charoenphon
    % Create Date: 05/01/2016
    %
    % Input: ellipsoidal Coordination
    % -----
    % dlat: latitude in radians
    % dlon: longitude in radians
```

```

%
% Output: longitude and latitude-related functions
% -----
%      aP : Pnm(sin?)cos(m?)
%      bP : Pnm(sin?)sin(m?)
% Reference:
% - J. Böhm, R. Heinkelmann, H. Schuh, Short Note: A Global Model of Pressure
% and Temperature for Geodetic Applications, Journal of Geodesy,
% doi:10.1007/s00190-007-0135-3, 2007.
% - Heiskanen and Moritz, Physical Geodesy, 1967
%
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% parameter t
'''
t = sin(dlat);

%% degree n and order m
n = 9;
m = 9;

%% determine n! (faktorielle) moved by 1
dfac = [x for x in range(1,22,1)]
dfac[1] = 1;
P = [
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
    [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
]
for i in range(1,(2*n + 2),1):
    dfac[i+1] = dfac[i]*i;
%% determine Legendre functions (Heiskanen and Moritz, Physical Geodesy, 1967,
eq. 1-62)
for i in range(0,n+1,1):
    for j in range(0,min(i,m)+1,1):
        ir = floor((i - j)/2);
        sum = 0;
        %% (Heiskanen and Moritz, Physical Geodesy, 1967, eq. 1-67)
        for k in range(0,ir+1,1):
            sum = sum + pow(-1,k)*dfac[2*i - 2*k + 1]/dfac[k +
1]/dfac[i - k + 1]/dfac[i - j - 2*k + 1]*pow(t,(i - j - 2*k));
        #print(sum);
        %% Legendre functions moved by 1
        P[i + 1][j + 1] = 1.0/pow(2,i)*sqrt(pow((1 - pow(t,2)),(j)))*sum

```

```

# #% spherical harmonics
i = 0;
aP = [x for x in range(0,56,1)]
bP = [x for x in range(0,56,1)]
for n in range(0,9+1,1):
    for m in range(0,n+1,1):
        i = i + 1;
        aP[i] = (P[n+1][m+1])*cos(m*dlon);
        bP[i] = (P[n+1][m+1])*sin(m*dlon);
return aP,bP

```

```

def CPT( dmjd,dlat,dlon,dhgt,IS_MSL=0):

```

```

'''
    % change the reference epoch to January 1 2000
    % reference day is 1 January
    % input data
    % -----
    % dmjd: modified julian date
    % dlat: latitude in radians
    % dlon: longitude in radians
    % dhgt: ellipsoidal height in m
    % IS_MSL : 1 is msl height, 0 is ellipsoidal height in meter
    % -----
    % output:
    % p = 1002.56 hPa
    % T = 22.12 deg Celsius
    % hort = (dhgt-undu) 44.06 m orthometric height

    % change the reference epoch to January 1 2000
'''
mjd = dmjd - 51544.5;
#%+++++
a_geoid = np.array([
    -5.6195e-001,-6.0794e-002,-2.0125e-001,-6.4180e-002,-3.6997e-002,
    +1.0098e+001,+1.6436e+001,+1.4065e+001,+1.9881e+000,+6.4414e-001,
    -4.7482e+000,-3.2290e+000,+5.0652e-001,+3.8279e-001,-2.6646e-002,
    +1.7224e+000,-2.7970e-001,+6.8177e-001,-9.6658e-002,-1.5113e-002,
    +2.9206e-003,-3.4621e+000,-3.8198e-001,+3.2306e-002,+6.9915e-003,
    -2.3068e-003,-1.3548e-003,+4.7324e-006,+2.3527e+000,+1.2985e+000,
    +2.1232e-001,+2.2571e-002,-3.7855e-003,+2.9449e-005,-1.6265e-004,
    +1.1711e-007,+1.6732e+000,+1.9858e-001,+2.3975e-002,-9.0013e-004,
    -2.2475e-003,-3.3095e-005,-1.2040e-005,+2.2010e-006,-1.0083e-006,
    +8.6297e-001,+5.8231e-001,+2.0545e-002,-7.8110e-003,-1.4085e-004,
    -8.8459e-006,+5.7256e-006,-1.5068e-006,+4.0095e-007,-2.4185e-008
]);

b_geoid = np.array([
    +0.0000e+000,+0.0000e+000,-6.5993e-002,+0.0000e+000,+6.5364e-002,
    -5.8320e+000,+0.0000e+000,+1.6961e+000,-1.3557e+000,+1.2694e+000,
    +0.0000e+000,-2.9310e+000,+9.4805e-001,-7.6243e-002,+4.1076e-002,
    +0.0000e+000,-5.1808e-001,-3.4583e-001,-4.3632e-002,+2.2101e-003,
    -1.0663e-002,+0.0000e+000,+1.0927e-001,-2.9463e-001,+1.4371e-003,

```

