

การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Performance assessment of Virtual RINEX for cadastral surveying in Thailand



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

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย
โดย	น.ส.สิริธร เปรียบจัตุรัส
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ดร.ชัยโชค ไวกาษา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญูตา)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวกสุระสิงห์)	

สิริธร เปรียบจัตุรัส : การประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย. (Performance assessment of Virtual RINEX for cadastral surveying in Thailand) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธีทัต เจริญภาลัญญูตา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ในซอฟต์แวร์หลายยี่ห้อเพื่อนำมาใช้งานแทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (Network-based Real time Kinematic - NRTK) ด้วยเทคนิคสถานีฐานอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station - VRS) โดยเทคนิคสถานีฐานอ้างอิงเสมือนยังสามารถทำงานแบบการประมวลผลภายหลัง (Post-processing VRS) ได้โดยการสร้างไฟล์สถานีฐานอ้างอิงเสมือน Virtual RINEX ผ่านเว็บไซต์ CORS WEB โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วยหมุดทดสอบทั้งหมด 374 หมุด จากพื้นที่ให้บริการโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร จำนวน 204 ลูบ ที่ครอบคลุมพื้นที่ 36 จังหวัดในประเทศไทย แบ่งหมุดทดสอบโดยใช้ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร โดยข้อมูลหมุดทดสอบทำการรังวัด 3 วิธีได้แก่ 1) การรังวัดแบบสถิติ จำนวน 60 นาที สำหรับใช้เป็นค่าพิกัดอ้างอิง และ 2) การรังวัด NRTK VRS จำนวน 3 นาที 3) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ผ่านซอฟต์แวร์ 3 ค่าย ได้แก่ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ผลการศึกษาพบว่าขนาดของลูบมีผลต่อประสิทธิภาพของการรังวัด VRS และ Virtual RINEX กล่าวคือลูบขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าลูบขนาดใหญ่และทุกขนาดของลูบของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 ,CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ให้ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการรังวัดแปลงที่ดิน ดังนั้นควรเพิ่มสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณแบบต่อเนื่องถาวรเพิ่มเติมและควรตรวจสอบเพื่อจัดการกับค่ากระโดดก่อนนำเอาค่าพิกัดมาใช้งาน อีกทั้งควรใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้ออื่นๆ เพิ่มเติมนอกจาก CHC รุ่น i80 สำหรับการศึกษาในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170305721 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: VRS, Virtual RINEX, Post-Processing VRS, Cadastral surveying

Sireetorn Priabjaturat : Performance assessment of Virtual RINEX for cadastral surveying in Thailand. Advisor: Asst. Prof. TEETAT CHAROENKALUNYUTA, Ph.D.

This research aims to evaluate horizontal positioning accuracies obtaining from virtual reference station (VRS) observations; in virtual RINEX format, computed in post-processing format using available software packages in order to provide different analysis strategies apart from the conventional VRS Network-based Real-Time Kinematic (NRTK) positioning commonly used in cadastral surveys. This VRS-based positioning can be operated in post-processing baseline mode by generating a virtual-RINEX observation data via the CORS WEB website. This study has applied 374 test points collected from 204 triangular loops created from GNSS CORS network across Thailand. They are divided into five groups based on their loop spacing lengths of: 10-30, 30-50, 50-70, 70-90, and 90-110 kilometers. Determined positions are estimated within post-processing modes by applying three different scenarios; namely, 1) a 60-minute static survey assigned as the network ground truths, 2) a 3-minute NRTK VRS positioning given as testing points and 3) a virtual RINEX positioning determined from three selected data processing software comprising of TBC 5.0, CGO2, and RTKLIB 2.4.3, also used as testing points. The result shows that obtained horizontal positioning accuracies; indicated in computed RMSEs, are less than 4 centimeters for every baseline lengths of the triangular loops estimating from the virtual RINEX observations and their positioning are undertaken from TBC 5.0, CGO2, and RTKLIB 2.4.3 software suites; therefore, it could be concluded that the post-processing VRS-based positioning is appropriate for cadastral mapping applications in Thailand. Efficiencies of this cadastral survey scheme could be enhanced by: contributing more GNSS CORS observations into the network in order to increase detections of measurement errors such as jumps in horizontal positions before outputting results as well as obtaining more data from other available rover receivers; along with the currently used model, to the analyses, however, this does provide a logical direction for some further works.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความกรุณาช่วยเหลือ แนะนำ และสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายท่านด้วยกัน โดยเฉพาะผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญา ซึ่ง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ที่กรุณาให้เกียรติ เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง อ.ดร.ชัยโชค ไวกาษา ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการ ภายนอกมหาวิทยาลัยในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งทุกท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ ช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง จนกระทั่งการทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนรู้สึก ซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน ที่เอื้อเฟื้อและให้ความ อนุเคราะห์ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อประกอบการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร. ทยาทิพย์ ทองตัน ที่ช่วยให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขการใช้ ภาษาอังกฤษในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ และกัลยาณมิตร ของผู้เขียนทุกท่าน สำหรับมิตรภาพ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่มอบสิ่งที่ดี ความห่วงใย การสนับสนุนและ โอกาสที่ดีทางการศึกษากับผู้เขียนมาโดยตลอด ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะ ก่อให้เกิดประโยชน์ไม่มากนักน้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขอภัยเป็น อย่างสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สิริธร เปรียบจตุรัส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา.....	4
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	4
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	5
1.3.4 เว็บไซต์และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
1.3.5 เครื่องมือสำรวจรังวัดดาวเทียม (ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมจาก กรมที่ดิน).....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1.1 การรังวัดแบบสถิต (Static Survey).....	8
2.1.2 การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (Real-time kinematic survey: RTK).....	8

2.1.3	โครงข่าย CORS.....	9
2.1.4	ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network : NRTK)	9
2.1.5	ระบบ Virtual Reference Station (VRS)	10
2.1.6	Virtual RINEX	12
2.1.7	การหาค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE).....	13
2.1.8	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD หรือ σ) และการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution).....	14
2.1.9	ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network).....	15
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2.1	Virtual RINEX	16
2.2.2	Virtual Reference Station (VRS).....	20
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	21
3.1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
3.2	ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.3	ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.4	การประมวลผลข้อมูล.....	23
3.5	วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผล.....	25
บทที่ 4	ผลการศึกษาวิจัย	26
4.1	ผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน .	26
4.2	ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS	28
4.3	ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX.....	33

4.4 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ของตำแหน่งทางราบ.....	51
4.4.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0	51
4.4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2 ...	54
4.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3.....	57
4.5 การทดสอบทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบ.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย	71
5.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3.....	71
5.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 แบบรายวินาที.....	72
5.3 สรุปผลการทดสอบทางสถิติ	78
5.4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	79
5.4.1 ข้อเสนอสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3.....	79
5.4.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก. รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย	82

บรรณานุกรม..... 91

ประวัติผู้เขียน..... 95



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การตั้งค่าพื้นฐานของแต่ละซอฟต์แวร์	24
ตารางที่ 2 ตารางการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน จำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบ	26
ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียม แบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของตำแหน่งทางราบ.....	28
ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร.....	33
ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร.....	37
ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร.....	40
ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร.....	44
ตารางที่ 8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร.....	47
ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และ การรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0.....	52
ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2.....	55
ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3.....	58
ตารางที่ 12 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ ช่วงเวลา 1 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที.....	61

ตารางที่ 13 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่
ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผล
ภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร..... 64

ตารางที่ 14 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่
ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผล
ภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร..... 66

ตารางที่ 15 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่
ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผล
ภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร..... 69



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Stations) ของประเทศไทย จาก 6 หน่วยงาน (กรมแผนที่ทหาร, 2563).....	2
ภาพที่ 2 เว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน	3
ภาพที่ 3 ตำแหน่งของ CORS และหมุดทดสอบ (กรมที่ดิน, 2563)	5
ภาพที่ 4 หลักการทำงานของระบบ VRS (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561).....	12
ภาพที่ 5 การกระจายตัวเป็นรูปประขังคว่ำ มีค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวอยู่ที่ X และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 1σ , 2σ และ 3σ (วิชัย เที่ยงวีรชน, 2548)	14
ภาพที่ 6 ผลลัพธ์เส้นฐานเป็นศูนย์ในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) สำหรับ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013).....	17
ภาพที่ 7 AUSPOS ผลลัพธ์ทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) สำหรับ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013).....	17
ภาพที่ 8 ผลลัพธ์เส้นฐานสำหรับการเพิ่มการรังวัดและความยาวเส้นฐานที่แตกต่างกันในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) ที่ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013).....	18
ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบผลลัพธ์เส้นฐานของ virtual และ observed กับตำแหน่ง 'จริง' สำหรับ ความยาวเส้นฐานที่แตกต่างกันในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) ที่ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013).....	18
ภาพที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย	21
ภาพที่ 11 การจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร	27
ภาพที่ 12 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของ ตำแหน่งทางราบ การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS	29
ภาพที่ 13 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) (บน) ลูบขนาด 10-30 กม. และ (ล่าง) ลูบขนาด 30-50 กม.	30

ภาพที่ 14 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) (บน) ลูบขนาด 50-70 กม. และ (ล่าง) ลูบขนาด 70-90 กม..... 31

ภาพที่ 15 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ลูบขนาด 90-110 กม. และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ของการรังวัดด้วยโครงข่าย การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS..... 32

ภาพที่ 16 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร..... 34

ภาพที่ 17 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร ตามลำดับ..... 35

ภาพที่ 18 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร ตามลำดับ..... 36

ภาพที่ 19 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของ ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร ตามลำดับ..... 38

ภาพที่ 20 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 (บน) และ ซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 (ล่าง) ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร ตามลำดับ..... 39

ภาพที่ 21 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ใน ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร..... 40

ภาพที่ 22 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร..... 41

ภาพที่ 23 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร ตามลำดับ..... 42

ภาพที่ 24 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร ตามลำดับ.....	43
ภาพที่ 25 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร ตามลำดับ.....	45
ภาพที่ 26 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 (บน) และ ซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 (ล่าง) ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร ตามลำดับ.....	46
ภาพที่ 27 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร.....	47
ภาพที่ 28 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 90-110 กิโลเมตร.....	48
ภาพที่ 29 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ	49
ภาพที่ 30 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ.....	50
ภาพที่ 31 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายการรับสัญญาณด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรับสัญญาณแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0.....	53
ภาพที่ 32 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบของการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายการรับสัญญาณด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรับสัญญาณแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0	54
ภาพที่ 33 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรับสัญญาณด้วยโครงข่ายการรับสัญญาณด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรับสัญญาณแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2	56

ภาพที่ 34 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2.....	57
ภาพที่ 35 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3.....	59
ภาพที่ 36 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3	60
ภาพที่ 37 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 10-30 กิโลเมตร.....	73
ภาพที่ 38 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร.....	74
ภาพที่ 39 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร.....	75
ภาพที่ 40 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร.....	76
ภาพที่ 41 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร.....	77

บทที่ 1

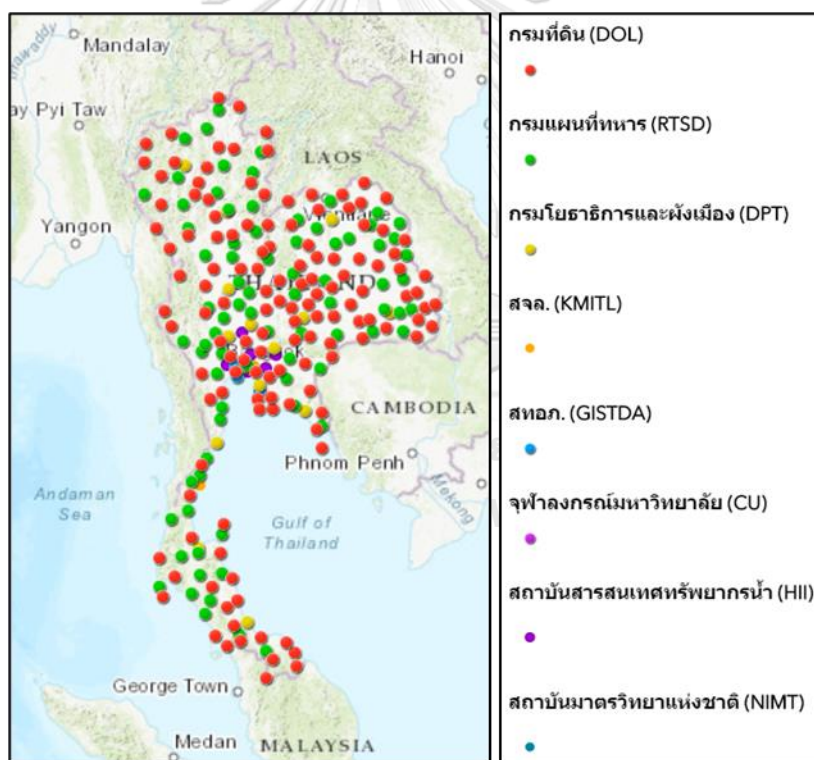
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมแบบจลน์ (Real Time Kinematic : RTK) ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการผลในการรังวัดจำนวนมาก ใช้เวลาในการรังวัดไม่นาน และให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงในระดับเซนติเมตร ในการรังวัดจำเป็นต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อยสองเครื่อง โดยเครื่องแรกให้เป็นสถานีฐาน (Base station) ตั้งอยู่ที่หมุดที่ทราบค่าพิกัด ส่วนเครื่องที่สองให้เป็นสถานีจร (Rover station) ตั้งอยู่ที่หมุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด และต้องมีอุปกรณ์สื่อสารสำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานและสถานีจร การรังวัดแบบจลน์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางระหว่าง Base กับ Rover ถ้าระยะทางมากขึ้นจะส่งผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่งเนื่องจากจะมีความคลาดเคลื่อนต่อสัญญาณที่ส่งมาจากกลุ่มดาวเทียม GNSS ผ่านชั้นบรรยากาศมายังเครื่องรับ ต่อมาได้มีการพัฒนาการรังวัดด้วยระบบ RTK มาเป็นการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network : NRTK) โดยใช้เทคนิคสถานีฐานอ้างอิงเสมือน (Virtual reference station : VRS) (ธีทัต เจริญกาลัญญูตา, 2555) ซึ่งเป็นสถานีฐานอ้างอิงที่สมมุติขึ้นซึ่งอยู่ห่างจากผู้ใช้ RTK เพียงไม่กี่เมตร เริ่มต้นจากการรับสัญญาณ GNSS จากสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) แล้วจะส่งไปยังศูนย์ควบคุม จากนั้นศูนย์ควบคุมจะทำการคำนวณสร้างแบบจำลองค่าแก้ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองค่าแก้ของนาฬิกาดาวเทียม แบบจำลองค่าแก้ของชั้นบรรยากาศ และแบบจำลองค่าแก้ของวงโคจรดาวเทียม ในกรณีของระบบ VRS ผู้ใช้งานต้องส่งตำแหน่งโดยประมาณของตนเอง (ค่าพิกัดในรูปแบบ National Marine Electronic Association : NMEA) ให้ศูนย์ควบคุม จากนั้นศูนย์ควบคุมจะใช้ข้อมูลจากสถานี CORS ที่อยู่โดยรอบผู้ใช้งาน และค่าแก้ที่คำนวณได้สร้างข้อมูลขึ้นมา แล้วส่งกลับไปให้ผู้ใช้งาน ข้อมูลที่สร้างขึ้นมานี้ เครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้งานจะมองเห็นเสมือนว่าเป็นข้อมูลของสถานีฐานหรือสถานีอ้างอิงในงานรังวัด RTK แบบดั้งเดิม (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) สำหรับการรังวัด NRTK เทคนิค VRS ต้องการสถานี CORS อย่างน้อย 3 สถานี ทำให้สามารถปรับแก้ชั้นบรรยากาศในขณะที่เคลื่อนย้าย Rover ทำให้ช่วยลดข้อจำกัดด้านระยะทางระหว่าง Base กับ Rover ออกไปได้ถึง 70 กิโลเมตร เพื่อให้ได้ความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเซนติเมตร (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561)

ในปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2563) มีหน่วยงานหลัก 6 หน่วยงานได้ทำการติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) ทั่วประเทศ รวมทั้งสิ้น 251 สถานี (ภาพที่ 1) ได้แก่

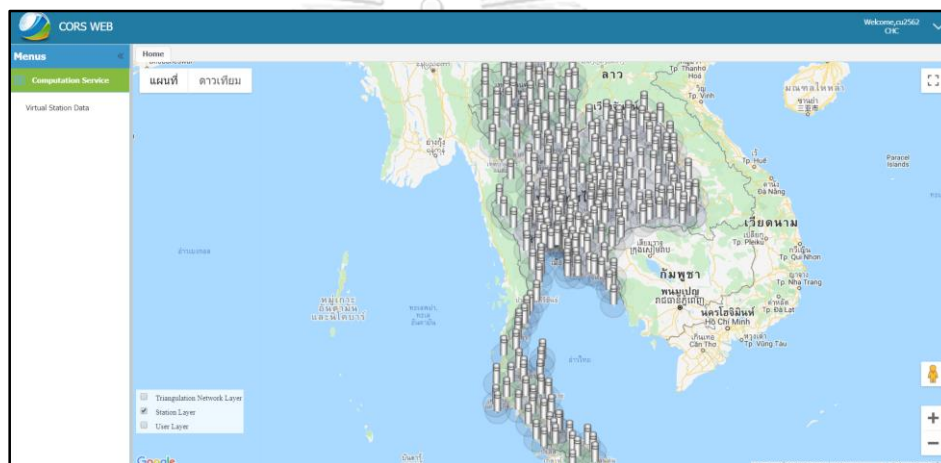
- 1) กรมที่ดิน 134 สถานี
- 2) กรมแผนที่ทหาร 80 สถานี
- 3) กรมโยธาธิการและผังเมือง 15 สถานี
- 4) สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ 6 สถานี
- 5) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ 1 สถานี
- 6) สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ และมหาวิทยาลัยต่างๆ รวม 15 สถานี (กรมแผนที่ทหาร, 2563)



ภาพที่ 1 ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Stations) ของประเทศไทย จาก 6 หน่วยงาน (กรมแผนที่ทหาร, 2563)

อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ที่จะได้รับประโยชน์จากการปรับแก้โครงข่าย GNSS สำหรับการใช้งานในโปรแกรมประมวลผลภายหลัง (Post processing) สามารถทำได้ผ่านการจัดเตรียมข้อมูล Virtual RINEX ซึ่งเป็นไฟล์ที่สร้างขึ้นตามไฟล์ข้อมูล RINEX แบบดั้งเดิม แต่ข้อมูลจะคล้ายกับไฟล์ของ

เครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่วางไว้ใกล้กับผู้ใช้ (Rover) โดยถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลดิบของสถานี CORS ของแต่ละสถานีที่อยู่ใกล้กับ Rover ผ่านเว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB (ภาพที่ 2) ผู้ใช้ต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการเอง หรือหมายความว่าอีกอย่างคือ Virtual RINEX เป็นวิธีการเก็บข้อมูล NRTK ไปยังไฟล์ RINEX แทนที่จะเผยแพร่ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพการประมวลผลภายหลังควรคล้ายกันมากกับข้อมูลแบบเรียลไทม์ การรังวัดแบบ Virtual RINEX มีประโยชน์ในกรณี que การเชื่อมต่อสื่อสารของระบบ NRTK ล้มเหลว ประโยชน์หลักของ Virtual RINEX คือ มีสถานีฐานอ้างอิงใกล้กับตำแหน่ง Rover เพื่อลดความยาวของเส้นฐานให้เกือบเท่ากับศูนย์ ขจัดความคลาดเคลื่อนต่อสัญญาณที่ส่งมาจากกลุ่มดาวเทียม GNSS ผ่านชั้นบรรยากาศมายังเครื่องรับ (Dabove et al., 2016; Janssen, 2013)



ภาพที่ 2 เว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน

ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย โดยจะใช้ข้อมูลการรังวัด Static แบบสัมพัทธ์, NRTK เทคนิค VRS และ Virtual RINEX ทำการประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ที่แตกต่างกัน 3 ซอฟต์แวร์ได้แก่ Trimble Business Center (TBC) 5.0, CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ซึ่งแบ่งขั้นตอนการประมวลผลเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- (1) ประมวลผลระหว่างข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์กับข้อมูลสถานี CORS ที่ใกล้ที่สุด 2 สถานี
- (2) ประมวลผลข้อมูลระหว่าง Virtual RINEX กับข้อมูลการรังวัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์

(3) นำผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ได้จาก (1) มาเปรียบเทียบกับค่า RMSE ทางราบกับผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ได้จาก (2) และนำผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ได้จาก (1) มาเปรียบเทียบกับค่า RMSE ทางราบกับผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ได้จากรังวัดด้วย NRTK เทคนิค VRS

(4) สรุปผลที่ได้ว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX เหมาะสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์ในการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทยหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ในซอฟต์แวร์หลายยี่ห้อ เพื่อนำมาใช้งานแทนที่ การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

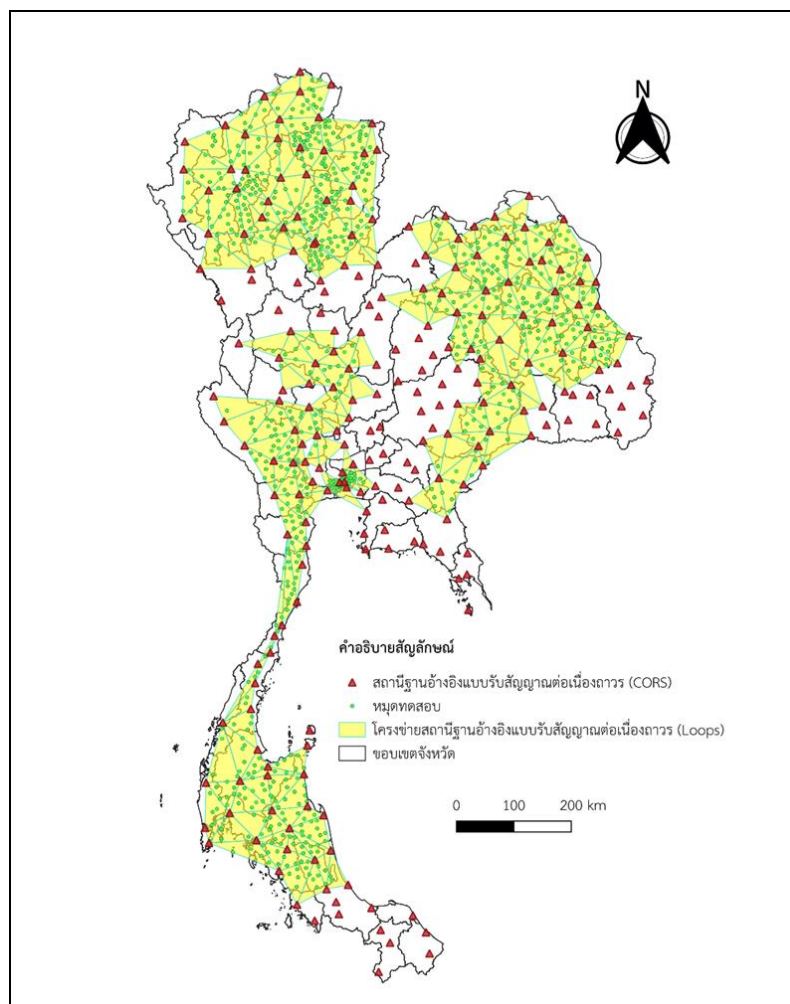
- 1) ศึกษาการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS
- 2) ศึกษาการรังวัดแบบ Virtual RINEX
- 3) ศึกษาความถูกต้องทางตำแหน่งเฉพาะทางราบเท่านั้น

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

1) ขอบเขตพื้นที่การศึกษาบริเวณประเทศไทย 36 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำพูน เชียงราย พะเยา ลำปาง แพร่ น่าน อุตรดิตถ์ นครสวรรค์ สุพรรณบุรี สระแก้ว กาฬสินธุ์ ขอนแก่น นครพนม บัรีรัมย์ ร้อยเอ็ด สกลนคร อุตรธานี ยโสธร มุกดาหาร อำนาจเจริญ กระบี่ ชุมพร ตรัง นครศรีธรรมราช พังงา พัทลุง ภูเก็ต ระนอง สุราษฎร์ธานี กาญจนบุรี ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี ราชบุรี

2) ตำแหน่งที่ตั้ง CORS จำนวน 239 สถานี (กรมที่ดิน, 2563) และตำแหน่งหมุดทดสอบในการรังวัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์และการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิค VRS โดยข้อมูลหมุดทดสอบรวมทั้งสิ้น 926 หมุด ใน 230 ลูบ (ดังแสดงในภาพที่ 3) โดยจะทำการคัดเลือกหมุดเพื่อที่จะนำมาทดสอบจากลูบทั้งหมดที่มี โดยจะพิจารณาจากลูบที่มีขนาดต่างกันในการศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยได้จำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้านออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ

(Charoenkalunyuta et al., 2019) แล้วทำการเลือกหมุดทดสอบจำนวน 3 หมุด ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่ง Centroids ของรูปสามเหลี่ยมเท่านั้น



ภาพที่ 3 ตำแหน่งของ CORS และหมุดทดสอบ (กรมที่ดิน, 2563)

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1) ข้อมูลการรังวัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์ ซึ่งได้จากการรับสัญญาณ GNSS เป็นระยะเวลา 60 นาที โดยการเลือกการตั้งรับสัญญาณ GNSS ในตำแหน่งที่ค่อนข้างโล่ง ปราศจากสิ่งบดบังรอบทิศ (เท่าที่สามารถทำได้)

2) ข้อมูลการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS รับสัญญาณดาวเทียมทุก 1 วินาที ได้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม 60 วินาที อย่างต่อเนื่องจำนวน 15 ครั้ง และดำเนินการรังวัดในเวลาเดียวกันกับการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์

3) ข้อมูล Virtual RINEX ได้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม 60 นาที ซึ่งได้จากเว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน โดยเลือกตำแหน่ง Virtual Point และเวลาเดียวกันกับการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์

4) ข้อมูลการรังวัดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ตั้งแต่วันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ถึง วันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2562

1.3.4 เว็บไซต์และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

เว็บไซต์สำหรับดาวเทียม Virtual RINEX และโปรแกรมสำหรับประมวลผล

1) เว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน

เว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน เป็นเว็บไซต์ที่เก็บข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมของ CORS สามารถใช้ดาวเทียมข้อมูล Virtual RINEX ย้อนหลังสามารถเลือกตำแหน่ง Virtual Point วันที่ทำการรับสัญญาณและเวลาที่ต้องการใช้งานได้

2) Trimble Business Center (TBC) 5.0

ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC) เวอร์ชัน 5.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ พัฒนาโดยบริษัท Trimble Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประมวลผลข้อมูลดาวเทียม GNSS ในภายหลัง (Post Processing) โดยมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูล GNSS ของกลุ่มดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou (BDS) ร่วมกันได้รวมถึงสามารถประมวลผลข้อมูล GNSS ร่วมกับวงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูงได้รองรับข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องมือหลากหลายรุ่นและยี่ห้อ (Trimble, 2019)

3) CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2

ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับประมวลผลเส้นฐานทั้งจาก Broadcast และ Precise Ephemeris โดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou ในรูปแบบไฟล์ RINEX v.2 v.3, .HCN, .DAT ฯลฯ มาประมวลผลเส้นฐานและปรับแก้ (Adjustment) ผ่านระบบ Least Squares (CHC NAVTECH THAILAND, 2016)

4) RTKLIB 2.4.3

ซอฟต์แวร์ประมวลผล Open source สามารถประมวลผลแบบ pseudorange และ carrier-phase ทั้งแบบ real-time และ post-processing

5) Quantum GIS

โปรแกรมที่ใช้หาตำแหน่งของพิกัดหมุดที่จะทำการทดสอบและหาตำแหน่งของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS)

6) Microsoft Excel

โปรแกรมที่นำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่า RMSE ทางราบ

1.3.5 เครื่องมือสำรวจจริงวัดดาวเทียม (ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมจากกรมที่ดิน)

สามารถแบ่งเครื่องมือสำรวจจริงวัดดาวเทียม GNSS ได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1) สถานีอ้างอิงพิกัดแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS)

1.1) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น N72

1.2) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น TRIMBLE NETR9

1.3) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น TRIMBLE NETR5

1.4) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ LEICA รุ่น GR25

1.5) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS

2) สถานีผู้ใช้งาน (Rover)

เครื่องมือรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น I 80

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงการประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ในซอฟต์แวร์หลายยี่ห้อ เพื่อนำมาใช้งานแทนที่ การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การรังวัดแบบสถิต (Static Survey)

เป็นการรังวัดแบบสัมพัทธ์โดยจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป โดยที่สถานีฐาน (Base station) ตั้งอยู่บนตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัด ส่วนสถานีจร (Rover station) ตั้งไว้บนตำแหน่งที่ต้องการจะทราบค่า วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งรับสัญญาณไว้นานอย่างน้อย 30 นาที เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลในภายหลังโดยจะได้ค่าความถูกต้องตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร สำหรับเส้นฐาน (Base line) ความยาวไม่เกิน 20 ถึง 30 กิโลเมตร (KQ GNSS, 2018; Leick, 2004; Teunissen & Kleusberg, 2012; Wang et al., 2002; เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2548)

2.1.2 การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนในทันที (Real-time kinematic survey: RTK)

