

การประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบ  
จลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย  
ไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF POSITIONING ACCURACY USING COR STATIONS NETWORKING WITH A  
NETWORK RTK GNSS TECHNIQUE FOR CADASTRAL SURVEYS 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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย
โดย	นายรุ่งโรจน์ เจริญยศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญาตา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญาตา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน)

รุ่งโรจน์ เจริญยศ : การประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย. ( EVALUATION OF POSITIONING ACCURACY USING COR STATIONS NETWORKING WITH A NETWORK RTK GNSS TECHNIQUE FOR CADASTRAL SURVEYS IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ธีทัต เจริญกมลัญญา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและวิเคราะห์ผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม (loops) ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วยข้อมูลหมุดทดสอบทั้งหมด 2,122 หมุด จากพื้นที่ให้บริการโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ จำนวน 143 รูป ที่ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย โดยข้อมูลหมุดทดสอบนั้น ทำการรังวัด 2 วิธี ไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ 1) การรังวัดแบบสถิต (Static) จำนวน 90 นาที สำหรับใช้เป็นค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) และ 2) การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS จำนวน 15 นาที จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มหมุดทดสอบโดยใช้ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้านออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ และจำแนกลักษณะของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ออกเป็น 1) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า 2) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และ 3) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน อีกทั้งยังจำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Ill-Conditioned Triangle

ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความสัมพันธ์กับขนาดของรูปโดยตรง กล่าวคือ การรังวัดในรูปขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีกว่ารูปขนาดใหญ่ โดยเฉพาะรูปที่มีขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีที่สุด และทุกขนาดของรูป มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบเฉลี่ยที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ส่วนลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ นั้น ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของรูปเช่นเดียวกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับงานรังวัดที่ดินในประเทศไทย

สาขาวิชา            วิศวกรรมสำรวจ  
ปีการศึกษา            2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6070470421 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: RTK GNSS Network, Continuously Operating Reference Station (CORS), Cadastral  
Surveying in Thailand, VRS Thailand

Rungrote Charoenyot : EVALUATION OF POSITIONING ACCURACY USING COR STATIONS  
NETWORKING WITH A NETWORK RTK GNSS TECHNIQUE FOR CADASTRAL SURVEYS IN  
THAILAND. Advisor: Teetat Charoenkalunyuta, Ph.D. Co-advisor: Prof. CHALERMCHON  
SATIRAPOD, Ph.D.

The objective of this thesis is to evaluate the horizontal positioning accuracy and examine the effect of the triangular CORS networks (loops) geometric characteristics of RTK GNSS network with Virtual Reference Station (VRS) technique for the cadastral survey in Thailand. The data in this study consists of 2,122 test points, which were collected from 143 loops of triangular CORSs networks covering most parts of Thailand. There are two different methods conducted to process the data in this study - i.e. 1) The post processing of 90-minute static GNSS surveying used as the ground truth, and 2) The 15-minute RTK GNSS Network surveying with VRS technique as the testing points. This data is divided into four separated groups by the loop spacing of 30-50 km, 50-70 km, 70-90 km and 90-110 km, and also categorized by the characteristics of triangular CORS networks into three groups including 1) Equilateral triangle 2) Acute triangle and 3) Obtuse triangle. Moreover, the triangles are also classified as the Well-Conditioned Triangle and the Ill-Conditioned Triangle.

The result shows that the efficiency of RTK GNSS network with VRS technique has direct correlation with the loop sizes. It could be said that RTK GNSS Network positioning with the smaller loop size of COR stations would be more accurate rather than the larger loop size, particularly the loops that smaller than 50 kilometers. In addition, all sample groups of this study including the largest loop size could provide averages of horizontal accuracy better than four centimeters. On the other hand, the geometric characteristics of triangular CORS networks seem to not have a significant effect on the horizontal position accuracy of the RTK GNSS Network with the VRS technique, unlike the loop sizes. All in all, it could be concluded that the RTK GNSS Network with the VRS technique is applicable for the cadastral survey in Thailand.

Field of Study: Survey Engineering

Academic Year: 2019

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือ แนะนำ และสนับสนุนจากหลายท่านด้วยกัน โดยเฉพาะ อ.ดร.ธีทัต เจริญกุลัญญาตา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รวมถึง อ.ดร.ชัยโชค ไวกาษา ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งทุกท่านได้กรุณาให้แนวความคิด ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอธิบดีกรมที่ดิน ท่านผู้อำนวยการสำนักมาตรฐานและส่งเสริมการรังวัด กรมที่ดิน ท่านผู้อำนวยการส่วนมาตรฐานมาตรฐานการรังวัดเฉพาะราย ที่ให้ความกรุณาอนุญาต และอนุมัติทุนการศึกษาให้ผู้เขียนได้มาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท รวมถึงนายสงวน มณีรัตนศักดิ์ หัวหน้ากลุ่มพัฒนาเทคโนโลยีการรังวัดและทำแผนที่ นายณัฐวุฒิ ลิ่มนราภิรมย์ วิศวกรรังวัดปฏิบัติการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่อีกหลายท่าน อันผู้เขียนมิได้เอ่ยนาม ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจให้ผู้เขียน ในการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณกรมที่ดิน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจากโครงการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่ เพื่อประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคุณคณาจารย์ต่าง ๆ อันผู้เขียนมิได้เอ่ยนาม ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางด้านวิชาการแก่ผู้เขียน รวมทั้งได้แต่งตำราให้ผู้เขียนได้ใช้ค้นคว้า อ้างอิง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ผู้เขียนขอขอบคุณนายวรวิช กำธรกิตติกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขการใช้ภาษาอังกฤษในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ และกัลยาณมิตรของผู้เขียนทุกท่าน สำหรับมิตรภาพ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณครอบครัวสำหรับกำลังใจ และการสนับสนุนในทุกด้าน ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์ไม่มากนักน้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยเป็นอย่างสูง

รุ่งโรจน์ เจริญยศ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	5
1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	6
1.3.3 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา.....	7
1.3.4 เครื่องมือสำหรับรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส.....	8
1.3.5 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	9
1.3.5.1 Trimble Business Center (TBC 4.1).....	9
1.3.5.2 CHC Precision Service (CPS).....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	11
2.1.1 ระบบดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS).....	11

2.1.2	หลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส	12
2.1.2.1	การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)	12
2.1.2.2	เรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry)	13
2.1.3	วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากสมการค่าสังเกต (Observation Equation)	13
2.1.3.1	ซูโดเรนจ์ (Pseudorange)	13
2.1.3.2	เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)	15
2.1.4	เทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง (Double Differencing)	16
2.1.5	วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส	18
2.1.5.1	การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบสถิต (Static)	18
2.1.5.2	การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network)	18
2.1.5.3	องค์ประกอบของระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network)	19
2.1.5.4	แนวคิดวิธีการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ในรูปแบบต่างๆ	20
2.1.5.5	หลักการของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS)	24
2.1.6	ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558	30
2.1.7	รูปสามเหลี่ยม (Triangles)	32
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา	33
2.2.1	การศึกษาเกี่ยวกับการรังวัดที่ดินด้วยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ในรูปแบบต่างๆ	33
2.2.2	การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์	36



2.2.3 การศึกษาเกี่ยวกับระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจีเอ็นเอสเอสจลน์ (RTK GNSS Network หรือ Network – Based RTK : NRTK).....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	41
3.1 ทำการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	42
3.2 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอส.....	42
3.2.1 ข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) .....	42
3.2.2 ข้อมูลการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	42
3.3 การจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน.....	43
3.4 การประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static).....	43
3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) .....	45
3.6 วิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	46
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย .....	51
4.1 ผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน .	51
4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	53
4.3 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	58

4.3.1 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยจำแนกตามขนาดของมุมภายใน .. 58	
4.3.2 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ย ระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน..... 59	
4.3.3 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle. 63	
4.3.3.1 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ..... 63	
4.3.3.2 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle 64	
4.3.3.3 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ..... 66	
4.3.3.4 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle 68	
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่อง ถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ของการ รังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิง เสมือน (VRS)..... 69	
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน..... 69	
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และ ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน ..... 70	

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle. 72	
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย .....	80
5.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	80
5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่อง ถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ของการ รังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิง เสมือน (VRS).....	84
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน.....	84
5.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และ ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน .....	85
5.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle. 88	
5.2.3.1 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็น รูป สามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน .....	88
5.2.3.2 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ที่ จำแนกตามขนาดของมุมภายใน .....	90
5.2.3.3 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle	

ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐาน อ้างอิงถาวรสามด้าน .....	91
5.2.3.4 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูป สามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ที่ จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐาน อ้างอิงถาวรสามด้าน .....	93
5.2.4 ข้อสังเกต .....	95
5.3 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	100
5.3.1 ข้อเสนอสรุปผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอส เอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ สถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย .....	100
5.3.2 ข้อเสนอสรุปของการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทาง ตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วย เทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) .....	101
5.3.3 ข้อเสนอแนะ .....	102
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก. รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณ ดาวเทียม ระบบ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย .....	105
ภาคผนวก ข. รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย.	117
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทาง ราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม .....	122
บรรณานุกรม.....	130
ประวัติผู้เขียน .....	135

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งสำหรับการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายฯ .....	31
ตารางที่ 2 ตารางแสดงการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน จำนวน รูป และจำนวนหมุดทดสอบของแต่ละกลุ่ม .....	51
ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียม จีเอ็นเอส เอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิง เสมือน (VRS) .....	54
ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบ รับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม .....	58
ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม (ต่อ).....	60
ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well- Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle.....	63
ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบ รับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well- Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ).....	64
ตารางที่ 8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบ รับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน .....	69
ตารางที่ 9 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิง แบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน (ต่อ).....	70
ตารางที่ 10 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และ ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน.....	70



ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle (ต่อ) .....	77
ตารางที่ 20 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle.....	78
ตารางที่ 21 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ) .....	79
ตารางที่ 22 ตารางแสดงข้อมูลของลูปที่มีค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร.....	96
ตารางที่ 23 ตารางแสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่มีแนวโน้มที่จะให้ ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร .....	98
ตารางที่ 24 ตารางแสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่ใช้ในงานวิจัย .....	109
ตารางที่ 25 ตารางแสดงข้อมูลของลูปที่มีค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร ที่มีสถานีฐานอ้างอิงฯ อย่างน้อย 1 สถานี ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ 2 ระบบ ได้แก่ GPS และ GLONASS.....	111
ตารางที่ 26 ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle .....	124
ตารางที่ 27 ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle .....	125
ตารางที่ 28 ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่	

จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle ..... 126

ตารางที่ 29 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน..... 127

ตารางที่ 30 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความสัมพันธ์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน..... 128





## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ตัวอย่างของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS).....	1
ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) และตำแหน่งของ หมุดทดสอบสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (มิถุนายน 2561).....	2
ภาพที่ 3 อธิบายลักษณะของหลักเขตที่ดิน.....	4
ภาพที่ 4 ตัวอย่างการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของหมุดทดสอบในพื้นที่ต่างๆ.....	6
ภาพที่ 5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80.....	8
ภาพที่ 6 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC 4.1).....	9
ภาพที่ 7 ซอฟต์แวร์ CHC Precision Service (CPS).....	10
ภาพที่ 8 การเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ.....	14
ภาพที่ 9 แสดงหลักการเทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง.....	17
ภาพที่ 10 แสดงหลักการของระบบ FKP.....	21
ภาพที่ 11 แสดงหลักการของระบบ VRS.....	22
ภาพที่ 12 แสดงหลักการของระบบ Master-Auxiliary Concept (MAX).....	23
ภาพที่ 13 แสดงหลักการของระบบ Individualized MAX (i-MAX).....	24
ภาพที่ 14 แสดงถึงลักษณะการทำงานของระบบ Virtual Reference Station (VRS).....	25
ภาพที่ 15 แสดงถึงแนวคิดการทำงานของระบบ VRS.....	28
ภาพที่ 16 ประเภทของรูปสามเหลี่ยมแบบต่างๆ.....	32
ภาพที่ 17 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
ภาพที่ 18 ตัวอย่างวิธีการรังวัดสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในพื้นที่ต่างๆ.....	43
ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างการประมวลผลข้อมูลแบบสถิติฯ โดยทำการโยงยึดพิกัดอ้างอิง จากสถานี ฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ใกล้ที่สุด จำนวน 2 สถานี.....	44

ภาพที่ 20 แสดงลักษณะของรูปสามเหลี่ยมในอุดมคติ, รูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle.....	47
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมภายใน และด้านตรงข้ามมุม ตามกฎของโคไซน์.....	49
ภาพที่ 22 กราฟแสดงผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่าง สถานีฐานถาวรสามด้าน.....	52
ภาพที่ 23 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียม จีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS).....	55
ภาพที่ 24 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียม จีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) (ต่อ).....	56
ภาพที่ 25 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียม จีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) (ต่อ).....	57
ภาพที่ 26 กราฟแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบ รับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยจำแนกตามขนาดของมุมภายใน.....	59
ภาพที่ 27 กราฟแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบ รับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน.....	62
ภาพที่ 28 กราฟแสดงจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle .....	66
ภาพที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) กับจำนวนข้อมูลในรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเอส ของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS .....	82
ภาพที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) กับระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเอส ของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS .....	83



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

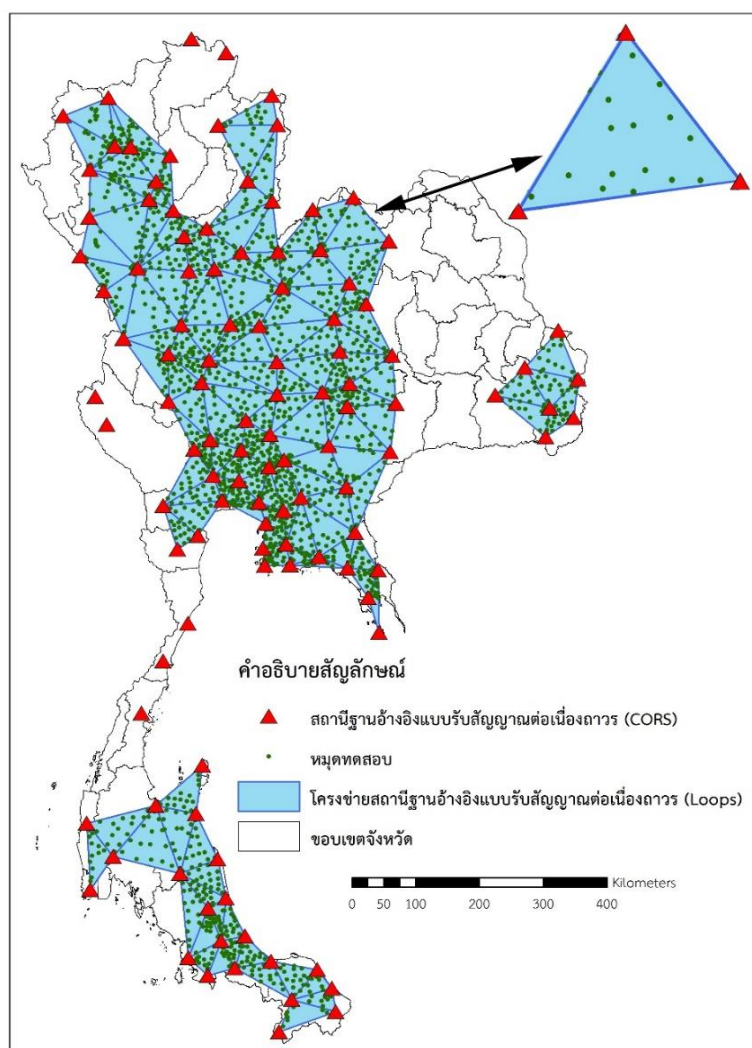
เนื่องด้วยประเทศไทยมีแนวคิดที่จะพัฒนาเรื่องการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System: GNSS) ของประเทศบนหลักการของ Network of Continuously Operating Reference Station (CORS) ซึ่งในปัจจุบันโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทางสากล มีส่วนส่งเสริมเศรษฐกิจของประเทศทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ประกอบกับหน่วยงานในประเทศไทยหลายหน่วยงาน ได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร เพื่อดำเนินงานตามภารกิจของแต่ละหน่วยงาน (Thaigov., 2560) โดยกรมที่ดินเป็นหนึ่งในหน่วยงานที่ได้รับจัดสรรงบประมาณดังกล่าว เนื่องจากเป็นหน่วยงานหลักที่ดำเนินงานด้านการรังวัดและจัดทำรูปแปลงที่ดินของประเทศไทย



ภาพที่ 1 ตัวอย่างของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS)

ภารกิจหลักของกรมที่ดินคือการทำงานเกี่ยวกับการออกหนังสือแสดงสิทธิในที่ดินให้ราษฎร และให้บริการจดทะเบียนสิทธิและนิติกรรมเกี่ยวกับที่ดิน และอสังหาริมทรัพย์อย่างอื่น รวมถึงการจัดที่ทำกินให้ประชาชนตามประมวลกฎหมายที่ดิน โดยที่ดินมีความสำคัญอย่างมากในระบบเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย เนื่องจากที่ดินเป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ของการดำรงชีวิตขั้นพื้นฐานของมนุษย์ อีกทั้งในปัจจุบันที่ดินเป็นทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูง และมูลค่าของที่ดินก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอีกด้วย (กรมที่ดิน, 2554) สำหรับวิธีการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย กรมที่ดินได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับระบบ และวิธีการทำงานมาตลอด จากเดิมที่ต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ขนาดใหญ่ มีระบบการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาในการประมวลผลที่ยาวนาน มาเป็นเครื่องมือที่มีขนาด

เล็กน้อย แต่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ใช้เวลาในการปฏิบัติงานและคำนวณประมวลผลสมการที่ยุ่งยาก ซับซ้อนในเวลาเพียงไม่กี่นาที (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2558) จนปัจจุบันได้นำเอา เทคโนโลยีการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) มาปรับใช้สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดิน ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในหลายประเทศทั่วโลก อาทิ ประเทศสหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น อังกฤษ และออสเตรเลีย เป็นต้น เนื่องจากวิธีการดังกล่าวให้ค่าความ ถูกต้อง แม่นยำทางตำแหน่งที่สูงมาก อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานลง และเพิ่ม ประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) และตำแหน่งของหมุดทดสอบสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (มิถุนายน 2561)

กรมที่ดินได้ทำการติดตั้งติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) เพื่อภารกิจการรังวัดและจัดทำรูปแบบแปลงที่ดิน ด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยได้เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 (กรมที่ดิน, 2561) จนถึงปัจจุบันมีสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรจำนวน 134 สถานี และยังได้มีการบูรณาการเชื่อมโยงข้อมูลจากสถานีฐานอ้างอิงฯ ของกรมโยธาธิการและผังเมืองจำนวน 15 สถานี ของกรมแผนที่ทหารจำนวน 80 สถานี ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) จำนวน 6 สถานี ของสถาบันการศึกษา และหน่วยงานด้านการวิจัยต่างๆ อีก 9 สถานี จึงทำให้ปัจจุบันกรมที่ดินมีสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรให้บริการรวมทั้งสิ้น 244 สถานี แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลที่ทำกรรังวัดในช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561 ซึ่งขณะนั้นมีสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรของกรมที่ดินจำนวน 99 สถานี โดยเป็นสถานีฐานถาวรจำนวน 92 สถานี และสถานีฐานถาวรแบบติดตั้งชั่วคราว อีกจำนวน 7 สถานี และข้อมูลจากสถานีฐานฯ ของกรมโยธาธิการและผังเมืองจำนวน 15 สถานี รวมทั้งสิ้น 114 สถานี กระจายอยู่ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย (ดูภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2 ประกอบ)

ที่ผ่านมาเคยมีการทดสอบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์แล้ว แต่ทำการทดสอบเฉพาะในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลเท่านั้น โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรเพียง 11 สถานี โดยมีระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวร (Station Spacing) ตั้งแต่ 27.8 กิโลเมตร จนถึง 125.6 กิโลเมตร และมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรเท่ากับ 60 กิโลเมตร ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวร มีผลต่อค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ โดยค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่สั้นกว่า ย่อมให้ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือทางตำแหน่งที่ดีกว่า (Teeratat Charoenkalunyuta et al., 2012) แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรตั้งแต่ 25.1 กิโลเมตร จนถึง 198.6 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรเท่ากับ 82.7 กิโลเมตร และมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม หรือเรียกว่า ลูป (Loops) ตั้งแต่ 37.2 กิโลเมตร จนถึง 110 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านเท่ากับ 72.5 กิโลเมตร (กรมที่ดิน, 2562) ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีจำนวนสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรมากกว่า

ในปัจจุบัน กรมที่ดินได้เริ่มดำเนินการรังวัดแปลงที่ดินทั่วประเทศให้มีค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ชัดเจนแน่นอนโดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยดำเนินการเพื่อการรังวัดที่ดินเฉพาะรายของสำนักงานที่ดิน และการเดินสำรวจรังวัดสอบเขตและออกโฉนดที่ดินทั่วประเทศควบคู่กัน (กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน, 2561) ซึ่งดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดเรื่องค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่ไม่เกิน  $\pm 4$  เซนติเมตร ตามระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558 ซึ่งเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งนี้ มีที่มาจากหมวดหลักเขตที่ดินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 8 เซนติเมตร และเพื่อให้ตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดแปลงที่ดิน ยังคงอยู่ภายในขอบเขตของหมวดหลักเขตที่ดิน (ดูภาพที่ 3 ประกอบ) ดังนั้นตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ซึ่งใช้เป็นหมุดอ้างอิงสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินดังกล่าว จึงต้องการค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่ไม่เกิน  $\pm 4$  เซนติเมตรนั่นเอง



ภาพที่ 3 อธิบายลักษณะของหลักเขตที่ดิน

สำหรับในอนาคต กรมที่ดินและหน่วยงานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ยังมีแผนที่จะดำเนินการติดตั้งโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรเพิ่มเติม เพื่อให้มีจำนวนสถานีฐานเพิ่มมากขึ้น และครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นการยกระดับโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทาง (GNSS) ของประเทศไทย ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้น จากการพัฒนาระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ส่งผลให้มีจำนวนสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรเพิ่มขึ้น มีขนาดของโครงข่ายที่ใหญ่ขึ้น ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากขึ้น ประกอบกับข้อกำหนดเรื่องค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบสำหรับงานรังวัดแปลงที่ดิน ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้

จากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน โดยพิจารณาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบเป็นหลัก เนื่องจากมีความสำคัญต่อการรังวัดแปลงที่ดินมากที่สุด และประกอบกับการศึกษาเรื่องลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม จะช่วยให้ทราบถึงผลที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

### 1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยม จำนวน 143 ลูบ ในพื้นที่ 63 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดสมุทรปราการ นนทบุรี ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา อ่างทอง ลพบุรี สิงห์บุรี ชัยนาท สระบุรี ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี นครนายก สระแก้ว นครราชสีมา บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ อุบลราชธานี ชัยภูมิ หนองบัวลำภู ขอนแก่น อุดรธานี เลย หนองคาย เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง อุดรดิษฐ์ แพร่ น่าน พะเยา แม่ฮ่องสอน นครสวรรค์ อุทัยธานี กำแพงเพชร ตาก สุโขทัย พิษณุโลก พิจิตร เพชรบูรณ์ ราชบุรี กาญจนบุรี สุพรรณบุรี นครปฐม สมุทรสาคร เพชรบูรณ์ นครศรีธรรมราช กระบี่ ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี สงขลา ตรัง พัทลุง ปัตตานี ยะลา นราธิวาส พังงา สตูล สมุทรสงคราม และกรุงเทพมหานคร (ดูภาพที่ 2 ประกอบ) (กรมที่ดิน, 2562)



### 1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชิงพื้นที่ ซึ่งเป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่างกรมที่ดินและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วย

1.3.2.1 ข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) และข้อมูลการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) สำหรับรายละเอียดของการรังวัดฯ จะแสดงในบทที่ 3

1.3.2.2 ข้อมูลประมวลผลภายหลัง (Post Processing) ของข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) โดยใช้ค่าแก้วงโคจรรายละเอียดสูงของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou ความถูกต้องสูงที่สุด (Precise Orbit) จาก Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Trimble Business Center (TBC) 4.1 เพื่อกำหนดให้เป็นค่าพิคต์อ้างอิง (Ground Truth) ในการนำมาตรวจสอบกับค่าพิคต์ของหมุดทดสอบที่ทำการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS

1.3.2.3 ข้อมูลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของหมุดทดสอบในพื้นที่ต่างๆ

### 1.3.3 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

1.3.3.1 ศึกษาวิธีการรังวัดสัญญาณดาวเทียมด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบ จลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ของกรมที่ดิน โดยศึกษาจากระเบียบระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่าย การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558

1.3.3.2 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส การ รังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคต่างๆ และการวิเคราะห์ผล การศึกษาตามหลักการของการวิจัยสากล

1.3.3.3 ศึกษารายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณ ดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้เป็นสถานีผู้ใช้งาน และสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งรายละเอียดของการศึกษา จะแสดงในภาคผนวก ก.

1.3.3.4 ศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC) เวอร์ชัน 4.1 สำหรับ นำมาใช้ประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต เพื่อกำหนดให้เป็นค่าพิคัดอ้างอิง (Ground Truth) ในการนำมาตรวจสอบกับค่าพิคัดของหมุดทดสอบที่ทำการรังวัดด้วยเทคนิค แบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) โดยรายละเอียดของการศึกษา จะแสดงในบทที่3 และ ทำการศึกษารายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของซอฟต์แวร์ CHC Precision Service หรือ CPS ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลของโครงข่ายสถานี ฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณ ต่อเนื่องถาวร (CORS) โดยรายละเอียดของการศึกษา จะแสดงในภาคผนวก ข.

1.3.3.5 สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอส เอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) จะพิจารณาเฉพาะค่าพิคัดทางราบ เท่านั้น และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านทางตัวแปรทางสถิต ได้แก่

- ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity ของการรับสัญญาณด้วยเทคนิค VRS
- ค่าร้อยละของการรับสัญญาณด้วยเทคนิค VRS สำเร็จ
- ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP) ของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS
- ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าพิคัดอ้างอิง

- ร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ (Rate of the position jump in Horizontal) ของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง
- ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal Root Mean Square Error – Horizontal RMSE) ของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

1.3.3.6 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) จะพิจารณาโดยใช้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal Root Mean Square Error - RMSE) ของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

#### 1.3.4 เครื่องมือสำหรับรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

เครื่องมือที่ใช้สำหรับรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสของสถานีผู้ใช้งานในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบหลายความถี่ (Multi Frequencies) รองรับการควบคุมการทำงานผ่านระบบไร้สาย (Wireless) ผ่านสัญญาณ Bluetooth, Wifi และระบบ 3G/4G โดยสามารถรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ได้ทั้ง GPS, GLONASS, Beidou, Galileo, QZSS และ SBAS รองรับการดำเนินงานในหลากหลายโหมด เช่น STATIC, RTK และ Network RTK ด้วยความละเอียดแม่นยำสูง โดยรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับเครื่องมือรังวัดสัญญาณดาวเทียมฯ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะแสดงในภาคผนวก ก. (CHC NAVTECH THAILAND, 2018)

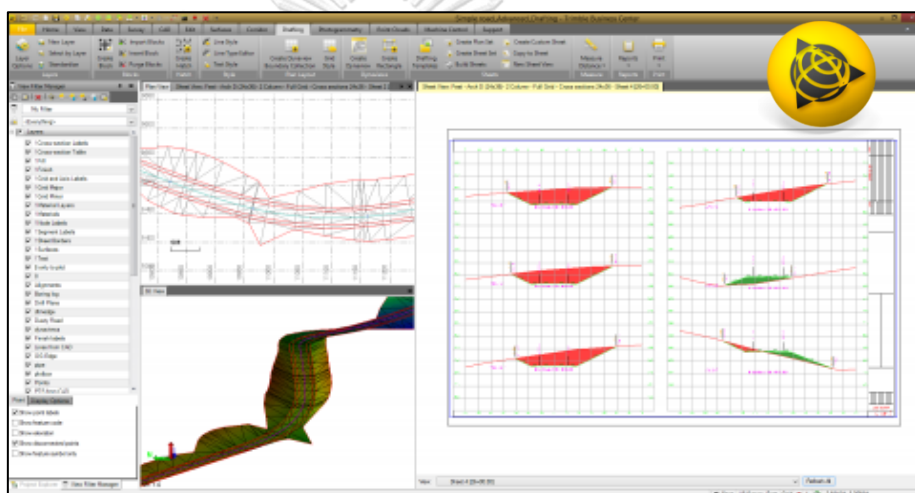


ภาพที่ 5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80

### 1.3.5 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษา

#### 1.3.5.1 Trimble Business Center (TBC 4.1)

ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC) เวอร์ชัน 4.1 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ พัฒนาโดยบริษัท Trimble Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประมวลผลข้อมูลดาวเทียม GNSS ในภายหลัง (Post Processing) โดยมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูล GNSS ของกลุ่มดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou (BDS) ร่วมกันได้ รวมถึงสามารถประมวลผลข้อมูล GNSS ร่วมกับวงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูงได้ รองรับข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องมือหลากหลายรุ่นและยี่ห้อ (Trimble, 2019)



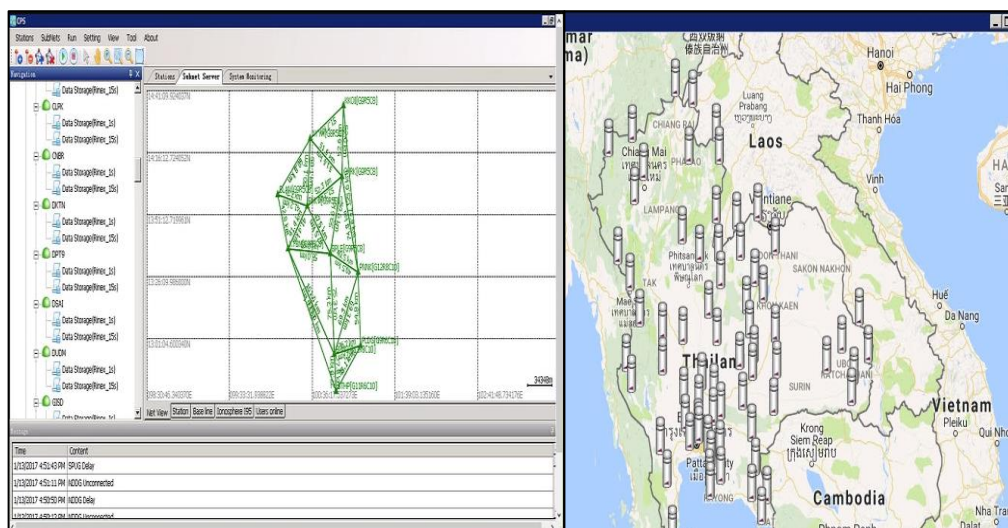
ภาพที่ 6 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center (TBC 4.1)

(ที่มา: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-business-center>)