```

-1.1452e-002,-2.8156e-003,-3.5330e-004,+0.0000e+000,+4.4049e-001,
+5.5653e-002,-2.0396e-002,-1.7312e-003,+3.5805e-005,+7.2682e-005,
+2.2535e-006,+0.0000e+000,+1.9502e-002,+2.7919e-002,-8.1812e-003,
+4.4540e-004,+8.8663e-005,+5.5596e-005,+2.4826e-006,+1.0279e-006,
+0.0000e+000,+6.0529e-002,-3.5824e-002,-5.1367e-003,+3.0119e-005,
-2.9911e-005,+1.9844e-005,-1.2349e-006,-7.6756e-009,+5.0100e-008
]);
'''
%+++++
% Pressure
%+++++
'''
ap_mean = np.array([
+1.010892e+03, -4.867222e-02, +1.822971e-02, -3.324399e-03, +3.572836e-02,
-5.394712e-02, +9.686214e-02, -2.012361e-02, +5.192825e-01, -3.192717e-01,
+5.245234e-02, -1.204938e-01, +3.883340e-01, -1.588320e+00, +2.950686e+00,
-1.370723e-01, -5.211034e-02, -2.933797e+00, +2.334519e+00, +5.570869e-01,
-6.972455e-02
])

bp_mean = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +2.477534e-04, +0.000000e+00, -1.424533e-01,
+7.895489e-02, +0.000000e+00, -5.392283e-02, +2.792331e-01, -4.721353e-01,
+0.000000e+00, +4.900066e-01, -1.540758e-01, +1.702179e+00, -8.847168e-01,
+0.000000e+00, +4.783299e-01, -1.532571e+00, +1.668063e+00, +3.675336e-02,
-4.138129e-01
]);

ap_amp1 = np.array([
-1.843824e-02, -2.383413e-02, +1.660221e-03, -1.457648e-02, +6.580735e-03,
+8.678801e-03, -9.428315e-03, +5.177435e-03, +1.052723e-01, -1.455655e-02,
-4.073616e-03, +2.213355e-02, +1.784970e-01, -1.298671e-01, +8.467440e-02,
+5.748023e-02, +4.864313e-02, +1.327358e+00, +7.816825e-01, +1.488882e-02,
-3.590427e-02
]);

bp_amp1 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, -8.772996e-03, +0.000000e+00, -4.223774e-02,
+4.827876e-03, +0.000000e+00, -5.505014e-02, +3.333848e-02, -6.194419e-04,
+0.000000e+00, -1.434603e-01, +2.823686e-03, +2.583480e-01, -3.574601e-02,
+0.000000e+00, -2.134249e-01, +4.058633e-01, +6.895960e-02, -1.099031e-01,
-2.140345e-02
]);

ap_amp2 = np.array([
+2.094551e-02, +2.750853e-02, +5.352021e-04, +9.431700e-03, -9.746308e-03,
-2.134481e-02, -1.236653e-02, -1.226534e-02, -1.904130e-01, -6.079823e-02,
-8.006710e-03, -4.461185e-03, -1.552058e-01, +2.959871e-01, +2.084297e-01,
-1.699338e-02, -5.613425e-03, -3.508158e-01, +1.548402e-01, -7.923722e-04,
-3.094693e-02
]);

```

```

bp_amp2 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +1.286373e-02, +0.000000e+00, +6.051707e-02,
+7.542718e-03, +0.000000e+00, +4.558401e-02, -6.121856e-02, -5.698610e-02,
+0.000000e+00, +7.844322e-03, -9.504775e-02, -6.099932e-01, -3.699952e-01,
+0.000000e+00, +5.649467e-02, -1.693623e-01, +3.305432e-01, -4.767056e-02,
-4.294397e-02
]);

```

```

ap_amp3 = np.array([
-9.052975e-03, -1.290641e-02, -9.954493e-04, -6.699791e-03, +3.250406e-03,
+7.391858e-03, +3.807220e-04, +5.105764e-03, +7.536761e-02, +4.119862e-02,
+1.598106e-03, +7.512822e-03, +9.467779e-02, -7.710363e-02, -1.072965e-01,
+1.977249e-02, +1.418844e-02, +4.447053e-01, +1.816487e-01, +2.243863e-02,
+1.016400e-02
]);

```