วิธีการนี้มีหลักการทำงาน คือ ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางไว้ในตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัดให้เป็นสถานีฐาน (Base station) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองคือสถานีจร (Rover station) นำไปวางไว้บนตำแหน่งที่ต้องการจะทราบค่าพิกัด ต้องมีการสื่อสารระหว่างเครื่องรับทั้งสองเครื่องผ่านทางคลื่นวิทยุหรือสัญญาณอินเทอร์เน็ต ทำให้สถานีจรสามารถทราบค่าพิกัดตำแหน่งที่ถูกต้องได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลในภายหลัง ทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง ความถูกต้องที่ได้จะอยู่ในระดับ 1 ถึง 5 เซนติเมตร สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร (อิทัต และ เฉลิมชนม์, 2012) ปัจจุบันการรังวัดแบบจลนในทันทีหรือการรังวัดแบบ RTK นั้นสามารถทำได้ง่ายโดยใช้ระบบโครงข่ายสถานีรับสัญญาณดาวเทียมถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) เรียกว่า ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน (RTK GNSS Network) หลักการคล้ายคลึงกับวิธีการรังวัดแบบจลนในทันที แต่แตกต่างกันที่ต้องขอรหัสผู้ใช้ (user name) จากผู้ให้บริการโครงข่าย (ซึ่งในประเทศไทยให้บริการโดยกรมที่ดิน) โดยผู้ใช้งานใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวไปวางในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัดภายในพื้นที่ให้บริการ วิธีนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1 ถึง 5 เซนติเมตร (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561)

ความแตกต่างระหว่าง RTK และ PPK คือ การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK นั้น จะให้ค่าพิกัดที่แม่นยำในรูปแบบเรียลไทม์หรือทันทีขณะที่ทำการรังวัดในสนาม แต่ PPK (Post-Processing Kinematic) เป็นการนำข้อมูลดิบของตำแหน่งที่ต้องการรังวัดค่าพิกัดมาประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ในภายหลังเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่แม่นยำ วิธีการแบบนี้เรียกว่า GNSS Post-processing ซึ่งการทำ Post-Processing สามารถใช้งานได้ทั้งแบบ Static และ Kinematic โดยนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่เป็นสถานีฐานและสถานีผู้ใช้ที่บันทึกในช่วงเวลาเดียวกันมาประมวลผลในซอฟต์แวร์

2.1.3 โครงข่าย CORS

โครงข่าย CORS เป็นโครงสร้างพื้นฐานซึ่งประกอบด้วย:

1) โครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพที่มีชุดของสถานีถาวร GNSS หลายความถี่และหลายกลุ่ม (เครื่องรับและเสาอากาศ) รับสัญญาณอย่างต่อเนื่องจากดาวเทียมทุกวันตลอด 24 ชั่วโมงและตลอดทั้งปี

2) โครงข่ายการสื่อสารที่ถ่ายทอดการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์จาก CORS ไปยังศูนย์ควบคุมและจากศูนย์ควบคุมไปยังผู้ใช้

3) โครงสร้างพื้นฐานการคำนวณประกอบด้วยซอฟต์แวร์โครงข่ายที่ประเมินความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ GNSS และส่งค่าแก้ไขแก่ผู้ใช้

ก่อนที่จะให้ค่าพิกัดตำแหน่งโครงข่ายแบบเรียลไทม์ (NRTK) จำเป็นอย่างยิ่งที่ซอฟต์แวร์โครงข่ายจะแก้ไข phase ambiguity สำหรับดาวเทียมที่รับได้ทั้งหมด หลังจากนั้นสามารถส่งค่าพิกัดโครงข่ายแบบเรียลไทม์ให้แก่ผู้ใช้ทั่วไปได้ กระบวนการนี้ใช้ได้ทั้งแบบเรียลไทม์และหลังการประมวลผล

2.1.4 ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network : NRTK)

1) องค์ประกอบของระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

โครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ

1.1) สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (Continuous Operating Reference Station : CORS) เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งถาวร ในตำแหน่งที่มีความมั่นคง โดยสถานีเหล่านี้จะรับสัญญาณดาวเทียมตลอด 24 ชั่วโมง และทำการส่งสัญญาณดาวเทียมที่รับได้ไปยังศูนย์ควบคุมผ่านทางระบบสื่อสาร เช่น ทางโทรศัพท์ หรือระบบอินเทอร์เน็ต

1.2) ศูนย์ควบคุม (Control Center) เป็นชุดของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ส่งมาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง หรือ CORS เพื่อคำนวณค่าปรับแก้ให้แก่ผู้ใช้งานที่ทำการรังวัดค่าพิกัดแบบจลน์ (Real Time Kinematic) กำหนดและตรวจสอบสิทธิการใช้งานสำรองข้อมูลตลอดจนให้บริการดาวนำไหลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมสำหรับใช้คำนวณค่าพิกัด (Post Process)

1.3) การสื่อสาร (Communication) คือ ระบบสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (CORS) กับศูนย์ควบคุมและระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานโดยการสื่อสารที่ปกติจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงกับศูนย์ควบคุม ซึ่งมักจะใช้เป็นระบบอินเทอร์เน็ตพื้นฐาน เช่น ระบบ ADSL หรือ Leased Line เนื่องจากองการการรับส่งข้อมูลที่มีเสถียรภาพสูงและจากการที่สถานี CORS จะต้องทำงานตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องมีการสื่อสารสำรอง (Backup Link) เช่น อินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไวไฟใช้งานเพื่อทดแทนในกรณีที่ระบบสื่อสารหลักเกิดขัดข้องในส่วนของการรับส่งข้อมูลระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานจะใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์มือถือเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำและไม่จำเป็นต้องใช้การสื่อสารที่มีเสถียรภาพที่สูงมาก (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561)

หลักการทำงานของระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ในการรังวัดค่าพิกัดที่มีการใช้งานในปัจจุบัน มีอยู่ 3 ระบบ คือ Area Correction Parameter (Flächen Korrektur Parameter - FKP), ระบบ Master-Auxiliary Concept (MAC) และระบบ Virtual Reference Station (VRS) ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นการศึกษาระบบการทำงานของ VRS เพียงวิธีเดียว

2.1.5 ระบบ Virtual Reference Station (VRS)

Virtual Reference Station (VRS) เป็นสถานีอ้างอิงที่สมมุติขึ้น ซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งของผู้ใช้ RTK เพียงไม่กี่เมตร สำหรับตำแหน่งนี้ข้อมูลการรังวัดจะถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร (CORS) ซึ่งเมื่อได้รับสัญญาณแล้วจะส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมเพื่อทำการคำนวณสร้างแบบจำลองของค่าแก้ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองค่าแก้ของนาฬิกาดาวเทียม แบบจำลองค่าแก้ของชั้นบรรยากาศ และแบบจำลองค่าแก้ของวงโคจรดาวเทียม ซึ่งในระบบ VRS ผู้ใช้งานต้องส่งพิกัดตำแหน่งโดยประมาณของตนเอง (ค่าพิกัดในรูปแบบ NMEA) ให้ศูนย์ควบคุมซึ่งศูนย์ควบคุมจะทำการใช้ข้อมูลจากสถานี CORS ที่อยู่โดยรอบผู้ใช้งาน และค่าแก้ที่คำนวณได้ สร้างหรือสังเคราะห์ข้อมูลขึ้นมาและส่งกลับไปให้ผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่สร้างขึ้นมานี้เครื่องรับ

สัญญาณของผู้ใช้งานจะมองเห็นเสมือนว่าเป็นข้อมูลของสถานีฐานหรือสถานีอ้างอิงในงานรับวัด RTK แบบเดิม ดังนั้น จึงเรียกระบบการทำงานของระบบโครงข่ายการรับวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบนี้ว่าเป็นสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station) ตามข้อมูลที่ศูนย์ควบคุมได้ส่งให้ผู้ใช้งาน (Castleden et al., 2004; Da Tsai et al., 2019; กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561) ดังภาพที่ 4

ระบบ VRS ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย (Vollath et al., 2000) ซึ่งมีการทำงานตามขั้นตอนหลัก คือ

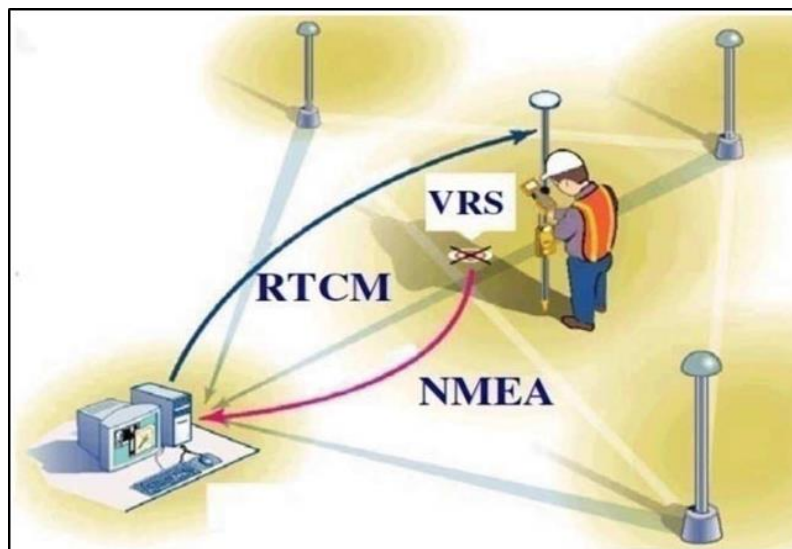
1) ซอฟต์แวร์ระบบโครงข่ายแบบจลน์ในทันทีจะทำการคำนวณค่าต่างครั้งที่สองด้วยวิธี Ionosphere – Free Linear Combination สำหรับทุกๆ คู่ของสถานีฐาน และจะคำนวณหาค่าเลขปริศนาและค่าคลาดเคลื่อนรวมของแต่ละสถานีฐานด้วย

2) ค่าคลาดเคลื่อนรวมของทุกสถานีจะถูกนำไปคำนวณและ Interpolate สำหรับตำแหน่งโดยประมาณของสถานีผู้ใช้งาน (ซึ่งทราบได้โดยการหาค่าจากซูโดเรนจ์ของเครื่องรับ) ซึ่งตำแหน่งโดยประมาณนี้จะถูกส่งจากสถานีผู้ใช้งานไปยังซอฟต์แวร์ระบบโครงข่ายฯ ในรูปแบบของ NMEA Message

3) ค่าคลาดเคลื่อนรวมที่ถูก Interpolate แล้วจะถูกส่งในรูปแบบของ Message 18/19 หรือ 20/21 ของ RTCM 2.3 โดยเป็นข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลการรับวัดดาวเทียมที่ทราบขนาดค่าคลาดเคลื่อนรวม ณ ตำแหน่งใกล้ ๆ กับสถานีผู้ใช้งาน แล้วส่งไปยังสถานีผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงเสมือนว่ามีสถานีเสมือน (Virtual Reference Station) สำหรับอ้างอิงใกล้ ๆ กับสถานีผู้ใช้งาน

4) ซอฟต์แวร์ที่สถานีผู้ใช้งานจะทำการประมวลเส้นฐานซึ่งมีขนาดสั้น ระหว่างสถานีเสมือนและข้อมูลการรับวัดดาวเทียมจริงของสถานีผู้ใช้งานเพื่อหาค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน

ข้อดีของระบบ VRS คือ สถานีผู้ใช้งานไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือซอฟต์แวร์เพิ่มเติม เนื่องจากการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดของสถานีผู้ใช้งานนั้นเหมือนกับการทำงาน Single RTK และอย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าระบบนี้ต้องการการสื่อสารแบบสองทาง (Two Way Communication)



ภาพที่ 4 หลักการทำงานของระบบ VRS (กองเทคโนโลยีท่าอากาศยานที่ กรมที่ดิน, 2561)

2.1.6 Virtual RINEX

RINEX (Receiver Independent EXchange) เป็นไฟล์ข้อมูลการรังวัดตามเทียม ซึ่งรูปแบบแรกได้รับการพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเบิร์นประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูล GNSS ใต้ง่ายในแคมเปญ GPS ยุโรปครั้งแรก ตั้งแต่นั้นมา RINEX ได้พัฒนาเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการแลกเปลี่ยนและเก็บถาวรข้อมูล GNSS (Janssen, 2013)

Virtual RINEX นั้นเป็นการเก็บข้อมูลของการรังวัดแบบ NRTK เพื่อนำข้อมูลนั้นมาใช้ในการประมวลผลภายหลัง (post-processing) ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ โดยข้อมูลการรังวัดนั้นเป็นข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องกำหนดตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงภายในพื้นที่ที่ครอบคลุมโดยโครงข่าย CORS ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพของค่าพิกัดที่ได้หลังการประมวลผลควรคล้ายกันมากกับการให้ค่าพิกัดแบบทันที โดย

- 1) ไฟล์ Virtual RINEX มีเนื้อหาและความแม่นยำเหมือนกันกับข้อมูล NRTK ที่ให้ค่าพิกัดในทันที
- 2) ซอฟต์แวร์ประมวลผลภายหลังใช้อัลกอริทึมแบบเดียวกันกับการให้ค่าพิกัดแบบทันทีสามารถทำงานได้ในพื้นที่จุดอ้างอิงการสื่อสาร ซึ่งข้อมูล Virtual RINEX ยังสามารถสร้างสถานีอ้างอิงในพื้นที่ที่จำกัดได้อีกด้วย
- 3) ข้อมูล Virtual RINEX สร้างขึ้นโดยซอฟต์แวร์โครงข่าย CORS โดยผู้ใช้ต้องกำหนดตำแหน่ง (และช่วงเวลา) กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับขั้นตอนดังต่อไปนี้:

(1) การพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศและวงโคจรดาวเทียม โดยการคำนวณหาค่าเลขปริศนาของเส้นฐานภายในโครงข่าย

(2) การสร้างค่าแก้ตามโครงข่ายสำหรับตำแหน่งที่กำหนดโดยใช้ interpolation model

(3) การนำการแก้ไขมาใช้กับตำแหน่งที่กำหนด

(4) การรับวัด CORS ที่ใกล้ที่สุดไปยังตำแหน่งที่กำหนด

เพียงกำหนดตำแหน่งของสถานีอ้างอิงที่ต้องการและความสูงเหนือทธรณี ระบบจะสร้างข้อมูล Virtual RINEX ขึ้นมาเองเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ (Dabove et al., 2016; Janssen, 2013)

2.1.7 การหาค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE)

การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องในตำแหน่งทางราบและตำแหน่งทางตั้ง โดยคำนวณได้จากสมการที่ 1 (FGDC, 1998)

$$RMSE_{hor.} = \sqrt{\frac{\sum((N_{check,i} - N_{data,i})^2 + (E_{check,i} - E_{data,i})^2)}{n}} \quad (1)$$

โดยที่

$RMSE_{hor.}$ คือ RMSE ของตำแหน่งทางราบ (เมตร)

$N_{check,i}$ คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของการรับวัดแบบ static

$N_{data,i}$ คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของ VRS และ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของการรับวัดแบบ Virtual RINEX

$E_{check,i}$ คือ ค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของการรับวัดแบบ static

$E_{data,i}$ คือ ค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของ VRS และค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของการรับวัดแบบ Virtual RINEX

n คือ จำนวนหมุดทดสอบ

ในขณะที่ตำแหน่งในทางตั้งจะวิเคราะห์ค่าความสูงเหนือทธรณี (Ellipsoidal Height) บนพื้นหลักฐาน WGS 1984 (กรัมที่ดิน, 2562)

2.1.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD หรือ σ) และการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เป็นวิธีการทางสถิติอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อวัดการกระจายตัวของข้อมูลว่ากระจายออกจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด หากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงถึงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวห่างจากค่าเฉลี่ยน้อย และถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากแสดงถึงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวห่างจากค่าเฉลี่ยมาก หากข้อมูลมีการกระจายตัวห่างจากค่าเฉลี่ยมาก อาจทำให้ผลของงานวิจัยคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) จึงต้องพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ด้วยวิธีการทางสถิตินี้คิดค้นโดย ฟรานซิส กาลตัน (Francis Galton) ในปี ค.ศ. 1860 ดังสมการที่ 3

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

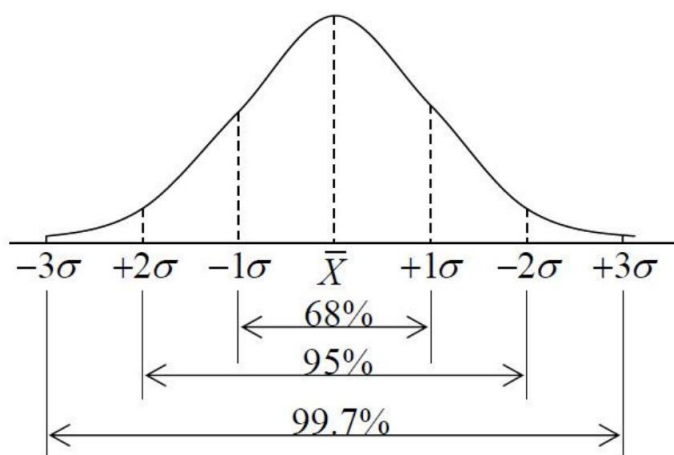
โดยที่

N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

X_i คือ ค่า RMSE ทางราบที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง (เมตร)

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของค่า RMSE ทางราบที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง (เมตร)

การแจกแจงแบบปกติหรือที่เรียกว่าการแจกแจงแบบเกาส์เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสมมาตรเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่อยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยนั้นเกิดขึ้นบ่อยกว่าข้อมูลที่อยู่ห่างจากค่าเฉลี่ย ในรูปแบบกราฟการแจกแจงแบบปกติจะปรากฏเป็นเส้นโค้งระฆัง (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 การกระจายตัวเป็นรูประฆังคว่ำ มีค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวอยู่ที่ \bar{X} และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 1σ , 2σ และ 3σ (วิชัย เที่ยงวีรชน, 2548)

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้ Normal Curve

$-\sigma$ ถึง $+\sigma = 68.27\%$ ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

-0.6745σ ถึง $+0.6745\sigma = 50\%$ ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

-1.6449σ ถึง $+1.6449\sigma = 90\%$ ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

-1.9599σ ถึง $+1.9599\sigma = 95\%$ ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ใต้กราฟหมายถึงโอกาสที่ความคลาดเคลื่อนในช่วงนั้นจะเกิดขึ้นได้ของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของระดับความเชื่อมั่น (Confidential level)

ความเชื่อมั่นของความคลาดเคลื่อน (Expectation of Error Value) ดังสมการที่ 4

$$E_p = C_p \sigma \quad (4)$$

โดยที่

E_p คือ ค่าความเชื่อมั่น

C_p คือ Numerical factor

σ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$E_{50} = \pm 0.6745\sigma$$

$$E_{90} = \pm 1.6449\sigma$$

$$E_{95} = \pm 1.9599\sigma$$

2.1.9 ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้มีการอ้างอิงหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไข เกี่ยวกับการรังวัดโดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยมีเงื่อนไขในการรังวัด ดังนี้

ภาคผนวก ข รังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ มีเงื่อนไขดังนี้

- (1) ใช้วิธีการรังวัดตามรูปแบบหมุดดาวเทียม RTK Network
- (2) ค่าพีดีโอพี (PDOP) ขณะทำการรังวัดไม่เกิน 5
- (3) ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ในทางราบไม่เกิน 3 เซนติเมตร
- (4) ผลการรังวัดเป็นแบบฟิกซ์ (Fixed)

(5) รับสัญญาณดาวเทียมทุก 1 วินาที และได้ข้อมูลจากการรับสัญญาณดาวเทียมไม่น้อยกว่า 60 วินาที อย่างต่อเนื่องจำนวน 3 ครั้ง การรับสัญญาณดาวเทียมโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ณ สถานีจร ให้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมประกอบขากล่อง ตั้งให้ตรงศูนย์กลางหมุดดาวเทียม RTK Network หรือหลักเขตที่ดิน ก่อนการรับสัญญาณดาวเทียมทุกครั้ง ให้ปิดเครื่องแล้วเปิดใหม่ เพื่อให้เครื่องรับสัญญาณมีสภาพเริ่มต้นการใช้งานใหม่ โดยค่าความแตกต่างของค่าพิกัดต้องอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งในทางราบ ± 4 เซนติเมตร และให้ค่าเฉลี่ย

(6) กรณีรับสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณระบบสื่อสาร ให้ผู้รังวัดแจ้งให้ผู้ดูแลระบบของสถานีควบคุมทราบก่อนดำเนินการ เพื่อนำข้อมูลดาวเทียมมาประมวลผลในภายหลัง (Post-Processing) โดยให้รับสัญญาณดาวเทียม 1 วินาที และได้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมไม่น้อยกว่า 10 นาที อย่างต่อเนื่องจำนวน 2 ครั้ง และมีเงื่อนไขตาม (1) – (4)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Virtual RINEX

Janssen (2013) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของข้อมูล Virtual RINEX โดยศึกษาจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการหาตำแหน่งแบบ static ซึ่งจะใช้ข้อมูลการรังวัด 3 วัน กับข้อมูล Virtual RINEX ที่สร้างขึ้นโดยเว็บไซต์ CORSnet-NSW โดยทำการทดสอบในพื้นที่ NRTK ขนาดเล็กและใหญ่ ในนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็นสามวิธี:

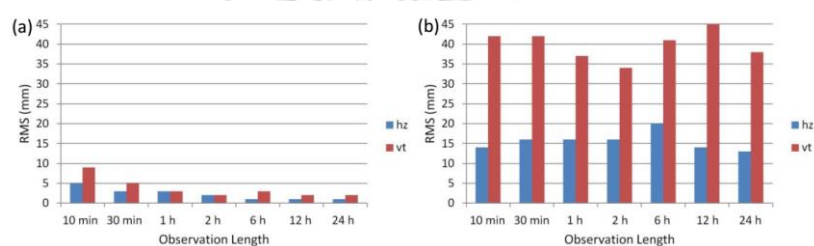
(1) การประมวลผลเส้นฐาน (เส้นฐานเข้าใกล้ศูนย์) จะวิเคราะห์ระหว่างข้อมูล virtual และ observed ความยาวของเส้นฐานนี้จะใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล virtual RINEX วิเคราะห์ความยาวของเซสชัน 10 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงในหนึ่งวัน และ 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงใน 3 วัน เพื่อลดการประมวลผลการวิเคราะห์ 1 วันรวมสูงสุด 24 โซลูชัน เช่น ใช้การรังวัด 10 นาทีหรือ 30 นาทีที่จุดเริ่มต้นของแต่ละชั่วโมง เซสชันทั้งหมดถูกประมวลผลโดยใช้อัตราการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที

(2) การประมวลผล AUSPOS โดยตำแหน่งของแต่ละจุดทดสอบถูกกำหนดโดยใช้ข้อมูล virtual 30 วินาที และข้อมูล observed เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงในช่วงสามวัน AUSPOS ใช้ประโยชน์จากซอฟต์แวร์ Bernese GPS เวอร์ชัน 5.0 และในกรณีนี้การแก้ปัญหาขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมต่อกับ CORS 13 หรือ 14 ตัวโดยรอบ ความแตกต่างในพิกัดผลลัพธ์ถูกเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบคุณภาพข้อมูล virtual RINEX

(3) การประมวลผลเส้นฐานที่สัมพันธ์กับ CORS การประมวลผลเส้นฐานเปรียบเทียบกับ CORS สี่ตัว ใช้ข้อมูล virtual และข้อมูล observed สำหรับช่วงเวลา 10 นาทีและ 1 ชั่วโมงในหนึ่งวัน เช่นเดียวกับช่วงเวลา 24 ชั่วโมงในช่วงสามวัน อีกครั้งการวิเคราะห์ 1 วันรวมสูงสุด 24 โคลงชั้น เช่นใช้รังวัด 10 นาทีที่จุดเริ่มต้นของแต่ละชั่วโมง เซสชันทั้งหมดถูกประมวลผลโดยใช้อัตราการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ในขณะที่เซสชัน 10 นาทีถูกประมวลผลโดยใช้ข้อมูล 1 วินาที สำหรับแต่ละพื้นที่ทดสอบ โคลงชั้นที่ได้รับโดยใช้ Virtual RINEX และข้อมูล observed ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน และเปรียบเทียบกับพิกัด 'จริง' ของจุดทดสอบ (เช่นพิกัดที่ปรับแก้แล้วซึ่งใช้สำหรับการสร้างข้อมูล Virtual RINEX)

ผลการทดสอบพบว่า

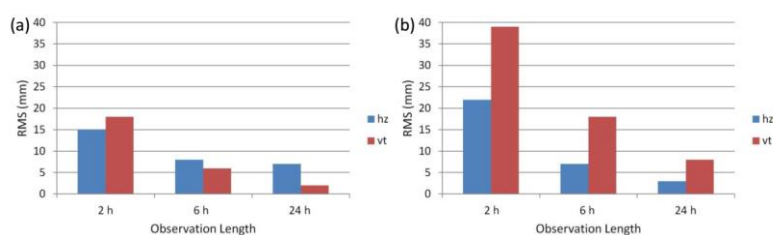
(1) การประมวลผลเส้นฐาน (เส้นฐานเข้าใกล้ศูนย์) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลลัพธ์เส้นฐานเป็นศูนย์ในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) สำหรับ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013)

แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ได้รับโดยใช้ข้อมูล virtual RINEX ยอมรับกับข้อมูลที่ observed ที่ระดับ 1-2 มม. (RMS) สำหรับการรังวัดที่ยาวนานในเซลล์ NRTK ขนาดเล็ก และการรังวัดต่างๆ ที่ตรวจสอบในเซลล์ NRTK ขนาดใหญ่ความแตกต่างระหว่างสองวิธีนี้มีค่าประมาณ 15 มม. (hz) และ 40 มม. (vt)

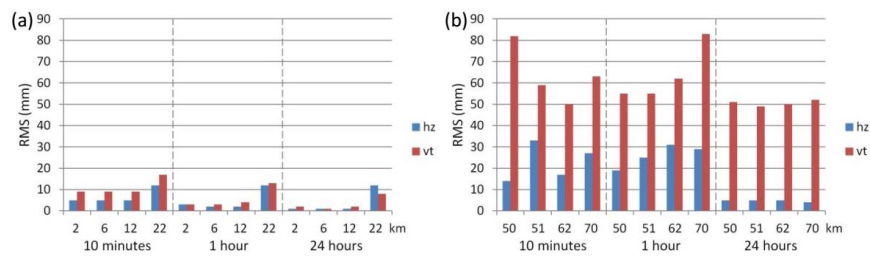
(2) การประมวลผลด้วย AUSPOS ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 AUSPOS ผลลัพธ์ทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) สำหรับ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013)

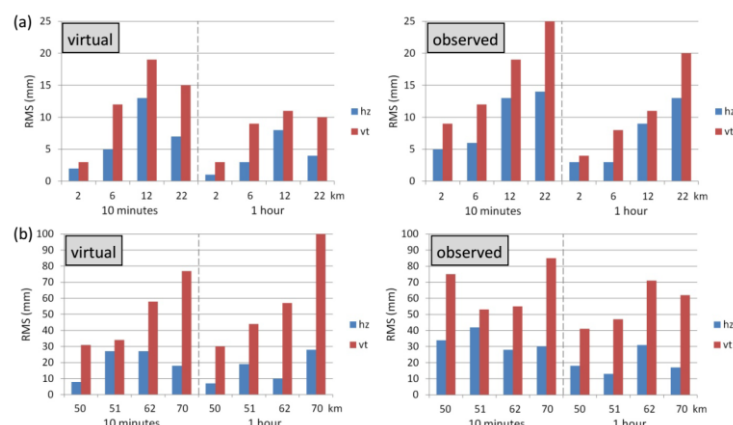
แสดงให้เห็นว่าโซลูชัน 24 ชั่วโมงเทียบเคียงที่ระดับ 10 มม. หรือดีกว่า (ที่ขีดจำกัดความแม่นยำในปัจจุบันของบริการ AUSPOS) ในขณะที่โซลูชัน 2 ชั่วโมงแสดงความแตกต่างสูงถึงประมาณ 20 mm (hz) และ 40 mm (vt)

(3) การประมวลผลเส้นฐานที่สัมพันธ์กับ CORS โดยรอบ ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9



ภาพที่ 8 ผลลัพธ์เส้นฐานสำหรับการเพิ่มการรังวัดและความยาวเส้นฐานที่แตกต่างกันในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) ที่ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013)

ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างตั้งแต่ระดับไม่กี่มม. สำหรับเส้นฐานสั้น (10 กม.) ในเซลล์ NRTK ขนาดเล็กไปจนถึงระดับความสูงไม่กี่ซม. สำหรับเส้นฐานยาว (70 กม.) ในเซลล์ NRTK ขนาดใหญ่



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบผลลัพธ์เส้นฐานของ virtual และ observed กับตำแหน่ง 'จริง' สำหรับความยาวเส้นฐานที่แตกต่างกันในทางราบ (hz) และทางตั้ง (vt) ที่ (a) Queens Square (เซลล์ขนาดเล็ก) และ (b) Sofala (เซลล์ขนาดใหญ่) (Janssen, 2013)

โซลูชัน 10 นาทีและ 1 ชั่วโมง ที่ได้รับจากการใช้ Virtual RINEX และข้อมูล observed นำมาเปรียบเทียบกับพิกัด 'จริง' ของจุดทดสอบ นั่นคือพิกัดที่ปรับใช้สำหรับการสร้างข้อมูล Virtual

RINEX โดยทั่วไปแล้วผลลัพธ์ virtual จะแสดงระดับข้อตกลงที่สูงขึ้นด้วยพิกัด 'จริง' สิ่งนี้ไม่น่าแปลกใจเนื่องจากตำแหน่ง virtual มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่แท้จริงของผู้รับ ซึ่งผลกระทบที่ได้รับจากความแปรปรวนของบรรยากาศในท้องถิ่นนั้นได้รับการ 'เฉลี่ยออก' ในระหว่างการปรับแก้โครงข่ายที่ใช้เพื่อกำหนดตำแหน่ง 'จริง' ตามที่คาดไว้ จะทำให้บรรลุน้ำหนักข้อตกลงที่สูงขึ้นเมื่อใช้ช่วงการรังวัดที่ยาวขึ้น