#### 1.3.5.2 CHC Precision Service (CPS)

CHC Precision Service หรือ CPS เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท CHC ประเทศจีน โดยทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows Server สำหรับการประมวลผลโครงข่ายดาวเทียม Network-Based GNSS RTK จากข้อมูลสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) รองรับสัญญาณทั้งระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou (BDS) สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้หลากหลายยี่ห้อ ซอฟต์แวร์ CPS ถูกออกแบบมารองรับการให้บริการในโครงข่ายสถานีฐานถาวรฯ ในพื้นที่ขนาดใหญ่ และให้บริการค่าปรับแก้ในรูปแบบต่างๆ ให้กับผู้ใช้งานในการทำงานระบบ

Network-Based GNSS RTK หรือ VRS โดยแสดงผลออกมาให้ใช้งานง่าย มีแผนที่ออนไลน์ สำหรับการตรวจสอบตำแหน่ง รวมทั้งการแสดงผลข้อมูลสถานะของแต่ละสถานีแบบ Real-time โดยรายละเอียดเพิ่มเติมจะแสดงในภาคผนวก ข. (CHC NAVTECH THAILAND, 2016)



ภาพที่ 7 ซอฟต์แวร์ CHC Precision Service (CPS)

(ที่มา: <https://www.chcthailand.com/software>)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS) สำหรับการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

1.4.2 ทราบถึงผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS)

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ระบบดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS)

ระบบดาวเทียมนำทาง (Global Navigation Satellite Systems : GNSS) ซึ่งเป็นคำที่ทั่วโลกใช้เรียกระบบดาวเทียมนำทางที่มีการเปิดให้บริการอยู่ในปัจจุบัน และระบบดาวเทียมนำทางที่มีการวางแผนจะเปิดให้บริการในอนาคต ซึ่งหน่วยงานด้านอวกาศได้นิยามความหมายของระบบดาวเทียมนำทางว่า GNSS เพื่อให้ครอบคลุมระบบดาวเทียมที่มีลักษณะการใช้งานคล้ายคลึงกับระบบดาวเทียม GPS ของประเทศสหรัฐอเมริกา เช่น ระบบดาวเทียม GLONASS ของประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย, ระบบดาวเทียม Galileo ของสหภาพยุโรป ระบบดาวเทียม Compass หรือ Beidou ของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน, ระบบดาวเทียม QZSS ของประเทศญี่ปุ่น และระบบดาวเทียม IRNSS ของประเทศอินเดีย เป็นต้น โดยระบบดาวเทียมนำทางดังกล่าวเป็นระบบที่สามารถใช้หาตำแหน่งได้ในทุกสภาพอากาศ ตลอด 24 ชั่วโมง และสามารถใช้งานได้ทั่วโลก ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ (Tom Stansell, 2018; เจนพิธิกร สุนทรรัตน์, 2560; เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

**1.) ส่วนอวกาศ (Space segment)** ส่วนอวกาศประกอบด้วยตัวดาวเทียมและสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยระบบดาวเทียม GNSS ซึ่งโคจรรอบโลกที่ความสูงประมาณ 20,000 กิโลเมตร โดยดาวเทียม GNSS ในแต่ละระบบ จะมีกลุ่มดาวเทียมที่มีการจัดรูปแบบวงโคจรครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ แต่โดยส่วนมากจะจัดให้สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงทั่วโลกตลอด 24 ชั่วโมง และสำหรับสัญญาณที่ส่งออกมาจากดาวเทียม โดยทั่วไปจะเป็นคลื่นวิทยุ โดยคลื่นดังกล่าวนั้นถูกผสมผสานรหัสและข้อมูลดาวเทียมไปกับคลื่นหรือเรียกสั้นๆ ว่าการกล้ำสัญญาณ (Modulation) ด้วยรหัสและข้อมูลดาวเทียม ซึ่งได้แก่ ข้อมูลวงโคจรที่ถูกต้องของดาวเทียม (Ephemeris Data) ส่งรหัส (Code) และข้อมูล Carrier Phase และข้อมูลตำแหน่งโดยประมาณของดาวเทียมทั้งหมด (Almanac Information) เป็นต้น

**2.) ส่วนควบคุม (Control Segment)** ส่วนควบคุมประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่จำเป็นต่อการติดตามดาวเทียม การคำนวณวงโคจรดาวเทียม การดูแลรักษาระบบ และควบคุมส่วนอวกาศ ซึ่งประกอบด้วยสถานีควบคุมหลัก (Master control station) ที่ทำการประมวลผลข้อมูลทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลวงโคจรดาวเทียม ข้อมูลค่าแก้เวลาดาวเทียม หรือข้อมูลอื่นๆ สถานีอัปโหลด (Upload station) จะเป็นสถานีที่คอยส่งข้อมูลที่คำนวณได้จากสถานีควบคุมหลักไปยังดาวเทียมและสถานีติดตาม (Monitor Stations) ซึ่งทำหน้าที่คอยติดตามดาวเทียม

**3.) ส่วนผู้ใช้ (User Segment)** ส่วนผู้ใช้ประกอบด้วยทุกๆส่วน ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ตัวเครื่องรับสัญญาณ หรือวิธีการประมวลผลที่อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ สำหรับประเภทผู้ใช้จะถูกแบ่งออกเป็นผู้ใช้ทางการทหาร และพลเรือน โดยผู้ใช้พลเรือน จะไม่ได้รับอนุญาตให้สามารถเข้าถึงสัญญาณหรือบริการของ GNSS ทั้งหมดได้ ปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมีความหลากหลายอย่างมาก โดยแบ่งตามชนิดของการรังวัด ได้แก่ การรังวัดด้วยซูโดเรนจ์ การรับสัญญาณความถี่แบบหนึ่งความถี่ สองความถี่ หรือมากกว่านั้น โดยทั่วไปแล้วจะให้ข้อมูลสถานะกลุ่มดาวเทียม กำหนดเวลาและข้อมูลการโคจร

### 2.1.2 หลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

สำหรับหลักการหาตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS ในหัวข้อนี้ ประกอบไปด้วยวิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning) และค่าเรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.1.2.1 การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์เป็นวิธีที่ใช้สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงและจะต้องทราบตำแหน่งสัมบูรณ์อย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อใช้หาตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดอื่นๆ ฉะนั้นจะต้องมีเครื่องรับอย่างน้อย 2 เครื่องในการทำงาน หลักการทำงานของการทำงานตำแหน่งแบบสัมพัทธ์คือการนำเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่หนึ่งไปวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า สถานีฐาน (Base station) หรือสถานีอ้างอิง (Reference station) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ซึ่งเรียกว่า สถานีจร (Roving station) หรือสถานีผู้ใช้ (User station) การหาค่าพิกัดของตำแหน่งจุดต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน ทั้งนี้ต้องรับสัญญาณจากดาวเทียม

อย่างน้อย 4 ดวง ด้วยการทำงานในลักษณะดังกล่าว ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic errors) หลายชนิด ดังเช่น ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจร ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ เป็นต้น โดยจะถูกหักล้างกันไปทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้นั้นดีขึ้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

### 2.1.2.2 เรขาคณิตของดาวเทียม (Satellite Geometry)

ค่าความถูกต้องของตำแหน่งที่ได้จะขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของดาวเทียม ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ด้วยค่า DOP (Dilution of Precision) แสดงไว้ดังสมการที่ (1)

$$\sigma = \sigma_0 * DOP \quad (1)$$

โดยที่  $\sigma$  แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งที่ต้องการทราบ

$\sigma_0$  แสดงถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะที่วัดได้

ทั้งนี้ค่า DOP ยังแบ่งออกได้เป็นหลายๆชนิด เช่น HDOP (Horizontal Dilution of Precision), PDOP (Positional Dilution of Precision), TDOP (Time Dilution of Precision), GDOP (Geometric Dilution of Precision) เป็นต้น ซึ่งค่า GDOP จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความถูกต้องโดยรวม หากสมมติว่าความถูกต้องของระยะที่วัดได้เท่ากัน จะเห็นได้ว่าถ้ายิ่งค่า DOP ยิ่งต่ำก็จะทำให้ได้ความถูกต้องของตำแหน่งที่ต้องการสูงขึ้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

### 2.1.3 วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากสมการค่าสังเกต (Observation Equation)

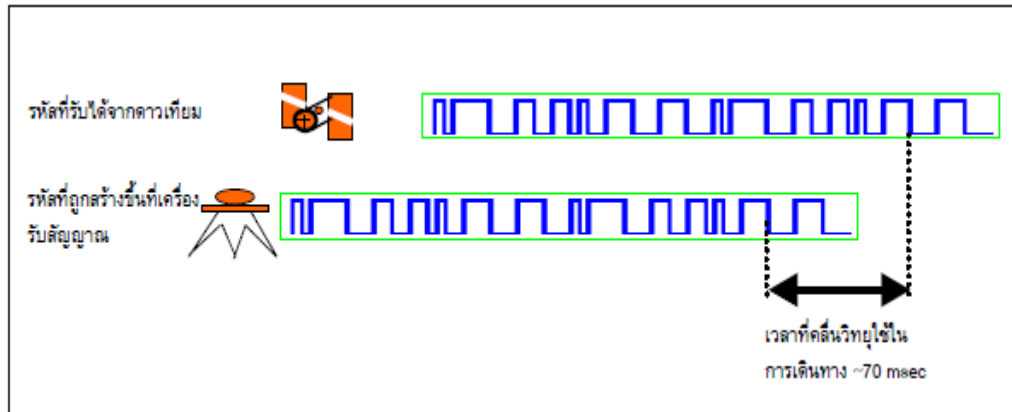
ค่ารังวัดที่ได้จากการรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งมี 2 ชนิด ได้แก่ ซูโดเรนจ์ (Pseudorange) และเฟสของคลื่นส่ง (Carrier Phase) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1.3.1 ซูโดเรนจ์ (Pseudorange)

คือ ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณ หากค่าได้จากการถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมเปรียบเทียบกับรหัสที่เครื่องรับสัญญาณสร้างขึ้น โดยจะทำการ



เลื่อนไปมาจนกระทั่งได้รหัสที่ตรงกัน ค่าเลื่อนระหว่างรหัสทั้งสองคือระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเทียบสัญญาณของรหัสเพื่อหาเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับที่มา: (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549)

เมื่อนำความเร็วของคลื่นวิทยุคูณด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ จะได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณซึ่งเรียกว่า ‘ซูโดเรนจ์’ นั่นเอง โดยปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของระยะเวลาดังกล่าว ได้แก่ ความเที่ยงตรงของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ ซึ่งมักมีความแตกต่างกัน รวมถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคลื่นสัญญาณดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมายังเครื่องรับสัญญาณ และปัจจัยประกอบอื่นๆ โดยมีสมการของซูโดเรนจ์ที่ได้จากรหัสและมีหน่วยเป็นระยะทาง ดังสมการที่ (2) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549; ซีทัด เจริญกาลัญญาตา, 2555)

$$R = \rho + \Delta_r + d_{ion} + d_{trop} + c (\Delta\delta_r - \Delta\delta_s) + dm_R + \varepsilon_R \quad (2)$$

- โดยที่
- $R$  คือ ซูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส (เมตร)
  - $\rho$  คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)
  - $\Delta_r$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)
  - $d_{ion}$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)
  - $d_{trop}$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)
  - $c$  คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

- $\Delta\delta_r$  คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)
- $\Delta\delta_s$  คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)
- $dm_R$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) (เมตร)
- $\epsilon_R$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวนในชุดเรดาร์ที่วัดได้ของรหัส (เมตร)

### 2.1.3.2 เฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase)

สำหรับงานที่ต้องการค่าความละเอียดถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตรจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการประมวลผล ซึ่งการวัดเฟสของคลื่นส่งในเครื่องรับเป็นการวัดเปรียบเทียบหรือค่าต่างระหว่างเฟสของคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา กับเฟสของคลื่นความถี่  $f_0$  ที่เครื่องรับสร้างขึ้นมา โดยคลื่นส่งที่ดาวเทียมส่งลงมา นั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของคลื่นจำนวนเต็มรอบ (Integer cycle part) กับส่วนที่ไม่เต็มรอบ (Fractional part) ในการรับสัญญาณนั้นเครื่องรับสัญญาณไม่สามารถจะนับจำนวนเต็มรอบของคลื่นส่งที่ส่งลงมา จำนวนเต็มรอบสามารถหาได้จากค่าการคำนวณในภายหลัง โดยจำนวนเต็มนี้มีชื่อเรียกว่าเลขปริศนา (Ambiguity) ซึ่งการคำนวณหาเลขปริศนา สามารถคำนวณได้จากกระบวนการหาเลขปริศนา (Ambiguity Resolution : AR) เป็นการคำนวณที่เกิดขึ้นภายหลังในขั้นตอนของการประมวลผลของข้อมูล โดยทั่วไปสามารถแบ่งกระบวนการประมาณค่าเลขปริศนาได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 คือการประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนจริง (Ambiguity – Float Solution) และแบบที่ 2 คือการประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนเต็มตามทฤษฎี (Ambiguity – Fixed Solution) ซึ่งวิธีนี้ได้รับการยอมรับว่าให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าวิธีประมาณค่าเลขปริศนาให้เป็นเลขจำนวนจริง และเป็นที่ยอมรับใช้กันในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ทั่วไป โดยสมการค่าสังเกตของการวัดเฟสของคลื่นส่งแสดงในสมการที่ (3) (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549; อัสวีนิ วงษ์สุวรรณ, 2557)

$$\phi = \rho + \Delta_r - d_{ion} + d_{trop} + c (\Delta\delta_r - \Delta\delta_s) + dm_\phi + \epsilon_\phi + \lambda N \quad (3)$$

โดยที่  $\phi$  คือ ชุดเรดาร์ที่ได้จากการวัดเฟสของคลื่นส่ง (เมตร)

$\rho$  คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ (เมตร)

$\Delta_r$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (เมตร)

$d_{ion}$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นส่ง (เมตร)

$d_{trop}$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)

$c$  คือ ความเร็วของคลื่นส่งหรือความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

$\Delta\delta_r$  คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

$\Delta\delta_s$  คือ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม (วินาที)

$dm_{\phi}$  คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเกิดคลื่นหลายวิถี (เมตร)

$\epsilon_{\phi}$  คือ ความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนในซูดเรนจ์ที่วัดได้ของคลื่นส่ง (เมตร)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)

$N$  คือ Ambiguity หรือ เลขปริศนาของคลื่นส่ง

จากสมการของซูดเรนจ์ (3) และสมการเฟสของคลื่นส่ง (4) จะเห็นว่าสมการทั้งสองมีความแตกต่างกันอยู่สองตัวแปร ได้แก่  $\lambda$  และ  $N$  ที่จะมีอยู่ในเฉพาะสมการเฟสของคลื่นส่งเท่านั้น และเครื่องหมายของค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน และไม่ว่าจะทำการรังวัดดาวเทียมด้วยซูดเรนจ์ หรือเฟสของคลื่นส่งก็ยังคงพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่หลายชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการขจัดหรือลดค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านั้นลง โดยวิธีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เทคนิคการรวมข้อมูลดาวเทียม (Data Combination) และเทคนิคการหาค่าต่างของข้อมูลดาวเทียม (Data Differencing technique) (เจนพิธิกร สุนทรรัตน์, 2560; ธีทัต เจริญกาลัญญา, 2555)

#### 2.1.4 เทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง (Double Differencing)

เป็นการนำข้อมูลมาหาค่าต่างสองครั้ง กล่าวคือเป็นการหาค่าต่างระหว่างจุดสองจุดและดาวเทียมสองดวง เช่น ระหว่างจุด A กับจุด B และดาวเทียม 1 กับ ดาวเทียม 2 ดังสมการที่ (4)

$$(\phi_A^1 - \phi_B^1) - (\phi_A^2 - \phi_B^2) = (p_A^1 - p_B^1) - (p_A^2 - p_B^2) + \lambda(N_A^1 - N_B^1) - \lambda(N_A^2 - N_B^2) \quad (4)$$

สามารถเขียนย่อๆได้ ดังสมการที่ 5

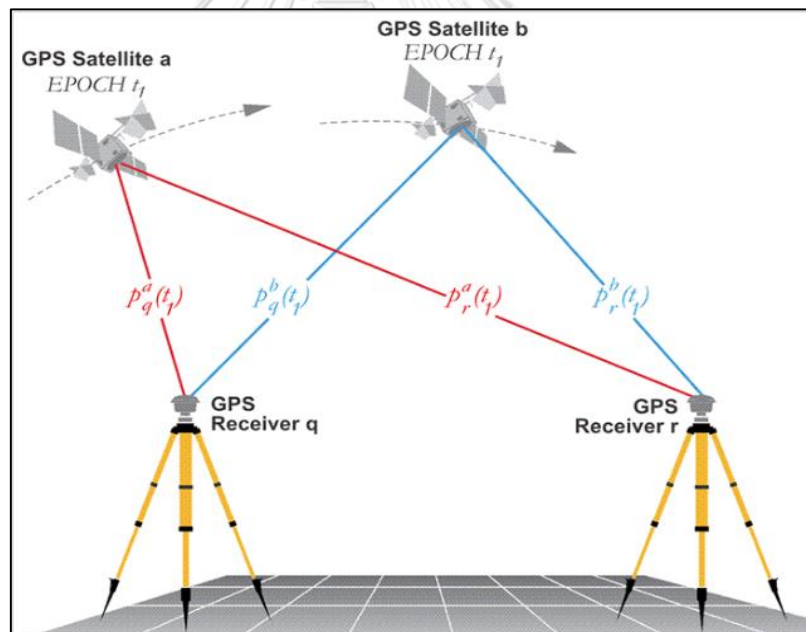
$$\phi_{AB}^{12} = \rho_{AB}^{12} + \lambda N_{AB}^{12} \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_{AB}^{12} = (\phi_A^1 - \phi_B^1) - (\phi_A^2 - \phi_B^2)$$

$$\rho_{AB}^{12} = (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^2 - \rho_B^2)$$

$$\lambda N_{AB}^{12} = \lambda(N_A^1 - N_B^1) - \lambda(N_A^2 - N_B^2)$$

การหาค่าต่างวิธีนี้ สามารถจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาดาวเทียม และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากนาฬิกาเครื่องรับ และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียม และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ ทั้งจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ และชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยประสิทธิภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นขึ้นอยู่กับระยะเส้นฐาน (เจนพิธีกร สุนทรรัตน์, 2560; เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2549) ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงหลักการเทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง

(ที่มา: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1727>)

### 2.1.5 วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

สำหรับหัวข้อเรื่องวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ประกอบไปด้วย 1.) การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบสถิต (Static) 2.) การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) 3.) องค์ประกอบของระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) 4.) แนวคิดวิธีการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ในรูปแบบต่างๆ และ 5.) หลักการของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 2.1.5.1 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบสถิต (Static)

วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางเอาไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัด หรือสถานีฐาน ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณดาวเทียมตามจุดที่ต้องการทราบค่าหรือสถานีจร วิธีการนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งสองเครื่องจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกัน และช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1 – 2 ชั่วโมง เพื่อให้มีข้อมูลของการวัดระยะที่เพียงพอที่จะใช้ในการประมวลผลหาจำนวนคลื่นเต็มรอบที่ไม่สามารถวัดได้ โดยวิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร (เฉลิมชนม์ สกฤษะพจน์, 2549)

#### 2.1.5.2 การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

เป็นการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบโครงข่ายสถานีฐาน (Network – Based RTK : NRTK) หรือเรียกสั้นๆ ว่า NRTK ข้อดีคือ ผลกระทบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่น้อยกว่าเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันทีแบบดั้งเดิม (Single-Based RTK) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่จะถูกขจัดในขั้นตอนของการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่ง วิธีนี้สามารถลดข้อจำกัดในเรื่องของความถูกต้องทางตำแหน่ง และความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดเมื่อมีระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การหาค่าเลขปริศนาที่เป็นจำนวนเต็มตามทฤษฎีนั้นมีประสิทธิภาพและทำให้กระบวนการประมวลค่าเลขปริศนาทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า วิธีการนี้ต้องประกอบด้วย สถานีฐานถาวร,

ศูนย์ควบคุมกลาง และสถานีผู้ใช้งาน โดยหลักการทำงานจะเริ่มจากสถานีฐานดาวเทียมที่มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบรังวัดคุณภาพสูงชนิดหลายความถี่ จำนวนอย่างน้อย 3 สถานี ที่ทำการติดตั้งอย่างถาวรในบริเวณที่โล่งแจ้งและไม่มีสิ่งบดบัง มีระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (Base Station) ได้ไกลประมาณ 70 กิโลเมตร โดยระยะห่างระหว่างสถานีฐาน และสถานีผู้ใช้งานสามารถขยับได้ และสามารถใช้อินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อกับระบบได้ตลอดเวลา เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมกลางได้ในทันที เมื่อศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้รับข้อมูลมาจากทุกสถานีฐานแล้วจะทำการประมวลผลของข้อมูลที่ได้รับ เพื่อคำนวณหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ เพื่อส่งให้สถานีผู้ใช้งานต่อไป เมื่อผู้ใช้งานต้องการทราบค่าพิกัดของตำแหน่ง สามารถทำได้โดยการนำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องเดียวไปวางที่ตำแหน่งที่ต้องการก็จะทราบค่าพิกัดนั้น (เจนพีธีกร สุนทรรัตน์, 2560)

### 2.1.5.3 องค์ประกอบของระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

1.) สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งถาวร ในตำแหน่งที่มีความมั่นคง โดยสถานีเหล่านี้จะทำการรับสัญญาณดาวเทียมตลอด 24 ชั่วโมง และทำการส่งสัญญาณดาวเทียมที่รับได้ไปยังศูนย์ควบคุมผ่านทางระบบสื่อสาร เช่น ทางโทรศัพท์ หรือระบบอินเทอร์เน็ต

2.) ศูนย์ควบคุม (Control Center) เป็นชุดของเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ส่งมาจากสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร หรือ CORS เพื่อคำนวณคำนวณปรับแก้ให้แก่ผู้ใช้งานที่ทำการรังวัดค่าพิกัดแบบจลน์ (Real Time Kinematic) กำหนดและตรวจสอบสิทธิการใช้งาน สำรองข้อมูลตลอดจนให้บริการดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียม สำหรับใช้คำนวณคำนวณค่าพิกัดในภายหลัง (Post Process)

3.) สถานีผู้ใช้งาน (Rover Station) หมายถึง หมุดหลักฐานแผนที่หรือตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด โดยการคำนวณอ้างอิงค่าพิกัดมาจากสถานีฐานอ้างอิง (Reference Base Station) หรือโดยการคำนวณอ้างอิงมาจากระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียม

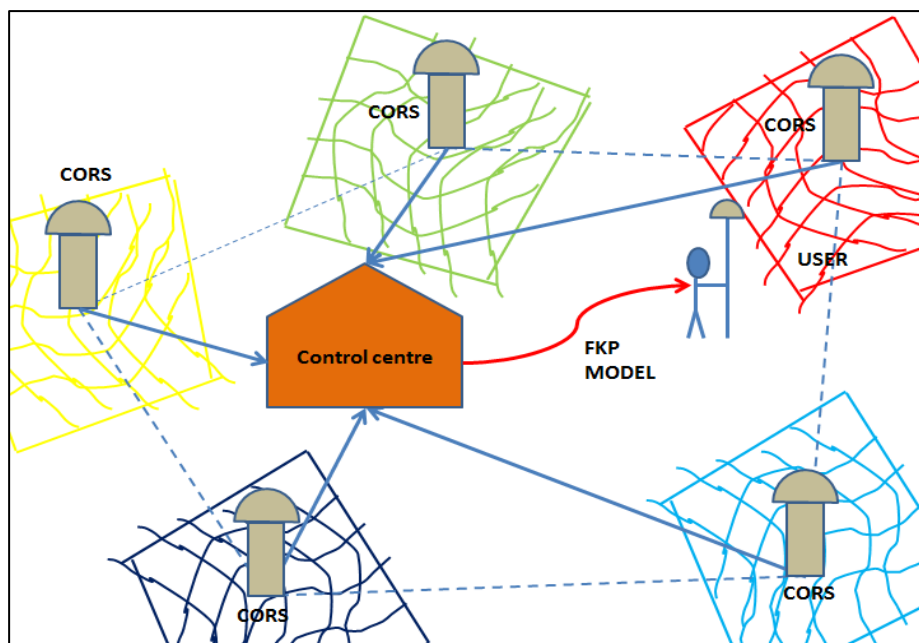
จีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยทำการส่งค่าแก้ค่าพิกัดผ่านทางระบบการสื่อสารต่างๆ

โดยระบบการสื่อสาร (Communication) คือ ระบบสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) กับศูนย์ควบคุม และระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานโดยการสื่อสารที่ปกติจะเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงกับศูนย์ควบคุมซึ่งมักจะใช้เป็นระบบอินเทอร์เน็ตพื้นฐาน เช่น ระบบ ADSL หรือ Leased Line เนื่องจากต้องการการรับส่งข้อมูลที่มีเสถียรภาพสูง และจากการที่สถานี CORS จะต้องทำงานตลอดเวลา ดังนั้น จึงต้องมีการสื่อสารสำรอง (Backup Link) เช่น อินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ไว้ใช้งาน เพื่อทดแทนในกรณีที่ระบบสื่อสารหลักเกิดขัดข้อง ในส่วนของการรับส่งข้อมูลระหว่างศูนย์ควบคุมกับผู้ใช้งานจะใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์มือถือ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้การสื่อสารที่มีเสถียรภาพที่สูงมาก (กรมที่ดิน, 2561)

#### 2.1.5.4 แนวคิดวิธีการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ในรูปแบบต่างๆ

ในปัจจุบันวิธีการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ การคำนวณและส่งค่าแก้ให้แก่สถานีผู้ใช้งานนั้นมีด้วยกัน 4 รูปแบบ ได้แก่

1.) วิธีการของระบบ Area Correction Parameter (Flächen Korrektur Parameter) หรือเรียกว่าระบบ FKP ซึ่งพัฒนาโดยบริษัท Geo++ ประเทศเยอรมนี มีหลักการทำงาน คือข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร หรือ สถานี CORS รับสัญญาณได้ จะถูกส่งไปยังศูนย์ควบคุม ซึ่งศูนย์ควบคุมจะทำการคำนวณสร้างแบบจำลองของค่าแก้ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองค่าแก้ของนาฬิกา ดาวเทียม แบบจำลองค่าแก้ของชั้นบรรยากาศ และแบบจำลองค่าแก้ของวงโคจรดาวเทียม โดยแบบจำลองที่ศูนย์ควบคุมคำนวณได้จะเรียกรวมกันว่า “State Space Model : SSM)” ทั้งนี้ศูนย์ควบคุมจะส่งข้อมูลแบบจำลองค่าแก้ SSM ให้ผู้ใช้งานในลักษณะที่เป็นค่าพารามิเตอร์ของระนาบแบบจำลองสำหรับแต่ละสถานี CORS โดยวิธีการนี้ไม่ต้องการตำแหน่งโดยประมาณของสถานีผู้ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 10 (Cina et al., 2015; กรมที่ดิน , 2561)

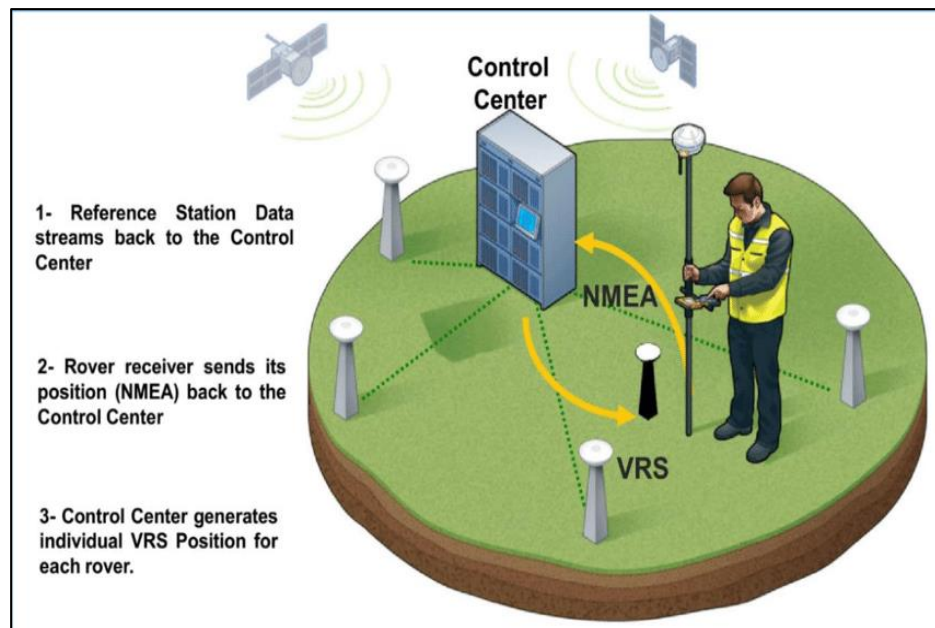


ภาพที่ 10 แสดงหลักการของระบบ FKP

(ที่มา: <https://www.intechopen.com/books/satellite-positioning-methods-models-and-applications/network-real-time-kinematic-nrtk-positioning-description-architectures-and-performances>)

2.) วิธีการของระบบ Virtual Reference Station (VRS) ระบบ VRS ถูกเสนอโดยบริษัท Trimble โดยมีหลักการทำงาน คือข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร หรือสถานี CORS รับสัญญาณได้ จะส่งไปยังศูนย์ควบคุมเพื่อทำการคำนวณคำนวณแก้ต่างๆ ในกรณีของระบบ VRS ผู้ใช้งานต้องส่งตำแหน่งโดยประมาณของตนเอง (ค่าพิกัดในรูปแบบ NMEA) ให้ศูนย์ควบคุม ซึ่งศูนย์ควบคุมจะทำการใช้ข้อมูลจากสถานี CORS ที่อยู่โดยรอบผู้ใช้งาน และค่าแก้ที่คำนวณได้ สร้างหรือสังเคราะห์ข้อมูลขึ้นมาแล้วส่งกลับไปให้ผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่สร้างขึ้นมานี้ เครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้งานจะมองเห็นเสมือนว่าเป็นข้อมูลของสถานีฐานหรือสถานีอ้างอิงในงานรังวัด RTK แบบเดิม ดังนั้น จึงเรียกระบบการทำงานของระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ แบบนี้ว่าเป็นสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station) ตามข้อมูลที่ศูนย์ควบคุมส่งให้ผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 11 (Elhattab, 2016; กรมที่ดิน, 2561)