```

bp_amp3 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, -4.787202e-03, +0.000000e+00, -2.581067e-02,
-6.683890e-03, +0.000000e+00, -2.745042e-02, +1.788199e-02, +2.260840e-02,
+0.000000e+00, -4.061706e-02, +2.628224e-02, +2.297646e-01, +2.116129e-01,
+0.000000e+00, -6.541473e-02, +1.455526e-01, +2.110150e-02, -2.903848e-02,
+7.906671e-03
]);

```

```

ap_amp4 = np.array([
+9.661741e-03, +1.401484e-02, -2.401224e-03, +4.419539e-03, -6.882347e-03,
-3.779642e-03, -8.470225e-03, -3.441322e-03, -9.855427e-02, +3.007053e-02,
-4.843522e-03, +2.973139e-03, -8.338965e-02, +2.305922e-01, -2.010147e-01,
-3.463871e-03, -1.703996e-03, -7.498349e-02, -1.824914e-02, -9.731924e-03,
+2.278073e-03
]);

```

```

bp_amp4 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +5.320187e-03, +0.000000e+00, +3.158366e-02,
-8.783372e-03, +0.000000e+00, +2.244901e-02, -4.570417e-02, +2.118533e-02,
+0.000000e+00, -1.057532e-02, -3.098639e-02, -2.982728e-01, +6.212697e-02,
+0.000000e+00, +1.481098e-02, -2.802378e-02, +9.832486e-02, -3.423242e-02,
+1.540463e-02
]);

```

```

'''
%+++++
% Temperature
%+++++
'''

```

```

at_mean = np.array([
+2.852306e+01, -1.884591e-01, -7.668248e-03, -7.375789e-02, +5.902513e-02,
+1.628582e-01, +5.013676e-02, +8.627457e-02, +1.215849e+00, +4.812244e-01,
+3.939755e-02, +7.304826e-02, +1.133750e+00, -1.627053e+00, -2.078146e+00,
+1.921217e-01, +9.654392e-02, +4.143076e+00, -4.645584e-01, +4.385990e-02,
+1.894726e-01
]);

```

```

bt_mean = np.array([

```

```
+0.000000e+00, +0.000000e+00, -9.239613e-02, +0.000000e+00, -3.980853e-01,
-6.886118e-02, +0.000000e+00, -3.371473e-01, +3.519740e-01, +5.011482e-01,
+0.000000e+00, -2.882652e-01, +6.190629e-01, +3.832184e+00, +2.672290e+00,
+0.000000e+00, -6.362012e-01, +1.729005e+00, -1.724852e+00, +1.414199e-01,
+3.124967e-01
```

```
]);
```

```
at_amp1 = np.array([
+5.055433e-02, +5.994779e-02, +6.856827e-03, +3.129654e-02, -1.280548e-02,
-5.839265e-02, +1.118152e-02, -3.212903e-02, -3.166419e-01, -2.410407e-01,
+2.061286e-03, -5.926995e-02, -3.678281e-01, +1.933984e-01, +1.171380e+00,
-1.196108e-01, -7.452833e-02, -2.640409e+00, -1.832870e-01, +9.512814e-02,
-5.089905e-02
```

```
]);
```

```
bt_amp1 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +2.954011e-02, +0.000000e+00, +1.135517e-01,
+4.216909e-02, +0.000000e+00, +1.241552e-01, -5.847259e-02, -2.326152e-01,
+0.000000e+00, +2.741419e-01, -1.957574e-01, -9.513835e-01, -1.136284e+00,
+0.000000e+00, +4.232583e-01, -1.040146e+00, +7.756379e-01, +8.510374e-02,
-1.630158e-01
```

```
]);
```

```
at_amp2 = np.array([
-3.482558e-02, -4.780073e-02, +4.809270e-03, -2.757590e-02, +1.885069e-02,
+1.274227e-02, -9.258300e-03, +2.538437e-02, +2.287183e-01, -2.599413e-02,
-1.129999e-03, +4.544314e-02, +3.001729e-01, -4.301144e-01, +2.340938e-01,
+9.465919e-02, +4.687341e-02, +2.072097e+00, -7.104465e-01, -1.841612e-01,
+1.908230e-02
```

```
]);
```

```
bt_amp2 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, -1.617053e-02, +0.000000e+00, -8.866015e-02,
+1.273518e-02, +0.000000e+00, -1.056768e-01, +1.034596e-01, -2.137277e-02,
+0.000000e+00, -2.201807e-01, +2.073911e-01, +5.765749e-01, +1.961207e-02,
+0.000000e+00, -3.437435e-01, +9.287935e-01, -9.996136e-01, +7.172012e-02,
+3.642841e-02
```