Dabove et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการประเมินคุณภาพและความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้ Virtual RINEX ที่อยู่ใกล้กับขอบเขตของ CORS ที่แตกต่างกันสองระบบ (GNSMART โดย GEO ++ และ Spidernet โดย Leica Geosystems) ซึ่งจัดการโดยซอฟต์แวร์โครงข่ายที่ต่างกันสองตัวในระบบอ้างอิงเดียวกัน เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและคุณภาพของ Virtual RINEX สองตัวที่ได้จากซอฟต์แวร์โครงข่าย GNSS ที่มีระยะทางระหว่างสถานีประมาณ 40 กม. (ตามแบบฉบับของโครงข่ายอิตาลี) มีจุดที่ใช้ทดสอบ กระจายตัว 15 จุด อย่างเท่าเทียมกันใกล้ขอบเขตระหว่างโครงข่ายทั้งสอง โดยใช้ระยะทางเท่ากันระหว่างสถานีจริงที่มีอยู่ของทั้งสองโครงข่าย ซึ่งในแต่ละจุดจะสร้างไฟล์ Virtual RINEX นาน 24 ชั่วโมง ทุกๆ 1 วินาที จากนั้นทำการทดสอบเพื่อประเมินความสำคัญของที่ตั้งของสถานีถาวรที่ระดับความสูงต่างๆ เพื่อประเมินค่าคลาดเคลื่อนและเพื่อใช้ในการสร้าง Virtual RINEX ในวิธีที่ดีกว่า ในการประเมินคุณภาพของ Virtual RINEX ของทั้งสองโครงข่ายจะใช้เส้นฐานระหว่าง Virtual RINEX ที่สร้างโดยซอฟต์แวร์โครงข่ายทั้งสองมาประเมินโดยใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์และทำการประมวลผลสำหรับความยาวเซสชัน 5 นาที 10 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

Da Tsai et al. (2019) ได้ทำการศึกษาเทคนิค Virtual Station-Based Post-Processing Kinematic (VRS-PPK) เทคนิคการวางตำแหน่งนี้เป็นประโยชน์ในการทำงานที่ไม่ต้องการให้ผู้ใช้สร้างสถานีฐานหรือใช้อุปกรณ์สื่อสารแบบเรียลไทม์ผ่านระบบ VRS ซึ่งเทคนิคนี้อาจใช้สำหรับการสำรวจในทางราบที่มีความหนาแน่นสูง การศึกษาครั้งนี้นำข้อมูลการรังวัดแบบ Static ที่ได้รับผ่าน resurvey สถานีควบคุมในปี 2555 (ดำเนินการโดยกระทรวงมหาดไทยของไต้หวัน) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำภายในและความแม่นยำภายนอกของการวางตำแหน่งแบบ VRS-PPK ดังนั้นจึงจัดทำมาตรฐานการใช้งาน การสำรวจแบบหนาแน่นหรือการสำรวจอื่นๆ ผลการวิจัยพบว่าหลังจากที่พื้นที่ทดสอบถูกคัดเลือกผ่านเกณฑ์แล้วค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชุดรังวัดจะต้องน้อยกว่า 2 ซม. ในองค์ประกอบแนวราบ และน้อยกว่า 5 ซม. ในองค์ประกอบแนวตั้ง อัตราความแม่นยำของการกำหนดตำแหน่งของไซต์ทดสอบนั้นเป็น 70% ช่วงเวลาตอนเช้ามีอัตราความแม่นยำสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของพิกัด คือ 1.3 ซม. จากนั้นได้ทำการตรวจสอบความแตกต่างระหว่างชุด

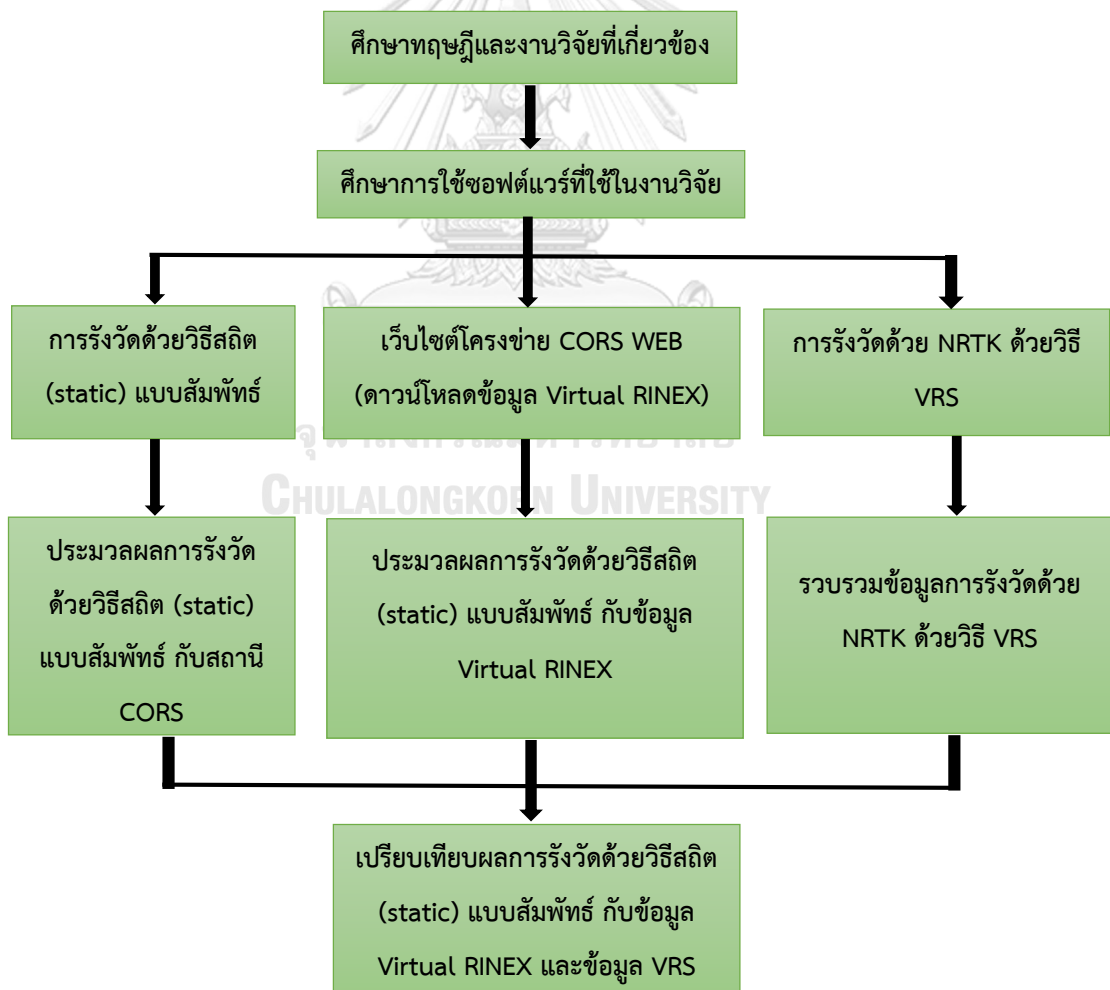
การรังวัดสองจุดของการทดสอบแต่ละจุด ผลการวิจัยพบว่า 92% ของพื้นที่ทดสอบนั้นมีความแตกต่างกันไม่เกิน 2 ซม. ในองค์ประกอบ N หรือ E อย่างไรก็ตามเมื่อเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนต่อความแตกต่างของจุดเพิ่มขึ้นเป็น 3 ซม. 97% ของสถานที่ทดสอบสามารถเป็นไปตามมาตรฐานความแตกต่างของเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จากนั้นจะทำการตรวจสอบความแตกต่างความยาวเส้นฐานระหว่าง VRS-PPK และ static ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าข้อกำหนดสำหรับการตรวจสอบความแตกต่างของความยาวเส้นฐานสามารถมีความรัดกุมได้มากถึง 20 มม. + 4 ppm × L ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานสำหรับสถานีควบคุมที่ resurvey โดยใช้การรังวัดแบบ VRS-PPK

2.2.2 Virtual Reference Station (VRS)

Mageed (2013) ได้ทำการศึกษาการประเมินความแม่นยำระหว่างการรังวัดแบบ GPS Virtual Reference Station (VRS) และเทคนิคการรังวัด GPS Real Time Kinematic (RTK) เพื่อเปรียบเทียบพิกัด X, Y และ Z ที่เกิดจากโครงข่าย VRS กับพิกัดผลลัพธ์จุดเดียวกันที่เกิดจากเทคนิค RTK ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งทางราบ P_{2d} ระหว่างเทคนิคทั้งสองมีค่าเฉลี่ย 52 มม. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 18 มม. ในขณะที่ความแตกต่างตำแหน่งเชิงพื้นที่ P_{3d} มีค่าเฉลี่ย 67 มม. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 23 มม. การค้นพบนี้ถือว่าไม่สำคัญต่องานสำรวจที่ดินและสำรวจภูมิประเทศ แต่ควรคำนึงถึงการสำรวจที่แม่นยำเช่นการตรวจสอบความผิดปกติของโครงสร้างเมื่อใช้เทคนิคทั้งสองในการวัด

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย เพื่อให้เป็นวิธีการรังวัดทางเลือกในกรณีที่การเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างสถานีควบคุม สถานีอ้างอิง และสถานีผู้ใช้ ไม่สามารถติดต่อสื่อสารร่วมกันได้ในการรังวัดแบบ NRTK เทคนิค VRS เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการรังวัดแบบ Virtual RINEX กับการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สำหรับนำมาใช้ในงานรังวัดแปลงที่ดิน โดยวิเคราะห์ค่า RMSE ทางราบ โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดวิธี Static แบบสัมพัทธ์ และการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX

3.2 ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย

ศึกษาการใช้งานเว็บไซต์สำหรับดาวเทียม Virtual RINEX และโปรแกรมสำหรับประมวลผล

3.2.1 เว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB

เป็นเว็บไซต์ที่เก็บข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมของ CORS สามารถใช้ดาวเทียมข้อมูล Virtual RINEX ย้อนหลัง สามารถเลือกตำแหน่ง Virtual Point วันที่ทำการรับสัญญาณและเวลาที่ต้องการใช้งานได้

3.2.2 Trimble Business Center (TBC) 5.0

ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC) เวอร์ชัน 5.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ พัฒนาโดยบริษัท Trimble Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประมวลผลข้อมูลดาวเทียม GNSS ในภายหลัง (Post Processing) โดยมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูล GNSS ของกลุ่มดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou (BDS) ร่วมกันได้รวมถึงสามารถประมวลผลข้อมูล GNSS ร่วมกับวงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูงได้รองรับข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องมือหลากหลายรุ่นและยี่ห้อ (Trimble, 2019)

3.2.3 CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2

เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับประมวลผลเส้นฐานทั้งจาก Broadcast และ Precise Ephemeris โดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou ในรูปแบบไฟล์ RINEX v.2 v.3, .HCN, .DAT ฯลฯ มาประมวลผลเส้นฐานและปรับแก้ (Adjustment) ผ่านระบบ Least Squares (CHC NAVTECH THAILAND, 2017)

3.2.4 RTKLIB 2.4.3

เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผล Open source สามารถประมวลผลแบบ Pseudorange และ Carrier-phase ทั้งแบบ Real-time และ Post-processing

3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

รวบรวมข้อมูลจากการรังวัดด้วยวิธี Static และการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS จากข้อมูลภาคสนามของกรมที่ดินระหว่างวันที่ 14

ธันวาคม 2562 ถึง 29 ธันวาคม 2562 ข้อมูลหมุดทดสอบรวมทั้งสิ้น 926 หมุด ใน 230 ลูบ โดยจะทำการคัดเลือกหมุดเพื่อที่จะนำมาทดสอบจากลูบทั้งหมดที่มี โดยจะพิจารณาจากลูบที่มีขนาดต่างกันในการศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยได้จำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้านออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ (Charoenkalunyuta et al., 2019) แล้วทำการเลือกหมุดทดสอบจำนวน 3 หมุด ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่ง Centroids ของลูบสามเหลี่ยมเท่านั้น

3.3.1 ข้อมูลการรังวัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์ ได้จากการรับสัญญาณ GNSS เป็นระยะเวลา 60 นาที โดยรับสัญญาณ 30 วินาที ต่อ 1 epoch ในตำแหน่งที่ค่อนข้างโล่ง ปราศจากสิ่งบดบังรอบทิศ (เท่าที่สามารถทำได้)

3.3.2 ข้อมูลการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS รับสัญญาณดาวเทียมทุก 1 วินาที ได้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม 60 วินาที อย่างต่อเนื่องจำนวน 15 ครั้ง และดำเนินการรังวัดในเวลาเดียวกันกับการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์

3.3.3 ข้อมูล Virtual RINEX การรับสัญญาณดาวเทียมทุก 1 วินาที ได้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม 60 นาที ซึ่งดาวนำโหนดได้จากเว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน โดยเลือกตำแหน่ง Virtual Point และช่วงเวลาเดียวกันกับการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์

3.4 การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลจะใช้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม Static แบบสัมพัทธ์ 60 นาที และข้อมูล Virtual RINEX รับสัญญาณดาวเทียม 60 นาที โดยตำแหน่ง Virtual Point และช่วงเวลาการรับสัญญาณเดียวกันกับการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธี Static แบบสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถดาวนำโหนดได้จากเว็บไซต์โครงข่าย CORS WEB ของกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน จากนั้นแบ่งการประมวลผลเป็นสองวิธี ได้แก่ การประมวลผลข้อมูล Static แบบสัมพัทธ์กับสถานี CORS ที่ใกล้ที่สุด 2 สถานี และการประมวลผลข้อมูล Virtual RINEX กับข้อมูล Static แบบสัมพัทธ์

3.4.1 การประมวลผลข้อมูล Static แบบสัมพัทธ์กับสถานี CORS ที่ใกล้ที่สุด 2 สถานี

3.4.1.1 ใช้โปรแกรม Trimble Business Center (TBC) 5.0 ในการประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) ในภายหลัง (Post Processing) จำนวน 60 นาที เพื่อกำหนดให้เป็นค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ในการนำมาตรวจสอบกับค่าพิกัดของหมุดทดสอบที่

ทำการรังวัดด้วย NRTK เทคนิค VRS และค่าพิกัดที่ประมวลได้จากข้อมูล Virtual RINEX กับข้อมูล Static แบบสัมพัทธ์

3.4.1.2 ใช้ค่าปรับแก้วงโคจรรายละเอียดสูง MGEX Final orbit ของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo, Beidou และ QZSS ความถูกต้องสูงที่สุด (Precise Orbit) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex> โดยข้อดีของการใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูง เพื่อนำมาประมวลผลข้อมูลแบบสถิตในภายหลังนั้น ค่าพิกัดที่ได้จะมีความถูกต้องสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast (กรมที่ดิน, 2562)

3.4.1.3 ในการประมวลผลในแต่ละหมุดทดสอบ จะทำการโยนยึดค่าพิกัดอ้างอิงจากสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่อยู่ใกล้กับหมุดทดสอบมากที่สุด จำนวน 2 สถานี

3.4.2 การประมวลผลข้อมูล Virtual RINEX กับข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static)

3.4.2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล Virtual RINEX กับข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) ในภายหลัง (Post Processing) ได้แก่

1. Trimble Business Center (TBC) 5.0
2. CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2
3. RTKLIB 2.4.3

ตารางที่ 1 การตั้งค่าพื้นฐานของแต่ละซอฟต์แวร์

Basic Setting	
Elevation Mask	10°
Ephemeris used	Broadcast
Frequency used	Dual Frequency (L1, L2)

การรังวัดค่าพิกัดมาประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ในภายหลังเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่แม่นยำ วิธีการแบบนี้เรียกว่า GNSS Post-processing ซึ่งการทำ Post-Processing สามารถใช้งานได้ทั้งแบบ Static และ Kinematic โดยนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณที่เป็นสถานีฐานและสถานีผู้ใช้ที่บันทึกในช่วงเวลาเดียวกันมาประมวลผลในซอฟต์แวร์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกการทำประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ในภายหลัง (Post-Processing) ทั้งแบบ Static และ Kinematic

** งานวิจัยนี้ได้ทำการประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ในภายหลัง (Post-processing) แบบ Kinematic ซึ่งทำได้เพียงซอฟต์แวร์ CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 เท่านั้น

3.4.2.2 ใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast ของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou

3.4.2.3 ในการประมวลผลข้อมูล Virtual RINEX กับข้อมูลการรับสัญญาณแบบสถิต (Static) ในภายหลัง (Post-Processing) จำนวน 1, 2, 3 และ 10 นาที และมี epoch เดียวกันกับข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมด้วย NRTK เทคนิค VRS เพื่อนำค่าพิกัดที่ประมวลผลได้มาตรวจสอบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) และค่าพิกัดที่รังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS

3.5 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผล

การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX เพื่อนำมาใช้แทนที่ การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดิน แบ่งการวิเคราะห์ ดังนี้

3.5.1 จำนวนอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX (คำนวณจาก epoch ที่มีผลการประมวลผลเป็น Fix เท่านั้น)

3.5.2 จำนวนอัตราร้อยละของค่ากระโดด ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX เมื่อเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (คำนวณจากจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบมากกว่า 8 เซนติเมตร)**

3.5.3 วิเคราะห์ค่าความถูกต้องโดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ตามสมการที่ 2.1

** ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีตัววัดความแปรปรวนของค่าพิกัดเพิ่มขึ้นมาอีก 1 พารามิเตอร์ คือ ร้อยละค่ากระโดดทางตำแหน่ง โดย “ค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” คือ ค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร (ซึ่งเท่ากับ 2σ หรือที่ความเชื่อมั่น 95% ของความถูกต้องทางตำแหน่งที่ต้องการคือ 4 เซนติเมตร)

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

จากการวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ โดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Root Mean Square Error - RMSE) ของการรังวัดแบบ Virtual RINEX กับการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX (VR) เพื่อนำมาใช้งานแทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดิน ได้ผลการศึกษาวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

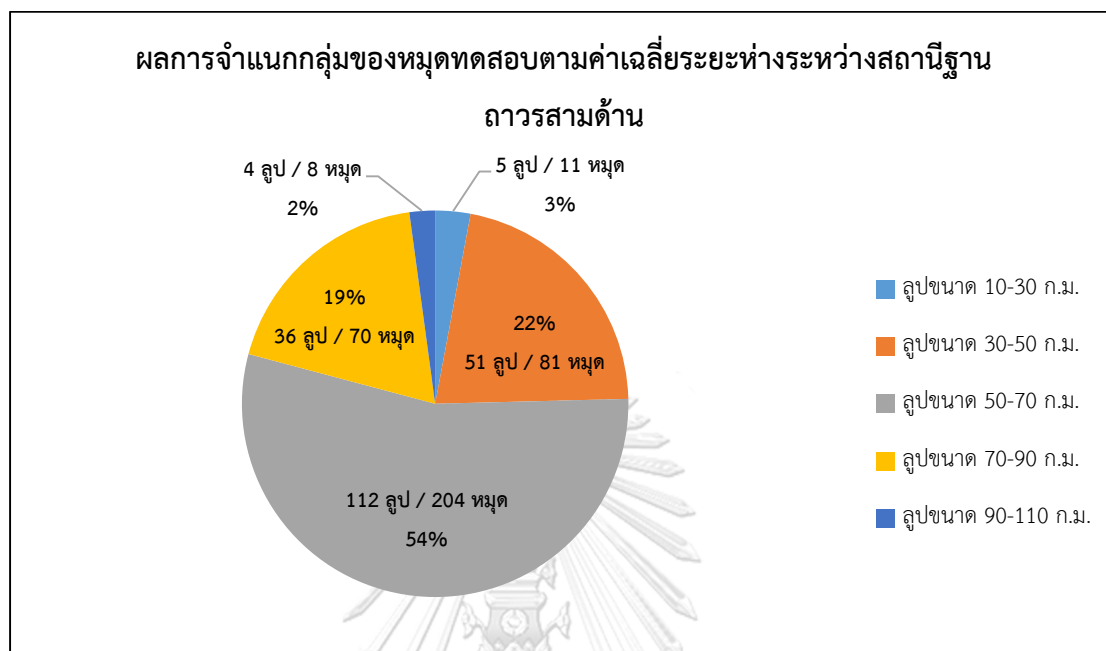
4.1 ผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน

จากการรังวัดด้วยวิธี Static และการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS จากข้อมูลภาคสนามของกรมที่ดินระหว่างวันที่ 14 ธันวาคม 2562 ถึง 29 ธันวาคม 2562 มีข้อมูลหมุดทดสอบรวมทั้งสิ้น 926 หมุด ใน 230 ลูบ โดยจะทำการคัดเลือกหมุดเพื่อที่จะนำมาทดสอบจากลูบทั้งหมดที่มี โดยจะพิจารณาจากลูบที่มีขนาดต่างกัน ใน การศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยได้จำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้านออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ (Charoenkalunyuta et al., 2019) แล้วทำการเลือกหมุดทดสอบจำนวน 3 หมุด ที่อยู่ใกล้กับตำแหน่ง Centroids ของลูบสามเหลี่ยมเท่านั้น ดังแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน จำนวนลูบ และจำนวนหมุดทดสอบ

ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐาน อ้างอิงถาวรสามด้าน (กิโลเมตร)	จำนวนลูบ (Loops)	จำนวนหมุด (หมุด)
10-30	5	11
30-50	51	81
50-70	112	204
70-90	36	70
90-110	4	8
รวม	208	374

สำหรับการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร
สามด้าน มีรายละเอียด ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร
สามด้าน

- ลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 5 ลูบ มีหมุดทดสอบ 11 หมุด คิดเป็น 3%
- ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 51 ลูบ มีหมุดทดสอบ 81 หมุด คิดเป็น 22%
- ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 112 ลูบ มีหมุดทดสอบ 204 หมุด คิดเป็น 54%
- ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 36 ลูบ มีหมุดทดสอบ 70 หมุด คิดเป็น 19%
- ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 4 ลูบ มีหมุดทดสอบ 8 หมุด คิดเป็น 2%

จากผลการจำแนกฯ ข้างต้น จะเห็นว่า ข้อมูลหมุดทดสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในลูบขนาด 50-70
รองลงมาคือลูบขนาด 30-50 และ 70-90 กิโลเมตร รองลงมาคือลูบขนาด 10-30 กิโลเมตร และ 70-
90 กิโลเมตร มีจำนวนหมุดที่น้อยที่สุด

4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้นจะพิจารณาเฉพาะค่าพิกัดทางราบ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรทางสถิติ ได้แก่

4.2.1 อัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS (เฉลี่ย 3 นาที)

4.2.2 อัตราร้อยละของค่ากระโดดสูงสุดของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

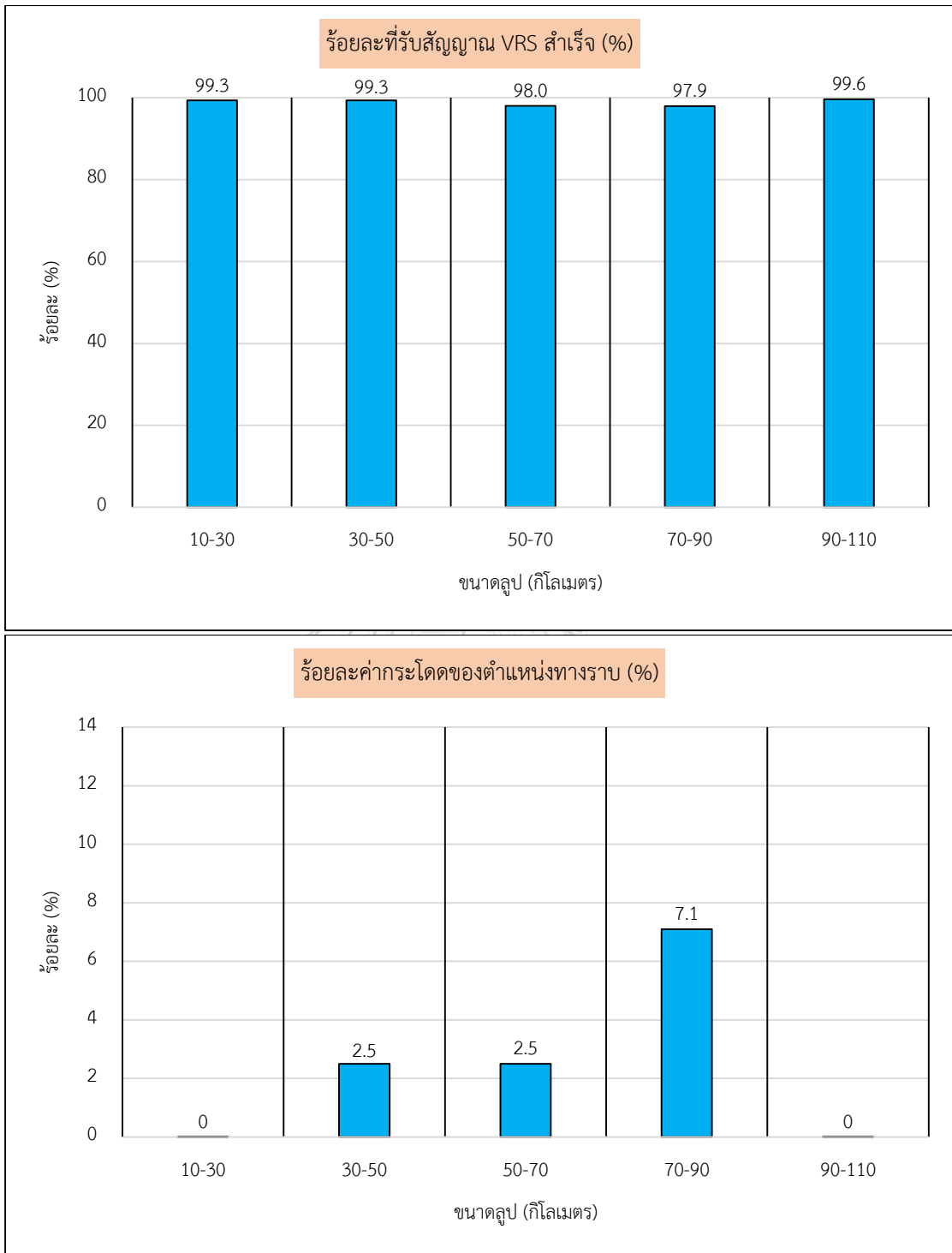
4.2.3 ค่าความถูกต้องโดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ตามสมการที่ 2.1

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 3 และภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 15

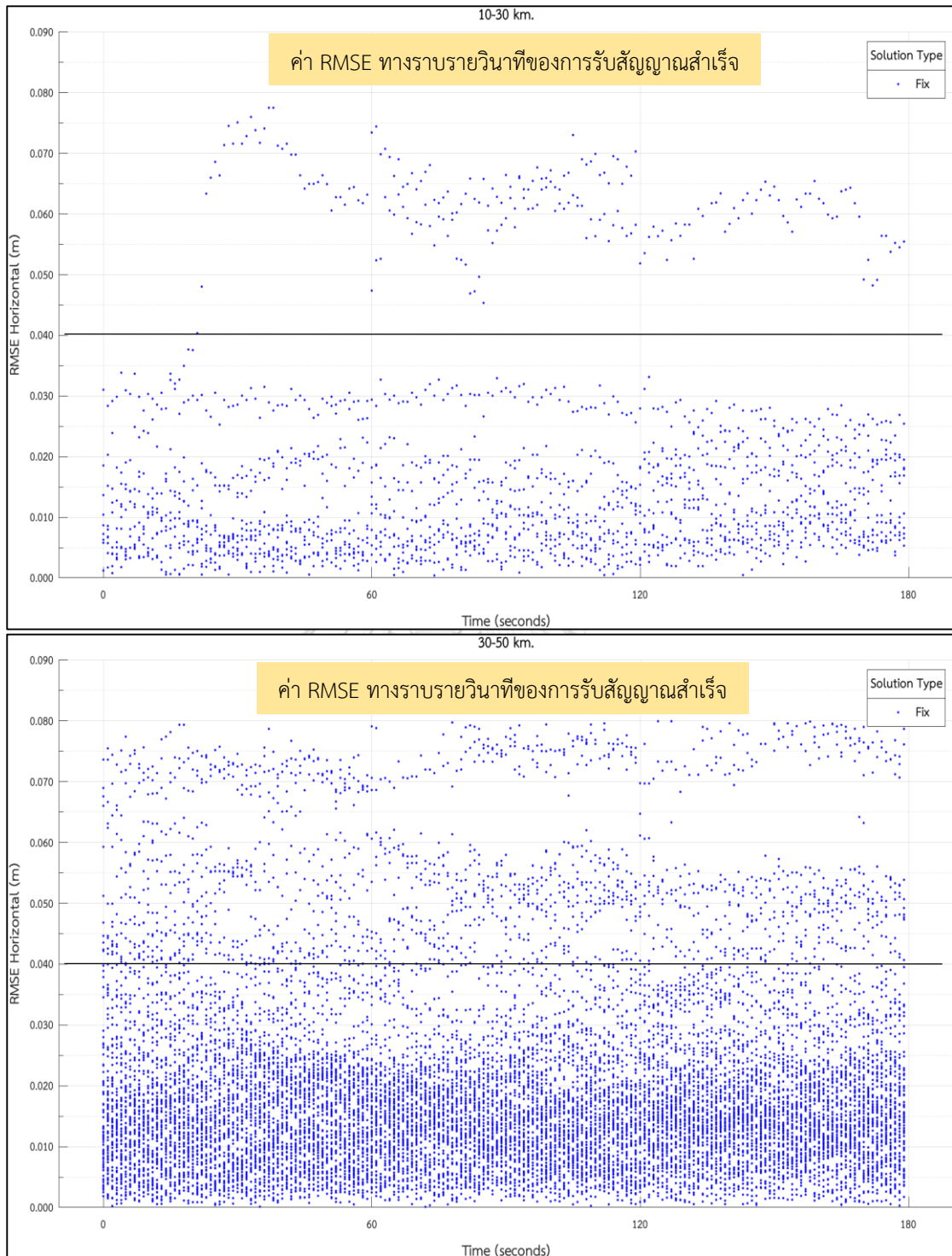
ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของตำแหน่งทางราบ

ลำดับ	ขนาดรูป (กิโลเมตร)	จำนวนหมุด ทดสอบ	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่มากกว่า 8 ซม. (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
1	10-30	11	99.3	0	0.020
2	30-50	81	99.3	2.5	0.024
3	50-70	204	98	2.5	0.027
4	70-90	70	97.9	7.1	0.032
5	90-110	8	99.6	0	0.029