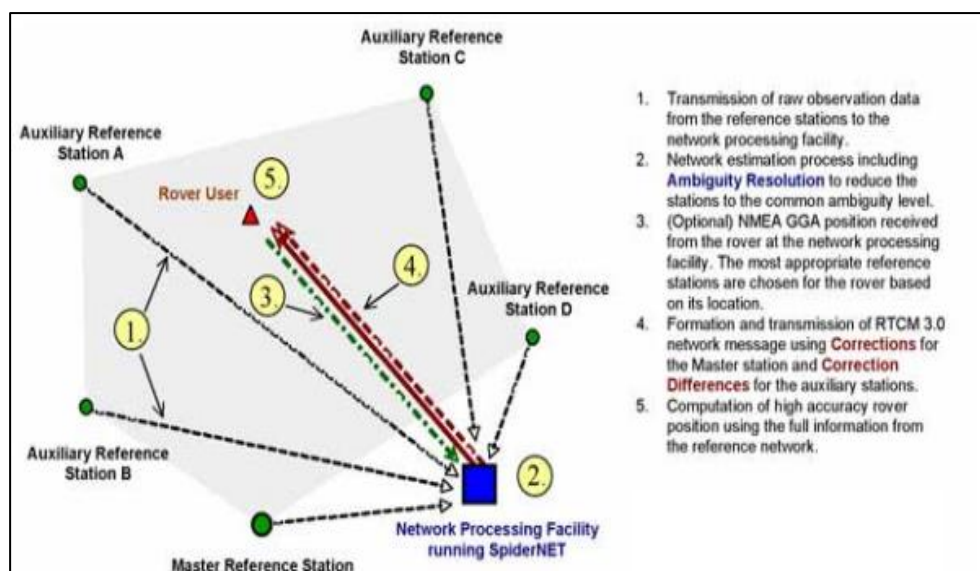


ภาพที่ 11 แสดงหลักการของระบบ VRS

(ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Virtual-Reference-Stationconcept\\_fig3\\_316613530](https://www.researchgate.net/figure/Virtual-Reference-Stationconcept_fig3_316613530))

3.) วิธีการของระบบ Master-Auxiliary Concept (MAX) วิธีการนี้คิดค้นและพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Leica และบริษัท Geo++ โดยการทำงานระบบ MAX นั้นต้องประกอบไปด้วยเครือข่ายของสถานีฐานอ้างอิงอย่างน้อย 3 สถานีหรือมากกว่าขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่าย ในการส่งค่าแก้ของระบบ MAX จะถูกส่งในรูปแบบ Message คือ Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) เวอร์ชัน 3 ให้กับสถานีผู้ใช้งาน ศูนย์ควบคุมจะเลือกสถานีฐานอ้างอิง ที่อยู่ใกล้ผู้ใช้งานมากที่สุด โดยจะกำหนดให้สถานีฐานอ้างอิงนี้เป็นสถานีหลัก (Master Station) พร้อมทั้งเลือกสถานีฐานอ้างอิงที่อยู่ใกล้เคียงอีกอย่างน้อย 2 สถานีให้เป็น สถานี Auxiliary แล้วทำการคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนที่สถานีผู้ใช้งาน จากนั้นทำการปรับแก้ค่าสังเกตที่สถานีผู้ใช้งานเพื่อหาตำแหน่ง จากนั้นทำการส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมและค่าปรับแก้ของสถานี Master พร้อมกับค่าต่างของค่าปรับแก้ระหว่างสถานี Master และสถานี Auxiliary ไปให้ผู้ใช้งาน วิธีการนี้ใช้ข้อมูลดาวเทียมแบบเต็ม (Full Raw Observation) ทำให้การหาตำแหน่งวิธีนี้ค่อนข้างมีความสามารถในการติดตาม และการประมวลผลซ้ำ จะมีการ Update ค่าปรับแก้ตามการเคลื่อนที่ของสถานีผู้ใช้งาน ทำให้ค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลวิธีนี้มีความคงที่และน่าเชื่อถือที่ดี

โดยหลักการของระบบ Master-Auxiliary Concept (MAX) (Leica Geosystems, 2005; กรมที่ดิน, 2561; สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา, 2560) แสดงในภาพที่ 12

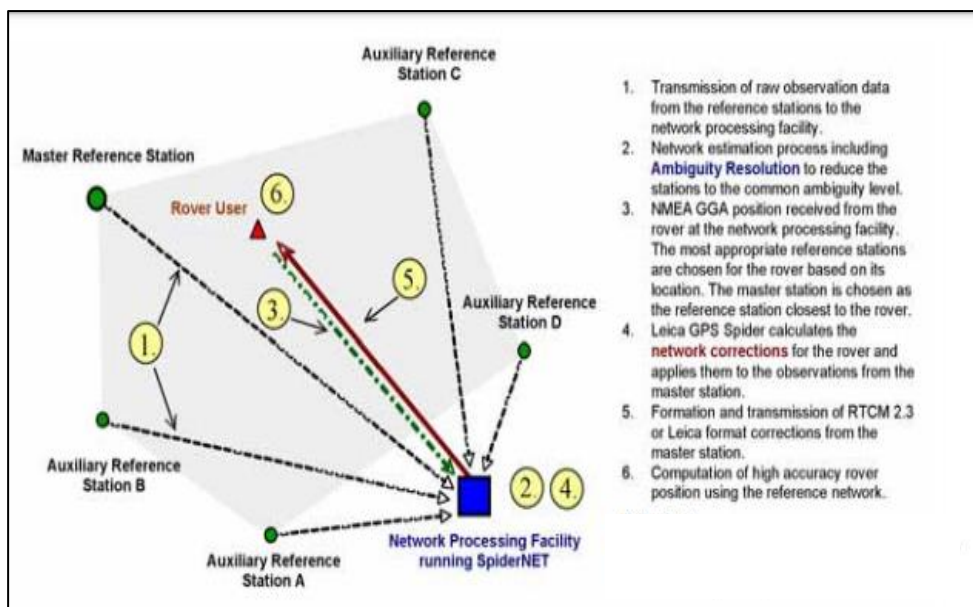


ภาพที่ 12 แสดงหลักการของระบบ Master-Auxiliary Concept (MAX)

(ที่มา: <https://leica-geosystems.com/>)

4.) วิธีการของระบบ Individualized Master-Auxiliary Corrections (i-MAX) สำหรับวิธีการนี้คิดค้นและพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Leica โดยพัฒนาพร้อมกับวิธี MAX โดยระบบนี้พัฒนามาเพื่อใช้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Receiver) รุ่นเก่าซึ่งมีแนวคิดคล้ายกันกับระบบ Virtual Reference Station (VRS) ซึ่งต้องการการติดต่อแบบสองทางระหว่างสถานีผู้ใช้งานและสถานีฐานอ้างอิง โดยสถานีผู้ใช้งานจะส่งข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม และตำแหน่งโดยประมาณของสถานีผู้ใช้งานไปยังศูนย์ควบคุม ศูนย์ควบคุมจะเลือกสถานีฐานอ้างอิง ที่อยู่ใกล้ผู้ใช้งานมากที่สุด โดยจะกำหนดให้สถานีฐานอ้างอิงนี้เป็นสถานีหลัก (Master Station) จากนั้นศูนย์ควบคุมจะทำการคำนวณค่าแก้ต่างๆ เพื่อส่งให้สถานีผู้ใช้งาน โดยการคำนวณค่าแก้ไม่ได้มีการใช้ข้อมูลดาวเทียมสูงสุด และค่าแก้ที่สร้างสำหรับสถานีฐานอ้างอิงจริงไม่ใช่สถานีฐานอ้างอิงเสมือน ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างจากระบบ VRS นั่นเอง สุดท้ายการประมวลผลจะเป็นการประมวลผลเส้นฐานระหว่างสถานีหลัก กับสถานีผู้ใช้งาน วิธีการนี้ค่อนข้างจะ Dynamic และมีการ Update เนื่องจากมีความสามารถในการติดตามและการประมวลผลซ้ำ ถ้าตำแหน่งของสถานีผู้ใช้งานเปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสถานีฐานอ้างอิงจริงไม่ใช่สถานีฐานอ้างอิงเสมือน ซึ่งทำให้ผลของ

ค่าพิกัดนั้นมีความคงที่และน่าเชื่อถือ (Leica Geosystems, 2005; สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา, 2560) โดยหลักการของระบบ i-MAX นี้ แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงหลักการของระบบ Individualized MAX (i-MAX)

(ที่มา: <https://leica-geosystems.com/>)

#### 2.1.5.5 หลักการของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS)

ในปัจจุบัน กรมที่ดินใช้การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ที่เป็นระบบแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ในการดำเนินงานรังวัดแปลงที่ดิน ซึ่งระบบ VRS นี้มีหลักการทำงาน ดังนี้

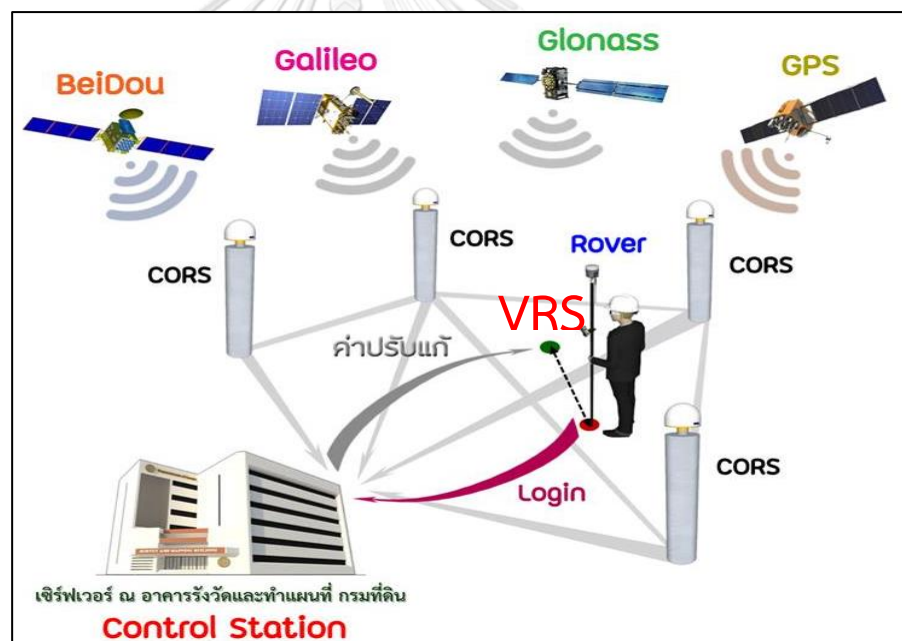
1.) ซอฟต์แวร์ระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ จะทำการคำนวณค่าต่างครั้งที่สอง ด้วยวิธี Ionospheric-Free Linear Combination สำหรับทุกๆคู่ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร และจะคำนวณหาค่าเลขปริศนาและค่าคลาดเคลื่อนรวมของแต่ละสถานีฐานอ้างอิงฯ ด้วย

2.) ค่าคลาดเคลื่อนรวมของทุกสถานีฐานอ้างอิงฯ จะถูกนำไปคำนวณและ Interpolate สำหรับตำแหน่งโดยประมาณของสถานีผู้ใช้งาน (ซึ่งทราบได้โดยการหาจากค่าซูโดเรนจ์ ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม) ซึ่งตำแหน่งโดยประมาณนี้จะถูกส่งจากสถานี

ผู้ใช้งานไปยังซอฟต์แวร์ระบบโครงข่ายฯ ในรูปแบบของ The National Marine Electronics Association (NMEA) Message

3.) สำหรับค่าคลาดเคลื่อนรวมที่ถูก Interpolate แล้ว จะถูกส่งในรูปแบบ Message 18/19 หรือ 20/21 ของ RTCM เวอร์ชัน 3.X โดยเป็นรูปแบบของข้อมูลการรังวัดดาวเทียมที่ทราบขนาดของค่าคลาดเคลื่อนรวม ณ ตำแหน่งใกล้ๆ กับสถานีผู้ใช้งาน จากนั้นจะส่งไปยังสถานีผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงเสมือนว่ามีสถานีอ้างอิง (Virtual Reference Station) มาอยู่ใกล้ๆ กับสถานีผู้ใช้งานนั่นเอง

4.) ซอฟต์แวร์ที่สถานีผู้ใช้งาน จะทำการประมวลผลเส้นฐาน ซึ่งมีขนาดสั้นระหว่างสถานีอ้างอิงเสมือน และข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจริงของสถานีผู้ใช้งาน เพื่อทำการหาค่าพิกัดตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน



ภาพที่ 14 แสดงถึงลักษณะการทำงานของระบบ Virtual Reference Station (VRS)  
ที่มา: (กรมที่ดิน, 2561)

ข้อดีของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS คือ ใช้เวลาการรังวัดค่อนข้างเร็ว และได้ค่าพิกัดในทันที สถานีผู้ใช้งานไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือซอฟต์แวร์เพิ่มเติม เนื่องจากระบบ VRS จะใช้ซอฟต์แวร์ของสถานีผู้ใช้งานในกระบวนการประมวลผลเส้นฐาน เพื่อหาค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน ส่วนข้อจำกัดของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS คือ

ประสิทธิภาพของการรังวัดจะลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างสถานีฐานเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ และการทำงานของเทคนิค VRS ต้องการการสื่อสารแบบสองทาง (Two Way Communication) และต้องมีสถานีฐานอ้างอิงๆ อย่างน้อย 3 สถานี

สำหรับหลักการทำงานของระบบ VRS คือการสร้างสถานีอ้างอิงเสมือน จากข้อมูลดาวเทียมของทุกสถานีฐานจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบของข้อมูลดาวเทียมที่ลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ แล้ว (ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โทรโพสเฟียร์ และค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม) ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ใกล้กับสถานีผู้ใช้งาน จากนั้นสถานีผู้ใช้งานจะทำการประมวลผลพื้นฐานสั้นๆ ระหว่างสถานีอ้างอิงเสมือน กับข้อมูลดาวเทียมของสถานีผู้ใช้งาน เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง ณ สถานีผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 6 (เจนพิธีกร สุนทรรัตน์, 2560; ธีทัต เจริญกาลัญญา, 2555)

$$\phi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(t) + N + f^s \Delta\delta_r^s(t) \quad (6)$$

โดยที่  $\phi_r^s(t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่ง ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของคลื่นส่ง (เมตร)

$\rho_r^s(t)$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$N$  คือ Ambiguity หรือ เลขปริศนาของคลื่นส่ง

$f^s$  คือ  $\frac{c}{\lambda}$  มีหน่วยเป็นเฮิร์ต และเมื่อ  $c$  คือความเร็วแสง มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที

$\Delta\delta_r^s(t)$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ (เมตร)

หากกำหนดให้ตำแหน่งของ Reference Station A ของเครื่องรับ  $r$  เท่ากับ เวกเตอร์  $X_A$  และตำแหน่งของสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) เท่ากับ เวกเตอร์  $X_V$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (6) จะได้สมการ

$$\phi_r^s(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_A, t) + N + f^s \Delta\delta_r^s(t) \quad (7)$$

$$\phi_r^s(X_V, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_V, t) + N + f^s \Delta\delta_r^s(t) \quad (8)$$

โดยที่  $\phi_r^s(X_A, t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของ Reference Station A  
ณ เวลาใดๆ (เมตร)

$\phi_r^s(X_V, t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ณ เวลาใดๆ

$\rho_r^s(X_A, t)$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่ง Reference Station A (เมตร)

$\rho_r^s(X_V, t)$  คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ ณ ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) (เมตร)

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (7) และสมการที่ (8) มาลบกันจะได้สมการดังนี้

$$\phi_r^s(X_V, t) - \phi_r^s(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_V, t) - \frac{1}{\lambda} \rho_r^s(X_A, t) \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) จะเห็นว่าเทอมของค่าเลขปริศนา (N) และค่าคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ  $\Delta\delta_r^s(t)$  จะหายไป จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (10)

$$\phi_r^s(X_V, t) = \phi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} [\rho_r^s(X_V, t) - \rho_r^s(X_A, t)] \quad (10)$$

จากสมการข้างต้น  $\phi_r^s(X_V, t)$  คือ ข้อมูลการวัดเฟสของคลื่นส่งของสถานี VRS ซึ่งข้อมูลนี้ไม่จำเป็นต้องทำการรังวัดจริง เนื่องจากสมการทางด้านขวามือสามารถหาค่าได้ แต่เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมที่ได้จากสถานีฐานยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และค่าความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียมดังที่แสดงในสมการที่ (11)

$$\Delta_r^s(X_A, t) = \Delta^{orbit}(X_A, t) + \Delta^{iono}(X_A, t) + \Delta^{tro}(X_A, t) \quad (11)$$

โดยที่  $\Delta_r^s(X_A, t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ที่ Reference Station A (เมตร)

$\Delta^{orbit}(X_A, t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม  
ที่ Reference Station A (เมตร)

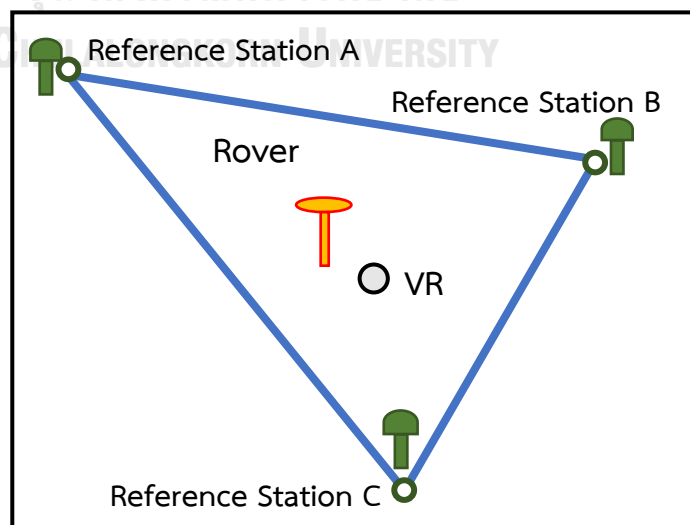
$\Delta^{iono}(X_A, t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ  
ไอโอโนสเฟียร์ที่ Reference Station A (เมตร)

$\Delta^{tro}(X_A, t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ  
โทรโพสเฟียร์ที่ Reference Station A (เมตร)

ซึ่งในความเป็นจริงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ด้วย ดังนั้น  
จากสมการที่ (7) เมื่อเพิ่มสมการของค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ เข้าไป จะได้สมการใหม่  
ดังนี้

$$\Phi_r^S(X_A, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^S(X_A, t) + N + f^S \Delta\delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_A, t) \quad (12)$$

จากสมการข้างต้น เป็นสมการของสถานีอ้างอิง A ในทำนองเดียวกัน หากมีสถานี  
อ้างอิงอื่นๆเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างในภาพที่ 15 ซึ่งมีสถานีอ้างอิง B และสถานีอ้างอิง C  
ค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ก็จะเป็น  $\Delta_r^S(X_B, t)$  และ  $\Delta_r^S(X_C, t)$  ตามลำดับ  
ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ นี้ จะมีในทุกๆ สถานีอ้างอิง และทุกๆ Epoch ที่ทำการ  
รังวัด



ภาพที่ 15 แสดงถึงแนวคิดการทำงานของระบบ VRS

ดังนั้น สำหรับสถานีอ้างอิง B และสถานีอ้างอิง C จะมีสมการ ดังนี้

$$\phi_r^S(X_B, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^S(X_B, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_B, t) \quad (13)$$

$$\phi_r^S(X_C, t) = \frac{1}{\lambda} \rho_r^S(X_C, t) + N + f^S \Delta \delta_r^S(t) + \Delta_r^S(X_C, t) \quad (14)$$

ดังนั้น ในทำนองเดียวกัน สมการของสถานีอ้างอิงเมื่อน (VRS) ในสมการที่ (10) เมื่อเพิ่มส่วน ของค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$\phi_r^S(X_V, t) = \phi_r^S(X_A, t) + \frac{1}{\lambda} [\rho_r^S(X_V, t) - \rho_r^S(X_A, t)] + \Delta_r^S(X_V, t) \quad (15)$$

จากสมการที่ (12) เมื่อนำมาลบกับสมการที่ (14) เทอมของค่าความคลาดเคลื่อน  $\Delta_r^S(X_A, t)$ ,  $\Delta_r^S(X_B, t)$  และ  $\Delta_r^S(X_C, t)$  สามารถหาค่าได้ เนื่องจากทราบตำแหน่งของสถานีอ้างอิงทุกสถานี และเทอมของ N และ  $f^S \Delta \delta_r^S(t)$  สามารถหาค่าได้ด้วยกระบวนการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity Resolution: AR) และการใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สองของทุกคู่สถานีอ้างอิง

ดังนั้น เมื่อทราบค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ของสถานีอ้างอิงแล้ว จะสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ของสถานีอ้างอิงเมื่อน (VRS) ได้จากการ Interpolate ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงวิธีการ Weighted Mean จากข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ ของทุกสถานี ตัวอย่างเช่น สมการดังต่อไปนี้

$$\Delta_r^S(X_i, t) = aX_i + bY_i + cZ_i \quad (16)$$

โดยที่  $X_i, Y_i, Z_i$  คือ ค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีอ้างอิง i ทั้งสามทิศทางในระบบพิกัด Earth Center Earth Fix หรือระบบพิกัดระนาบที่ประกอบด้วยค่าความสูง

$a, b, c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสถานีอ้างอิง A, B, C โดยการแก้สมการเชิงเส้น และถ้ามีสถานีอ้างอิงมากกว่า 3 สถานี สามารถคำนวณหาได้จากเทคนิค Least Square Adjustment



### 2.1.6 ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้มีการอ้างอิงหลักการปฏิบัติงานการรังวัดที่ดินของกรมที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ตามระเบียบระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558 (กรมที่ดิน, 2558) ซึ่งมีส่วนที่เกี่ยวข้อง ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### หมวดที่ 2 การรับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network)

1.) ให้ทำการรังวัดโดยการรับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมดดาวเทียม RTK Network เพื่อใช้ในการโยกยึดหลักเขตที่ดิน หรือใช้เป็นหมุดออก และหมุดเข้าบรรจบเส้นโครงงานหมุดหลักฐานแผนที่ เพื่อเก็บรายละเอียดแปลงที่ดิน และไม่ให้นำทำการรังวัดโดยการรับสัญญาณดาวเทียมที่หลักเขตที่ดิน ยกเว้นกรณีตรวจสอบค่าพิกัดฉากของหลักเขตที่ดิน

2.) ก่อนทำการรังวัดให้ตรวจสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมโดยรับสัญญาณทั้งหมดดาวเทียม Static ซึ่งทราบค่าพิกัดฉาก โดยค่าความแตกต่างต้องอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง  $\pm 4$  เซนติเมตร

การรับสัญญาณดาวเทียมโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ณ สถานีจร ให้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมประกอบขาคล้อง ตั้งให้ตรงศูนย์กลางหมุดดาวเทียม RTK Network และให้ตรวจสอบการรับสัญญาณดาวเทียมซ้ำ 2 ครั้ง ก่อนการรับสัญญาณดาวเทียมครั้งที่ 2 ให้ปิดเครื่อง แล้วเปิดเครื่องใหม่ เพื่อให้เครื่องรับสัญญาณมีสภาพเริ่มต้นการทำงานใหม่ โดยค่าความแตกต่าง ของค่าพิกัดฉากต้องอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง  $\pm 4$  เซนติเมตร และให้ใช้ค่าเฉลี่ย

#### ภาคผนวก ก. วิธีปฏิบัติงานรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

การปฏิบัติงานรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ให้ดำเนินการดังนี้

1.) ให้ใช้วิธีการรังวัดรับสัญญาณดาวเทียม ในพื้นที่ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบสถานีโครงข่าย

2.) ให้ใช้ค่า PDOP (Position Dilution of Precision) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการบ่งชี้ความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดที่ทำการรับสัญญาณดาวเทียมที่คำนวณได้ ณ เวลาใดๆ โดยกำหนดค่า PDOP ขณะทำการรังวัดไม่เกิน 5

3.) ให้ใช้ค่า RMS (Root Mean Square) คือค่ารากที่สองของความแปรปรวนของข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม กำหนดให้ไม่เกิน 3 เซนติเมตร

4.) ให้ใช้ผลการรังวัดเป็นแบบ Fixed โดยหมายถึง สถานะของการรับสัญญาณดาวเทียม ซึ่งจำนวนลูกคลื่นได้ถูกคำนวณแล้ว และได้ผลลัพธ์เป็นจำนวนลูกคลื่นเต็มลูกคลื่น ขณะทำการรับสัญญาณดาวเทียม ณ เวลาใดๆ

5.) ทำการรังวัดบันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที และข้อมูลการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมไม่น้อยกว่า 180 ข้อมูล

ภาคผนวก ข. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งจากการรังวัดเฉพาะราย โดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งสำหรับการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายฯ

ลำดับที่	รายการ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง
1	การตรวจสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม โดยรับสัญญาณทั้งหมด ดาวเทียม Static ซึ่งทราบค่าพิกัดฉาก	$\pm 4$ เซนติเมตร
2	การตรวจสอบการรับสัญญาณดาวเทียม โดยให้ทำการรับสัญญาณดาวเทียม ซ้ำ 2 ครั้ง	$\pm 4$ เซนติเมตร
3	การตรวจสอบค่าพิกัดฉากเดิม และค่าพิกัดฉากใหม่ของหลักเขตที่ดิน	$\pm [4 \text{ เซนติเมตร} + (D * \frac{100}{5,000})]$ D = ผลรวมของระยะระหว่างหมุดหลักฐานแผนที่ กับระยะโยงยึดหน่วยเป็นเมตร

### 2.1.7 รูปสามเหลี่ยม (Triangles)

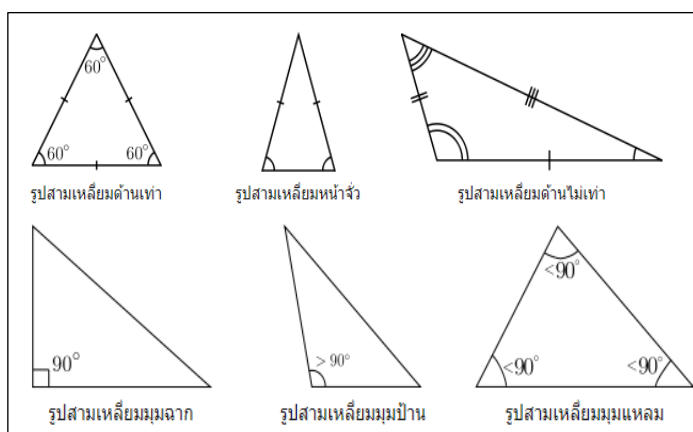
รูปสามเหลี่ยม คือ หนึ่งในรูปร่างพื้นฐานในเรขาคณิต เป็นรูป 2 มิติ ที่ประกอบด้วยจุดยอด 3 จุดและด้าน 3 ด้านที่เป็นส่วนของเส้นตรง โดยสามารถแบ่งประเภทของรูปสามเหลี่ยมออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

#### 1.) พิจารณาจากความยาวของด้าน จำแนกได้ดังนี้

- รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ( Equilateral Triangle ) คือรูปสามเหลี่ยมที่มีด้านทั้งสามยาวเท่ากัน
- รูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ( Isosceles Triangle ) คือรูปสามเหลี่ยมที่มีด้าน 2 ด้านยาวเท่ากัน
- รูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า ( Scalene Triangle ) คือรูปสามเหลี่ยมที่ไม่มีด้าน 2 ด้านใดยาวเท่ากัน

#### 2.) พิจารณาจากขนาดของมุม จำแนกได้ดังนี้

- รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม ( Acute Triangle ) คือรูปสามเหลี่ยมที่มีมุมทั้งสามมีขนาดเล็กกว่ามุมฉาก
- รูปสามเหลี่ยมมุมฉาก ( Right Triangle ) คือ รูปสามเหลี่ยมที่มีมุมมุมหนึ่งมีขนาดเท่ากับมุมฉาก
- รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน ( Obtuse Triangle ) คือรูปสามเหลี่ยมที่มีมุมมุมหนึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามุมฉาก



ภาพที่ 16 ประเภทของรูปสามเหลี่ยมแบบต่างๆ

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

### 2.2.1 การศึกษาเกี่ยวกับการรังวัดที่ดินด้วยเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบต่างๆ

เจนพิธีกร สุนทรรัตน์ (2560) ได้ทำการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในทันที (Network-Based GNSS RTK) ของกรมที่ดินเพื่อใช้สำหรับงานรังวัดที่ดิน โดยทำการกำหนดวิธีการสำรวจรังวัดและกำหนดพื้นที่ที่ทำการศึกษาออกเป็น 2 พื้นที่ ได้แก่

1.) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งตั้งอยู่ตรงบริเวณประมาณค่อนกึ่งกลาง Loop ของสถานีอ้างอิง โดยสภาพพื้นที่มีความหลายหลายเหมาะแก่การศึกษา กำหนดวิธีการศึกษาจำนวน 3 เทคนิค คือใช้เทคนิคการรังวัดแบบ Static เป็นค่าอ้างอิง เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคนิค Single Based RTK Positioning และวิธี Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) โดยกำหนดพื้นที่ศึกษาเป็น 3 ลักษณะ คือพื้นที่โล่งแจ้ง, พื้นที่มีสิ่งปกคลุมปานกลาง และพื้นที่มีสิ่งปกคลุมหนาแน่น กรณีละ 30 จุด โดยกำหนดวิธีการรังวัดด้วยเทคนิค Static ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที นาน 30 นาที ใช้จุดควบคุมค่าพิกัดอ้างอิงจากสถานีอาคารรังวัดและทำแผนที่ (PKKT) ถ่ายค่าพิกัดมายังสถานี CUSV ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กำหนดวิธีการรังวัดด้วยวิธี เทคนิค Single Based RTK Positioning ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที จำนวนข้อมูลไม่น้อยกว่า 180 ข้อมูล และทำการ Fix Ambiguity โดยใช้สถานีฐาน (Based Station) จากอาคารรังวัดและทำแผนที่ (PKKT) และกำหนดวิธีการรังวัดด้วยวิธี Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที จำนวนข้อมูลไม่น้อยกว่า 180 ข้อมูลใช้สถานีอ้างอิงของกรมที่ดิน 3 สถานี ได้แก่ สถานีอาคารรังวัดและทำแผนที่ (PKKT) สถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบบ (KTBN) และสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี (BPLE) โดยระยะห่างระหว่างสถานีอ้างอิงไม่เกิน 70 กิโลเมตร

และ 2.) คือพื้นที่บริเวณอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นพื้นที่โล่ง และมี Loop ของสถานีอ้างอิงแตกต่างจากพื้นที่บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค Static เป็นค่าอ้างอิง เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคนิค Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) โดยทำการรังวัดโดยตรงที่หัวหมุดหลักเขตที่ดิน จำนวน 34 หมุด

โดยกำหนดวิธีการรังวัดด้วยเทคนิค Static ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที นาน 30 นาที ใช้จุดควบคุมค่าพิกัดอ้างอิงจากสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดนครปฐม สาขา บางเลน (BLAN) และกำหนดวิธีการรังวัดด้วยวิธี Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) ทำการบันทึกข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที จำนวนข้อมูลไม่น้อยกว่า 180 ข้อมูลใช้สถานีอ้างอิงของกรมที่ดิน 3 สถานี ได้แก่ สถานีอาคารรังวัดและทำแผนที่ (PKKT) สถานีสำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYYA) และสถานีสำนักงานที่ดินจังหวัด นครปฐม สาขาบางเลน (BLAN) โดยระยะห่างระหว่างสถานีอ้างอิงไม่เกิน 70 กิโลเมตร

จากการศึกษาพบว่า ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หากสามารถทำการ Fix Ambiguity ได้ เทคนิคการรังวัดแบบ Single Based RTK Positioning และเทคนิคการรังวัดแบบ Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) จะให้ค่าความถูกต้องทางราบใกล้เคียงกันที่ ระดับไม่เกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งทั้งสองเทคนิคทำงานได้ดีในสภาพพื้นที่โล่งแจ้งและบริเวณที่ต้นไม้ไม่หนาแน่นมาก ส่วนพื้นที่ที่เป็นอาคารสูงจะเป็นพื้นที่อับสัญญาณและเกิดการสะท้อนจาก Multipath และสำหรับพื้นที่บริเวณอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี หากสามารถทำการ Fix Ambiguity ได้ เทคนิค Network RTK ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) จะให้ค่า ความถูกต้องทางราบที่ระดับ 3 เซนติเมตร แต่ในพื้นที่ที่ทำการศึกษาเป็นการรังวัดจากสถานีที่จริง โดยรังวัดโดยตรงที่หัวมุมหลักเขตที่ดิน จึงอาจมีอุปสรรคจากสิ่งปลูกสร้างหรือสภาพภูมิประเทศ ได้ (เจนพิธิกร สุนทรรัตน์, 2560)

Erenoglu (2017) ได้ทำการศึกษาและประเมินผลวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม (GPS/GNSS) ในการรังวัดที่ดินในพื้นที่ประเทศตุรกี เนื่องจากวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมนั้นให้ค่า ความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ดีกว่า ใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่า และมีความคุ้มค่าในเชิง เศรษฐศาสตร์กว่าวิธีการรังวัดแบบดั้งเดิม โดยพบว่าวิธีการรังวัดที่ดินด้วยระบบดาวเทียมนั้น ให้ค่า ความถูกต้องทางตำแหน่งสูง ในเวลาที่รวดเร็ว และเข้ากันได้กับมาตรฐานวิธีการรังวัดและทำแผนที่ ของประเทศตุรกีเป็นอย่างดี โดยวิธีการดำเนินการศึกษาของผู้วิจัย ได้กำหนดให้มีการ เปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งการรังวัดด้วยดาวเทียม กับวิธีการรังวัดแบบดั้งเดิมโดยใช้ กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (Total Station) โดยผู้วิจัยได้กำหนดพื้นที่ที่ทำการศึกษาคือ บริเวณเมือง Canakkale ในประเทศตุรกี ซึ่งพื้นที่ที่เลือกศึกษาอยู่ในบริเวณชุมชน ผู้วิจัยได้กำหนด วิธีการรังวัดเพื่อการศึกษาทั้งหมด 4 วิธี คือ

1.) วิธีการรังวัดแบบ Static เพื่อใช้ในการสร้างจุดอ้างอิง โดยกำหนดจุดทั้งหมด 4 จุด (P1,P2,P3,P4) กระจายโดยรอบและครอบคลุมพื้นที่ศึกษา มีความยาวเส้นฐานระหว่าง 108 ถึง 295 เมตร ทำการประมวลผลข้อมูลร่วมกับสถานี ISTA ซึ่งเป็นสถานี IGS ที่มีการรังวัดต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง โดยกำหนด Elevation Angle  $5^{\circ}$  ทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 30 วินาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ของวันที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2013

2.) วิธีการรังวัดด้วยเทคนิค Single Base RTK Positioning โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงเป็นจุด P1, P2, P3, P4 และให้สถานีผู้ใช้งานทำการรังวัดบริเวณมุมขอบของแปลงที่ดินจำนวน 32 มุม ขอบแปลง โดยรังวัดข้อมูลจำนวนชุดละ 10 Epochs

3.) วิธีการรังวัดด้วยเทคนิค Continuously Operating Reference Station – RTK (CORs-RTK) ด้วยระบบ Virtual Reference Station (VRS) โดยกำหนดให้สถานีผู้ใช้งานทำการรังวัด บริเวณมุมขอบของแปลงที่ดินจำนวน 32 มุมขอบแปลง (จุดเดียวกับการรังวัดด้วยเทคนิค Single Base RTK Positioning) โดยรังวัดข้อมูลจำนวนชุดละ 10 Epochs แล้วทำการเฉลี่ยค่า ส่งข้อมูลค่าแก่ระหว่างสถานีฐานและสถานีผู้ใช้งานด้วยเครือข่ายโทรศัพท์ GSM และ

และ 4.) วิธีการรังวัดแบบดั้งเดิมโดยใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (Total Station) โดยกำหนดจุด P1,P2,P3,P4 เป็นจุดอ้างอิง จากนั้นทำการรังวัดบริเวณมุมขอบของแปลงที่ดิน จำนวน 32 มุมขอบแปลง (จุดเดียวกับการรังวัดด้วยเทคนิค Single Base RTK Positioning และ CORs-RTK) โดยใช้กล้อง Total Station ที่มีความละเอียดทางมุมที่  $1''$  ความละเอียดในการวัด ระยะทางที่  $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ .

ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการรังวัดทั้ง 4 วิธีสามารถให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) และค่าความแม่นยำ (Precision) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินที่สอดคล้องกันของค่าพิกัดในทางราบและทางตั้ง ซึ่งผลจากการรังวัดด้วยเทคนิค Single Base RTK Positioning ให้ค่าความถูกต้องทางราบอยู่ที่ระดับ 2 ถึง 4 มิลลิเมตร และค่าความถูกต้องตั้งทางตั้งที่ระดับ 7 ถึง 10 มิลลิเมตร การรังวัดด้วยเทคนิค CORs-RTK ให้ค่าความถูกต้องทางราบอยู่ที่ระดับ 7 ถึง 9 มิลลิเมตร และค่าความถูกต้องตั้งทางตั้งที่ระดับ 12 ถึง 15 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าการรังวัดด้วยเทคนิค Single Base RTK Positioning จะให้ค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งดีกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค CORs-RTK เพียงเล็กน้อย ซึ่งมีสาเหตุจากระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (Base Station) และสถานีผู้ใช้งาน (Rover Station) ซึ่ง Single Base RTK Positioning จะมีระยะห่างระหว่างสถานีฐาน

ที่สั้นกว่า CORs-RTK และสำหรับวิธีการรังวัดแบบดั้งเดิมโดยใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (Total Station) ให้ค่าความถูกต้องทางราบอยู่ที่ระดับ 6 ถึง 8 มิลลิเมตร และค่าความถูกต้องตั้งทางตั้งที่ระดับ 9 ถึง 11 มิลลิเมตร ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาในการทำงาน แต่ก็สามารถให้ค่าความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดได้ดีกว่าวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมอื่นๆ ในบริเวณที่เป็นชุมชน บริเวณที่มีสิ่งก่อสร้างบดบัง หรือบริเวณพื้นที่ที่เป็นป่า ซึ่งการรังวัดด้วยดาวเทียมนั้น ทั้ง 2 วิธี คือ Single Base RTK Positioning และ CORs-RTK จะให้ค่าความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดได้ดีในพื้นที่โล่งแจ้ง (Erenoglu, 2017)

### 2.2.2 การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

Charoenkalunyuta et al. (2012) สำหรับโครงข่ายการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (Network-based Real Time Kinematic, NRTK) โดยใช้ระบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station, VRS) ได้มีการติดตั้งในประเทศไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 โดยระบบ NRTK นี้ประกอบไปด้วยสถานีทั้งหมด 11 สถานี ที่มีการติดตั้งอยู่ในภาคกลางเป็นส่วนใหญ่ มีระยะห่างเฉลี่ยแต่ละสถานีประมาณ 60 กิโลเมตร

สำหรับในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยการจำลองระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวร (Reference receiver spacing) ออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ ระยะห่างฯ ที่ 10-20, 30-50, 50-60 และ 60-80 กิโลเมตร ตามลำดับ และทำการรับสัญญาณดาวเทียมแบบละ 2 จุด และหาค่าตำแหน่งทั้งทางราบและทางตั้ง ด้วยวิธีการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station: VRS) ของกรมที่ดิน โดยใช้ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 1 วินาที ตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ถึงวันที่ 3 มีนาคม 2553 (31 วัน) โดยเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งฯ อ้างอิง (Bench Mark) ที่ได้จากการประมวลผลในภายหลังแบบ Static ด้วยโปรแกรม Bernese 5.0 ซึ่งใช้ข้อมูลรับสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 30 วินาที ตั้งแต่วันที่ 1-7 กุมภาพันธ์ 2553 (เป็นเวลา 7 วัน) แล้ววิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของ 1.) ร้อยละของการหาค่าเลขปริศนาสำเร็จ (Ambiguity-fixing rate (%)) ของการรังวัดด้วยโครงข่ายฯ 2.) ร้อยละของค่ากระโดด (Rate of position jump (%)) ของตำแหน่งทางราบและทางตั้งของการรังวัดด้วยโครงข่ายฯ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง และ 3.) ค่าต่างของรากที่

สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE) ของตำแหน่งทางราบและทางตั้ง ระหว่างการรังวัดด้วยโครงข่ายฯ และค่าพิกัดอ้างอิง

สำหรับผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม มีผลต่อค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ โดยค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงที่สั้นกว่า ย่อมให้ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของตำแหน่งที่ดีกว่า อีกทั้งยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของระบบ NRTK ในประเทศไทย โดยระยะห่างระหว่างสถานีฐานที่ 10-20 กิโลเมตร กระบวนการหาค่าเลขปริศนาจะสำเร็จได้ยากในช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูง ดังนั้น ระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงที่ไม่เกิน 30 กิโลเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่อยู่ในเขตละติจูดต่ำอย่างประเทศไทย จะทำให้การรังวัดด้วยระบบ NRTK มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือที่สูง แต่ต้องมีการจัดการกับค่าความคลาดเคลื่อนจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างเหมาะสมร่วมด้วย (Teerat Chaoenkalunyuta et al., 2012)

### 2.2.3 การศึกษาเกี่ยวกับระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจีเอ็นเอสเอสจลน์ (RTK GNSS Network หรือ Network - Based RTK : NRTK)

Hu et al. (2003) ได้ทำการศึกษาเรื่องการพัฒนาและประเมินผลการรังวัดด้วยดาวเทียม GPS แบบจลน์ในทันที (Real-time Kinematic, RTK) โดยใช้ระบบสถานีฐานอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Stations, VRS) ซึ่งได้ใช้วิธีการรังวัดค่าพิกัดด้วย RTK ที่มีความแม่นยำสูง โดยใช้ระบบ VRS ที่พัฒนาและทดสอบ โดยมหาวิทยาลัย Nanyang Technological University (NTU) ประเทศสิงคโปร์ ซึ่งเน้นการใช้งานแบบให้ผลในทันที ดำเนินการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจาก Singapore Integrated Multiple Reference Station Network (SIMRSN) ทำการทดสอบด้วยวิธีการนี้ในสถานที่ต่างๆในประเทศสิงคโปร์

ผลการทดสอบยืนยันว่าสามารถให้ความถูกต้องของตำแหน่งทางราบที่ระดับ 3 เซนติเมตร และความถูกต้องของตำแหน่งทางตั้งที่ 1-5 เซนติเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการรังวัดแบบ Single-reference RTK และใช้ระยะเวลาในการหาค่าเลขปริศนา (Time to Fix) เฉลี่ยน้อยกว่า 2 นาที และผลการรังวัดด้วย VRS RTK นี้ได้เติมเต็มช่องว่างของความต้องการความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดในระดับมิลลิเมตร และระดับเดซิเมตร ถึงระดับเมตร แต่อย่างไรก็ตาม ยังต้อง



ทำการศึกษาเพิ่มเติมในสภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ VRS RTK ในพื้นที่ขนาดใหญ่มากขึ้น ที่มีระยะห่างแต่ละสถานีเป็นระดับร้อยกิโลเมตรขึ้นไป (Hu et al., 2003)

**ธีรทัต เจริญกัลัญญูตา และเฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2553)** ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลนในทันที (Real Time Kinematic ; RTK) ซึ่งเป็นเทคนิคการรังวัดที่มีข้อดีคือ ใช้เวลาในการรังวัดที่รวดเร็ว ได้ค่าพิกัดตำแหน่งในทันที โดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสที่เป็นระบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบเสมือน (Virtual Reference Station Network) ของกรมที่ดิน ซึ่งมีการติดตั้งสถานีถาวรเพื่อรับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมด 9 สถานี ครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของจังหวัดสมุทรปราการ ชลบุรี ระยอง นครนายก นครปฐม สมุทรสาคร และจังหวัดนนทบุรี ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 11,014 ตารางกิโลเมตร โดยมีศูนย์ควบคุม (Control Center) ตั้งอยู่ที่กองเทคโนโลยีทำแผนที่ อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน

ในบทความนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบประสิทธิภาพระบบดังกล่าวในสภาพพื้นที่สนามจริง โดยกำหนดสถานีผู้ใช้งาน จำนวน 2 สถานี แบ่งเป็นสถานีที่ 1 เป็นสถานีแบบเปิดโล่ง และสถานีที่ 2 เป็นสถานีที่มีสิ่งปกคลุมปานกลาง โดยทั้ง 2 สถานีตั้งอยู่ที่วัดอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดอัตราในการบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 13 ชั่วโมง ระหว่างเวลา 11:21:00 – 00:21:00 น.ของวันที่ 14 และ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2551 และใช้ระบบสื่อสารระหว่างสถานีผู้ใช้งานกับศูนย์ควบคุมผ่าน GPRS ด้วยโทรศัพท์มือถือ

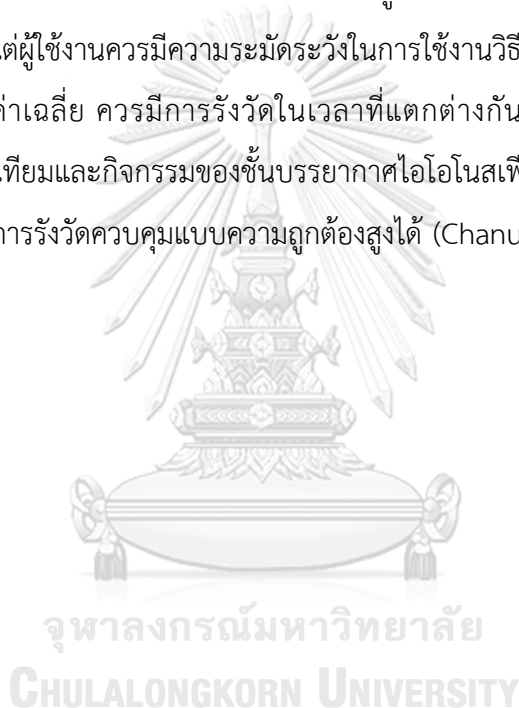
ผลการศึกษาเบื้องต้นได้แสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นที่เปิดโล่งมีโอกาสได้ค่าพิกัดตำแหน่งมากกว่าบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุม ส่วนค่าการกระจายตัวเชิงตำแหน่งของทั้งสองสถานีนั้น สรุปได้ว่า ค่าพิกัดในทางราบอยู่ในระดับ 1 ถึง 3 เซนติเมตร และค่าพิกัดทางตั้งอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร แต่ค่าพิกัดทางราบและทางตั้งของทั้งสองสถานียังมีบางช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนสูง และมีค่ากระโดดขนาดใหญ่ที่ต้องทำการวิจัยเพื่อหาสาเหตุต่อไป (ธีรทัต เจริญกัลัญญูตา & เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2553)

Chanutboonsin et al. (2016) สำหรับระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดิน (DOL-VRS) เป็นวิธีการที่ช่วยลดข้อจำกัดต่างๆของวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบเดิม (Conventional RTK) และเป็นวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีขึ้น โดยได้มีการติดตั้งในปี ค.ศ. 2008 ประกอบไปด้วยสถานีฐานอ้างอิงทั้งหมด 11 สถานี ซึ่งทำให้เกิดคำถามขึ้นว่า มีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดในการที่จะนำเอาวิธีการรังวัดด้วยระบบ DOL-VRS นี้มาใช้สำหรับงานรังวัดควบคุม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานระบบ DOL-VRS นี้ใน 2 มุมมอง ได้แก่ จำนวนข้อมูลในการรังวัด และผลกระทบจากอิทธิพลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพ คืออัตราความสำเร็จในการหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity-fixing rate) อัตราค่ากระโดดของค่าพิกัด (Rate of position jump) และค่าต่างของรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE) ของตำแหน่ง

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลสถานีฐานอ้างอิง (CORS Station) ทั้งหมด 7 สถานี เป็นของกรมที่ดิน 6 สถานี ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรุ่น Trimble NetR5 GNSS และกรมโยธาธิการและผังเมืองอีก 1 สถานีซึ่งใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรุ่น Leica GRX 1200 Pro โดยทำการรับข้อมูลทั้ง 2 ความถี่ ทั้งแบบการใช้เฟสของคลื่นส่ง และการใช้รหัส กำหนดมุม Cut-off elevation ของดาวเทียม 5 องศา รับสัญญาณทุกๆ 1 วินาที (กรมที่ดิน) และทุกๆ 5 วินาที (กรมโยธาธิการและผังเมือง) ใช้ข้อมูลการรังวัดทั้งหมด 7 วัน แบ่งเป็น ปี ค.ศ. 2014 จำนวน 3 วัน (DOY 108,198,303) และปี ค.ศ. 2015 จำนวน 4 วัน (DOY 041 ถึง 044) โดยมีการคำนึงถึงกิจกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric activity) ที่แสดงทางค่าผลรวมองค์ประกอบอิเล็กตรอน (Total Electron Content, TEC) โดยกำหนด 4 ระดับ คือค่าต่ำ (<40) ค่าปานกลาง (40-80) ค่าสูง (90-120) และค่าสุดขีด (>120) ข้อมูลทั้งหมดประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Leica Geo Office (LGO) พร้อมค่าแกว่งโจรแบบแมนย้าจาก IGS และค่าแก้नाพิภาดาวเทียมในรูปแบบ SP3 การแก้ไขและตรวจสอบคุณภาพใช้ชุดเครื่องมือ TEQC และกิจกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เลือก ใช้เครื่องมือ Trimble GNSS Planning Online

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่า การรังวัดด้วยระบบ DOL-VRS สำหรับงานรังวัดควบคุม จะมีความน่าเชื่อถือเมื่อทำการรังวัดด้วยการรับสัญญาณดาวเทียมทุกๆ 5 วินาที และรับสัญญาณอย่างน้อย 180 Epochs ต่อการรังวัดในแต่ละครั้ง โดยอยู่ในสถานะที่มีปัจจัยจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ดี (มีค่า Total Electron Content, TEC ที่ต่ำ) ในอีกกรณีหนึ่งต้องรับ

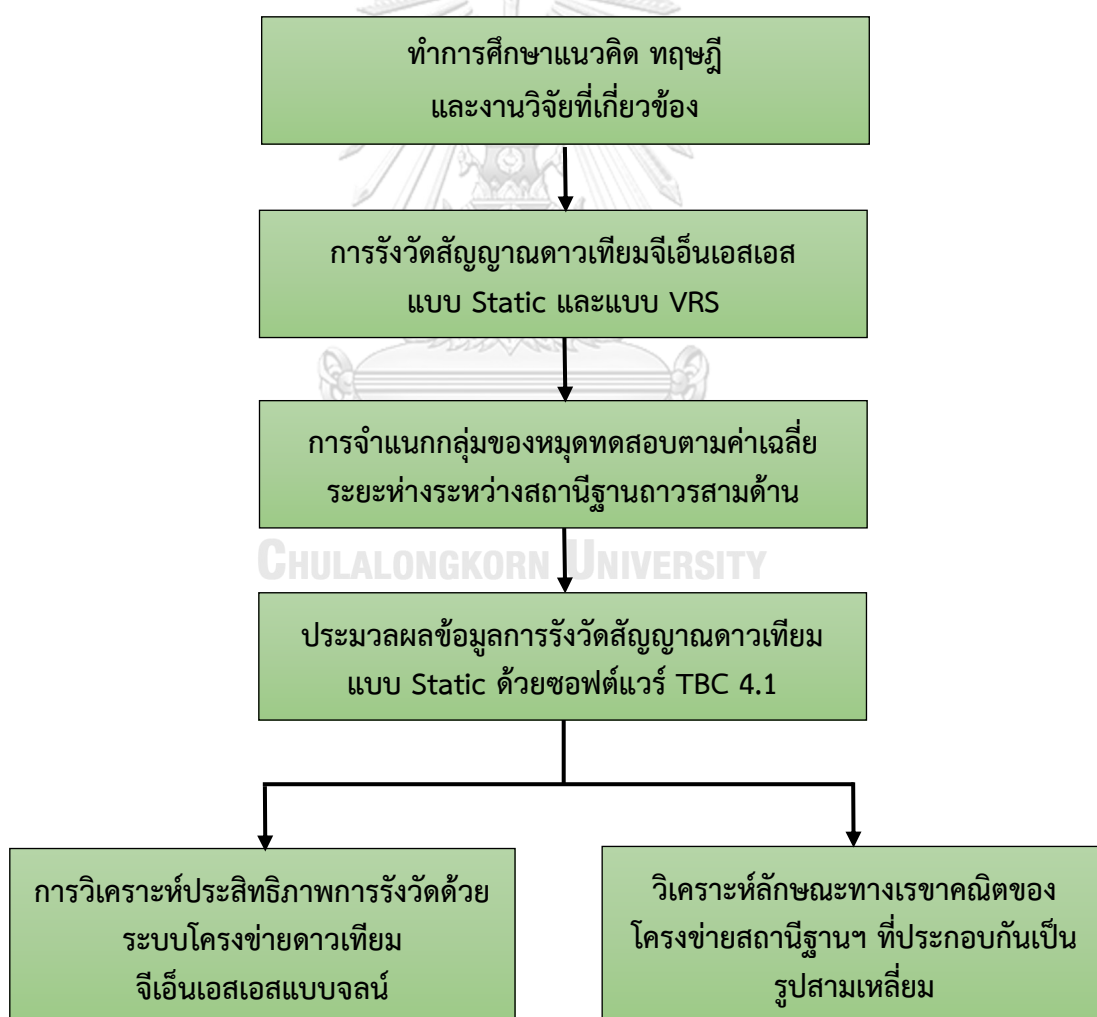
สัญญาณ 720 Epochs หรือมากกว่าเมื่อมีกิจกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความยาวของ Session ที่สั้น กระบวนการหาค่าเลขปริศนาจะไม่ประสบความสำเร็จหรือได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง และกิจกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีอิทธิพลต่อค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้ง นอกจากนี้วิธีการรังวัดแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square adjustment) มีค่าต่างอยู่ที่ 0.7 เซนติเมตร ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งของวิธีการรับสัญญาณ 720 Epochs มีค่าต่ำสุด 3.9 เซนติเมตร (TEC ต่ำ) และ 10.1 เซนติเมตร (TEC สูง) ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้วิธีการรังวัดแบบ VRS ในงานรังวัดควบคุมได้โดยใช้ระบบ DOL-VRS ที่ให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำที่ 2 เซนติเมตร ในภาวะที่มีค่า TEC ต่ำๆ แต่ผู้ใช้งานควรมีความระมัดระวังในการใช้งานวิธีการนี้ ควรมีการทำการรังวัดซ้ำที่จุดเดิม และใช้ค่าเฉลี่ย ควรมีการรังวัดในเวลาที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงเรขาคณิตของดาวเทียมและกิจกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ การปฏิบัติเช่นนี้จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการรังวัดควบคุมแบบความถูกต้องสูงได้ (Chanutboonsin et al., 2016)



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ประกอบกับการวิเคราะห์ผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบจากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานศึกษาวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

### 3.1 ทำการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษารวบรวมแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส การรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (Network-Based GNSS RTK) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคต่างๆ และการวิเคราะห์ผลการศึกษิตตามหลักการของการวิจัยสากล

### 3.2 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชียงพื้นที่ ซึ่งเป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่างกรมที่ดินและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยซึ่งเจ้าหน้าที่กรมที่ดินได้ให้ความอนุเคราะห์ปฏิบัติงานการรังวัดดาวเทียมในสนาม โดยทำการรังวัดหมุดทดสอบทั้งหมด 2,122 หมุด จาก 143 ลูบ ในพื้นที่ 63 จังหวัด (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) โดยดำเนินการรังวัดในช่วงเวลาที่ท้องฟ้าเปิดโล่ง ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 (ช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย) (Teetat Charoenkalunyuta et al., 2019) ทั้งนี้การรังวัดแต่ละหมุดทดสอบทำการรับสัญญาณดาวเทียมใน 2 วิธี ได้แก่

#### 3.2.1 ข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static)

ข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) ได้มาจากการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยรับสัญญาณดาวเทียม Epoch ละ 30 วินาที และรับสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่โล่งแจ้ง ปราศจากสิ่งบดบัง

#### 3.2.2 ข้อมูลการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

ข้อมูลการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) จำนวน 15 นาที โดยทำการรับสัญญาณครั้งละ 1 นาที และการรับสัญญาณครั้งที่ 8 และ ครั้งที่ 9 ให้ห่างกันประมาณ 30 นาที ซึ่งทำการรังวัดในคราวเดียวกันกับการรังวัดแบบสถิต



ภาพที่ 18 ตัวอย่างวิธีการรังวัดสัญญาณจีเอ็นเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในพื้นที่ต่างๆ

### 3.3 การจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน

เนื่องจากระบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรตั้งแต่ 25.1 กิโลเมตร จนถึง 198.6 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรเท่ากับ 82.7 กิโลเมตร และมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม หรือเรียกว่าลูป (Loops) ตั้งแต่ 37.2 กิโลเมตร จนถึง 110 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านเท่ากับ 72.5 กิโลเมตร ดังนั้นเพื่อให้มีความสะดวกในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัย ผู้เขียนจึงได้ทำการแบ่งกลุ่มของหมุดทดสอบทั้งหมดตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ที่ระยะห่างเฉลี่ยๆ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ

### 3.4 การประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static)

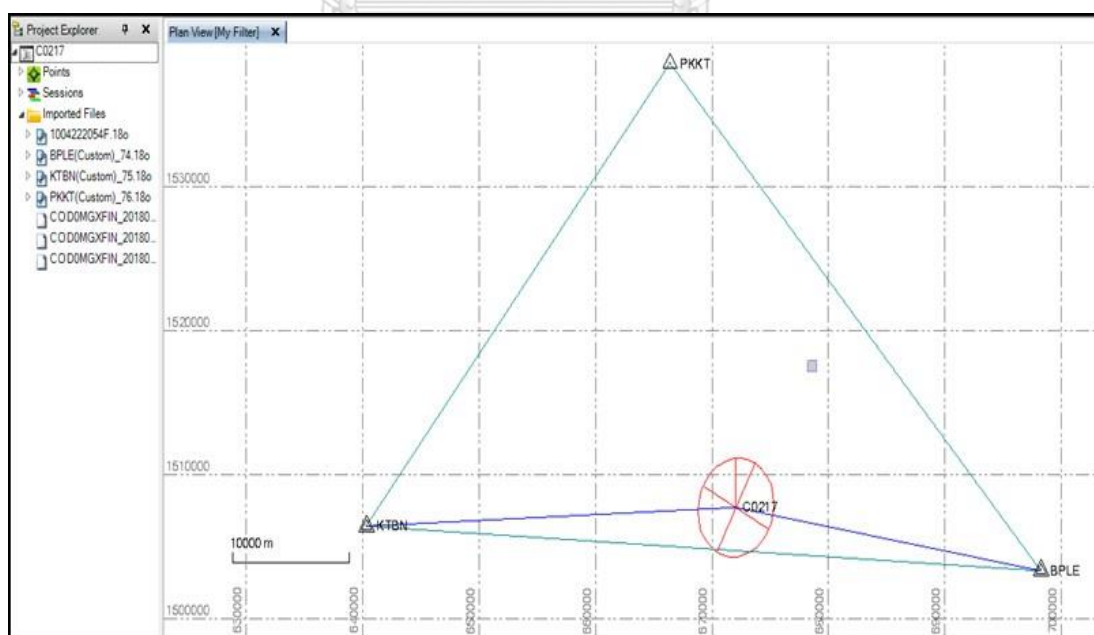
สำหรับการประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) เพื่อใช้เป็นค่าพิกัดอ้างอิงนั้น มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

3.4.1 ใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Trimble Business Center (TBC) 4.1 ในการประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบสถิต (Static) ในภายหลัง (Post Processing) จำนวน 90 นาที

เพื่อกำหนดให้เป็นค่าพิกัดอ้างอิง (Ground Truth) ในการนำมาตรวจสอบกับค่าพิกัดของหมุดทดสอบ ที่ทำการรังวัดด้วยเทคนิคสถานีอ้างอิงเสมือน

3.4.2 ใช้ค่าปรับแก้วงโคจรรายละเอียดสูงของระบบดาวเทียม GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou ความถูกต้องสูงที่สุด (Precise Orbit) จาก Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) ซึ่งจะสามารถดาวน์โหลดได้ล่าช้าจากวันที่รับสัญญาณดาวเทียมประมาณ 12 วัน โดยสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/> โดยข้อดีของการใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูง เพื่อนำมาประมวลผลข้อมูลแบบสทิต ในภายหลังนั้น ค่าพิกัดที่ได้จะมีความถูกต้องสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ค่าปรับแก้วงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast (กรมที่ดิน, 2562)

3.4.3 ในการประมวลผลในแต่ละหมุดทดสอบ จะทำการโยงยึดค่าพิกัดอ้างอิงจากสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่อยู่ใกล้กับหมุดทดสอบมากที่สุด จำนวน 2 สถานี ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลแบบสทิต ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงกับสถานีผู้ใช้งาน หรือระยะเส้นฐาน (Baseline length) กล่าวคือระยะเส้นฐานที่สั้นกว่าย่อมให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีกว่า (OKOROCHA & OLAJUGBA, 2014) ดังตัวอย่างในภาพที่ 19 โดยในการประมวลผล ได้มีการกำหนดเกณฑ์ค่า Horizontal Precision ที่ดีกว่า 2 เซนติเมตร และค่า Vertical Precision ที่ดีกว่า 4 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างการประมวลผลข้อมูลแบบสทิตฯ โดยทำการโยงยึดพิกัดอ้างอิง จากสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่อยู่ใกล้ที่สุด จำนวน 2 สถานี

### 3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) จะพิจารณาเฉพาะค่าพิกัดทางราบเท่านั้น และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านทางตัวแปรทางสถิติได้แก่

3.5.1 วิเคราะห์ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS (เฉลี่ย 2 ครั้ง) \*

3.5.2 คำนวณอัตราการย่อยละของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่รับสัญญาณสำเร็จ (เฉลี่ย 15 นาที)

3.5.3 คำนวณค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP) ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS (เฉลี่ย 15 นาที)

3.5.4 คำนวณค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

3.5.5 คำนวณร้อยละของค่ากระโดดทางราบ (Rate of the position jump in Horizontal) ขนาดใหญ่ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของตำแหน่งทางราบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (คำนวณจากจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบมากกว่า 8 เซนติเมตร) \*\*

3.5.6 วิเคราะห์ค่าความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ โดยใช้การคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal Root Mean Square Error – Horizontal RMSE) ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (Different of Horizontal RMSE) ตามสมการที่ (17) (FGDC, 1998)

$$\text{RMSE}_{hor} = \sqrt{\sum((N_{static} - N_{i(VRS)})^2 + (E_{static} - E_{i(VRS)})^2)/n} \quad (17)$$



โดยที่	$RMSE_{hor}$	คือ ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (เมตร)
	$N_{static}, E_{static}$	คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ และ ตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัดแบบ Static
	$N_{VRS}, E_{VRS}$	คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ และ ตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัดแบบ VRS
	$i$	คือ ข้อมูลแต่ละ Epoch ที่ 1 วินาที
	$n$	คือ จำนวนหมุดทดสอบ

หมายเหตุ \* ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity คือค่าเฉลี่ยของระยะเวลาตั้งแต่การเปิดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจนถึงการหาค่าเลขปริศนาสำเร็จ (Time to first fixed) ซึ่งมีการเก็บข้อมูลระยะเวลาตั้งแต่การเปิดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจนถึงการหาค่าเลขปริศนาสำเร็จจำนวน 2 ครั้ง คือ นาฬิกาที่ 1 และนาฬิกาที่ 9 ของการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS

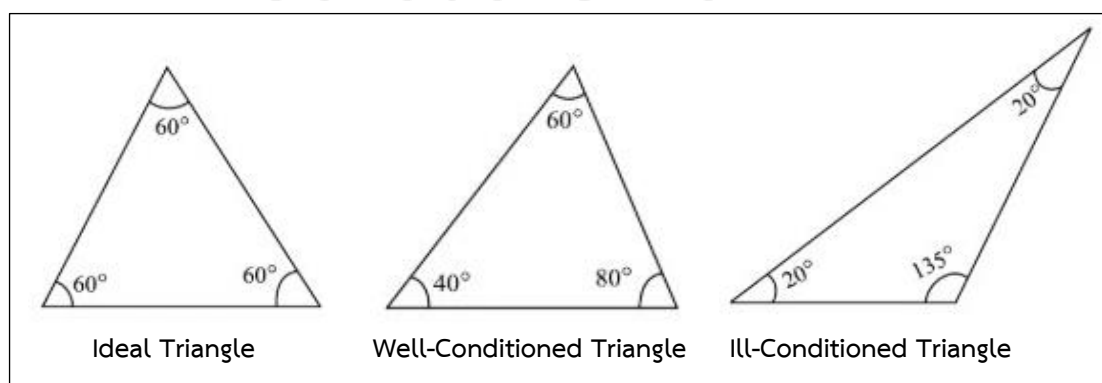
\*\* ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีตัววัดความแปรปรวนของค่าพิกัดเพิ่มขึ้นไปอีก 1 พารามิเตอร์คือ ร้อยละค่ากระโดดทางตำแหน่ง โดยนิยาม “ค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” คือ ค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร (ซึ่งเท่ากับ 2 $\sigma$  หรือที่ความเชื่อมั่น 95% ของความถูกต้องทางตำแหน่งที่ต้องการคือ 4 เซนติเมตร)

### 3.6 วิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ (Network-Based GNSS RTK) โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือทางตำแหน่งที่ได้ จะมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวร หรือขนาดโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร โดยตรง กล่าวคือขนาดระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวร หรือโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่มีขนาดเล็ก จะให้ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือทางตำแหน่งที่ดีกว่าขนาดระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวร หรือโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่มี

ขนาดที่ใหญ่กว่า (Teeratat Charoenkalunyuta et al., 2012; Lim, Rizos, & Musa, 2008; Musa, 2007)

แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ ผู้เขียนได้รับคำถามจากผู้ปฏิบัติงานของกรมที่ดิน ประกอบกับข้อสงสัยของผู้เขียนเองว่า นอกจากขนาดระยะห่าง และขนาดโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรแล้วนั้น รูปร่างหรือลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร จะมีผลต่อค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS หรือไม่ ผู้เขียนจึงได้กำหนดสมมติฐานเบื้องต้นไว้ว่า รูปร่างหรือลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่ตึ้นนั้น ต้องเป็นสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle โดยอ้างอิงมาจากวิธีการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangulation) กล่าวคือ รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle) หรือใกล้เคียงด้านเท่า หรือมีขนาดของมุมแต่ละมุมใกล้เคียง  $60^\circ$  โดยในการวัดมุมแต่ละมุมนั้นต้องส่งผลกระทบต่อความยาวด้านที่คำนวณได้น้อยที่สุด จะเรียกว่ารูปสามเหลี่ยมประเภทนี้ว่า Well-Conditioned Triangle (Bhavikatti, 2008) หรือในทำนองเดียวกัน จากเรื่องของลักษณะถูกส่วนของรูป (Strength of Figures) ตามหลักในการคำนวณค่าไซน์ (Sine) ของมุมที่มีค่าใกล้  $0^\circ$  หรือ  $180^\circ$  จะมีอัตราส่วนของความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่สูง ซึ่งในการคำนวณการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม จะใช้กฎของไซน์ (Law of sine) ในการคำนวณ ซึ่งจากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์พบว่า ขนาดของมุมที่มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ  $56^\circ 14'$  แต่ในทางปฏิบัติให้ถือว่ารูปสามเหลี่ยมที่มีขนาดของมุมที่เล็กที่สุดไม่เกิน  $30^\circ$  และขนาดของมุมที่ใหญ่ที่สุดไม่เกิน  $120^\circ$  นั้น จัดเป็น Well-Conditioned Triangle เช่นเดียวกัน (Basak, 1994; Chandra, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงลักษณะของรูปสามเหลี่ยมในอุดมคติ, รูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้เขียนได้ออกแบบวิธีการศึกษาวิจัย โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

3.6.1 ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องรูปสามเหลี่ยม และการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangulation) เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

3.6.2 รวบรวม และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร หรือเรียกว่าลูป จำนวนทั้งหมด 143 ลูป

3.6.3 คำนวณระยะเส้นฐาน (Baseline) ระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรทั้งสามด้านของโครงข่ายสามเหลี่ยม จากค่าพิกัดในระบบ UTM (N, E) ของสถานีฐานอ้างอิงถาวร โดยใช้การคำนวณทางเรขาคณิตเบื้องต้นในการหาระยะทางระหว่างจุดสองจุดบนระนาบ ดังสมการที่ (18)

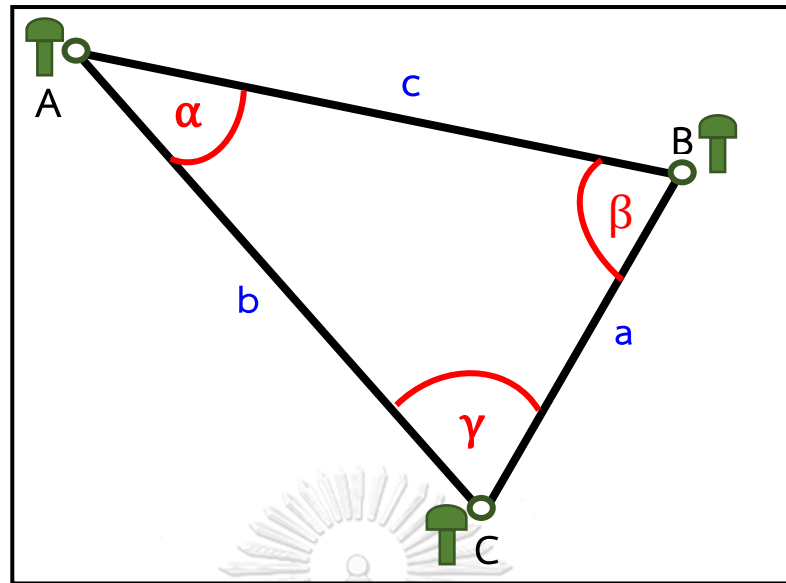
$$\text{Distance} = \sqrt{(N_1 - N_2)^2 + (E_1 - E_2)^2} \quad (18)$$

โดยที่ Distance คือ ระยะทางระหว่างสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (เมตร)

$N$  คือ ค่าพิกัดในแนวเหนือ-ใต้ ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร

$E$  คือ ค่าพิกัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร

3.6.4 คำนวณค่ามุมภายในของสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยใช้กฎของโคไซน์ (Law of Cosine) ซึ่งเป็นกฎที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวด้านของรูปสามเหลี่ยมกับโคไซน์ของมุมหนึ่งในรูปสามเหลี่ยมนั้น กฎของโคไซน์เขียนได้ดังสมการที่ (19) สมการที่ (20) และสมการที่ (21) และกำหนดให้ชื่อของด้านและมุมของรูปสามเหลี่ยมเป็นไปตามภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมภายใน และด้านตรงข้ามมุม ตามกฎของโคไซน์

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos\alpha \quad (19)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos\beta \quad (20)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos\gamma \quad (21)$$

โดยที่  $A, B, C$  คือ สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร

$a, b, c$  คือ ระยะทางระหว่างสถานีฐานแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร

$\alpha, \beta, \gamma$  คือ มุมภายในของสถานีฐานแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร  
ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

3.6.5 จำแนกโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร โดยจำแนกตามขนาดของมุมภายใน ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- 1) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle) โดยกำหนดให้มุมภายในของรูปสามเหลี่ยมมีขนาดตั้งแต่  $56^\circ$  ถึง  $64^\circ$
- 2) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม (Acute Triangle) คือรูปสามเหลี่ยมที่มุมภายในทั้งสามมุมมีขนาดเล็กกว่า  $90^\circ$

- 3) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน (Obtuse Triangle) คือรูปสามเหลี่ยมที่มีมุมภายในหนึ่งมุม มีขนาดใหญ่กว่า  $90^\circ$

3.6.6 จำแนกโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่เป็น Well-Conditioned Triangle และโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวร ที่เป็น Ill-Conditioned Triangle

3.6.7 ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) โดยใช้การวิเคราะห์ตามข้อที่ 3.4



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาวิจัย

จากการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ประกอบกับการวิเคราะห์ผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบจากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทยนั้น ได้ผลการศึกษาวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน

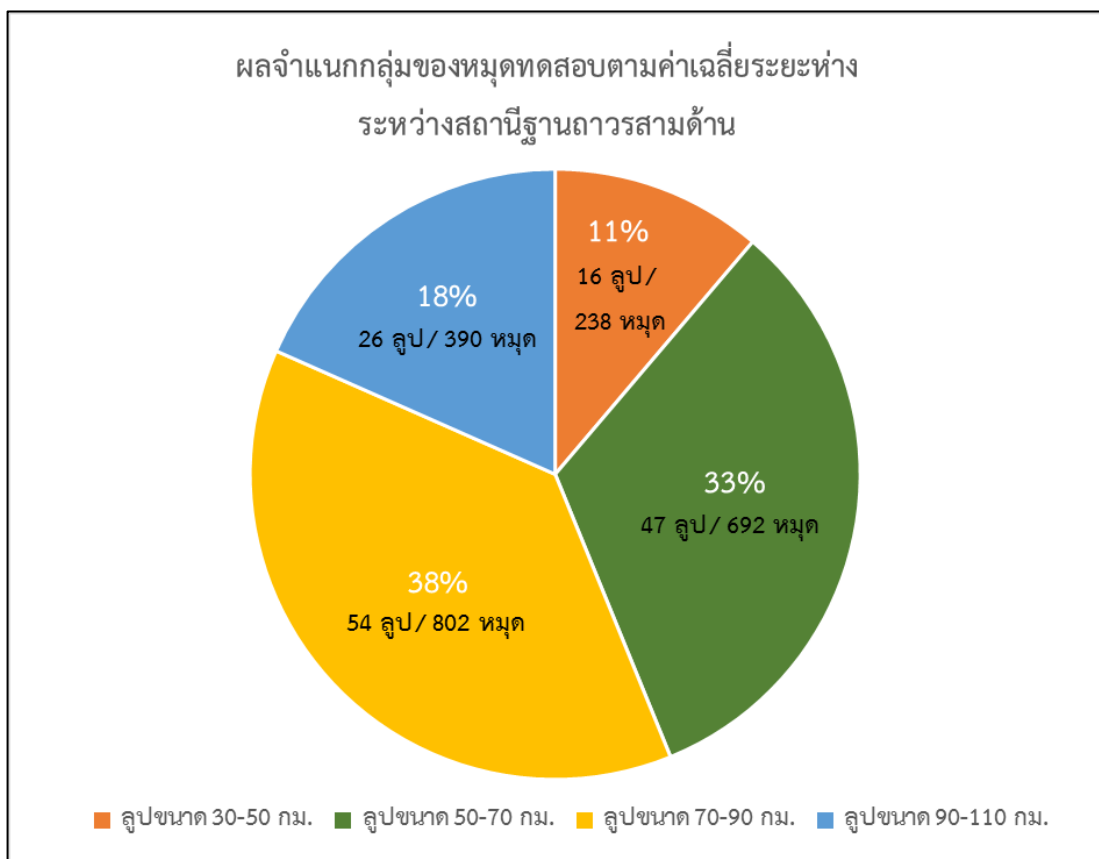
เนื่องจากระบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรตั้งแต่ 25.1 กิโลเมตร จนถึง 198.6 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรเท่ากับ 82.7 กิโลเมตร และมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม หรือเรียกว่าลูป (Loops) ตั้งแต่ 37.2 กิโลเมตร จนถึง 110 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้านเท่ากับ 72.5 กิโลเมตร ดังนั้นเพื่อให้มีความสะดวกในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัย ผู้เขียนจึงได้ทำการแบ่งกลุ่มของหมุดทดสอบทั้งหมด ตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ที่ระยะห่างเฉลี่ยฯ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ตามลำดับ ซึ่งจำนวนหมุดทดสอบ จำนวนลูป ในแต่ละช่วงของระยะห่างเฉลี่ยฯ แสดงได้ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ตารางแสดงการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน

จำนวนลูป และจำนวนหมุดทดสอบของแต่ละกลุ่ม

ช่วงที่	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	จำนวนลูป (Loops)	จำนวนหมุดทดสอบ (หมุด)
1	30-50	16	238
2	50-70	47	692
3	70-90	54	802
4	90-110	26	390
รวม		143	2,122

สำหรับผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน มีรายละเอียด ดังนี้ (ดูภาพที่ 22 ประกอบ)



ภาพที่ 22 กราฟแสดงผลการจำแนกกลุ่มของหมุดทดสอบตามค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน

- หลุมขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนหลุม 16 หลุม มีหมุดทดสอบ 238 หมุด คิดเป็น 11%
- หลุมขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนหลุม 47 หลุม มีหมุดทดสอบ 692 หมุด คิดเป็น 33%
- หลุมขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนหลุม 54 หลุม มีหมุดทดสอบ 802 หมุด คิดเป็น 38%
- หลุมขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนหลุม 26 หลุม มีหมุดทดสอบ 390 หมุด คิดเป็น 18%

จากผลการจำแนกฯ ข้างต้น จะเห็นว่า ข้อมูลหมุดทดสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในหลุมขนาด 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร รองลงมาคือหลุมขนาด 90-110 กิโลเมตร และหลุมขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนหมุดทดสอบน้อยที่สุด

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือนนั้น จะพิจารณาเฉพาะค่าพิกัดทางราบเท่านั้น และทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านทางตัวแปรทางสถิติ ได้แก่

4.2.1 ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS (เฉลี่ย 2 ครั้ง)

4.2.2 อัตราร้อยละของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่รับสัญญาณสำเร็จ (เฉลี่ย 15 นาที)

4.2.3 ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP) ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS (เฉลี่ย 15 นาที)

4.2.4 ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

4.2.5 อัตราร้อยละของค่ากระโดดทางราบ (Rate of the position jump in Horizontal) ขนาดใหญ่ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของตำแหน่งทางราบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง (คำนวณจากจำนวนหมุดที่มีค่าพิกัดทางราบมากกว่า 8 เซนติเมตร)

4.2.6 ค่าความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ จากการคำนวณค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal Root Mean Square Error – Horizontal RMSE) ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิค VRS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง

โดยผลการศึกษาวิจัยนั้น รายละเอียดทั้งหมดจะแสดงตามตารางที่ 3 และภาพที่ 23 ถึง ภาพที่ 25 ดังนี้



**ตารางที่ 3** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

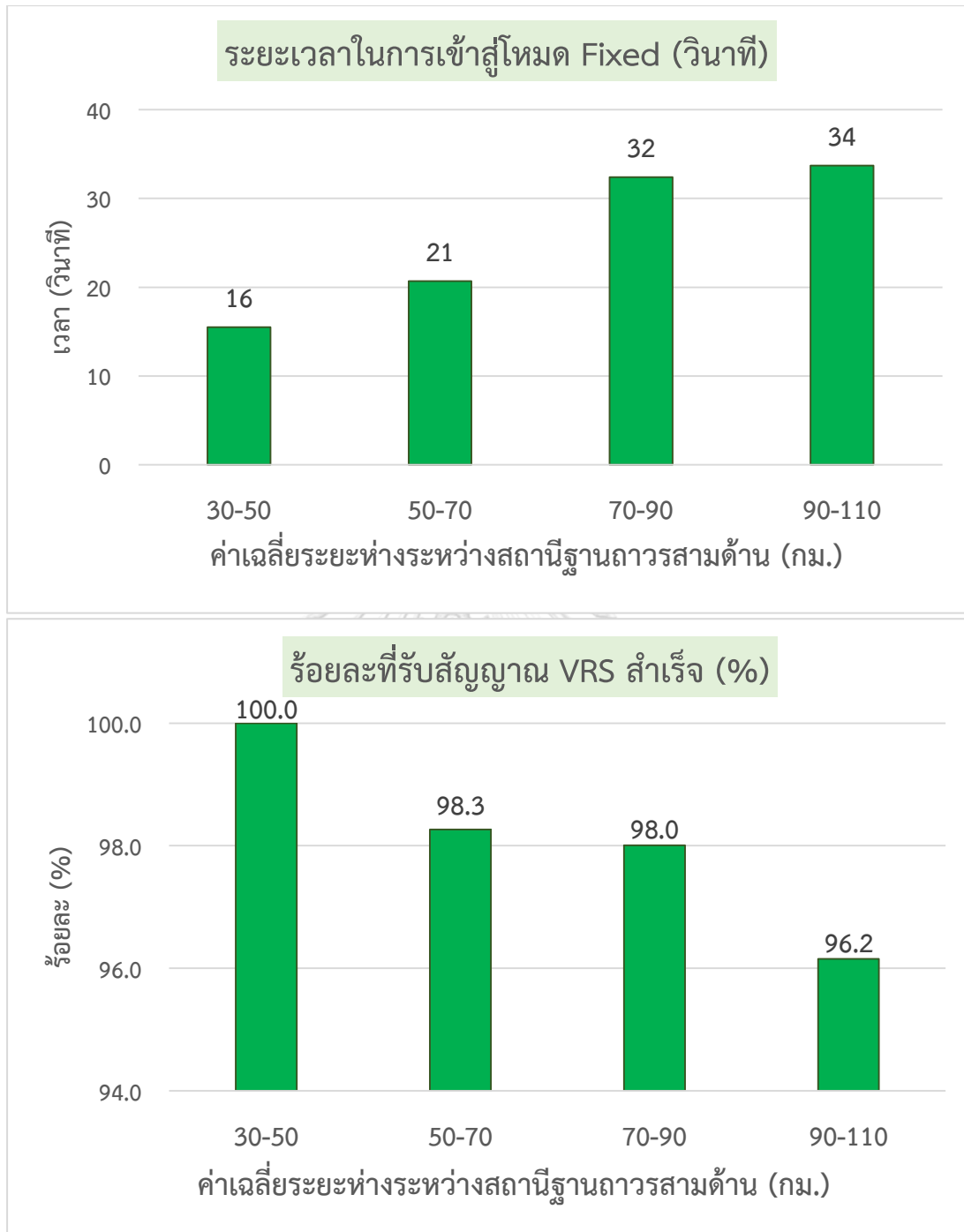
ลำดับ	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed* (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	30-50	16	100.0	1.5
2	50-70	21	98.3	1.5
3	70-90	32	98.0	1.4
4	90-110	34	96.2	1.4

ลำดับ	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ** (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	30-50	0.130	2.5	0.032
2	50-70	0.348	3.6	0.035
3	70-90	0.223	3.4	0.035
4	90-110	0.232	3.1	0.035

หมายเหตุ

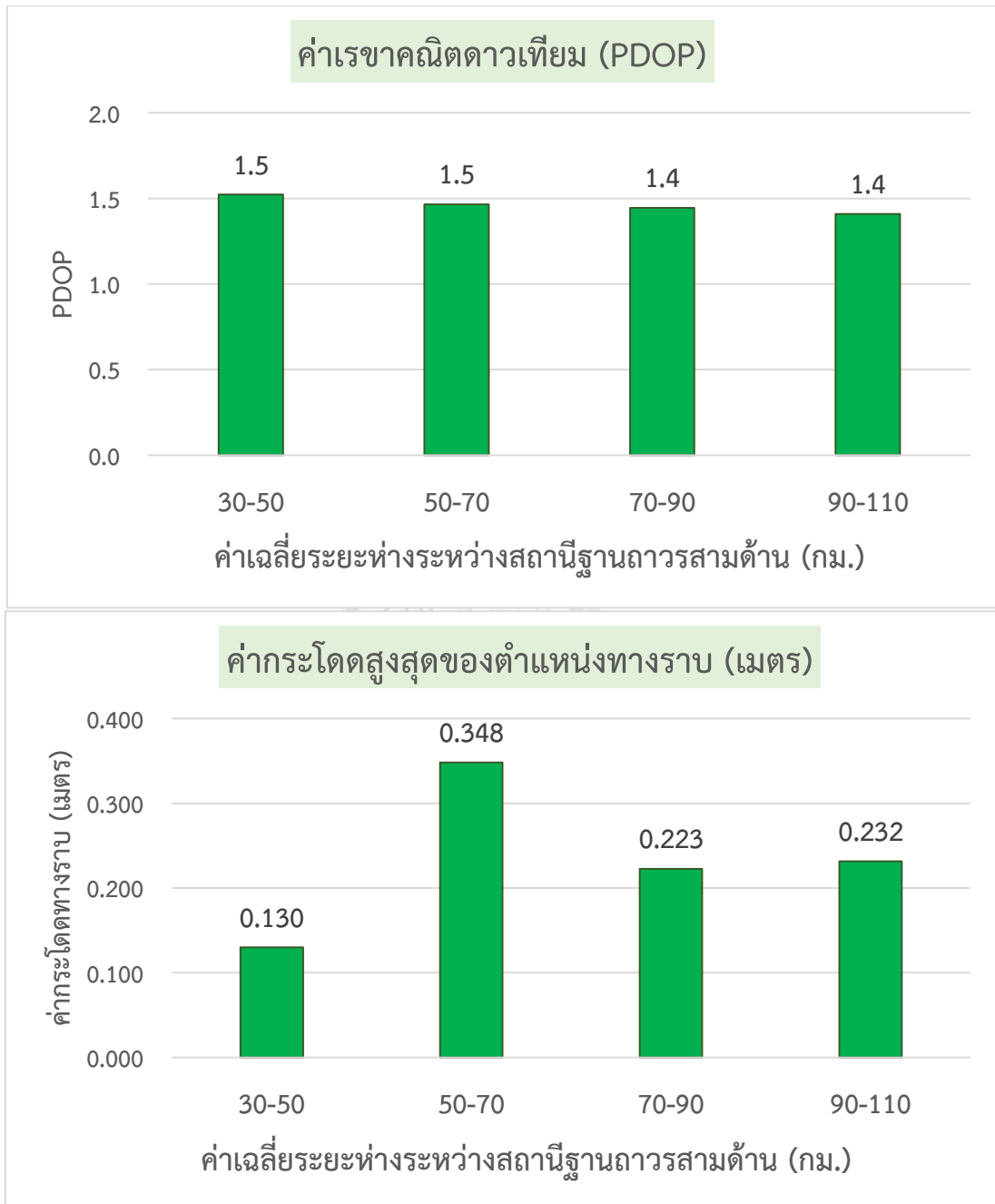
\* ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาตั้งแต่การเปิดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจนถึงการหาค่าเลขปริศนาสำเร็จ (Time to first fixed) ซึ่งมีการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง คือ นาทีที่ 1 และนาทีที่ 9

\*\* ค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ คือ ค่าพิกัดทางราบที่มากกว่า 8 เซนติเมตร



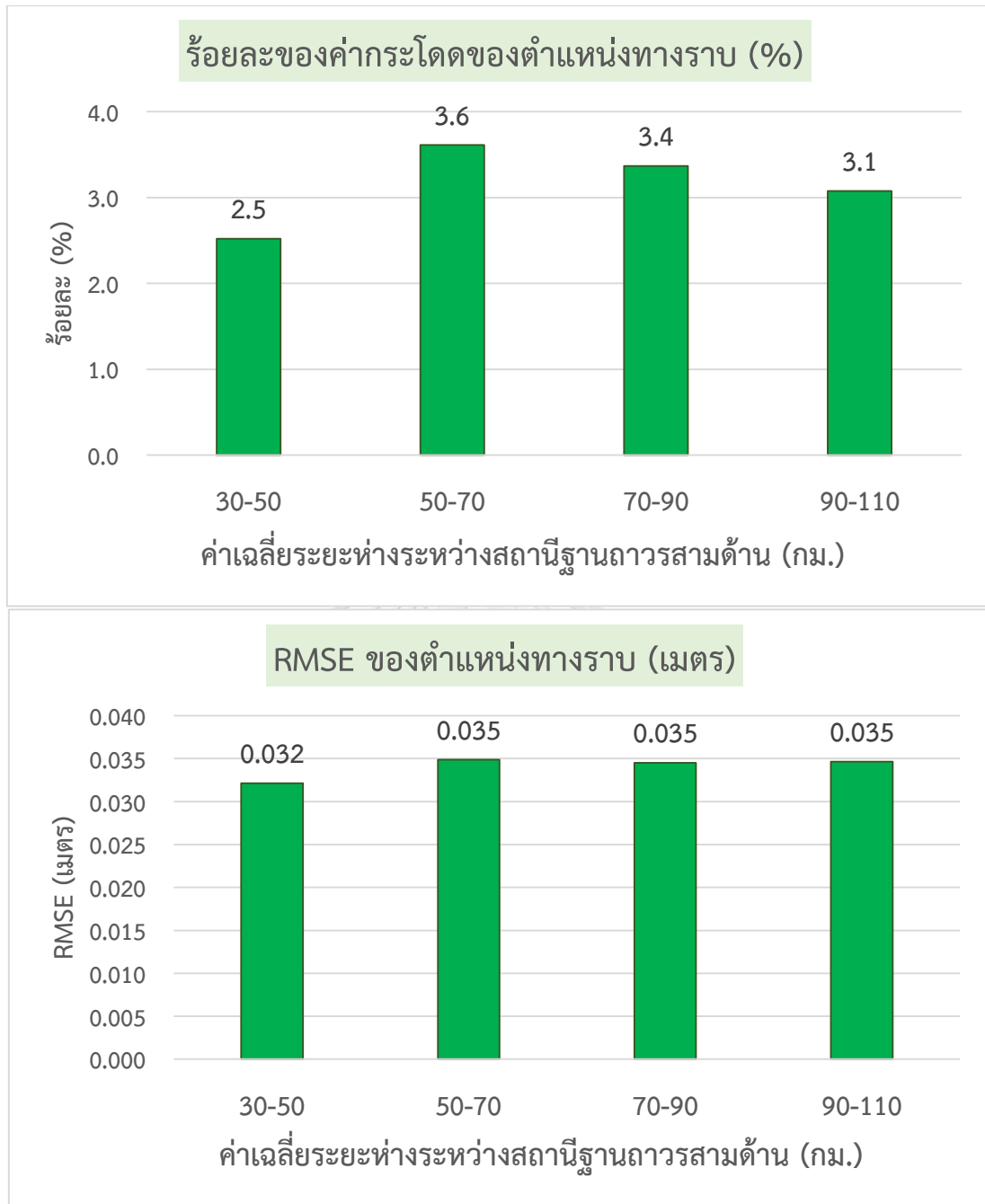
ภาพที่ 23 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” และ “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการรับสัญญาณ 15 นาที)



**ภาพที่ 24** แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) (ต่อ)

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” และ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลารับสัญญาณ 15 นาที)



ภาพที่ 25 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) (ต่อ)

สำหรับค่าตัวแปรทางสถิติ “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ” (ค่าเฉลี่ยระยะเวลารับสัญญาณ 15 นาที)

#### 4.3 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ตามรายละเอียดในบทที่ 3 ข้อที่ 3.6 นั้น โดยมีผลการศึกษาวิจัย ดังนี้

##### 4.3.1 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยจำแนกตามขนาดของมุมภายใน

สำหรับการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม นั้น จะจำแนกตามขนาดของมุมภายในที่คำนวณมาจากกฎของโคไซน์ (Law of Cosine) ซึ่งจะทำให้การจำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยม 3 ประเภท ได้แก่ รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral Triangle) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม (Acute Triangle) และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน (Obtuse Triangle) โดยผลของการจำแนก แสดงตามตารางที่ 4 ดังนี้

**ตารางที่ 4** ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

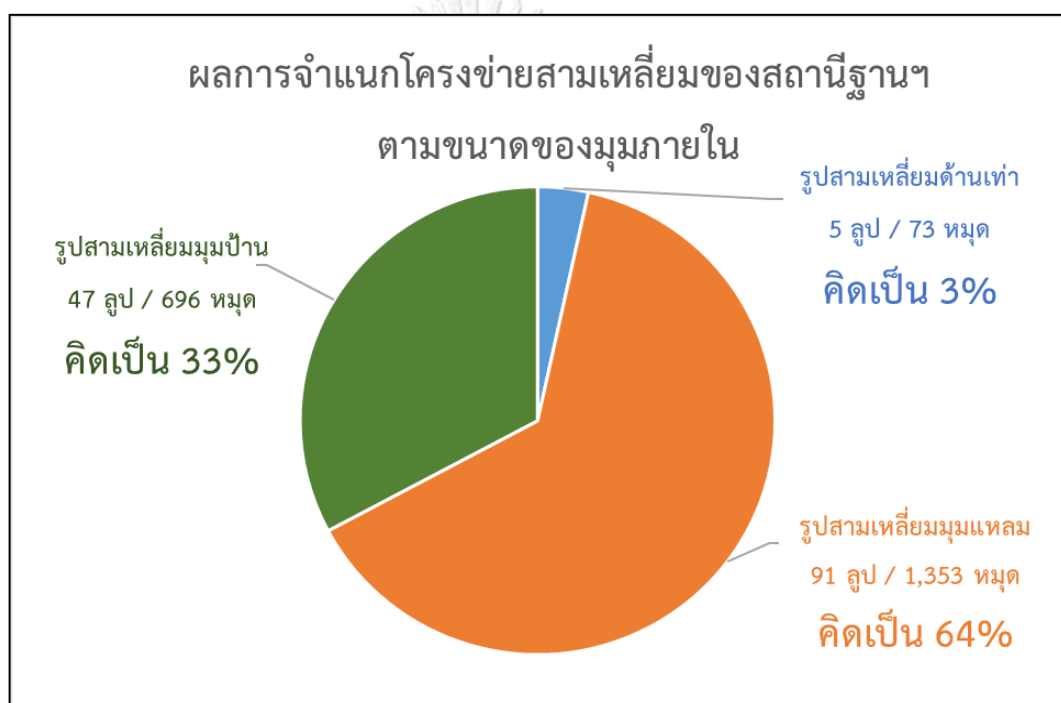
โดยทำการจำแนกตามขนาดของมุมภายใน, จำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบของรูปสามเหลี่ยมแต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	จำนวนรูป (Loops)	จำนวนหมุดทดสอบ (หมุด)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	5	73
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	91	1,353
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	47	696
รวม		143	2,122

สำหรับรายละเอียดผลการจำแนก มีดังนี้ (ดูภาพที่ 26 ประกอบ)

- รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า มีจำนวนรูป 5 รูป มีหมุดทดสอบ 73 หมุด คิดเป็น 3%
- รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม มีจำนวนรูป 91 รูป มีหมุดทดสอบ 1,353 หมุด คิดเป็น 64%
- รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีจำนวนรูป 47 รูป มีหมุดทดสอบ 696 หมุด คิดเป็น 33%

จากข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม รองลงมาเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่ามีจำนวนน้อยที่สุด