```
]);
```

```
at_amp3 = np.array([
+1.816475e-02, +2.982211e-02, +2.039026e-03, +2.172985e-02, -7.142328e-03,
-4.918072e-03, +1.465577e-02, -1.631348e-02, -1.258170e-01, -9.234066e-02,
+4.446380e-03, -3.856942e-02, -2.185022e-01, +8.423517e-02, +1.273771e-01,
-7.818888e-02, -5.124028e-02, -1.746669e+00, -1.762876e-01, +7.374928e-02,
-2.341071e-02
```

```
]);
```

```
bt_amp3 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +6.606802e-03, +0.000000e+00, +5.149432e-02,
+1.506762e-02, +0.000000e+00, +7.667428e-02, -3.018114e-02, -1.248579e-02,
+0.000000e+00, +1.972592e-01, -9.539497e-02, -3.170350e-01, -4.527891e-01,
+0.000000e+00, +2.824343e-01, -6.705847e-01, +3.894929e-01, +8.461483e-02,
```

```

-3.276548e-02
]);

at_amp4 = np.array([
+1.107979e-02, +1.460684e-02, +4.969003e-03, +9.310627e-03, -3.521190e-04,
-1.590177e-02, +5.561407e-03, -8.330922e-03, -7.507249e-02, -1.306867e-01,
+9.365290e-04, -1.794143e-02, -1.109111e-01, -5.271107e-02, +5.150452e-01,
-3.566474e-02, -2.625327e-02, -7.996693e-01, -3.346342e-01, -2.904673e-02,
-2.636359e-02
]);

bt_amp4 = np.array([
+0.000000e+00, +0.000000e+00, +6.272492e-03, +0.000000e+00, +2.670773e-02,
+2.536624e-02, +0.000000e+00, +3.496479e-02, +5.210219e-03, -8.695231e-02,
+0.000000e+00, +8.624950e-02, -3.259672e-02, -2.429669e-01, -5.743642e-01,
+0.000000e+00, +1.186463e-01, -2.674783e-01, -2.756823e-02, +8.650385e-02,
-4.773572e-02
]);
#%+++++
[aP,bP]= sphericalHM(dlat, dlon);
aP = np.array(aP)
bP = np.array(bP)
#% Geoid height
n = len(a_geoid)+1;
undu = aP[1:n].dot(a_geoid) + bP[1:n].dot(b_geoid);

n = len(ap_mean)+1;
avg = aP[1:n].dot(ap_mean) + bP[1:n].dot(bp_mean);
a1 = aP[1:n].dot(ap_amp1) + bP[1:n].dot(bp_amp1);
a2 = aP[1:n].dot(ap_amp2) + bP[1:n].dot(bp_amp2);
a3 = aP[1:n].dot(ap_amp3) + bP[1:n].dot(bp_amp3);
a4 = aP[1:n].dot(ap_amp4) + bP[1:n].dot(bp_amp4);
pres0 = avg + a1*cos(2*pi*(mjd)/365.5) + a2*sin(2*pi*(mjd)/365.5) +
a3*cos(4*pi*(mjd)/365.5) + a4*sin(4*pi*(mjd)/365.5);

n = len(at_mean)+1;
avg= aP[1:n].dot(at_mean) + bP[1:n].dot(bt_mean);
a1 = aP[1:n].dot(at_amp1) + bP[1:n].dot(bt_amp1);
a2 = aP[1:n].dot(at_amp2) + bP[1:n].dot(bt_amp2);
a3 = aP[1:n].dot(at_amp3) + bP[1:n].dot(bt_amp3);
a4 = aP[1:n].dot(at_amp4) + bP[1:n].dot(bt_amp4);
temp0 = avg + a1*cos(2*pi*(mjd)/365.5) + a2*sin(2*pi*(mjd)/365.5) +
a3*cos(4*pi*(mjd)/365.5) + a4*sin(4*pi*(mjd)/365.5);

#% height correction for pressure
#% orthometric height

hort = dhgt if IS_MSL==1 else dhgt - undu;
p = pres0*pow(1.0-0.00002260*hort,5.2250);

t = temp0 - 0.00650*hort;
return p,t,hort

```



#### ก.4 การแก้ปัญหามินเวอรัส์ด้วยวิธี Tikhonov Regularization และ SVD (Matlab)

```

%Original Source
%https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/58736-regularized-least-square--
tikhonov-regularization-test-for-hilbert-matrix?focused=6690353

% another method can be found
% http://www2.compute.dtu.dk/~pcha/Regutools/
% https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52-
regtools?focused=3860038&tab=function
%-----%
%-- demonstrating ill-conditioned system
%-----%

clc
close
clear

%-----%

A    = hilb(10);           % create a Hilbert matrix
x_true = [ 55 44 33 44 22 12 10 15 18 20]'; % Ax = B
B_true = A*x_true;       % Compute B