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของตำแหน่งทางราบที่ช่วงการรังวัด 3 นาที รูปขนาด 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีรายละเอียดดังภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 15

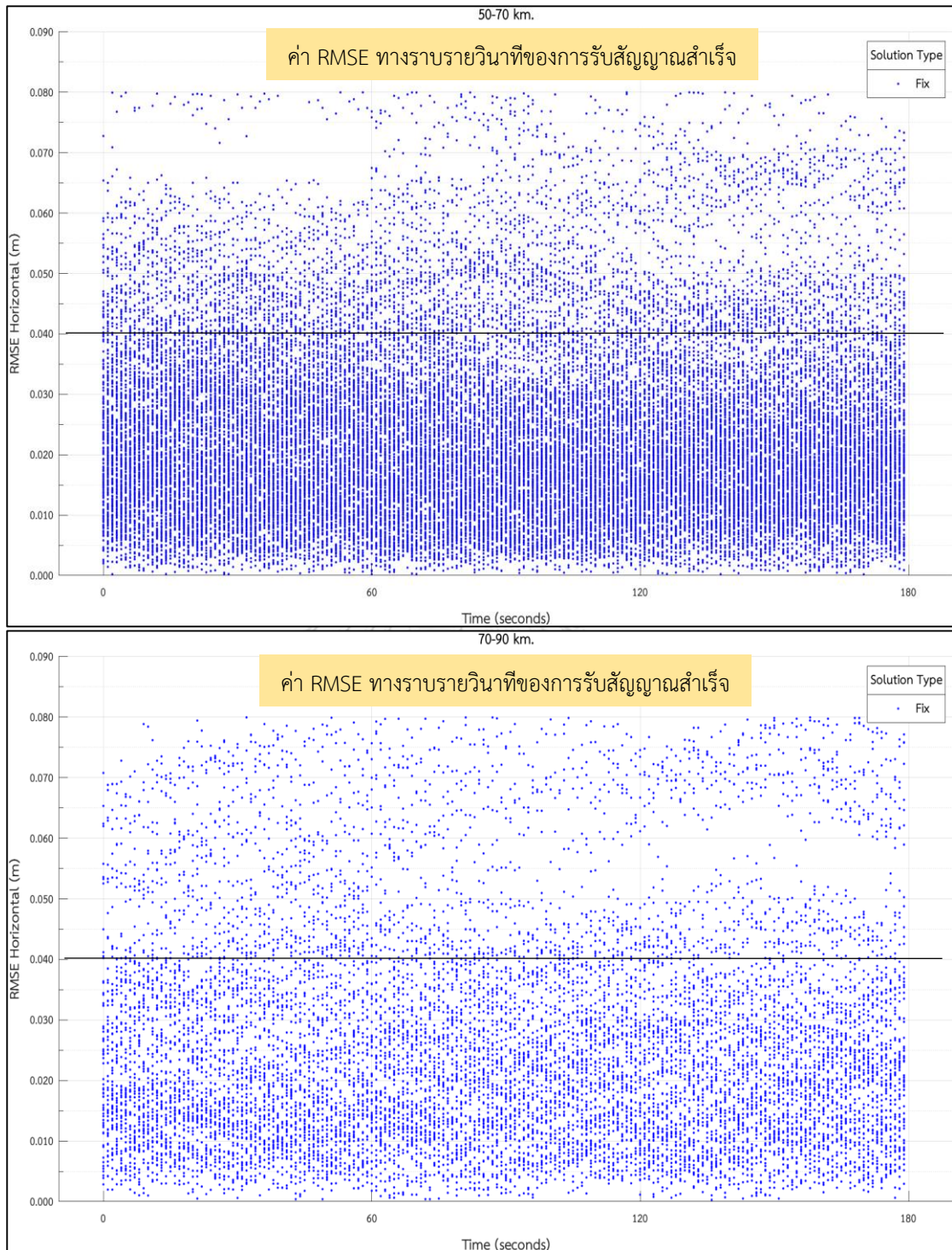


ภาพที่ 12 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 3 นาที)



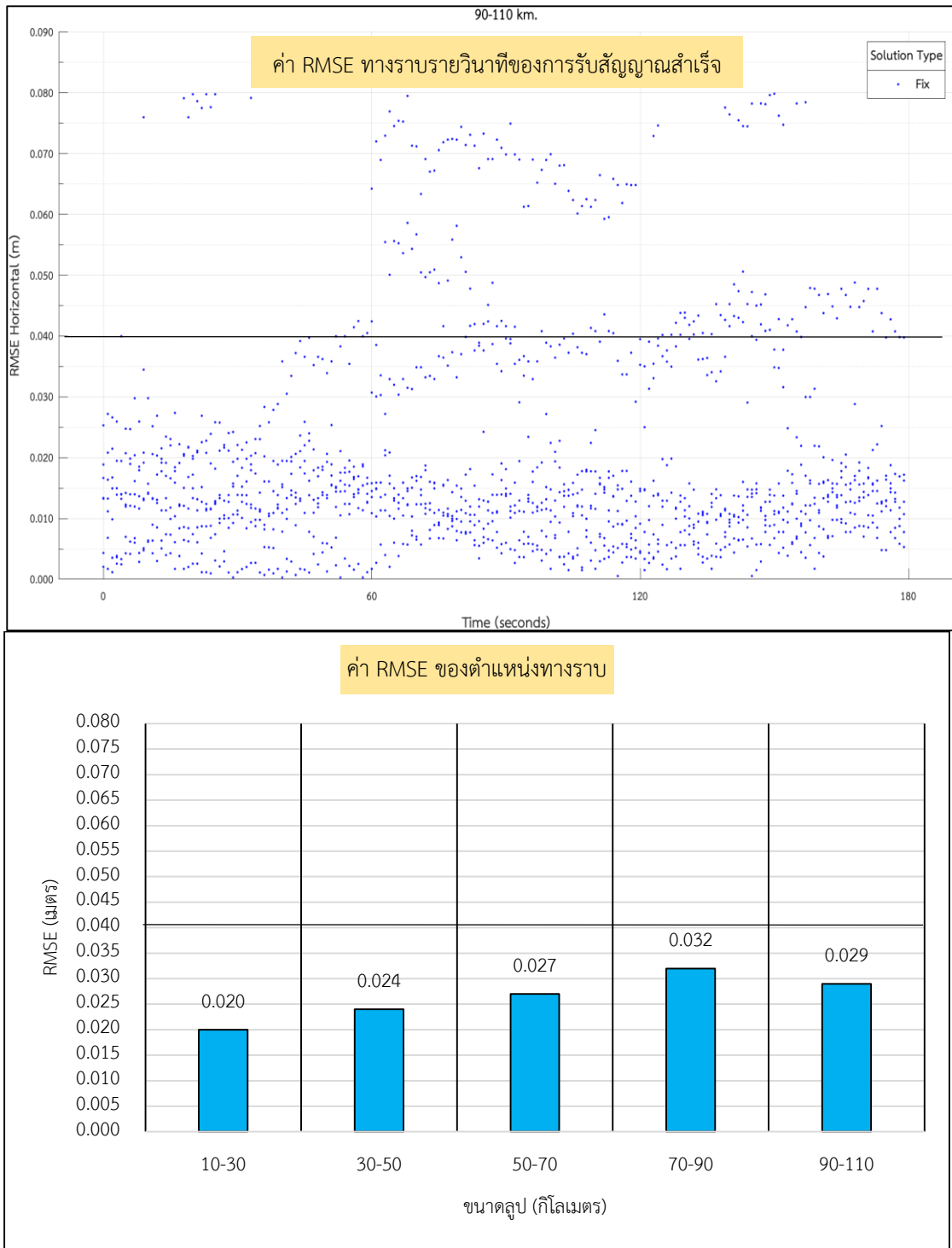
ภาพที่ 13 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) (บน) ลูบขนาด 10-30 กม. และ (ล่าง) ลูบขนาด 30-50 กม.

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 3 นาที)



ภาพที่ 14 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) (บน) ลูบขนาด 50-70 กม. และ (ล่าง) ลูบขนาด 70-90 กม.

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 3 นาที)



ภาพที่ 15 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ลูปขนาด 90-110 กม. และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ด้วยเทคนิคแบบ VRS

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 3 นาที)

4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX นั้นจะพิจารณาค่าพิกัดทางราบ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรทางสถิติ ได้แก่

1. อัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดแบบ Virtual RINEX (เฉลี่ย 1, 2, 3 และ 10 นาที)
2. อัตราร้อยละของค่ากระโดดสูงสุดของการรังวัดแบบ Virtual RINEX เมื่อเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง
3. ค่าความถูกต้องโดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของการรังวัดแบบ Virtual RINEX เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ตามสมการที่ 2.1

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX ของตำแหน่งทางราบ ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ที่ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ Trimble Business Center (TBC) 5.0, CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2 และ RTKLIB 2.4.3

4.3.1 รูปขนาด 10-30 กิโลเมตร

โดยผลการศึกษาวินิจฉัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 4 และภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 18

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) รูปขนาด 10-30 กิโลเมตร

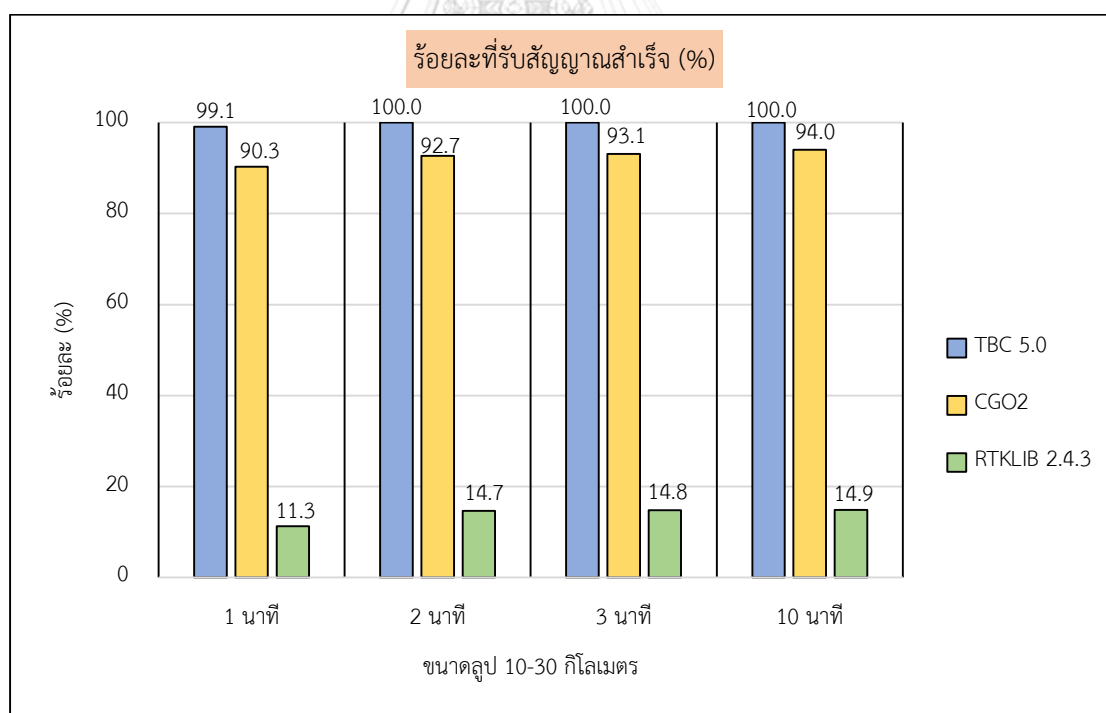
สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติได้แก่ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ”, “ร้อยละค่ากระโดดทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ* (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
1	TBC 5.0	11	1	99.1	9.1	0.020
			2	100	0	0.022
			3	100	0	0.019
			10	100	0	0.021

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ* (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
2	CGO2	11	1	90.3	0	0.017
			2	92.7	0	0.019
			3	93.1	0	0.018
			10	94	0	0.018
3	RTKLIB 2.4.3	11	1	11.3	0	0.010
			2	14.7	0	0.013
			3	14.8	0	0.011
			10	14.9	0	0.020

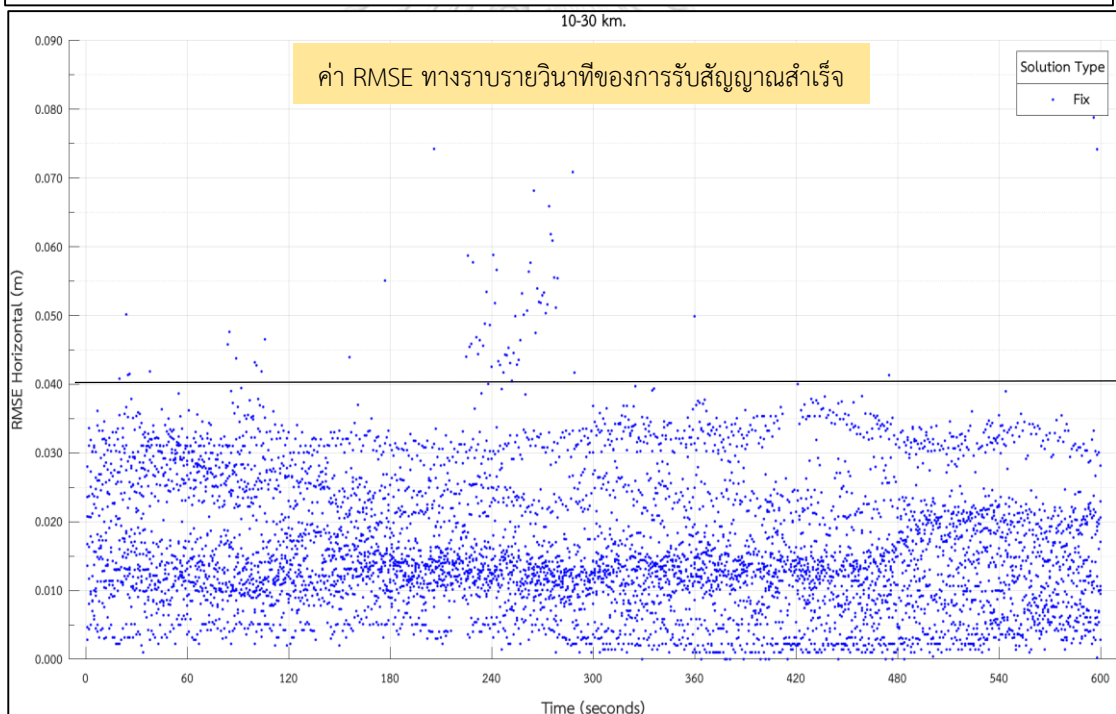
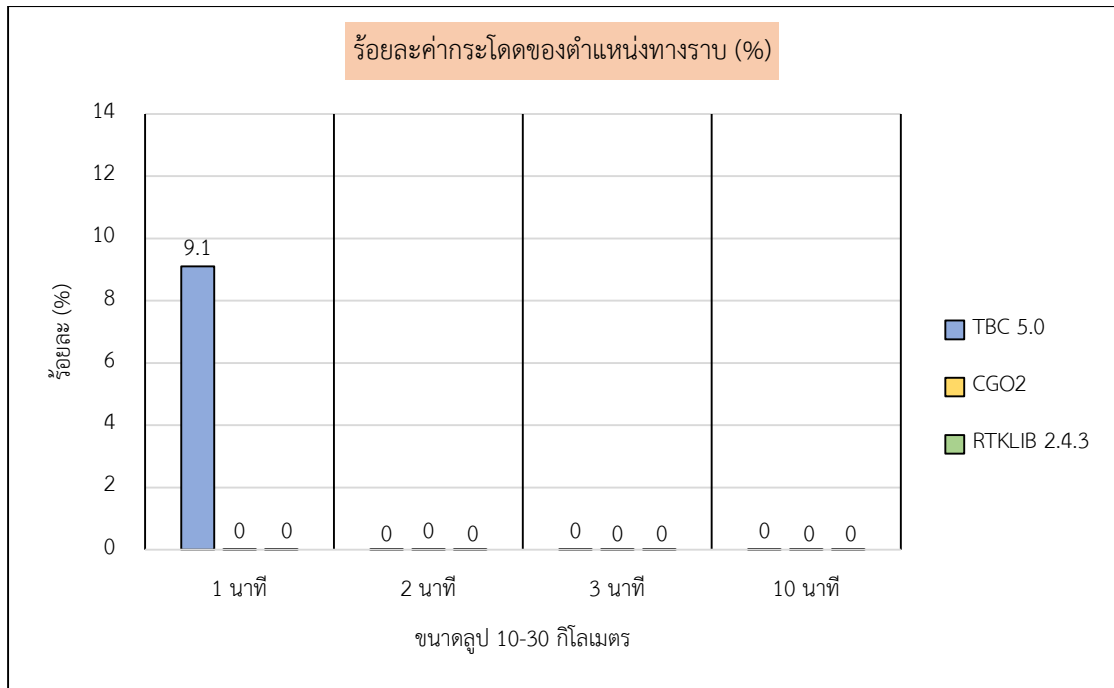
หมายเหตุ

* ร้อยละค่ากระโดดค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ร้อยละของจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



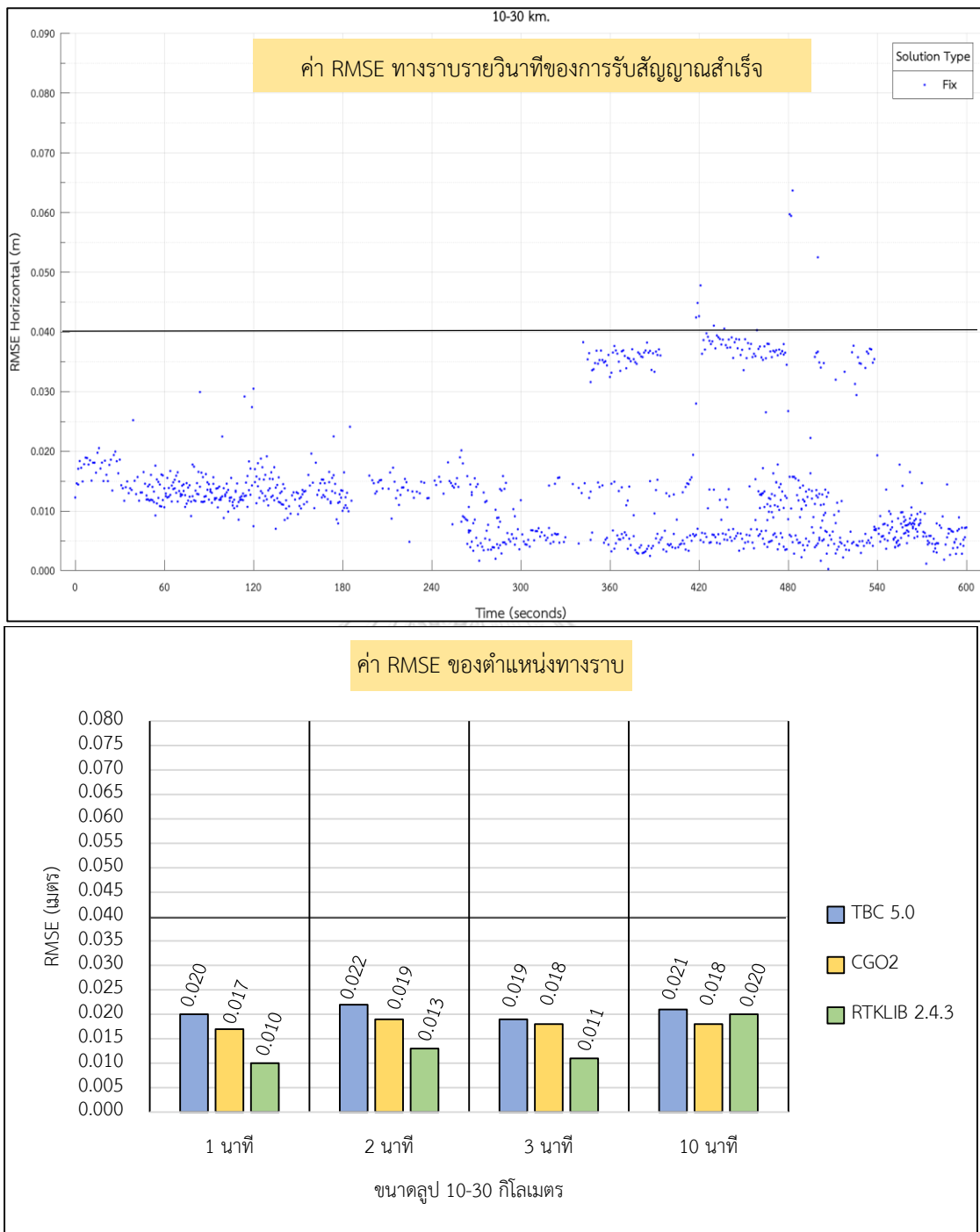
ภาพที่ 16 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 10-30 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 17 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในลูปขนาด 10-30 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละค่ากระโดดในตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที) และ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที)



ภาพที่ 18 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 10-30 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที) และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)

4.3.2 รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 5 และภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 21

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ)

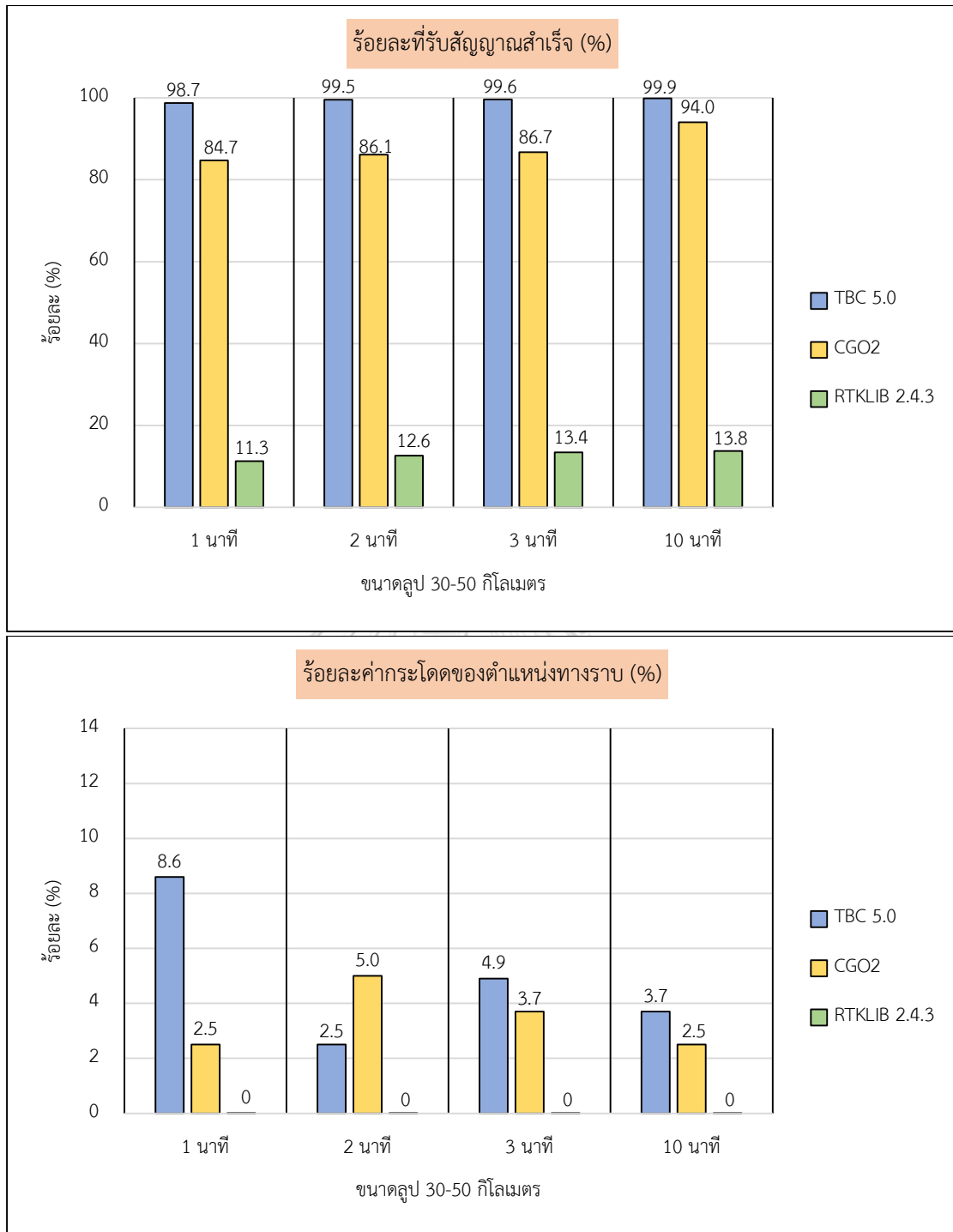
รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติได้แก่ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ”, “ร้อยละค่ากระโดดทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
1	TBC 5.0	81	1	98.7	8.6	0.029
			2	99.5	2.5	0.031
			3	99.6	4.9	0.029
			10	99.9	3.7	0.028
2	CGO2	81	1	84.7	2.5	0.029
			2	86.1	5	0.029
			3	86.7	3.7	0.030
			10	94	2.5	0.028
3	RTKLIB 2.4.3	81	1	11.3	0	0.020
			2	12.6	0	0.017
			3	13.4	0	0.019
			10	13.8	0	0.018

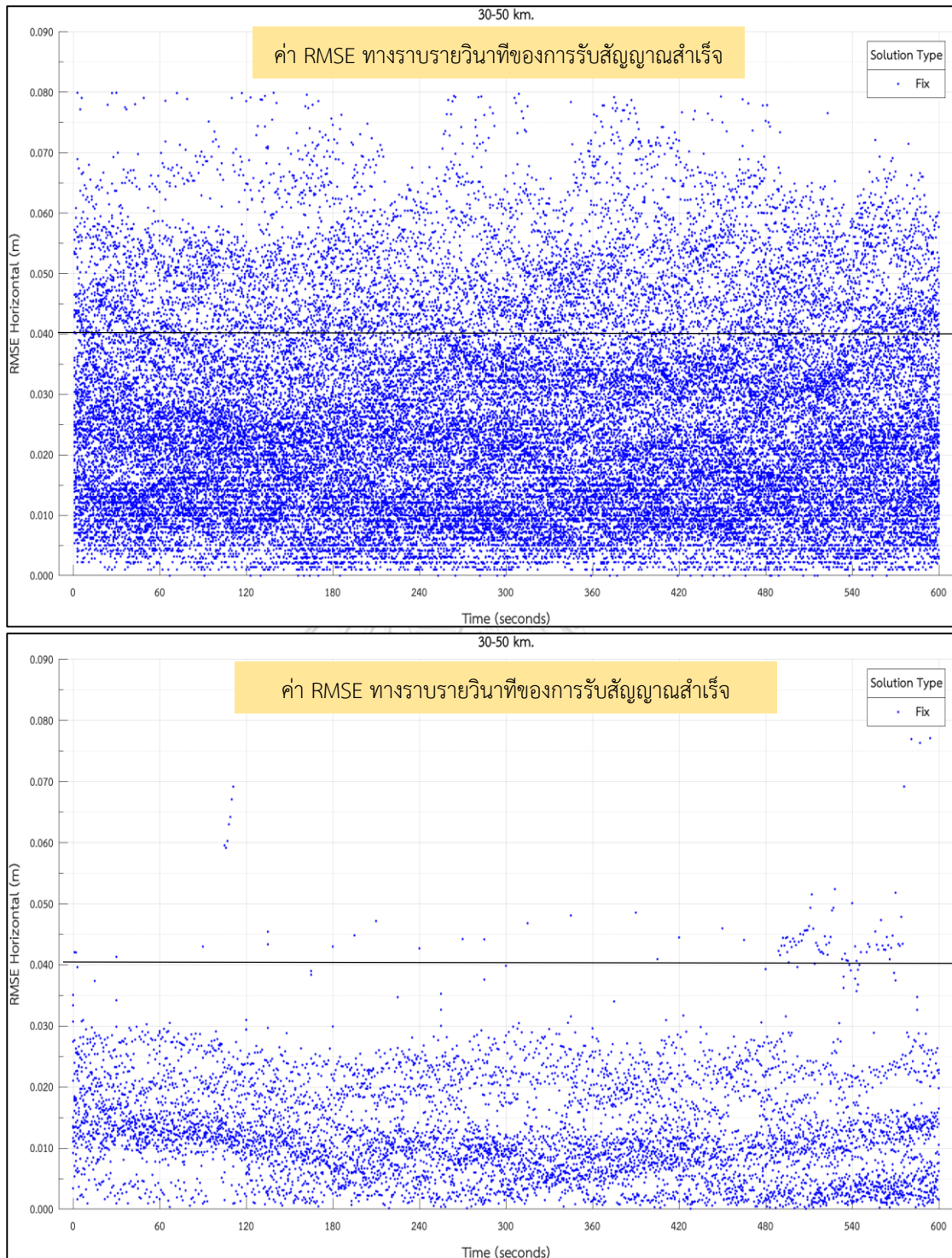
หมายเหตุ

* ร้อยละค่ากระโดดค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ร้อยละของจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