ภาพที่ 26 กราฟแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยจำแนกตามขนาดของมุมภายใน

#### 4.3.2 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน

เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ฯ ตามข้อที่ 4.2 ในหัวข้อนี้จึงได้นำเอาวิธีการจำแนกตามค่าเฉลี่ยระยะห่าง

ระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน ตามข้อที่ 4.1 มาประกอบในการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมด้วย โดยผลของการจำแนกฯ แสดงตามตารางที่ 5 ดังนี้

**ตารางที่ 5** ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม (ต่อ)

โดยทำการจำแนกตามขนาดของมุมภายใน, ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน, จำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบ ของรูปสามเหลี่ยมแต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	จำนวนรูป (Loops)	จำนวนหมุดทดสอบ (หมุด)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	1	15
		50-70	3	44
		70-90	1	14
		90-110	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	12	180
		50-70	29	425
		70-90	31	463
		90-110	19	285
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	3	43
		50-70	15	223
		70-90	22	325
		90-110	7	105
รวม			143	2,122

สำหรับผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน มีรายละเอียด ดังนี้ (ดูภาพที่ 27 ประกอบ)

### 1) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 1 ลูบ มีหมุดทดสอบ 15 หมุด คิดเป็น 1%
- ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 3 ลูบ มีหมุดทดสอบ 44 หมุด คิดเป็น 2%
- ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 1 ลูบ มีหมุดทดสอบ 14 หมุด คิดเป็น 1%
- ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร ไม่มี

จากข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ข้อมูลหมุดทดสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร

### 2) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 12 ลูบ มีหมุดทดสอบ 180 หมุด คิดเป็น 8%
- ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 29 ลูบ มีหมุดทดสอบ 425 หมุด คิดเป็น 20%
- ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 31 ลูบ มีหมุดทดสอบ 463 หมุด คิดเป็น 22%
- ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 19 ลูบ มีหมุดทดสอบ 285 หมุด คิดเป็น 13%

จากข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม ข้อมูลหมุดทดสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร และ 70-90 กิโลเมตร รองลงมาคือลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร และลูบขนาด 30-50 กิโลเมตรมีจำนวนหมุดทดสอบน้อยที่สุด

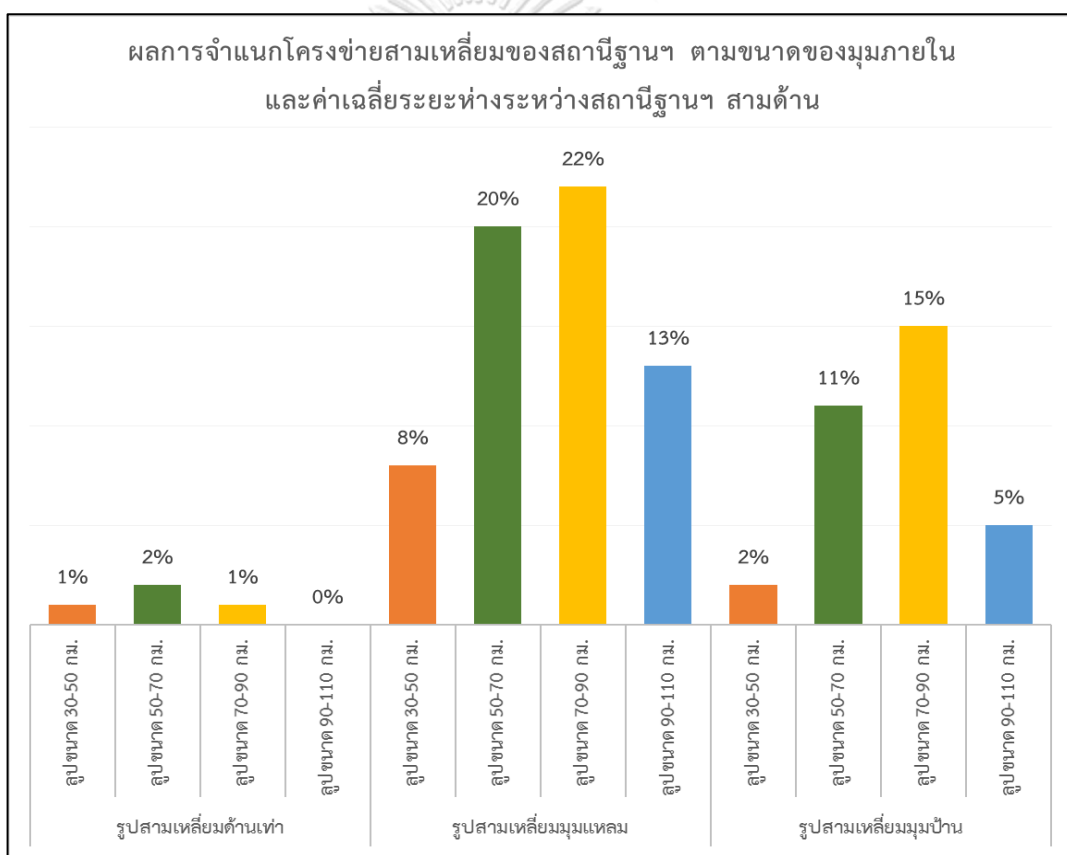
### 3) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- ลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 3 ลูบ มีหมุดทดสอบ 43 หมุด คิดเป็น 2%
- ลูบขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 15 ลูบ มีหมุดทดสอบ 223 หมุด คิดเป็น 11%



- ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 22 ลูบ มีหมุดทดสอบ 325 หมุด คิดเป็น 15%
- ลูบขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนลูบ 7 ลูบ มีหมุดทดสอบ 105 หมุด คิดเป็น 5%

จากข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน ข้อมูลหมุดทดสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร รองลงมาคือลูบขนาด 50-70 และ 90-110 กิโลเมตร และลูบขนาด 30-50 กิโลเมตรมีจำนวนหมุดทดสอบน้อยที่สุด



ภาพที่ 27 กราฟแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน

#### 4.3.3 ผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

สำหรับรายละเอียดผลการจำแนกฯ แสดงตามตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ดังนี้

**ตารางที่ 6** ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

โดยทำการจำแนกตามขนาดของมุมภายใน, จำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบ ของรูปสามเหลี่ยมแต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	Well-Conditioned Triangle		Ill-Conditioned Triangle	
		จำนวนรูป	จำนวนหมุด	จำนวนรูป	จำนวนหมุด
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	5	73	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	81	1,203	10	150
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	23	338	24	358
รวม		109	1,614	34	508
จำนวนรูป / จำนวนหมุด		143		2,122	

##### 4.3.3.1 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle

- รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า มีจำนวนรูป 5 รูป มีหมุดทดสอบ 73 หมุด คิดเป็น 3%
- รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม มีจำนวนรูป 81 รูป มีหมุดทดสอบ 1,203 หมุด คิดเป็น 57%
- รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีจำนวนรูป 23 รูป มีหมุดทดสอบ 338 หมุด คิดเป็น 16%

สำหรับโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ข้อมูลส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม รองลงมาจะเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน และโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีข้อมูลน้อยที่สุด

#### 4.3.3.2 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

- รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ไม่มี
- รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม มีจำนวนรูป 10 รูป มีหมุดทดสอบ 150 หมุด คิดเป็น 7%
- รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีจำนวนรูป 24 รูป มีหมุดทดสอบ 358 หมุด คิดเป็น 17%

สำหรับโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ข้อมูลส่วนใหญ่จะมีลักษณะของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน รองลงมาจะเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

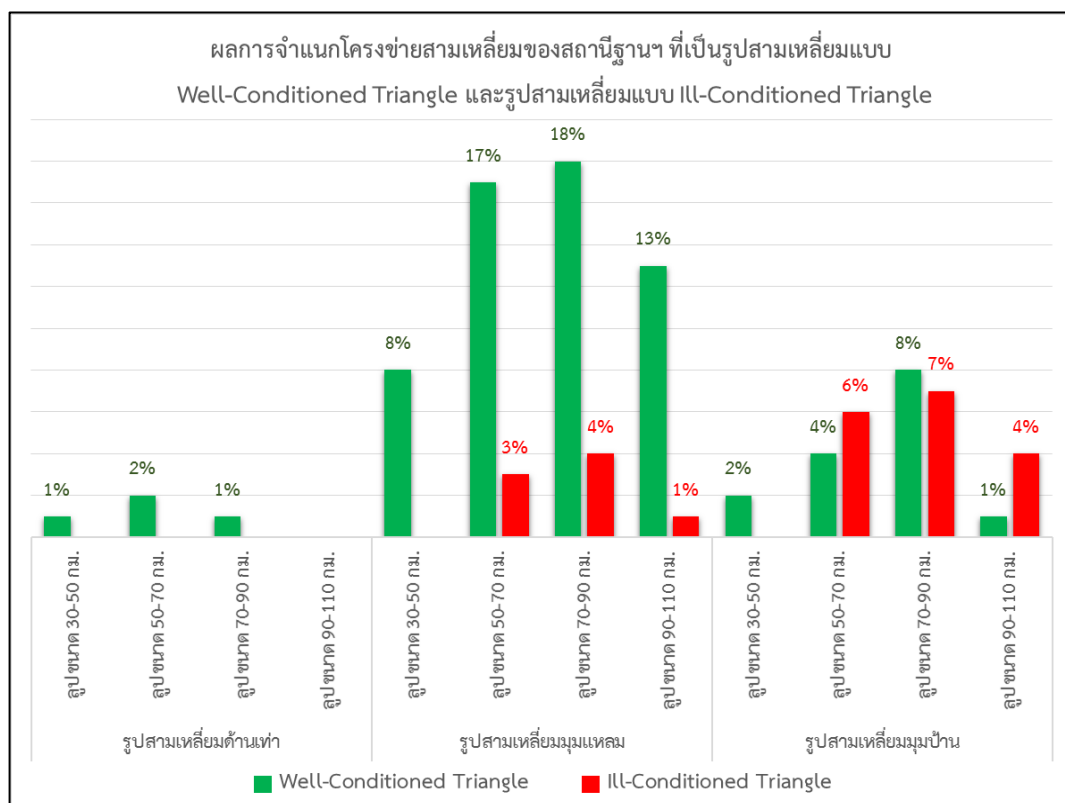
**ตารางที่ 7** ตารางแสดงผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ)

โดยทำการจำแนกตามขนาดของมุมภายใน, ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน, และจำนวนรูป ของรูปสามเหลี่ยมแต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	Well-Conditioned Triangle		Ill-Conditioned Triangle	
			จำนวนรูป	จำนวนมุม	จำนวนรูป	จำนวนมุม
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	1	15	-	-
		50-70	3	44	-	-
		70-90	1	14	-	-
		90-110	-	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	12	180	-	-
		50-70	25	365	4	60
		70-90	26	388	5	75
		90-110	18	270	1	15
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	3	43	-	-
		50-70	6	90	9	133
		70-90	12	175	10	150
		90-110	2	30	5	75
รวม			109	1,614	34	508
จำนวนรูปทั้งหมด/จำนวนมุมทั้งหมด			143		2,122	

### CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับผลการจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle มีรายละเอียดตามภาพที่ 28 ดังนี้



ภาพที่ 28 กราฟแสดงจำแนกลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

#### 4.3.3.3 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle

##### 1) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 1 รูป มีหมุดทดสอบ 15 หมุด คิดเป็น 1%
- รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 3 รูป มีหมุดทดสอบ 44 หมุด คิดเป็น 2%
- รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 1 รูป มีหมุดทดสอบ 14 หมุด คิดเป็น 1%
- รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ไม่มี

## 2) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 12 รูป มีมุมทดสอบ 180 มุม คิดเป็น 8%
- รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 25 รูป มีมุมทดสอบ 365 มุม คิดเป็น 17%
- รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 26 รูป มีมุมทดสอบ 388 มุม คิดเป็น 18%
- รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 18 รูป มีมุมทดสอบ 270 มุม คิดเป็น 13%

## 3) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 3 รูป มีมุมทดสอบ 43 มุม คิดเป็น 2%
- รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 6 รูป มีมุมทดสอบ 90 มุม คิดเป็น 4%
- รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 12 รูป มีมุมทดสอบ 175 มุม คิดเป็น 8%
- รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 2 รูป มีมุมทดสอบ 30 มุม คิดเป็น 1%

จากข้างต้น โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ข้อมูลส่วนใหญ่จะเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม รองลงมาคือโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

#### 4.3.3.4 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

##### 1) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- ไม่มีโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

##### 2) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร ไม่มี
- รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 4 รูป มีหมุดทดสอบ 60 หมุด คิดเป็น 3%
- รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 5 รูป มีหมุดทดสอบ 75 หมุด คิดเป็น 4%
- รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 1 รูป มีหมุดทดสอบ 15 หมุด คิดเป็น 1%

##### 3) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- รูปขนาด 30-50 กิโลเมตร ไม่มี
- รูปขนาด 50-70 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 9 รูป มีหมุดทดสอบ 133 หมุด คิดเป็น 6%
- รูปขนาด 70-90 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 10 รูป มีหมุดทดสอบ 150 หมุด คิดเป็น 7%
- รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร มีจำนวนรูป 5 รูป มีหมุดทดสอบ 75 หมุด คิดเป็น 4%

จากข้างต้น โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ข้อมูลส่วนใหญ่จะเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน รองลงมาคือโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม ส่วนโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าไม่มีลักษณะที่เป็น Ill-Conditioned Triangle

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

สำหรับในหัวข้อนี้ จะแสดงถึงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) โดยใช้การวิเคราะห์ผ่านตัวแปรทางสถิติต่างๆ (รายละเอียดตามข้อที่ 4.2) โดยผลการวิเคราะห์ฯ ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน

รายละเอียดผลการวิเคราะห์ฯ แสดงตามตารางที่ 8 และตารางที่ 9 ดังนี้

**ตารางที่ 8** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	8	100.0	1.4
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	31	98.4	1.4
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	21	97.0	1.5



**ตารางที่ 9** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	0.112	2.7	0.027
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	0.348	3.0	0.034
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	0.232	3.9	0.035

**4.4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน**

รายละเอียดผลการวิเคราะห์ฯ แสดงตามตารางที่ 10 และตารางที่ 11 ดังนี้

**ตารางที่ 10** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	3	100.0	1.5
		50-70	8	100.0	1.4
		70-90	14	100.0	1.4
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	13	100.0	1.5
		50-70	24	98.6	1.5
		70-90	40	98.1	1.4
		90-110	38	97.5	1.4
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	30	100.0	1.5
		50-70	16	97.3	1.5
		70-90	22	97.8	1.5
		90-110	22	92.4	1.4

**ตารางที่ 11** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	0.001	0.0	0.013
		50-70	0.112	4.5	0.031
		70-90	0.044	0.0	0.025
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	0.083	2.2	0.033
		50-70	0.348	3.3	0.036
		70-90	0.162	2.6	0.033
		90-110	0.164	3.9	0.035
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	0.116	4.7	0.033
		50-70	0.101	4.0	0.034
		70-90	0.223	4.6	0.037
		90-110	0.232	1.0	0.034

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน, ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน, ลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 12 ถึงตารางที่ 21 ดังนี้

**ตารางที่ 12** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	Well-Conditioned Triangle	25	98.1	1.5
2	Ill-Conditioned Triangle	32	97.4	1.4

**ตารางที่ 13** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	Well-Conditioned Triangle	0.348	3.2	0.034
2	Ill-Conditioned Triangle	0.232	3.5	0.035

**ตารางที่ 14** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

Well-Conditioned Triangle				
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	8	100.0	1.4
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	27	98.4	1.5
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	23	96.7	1.5

**ตารางที่ 15** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

Well-Conditioned Triangle				
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	0.112	2.7	0.027
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	0.348	2.9	0.034
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	0.223	4.4	0.036

**ตารางที่ 16** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

Ill-Conditioned Triangle				
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	64	98.0	1.4
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	19	97.2	1.5

**ตารางที่ 17** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะของรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

Ill-Conditioned Triangle				
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	0.157	4.0	0.038
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	0.232	3.4	0.034

**ตารางที่ 18** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

Well-Conditioned Triangle					
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	3	100.0	1.5
		50-70	8	100.0	1.4
		70-90	14	100.0	1.4
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	13	100.0	1.5
		50-70	27	98.4	1.5
		70-90	24	98.5	1.4
		90-110	40	97.4	1.4
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	30	100.0	1.5
		50-70	16	98.9	1.5
		70-90	26	97.7	1.5
		90-110	18	80.0	1.6

**ตารางที่ 19** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

Well-Conditioned Triangle					
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	0.026	0.0	0.013
		50-70	0.112	4.5	0.031
		70-90	0.044	0.0	0.025
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	0.130	2.2	0.033
		50-70	0.348	3.8	0.037
		70-90	0.162	1.8	0.031
		90-110	0.164	3.7	0.034
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	0.116	4.7	0.033
		50-70	0.097	3.3	0.034
		70-90	0.223	5.7	0.038
		90-110	0.053	0.0	0.031



**ตารางที่ 20** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)”

Ill-Conditioned Triangle					
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed (วินาที)	ร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ (%)	เรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	-	-	-
		50-70	-	-	-
		70-90	-	-	-
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	-	-	-
		50-70	7	100.0	1.5
		70-90	121	96.0	1.4
		90-110	11	100.0	1.3
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	-	-	-
		50-70	16	96.2	1.5
		70-90	19	98.0	1.5
		90-110	23	97.3	1.4

**ตารางที่ 21** ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle (ต่อ)

สำหรับตัวแปรทางสถิติ ได้แก่ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ”, “อัตราร้อยละของค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบ”

Ill-Conditioned Triangle					
ลำดับ	ประเภทของรูปสามเหลี่ยม	ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานถาวรสามด้าน (กม.)	ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ (ม.)	ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (%)	RMSE ของตำแหน่งทางราบ (ม.)
1	รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	30-50	-	-	-
		50-70	-	-	-
		70-90	-	-	-
		90-110	-	-	-
2	รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	30-50	-	-	-
		50-70	0.075	0.0	0.027
		70-90	0.111	6.7	0.042
		90-110	0.157	6.7	0.053
3	รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	30-50	-	-	-
		50-70	0.101	4.5	0.033
		70-90	0.157	3.3	0.034
		90-110	0.232	1.3	0.035

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ประกอบกับการวิเคราะห์ผลของลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบจากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย ซึ่งดำเนินการในพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีฐานอ้างอิงถาวร จำนวน 143 รูป ในพื้นที่ 63 จังหวัด มีจำนวนหมุดทดสอบทั้งสิ้น 2,122 หมุด โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการศึกษา ข้อจำกัด ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะต่างๆ ของการศึกษาวิจัยนี้ โดยผู้เขียนหวังว่าจะเกิดประโยชน์ และสามารถนำไปปรับใช้ อ้างอิง หรือต่อยอดงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ต่อไป

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ดังที่กล่าวไปในข้อที่ 4.2 ตามตารางที่ 3 ตารางที่ 4 และภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24 นั้น สามารถสรุปได้ ดังนี้

- 1.) ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 16, 21, 32 และ 34 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น สำหรับรูปที่มีขนาดเล็กกว่าจะใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity ที่น้อยกว่ารูปที่มีขนาดใหญ่กว่า
- 2.) ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 98.3%, 98% และ 96.2% ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น อัตราการรับสัญญาณแบบ VRS สำเร็จ มีความสัมพันธ์กับขนาดของรูปโดยตรง กล่าวคือ การรังวัดด้วยเทคนิค

แบบ VRS ในพื้นที่ของลูบที่มีขนาดเล็ก จะมีอัตราการรับสัญญาณ VRS สำเร็จมากกว่าการรับสัญญาณแบบ VRS ในพื้นที่ของลูบที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยเฉพาะลูบที่มีขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร จะมีอัตราการรับสัญญาณแบบ VRS สำเร็จ เท่ากับ 100%

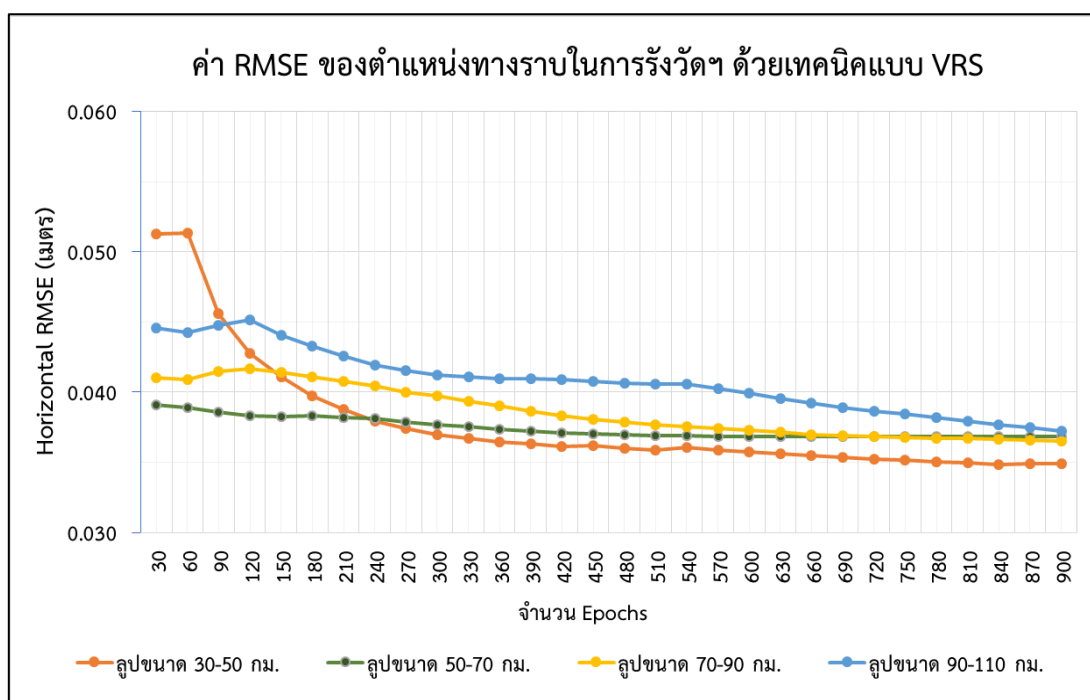
3.) สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของลูบมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS) หลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ) ได้นั่นเอง

4.) สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ของการรับสัญญาณด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่าตั้งแต่ประมาณ 13-23 เซนติเมตร ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า ค่ากระโดดขนาดใหญ่ของตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS อาจเกิดขึ้นได้ในลูบทุกขนาด

5.) ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 2.5%, 3.6%, 3.4% และ 3.1% ตามลำดับ ซึ่งที่ขนาดของลูบ 30-50 กิโลเมตรนั้น มีค่าร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบที่น้อยที่สุด ส่วนลูบที่เหลือมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยจะเห็นว่าค่ากระโดดทางราบของการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น มีอัตราที่เพิ่มขึ้นเมื่อลูบมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การรับสัญญาณด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ของลูบที่มีขนาดเล็ก จะมีจำนวนค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบน้อยกว่าการรับสัญญาณด้วยเทคนิคแบบ VRS ของลูบที่มีขนาดใหญ่กว่า

6.) ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.032, 0.035, 0.035 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าทุกขนาดลูบมีค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบต่ำกว่า 4 เซนติเมตรทั้งหมด และที่ขนาดของลูบที่ไม่เกิน 50 กิโลเมตรจะมีค่า RMSE ของตำแหน่งทางราบที่น้อยที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การรับสัญญาณด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) นั้น ให้ค่าความถูกต้องของตำแหน่งทางราบที่ดีเพียงพอสำหรับการรับสัญญาณแปลงที่ดินในประเทศไทย

นอกจากการวิเคราะห์ผ่านตัวแปรทางสถิติ ดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้วนั้น มีข้อสังเกตเพิ่มเติมเกี่ยวกับจำนวนข้อมูลและระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ซึ่งผลของจำนวนข้อมูลในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ แสดงตามภาพที่ 29



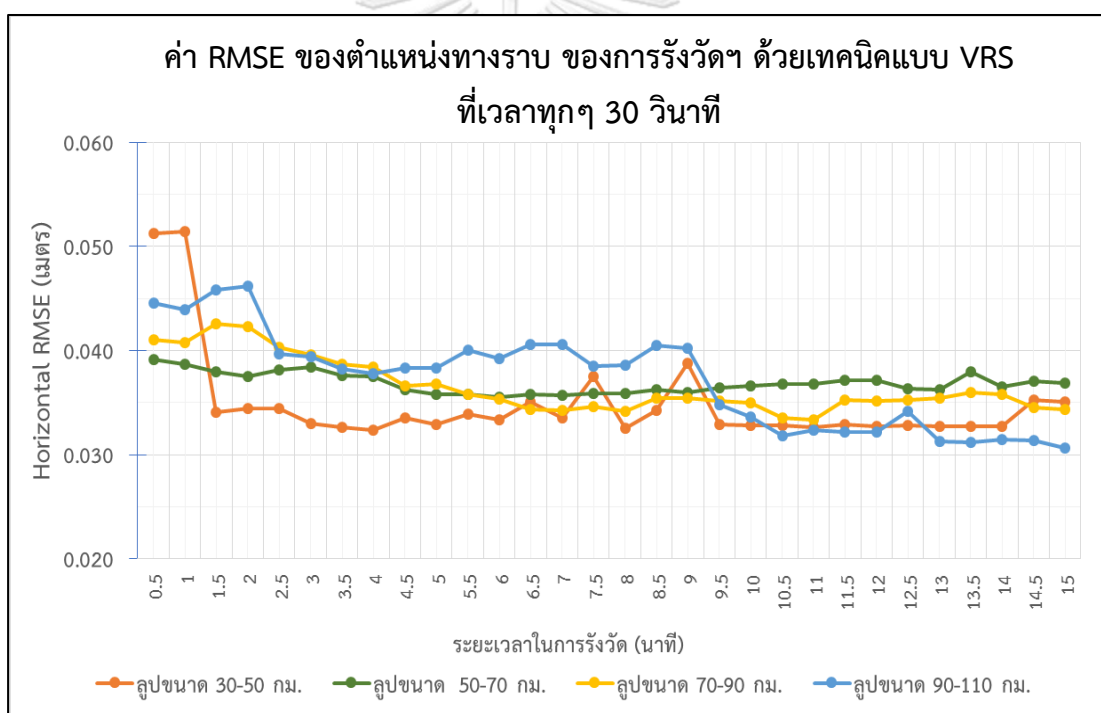
**ภาพที่ 29** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) กับจำนวนข้อมูลในการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS

จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นว่า สำหรับทุกขนาดของลูป จะให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) ที่ลดลงตามจำนวนระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยลูปขนาด 30-50 กิโลเมตร จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตร เมื่อทำการรับข้อมูลดาวเทียมฯ ตั้งแต่ 180 Epochs เป็นต้นไป สำหรับลูปขนาด 50-70 กิโลเมตร ให้ค่า Horizontal RMSE ที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตรตั้งแต่การรับข้อมูลดาวเทียมฯ ใน 30 Epoch แรก ส่วนลูปขนาด 70-90 กิโลเมตรจะให้ค่า Horizontal RMSE ที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตร เมื่อทำการรับข้อมูลดาวเทียมฯ ตั้งแต่ 270 Epoch เป็นต้นไป และลูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า Horizontal RMSE ที่ต่ำกว่า 4 เซนติเมตรตั้งแต่การรับข้อมูลดาวเทียมฯ ตั้งแต่ 570 Epoch เป็นต้นไป และจะเห็นว่าเมื่อ

ทำการรับสัญญาณดาวเทียมฯ นานมากขึ้น ลูบที่มีขนาดเล็กจะให้ค่า Horizontal RMSE ที่ลดลง โดยลูบขนาด 30-50 กิโลเมตร จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่น้อยที่สุด

ดังนั้น จากรายละเอียดข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้ ขนาดของลูบและระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ โดยลูบที่มีขนาดเล็กจะให้ค่า Horizontal RMSE ของตำแหน่งทางราบที่น้อยกว่าลูบที่มีขนาดใหญ่กว่า และค่า Horizontal RMSE จะมีขนาดลดลงเมื่อมีจำนวนข้อมูลหรือระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่เพิ่มมากขึ้น

นอกจากจำนวนข้อมูลในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบแล้วนั้น ระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ก็มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบเช่นเดียวกัน โดยผลของระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ แสดงตามภาพที่ 30



**ภาพที่ 30** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) กับระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ของการรังวัดฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS

จากภาพที่ 30 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาของการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ในช่วงระยะเวลา 2 นาทีแรก มีเพียงลูบขนาด 30-50 และ 50-70 กิโลเมตรเท่านั้น ที่ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE) ที่น้อยกว่า 4 เซนติเมตร ต่อมาในระยะเวลาการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่มากกว่า 2 นาที ค่า Horizontal RMSE ในทุกๆ ขนาดของลูบ

มีแนวโน้มลดลงน้อยกว่า 4 เซนติเมตร แต่สำหรับรูปขนาดใหญ่กว่า 90 กิโลเมตรนั้น อาจจะมีค่า Horizontal RMSE ที่มากกว่า 4 เซนติเมตร แม้จะรับสัญญาณนานกว่า 2 นาทีก็ตาม

ดังนั้น จึงพอสรุปได้ว่า ระยะเวลารวมสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ที่เหมาะสม คือไม่ควรต่ำกว่า 2 นาที

**5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)**

สำหรับผลการวิเคราะห์ฯ มีรายละเอียดตามข้อต่อไปนี้

**5.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน**

1.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” คือ 8, 31 และ 21 วินาที ตามลำดับ

2.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 98.4%, และ 97% ตามลำดับ

3.) สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.) สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น ในโครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าตั้งแต่ประมาณ 11-35 เซนติเมตร

5.) โครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 2.7%, 3.0% และ 3.9% ตามลำดับ

6.) โครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.027, 0.034 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ฯ ข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ”, “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ที่น้อยที่สุด ส่วน “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” มีโอกาสเกิดได้ในโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ทุกรูปแบบ และสำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS) หลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ) ได้นั่นเอง

จากรายละเอียดข้างต้น อาจยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะให้ประสิทธิภาพในการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ดีที่สุด เนื่องจากมีจำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบที่น้อยกว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ รูปแบบอื่นๆ อยู่เป็นจำนวนมาก

**5.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน**

### 1.) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 3, 8 และ 14 วินาที ตามลำดับ



- สำหรับ “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” ที่ทุกขนาดของลูบมีค่าเท่ากัน คือ 100%
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของลูบมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มีค่ามากที่สุด คือ 11 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 0%, 4.5% และ 0% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.013, 0.031 และ 0.025 เมตร ตามลำดับ

## 2.) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 13, 24, 40 และ 38 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 98.6%, 98.1% และ 97.5% ตามลำดับ
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของลูบมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 8-34 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 2.2%, 3.3%, 2.6% และ 3.9% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูบ 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.033, 0.036, 0.033 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ

### 3.) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 30, 16, 22 และ 22 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 97.3%, 97.8% และ 92.4% ตามลำดับ
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของรูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 10-23 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 4.7%, 4.0%, 4.6% และ 1.0% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.033, 0.034, 0.037 และ 0.034 เมตร ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าจะมีประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ดีที่สุด ส่วนโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน สำหรับตัวแปรทางสถิติ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูป ส่วน “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” จะลดลงเมื่อมีขนาดของรูปที่ใหญ่ขึ้น สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” มีโอกาสเกิดได้ในทุกขนาดของรูป ส่วน “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูป แต่โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมป้านมีค่าใกล้เคียงกัน และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ทั้งสองประเภท มีค่าอยู่ระหว่าง 0.033-0.037 เมตร โดยรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่น้อยที่สุด และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูปที่ใหญ่ขึ้น

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS โดยตรง ถึงแม้ผลการวิเคราะห์จะชี้ให้เห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นมีประสิทธิภาพในการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ดีที่สุดก็ตาม แต่โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ดังกล่าว มีจำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบที่น้อยกว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ รูปแบบอื่นๆ อยู่เป็นจำนวนมาก จึงเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ดีพอ และไม่ควรรนำมาใช้เป็นข้อสรุปของการวิเคราะห์ฯ นี้ แต่ประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของรูปมากกว่า โดยในพื้นที่รูปขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดฯ ที่ดีกว่าในพื้นที่รูปขนาดใหญ่

### 5.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

#### 5.2.3.1 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน

1.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” คือ 8, 27 และ 23 วินาที ตามลำดับ

2.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 98.4%, และ 96.7% ตามลำดับ

3.) สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.) สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น ในโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าตั้งแต่ประมาณ 11-35 เซนติเมตร

5.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 2.7%, 2.9% และ 4.4% ตามลำดับ

6.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.027, 0.034 และ 0.036 เมตร ตามลำดับ

สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ”, “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ที่น้อยที่สุด ส่วน “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” มีโอกาสเกิดได้ในโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ทุกรูปแบบ และสำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS) หลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ) ได้นั่นเอง

จากรายละเอียดข้างต้น อาจยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะให้ประสิทธิภาพในการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ดีที่สุด เนื่องจากมีจำนวนรูป และจำนวนหมุดทดสอบที่น้อยกว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ รูปแบบอื่นๆ อยู่เป็นจำนวนมาก

### 5.2.3.2 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน

ไม่มีโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีลักษณะเป็น Ill-Conditioned Triangle

1.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” คือ 64 และ 19 วินาที ตามลำดับ

2.) โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็น รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 98.0%, และ 97.2% ตามลำดับ

3.) สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.) สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น ในโครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่าตั้งแต่ประมาณ 16-23 เซนติเมตร

5.) โครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็น รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 4.0% และ 3.4% ตามลำดับ

6.) โครงข่ายสามเหลี่ยมฯ ที่เป็น รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.038 และ 0.034 เมตร ตามลำดับ

สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle มีเพียงโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้านเท่านั้น และผลการวิเคราะห์ฯ แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ทั้งสองประเภท มีประสิทธิภาพประสิทธิภาพ

ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบก็ยังคงอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 4 เซนติเมตร

**5.2.3.3 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Well-Conditioned Triangle ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน**

#### 1.) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 3, 8 และ 14 วินาที ตามลำดับ
- สำหรับ “อัตราการ้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” ที่ทุกขนาดของรูปมีค่าเท่ากัน คือ 100%
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของรูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มีค่ามากที่สุด คือ 11 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 0%, 4.5% และ 0% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70 และ 70-90 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.013, 0.031 และ 0.025 เมตร ตามลำดับ

#### 2.) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 13, 24, 40 และ 38 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราการ้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 98.6%, 98.1% และ 97.5% ตามลำดับ

- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของรูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 8-34 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 2.2%, 3.3%, 2.6% และ 3.9% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.033, 0.036, 0.033 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ

### 3.) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 30, 16, 22 และ 22 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 97.3%, 97.8% และ 92.4% ตามลำดับ
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของรูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 10-23 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 4.7%, 4.0%, 4.6% และ 1.0% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 30-50, 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.033, 0.034, 0.037 และ 0.034 เมตร ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น จะเห็นว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่ดีที่สุด ส่วนโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน สำหรับตัวแปรทางสถิติ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูป ส่วน “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” จะลดลงเมื่อมีขนาดของรูปที่ใหญ่ขึ้น สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” และ “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” มีโอกาสเกิดได้ในทุกขนาดของรูป ส่วน “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” มีค่าอยู่ระหว่าง 0.031-0.038 เมตร ซึ่งรูปขนาด 30-50 กิโลเมตร จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่น้อยที่สุด และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูปที่ใหญ่ขึ้น และสำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS) หลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ)

**5.2.3.4 โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle ที่จำแนกตามขนาดของมุมภายใน และค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน**

#### 1.) รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

ไม่มีโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle

#### 2.) รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม

- ที่ขนาดของรูป 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 7, 121 และ 11 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของรูป 50-70, 70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 100%, 96% และ 100% ตามลำดับ



- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของลูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.3-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 7-15 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 0%, 6.7% และ 6.7% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.027, 0.042 และ 0.053 เมตร ตามลำดับ

### 3.) รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร ให้ค่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity” ที่ 16, 19 และ 23 วินาที ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” คือ 96.2%, 98.0% และ 97.3% ตามลำดับ
- สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” นั้น ที่ทุกขนาดของลูปมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.4-1.5 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ
- สำหรับ “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีตั้งแต่ 10-23 เซนติเมตร
- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มีค่า “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” เท่ากับ 4.5%, 3.3% และ 1.3% ตามลำดับ
- ที่ขนาดของลูป 50-70,70-90 และ 90-110 กิโลเมตร มี “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” คือ 0.033, 0.034 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ

สำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแบบ III-Conditioned Triangle มีแค่โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้านเพียง 2 ประเภทเท่านั้น และไม่มีลูปขนาด 30-50 กิโลเมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์ฯ แสดงให้เห็นว่า “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed

Ambiguity” มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของลูป ส่วน “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีขนาดของลูปที่ใหญ่ขึ้น สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอส (GNSS) หลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ) ได้นั่นเอง ส่วน “ค่ากระโดดสูงสุดของตำแหน่งทางราบ” และ “ร้อยละของค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ” มีโอกาสเกิดได้ในทุกขนาดของลูป และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” มีค่าอยู่ระหว่าง 0.027-0.053 โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของลูปที่ใหญ่ขึ้น

สำหรับสำหรับผลการวิเคราะห์ฯ แสดงให้เห็นว่ามีโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่ให้ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ที่เกิน 4 เซนติเมตร ได้แก่ โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม โดยมีค่า Horizontal RMSE อยู่ที่ 0.042 เมตร ซึ่งเป็นลูปขนาด 70-90 กิโลเมตร และมีค่า Horizontal RMSE อยู่ที่ 0.053 เมตร ที่ลูปขนาด 90-110 กิโลเมตร แต่มีจำนวนลูปเพียง 5 และ 1 ลูป ตามลำดับ ซึ่งยังไม่อาจสรุปได้ว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงฯ ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ไม่ดี เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลน้อยเกินไป

#### 5.2.4 ข้อสังเกต

1.) เมื่อทำการคำนวณค่าตัวแปรทางสถิติต่างๆ (รายละเอียด ดูข้อที่ 4.2) แยกออกเป็นแต่ละลูป พบว่า มีลูปที่ให้ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร จำนวน 110 ลูป และเกินกว่า 4 เซนติเมตร จำนวน 33 ลูป และเมื่อพิจารณาเฉพาะลูปที่ให้ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร พบว่าลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงฯ นั้น มีทั้งที่เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน และมีลักษณะเป็นทั้ง Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle คละกันไป โดยไม่ได้มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐาน

อ้างอิงๆ รูปแบบใด ที่จะส่งผลให้ได้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร รายละเอียด ตามตารางที่ 24 ดังนี้

**ตารางที่ 22** ตารางแสดงข้อมูลของกลุ่มที่มีค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร

ลำดับ	ชื่อรูป	ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูป สามเหลี่ยม		ค่า RMSE ทางราบ (ม.)
1	HACH-SMNM-WGCN	30-50	42.5	มุมแหลม	III	0.048
2	CNBR-PLDG-PNNK	30-50	45.3	มุมแหลม	Well	0.055
3	RATP-SADO-SOKA	30-50	47.7	มุมป้าน	III	0.046
4	PTLG-RAND-RATP	50-70	53.3	มุมแหลม	III	0.043
5	KSSB-NROA-SCHP	50-70	54.1	ด้านเท่า	Well	0.046
6	BTRG-DUDM-KHJM	50-70	56.2	มุมป้าน	III	0.041
7	SADO-SOKA-TEPA	50-70	57.1	มุมแหลม	III	0.043
8	PPRM-SISA-UTTD	50-70	58.6	มุมป้าน	III	0.042
9	RAND-RATP-SOKA	50-70	59.2	มุมแหลม	Well	0.045
10	BORI-CHAN-SDAO	50-70	59.5	มุมแหลม	Well	0.047
11	CHMA-HACH-JAHM	50-70	59.9	มุมแหลม	Well	0.050
12	CHAN-KLNG-RAYG	50-70	62	มุมแหลม	Well	0.095
13	DKTN-NKRM-WNKH	50-70	68.2	มุมป้าน	Well	0.040
14	LOMS-SDAN-TPHN	70-90	73.5	มุมแหลม	III	0.045
15	BTAK-MSOD-THSY	70-90	75.1	มุมแหลม	III	0.041
16	DUDM-MSSB-SISK	70-90	76.2	มุมแหลม	Well	0.055
17	BNST-SADO-TEPA	70-90	77.3	มุมป้าน	Well	0.042
18	CHKN-SKOM-WSPG	70-90	78	มุมแหลม	Well	0.043
19	BOKO-CLPK-PONG	70-90	79.4	มุมแหลม	Well	0.044
20	DUDM-NAMY-SISK	70-90	79.7	มุมแหลม	Well	0.046

ลำดับ	ชื่อรูป	ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูป สามเหลี่ยม		ค่า RMSE ทางราบ (ม.)
21	KPNG-SICN-SRTN	70-90	80.5	มุมป้าน	Well	0.068
22	BTAK-SISA-WGCN	70-90	81.4	มุมป้าน	Well	0.059
23	BRAI-SPBR-UTHI	70-90	81.7	มุมป้าน	Well	0.041
24	CHTK-LOMS-PPRM	70-90	82.4	มุมป้าน	Well	0.044
25	CHMA-HACH-MEJM	70-90	82.9	มุมป้าน	Ill	0.049
26	BKOK-NANO-UTTD	70-90	87.8	มุมป้าน	Ill	0.044
27	BTAK-SMNM-WGCN	70-90	88.4	มุมแหลม	Well	0.068
28	BKOK-BOKO-NANO	90-110	92.6	มุมแหลม	Ill	0.053
29	CHDN-NKSW-UTHI	90-110	92.9	มุมป้าน	Well	0.066
30	AMKO-MEJM-SMNM	90-110	93.6	มุมแหลม	Well	0.044
31	SICN-SRTN-TGSG	90-110	93.8	มุมแหลม	Well	0.050
32	KSSB-LOMS-SDAN	90-110	95.4	มุมแหลม	Well	0.067
33	BOKO-NANO-PONG	90-110	99.1	มุมแหลม	Well	0.045

หมายเหตุ **Well** คือ รูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นแบบ Well-Conditioned Triangle และ **Ill** คือ รูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นแบบ Ill-Conditioned Triangle

2.) สำหรับรูปที่ให้ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตรนั้น ส่วนใหญ่เป็นรูปที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 กิโลเมตร ซึ่งมีจำนวน 30 รูป จากจำนวนรูปทั้งหมด 33 รูป ด้วยเหตุผลนี้จึงสอดคล้องกับข้อสรุปที่ว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของรูปโดยตรง

3.) เมื่อพิจารณาเพิ่มเติม พบว่ารูปที่ให้ค่า ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร จำนวน 19 รูป โดยในแต่ละรูป จะมีสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) อย่างน้อย 1 สถานีที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Reference Receiver Model) ที่รับสัญญาณจากกลุ่มดาวเทียมได้เพียง 2 ระบบ ได้แก่ GPS และ GLONASS โดยมีรายละเอียด ตามตารางที่ 25 ดังนี้ (รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย จะแสดงในภาคผนวก)

ตารางที่ 23 ตารางแสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่มีแนวโน้มที่จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร

ลำดับ	ชื่อรูป	ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูปสามเหลี่ยม		ค่า RMSE ทางราบ (ม.)
1	HACH-SMNM-WGCN	30-50	42.5	มุมแหลม	III	0.048
2	CNBR-PLDG-PNNK	30-50	45.3	มุมแหลม	Well	0.055
3	RATP-SADO-SOKA	30-50	47.7	มุมป้าน	III	0.046
4	PTLG-RAND-RATP	50-70	53.3	มุมแหลม	III	0.043
5	KSSB-NROA-SCHP	50-70	54.1	ด้านเท่า	Well	0.046
6	BTRG-DUDM-KHJM	50-70	56.2	มุมป้าน	III	0.041
7	SADO-SOKA-TEPA	50-70	57.1	มุมแหลม	III	0.043
8	PPRM-SISA-UTTD	50-70	58.6	มุมป้าน	III	0.042
9	RAND-RATP-SOKA	50-70	59.2	มุมแหลม	Well	0.045
10	BORI-CHAN-SDAO	50-70	59.5	มุมแหลม	Well	0.047
11	CHMA-HACH-JAHM	50-70	59.9	มุมแหลม	Well	0.050
12	CHAN-KLNG-RAYG	50-70	62	มุมแหลม	Well	0.095
13	DKTN-NKRM-WNKH	50-70	68.2	มุมป้าน	Well	0.040
14	LOMS-SDAN-TPHN	70-90	73.5	มุมแหลม	III	0.045
15	BTAK-MSOD-THSY	70-90	75.1	มุมแหลม	III	0.041
16	DUDM-MSSB-SISK	70-90	76.2	มุมแหลม	Well	0.055
17	BNST-SADO-TEPA	70-90	77.3	มุมป้าน	Well	0.042
18	CHKN-SKOM-WSPG	70-90	78	มุมแหลม	Well	0.043
19	BOKO-CLPK-PONG	70-90	79.4	มุมแหลม	Well	0.044
20	DUDM-NAMY-SISK	70-90	79.7	มุมแหลม	Well	0.046

ลำดับ	ชื่อรูป	ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูป สามเหลี่ยม		ค่า RMSE ทางราบ (ม.)
21	KPNG-SICN- <span style="background-color: red;">SRTN</span>	70-90	80.5	มุมป้าน	Well	0.068
22	BTAK-SISA-WGCN	70-90	81.4	มุมป้าน	Well	0.059
23	BRAI- <span style="background-color: red;">SPBR</span> -UTHI	70-90	81.7	มุมป้าน	Well	0.041
24	CHTK-LOMS-PPRM	70-90	82.4	มุมป้าน	Well	0.044
25	<span style="background-color: red;">CHMA</span> -HACH-MEJM	70-90	82.9	มุมป้าน	Ill	0.049
26	BKOK-NANO- <span style="background-color: red;">UTTD</span>	70-90	87.8	มุมป้าน	Ill	0.044
27	BTAK-SMNM-WGCN	70-90	88.4	มุมแหลม	Well	0.068
28	BKOK-BOKO-NANO	90-110	92.6	มุมแหลม	Ill	0.053
29	CHDN- <span style="background-color: red;">NKSW</span> -UTHI	90-110	92.9	มุมป้าน	Well	0.066
30	AMKO-MEJM-SMNM	90-110	93.6	มุมแหลม	Well	0.044
31	SICN- <span style="background-color: red;">SRTN</span> -TGSG	90-110	93.8	มุมแหลม	Well	0.050
32	KSSB-LOMS-SDAN	90-110	95.4	มุมแหลม	Well	0.067
33	BOKO-NANO-PONG	90-110	99.1	มุมแหลม	Well	0.045

หมายเหตุ            คือ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS

           คือ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ TRIMBLE รุ่น NETR5

\*\* ในการคำนวณ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ของแต่ละรูปนั้น ไม่ได้มีการกำจัด “ค่ากระโดดทางตำแหน่งทางราบ” ที่มีขนาดใหญ่ ออก เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นข้อมูลที่สะท้อนถึงความเป็นจริง

### 5.3 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.3.1 ข้อเสนอสรุปผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) สำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

จากผลการวิเคราะห์ฯ ในข้อ 5.1 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1.) เนื่องจากผลการศึกษาวิจัยชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความสัมพันธ์กับขนาดของลูปโดยตรง กล่าวคือ ในพื้นที่ลูปขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีกว่าในพื้นที่ลูปขนาดใหญ่ ในแง่ของ “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)”

2.) ขนาดของลูปที่ให้ประสิทธิภาพของการรังวัดแปลงที่ดินด้วยเทคนิคการรังวัดแบบ VRS ที่ดีที่สุด คือลูปที่มีขนาดไม่เกิน 50 กิโลเมตร เนื่องจากพบว่าที่ขนาดของลูป 30-50 กิโลเมตร มี “ระยะเวลาในการเข้าสู่โหมด Fixed Ambiguity”, “อัตราร้อยละที่รับสัญญาณ VRS สำเร็จ” และ “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับลูปขนาดอื่นๆ

3.) สำหรับ “ค่าเรขาคณิตดาวเทียม (PDOP)” ที่ทุกขนาดของลูปมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากในปัจจุบันมีกลุ่มดาวเทียมนำทางจีเอ็นเอสเอสหลายกลุ่ม (GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou เป็นต้น) ทำให้ข้อมูลจากดาวเทียม (Visible Satellite) ในแต่ละพื้นที่มีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถให้ค่าเรขาคณิตของดาวเทียมที่ดี (PDOP ต่ำ) ได้นั่นเอง

4.) ไม่แนะนำให้ทำการรังวัดแปลงที่ดินในลูปที่มีขนาดใหญ่กว่า 90 กิโลเมตร เนื่องจากพบความไม่แน่นอนของค่าพิกัดทางราบที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร ในขณะที่ทำการรับสัญญาณฯ ซึ่งอาจจะส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้ มีค่าเกินกว่า 4 เซนติเมตร

5.) ระยะเวลารวมสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ที่เหมาะสม คือไม่ควรต่ำกว่า 2 นาที เนื่องจากระยะเวลาในการรับสัญญาณรวมตั้งแต่ 2 นาทีขึ้นไป ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ได้จะมีแนวโน้มที่ดีกว่า 4 เซนติเมตร

7.) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร เทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) นั้นให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งดีเพียงพอสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

### 5.3.2 ข้อสรุปของการวิเคราะห์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

จากผลการวิเคราะห์ฯ ในข้อ 5.2 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1.) สำหรับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ทั้งวิธีการจำแนกตามขนาดของมุมภายใน ออกเป็นรูปสามเหลี่ยม 3 ประเภท ได้แก่ รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน และวิธีการจำแนกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และรูปสามเหลี่ยมแบบ Ill-Conditioned Triangle นั้น ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่า “ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในตำแหน่งทางราบ (Horizontal RMSE)” ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ สำหรับรูปสามเหลี่ยมทุกประเภทที่ทำการศึกษามีค่าเฉลี่ยที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร ซึ่งดีเพียงพอสำหรับการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย

2.) จากการทดสอบทางสถิติ ผลการทดสอบยืนยันว่าลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ไม่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) โดยผลการทดสอบทางสถิตินี้ จะแสดงในภาคผนวก ค.



3.) จากเหตุผลข้างต้น อาจพอสรุปได้ว่า ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ในแง่ของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ

4.) แต่เมื่อทำการศึกษาประกอบกับค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรสามด้าน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความสัมพันธ์กับขนาดของลูปโดยตรง โดยลูปที่มีขนาดเล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีกว่าลูปที่มีขนาดใหญ่กว่า

### 5.3.3 ข้อเสนอแนะ

1.) เนื่องจากผลการศึกษาวิจัยชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความสัมพันธ์กับขนาดของลูปโดยตรง กล่าวคือ ในพื้นที่ลูปขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีกว่าในพื้นที่ลูปขนาดใหญ่ โดยขนาดของลูปที่ไม่เกิน 50 กิโลเมตรจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการรังวัดที่ดีที่สุด ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการรังวัดแปลงที่ดินด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ให้ดียิ่งขึ้น ควรมีการติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรเพิ่มเติม เพื่อให้ลูปมีขนาดที่เล็กลง

2.) เนื่องจากระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีผลต่อความถูกต้องของตำแหน่งทางราบ ดังนั้น จึงควรที่จะศึกษาถึงระยะเวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่เหมาะสมสำหรับงานรังวัดแปลงที่ดินต่อไป

3.) จากผลการศึกษาพบว่า ในการรับสัญญาณดาวเทียมของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS นั้น ที่ทุกขนาดของลูป จะมี “ค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบ (Horizontal position jump)” ที่มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 4 เซนติเมตร) แฝงอยู่ด้วย โดยค่ากระโดดของตำแหน่งทางราบขนาดใหญ่ นี้ จะไม่แสดงให้ผู้ปฏิบัติงานเห็นผ่านทางเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่ใช้งาน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก ก่อนการนำเอาค่าพิกัดที่ได้มาใช้งาน และควรมีวิธีการเพื่อตรวจสอบ และจัดการกับค่ากระโดด

ขนาดใหญ่เหล่านี้ เพื่อให้ค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ ด้วยเทคนิคแบบ VRS มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือมากขึ้น

4.) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อศึกษาเรื่องลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยตรง โดยวิธีการศึกษาวิจัยนี้ ผู้เขียนได้กำหนดสมมติฐาน และวิธีการศึกษาวิจัยขึ้นมาจากข้อมูลที่มีอยู่เท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้ผลการศึกษาวิจัยมีความน่าเชื่อถือ และสามารถใช้อ้างอิงได้อย่างมีมาตรฐาน ควรมีการออกแบบวิธีการเก็บข้อมูล วิธีการศึกษาวิจัย และวิธีการประมวลผลที่เหมาะสม ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมาก

5.) สำหรับรูปที่มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร อาจเกิดได้จากหลายปัจจัย ยกตัวอย่างจากข้อสังเกตที่พบ คือคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้เป็นสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) ที่รับสัญญาณดาวเทียมได้เพียง 2 ระบบ คือ GPS และ GLONASS มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร เป็นต้น ดังนั้น จึงควรมีการหาสาเหตุที่ส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร เพิ่มเติมต่อไป

6.) ในการศึกษาวิจัยนี้ ใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Trimble Business Center (TBC) 4.1 ในการประมวลผลข้อมูลการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเพียงซอฟต์แวร์เดียวเท่านั้น ผู้เขียนมีความคิดเห็นว่า ควรใช้ซอฟต์แวร์การประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสเชิงวิจัย เช่น ได้แก่ Bernese, GIPSY-OASIS II หรือ GAMIT/GLOBK/TRACK ในการประมวลผลเพิ่มเติม

7.) ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสยี่ห้อและรุ่นอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความหลากหลายและความน่าเชื่อถือของงานวิจัยให้มากขึ้น



# ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเครื่องรับสัญญาณ  
ดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้ในงานวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification)  
ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80



CHC i-80 ถือเป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของ CHC ในปัจจุบัน ด้วยการออกแบบที่รวมจานรับสัญญาณ (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 เซนติเมตร 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)

**ข้อมูลเกี่ยวกับการรับสัญญาณ GNSS**

- 220 Channels พร้อมระบบติดตามสัญญาณดาวเทียม (Simultaneously tracked satellite signal)
  - GPS: L1C/A, L2C, L2E, L5

- GLONASS: L1C/A,L1P, L2C/A, L2P, L3
- Galileo: E1, E5A, E5B
- BeiDou: B1, B2

- SBAS: L1C/A, L5 (QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN)

### ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (GNSS

#### Accuracies)

- SBAS ค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (RMSE) : 0.5 เมตร

#### การรังวัดแบบ High-precision Static

- ทางราบ : 2.5 มม. + 0.1 ppm RMS
- ทางตั้ง : 3.5 มม. + 0.4 ppm RMS
- ระยะเส้นฐาน :  $\leq 300$  กม.

#### Post Processed Kinematic (PPK)

- ทางราบ : 8 มม. + 1 ppm RMS
- ทางตั้ง : 15 มม. + 1 ppm RMS

#### ● RTK

- ทางราบ : 8 มม. + 1 ppm RMS
- ทางตั้ง : 15 มม. + 1 ppm RMS
- Initialization time < 5 วินาที
- Initialization reliability > 99.9%

#### ● Network RTK

- ทางราบ : 8 มม. + 0.5 ppm RMS
- ทางตั้ง : 15 มม. + 0.5 ppm RMS
- Initialization time < 10 วินาที
- Initialization reliability > 99.9%

### อุปกรณ์ (Hardware)

- ขนาด (กxย): 14 ซม. x 12.4 ซม. (5.5 นิ้ว x 4.9 นิ้ว)

- น้ำหนัก: 1.02 กิโลกรัม / 1.22 กิโลกรัม พร้อมแบตเตอรี่

#### ● สภาพการใช้งาน (Environment)

- ระยะเวลาทำงาน : -40 °C ถึง +75 °C
- การเก็บรักษา : -55 °C ถึง +85 °C

- ความชื้น : การควบคุม 100%

- การป้องกันฝุ่นและน้ำ : IP68 ป้องกันได้ชั่วคราวที่ความลึก 1 ม.

- การป้องกันการตกกระแทก : 2 เมตร MILSTD810G

- จอ LCD: 128x64 dpi สามารถใช้งานกลางแจ้งได้

### การรับรองและการวัดสอบ (Certifications and Calibrations)

- FCC Part 15 (class B Device), FCC Part 22, 24, 90 ; CE Mark C-Tickk; Bluetooth EPL, IGS & NGS Antenna Calibration, MILSTD810G.

### การสื่อสารและการจัดเก็บข้อมูล

- Serial: 2 x 7pin LEMO port (external power, USB data download, USB update, RS232)
- Cellular: Internally integrated 3.75G modem
  - HSPA+ 21 Mbps (download), 5.76 Mbps (upload)

- WCDMA  
850/900/1700/1900/2100
- EDGE/GPRS/GSM  
850/900/1800/1900
- Bluetooth®: ติดตั้งภายใน สามารถใช้งานร่วมกับระบบ Android, Windows Mobile and Windows และ Desktop operating systems.
- WiFi: 802.11 b/g/n, access point mode
- UHF Radios (2): Protected TNC Female

- Protocols

- CMR,CMR+, sCMRx input และ output
- RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2 input และ output
- NMEA 0183 output
- HCN และ RINEX static formats
- NTRIP Client, NTRIP Caster

- Data Storage

- 32 GB high-speed memory
- Position ingrates: สูงสุด 20Hz

### ภาคไฟฟ้า (Electrical)

- Standard Internal Rx/Tx: 410 470 Mhz; Transmit power: 0.5 W to 2 W; Protocol CHC, Trimble, Pacific Crest; Range: 5 km optimal conditions
- FCC Certified Internal Rx/Tx: 403473 Mhz; Transmit power: 0.1 W to 1 W; Protocols Trimble, Satel, Pacific Crest; Range: 5 km optimal conditions
- FCC Certified Internal Rx/Tx: 865-867 MHz, India license free; Transmit power: 0.1W to 1W; Protocol Satel;Range: 5 km optimal conditions
- Power consumption: <3.2 W
- Li-ion battery capacity: 2 × 3400 mAh, 7.4 V
- เวลาในการทำงาน (Operating time) :
  - RTK UHF ชั้นต่ำ : 6 ชั่วโมง
  - RTK Rover : 12 ชั่วโมง
  - Static : 12 ชั่วโมง
  - External power: 12 to 36 V DC

## รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) : ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ที่ใช้เป็นสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS)

สำหรับในงานวิจัยนี้ มีสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรของกรมที่ดินจำนวน 99 สถานี โดยเป็นสถานีฐานถาวรจำนวน 92 สถานี และสถานีฐานถาวรแบบติดตั้งชั่วคราว อีกจำนวน 7 สถานี และข้อมูลจากสถานีฐานฯ ของกรมโยธาธิการและผังเมืองจำนวน 15 สถานี รวมทั้งสิ้น 114 สถานี กระจายอยู่ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย (ข้อมูลเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560) โดยมีรายละเอียด ตามตารางที่ 26 ดังนี้

ตารางที่ 24 ตารางแสดงรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯ ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (ยี่ห้อ/รุ่น)	ประเภท	จำนวน	หน่วยงาน	กลุ่มดาวเทียมที่ได้รับ
CHC N72	สถานีฐานถาวร (CORS)	92	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/ Galileo/Beidou
TRIMBLE NETR9	สถานีฐานถาวร (CORS)	2	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/ Galileo/Beidou /QZSS
TRIMBLE NETR5	สถานีฐานถาวร (CORS)	5	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS
LEICA GX1230+GNSS	สถานีฐานถาวร (CORS)	15	กรมโยธาธิการ และผังเมือง	GPS/GLONASS
CHC i80	สถานีจร (Rover)	N/A	กรมที่ดิน	GPS/GLONASS/ Galileo/Beidou

### ข้อสังเกต

1.) หากใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เป็นสถานีจรในการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีแบบ Fast Static หรือวิธีแผนที่ขึ้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์แล้วแต่กรณีนั้น ค่าพิกัดที่ได้รับทั้งจากการประมวลผลในภายหลังหรือได้รับค่าพิกัดในทันทีในสนาม จะแบ่งได้เป็นกรณีดังต่อไปนี้ (กรมที่ดิน, 2562)



- 1.1 หากทำการประมวลผลในภายหลังแบบ Fast Static โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงถาวร ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS เป็นสถานีฐานอ้างอิง (Base Station) ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS และ GLONASS เพียงสองระบบเท่านั้น
- 1.2 หากทำการประมวลผลในภายหลังแบบ Fast Static โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงถาวร ยี่ห้อ Trimble รุ่น NETR5 เป็นสถานีฐานอ้างอิง (Base Station) ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS และ GLONASS เพียงสองระบบเท่านั้น
- 1.3 หากทำการประมวลผลในภายหลังแบบ Fast Static โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงถาวร ยี่ห้อ Trimble รุ่น NETR9 เป็นสถานีฐานอ้างอิง (Base Station) ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou ทั้งสี่ระบบ แต่จะไม่ได้รับประโยชน์จากข้อมูลของกลุ่มดาวเทียม QZSS
- 1.4 หากทำการประมวลผลในภายหลังแบบ Fast Static โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงถาวร ยี่ห้อ CHC รุ่น N72 เป็นสถานีฐาน (Base Station) ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou ทั้งสี่ระบบ
- 1.5 หากได้รับค่าพิกัดในทันทีในสนามจากวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีใดสถานีหนึ่ง มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS หรือยี่ห้อ Trimble รุ่น NETR5 ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS และ GLONASS เพียงสองระบบเท่านั้น
- 1.6 หากได้รับค่าพิกัดในทันทีในสนามจากวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยสถานีฐานอ้างอิงถาวรที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมทั้งสามสถานีเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น N72 หรือยี่ห้อ Trimble รุ่น NETR9 ค่าพิกัดที่ได้รับ จะมาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลของกลุ่มดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS, Galileo และ Beidou ทั้งสี่ระบบ

2.) จากข้อที่ 5.2.4 ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นข้อสังเกตที่พบจากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการรับสัญญาณระบบดาวเทียม GNSS ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Reference Receiver Model) ที่ใช้เป็นสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (CORS) ที่รับสัญญาณจากกลุ่มดาวเทียมได้เพียง 2 ระบบ ได้แก่ GPS และ GLONASS มีแนวโน้มจะทำให้ลูบที่มีสถานีฐานอ้างอิงฯ ดังกล่าว อย่างน้อย