%-----%
%-- add perturbation and compute error

B_perturb = B_true;
B_perturb(1) = B_perturb(1) + 0.2;

% compute least square solutions and error

x_lls      = A\B_true;
x_perturb_lls = A\B_perturb;

error1     = norm(x_true-x_lls);
error2     = norm(x_true-x_perturb_lls);

%-----%
%-- least square computed using Singular Value Decomposition -----
%-- which is equivalent to Matlab back slash operator -----
%-----%

[U , S, V] = svd(A);
s          = diag(S);
x_svd     = V*((U'*B_true)./s); % least square using svd
x_perturb_svd = V*((U'*B_perturb)./s); % least square using svd
error_perturb = norm(x_true-x_perturb_svd);

%-----%

```

```

%-- Tikhonov Regularization
%-----%

lambda      = linspace(0,.5,50);    % regularization parameter
error_regu  = zeros(1,50);
for i = 1:length(lambda)
    x_regu_svd      = V*(s.*(U*B_perturb)./(s.^2+lambda(i))); %
    error_regu(i)   = norm(x_true-x_regu_svd);
end

%-----%
% visualize error for different regularization parameter
figure(1)
plot(lambda,log10(error_regu),'linewidth',2)
xlabel('Regularization parameter \lambda')
ylabel('norm error')

%-----%
%-- choose lambda = 0.0102
%-----%

x_regu_svd      = V*(s.*(U*B_perturb)./(s.^2+0.0102));

%-----%
% visualize data with and without regularization and compare with true
% data values

figure(2)
plot(1:length(x_true),log10(x_true))
xlabel('data indices')
ylabel('log of data values')
hold on
plot(1:length(x_true),log10(x_perturb_svd),'r')
plot(1:length(x_true),log10(x_regu_svd),'k')
legend('true data value','least square estimate',...
      'least square estimate with regularization','Location','northwest')