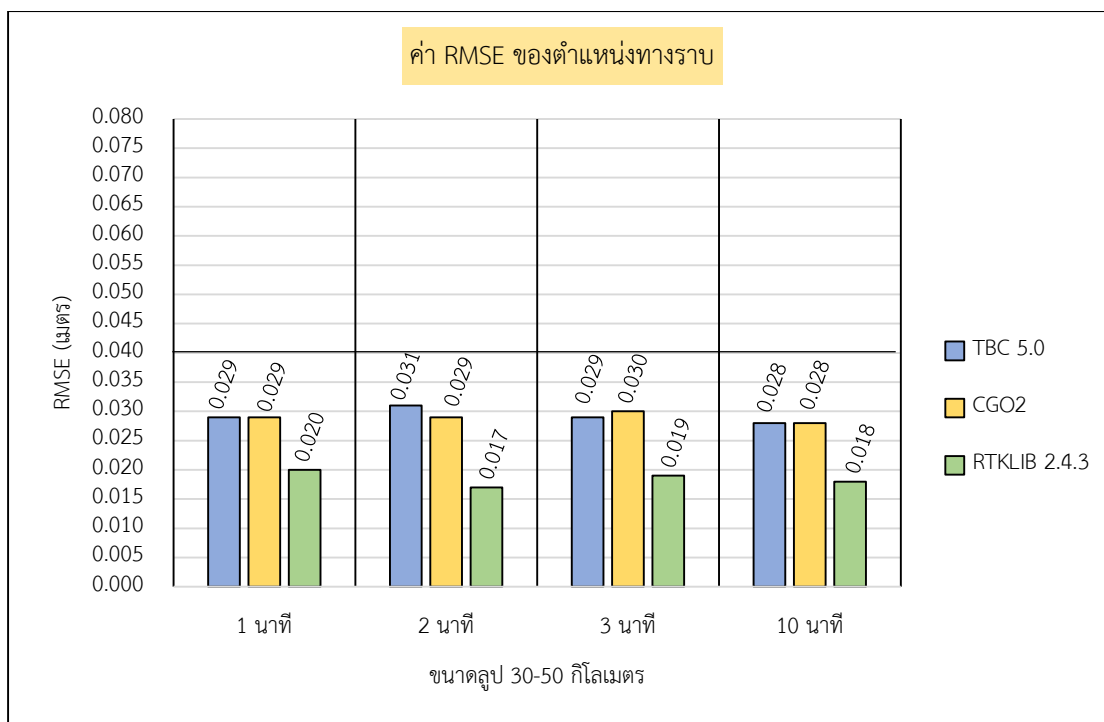
ภาพที่ 19 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูขขนาด 30-50 กิโลเมตรตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดในตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 20 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 (บน) และ ซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 (ล่าง) ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที)



ภาพที่ 21 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)

4.3.3 ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 6 และภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร

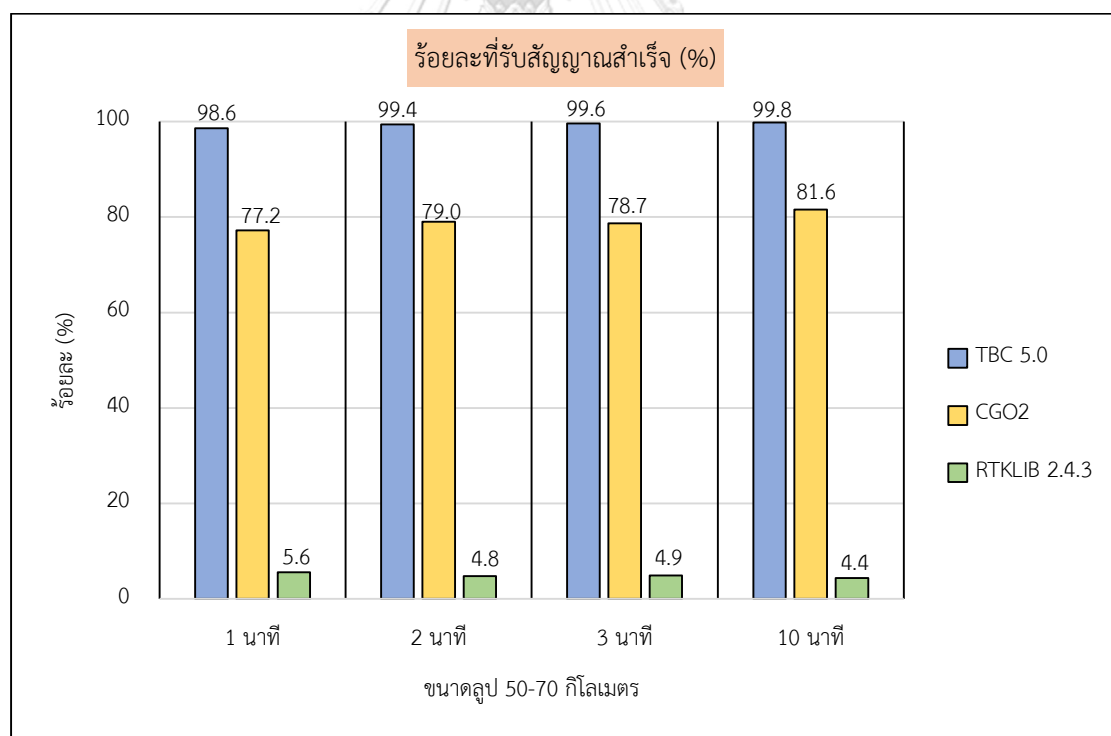
สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติได้แก่ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ”, “ร้อยละค่ากระโดดทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุม ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
1	TBC 5.0	204	1	98.6	1.5	0.038
			2	99.4	1	0.037
			3	99.6	0.5	0.037
			10	99.8	2.5	0.036

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
2	CGO2	204	1	77.2	3.2	0.036
			2	79	3	0.036
			3	78.7	1.5	0.036
			10	81.6	1.4	0.035
3	RTKLIB 2.4.3	204	1	5.6	0	0.045
			2	4.8	0	0.073
			3	4.9	0	0.078
			10	4.4	2.6	0.063

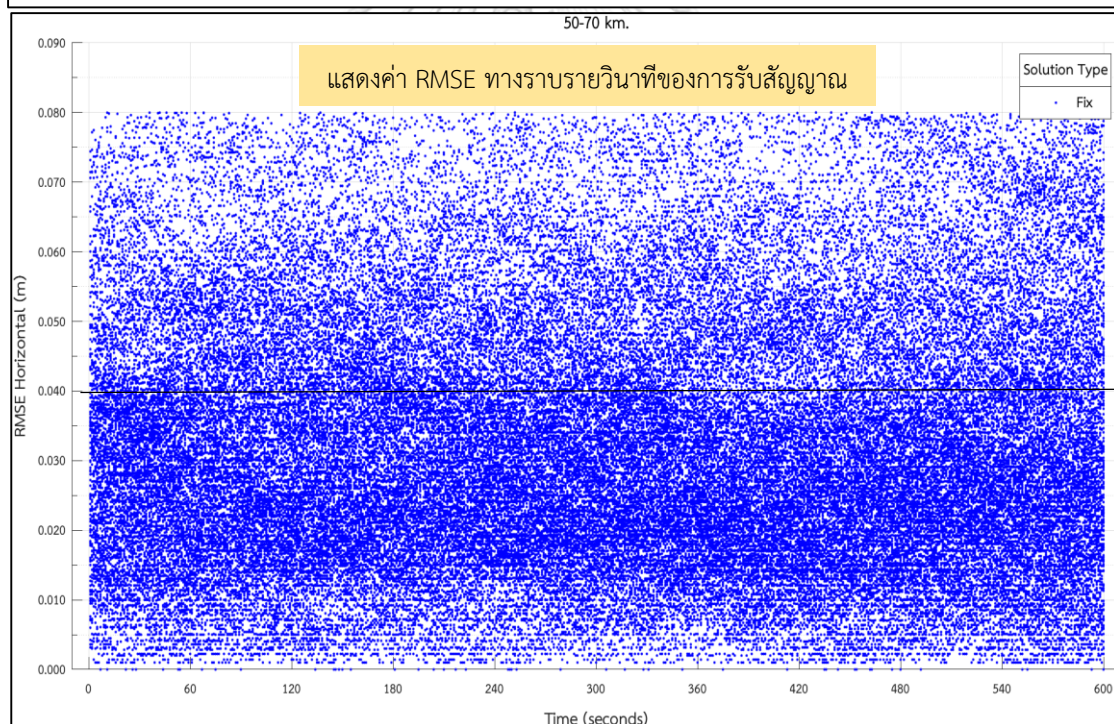
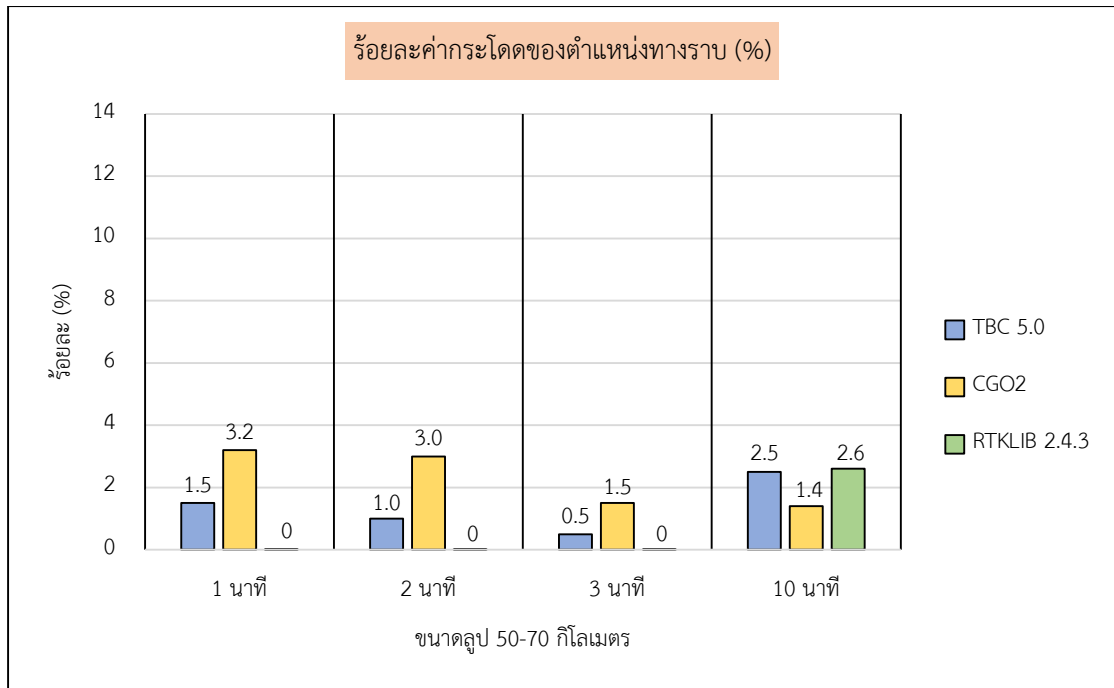
หมายเหตุ

* ร้อยละค่ากระโดดค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ร้อยละของจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



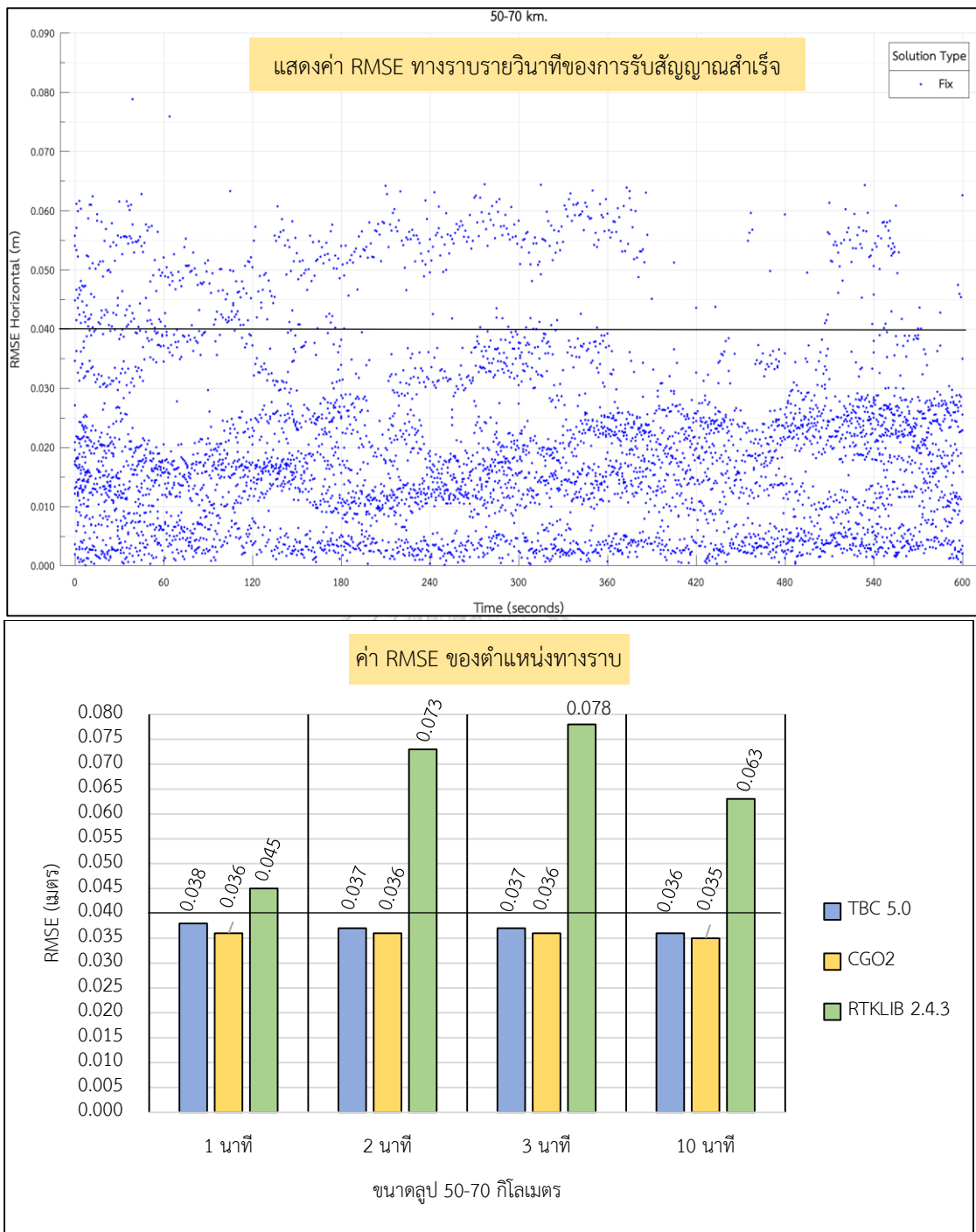
ภาพที่ 22 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูปขนาด 50-70 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 23 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในลูขขนาด 50-70 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละค่ากระโดดในตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที) และ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที)



ภาพที่ 24 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปแบบ 50-70 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที) และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)

4.3.4 รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 7 และภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 27

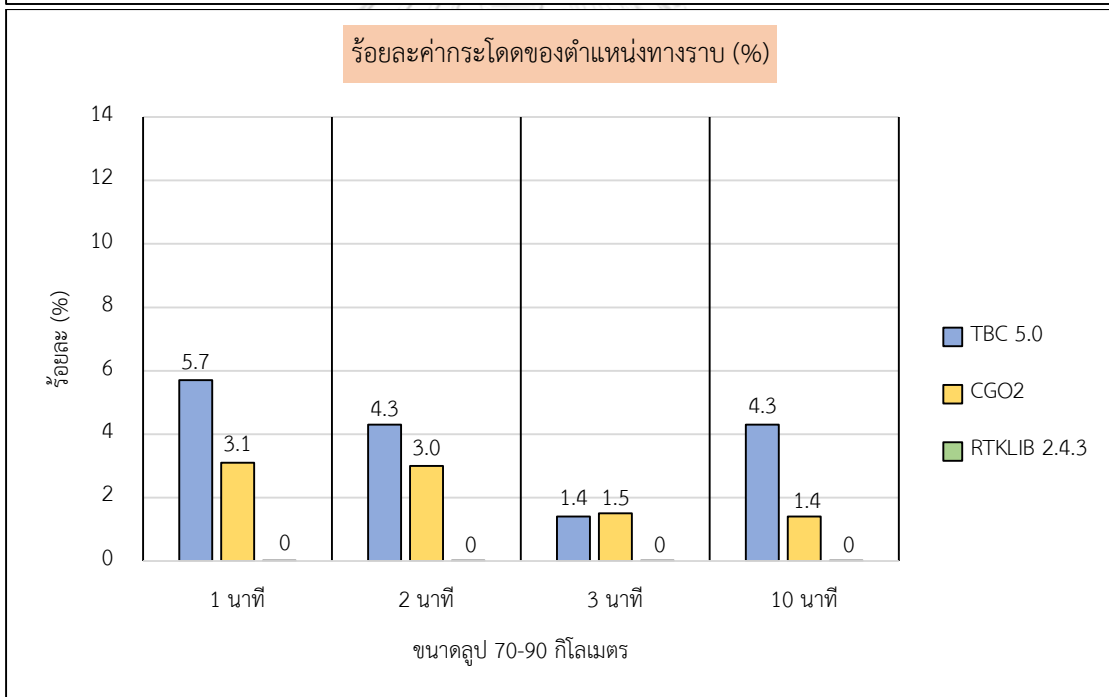
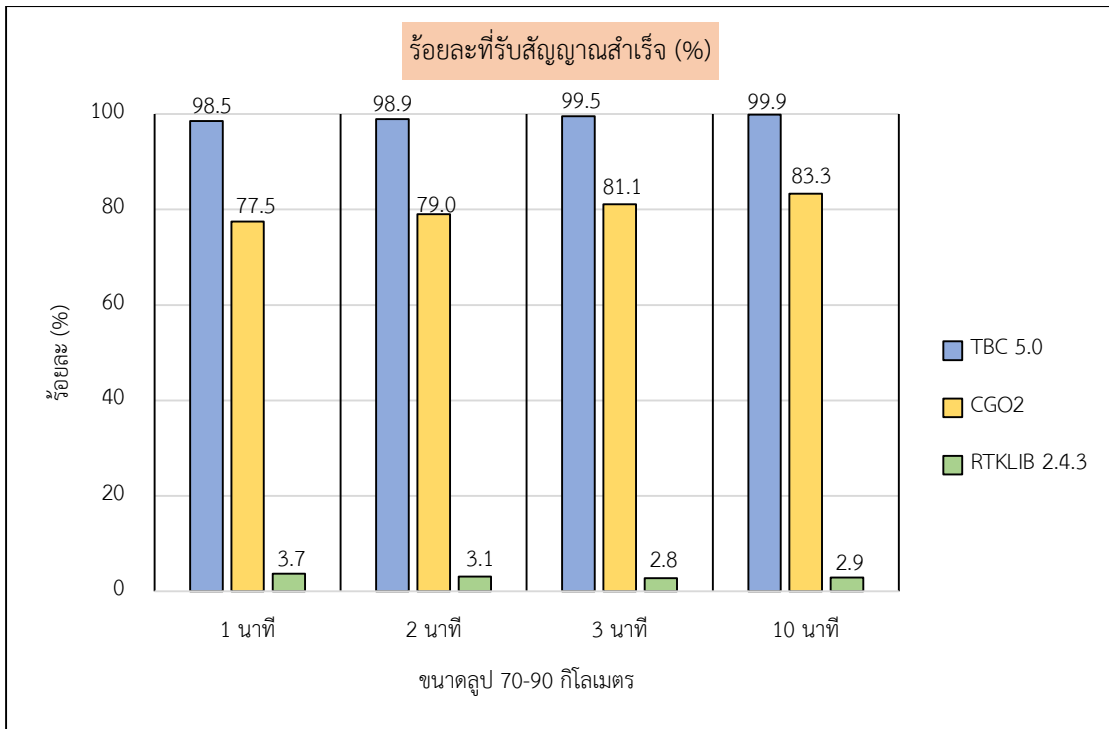
ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติได้แก่ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ”, “ร้อยละค่ากระโดดทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาทิต)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ร้อยละค่า กระโดดทาง ราบ (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
1	TBC 5.0	70	1	98.5	5.7	0.039
			2	98.9	4.3	0.036
			3	99.5	1.4	0.039
			10	99.9	4.3	0.038
2	CGO2	70	1	77.5	3.1	0.036
			2	79	3	0.037
			3	81.1	1.5	0.038
			10	83.3	1.4	0.038
3	RTKLIB 2.4.3	70	1	3.7	0	0.041
			2	3.1	0	0.040
			3	2.8	0	0.037
			10	2.9	0	0.039

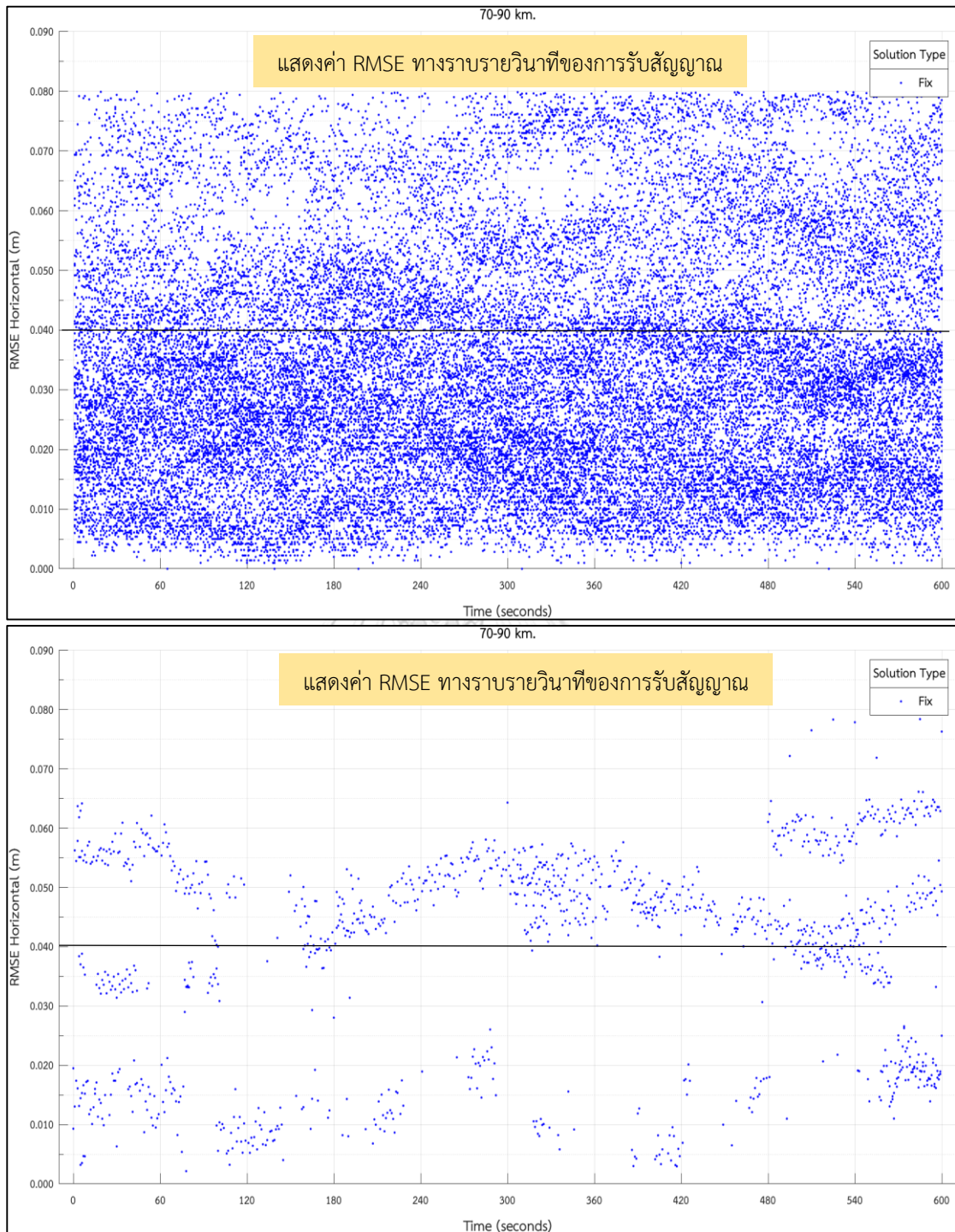
หมายเหตุ

* ร้อยละค่ากระโดดค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ร้อยละของจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



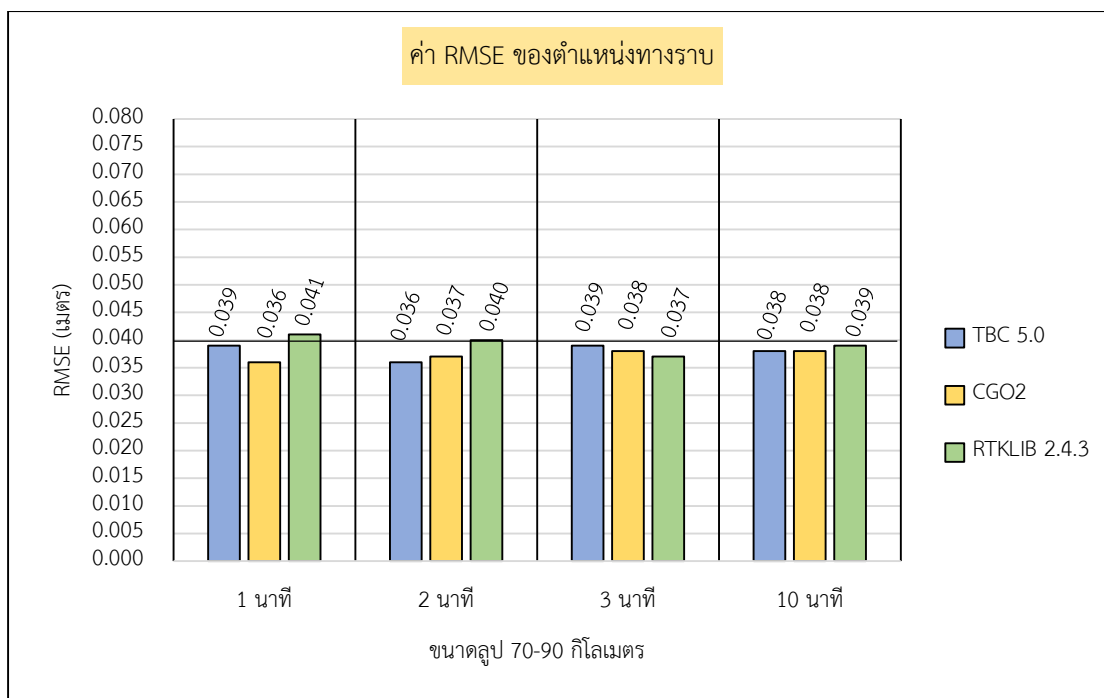
ภาพที่ 25 (บน) แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 26 แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 (บน) และ ซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 (ล่าง) ในลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที)



ภาพที่ 27 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)

4.3.5 ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 8 และภาพที่ 28 ถึงภาพที่ 30

ตารางที่ 8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX (ทางราบ) ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร

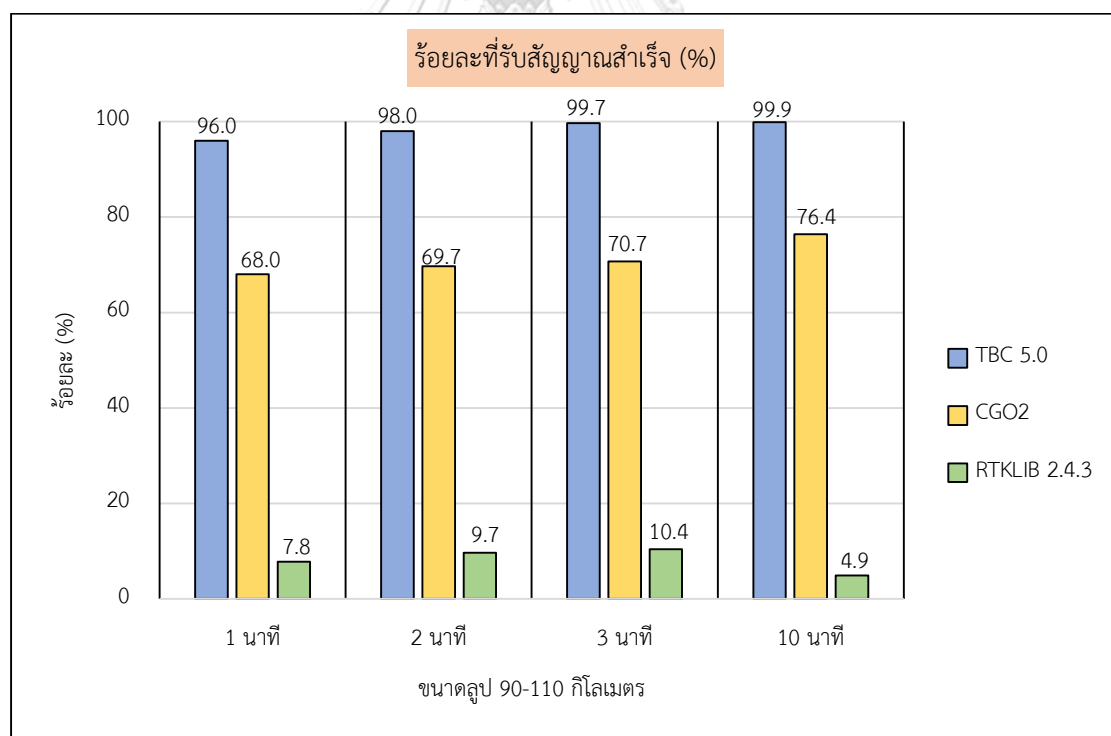
สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติได้แก่ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ”, “ร้อยละค่ากระโดดทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หตุ ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่ มากกว่า 8 ซม.* (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
1	TBC 5.0	8	1	96	12.5	0.041
			2	98	12.5	0.040
			3	99.7	0	0.038
			10	99.9	0	0.043

ลำดับ	ซอฟต์แวร์	จำนวน หมุด ทดสอบ	การรังวัด (นาที)	การรับ สัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่ มากกว่า 8 ชม.* (%)	RMSE ของ ตำแหน่งทางราบ (เมตร)
2	CGO2	8	1	68	0	0.034
			2	69.7	0	0.037
			3	70.7	12.5	0.038
			10	76.4	12.5	0.038
3	RTKLIB 2.4.3	8	1	7.8	0	0.030
			2	9.7	0	0.030
			3	10.4	0	0.031
			10	4.9	0	0.032