1 สถานี มีแนวโน้มที่จะให้ค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร โดยรายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมฯที่ใช้ในสถานีฐานอ้างอิงฯ ดังกล่าว แสดงตามตารางที่ 27 ดังนี้

**ตารางที่ 25** ตารางแสดงข้อมูลของรูปที่มีค่า Horizontal RMSE ที่เกินกว่า 4 เซนติเมตร ที่มีสถานีฐานอ้างอิงฯ อย่างน้อย 1 สถานี ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ 2 ระบบ ได้แก่ GPS และ GLONASS

ลำดับ	ชื่อรูป			ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูปสามเหลี่ยม		RMSE ทางราบ (ม.)
1	HACH	SMNM	WGCN	30-50	42.5	มุมแหลม	Ill	0.048
2	CNBR	PLDG	PNNK	30-50	45.3	มุมแหลม	Well	0.055
3	RATP	SADO	SOKA	30-50	47.7	มุมป้าน	Ill	0.046
4	PTLG	RAND	RATP	50-70	53.3	มุมแหลม	Ill	0.043
5	KSSB	NROA	SCHP	50-70	54.1	ด้านเท่า	Well	0.046
6	BTRG	DUDM	KHJM	50-70	56.2	มุมป้าน	Ill	0.041
7	SADO	SOKA	TEPA	50-70	57.1	มุมแหลม	Ill	0.043
8	PPRM	SISA	UTTD	50-70	58.6	มุมป้าน	Ill	0.042
9	RAND	RATP	SOKA	50-70	59.2	มุมแหลม	Well	0.045
10	BORI	CHAN	SDAO	50-70	59.5	มุมแหลม	Well	0.047
11	CHMA	HACH	JAHM	50-70	59.9	มุมแหลม	Well	0.050
12	CHAN	KLNG	RAYG	50-70	62	มุมแหลม	Well	0.095
13	DKTN	NKRM	WNKH	50-70	68.2	มุมป้าน	Well	0.040
14	LOMS	SDAN	TPHN	70-90	73.5	มุมแหลม	Ill	0.045
15	BTAK	MSOD	THSY	70-90	75.1	มุมแหลม	Ill	0.041
16	DUDM	MSSB	SISK	70-90	76.2	มุมแหลม	Well	0.055
17	BNST	SADO	TEPA	70-90	77.3	มุมป้าน	Well	0.042
18	CHKN	SKOM	WSPG	70-90	78	มุมแหลม	Well	0.043
19	BOKO	CLPK	PONG	70-90	79.4	มุมแหลม	Well	0.044
20	DUDM	NAMY	SISK	70-90	79.7	มุมแหลม	Well	0.046

ลำดับ	ชื่อรูป			ขนาดของรูป (กม.)		ประเภทของรูป สามเหลี่ยม		RMSE ทางราบ (ม.)
21	KPNG	SICN	SRTN	70-90	80.5	มุมป้าน	Well	0.068
22	BTAK	SISA	WGCN	70-90	81.4	มุมป้าน	Well	0.059
23	BRAI	SPBR	UTHI	70-90	81.7	มุมป้าน	Well	0.041
24	CHTK	LOMS	PPRM	70-90	82.4	มุมป้าน	Well	0.044
25	CHMA	HACH	MEJM	70-90	82.9	มุมป้าน	Ill	0.049
26	BKOK	NANO	UTTD	70-90	87.8	มุมป้าน	Ill	0.044
27	BTAK	SMNM	WGCN	70-90	88.4	มุมแหลม	Well	0.068
28	BKOK	BOKO	NANO	70-90	92.6	มุมแหลม	Ill	0.053
29	CHDN	NKSW	UTHI	90-110	92.9	มุมป้าน	Well	0.066
30	AMKO	MEJM	SMNM	90-110	93.6	มุมแหลม	Well	0.044
31	SICN	SRTN	TGSG	90-110	93.8	มุมแหลม	Well	0.050
32	KSSB	LOMS	SDAN	90-110	95.4	มุมแหลม	Well	0.067
33	BOKO	NANO	PONG	90-110	99.1	มุมแหลม	Well	0.045

**หมายเหตุ Well** คือ รูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นแบบ Well-Conditioned Triangle

**Ill** คือ รูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นแบบ Ill-Conditioned Triangle

**■** คือ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS

**■** คือ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ TRIMBLE รุ่น NETR5

- เป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 9 สถานี จากทั้งหมด 12 สถานี
- เป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ TRIMBLE รุ่น NETR5 ของกรมที่ดิน จำนวน 5 สถานี จากทั้งหมด 5 สถานี
- ที่เหลือเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ CHC รุ่น N72 ของกรมที่ดิน

## 1. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม 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

- 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

### 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



## 2. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ TRIMBLE รุ่น 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

- 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%

### ประสิทธิภาพของการรังวัด (Positioning

#### Performance)

- **Code Differecntial 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

- **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 ,GSOF

- **Static GNSS Surveying.**

- **Baseline < 30 กม.**
- ทางราบ : 3 มม. + 0.1 ppm RMS

- **Antenna**

- Trimble Zephyr Geodetic 2
- Trimble GNSS Choke Ring.



### 3. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ TRIMBLE รุ่น 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 Differecntial GNSS

##### Positioning

- ทางราบ :  $\pm 0.25$  ม. + 1 ppm RMS
- ทางตั้ง :  $\pm 0.50$  ม. + 0.5 ppm RMS
- WASS differential accuracy : โดยทั่วไป  $< 5$  ม. 3D RMS

##### ● Static / Fast Static GPS Surveying.

- ทางราบ :  $\pm 5$  มม. + 0.5 ppm RMS
- ทางตั้ง :  $\pm 5$  มม. + 1 ppm RMS

##### ● Kinematics Surveying.

- ทางราบ :  $\pm 10$  มม. + 1 ppm RMS
- ทางตั้ง :  $\pm 20$  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. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ยี่ห้อ LEICA รุ่น GX1230+GNSS (Leica 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/E5a/E5b/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
- 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 :  $\pm 5$  มม. + 0.5 ppm RMS
  - ทางตั้ง :  $\pm 10$  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 :  $\pm 10$  มม. + 1 ppm RMS
  - ทางตั้ง :  $\pm 20$  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
  - AX1203+ GNSS, L1/L2/L5 GPSGLONASS/Galileo/Compass SmartTrack+
  - AR25 choke-ring GPS/GLONASS Galileo/Compass

##### ประสิทธิภาพของการรังวัด (Positioning Performance)



ภาคผนวก ข.  
รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification)  
ของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



**รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification)**  
**ของซอฟต์แวร์ “CHC Precision Service (CPS)”**  
 (CHC NAVTECH THAILAND, 2016)

**คุณสมบัติที่สำคัญ :**

- รองรับการคำนวณตำแหน่งในหลายกลุ่มดาวเทียม ได้แก่ GPS, GLONASS, BDS และ Galileo
- สามารถรองรับการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สำหรับติดตั้งเป็นสถานีฐานได้หลากหลายผู้ผลิต
- การประมวลผลถูกกระจายการทำงานด้วย 3 ซอฟต์แวร์ ที่เป็น Stand-alone เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวร (CORS) ขนาดใหญ่
- ครอบคลุมพื้นที่โครงข่ายขนาดใหญ่
- มีโปรโตคอลการเชื่อมต่อที่หลากหลาย เช่น TCP client/server, UDP client/server, NTRIP, Telnet
- มีโมดูลสนับสนุนการทำงานต่างๆ เช่น การตรวจสอบคุณภาพสถานี, การเก็บข้อมูล RINEX แบบ Real-time, การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, การแสดงแผนที่ หรือการวิจารณ์ของผู้ใช้ออนไลน์ เป็นต้น
- รองรับ SQL Server หรือ การเข้าถึงฐานข้อมูล
- ทำงานบน Windows Server 2008/2012
- ไม่จำกัดบัญชีผู้ใช้ NTRIP
- การตั้งค่าซอฟต์แวร์ทำได้ง่าย และสามารถควบคุมระบบได้เต็มรูปแบบ

CHC Precision Service หรือ CPS เป็นซอฟต์แวร์ใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นโดย บริษัท CHC เพื่อให้บริการข้อมูลค่าแก้จากสถานีฐานอ้างอิงถาวร (CORS) ซึ่ง CPS รับรองสัญญาณทั้งระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou (BDS) อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้จากหลากหลายผู้ผลิต หรือยี่ห้อที่แตกต่างกัน โดย CPS ถูกออกแบบมาสำหรับการให้บริการของสถานีฐานอ้างอิงถาวร (CORS) ในพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนของระบบการรังวัดดาวเทียมที่สำคัญ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม และ ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี และ CPS ได้เพิ่มประสิทธิภาพค่าแก้ไขพื้นที่แก่ผู้ใช้งาน Rover จากวิธีการ Single Based และ Network-Based ด้วยการให้บริการทั้งฟังก์ชัน RTK และ DGNSS แก่การทำงานสำรวจจริงวัด หรือการใช้แอปพลิเคชันอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำจากการให้บริการของสถานีถาวร (CORS)

การออกแบบการให้บริการ CPS ได้รวม 3 ซอฟต์แวร์หลัก คือ 1.) CHC Stream เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลจากสถานีอ้างอิงทั้งหมด และถ่ายข้อมูลเหล่านี้ต่อไปยัง CPS 2.) CPS จะนำไปทำการคำนวณ และให้บริการ 3.) CPS Casher ให้การเข้าถึงพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง โครงสร้างการให้บริการจะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสถานีถาวร (CORS) ควบคุมและติดตามระบบได้อย่างง่าย และในเวลาเดียวกันได้ลดการทำงานของระบบทั้งหมดของ Server คอมพิวเตอร์ และช่วยให้ระบบทั้งหมดมีความเสถียรและปลอดภัย

### รายละเอียดทางเทคนิค

#### หน้าที่:

- ค่าแก้ของ RTK/RTD: Rover จะส่งไปตำแหน่งไปยัง CPS หลังจากนั้น CPS จะส่งค่าแก้ที่ได้จากการ Generate จาก Single Base หรือการสร้างสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ไปยัง Rover ทั้งนี้รองรับการทำงานเทคนิค MAX (Master Auxiliary Concept) และรองรับ RTCM3Net
- การตรวจสอบคุณภาพ: CPS วิเคราะห์ข้อมูลจากสถานีอ้างอิง ณ ขณะเวลาปัจจุบัน เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นหลายวิถี รวมไปถึงข้อมูลที่มี Cycle slip ด้วย
- การเก็บข้อมูล: CPS ได้เก็บข้อมูลดาวเทียมระบบ GPS, GLONASS และ BeiDou จากข้อมูลดิบ (Raw Data) โดยเก็บเป็นข้อมูล RINEX หรือข้อมูล HCN โมดูลการเก็บข้อมูล สามารถเก็บข้อมูลใน Simple rate ที่แตกต่างกันได้ในคราวเดียวกัน
- สามารถเก็บข้อมูล Virtual RINEX ในขณะทำงานได้ โดย จะเก็บไว้ใน Local Server Disk
- สามารถส่งข้อมูลดาวเทียมแบบ Static ไปยังแหล่งอื่นๆได้ โดยผ่านทาง FTP Server

- สถานะออนไลน์: เมื่อ Rover on-line ใช้บริการค่าแก้จาก CPS รายละเอียดของผู้ใช้งาน จะถูกलिस्टไว้ เช่น Mount point, NTRIP (ตัวอย่างเช่น ชื่อซอฟต์แวร์ของการสำรวจ) เวลาที่ เชื่อมต่อกับศูนย์ให้บริการ และระยะเวลาการ on-line รวมทั้งสถานะของการทำงาน (fix, float หรือ DGPS) และตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด ในปัจจุบันของ Rover ข้อมูลเหล่านี้ จะถูกบันทึกไปยังฐานข้อมูล เพื่อการพัฒนา Application ในภายหลัง
- การแสดงแผนที่ออนไลน์: ตำแหน่งของสถานีอ้างอิงรวมทั้งตำแหน่งของ Rover สามารถ แสดงใน Google street map/ Satellite map ได้
- การดาวน์โหลด ข้อมูลวงโคจรดาวเทียม: สามารถดาวน์โหลดข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบ Broadcast รวมไปถึงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมรายละเอียดสูง จากหน่วยงาน IGS ได้
- การแจ้งเตือนผ่านทาง E-mail: เพื่อเตือนความผิดปกติของระบบ และแก้ปัญหาได้อย่าง รวดเร็ว

#### ความสามารถ :

- สถานีอ้างอิง: แนะนำให้ใช้ 120 สถานี ในหนึ่ง PC server (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฮาร์ดแวร์ ของเครื่องคอมพิวเตอร์) เนื่องจากการออกแบบการทำงานของระบบที่สามารถแบ่งการ ทำงานของ CPS เป็นหลายเครื่อง ซึ่งสามารถทำงานคู่ขนานกันได้ ดังนั้นจึงไม่จำกัดจำนวน ของสถานีอ้างอิงในระบบ
- บัญชีผู้ใช้: บัญชีผู้ใช้สูงสุด 1,000 บัญชี (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฮาร์ดแวร์เครื่องคอมพิวเตอร์) สำหรับ PC Server หนึ่งเครื่อง เมื่อ CPS หลายเครื่องทำงานพร้อมกัน ดังนั้นจึงไม่จำกัดบัญชี ผู้ใช้
- ชนิดค่าแก้สำหรับ RTK: RTCM2.3, RTCM3.0, RTCM3.1, RTCM3.2, CMR, CMR+, SCMR
- ชนิดค่าแก้สำหรับ DGNSS: RTCM2.x, message 1,2
- ระบบดาวเทียมที่รับสัญญาณได้: GPS - L1, L2 และ L5, GLONASS - L1 และ L2, BDS - B1 และ B2
- Compatibility: Trimble, NovAtel, Leica, Topcon, Ashtech, Hemisphere, หรือ อุปกรณ์ยี่ห้ออื่นขึ้นอยู่กับบอร์ด OEM ของผู้ผลิต ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องรับสัญญาณของ สถานีอ้างอิง และเครื่องรับสัญญาณ Rover ได้
- การสื่อสาร: TCP server, TCP Client, UDP server, TRIP และ Telnet

**ฐานข้อมูล :**

- การเข้าถึง: แนะนำ 32 bit สำหรับ CPS โดยสถานีควรน้อยกว่า 50 สถานี สำหรับ subnet เดี่ยว
- SQL Server 2008 / 2012 / /2014 สำหรับการใช้ CPS ทั้ง 32 และ 64 bit

**ระบบปฏิบัติการที่รองรับ :**

- Microsoft Windows Server 2008 / 2012
- Microsoft Windows 7 / 8 / 8.1 / 10 สำหรับ 32 bits และ 64 bits

**คุณสมบัติของ PC Server****หน่วยประมวลผล (Processor) :**

- สำหรับ Dual Cores ไม่ควรเกิน 20 สถานี
- สำหรับ Quad Cores ไม่ควรเกิน 40 สถานี
- สำหรับ 8 Cores สามารถทำงานมากกว่า 50 สถานีได้ โดยที่ความเร็วต้องไม่น้อยกว่า 2.0 GHz

**หน่วยความจำ (RAM) :**

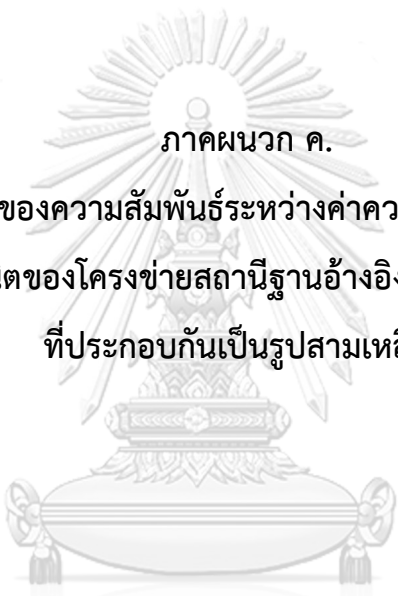
- แนะนำให้ใช้อย่างต่ำ 4 GB สำหรับจำนวนสถานีที่น้อยกว่า 20 สถานี
- อย่างต่ำ 8 GB สำหรับจำนวนสถานีที่น้อยกว่า 40 สถานี
- และอย่างต่ำ 16 GB สำหรับสถานีจำนวนมาก

**ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) :**

- เนื้อที่ 200 MB สำหรับการติดตั้งซอฟต์แวร์ CPS และต้องมีเนื้อที่เหลืออย่างน้อย 100 MB ต่อวันต่อสถานี สำหรับเก็บข้อมูลดาวเทียม (มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลา)

**ภาษาที่รองรับ :**

- ภาษาจีน, ภาษาอังกฤษ, ภาษาฝรั่งเศส และภาษารัสเซีย



ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ  
กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร  
ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### การทดสอบทางสถิติ

ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของ  
โครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

สำหรับในการศึกษาวิจัยนี้ จะทำการทดสอบทางสถิติ โดยใช้ซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า IBM SPSS  
Statistics Subscription โดยทำการทดสอบทางสถิติ 2 กรณี ได้แก่

1.) การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทาง  
เรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็น  
รูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ  
Ill-Conditioned Triangle โดยใช้วิธีการทดสอบที่ (t-test) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม  
ตัวอย่างสองกลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน (t-test for Independent Samples)

2.) การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทาง  
เรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็น  
รูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยม  
มุมป้าน โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA)

โดยผลการทดสอบทางสถิติ มีรายละเอียด ดังนี้

1. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทาง  
เรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่ประกอบกันเป็นรูป  
สามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ  
Ill-Conditioned Triangle

ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบที่ (t-test) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่าง  
สองกลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน (t-test for Independent Samples) โดยกำหนดสมมติฐาน ดังนี้

$H_0: \mu_1 = \mu_2$  (ค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์  
กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  (ค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบมีความสัมพันธ์กับลักษณะ  
ทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม)

โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า Sig. (2-tailed) ที่ได้จากซอฟต์แวร์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. (2-tailed)  $\leq 0.05$ ) (ยุทธ ไกยวรรณ, 2562)

ทำการทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คือค่าความถูกต้องทางราบของหมุดทดสอบในแต่ละโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle อย่างละ 6 ลูบ โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ 3 ด้าน ได้แก่ 50-70 กิโลเมตร 70-90 กิโลเมตร และ 90-110 กิโลเมตร โดยผลการทดสอบทางสถิติมีรายละเอียด ดังนี้

หมายเหตุ สำหรับกลุ่มขนาด 30-50 กิโลเมตร ไม่มีโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่มีลักษณะเป็น Ill-Conditioned Triangle จึงไม่ได้นำมาทำการทดสอบ

### 1.1 กลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ 3 ด้าน ขนาด 50-70 กิโลเมตร

**ตารางที่ 26** ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

ประเภท	จำนวนตัวอย่าง	<i>t</i> -test for Equality of Means				
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	t	df	Sig. (2-tailed)
Well-Conditioned Triangle	85	0.026	0.024	0.217	173	0.828
Ill-Conditioned Triangle	90	0.025	0.017			

จากตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle ที่ลูบขนาด 50-70

กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่า Sig. (2-tailed) ที่ได้คือ 0.828 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (Sig. (2-tailed) > 0.05) หมายความว่าเป็นการยอมรับ  $H_0$  กล่าวคือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

### 1.2 กลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ 3 ด้าน ขนาด 70-90 กิโลเมตร

**ตารางที่ 27** ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

ประเภท	จำนวน ตัวอย่าง	<i>t-test for Equality of Means</i>				
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	t	df	Sig. (2-tailed)
Well-Conditioned Triangle	91	0.023	0.018	0.079	179	0.937
Ill-Conditioned Triangle	90	0.022	0.019			

จากตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle ที่ลูบขนาด 70-90 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่า Sig. (2-tailed) ที่ได้คือ 0.937 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (Sig. (2-tailed) > 0.05) หมายความว่าเป็นการยอมรับ  $H_0$  กล่าวคือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์



ความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

### 1.3 กลุ่มค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ 3 ด้าน ขนาด 90-110 กิโลเมตร

ตารางที่ 28 ตารางแสดงผลการทดสอบทางสถิติระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

ประเภท	จำนวนตัวอย่าง	<i>t-test for Equality of Means</i>				
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	t	df	Sig. (2-tailed)
Well-Conditioned Triangle	90	0.023	0.020	-0.547	178	0.585
Ill-Conditioned Triangle	90	0.025	0.029			

จากตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle ที่รูปขนาด 90-110 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่า Sig. (2-tailed) ที่ได้คือ 0.937 ซึ่งมีความมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ กำหนด (Sig. (2-tailed) > 0.05) หมายความว่า เป็นการยอมรับ  $H_0$  กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

## 2. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะของโครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

ทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) เป็นการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหรือปัจจัยเพียงตัวเดียว กล่าวคือเป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างกันของระดับต่างๆ ของปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว โดยวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวคือการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรที่ได้รับปัจจัยที่ต่างระดับกันตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2549) โดยในการทดสอบทางสถิติครั้งนี้ ได้มีกำหนดสมมติฐาน ดังนี้

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$  (ค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$  (ค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม)

ทำการทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า Sig. ที่ได้จากซอฟต์แวร์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Sig.  $\leq 0.05$ ) (ชัยวิชิต เขียรชนะ, 2560)

สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คือค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของหมุดทดสอบในแต่โครงข่ายสามเหลี่ยมของสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จำนวน 5 รูป รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม จำนวน 7 รูป และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน จำนวน 6 รูป โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ จะมีขนาดของรูปที่ใกล้เคียงกัน โดยผลการทดสอบทางสถิติ มีรายละเอียดดังนี้

**ตารางที่ 29** ตารางแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

ประเภท	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	73	0.020	0.019
รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม	104	0.023	0.019
รูปสามเหลี่ยมมุมป้าน	90	0.024	0.020
รวม	267	0.023	0.019

ตารางที่ 30 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความสัมพันธ์ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

ความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	0.001	2	0.000	1.211	0.300
ภายในกลุ่ม	0.095	264	0.000		
รวม	0.096	266			

จากตาราง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสัมพัทธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบกับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน มีค่า F คือ 1.211 และค่า Sig. เท่ากับ 0.300 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (Sig. > 0.05) หมายความว่า เป็นการยอมรับ  $H_0$  กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม

### สรุปผลการทดสอบทางสถิติ

จากผลการทดสอบทางสถิติทั้ง 2 กรณีที่แสดงข้างต้น สามารถสรุปได้ ดังนี้

1.) ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น Well-Conditioned Triangle และ Ill-Conditioned Triangle

2.) ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงถาวรฯ ที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่จำแนกออกเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสามเหลี่ยมมุมแหลม และรูปสามเหลี่ยมมุมป้าน

ดังนั้น ลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรที่ประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ไม่มีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ ของการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวรด้วยเทคนิคแบบสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS)

## บรรณานุกรม

- Basak, N. N. (1994). *Survey and Leveling*. New Delhi, India.: McGraw Hill Ltd.
- Bhavikatti, S. S. (2008). *Surveying and Leveling*. New Delhi, India: I. K. International Publishing House Press.
- Chandra, A. M. (2005). *Higher Surveying*. New Delhi, India: New Age International Ltd.
- Chanutboonsin, K., Octavian Andrei, C., Weerawong , K., & Charoenkalunyuta, T. (2016). Feasibility of DOL-VRS Service for Establishing Survey Control Using Post-Processing Method. Volume 20 Issue 5. *ENGINEERING JOURNAL*, 230-238.
- Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Keitniyomrung, V., & Yomwan, P. (2019). Performance of Network-Based RTK GNSS for the Cadastral Survey in Thailand. Jul-Sep2019, Volume 15 Issue 3. *International Journal of Geoinformatics.*, p13-19. 17p.
- Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Lee, H.-K., & Choi, Y.-S. (2012). Performance of Network-Based RTK GPS in Low-Latitude Region: A Case Study in Thailand. Volume 16 Issue 5. *ENGINEERING JOURNAL*, 95-103.
- CHC NAVTECH THAILAND (2016). CPS Software. [Online] Retrieved August, 2019, from: [https://docs.wixstatic.com/ugd/498693\\_22aff2db13f9423884930b3ac03dc312.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/498693_22aff2db13f9423884930b3ac03dc312.pdf)
- CHC NAVTECH THAILAND (2018). CHC i-80 Receiver. [Online] Retrieved August, 2019, from <https://www.chcthailand.com/i-80-receiver>
- CHCNAV. (2018). *N72 GNSS Infrastructure*. China: Shanghai Huace Navigation Technology Ltd.
- Cina, A., Dabove, P., Manzano, A. M., & Piras, M. (2015). Network Real Time Kinematic (NRTK) positioning – Description, architectures and performances. in Jin S. (Ed.) *Satellite positioning: Methods, models and applications*, InTech Open, London, [Online] Retrieved August, 2019 from <https://www.intechopen.com/books/satellite-positioning-methods-models-andapplications/network-real-time-kinematic-nrtk-positioning-description-architectures-andperformances> .

- Elhattab, A. (2016). Recent Positioning Techniques for Efficient Port Operations and Development of Suez Canal Corridor. 2. 126-136. 10.21622/resd.2016.02.2.126 *Renewable Energy and Sustainable Development*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/figure/Virtual-Reference-Stationconcept\\_fig3\\_316613530](https://www.researchgate.net/figure/Virtual-Reference-Stationconcept_fig3_316613530)
- Erenoglu, R. C. (2017). A comprehensive evaluation of GNSS – and CORS – based positioning and terrestrial surveying for cadastral surveys. . *Survey Review*, 49(352), 28-38.
- FGDC, Federal Geographic Data Committee. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards, part 3: National standard for spatial data accuracy. In (pp. 25): Subcommittee for Base Cartographic Data.
- Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., & Law, C. L. (2003). Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. *Journal of Geodesy*, 77, 292 - 302.
- Leica Geosystems (2005). Networked reference stations; take it to the Max. White paper, 11p. [Online] Retrieved August 19, 2019 from [https://www.smartnetna.com/documents/Leica\\_GPS\\_SpiderNET-Take\\_it\\_to\\_the\\_MAX\\_June2005\\_en.pdf](https://www.smartnetna.com/documents/Leica_GPS_SpiderNET-Take_it_to_the_MAX_June2005_en.pdf)
- Leica Geosystems (2007). Leica GPS1200+ Series: Technical Data. [Online]. Retrieved October,2019 from [https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/general/brochures-datasheet/gps1200\\_technicaldata\\_en.pdf](https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/general/brochures-datasheet/gps1200_technicaldata_en.pdf)
- Lim, S., Rizos, C., & Musa, T. A. (2008). Application of Running Average Function to Non-Dispersive Errors of Network-Based Real-Time Kinematic Positioning. *Journal of Global Positioning Systems*, 148-155.
- Musa, T. A. (2007). *Residual Analysis of Atmospheric Delay in Low Latitude Region Using Network-Based GPS Positioning*. New South Wales, Australia: The University of New South Wales.

- OKOROCHA, C., & OLAJUGBA, O. (2014). Comparative Analysis of Short, Medium and Long Baseline Processing in the Precision of GNSS Positioning. *FIG Congress 2014 Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance Kuala Lumpur, Malaysia*.
- Thaigov. (2560). ที่ประชุมคณะกรรมการภูมิสารสนเทศแห่งชาติ เห็นชอบแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานระบบดาวเทียมนำทาง (GNSS) มอบหมาย สทอภ. เป็นหน่วยงานรับผิดชอบศูนย์ข้อมูลสถานี CORS แห่งชาติ [Online] Retrieved March 30, 2018  
from <http://www.thaigov.go.th/news/contents/details/2764>
- Tom Stansell (2018). GNSS Signal Structures. [Online]. Retrieved January 23, 2019 from [http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/03\\_gnss.pdf](http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/03_gnss.pdf)
- Trimble. (2006). *Trimble NetR5 Reference Station*.: Trimble Navigation Limited.
- Trimble (2010). Trimble NetR9 GNSS Reference Station. [online]. Retrieved October, 2019 from <http://www.kmcgeo.com/Datasheets/NetR9.pdf>
- Trimble (2019). Trimble Business Center: Office Software for Surveyors. [Online] Retrieved August, 2019 from: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-business-center>
- กรมที่ดิน. (2554). วารสารที่ดิน ฉบับพิเศษ (ครบรอบ 110 ปี กรมที่ดิน). In (Vol. ปีที่ 57 ฉบับที่ 1, pp. 5-16). กรุงเทพมหานคร: กองการพิมพ์ กรมที่ดิน.
- กรมที่ดิน. (2558). ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย พ.ศ. 2558. กรมที่ดิน
- กรมที่ดิน. (2561). คู่มือการรังวัดเฉพาะรายโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรุงเทพมหานคร: กองฝึกอบรม กรมที่ดิน.
- กรมที่ดิน. (2562). รายงานผลการศึกษาระดับสมบูรณ์ เรื่อง โครงการวิเคราะห์และประเมินผลความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เชียงพื้นที่. กรุงเทพมหานคร: กรมที่ดิน
- กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน. (2558). คู่มือปฏิบัติงานระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย. กรุงเทพมหานคร: กรมที่ดิน
- กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน. (2561). แผนงานการยกระดับงานรังวัดโดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรุงเทพมหานคร: กรมที่ดิน

- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2549). หลักสถิติ (พิมพ์ครั้งที่ 8 ed.). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจนพีธีกร สุนทรรัตน์. (2560). การทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน (*Performance Assessment of Network-Based GNSS RTK for Cadastral Surveying*). (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2549). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 *Advanced GPS Satellite Surveying* งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยวิชิต เขียวชนะ. (2560). สถิติสำหรับการวิจัย แนวคิดและการประยุกต์ใช้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีทัต เจริญกัลยาณุตตา. (2555). ผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อประสิทธิภาพ จากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ธีรทัต เจริญกัลยาณุตตา, & เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2553). การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย: ผลการทดสอบเบื้องต้น (*Accuracy Assessment of Real-Time Kinematic GPS Surveys Using the First Virtual Reference Station (VRS) Network in Thailand: Initial Test Results*). วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 70. หน้า 45-56. กรุงเทพมหานคร.
- ยุทธ ไกยวรรณ. (2562). หลักสถิติวิจัยและการใช้โปรแกรม SPSS (พิมพ์ครั้งที่ 6 ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมเกียรติ ทิพย์สุมณฑา. (2560). การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์โดยอาศัยเครือข่ายสถานี GNSS แบบต่างๆ ในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- อัศวินี วงษ์สุวรรณ. (2557). การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมในการคัดเลือกดาวเทียมระบบ GNSS ดวงที่เหมาะสม สำหรับการหาตำแหน่งแบบจลน์ กรณีศึกษาโดยใช้ข้อมูล GPS GLONASS และ COMPASS. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายรุ่งโรจน์ เจริญยศ
วัน เดือน ปี เกิด	21 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดจันทบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	2/613 หมู่บ้านศิริการ ซอย 15 ต.ท่าช้าง อ.เมืองจันทบุรี จ. จันทบุรี 22000
ผลงานตีพิมพ์	รุ่งโรจน์ เจริญยศ ธิทัต เจริญกมลัญญาตา และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2562) "การประเมินผลความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยระบบ โครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ โดยใช้สถานีฐานอ้างอิงแบบรับ สัญญาณต่อเนื่องถาวร สำหรับการรังวัดแปลงที่ดินในประเทศไทย" การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2562 : GEOINFOTECH 2019 วันที่ 27-29 สิงหาคม 2562