%-----%

```

## บรรณานุกรม

- Abd-Elazeem, M., Farah, A., & Farrag, F. (2011). Assessment Study of Using Online (CSRS) GPS-PPP Service for Mapping Applications in Egypt. *Journal of Geodetic Science*, 1(3), 233-239. doi:10.2478/v10156-011-0001-3
- Abdelazeem, M., & Celik, R. (2014). Accuracy and Repeatability Investigation of CSRS-PPP Online Processing Service. *Coordinates*, 2, 41-49.
- Ahmed, F., Václavovic, P., Teferle, F. N., Douša, J., Bingley, R., & Laurichesse, D. (2014). Comparative analysis of real-time precise point positioning zenith total delay estimates. *GPS Solutions*, 20(2), 187-199. doi:10.1007/s10291-014-0427-z
- Andrei, O., & Ruizhi, C. (2007). Tropospheric Delay Estimation Based on Numerical Weather Model. *Cadastre Journal RevCAD*.
- Arabi, M., & Nankali, H. R. (2017). Accuracy Assessment of Online PPP Services in Static Positioning and Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Estimation. *Geospatial Engineering Journal*, 8(3), 59-69.
- Bennitt, G. V., & Jupp, A. (2012). Operational Assimilation of GPS Zenith Total Delay Observations into the Met Office Numerical Weather Prediction Models. *Monthly Weather Review*, 140(8), 2706-2719. doi:10.1175/mwr-d-11-00156.1
- 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, 15. doi:10.1029/92JD01517
- Boehm, J. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1). doi:10.1029/2003gl018984
- Boehm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683. doi:10.1007/s00190-007-0135-3
- Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., & Weber, R. (2014). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, 19(3), 433-441. doi:10.1007/s10291-014-0403-7

- Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B2). doi:<https://doi.org/10.1029/2005JB003629>
- Bos, M. S., & Scherneck, H.-G. (2019, January 6, 2019). Welcome to the free ocean tide loading provider Retrieved from <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>
- Burrus, C. S. (2012). Iterative Reweighted Least Squares. Retrieved from <https://cnx.org/exports/92b90377-2b34-49e4-b26f-7fe572db78a1@12.pdf/iterative-reweighted-least-squares-12.pdf>
- Charoenphon, C., & Satirapod, C. (2019). Monitoring Precipitable Water Vapor in Real-Time using Kinematic GPS Precise Point Positioning in Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 15(1), p37-46.
- Chen, B., & Liu, Z. (2016). A Comprehensive Evaluation and Analysis of the Performance of Multiple Tropospheric Models in China Region. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 663-678. doi:10.1109/Tgrs.2015.2456099
- D. Laurichesse, & Blot, A. (2016). *Fast PPP Convergence Using MultiConstellation and Triple-Frequency Ambiguity Resolution*. Paper presented at the ION GNSS 2016, September 12-16, Portland, Oregon.
- Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. (1991). Effects of atmospheric modeling errors on determinations of baseline vectors from very long baseline interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B1), 643-650. doi:10.1029/90JB01503
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607. doi:10.1029/RS020i006p01593
- De Haan, S. (2006). National/Regional operational procedures of gps water vapour networks and agreed international procedures. *WMO/TD No. 1340, KNMI, Netherlands*, 20 pp.
- Dousa, J., & Bennitt, G. V. (2013). Estimation and evaluation of hourly updated global GPS Zenith Total Delays over ten months. *GPS Solut.*, 17(4), 453-464. doi:10.1007/s10291-012-0291-7

- Dousa, J., & Vaclavovic, P. (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*, 53(9), 1347-1358. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.021>
- Dragert, H., James, T. S., & Lambert, A. (2000). Ocean loading corrections for continuous GPS: A case study at the Canadian coastal site Holberg. *Geophysical Research Letters*, 27(14), 2045-2048. doi:10.1029/2000GL011536
- Ebner, R., & Featherstone, W. (2008). How Well Can Online GPS PPP Post-processing Services be Used to Establish Geodetic Survey Control Networks? *Journal of Applied Geodesy*, 2. doi:10.1515/JAG.2008.017
- El-Hattab, A. I. (2019). Influence of GPS antenna phase center variation on precise positioning. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(2), 272-277. doi:10.1016/j.nrjag.2013.11.002
- Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. (1991). Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B4), 6541-6555. doi:10.1029/90jb00834
- Elsobeiey, M., & Al-Harbi, S. (2015). Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. *GPS Solutions*, 20(3), 565-571. doi:10.1007/s10291-015-0467-z
- Elsobeiey, M., & El-Diasty, M. (2016). Impact of Tropospheric Delay Gradients on Total Tropospheric Delay and Precise Point Positioning. *International Journal of Geosciences*, 07(05), 645-654. doi:10.4236/ijg.2016.75050
- Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M., Liu, Y., & Ramatschi, M. (2004). Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 82(1B), 361-370. doi:10.2151/jmsj.2004.361
- Georg, W., Leoš, M., Andrea, S., Axel, R., & Dirk, S. (2020). BNC online documentation. Retrieved from <http://software.rtcn-ntrip.org/export/HEAD/ntrip/trunk/BNC/src/bnchelp.html>
- Gutman, S. I., & Benjamin, S. G. (2001). The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Prediction. *GPS Solutions*, 4(4), 16-24. doi:10.1007/pl00012860

- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy* (A. W. James Gilfu'ly Ed.). San Francisco: Freeman and Company.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Austria: Springer-Verlag Wien.