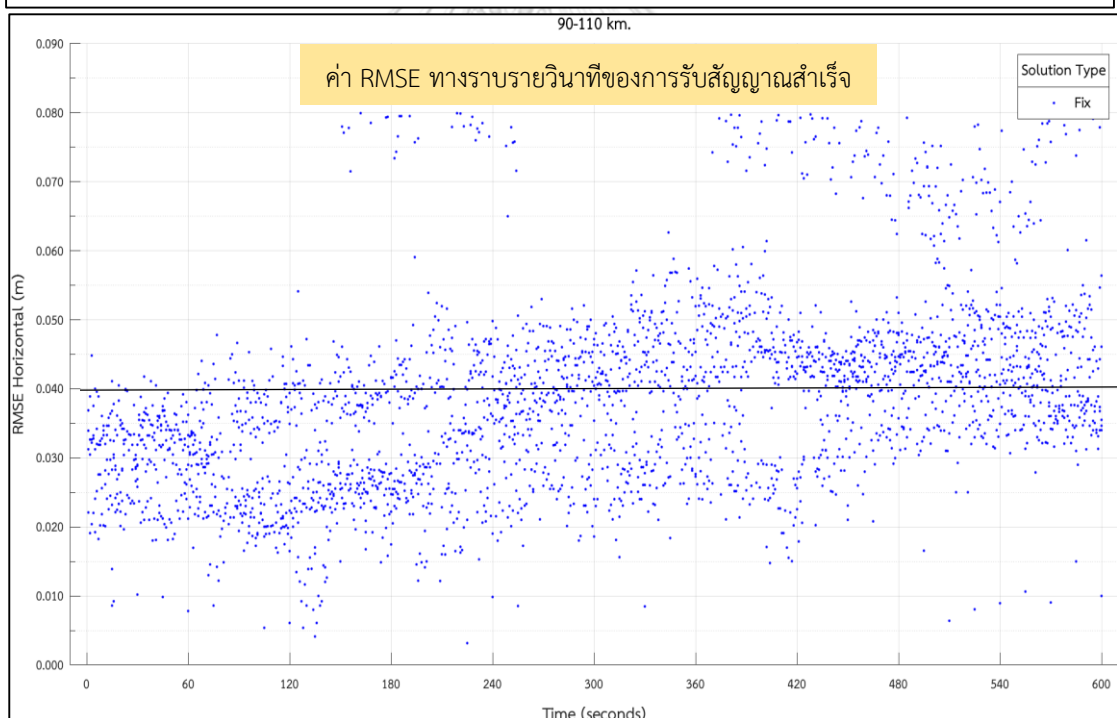
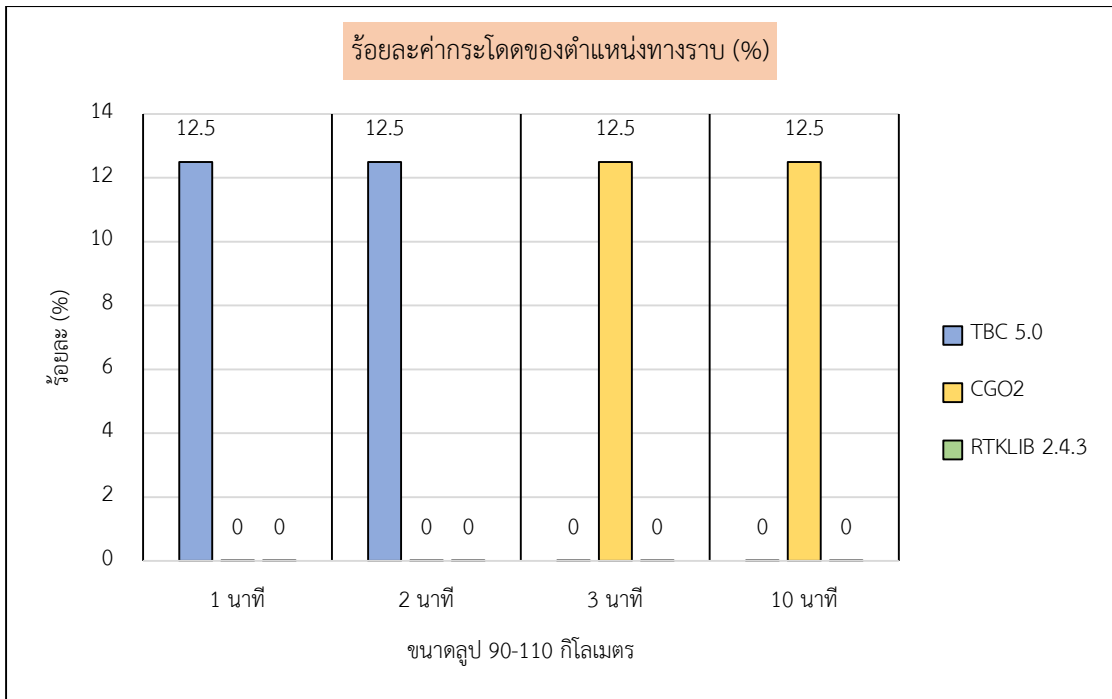
หมายเหตุ

* ร้อยละค่ากระโดดค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ร้อยละของจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



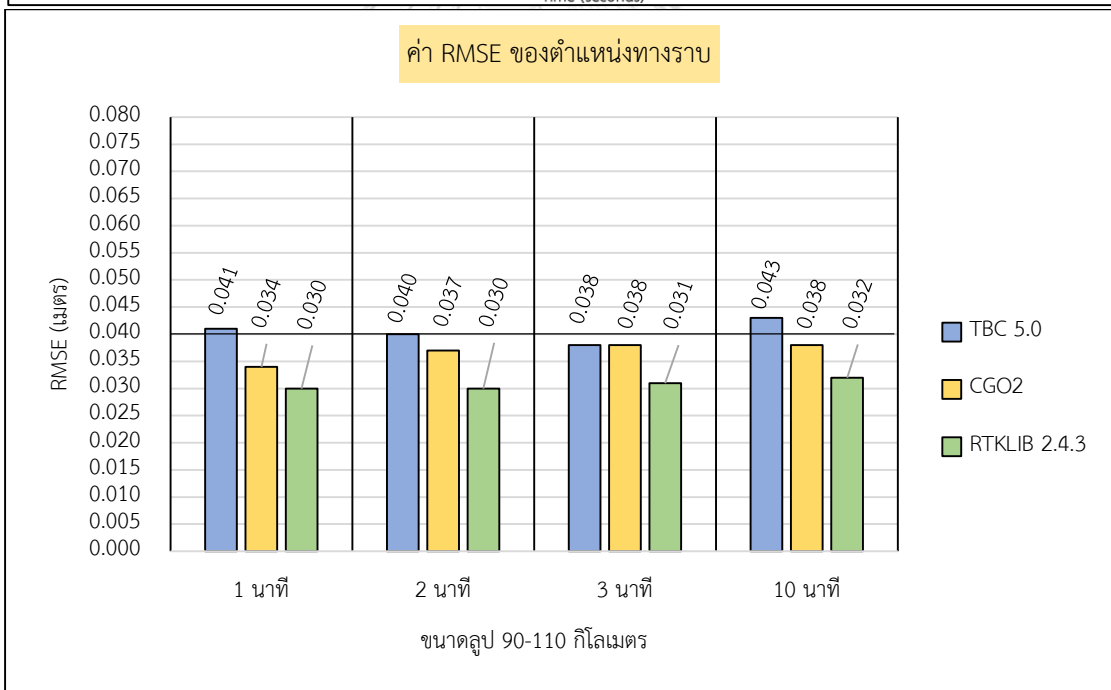
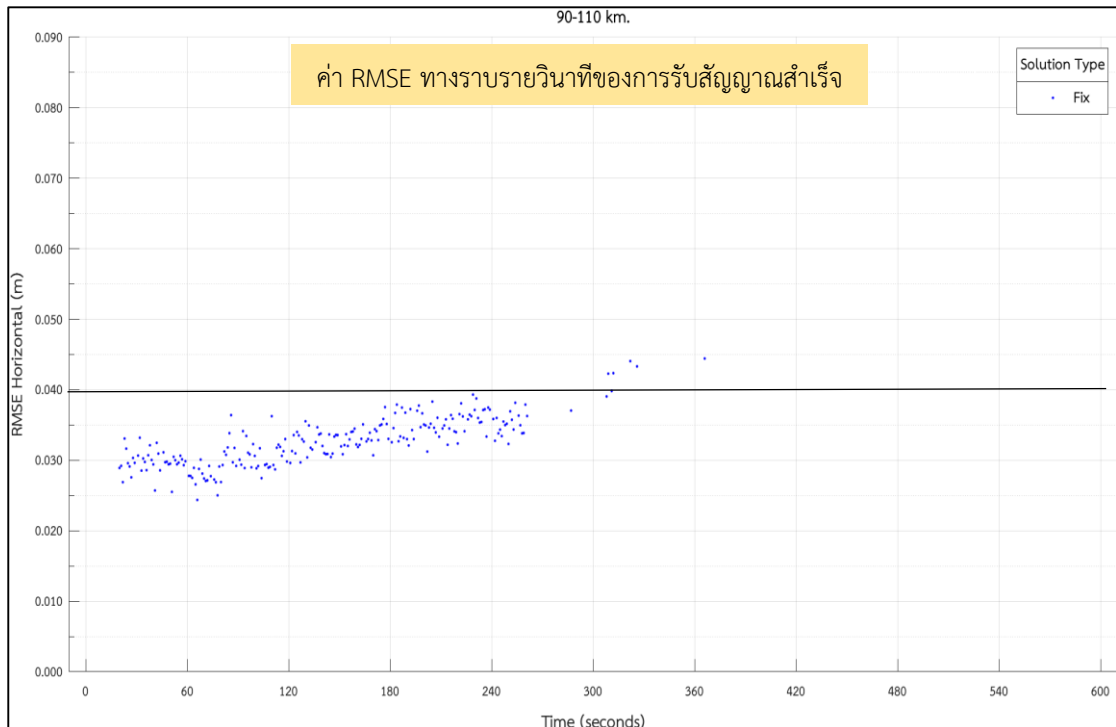
ภาพที่ 28 แสดงกราฟร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละที่รับสัญญาณสำเร็จ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 29 (บน) แสดงร้อยละค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ CGO2 ในลูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละค่ากระโดดในตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที) และ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที)



ภาพที่ 30 (บน) แสดงค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ (เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 8 cm) ด้วยซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 และ (ล่าง) แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ ด้วยซอฟต์แวร์ TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูขขนาด 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรับสัญญาณสำเร็จ” (รับสัญญาณทุก 1 วินาที เป็นเวลานาน 10 นาที) และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 1, 2, 3 และ 10 นาที)

4.4 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ของตำแหน่งทางราบ

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX นั้นจะพิจารณาค่าพิกัดทางราบ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรทางสถิติ ได้แก่

1. ผลการเปรียบเทียบอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS (เฉลี่ย 3 นาที) และการรังวัดแบบ Virtual RINEX (เฉลี่ย 1, 2, 3 และ 10 นาที)

2. ผลการเปรียบเทียบอัตราร้อยละของค่ากระโดดสูงสุดของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS (เฉลี่ย 3 นาที) และการรังวัดแบบ Virtual RINEX (เฉลี่ย 1, 2, 3 และ 10 นาที)

3. ผลเปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS (เฉลี่ย 3 นาที) และการรังวัดแบบ Virtual RINEX (เฉลี่ย 1, 2, 3 และ 10 นาที)

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดแบบ Virtual RINEX ของตำแหน่งทางราบ ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ที่ต่างกัน 3 ค่าย ได้แก่ Trimble Business Center (TBC) 5.0, CHC Geomatics Office 2 หรือ CGO2 และ RTKLIB 2.4.3

เมื่อนำค่า RMSE เฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS ที่ช่วงการรังวัด 3 นาที มาเปรียบเทียบกับ การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงการรังวัด 1, 2, 3 และ 10 นาที ได้ผลดังนี้

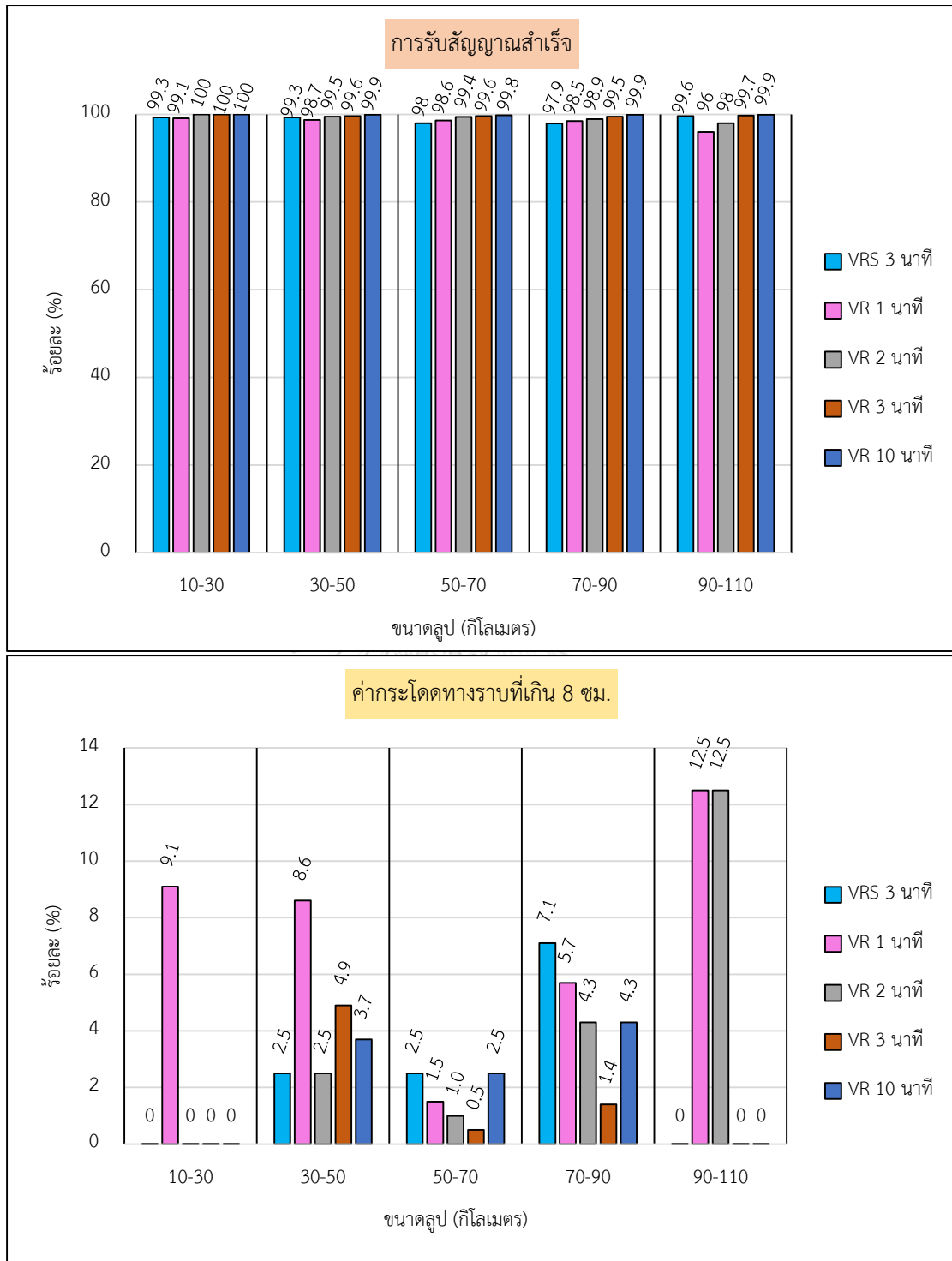
4.4.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0

ผลการเปรียบเทียบอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 ช่วงการรังวัด 1, 2, 3 และ 10 นาที โดยแบ่งออกตามขนาดลูบต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้มีรายละเอียดดังได้ผลดังตารางที่ 9 และภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 33

ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0

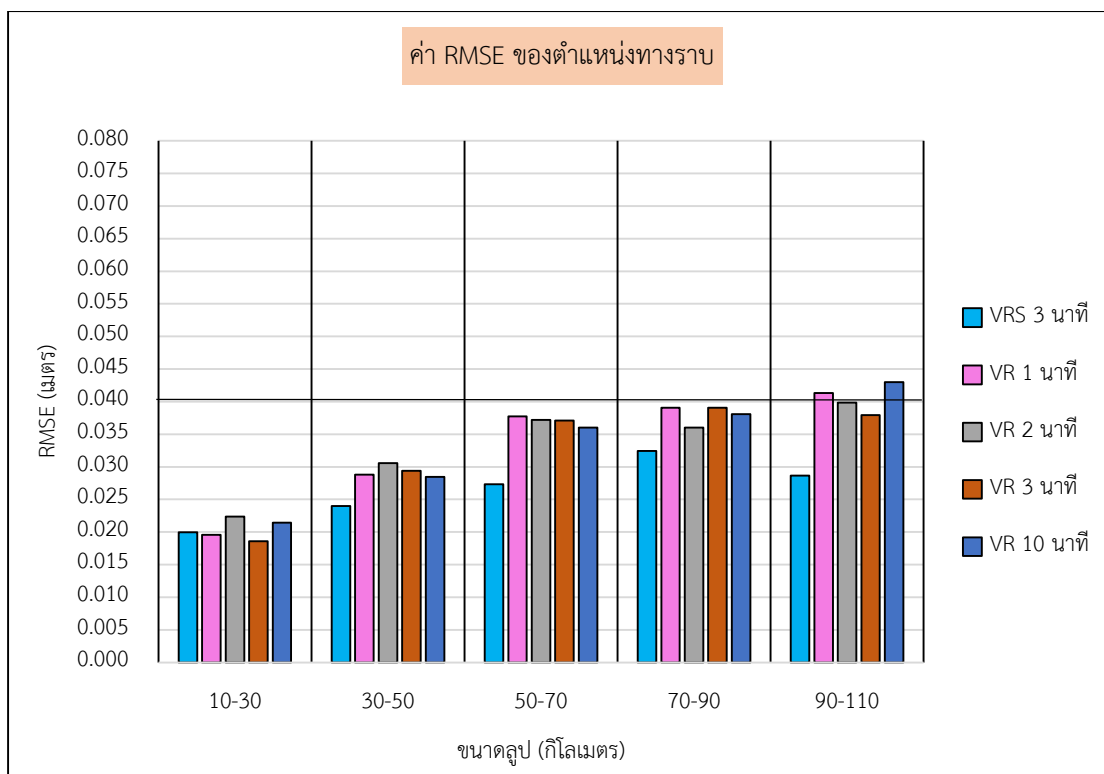
ลำดับ	ขนาดรูป (เมตร)	จำนวนหมุด ทดสอบ	วิธีการรังวัด	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่เกิน 8 ซม. (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
1	10-30	11	VRS 3 นาที	99.3	0	0.020
			VR 1 นาที	99.1	9.1	0.020
			VR 2 นาที	100	0	0.022
			VR 3 นาที	100	0	0.019
			VR 10 นาที	100	0	0.021
2	30-50	81	VRS 3 นาที	99.3	2.5	0.024
			VR 1 นาที	98.7	8.6	0.029
			VR 2 นาที	99.5	2.5	0.031
			VR 3 นาที	99.6	4.9	0.029
			VR 10 นาที	99.9	3.7	0.028
3	50-70	204	VRS 3 นาที	98	2.5	0.027
			VR 1 นาที	98.6	1.5	0.038
			VR 2 นาที	99.4	1	0.037
			VR 3 นาที	99.6	0.5	0.037
			VR 10 นาที	99.8	2.5	0.036
4	70-90	70	VRS 3 นาที	97.9	7.1	0.032
			VR 1 นาที	98.5	5.7	0.041
			VR 2 นาที	98.9	4.3	0.040
			VR 3 นาที	99.5	1.4	0.038
			VR 10 นาที	99.9	4.3	0.043
5	90-110	8	VRS 3 นาที	99.6	0	0.029
			VR 1 นาที	96	12.5	0.041
			VR 2 นาที	98	12.5	0.040
			VR 3 นาที	99.7	0	0.038
			VR 10 นาที	99.9	0	0.043

สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 ในรูปขนาด 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีรายละเอียดดังภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 33



ภาพที่ 31 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดทางราบที่เกิน 8 ซม.” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาที และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 32 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ จลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาที และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาที)

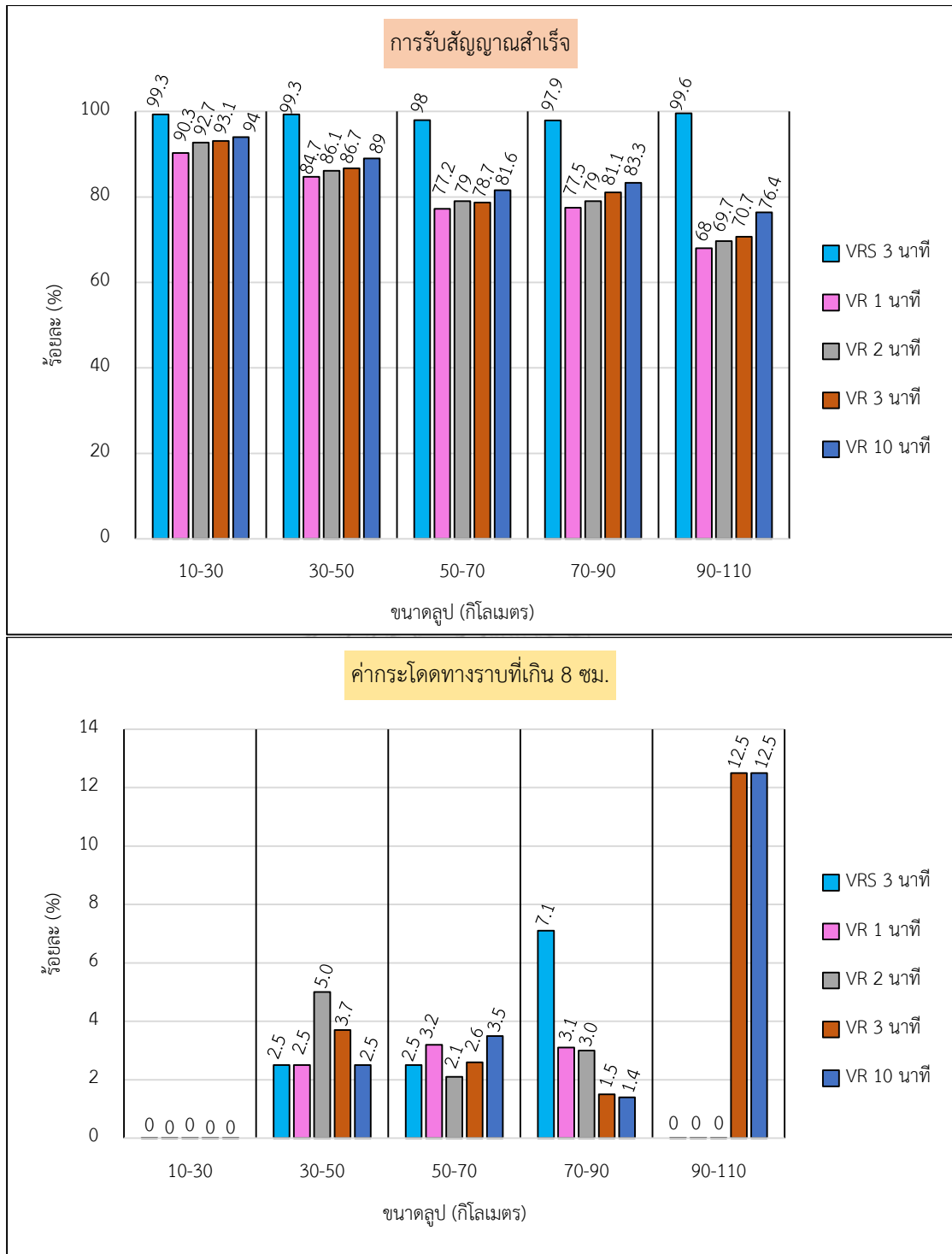
4.4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ จลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2

ผลการเปรียบเทียบอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ จลน์เทคนิค VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2 ช่วงการรังวัด 1, 2, 3 และ 10 นาที โดยแบ่งออกตามขนาดลู่ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้มีรายละเอียดดังได้ผลดังตารางที่ 10 และภาพที่ 34 ถึงภาพที่ 35

ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2

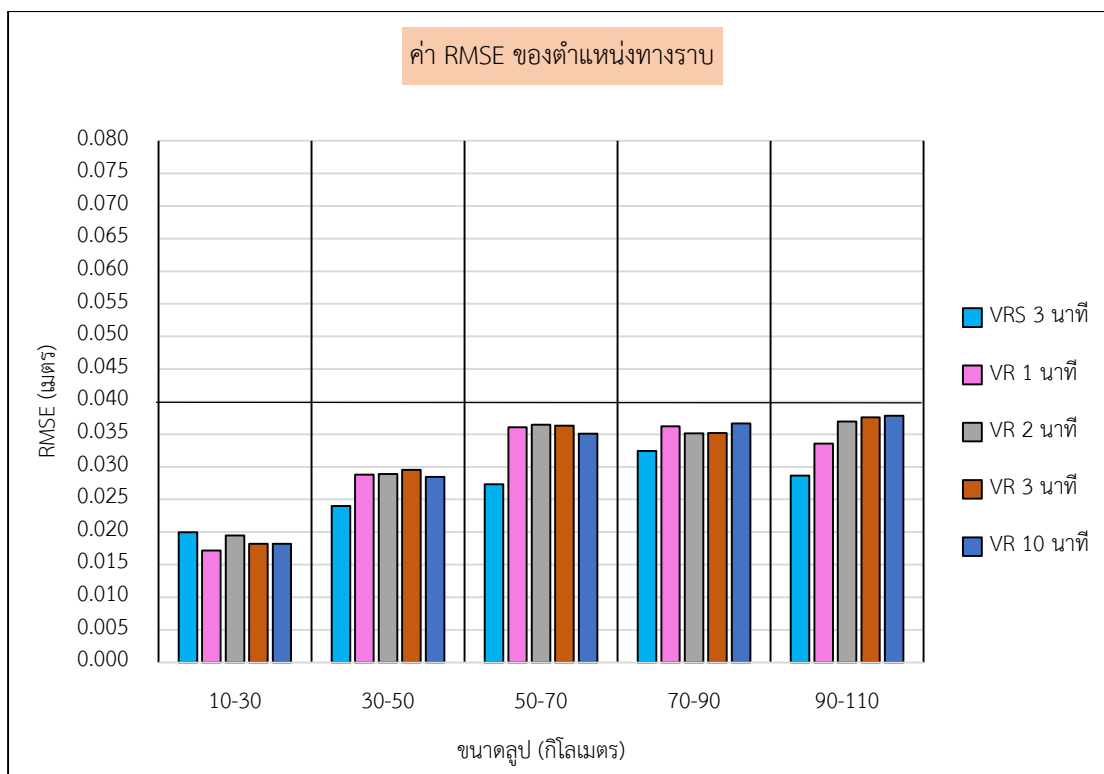
ลำดับ	ขนาดรูป (เมตร)	จำนวนหมุด ทดสอบ	วิธีการรังวัด	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่เกิน 8 ซม. (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
1	10-30	11	VRS 3 นาที	99.3	0	0.020
			VR 1 นาที	90.3	0	0.017
			VR 2 นาที	92.7	0	0.019
			VR 3 นาที	93.1	0	0.018
			VR 10 นาที	94	0	0.018
2	30-50	81	VRS 3 นาที	99.3	2.5	0.024
			VR 1 นาที	84.7	2.5	0.029
			VR 2 นาที	86.1	5	0.029
			VR 3 นาที	86.7	3.7	0.030
			VR 10 นาที	89	2.5	0.028
3	50-70	204	VRS 3 นาที	98	2.5	0.027
			VR 1 นาที	77.2	3.2	0.036
			VR 2 นาที	79	2.1	0.036
			VR 3 นาที	78.7	2.6	0.036
			VR 10 นาที	81.6	3.5	0.035
4	70-90	70	VRS 3 นาที	97.9	7.1	0.032
			VR 1 นาที	77.5	3.1	0.036
			VR 2 นาที	79	3	0.035
			VR 3 นาที	81.1	1.5	0.035
			VR 10 นาที	83.3	1.4	0.037
5	90-110	8	VRS 3 นาที	99.6	0	0.029
			VR 1 นาที	68	0	0.034
			VR 2 นาที	69.7	0	0.037
			VR 3 นาที	70.7	12.5	0.038
			VR 10 นาที	76.4	12.5	0.038

สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2 ในรูปขนาด 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีรายละเอียดดังภาพที่ 34 ถึงภาพที่ 35



ภาพที่ 33 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดทางราบที่เกิน 8 ซม.” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาที และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาที)



ภาพที่ 34 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาที และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาที)

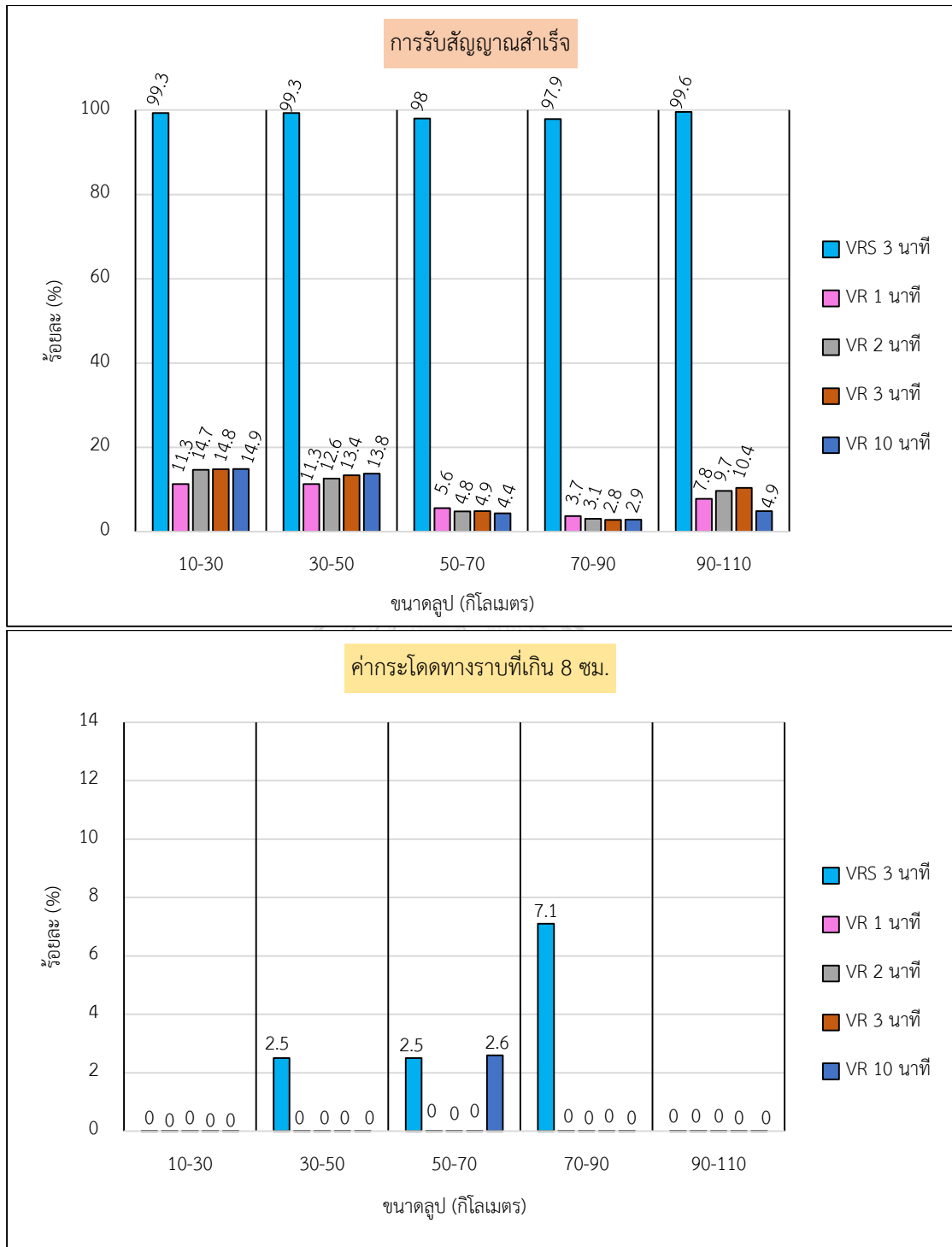
4.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3

ผลการเปรียบเทียบอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ ของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 ช่วงการรังวัด 1, 2, 3 และ 10 นาที โดยแบ่งออกตามขนาดลูปต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้มีรายละเอียดดังได้ผลดังตารางที่ 11 และภาพที่ 36 ถึงภาพที่ 37

ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE สองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบของการรังวัด NRTK-VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3

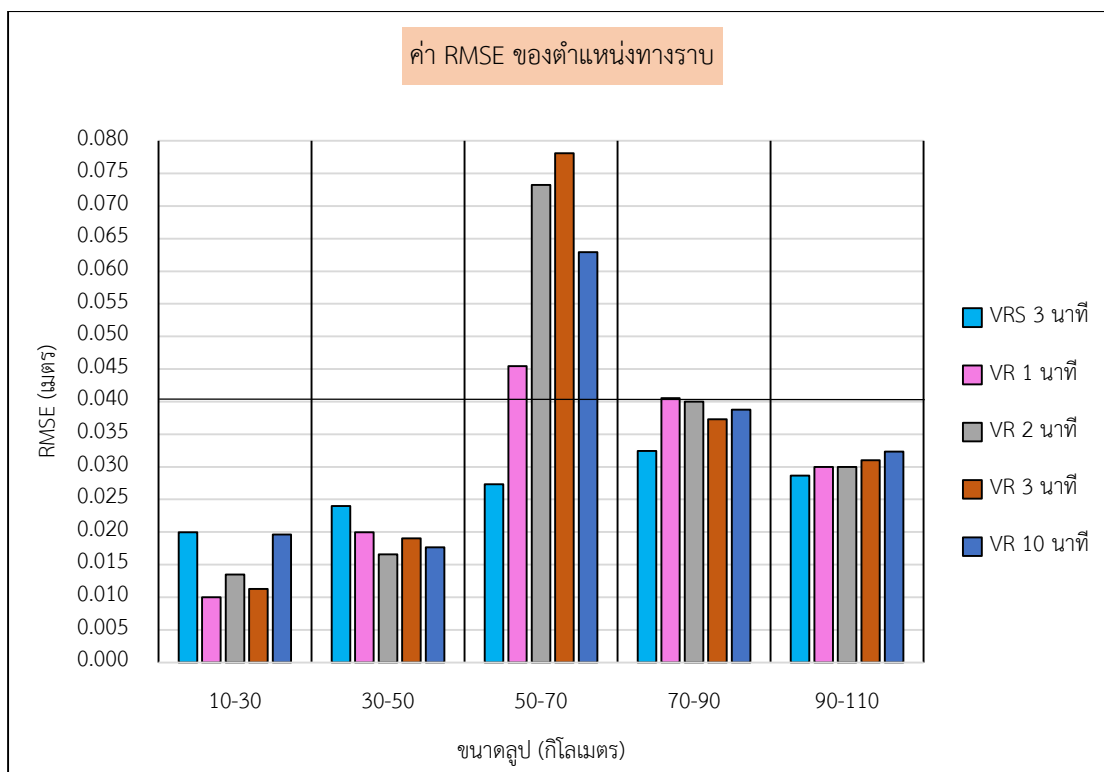
ลำดับ	ขนาดรูป (เมตร)	จำนวนหมุด ทดสอบ	วิธีการรังวัด	การรับสัญญาณ สำเร็จ (%)	ค่ากระโดดที่เกิน 8 ซม. (%)	RMSE ของตำแหน่ง ทางราบ (เมตร)
1	10-30	11	VRS 3 นาที	99.3	0	0.020
			VR 1 นาที	11.3	0	0.010
			VR 2 นาที	14.7	0	0.013
			VR 3 นาที	14.8	0	0.011
			VR 10 นาที	14.9	0	0.020
2	30-50	81	VRS 3 นาที	99.3	2.5	0.024
			VR 1 นาที	11.3	0	0.020
			VR 2 นาที	12.6	0	0.017
			VR 3 นาที	13.4	0	0.019
			VR 10 นาที	13.8	0	0.018
3	50-70	204	VRS 3 นาที	98	2.5	0.027
			VR 1 นาที	5.6	0	0.045
			VR 2 นาที	4.8	0	0.073
			VR 3 นาที	4.9	0	0.078
			VR 10 นาที	4.4	2.6	0.063
4	70-90	70	VRS 3 นาที	97.9	7.1	0.032
			VR 1 นาที	3.7	0	0.041
			VR 2 นาที	3.1	0	0.040
			VR 3 นาที	2.8	0	0.037
			VR 10 นาที	2.9	0	0.039
5	90-110	8	VRS 3 นาที	99.6	0	0.029
			VR 1 นาที	7.8	0	0.030
			VR 2 นาที	9.7	0	0.030
			VR 3 นาที	10.4	0	0.031
			VR 10 นาที	4.9	0	0.032

สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีรายละเอียดดังภาพที่ 36 ถึงภาพที่



ภาพที่ 35 (บน) แสดงค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ และ (ล่าง) แสดงร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จ” และ “ร้อยละค่ากระโดดทางราบที่เกิน 8 ซม.” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาฬิกา และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาฬิกา)



ภาพที่ 36 แสดงค่า RMSE ตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ จลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่า RMSE ตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยการรับสัญญาณ VRS 3 นาที่ และ Virtual RINEX 1, 2, 3 และ 10 นาที่)

4.5 การทดสอบทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบ

การทดสอบสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดจากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS กับค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ Virtual RINEX (VR) ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังผ่านซอฟต์แวร์ 3 ค่าย ได้แก่ Trimble Business Center (TBC) 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3

ในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ชื่อ IBM SPSS Statistic Subscription โดยการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดจากการรังวัดข้อมูลระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์เทคนิคสถานีฐานอ้างอิงเสมือน (VRS) กับค่าพิกัดจากการรังวัดแบบ Virtual RINEX (VR) ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังแบบ Static ในซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 เปรียบเทียบแยกตามวิธีการรังวัด

โดยมีปัจจัยเลือกใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนทางราบที่มีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธี Kruskal-wallis Test

สมมติฐาน

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีไม่มีความแตกต่างกัน)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน)

โดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า Sig. (2-tailed) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. (2-tailed) ≤ 0.05) ทำการทดสอบสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามสมมติฐานข้างต้น ด้วยซอฟต์แวร์ IBM SPSS Statistic Subscription

สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คือค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 1 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ในซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 1, 2, 3 และ 10 นาที ของหมุดทดสอบในแต่ละโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ 3 ด้าน ได้แก่ 10-30 กิโลเมตร 30-50 กิโลเมตร 50-70 กิโลเมตร 70-90 กิโลเมตร และ 90-110 กิโลเมตร

ตารางที่ 12 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 1 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที

ลำดับ	ขนาดรูป (กม.)	การรังวัด	ซอฟต์แวร์	จำนวน ตัวอย่าง	Median	Kruskal-Wallis Test		
						Kruskal-Wallis H	df	Sig.
1	10-30	VRS 3 นาที	-	11	.00900	.958	3	.811
		VR 10 นาที	TBC	11	.01500			
			CGO2	11	.01400			
			RTKLIB	7	.01400			
2	30-50	VRS 3 นาที	-	79	.01500	9.432	3	.024
		VR 10 นาที	TBC	78	.02150			
			CGO2	79	.02100			
			RTKLIB	36	.01700			
3	50-70	VRS 3 นาที	-	199	.02000	32.140	3	.000
		VR 10 นาที	TBC	199	.02800			
			CGO2	197	.02800			
			RTKLIB	61	.03300			

ลำดับ	ขนาดรูป (กม.)	การรังวัด	ซอฟต์แวร์	จำนวน ตัวอย่าง	Median	Kruskal-Wallis Test		
						Kruskal-Wallis H	df	Sig.
4	70-90	VRS 3 นาที	-	65	.02100	8.823	3	.032
		VR 10 นาที	TBC	67	.03200			
			CGO2	68	.03000			
			RTKLIB	20	.04450			
5	90-110	VRS 3 นาที	-	8	.01700	4.870	3	.182
		VR 10 นาที	TBC	8	.03550			
			CGO2	7	.03200			
			RTKLIB	1	-			

จากตารางการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ผลการทดสอบพบว่า

1) รูปขนาด 10-30 กิโลเมตร การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 10 นาที ค่า Sig. เท่ากับ 0.811 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

2) รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 10 นาที ค่า Sig. เท่ากับ 0.024 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

3) รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 10 นาที ค่า Sig. น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

4) รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 10 นาที ค่า Sig. เท่ากับ 0.032 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดง

ว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

5) ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ที่ช่วงเวลา 10 นาที ค่า Sig. เท่ากับ 0.182 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดแต่ละวิธีไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

เนื่องจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบ ด้วยวิธี Kruskal-wallis ข้างต้นสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของการรังวัดที่ลูบขนาด 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร แต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน และกลุ่มตัวอย่างมีมากกว่า 2 กลุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงใช้วิธี Mann-Whitney U โดยจับคู่กลุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบ

1.1 ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตรของช่วงการรังวัด Virtual RINEX 10 นาที และ การรังวัด VRS 3 นาที เปรียบเทียบตามวิธีการประมวลผล

สมมติฐาน

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร ไม่มีความแตกต่างกัน)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร มีความแตกต่างกัน)

โดยจะโดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า Sig. (2-tailed) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. (2-tailed) \leq 0.05) ทำการทดสอบสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามสมมติฐานข้างต้น ด้วยซอฟต์แวร์ IBM SPSS Statistic Subscription

ตารางที่ 13 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร

ลำดับ	การรังวัด	ซอฟต์แวร์	จำนวนตัวอย่าง	Median	Mann-Whitney Test		
					Mann-Whitney U	Z	Sig.
1	VRS 3 นาที	-	79	.01500	2402.500	-2.384	.017
	VR 10 นาที	TBC	78	.02150			
2	VRS 3 นาที	-	79	.01500	2287.500	-2.899	.004
	VR 10 นาที	CGO2	79	.02100			
3	VRS 3 นาที	-	79	.01500	1304.500	-.709	.478
	VR 10 นาที	RTKLIB	36	.01700			
4	VR 10 นาที	TBC	78	.02150	2991.500	-.314	.753
	VR 10 นาที	CGO2	79	.02100			
5	VR 10 นาที	TBC	78	.02150	1253.500	-.918	.359
	VR 10 นาที	RTKLIB	36	.01700			
6	VR 10 นาที	CGO2	79	.02100	1216.000	-1.243	.214
	VR 10 นาที	RTKLIB	36	.01700			

จากตารางการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร ด้วยวิธี Mann-Whitney U ผลการทดสอบพบว่า

1) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.017 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

2) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.004 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่

ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

3) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.478 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัย**

4) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.753 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

5) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.359 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

6) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.214 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

1.2 รูปขนาด 50-70 กิโลเมตรของช่วงการรังวัด Virtual RINEX 10 นาที และการรังวัด VRS 3 นาที เปรียบเทียบตามวิธีการประมวลผล

สมมติฐาน

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร ไม่มีความแตกต่างกัน)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีความแตกต่างกัน)

โดยจะโดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า Sig. (2-tailed) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. (2-tailed) ≤ 0.05) ทำการทดสอบสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามสมมติฐานข้างต้น ด้วยซอฟต์แวร์ IBM SPSS Statistic Subscription

ตารางที่ 14 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร

ลำดับ	การรังวัด	ซอฟต์แวร์	จำนวนตัวอย่าง	Median	Mann-Whitney Test		
					Mann-Whitney U	Z	Sig.
1	VRS 3 นาที	-	199	.02000	14668.500	-4.474	.000
	VR 10 นาที	TBC	199	.02800			
2	VRS 3 นาที	-	199	.02000	14200.500	-4.744	.000
	VR 10 นาที	CGO2	197	.02800			
3	VRS 3 นาที	-	199	.02000	4179.500	-3.680	.000
	VR 10 นาที	RTKLIB	61	.03300			
4	VR 10 นาที	TBC	199	.02800	19424.000	-.156	.876
	VR 10 นาที	CGO2	197	.02800			
5	VR 10 นาที	TBC	199	.02800	5470.500	-1.166	.244
	VR 10 นาที	RTKLIB	61	.03300			
6	VR 10 นาที	CGO2	197	.02800	5394.500	-1.206	.228
	VR 10 นาที	RTKLIB	61	.03300			

จากตารางการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร ด้วยวิธี Mann-Whitney U ผลการทดสอบพบว่า

1) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 พบว่าค่า Sig. น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

2) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

3) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัย**

4) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.876 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

5) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3

พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.244 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

6) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.228 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 50-70 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

1.3 รูปขนาด 70-90 กิโลเมตรของช่วงการรังวัด Virtual RINEX 10 นาที และ การรังวัด

VRS 3 นาที เปรียบเทียบตามวิธีการประมวลผล

สมมติฐาน

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร ไม่มีความแตกต่างกัน)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีความแตกต่างกัน)

โดยจะโดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า Sig. (2-tailed) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. (2-tailed) \leq 0.05) ทำการทดสอบสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามสมมติฐานข้างต้น ด้วยซอฟต์แวร์ IBM SPSS Statistic Subscription

ตารางที่ 15 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังแบบ Static ผ่านซอฟต์แวร์ TBC, CGO2 และ RTKLIB ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร

ลำดับ	การรังวัด	ซอฟต์แวร์	จำนวนตัวอย่าง	Median	Mann-Whitney Test		
					Mann-Whitney U	Z	Sig.
1	VRS 3 นาที	-	65	.02100	1785.000	-1.787	.074
	VR 10 นาที	TBC	67	.03200			
2	VRS 3 นาที	-	65	.02100	1782.000	-1.927	.054
	VR 10 นาที	CGO2	68	.03000			
3	VRS 3 นาที	-	65	.02100	402.000	-2.571	.010
	VR 10 นาที	RTKLIB	20	.04450			
4	VR 10 นาที	TBC	67	.03200	2234.500	-1.191	.848
	VR 10 นาที	CGO2	68	.03000			
5	VR 10 นาที	TBC	67	.03200	512.500	-1.589	.112
	VR 10 นาที	RTKLIB	20	.04450			
6	VR 10 นาที	CGO2	68	.03000	514.500	-1.649	.099
	VR 10 นาที	RTKLIB	20	.04450			

จากตารางการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร ด้วยวิธี Mann-Whitney U ผลการทดสอบพบว่า

1) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.074 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

2) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.054 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10

นาที่ ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

3) การรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.010 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. < 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_1 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ VRS ที่ช่วงเวลา 3 นาที และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **แตกต่างกันที่ระดับนัย**

4) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.848 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

5) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.112 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

6) การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.099 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 (Sig. > 0.05) แสดงว่ายอมรับ H_0 กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ CGO2 และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ช่วงเวลา 10 นาที ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตร **ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ**

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการวิเคราะห์และประเมินความถูกต้องของตำแหน่งทางราบของการรังวัดแบบ Virtual RINEX กับการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX เพื่อนำมาใช้แทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดิน ซึ่งดำเนินการในพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีฐานอ้างอิงถาวร จำนวน 208 ลูก ในพื้นที่ 36 จังหวัดมีจำนวนหมุดทดสอบทั้งสิ้น 374 หมุด โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการศึกษา ข้อจำกัด ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะต่างๆ ของการศึกษาวิจัยนี้ โดยผู้เขียนหวังว่าจะเกิดประโยชน์ และสามารถนำไปปรับใช้ อ้างอิง หรือต่อยอดงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ต่อไป

5.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX พบว่าความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดแบบ Virtual RINEX สามารถนำมาใช้แทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินได้ ซึ่งการรังวัดแบบ Virtual RINEX ได้ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ทั้ง 3 ยี่ห้อ ได้แก่ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์จากหัวข้อ 4.4 ดังนี้

- 1.) ผลการศึกษาค่าอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จของการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX พบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของรูป โดยรูปที่มีขนาดเล็กให้ค่าร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จดีกว่ารูปที่มีขนาดใหญ่ โดยค่าอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ในรูปขนาดเดียวกันมีผลต่อช่วงการรับสัญญาณและยี่ห้อของซอฟต์แวร์ โดยการรับสัญญาณที่นานขึ้นให้ค่าที่ดีกว่า และซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ คือ TBC 5.0 และ CGO2 ให้ค่าที่ดีกว่าซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ที่เป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 9 ถึงตารางที่ 11 ภาพที่ 31 (บน) , ภาพที่ 33 (บน) และ ภาพที่ 35 (บน) ตามลำดับ

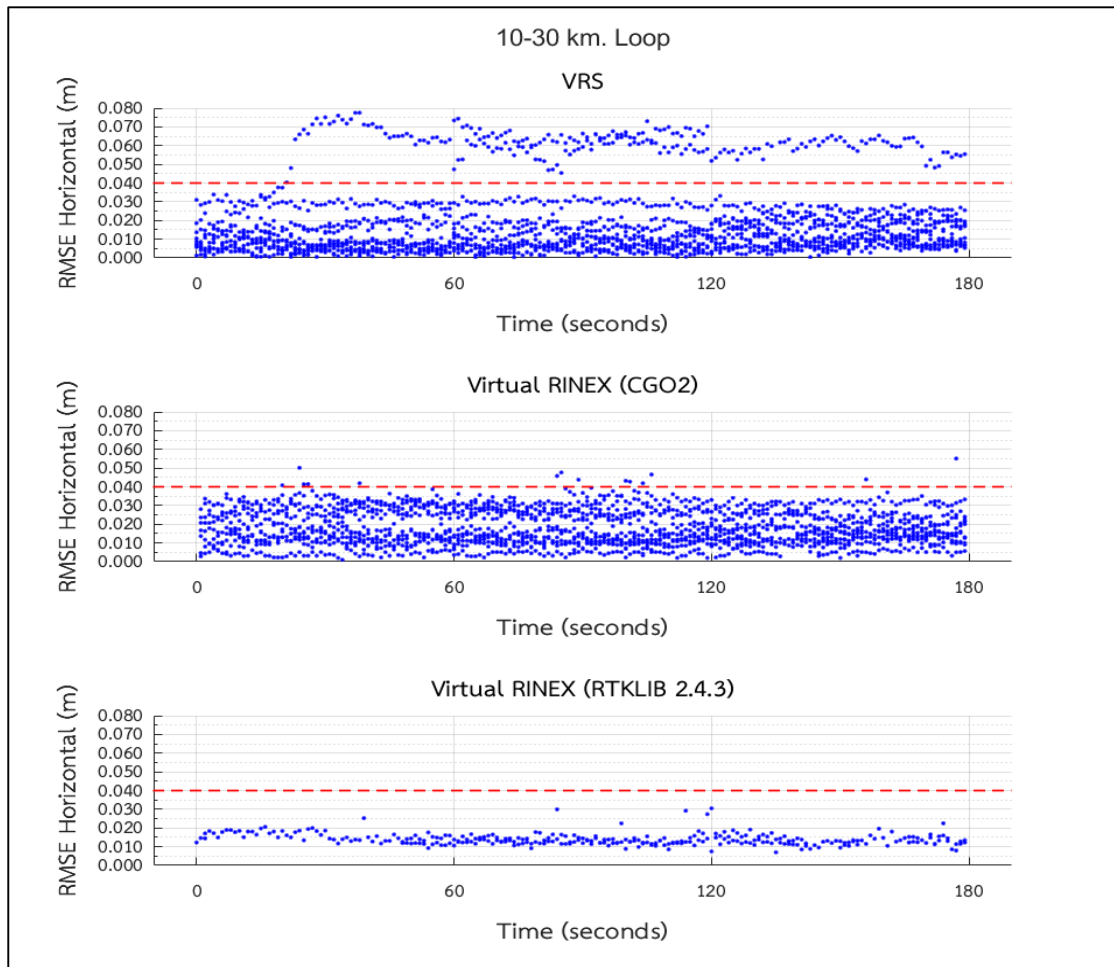
2.) ผลการศึกษาร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX พบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของลูป โดยลูปที่มีขนาดเล็กมีร้อยละค่ากระโดดทางราบน้อยกว่าลูปที่มีขนาดใหญ่ โดยร้อยละค่ากระโดดทางราบของการรังวัดแบบ Virtual RINEX มีความสัมพันธ์กับยี่ห้อของซอฟต์แวร์ โดย TBC 5.0 และ CGO2 ให้ค่าร้อยละค่ากระโดดทางราบที่มากกว่าซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัย จากการวิเคราะห์เนื่องจากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์มีอัตราร้อยละการรับสัญญาณสำเร็จที่สูงกว่าอาจทำให้พบค่ากระโดดทางราบที่มากกว่าได้เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 9 ถึงตารางที่ 11 ภาพที่ 31 (ล่าง) , ภาพที่ 33 (ล่าง) และ ภาพที่ 35 (ล่าง) ตามลำดับ

3.) ผลการศึกษาค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX พบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของลูป โดยลูปที่มีขนาดเล็กให้ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบดีกว่าลูปที่มีขนาดใหญ่ และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ซอฟต์แวร์ TBC 5.0 ช่วงเวลาการรับสัญญาณประมาณ 3 นาที ในลูปทุกขนาด ที่ซอฟต์แวร์ CGO2 การรับสัญญาณทุกช่วงเวลา ในลูปทุกขนาด และ RTKLIB 2.4.3 การรับสัญญาณทุกช่วงเวลา ในลูปขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร ให้ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 9 ถึงตารางที่ 11 ภาพที่ 32 , ภาพที่ 34 และ ภาพที่ 36 ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ทั้ง 3 ยี่ห้อ ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งเพียงพอและสามารถนำมาใช้งานแทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินได้ โดยมีเงื่อนไขในแต่ละยี่ห้อดังนี้ TBC 5.0 ช่วงเวลาการรับสัญญาณประมาณ 3 นาที ในลูปทุกขนาด ในขณะที่ CGO2 การรับสัญญาณทุกช่วงเวลา ในลูปทุกขนาด และ RTKLIB 2.4.3 การรับสัญญาณทุกช่วงเวลา ในลูปขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร

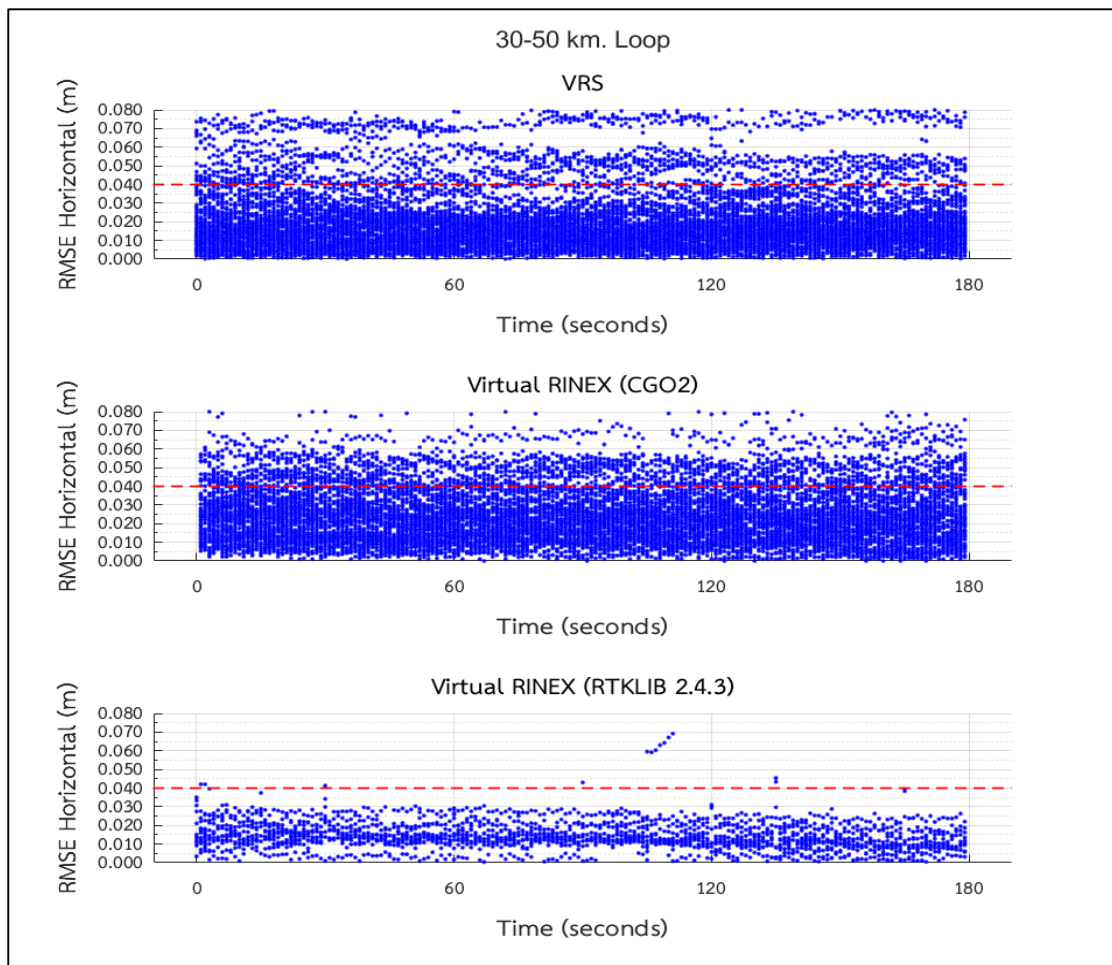
5.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 แบบรายวินาที

การวิเคราะห์ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 พบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของลูป และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล รายละเอียดการวิเคราะห์ดังภาพที่ 37 ถึงภาพที่ 41



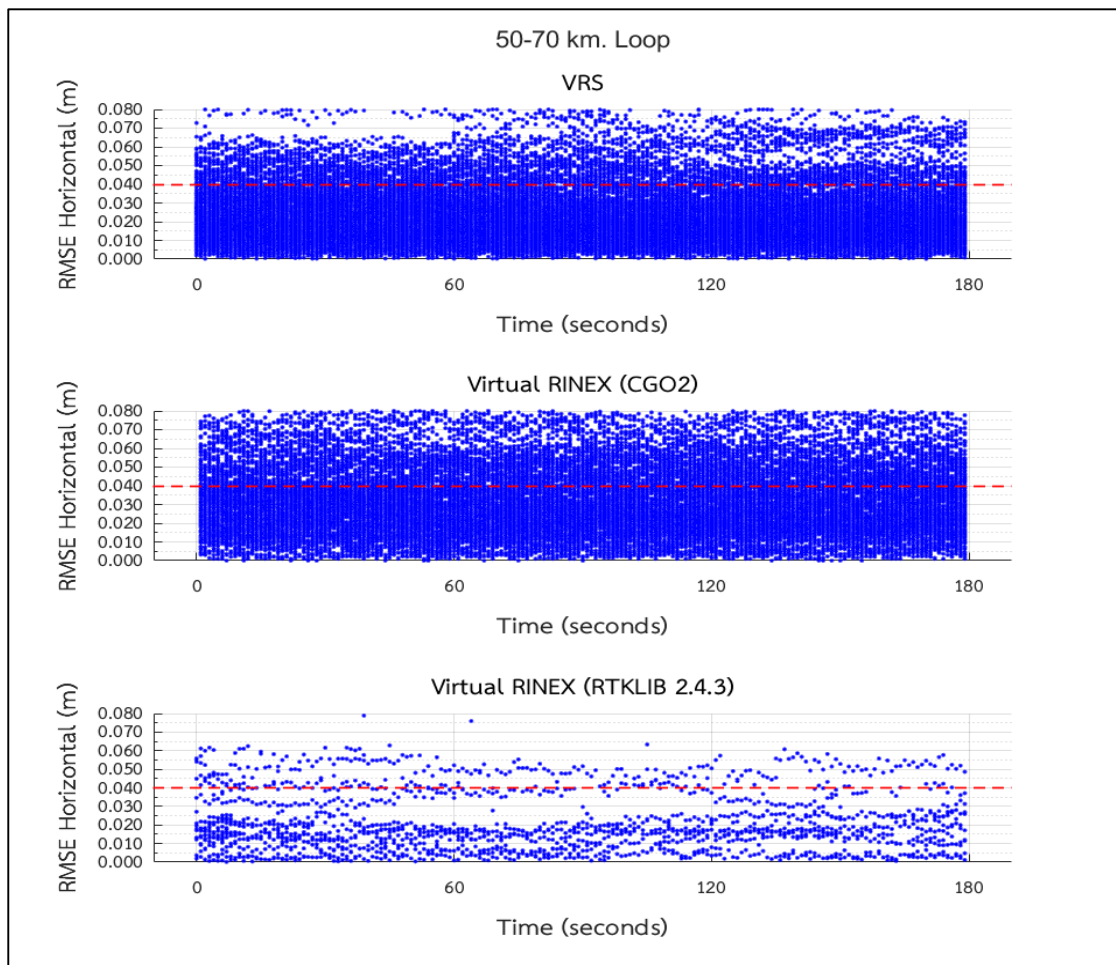
ภาพที่ 37 แสดงค่า RMSE ราบรายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 10-30 กิโลเมตร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 37 พบว่าในรูปขนาด 10-30 กิโลเมตร ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตรมีค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และยังพบอีกว่าการประมวลผลผ่าน CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยแล้วยังพบอีกว่าการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX และที่การประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ไม่พบข้อมูลค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่เกิน 4 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามจากการรังวัดทั้งสามวิธีพบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของทั้งสามการรังวัดอยู่ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตร และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 ให้ค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบที่ดีที่สุด