- Hopfield, H. S. (1971). Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data. *Radio Science*, 6(3), 357-367.  
doi:10.1029/RS006i003p00357
- Jiang, J., Zhou, T., & Zhang, W. (2019). Evaluation of Satellite and Reanalysis Precipitable Water Vapor Data Sets Against Radiosonde Observations in Central Asia. *Earth and Space Science*, 6(7), 1129-1148. doi:10.1029/2019ea000654
- Jiang, P., Ye, S., Chen, D., Liu, Y., & Xia, P. (2016). Retrieving Precipitable Water Vapor Data Using GPS Zenith Delays and Global Reanalysis Data in China. *Remote Sensing*, 8(5). doi:10.3390/rs8050389
- Karl, H. (2020). ERA5: data documentation. Retrieved from <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), 12-28. doi:10.1007/pl00012883
- Kress, R. (1998). "Tikhonov Regularization". Numerical Analysis. In (pp. 86–90). New York: Springer.
- Landskron, D., & Bohm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *J Geod*, 92(4), 349-360. doi:10.1007/s00190-017-1066-2
- Laurichesse, D. (2011, September 2011). *The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator*. Paper presented at the ION GNSS 2011, Portland, Oregon.
- Li, X., Dick, G., Ge, M., Heise, S., Wickert, J., & Bender, M. (2014). Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3615-3621. doi:10.1002/2013gl058721
- Li, Z. W., Tang, C. Z., Tang, S. H., & Zhang, Y. (2020). Comparison of Gns Pwv and Era5-Derived Pwv Based on Gns Pwv in Hong Kong, China. *ISPRS - International*

- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-3/W10*, 987-993. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-987-2020
- Lu, C., Li, X., Cheng, J., Dick, G., Ge, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2018). Real-Time Tropospheric Delay Retrieval from Multi-GNSS PPP Ambiguity Resolution: Validation with Final Troposphere Products and a Numerical Weather Model. *Remote Sensing*, 10(3). doi:10.3390/rs10030481
- Lu, C. X., Li, X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M. R., Glaser, S., & Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. doi:10.1007/s00190-015-0818-0
- Mendes, V. B., Prates, G., Santos, L., & Langley, R. B. (2000). An evaluation of the accuracy of models for the determination of weighted mean temperature of the atmosphere. *Proceedings of ION 2000 national technical meeting*.
- Mendez Astudillo, J., Lau, L., Tang, Y. T., & Moore, T. (2018). Analysing the Zenith Tropospheric Delay Estimates in On-line Precise Point Positioning (PPP) Services and PPP Software Packages. *Sensors (Basel)*, 18(2). doi:10.3390/s18020580
- Niell, A. E. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 699-702. doi:10.1186/bf03352267
- Ocalan, T., Erdogan, B., & Tunalioglu, N. (2013). Analysis of Web-Based Online Services for GPS Relative and Precise Point Positioning Techniques. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 19, 191-207. doi:10.1590/S1982-21702013000200003
- Oliveira, P. S., Morel, L., Fund, F., Legros, R., Monico, J. F. G., Durand, S., & Durand, F. (2016). Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. *GPS Solutions*, 1-14. doi:10.1007/s10291-016-0518-0
- Petit, G., & Luzum, B. (2010). *"IERS Conventions (2010)". IERS Technical Note No. 36*. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp.
- Rohm, W., Yuan, Y., Biadeglne, B., Zhang, K., & Marshall, J. L. (2014). Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. *Atmospheric Research*, 138, 414-426. doi:10.1016/j.atmosres.2013.11.026

- S. Katsougiannopoulos, C. P., D. Rossikopoulos, I. M. Ifadis and A. Fotiou. (2006). *Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data*. Paper presented at the XXIII International FIG Congress, Munich, Germany.
- Saastamoinen, J. (1972a). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *15*, 247-251. doi:10.1029/GM015p0247
- Saastamoinen, J. (1972b). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 105(1), 279-298. doi:10.1007/bf02521844
- Satirapod C., & P., C. (2005). Impact of Different Tropospheric Models on GPS Baseline Accuracy: Case Study in Thailand. *Positioning*, Vol. 1 No. 9.
- Shi, J., Wang, G., Han, X., & Guo, J. (2015). Impacts of real-time satellite clock errors on GPS precise point positioning-based troposphere zenith delay estimation. *Journal of Geodesy*, 89(8), 747-756. doi:10.1007/s00190-015-0811-7
- Shi, J., Xu, C., Guo, J., & Gao, Y. (2015). Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3452-3459. doi:10.1109/TGRS.2014.2377041
- 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 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Oregon Convention Center, Portland, Oregon, Sept. 12-16.
- Thomas, I. D., King, M. A., Clarke, P. J., & Penna, N. T. (2011). Precipitable water vapor estimates from homogeneously reprocessed GPS data: An intertechnique comparison in Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 116(D4). doi:10.1029/2010jd013889
- Vedel, H., & Huang, X.-Y. (2004). Impact of Ground Based GPS Data on Numerical Weather Prediction. *The meteorological Society of Japan*, 82(1B), 459-472. doi:10.2151/jmsj.2004.459
- Vey, S., Calais, E., Llubes, M., Florsch, N., Woppelmann, G., Hinderer, J., Amalvict, M., Lalancette, M. F., Simon, B., Duquenne, F., & Haase, J. S. (2002). GPS



- measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates: a case study in Brittany, France. *Journal of Geodesy*, 76(8), 419-427. doi:10.1007/s00190-002-0272-7
- Wang, G., & Zhao, Q. (2012). Preliminary Analysis of Real-Time Orbit and Clock Error Based on BNC. *160*, 189-196. doi:10.1007/978-3-642-29175-3\_17