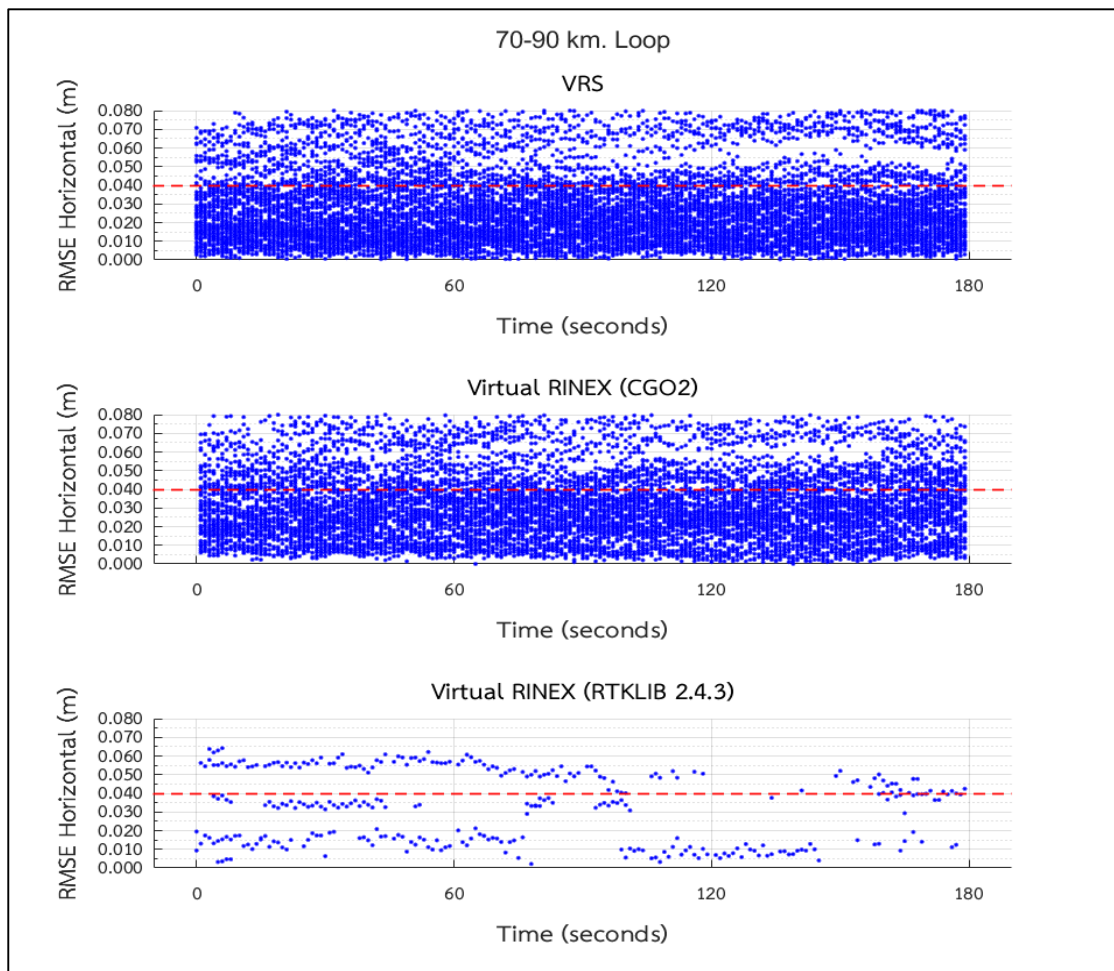
ภาพที่ 38 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ลูปขนาด 30-50 กิโลเมตร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 38 พบว่าในลูปขนาด 30-50 กิโลเมตร ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตรมีค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และยังพบอีกว่าการประมวลผลผ่าน CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยแล้วยังพบอีกว่าการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX และที่การประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 มีข้อมูลค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่เกิน 4 เซนติเมตรน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามจากการรังวัดทั้งสามวิธีพบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของทั้งสามการรังวัดอยู่ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตร และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 ให้ค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบดีที่สุด



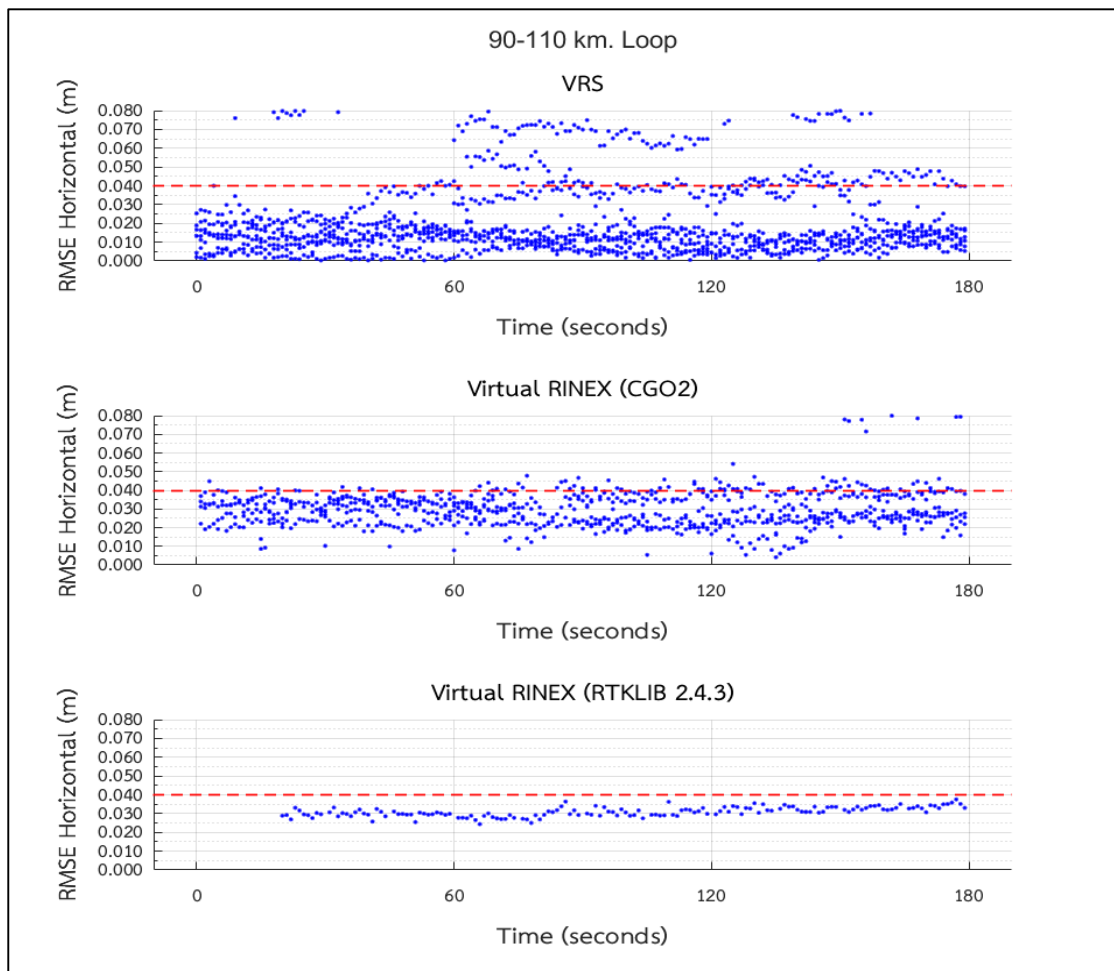
ภาพที่ 39 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 39 พบว่าในลูบขนาด 50-70 กิโลเมตรในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตรมีค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และยังพบอีกว่าการประมวลผลผ่าน CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยแล้วยังพบอีกว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 ให้ค่าพิกัดที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากที่สุดและที่การประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 มีข้อมูลค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่เกิน 4 เซนติเมตรน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS กับการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 อยู่ในวงไม่เกิน 4 เซนติเมตร แต่ค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 มีค่าที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร



ภาพที่ 40 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร

จากภาพที่ 40 พบว่าในรูปขนาด 70-90 กิโลเมตรในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตรมีค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และยังพบอีกว่าการประมวลผลผ่าน CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยงานวิจัย แล้วยังพบอีกว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 ให้ค่าพิกัดที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากที่สุดและที่การประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 มีข้อมูลค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่เกิน 4 เซนติเมตรมากที่สุด อย่างไรก็ตามจากการรังวัดทั้งสามวิธีพบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของทั้งสามการรังวัดอยู่ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตร



ภาพที่ 41 แสดงค่า RMSE รายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร

จากภาพที่ 41 พบว่าในรูปขนาด 90-110 กิโลเมตรในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตรมีค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 และยังพบอีกว่าการประมวลผลผ่าน CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิกัดที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยงานวิจัย แล้วยังพบอีกว่าการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิกัดที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX และที่การประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ไม่พบข้อมูลค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่เกิน 4 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามจากการรังวัดทั้งสามวิธีพบว่าค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบของทั้งสามการรังวัดอยู่ในช่วงไม่เกิน 4 เซนติเมตร

จากการวิเคราะห์ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีที่สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 พบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของลูป และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล โดยลูปที่มีขนาดเล็กให้ค่า RMSE ทางราบรายวินาทีดีกว่าลูปที่มีขนาดใหญ่ และซอฟต์แวร์ CGO2 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่าพิคกิ้งที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากกว่า RTKLIB 2.4.3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัย ในลูปขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตรค่า RMSE ทางราบรายวินาทีของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ให้ค่าพิคกิ้งที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX อย่างไรก็ตามในลูปขนาดเกิน 50 กิโลเมตรพบว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ซอฟต์แวร์ CGO2 ให้ค่าพิคกิ้งที่มากกว่า 4 เซนติเมตรเป็นจำนวนมากที่สุด และยังพบอีกว่าในลูปทุกขนาดของซอฟต์แวร์ CGO2 มีค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตร ซึ่งต่างจากซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 ที่พบความไม่แน่นอนในลูปขนาด 50-70 กิโลเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ย RMSE ทางราบที่มากกว่า 4 เซนติเมตร อาจเกิดจากประสิทธิภาพการประมวลผลของซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัยทำให้ข้อมูลเกิดความแปรปรวนและมีค่ากระโดดสูง

5.3 สรุปผลการทดสอบทางสถิติ

จากผลการทดสอบสถิติที่แสดงในข้อที่ 4.5 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิคกิ้งจากการรังวัดข้อมูลระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์เทคนิคสถานีฐานอ้างอิงเสมือน (VRS) กับค่าพิคกิ้งจากการรังวัดแบบ Virtual RINEX (VR) ที่ได้รับการประมวลผลภายหลังในซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 เฉพาะช่วงเวลา 10 นาทีเปรียบเทียบแยกตามวิธีการรังวัด

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบพบว่ามีความสัมพันธ์กับขนาดลูป และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล โดยในลูปทุกขนาดที่การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ TBC 5.0, CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 เมื่อนำมาจับคู่เปรียบเทียบกันเอง พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิคกิ้งที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อนำการรังวัดแบบ Virtual RINEX มาจับคู่เปรียบเทียบกับวิธีการรังวัดแบบ VRS พบว่าในลูปขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร การรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิคกิ้งที่ไม่แตกต่างกันกับการรังวัดแบบ VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 และ CGO2 ในลูปขนาดเล็กไม่เกิน 30 กิโลเมตรมีค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิคกิ้งที่ไม่แตกต่างกันกับ

การรังวัดแบบ VRS อย่างไรก็ตามในลูปที่มีขนาดใหญ่ ดังเช่น 70-110 กิโลเมตร ยังคงพบว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 และ CGO2 มีค่าคลาดเคลื่อนทางราบของค่าพิกัดที่ไม่แตกต่างกับการรังวัดแบบ VRS

การทดสอบสถิตินี้เป็นเพียงการหาความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนทางราบเทียบกับในแต่ละการรังวัดเพื่อหาความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ โดยใช้ค่าของข้อมูลที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบ ซึ่งจำนวนข้อมูลจะไม่เท่ากันเนื่องจากค่าที่ดีที่สุดของแต่ละการรังวัดก็แตกต่างกันไปซึ่งบางชุดข้อมูลพบว่ามีข้อมูลเพียงจุดเดียวก็ไม่สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบได้จึงเป็นข้อจำกัดและนำมาซึ่งผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับผลของงานวิจัยที่ได้สรุปไว้ในหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2

5.4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.4.1 ข้อสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS และการรังวัดแบบ Virtual RINEX ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 CGO2 และ RTKLIB 2.4.3

1) ลูปทุกขนาดให้ประสิทธิภาพของการรังวัดแปลงที่ดินด้วยการรังวัดโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ที่ดี ซึ่งมีอัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จและ ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร

2) ระยะเวลารวมสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยการรังวัดโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เทคนิค VRS ที่เหมาะสมคือไม่ต่ำกว่า 3 นาที

3) ทุกขนาดของลูปของการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน TBC 5.0 ,CGO2 และ RTKLIB 2.4.3 ให้ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร

4) ระยะเวลารวมที่เหมาะสมสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยการรังวัดแบบ Virtual RINEX

- สำหรับซอฟต์แวร์ TBC 5.0 คือใช้ข้อมูล Virtual RINEX ไม่ต่ำกว่า 3 นาที
- สำหรับซอฟต์แวร์ CGO2 คือใช้ข้อมูล Virtual RINEX ตั้งแต่ 1 นาทีขึ้นไป
- สำหรับซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 คือใช้ข้อมูล Virtual RINEX ตั้งแต่ 1 นาทีขึ้นไป

5) ไม่แนะนำให้ทำการรังวัดการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่าน RTKLIB 2.4.3 ในลูปที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 กิโลเมตร เนื่องจากพบความไม่แน่นอนของค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 4 เซนติเมตร ส่งผลทำให้ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบมีค่าเกิน 4 เซนติเมตร

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดแบบ Virtual RINEX ที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ทั้ง 3 ยี่ห้อให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งเพียงพอและสามารถนำมาใช้งาน

แทนที่การรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินได้ โดยมีเงื่อนไขตามที่ได้สรุปไว้ข้างต้น

5.4.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากขนาดของลูบมีผลต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค VRS และ Virtual RINEX กล่าวคือลูบขนาดเล็กให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ดีกว่าลูบขนาดใหญ่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการรังวัดแปลงที่ดิน ดังนั้นควรเพิ่มสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณแบบต่อเนื่องถาวรเพิ่มเติม เพื่อให้ลูบมีขนาดเล็กลง

2) ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสยี่ห้อและรุ่นอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความหลากหลายและความน่าเชื่อถือของงานวิจัยให้มากขึ้น

3) จากผลการศึกษาพบว่า ในการประมวลผลของการรังวัดแบบ Virtual RINEX นั้น ที่ทุกขนาดของลูบจะมีค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบที่มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 4 เซนติเมตร) แฝงอยู่ด้วย โดยค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบขนาดใหญ่จะไม่แสดงให้เห็นผ่านซอฟต์แวร์การประมวลผล ควรตรวจสอบเพื่อจัดการกับค่ากระโดดก่อนนำเอาค่าพิกัดมาใช้งาน



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ที่
ใช้ในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80



CHC i-80 ถือเป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของ CHC ในปัจจุบัน ด้วยการออกแบบที่รวมงานรับสัญญาณ (Antenna) และเครื่องประมวลผล (Receiver) เข้าด้วยกันเป็นชิ้นเดียว มีหน้าจอ LED แสดงสถานะอยู่บนตัวเครื่อง ด้วยการควบคุมการทำงานผ่านระบบไร้สาย (wireless) ผ่านสัญญาณ Bluetooth, Wifi และระบบ 3G รองรับสัญญาณ GNSS ได้ทุกระบบ (GPS / GLONASS / BeiDou / Galileo) ในทุกคลื่นความถี่ (L1 L2 L5) ที่ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงถึงระดับ 1-4 cm ในการทำงานระบบ RTK Network (VRS) อีกทั้งยังมีฟองกลมอิเล็กทรอนิกส์ (E-bubble) ในตัวตรวจจับการเอียงของเครื่องมือ มาพร้อมกับแบตเตอรี่ Li-on สองก้อน ใช้งานได้ยาวนานกว่า 10 ชั่วโมง ด้วยการออกแบบที่ทนทานตามมาตรฐานการกันน้ำและฝุ่น IP68 และการตกกระแทกจากความสูง 3 เมตร ทำให้ CHC รุ่น i-80 สามารถใช้งานได้ยาวนานและลุยได้ในทุกสภาพอากาศ (CHC NAVTECH THAILAND, 2018)

คุณสมบัติ

1. สามารถรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ได้ทั้ง GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, และ SBAS
2. สามารถทำงานได้ทั้งโหมด STATIC, RTK, และ NETWORK RTK ด้วยความละเอียดแม่นยำสูง โดยแต่ละโหมดมีความละเอียดแม่นยำเป็นดังนี้
 - STATIC: ทางราบ 2.5 mm + 0.1 ppm RMS
 - RTK: ทางราบ 8 mm +1 ppm RMS
 - RTK Network: ทางราบ 8 mm + 0.5 ppm RMS
 - สามารถกำหนดความถี่ในการบันทึกข้อมูลได้สูงถึง 20 Hz
3. รองรับการใช้งานทั้งซิมการ์ด, บลูทูธ (Bluetooth) และ WIFI

4. รองรับรูปแบบข้อมูลได้ทั้ง
 - CMR, CMR+, RTCM2, RTCM3.x
 - NTRPI Client, NTRPI Caster
 - ยอมรับค่าปรับแก้ Network RTK ของกรมที่ดินได้อย่างสมบูรณ์
5. มีเซ็นเซอร์วัดความเอียง eBubble ในการชดเชยค่าพิกัดอัตโนมัติในช่วงการเอียงตัว 30 องศาช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงานต่อพื้นที่ที่ยากแก่การเข้าถึง
6. มีขนาดเล็กกะทัดรัดเพียง 14x12.4 ซม. ทำจากวัสดุ Megnesium Alloy มีน้ำหนักเบาและทนทานสูงทำให้มีน้ำหนักเพียง 1.22 กก. (รวมแบตเตอรี่)
7. ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง +75°C
8. ผ่านมาตรฐานการป้องกันน้ำและฝุ่นละออง IP68 ทนต่อการกระแทกแมตกลางบนพื้นคอนกรีตจากที่สูง 2 เมตร
9. รองรับการใช้แบตเตอรี่จำนวน 2 ก้อนพร้อมกันสามารถถอดสลับการเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องปิดเครื่อง (Hot-Swap) ใช้งานแบตเตอรี่ต่อเนื่องในโหมด RTK ได้สูงถึง 12 ชม.

รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้เป็นสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS)

1. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น N72 (CHCNAV, 2018)



ข้อมูลเกี่ยวกับการรับสัญญาณ GNSS

- 440 Channels พร้อมระบบติดตามสัญญาณดาวเทียม (Simultaneously tracked satellite signal)
 - GPS: L1C/A, L2C, L2E, L5
 - GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A (GLONASS M only), L2P
 - Galileo: E1, E5A, E5B
 - BeiDou: B1, B2
- สามารถรับวัดแบบ Pseudo-range แบบความละเอียดถูกต้องสูง
- การรับวัดแบบ Carrier phase มี Noise ที่ต่ำมาก คือ < 1 มม. ใน 1 Hz. Bandwidth

ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (GNSS Accuracy)

- Real Time Kinematics (RTK)
 - ทางราบ : 8 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 15 มม + 1 ppm RMS
 - Initialization time < 8 วินาที
 - Initialization reliability > 99.9%
- Post-processing Static
 - ทางราบ : 2.5 มม. + 0.1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 5 มม. + 0.5 ppm RMS
- Post-processing Static (Long Observation)

- ทางราบ : 3 มม. + 0.1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 3.5 มม. + 0.4 ppm RMS
 - Protocols
 - Correction formats: CMR, CMR+, SCMRX, RTCM2.3, RTCM3.2, RTD
 - Observables: RT17, RT27, RTCM3.X, RINEX2.11, RINEX3.02
 - Position/Status I/O: NMEA 0183 V2.30 และ V4.0 output.
 - Antenna
 - CHC A220GR GNSS Geodetic
 - CHC C220GR2 GNSS Choke Ring
2. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น TRIMBLE NETR9 (Trimble, 2010)



ข้อมูลเกี่ยวกับการรับสัญญาณ GNSS

- 440 Channels:
 - GPS: L1 C/A, L2C, L2E (Trimble method for tracking L2P), L5
 - GLONASS: L1 C/A and unencrypted P code, L2 C/A and unencrypted P code.
 - Galileo: GIOVE-A and GIOVE-B
 - SBAS: L1 C/A, L5, WASS, EGNOS and MSAS
 - L-band OmniSTAR VBS, HP and XP

ประสิทธิภาพของการรังวัด (Positioning Performance)

- Code Differential GNSS Positioning
 - ทางราบ : 0.25 ม. + 1 ppm RMS

- ทางตั้ง : 0.50 ม. + 0.5 ppm RMS
- WASS differential accuracy : โดยทั่วไป < 5 ม. 3D RMS
- Static GNSS Surveying
 - Baseline < 30 กม.
 - ทางราบ : 3 มม. + 0.1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 4 มม. + 0.4 ppm RMS
 - Baseline > 30 กม.
 - ทางราบ : 4 มม. + 0 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 9 มม. + 0 ppm RMS
- Real Time Kinematics (RTK)
 - Single Baseline < 30 กม.
 - ทางราบ : 8 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 15 มม. + 1 ppm RMS
 - Network RTK
 - ทางราบ : 8 มม. + 0.5 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 15 มม. + 0.5 ppm RMS
 - Initialization time < 10 วินาที
 - Initialization reliability > 99.9%
- Protocols
 - Correction formats: CMR, CMR+, SCMRX, RTCM 2.3, RTCM 2.3, RTCM 3.0, RTCM 3.1
 - Observables: RT17, RT27, RTCM3.X, BINEX
 - Position/Status I/O: NMEA 0183 V2.30 ,GSOFF
- Antenna
 - Trimble Zephyr Geodetic 2
 - Trimble GNSS Choke Ring.

3. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น TRIMBLE NETR5 (Trimble, 2006)



ข้อมูลเกี่ยวกับการรับสัญญาณ GNSS

- 76 Channels:
 - GPS: L1 C/A Code, L2C, L1/L2/L5 Full Cycle Carrier
 - GLONASS: L1 C/A Code, L1 P Code, L2 P code, L1/L2 Full Cycle Carrier.
 - SBAS/WASS/EGNOS Support.

ประสิทธิภาพของการรังวัด (Positioning Performance)

- Code Differential GNSS Positioning
 - ทางราบ : ± 0.25 ม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : ± 0.50 ม. + 0.5 ppm RMS
 - WASS differential accuracy : โดยทั่วไป < 5 ม. 3D RMS
- Static / Fast Static GPS Surveying.
 - ทางราบ : ± 5 มม. + 0.5 ppm RMS
 - ทางตั้ง : ± 5 มม. + 1 ppm RMS
- Kinematics Surveying.
 - ทางราบ : ± 10 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : ± 20 มม. + 1 ppm RMS
 - Initialization time < 10 วินาที
 - Initialization reliability > 99.9%

- Protocols
 - Correction formats: CMR, CMR+, BINEX และ RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0
 - Observables: RT17, RT27
- Antenna
 - Trimble Zephyr Geodetic 2
 - EDO Dorne & Margolin Choke Ring Antenna

4. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS (Geosystems, 2007)



ข้อมูลเกี่ยวกับการรับสัญญาณ GNSS

- Receiver type:
 - Triple-frequency, GPS/GLONASS/Galileo, geodetic, real-time RTK receiver
 - Static, rapid static, kinematic, On the fly L1 / L2 / L5 E1 / E5 a/E5 b/Alt-BOC, code, phase Real-time RTK Post processing DGPS/RTCM standard Survey, geodetic and real-time RTK application
- 120 Channels:
 - GPS: L1/L2/L5 Carrier
 - GLONASS: L1/L2
 - Galileo: E1/E5a/E5b/Alt-BOC
 - 4 SBAS,WASS,EGNOS

ประสิทธิภาพของการรังวัด (Positioning Performance)

- Measurement precisions:
 - Carrier phase (L1): 0.2 มม. RMS, (L2): 0.2 มม. RMS
 - Code (Pseudo-range on L1, L2): 20 มม. RMS
- Static Surveying.
 - ทางราบ : ± 5 มม. + 0.5 ppm RMS
 - ทางตั้ง : ± 10 มม + 0.5 ppm RMS
 - For long lines with long observation
 - ทางราบ : 3 มม. + 0.5 ppm RMS
 - ทางตั้ง : 6 มม. + 0.5 ppm RMS
- Kinematics Surveying.
 - ทางราบ : ± 10 มม. + 1 ppm RMS
 - ทางตั้ง : ± 20 มม + 1 ppm RMS
- Reference Station Network
 - I-MAX, MAX format, VRS and FKP
- Protocols
 - Correction formats: CMR, CMR+, และ RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0
 - NMEA 0183 V.3.00
- Antenna
 - AX1 2 0 3 + GNSS, L1 / L2 / L5 GPS/GLONASS/Galileo/Compass SmartTrack+
 - AR25 choke-ring GPS/GLONASS Galileo/Compass

บรรณานุกรม

- กรมที่ดิน. (2562). ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) พ.ศ. 2562. กรมที่ดิน.
- กรมแผนที่ทหาร. (2563). ตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Stations) ในประเทศไทย. Retrieved from <https://gnss-portal.rtsd.mi.th/portal/apps/sites/#/gnss>
- กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน. (2561). คู่มือการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรุงเทพมหานคร: กองฝึกอบรม กรมที่ดิน.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2548). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 Advanced GPS Satellite Surveying งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีทัต เจริญกาลัญญา. (2555). ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2548). การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Castleden, N., Hu, G., Abbey, D., Weihing, D., Øvstedal, O., Earls, C., & Featherstone, W. (2004). First results from virtual reference station (VRS) and precise point positioning (PPP) GPS research at the western Australian Centre for Geodesy. *Journal of Global Positioning Systems*, 3(1-2), 79-84.
- Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Keitniyomrung, V., & Yomwan, P. (2019). Performance of Network-Based RTK GNSS for the Cadastral Survey in Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 15(3).
- CHC NAVTECH THAILAND. (2017). CPS Software. Retrieved from https://docs.wixstatic.com/ugd/498693_22aff2db13f9423884930b3ac03dc312.pdf
- CHC NAVTECH THAILAND. (2018). CHC i-80 Receiver. Retrieved from <https://www.chcthailand.com/i-80-receiver>
- CHCNAV. (2018). N72 GNSS Infrastructure. China: Shanghai Huace Navigation Technology Ltd.
- Da Tsai, M., Wu, C. L., Lin, Y. C., & Wang, M. C. (2019). Validating VRS-based Post-processing Kinematics GPS for Horizontal Densified Surveying.

- Dabove, P., Cina, A., & Manzano, A. M. (2016). *How reliable is a Virtual RINEX?* Paper presented at the 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS).
- FGDC, S. (1998). Geospatial positioning accuracy standards. Part 3: National standard for spatial data accuracy. In (pp. 25): Subcommittee for Base Cartographic Data.
- Geosystems, L. (2007). Leica GPS1200+ Series: Technical Data. Retrieved from https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/general/brochuresdatasheet/gps1200_technicaldata_en.pdf
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*: Springer Science & Business Media.
- Janssen, V. (2013). Investigation of Virtual RINEX data quality.
- KQ GNSS. (2018). GNSS RTK NETWORK. Retrieved from <http://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gnss-rtk-network.html>
- Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Mageed, K. M. A. (2013). Accuracy Evaluation between GPS Virtual Reference Station (VRS) and GPS Real Time Kinematic (RTK) Techniques. *World Appl. Sci. J*, 24, 1154-1162.
- Teunissen, P. J., & Kleusberg, A. (2012). *GPS for Geodesy*: Springer Science & Business Media.
- Trimble. (2006). Trimble NetR5 Reference Station.: Trimble Navigation Limited.
- Trimble. (2010). Trimble NetR9 GNSS Reference Station. Retrieved from <http://www.kmcgeo.com/Datasheets/NetR9.pdf>
- Trimble. (2019). Trimble Business Center : Office Software for Surveyors. Retrieved from <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimblebusiness-center>
- Vollath, Buecherl, Landau, Pagels, & Wagner. (2000). *Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations* Paper presented at the Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000).
- Wang, J., Satirapod, C., & Rizos, C. (2002). Stochastic assessment of GPS carrier phase

measurements for precise static relative positioning. *Journal of Geodesy*, 76(2), 95-104.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิริธร เปรียบจัตุรัส
วัน เดือน ปี เกิด	18 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ที่อยู่ปัจจุบัน	142 หมู่ที่ 1 ต.ตลาด อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30310
ผลงานตีพิมพ์	สิริธร เปรียบจัตุรัส และ ธิทัต เจริญกาลัญญาตา (2564) "การประเมิน ประสิทธิภาพของการรังวัดแบบ Post-processing VRS สำหรับการรังวัด ที่ดินในประเทศไทย" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26 วันที่ 23-25 มิถุนายน 2564