- Wang, J., Zhang, L., & Dai, A. (2005). Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications. *Journal of Geophysical Research*, 110(D21). doi:10.1029/2005jd006215
- Wang, X., Zhang, K., Wu, S., Fan, S., & Cheng, Y. (2016). Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2), 833-852. doi:10.1002/2015jd024181
- Weber, G., Dettmering, D., & Gebhard, H. (2005). *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)*, Berlin, Heidelberg.
- Weber, G., Mervart, L., Stürze, A., Rülke, A., & Stöcker, D. (2016). *BKG Ntrip Client, Version 2.12*. (Vol. 49). Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany: Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG)
- Welch, B. L. (1947). The Generalization of 'Student's' Problem when Several Different Population Variances are Involved. *Biometrika*, 34(1/2), 28-35. doi:10.2307/2332510
- Xu, A., Xu, Z., Ge, M., Xu, X., Zhu, H., & Sui, X. (2013). Estimating zenith tropospheric delays from BeiDou navigation satellite system observations. *Sensors (Basel)*, 13(4), 4514-4526. doi:10.3390/s130404514
- Xu, G. (2007). *GPS Theory Algorithms and Applications* (2 ed.). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yao, Y., Xu, C., Shi, J., Cao, N., Zhang, B., & Yang, J. (2015). ITG: A New Global GNSS Tropospheric Correction Model. *Sci Rep*, 5, 10273. doi:10.1038/srep10273
- Yao, Y., Xu, C., Zhang, B., & Cao, N. (2014). GTm-III: a new global empirical model for mapping zenith wet delays onto precipitable water vapour. *Geophysical Journal International*, 197(1), 202-212. doi:10.1093/gji/ggu008

- Yao, Y., Zhang, B., Yue, S. Q., Xu, C. Q., & Peng, W. F. (2013). Global empirical model for mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Geodesy*, 87(5), 439-448. doi:10.1007/s00190-013-0617-4
- Yuan, Y. B., Zhang, K. F., Rohm, W., Choy, S., Norman, R., & Wang, C. S. (2014). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 119(16), 10044-10057. doi:10.1002/2014JD021486
- Zhang, L., Yang, H., Gao, Y., Yao, Y., & Xu, C. (2018). *Evaluation and Analysis of Real-Time Precise Orbits and Clocks Products from Different IGS Analysis Centers*.
- Zhang, Q., Ye, J., Zhang, S., & Han, F. (2018). Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-Based GNSS, Radio Occultation, Radiosonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data. *Journal of Sensors*, 2018, 1-13. doi:10.1155/2018/3428303
- ZHANG Xiaohong, Z. F., LI Pan, ZHAI Guang. (2013). Zenith Troposphere Delay Interpolation Model for Regional CORS Network Augmented PPP. *GEOMATICS AND INFORMATION SCIENCE OF WUHAN UNIVERS*, 38(6), 679-683.
- Zhang, Y., Cai, C., Chen, B., & Dai, W. (2019). Consistency Evaluation of Precipitable Water Vapor Derived From ERA5, ERA-Interim, GNSS, and Radiosondes Over China. *Radio Science*. doi:10.1029/2018rs006789
- Zus, F., Douša, J., Kačmarík, M., Václavovic, P., Balidakis, K., Dick, G., & Wickert, J. (2019). Improving GNSS Zenith Wet Delay Interpolation by Utilizing Tropospheric Gradients: Experiments with a Dense Station Network in Central Europe in the Warm Season. *Remote Sensing*, 11(6). doi:10.3390/rs11060674
- ชัยยุทธ เจริญผล, & เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2560, 9-10 กุมภาพันธ์ 2560). การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการหาปริมาณไอน้ำในอากาศในทันทีด้วยวิธี การหาดำแหน่งด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในพื้นที่กรุงเทพมหานคร. Paper presented at the Geoinfotech 2017, Bangkok, Thailand.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชัยยุทธ เจริญผล
วัน เดือน ปี เกิด	23 กุมภาพันธ์ 2523
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	119/1 ถนนกาญจนาภิเษก (ฝั่งใต้) แขวงแสมดำ บางขุนเทียน กทม 10150
ผลงานตีพิมพ์	<p>Charoenphon, C., &amp; Satirapod, C. (2020). Improving the Accuracy of Real-Time Precipitable Water Vapour using Country-wide Meteorological Model with Precise Point Positioning in Thailand. <i>Journal of Spatial Science</i> (Online). doi:<a href="https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1758969">https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1758969</a></p> <p>Charoenphon, C., &amp; Satirapod, C. (2019). Monitoring Precipitable Water Vapor in Real-Time using Kinematic GPS Precise Point Positioning in Thailand. <i>International Journal of Geoinformatics</i>, 15(1), p37-46.</p> <p>Charoenphon, C., &amp; Satirapod, C. (2018). Monitoring precipitable water vapor in real-time using kinematic GPS precise point positioning in Thailand. In proceedings the International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC). Thailand: ITC_CSCC.</p> <p>Charoenphon, C., &amp; Satirapod, C. (2017). A Preliminary study for real-time estimation of precipitable water vapor using GNSS precise point positioning in Thailand. In proceedings on 38th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), New Delhi, India.</p> <p>Prakanrattana, K., Charoenphon, C., &amp; Satirapod, C. (2017). Comparative study of using different ionosphere models in</p>

Thailand for single-frequency GPS users. In proceedings on 38th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), New Delhi, India.

ชัยยุทธ เจริญผล และเฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2560). การศึกษาเบื้องต้น สำหรับการหาปริมาณไอน้ำในอากาศในทันทีด้วยวิธี การหาตำแหน่งด้วย ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการ เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ แห่งชาติ 2560, กรุงเทพฯ.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY