

# Part V

## ระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์  
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## สารบัญ Part V

เนื้อหา	หน้า
1. บทนำ.....	3
2. การออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	10
2.1 การออกแบบระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ.....	10
2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	11
2.3 องค์ประกอบของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน.....	14
2.4 การทำงานของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน.....	16
3. วิธีการใช้งานระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ.....	20
4. ผลการทดสอบเบื้องต้นของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ.....	21
4.1 การทดสอบความแม่นยำโดยใช้เทคนิคทางยี่ห้อเดซี.....	33
4.2 การทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส.....	62
5. ระบบระบุตำแหน่งในถ้ำต้นแบบและผลการทดสอบในถ้ำจริงทั้งสองแห่ง.....	63
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำต้นแบบ.....	63
5.2 ขั้นตอนการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	66
6. ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์.....	68
6.1 การดำเนินการทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	68
6.2 ผลทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	71
6.3 การทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายนอกถ้ำเพื่อการเปรียบเทียบ.....	74
6.4 สรุปผลการทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำปาฏิหาริย์.....	77
7. ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว.....	78
7.1 การดำเนินการทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	78
7.2 ผลทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ.....	81
7.3 การทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายนอกถ้ำเพื่อการเปรียบเทียบ.....	88
7.4 สรุปผลการทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำหลวงเชียงดาว.....	90
8. การติดตั้งป้ายแสดงพิกัดตำแหน่งภายในโพรงถ้ำทั้งสองแห่ง.....	91
9. แนวทางพัฒนาระบบระบุตำแหน่งในอนาคต.....	93
10. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก ก : โปรแกรมระบุตำแหน่งในถ้ำ.....	95

## ระบบระบุพิกัดตำแหน่งในถ้ำ

### 1. บทนำ

จากปัญหาด้านข้อจำกัดของการบอกตำแหน่งหรือนำทางโดยใช้ระบบ GPS (Global Positioning System) ภายในถ้ำซึ่งไม่สามารถรับสัญญาณ GPS จากดาวเทียมที่โคจรอยู่ในอวกาศภายนอกถ้ำได้ ทำให้การบอกตำแหน่งภายในถ้ำโดยใช้ระบบ GPS โดยตรงจากดาวเทียมจึงไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามได้มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องแต่ส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยที่เน้นในเรื่องของการระบุตำแหน่งภายในอาคารอยู่จำนวนหนึ่ง มีทั้งการใช้สัญญาณไร้สายเพื่อหาทิศทาง เช่น เซนเซอร์ชนิดใช้เสียง (Ultrasonic sensor) เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband technology) การใช้อุปกรณ์ปล่อยสัญญาณขนาดเล็กที่ติดตั้งภายในอาคาร เช่น อุปกรณ์บลูทูธ (Bluetooth) หรืออุปกรณ์อินฟราเรด (Infrared) การใช้ระบบนำทางร่วมกับเซ็นเซอร์ (Navigation system with sensors) เช่น เครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) และไจโรสโคป (Gyroscope) หรือการใช้งานแบบผสมผสาน เป็นต้น

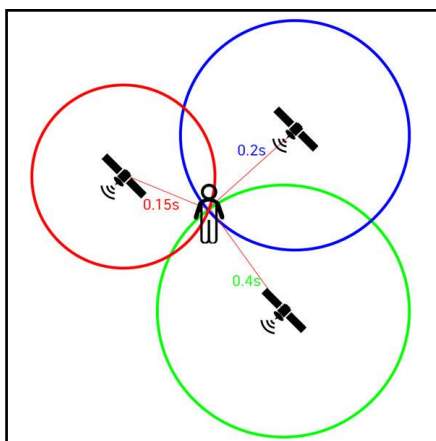
ระบบจีพีเอส (GPS) สำหรับใช้ระบุตำแหน่งบนโลก หรืออาจรู้จักในชื่อของ นาฟสตาร์ (Navstar) เป็นระบบดาวเทียมนำร่อง (Global navigation satellite system : GNSS) ใช้ระบุตำแหน่งและเวลาโดยคำนวณจากเวลาที่ของสัญญาณนาฬิกาที่ส่งมาจากดาวเทียม ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่โคจรรอบโลก ทำให้สามารถระบุตำแหน่งจุดรับสัญญาณได้ในทุกสภาพอากาศ รวมถึงสามารถคำนวณความเร็วและทิศทางเพื่อนำมาใช้ในการนำทางได้ ระบบดาวเทียมของจีพีเอสประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ

- 1) ส่วนควบคุมภาคพื้นโลก (Control segment)
- 2) ส่วนผู้ใช้งาน (User segment)
- 3) ส่วนอวกาศ (Space segment)

ในส่วนอวกาศประกอบด้วยดาวเทียมที่ใช้งานทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลก หนึ่งรอบใช้เวลา 11 ชั่วโมง 58 นาที โดยมีวงโคจรทั้งหมด 6 ระนาบ แต่ละระนาบทำมุมห่างกัน 60 องศา และมีจำนวนดาวเทียมระนาบละ 4 ดวง วงโคจรทุกระนาบจะทำมุมเอียง 55 องศา กับเส้นศูนย์สูตร (Equator) ดาวเทียมของระบบจีพีเอสนี้จัดให้อยู่ในกลุ่มของดาวเทียม (Satellite constellation) ที่มีวงโคจรระดับกลาง (MEO : Medium Earth Orbit) ซึ่งมีระดับความสูงประมาณ 20,200 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก มีการใช้งาน 3 ย่านความถี่ คือ 1) L1 ย่านความถี่ 1,559 – 1,610 MHz, 2) L2 ย่านความถี่ 1,215 - 1,240 MHz และ 3) L5 ย่านความถี่ 960 – 1,215 MHz โดยดาวเทียมแต่ละดวงจะใช้งานสองย่านความถี่นี้ที่มีการเข้ารหัสไว้ ซึ่งความถี่ในย่าน L2C จะใช้สำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความปลอดภัย ส่วนความถี่ในย่าน L5 จะใช้งานสำหรับการใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยในชีวิต เช่น ระบบเครื่องช่วยการเดินอากาศ [1]

ระบบจีพีเอสสามารถทำงานได้ด้วยการรับสัญญาณจากดาวเทียมแต่ละดวง โดยสัญญาณจากดาวเทียมที่รับได้จะประกอบด้วยข้อมูลที่ระบุตำแหน่งและเวลาขณะส่งสัญญาณ ตัวเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสจะต้องประมวลผลความแตกต่างของเวลาในการรับสัญญาณเทียบกับเวลาจริง ณ ปัจจุบันเพื่อคำนวณหาระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียมแต่ละดวงและคำนวณหาตำแหน่งที่ตัวของเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสวางอยู่ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการค้นหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงเพื่อใช้บอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก การใช้ดาวเทียมสามดวงในการระบุตำแหน่งโดยเปรียบเทียบจากระยะห่างระหว่างดาวเทียมทั้งสามกับเครื่องรับจีพีเอสนั้น จะสามารถระบุตำแหน่งบนผิวโลก

ได้ในกรณีที่พื้นโลกอยู่ในแนวระนาบดังแสดงรูปที่ 1 แต่ในความเป็นจริงพื้นโลกมีความโค้งเนื่องจากลักษณะของโลกมีลักษณะกลม ดังนั้นการใช้ดาวเทียมดวงที่สี่เข้ามาเพิ่มเติมจะทำให้สามารถคำนวณเรื่องความสูงเพื่อทำให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ความแม่นยำของการระบุตำแหน่งนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวงด้วย กล่าวคือ ถ้าระยะห่างระหว่างดาวเทียมที่ใช้งานอยู่ห่างกันหรือวางตัวกระจายตัวกันย่อมให้ค่าที่แม่นยำกว่าในขณะที่ดาวเทียมอยู่ใกล้กัน และยังมีจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้มากขึ้นก็จะยิ่งให้ความแม่นยำได้มากขึ้น (จาก <https://www.global5thailand.com>)



รูปที่ 1 การรับสัญญาณจากดาวเทียม  
(ที่มา : <http://fitrox.lnwshop.com>)

อย่างไรก็ตามการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมนั้นถูกออกแบบให้ใช้งานในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งเพื่อจะสามารถลดปัญหาการลดทอนและการสะท้อนของสัญญาณที่ทำให้การคำนวณตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อน แต่หากใช้ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารหรือภายในถ้ำที่มีทั้งการลดทอนสูง การสะท้อนของสัญญาณ การเลี้ยวเบน การรบกวนและการกระเจิงของสัญญาณ จะทำให้ไม่สามารถคำนวณตำแหน่งได้ถูกต้องหรือไม่สามารถรับสัญญาณได้ แม้ว่าการลดทอนจะเกิดขึ้นโดยทั่วไปก็ตามแต่ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารหรือในถ้ำที่มีส่วนปิดกั้นเส้นนำสายดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ ตัวอย่างเช่น บ้านไม่มีการลดทอนประมาณ 10 dB ในขณะที่บ้านอยู่อาศัยที่มีกำแพงอิฐจะมีการลดทอน 20-25 dB ซึ่งความไว (Sensitivity) ในการรับสัญญาณของตัวรับจะอยู่ในช่วง -160 - 190 dB [2] ปัญหารองลงมาก็คือ การสะท้อนของสัญญาณ สัญญาณที่ถูกส่งในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งทั่วไปจะประกอบด้วยสัญญาณทางตรงและสัญญาณที่เกิดการสะท้อน แต่การใช้งานกลางแจ้งมีปัญหาที่เกิดจากการสะท้อนน้อยกว่าการใช้งานสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ปัญหาการสะท้อนของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งสัญญาณสามารถที่จะเกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันได้ตามสภาพแวดล้อมขณะนั้น

จากข้อจำกัดของระบบระบุตำแหน่งบนโลกหรือจีพีเอสที่ใช้ภายในอาคาร ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร เช่น เทคโนโลยีอินฟราเรด (Infrared) เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย (WLAN) คลื่นวิทยุ (Radio frequency) บลูทูธ (Bluetooth) เทคโนโลยีแท็ก RFID (Radio Frequency Identification) และ อุปกรณ์รับสัญญาณจากดาวเทียมนำทางที่มีประสิทธิภาพสูง (High sensitivity GNSS) ซึ่งเทคโนโลยีต่างๆ นั้นมีข้อจำกัดและความเหมาะสมในการใช้งานต่างกัน [3] จากงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งภายในอาคาร [4] จำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1) ระบบวัดช่วงทิศทางไร้สาย (Wireless direction-range measurement system) เช่น การใช้งานเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-wideband technology) และคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ในการหาในการระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้การวัดค่าเวลาที่เดินทางจากวัตถุถึงจุดรับสัญญาณ (TOA : Time of Arrival) การหาตำแหน่งของวัตถุจากทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกมาจากวัตถุ (AOA : Angle of Arrival) เฟสของสัญญาณและระดับความแรงของสัญญาณ เป็นต้น

2) ระบบจับคู่กับอุปกรณ์ส่งสัญญาณบลูทูธ (Indoor beacon matching system) เป็นวิธีใช้งานที่ได้รับความนิยมเพราะสามารถใช้งานได้หลายวิธี เช่น การใช้เทคโนโลยีแท็ก RFID (Radio frequency identification) หรือการใช้เราเตอร์ Wi-Fi ที่ติดตั้งไว้ภายในอาคารเพื่อรับส่งสัญญาณจากการวิจัยในหลายปีที่ผ่านมาการใช้งานโดยการส่งสัญญาณบลูทูธได้ถูกพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้งานประเภทนี้ยังไม่เคยถูกใช้เพื่อการกักขังฉุกเฉิน

3) ระบบนำทางเฉื่อย (Inertial navigation system) คือ การนำทางโดยการคอมพิวเตอร์ เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวและเซ็นเซอร์การหมุน เพื่อคำนวณหาตำแหน่งจากทิศทางและความเร็วโดยไม่ต้องมีจุดอ้างอิง

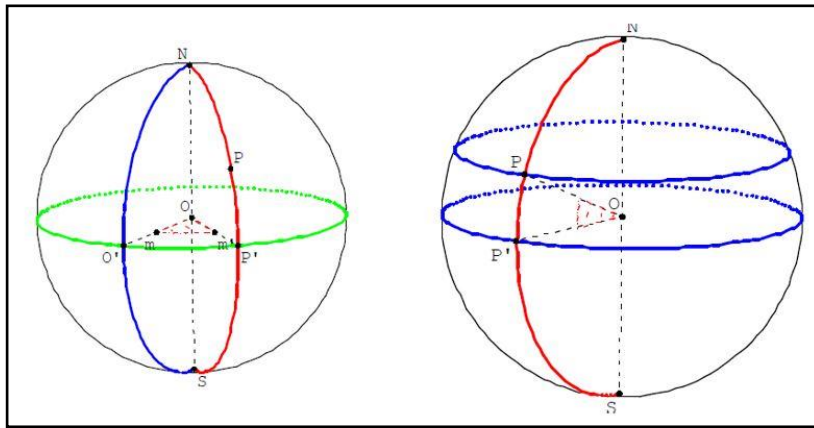
4) ระบบรวม (Mixed system) คือ การรวมระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารตั้งแต่ 2-3 ระบบเพื่อใช้งานร่วมกัน

จากบทความวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่า เกือบจะทั้งหมดของบทความมักจะเน้นงานวิจัยในเรื่องของการระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้วิธีเทคโนโลยีอื่นที่ไม่ใช่ด้วยการใช้เทคโนโลยีจีพีเอส และส่วนใหญ่จะใช้วิธีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการใช้งานที่ถาวร ซึ่งแตกต่างจากการใช้งานภายในถ้าที่ไม่สามารถนำอุปกรณ์ที่ต้องใช้กำลังงานไฟฟ้าไปติดตั้งอย่างถาวรได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวัดหาตำแหน่งที่แท้จริงภายนอกถ้าเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิง จากนั้นต้องใช้วิธีการคำนวณด้วยการนำระยะทาง มุมเอียง และระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลของจุดหมายปลายทางที่ต้องการระบุตำแหน่งมาคำนวณเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งวิธีนี้นักธรณีวิทยาได้ใช้ในการประมาณการตำแหน่งภายในถ้าจนมาถึงปัจจุบัน แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่แท้จริงอย่างมากเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้งานและความคลาดเคลื่อนจากการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติเอง

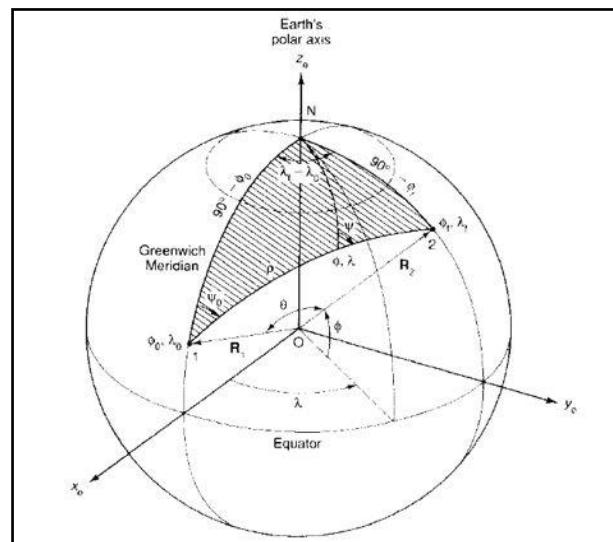
วิธีการคำนวณดังกล่าวหากต้องการความแม่นยำสูง จะต้องนำทฤษฎีความรู้ด้านภูมิศาสตร์ของสัณฐานโลกมาพิจารณาด้วย เนื่องจากโลกมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม (Spheroid) ทำให้หลักเกณฑ์และวิธีการสำรวจยุ่งยากขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการจะสำรวจแผนที่ให้ถูกต้องจริงๆ แล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงความโค้งของผิวโลกด้วย ในการสำรวจเพื่อทำแผนที่โดยคำนึงถึงความโค้งของผิวโลกนี้เรียกว่า การสำรวจทางยื่อเดซี (Geodesy) ซึ่งการสำรวจโดยวิธีนี้มีวิธีการหลายอย่าง เช่น Triangulation Traverse และ Gravity เป็นต้น วิธีการเหล่านี้ จะทำให้ทราบถึงขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) ของโลกเราได้ (อุตม ศิริปัญญา, <http://www.bangkokgis.com>) การบอกพิกัดตำแหน่งโดยทั่วไปสามารถบอกได้หลายวิธี เช่น การบอกพิกัดโดยใช้ละติจูด (latitude) และลองจิจูด (longitude) ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย หรือการบอกพิกัดโดยใช้ระบบพิกัดกริด (Grid locator system) โดยระบบพิกัดกริดซึ่งยังคงต้องใช้พื้นฐานความรู้ในเรื่องของพิกัดละติจูดและลองจิจูดมาทำการคำนวณ ซึ่งปัจจุบันยังคงนิยมใช้ในทางทหารและกลุ่มนักวิทยุสมัครเล่น เป็นต้น [5]

การบอกพิกัดตำแหน่งโดยใช้ละติจูดและลองจิจูด เป็นการบอกพิกัดที่ใช้บอกตำแหน่งบนพื้นโลก ซึ่งระบุว่าตำแหน่งนั้นอยู่ตรงจุดที่ทำมุมสัมพันธ์กับเส้นศูนย์สูตร (Equator) และเส้นสมมุติในแนวเหนือใต้ที่เรียกว่า เส้นไพรม์เมริเดียน (Prime meridian) เท่าใด โดยละติจูดหรือลองจิจูดเป็นพิกัดที่อ้างอิงจากเส้น

ศูนย์สูตร ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 องศาที่เส้นศูนย์สูตร ไปจนถึง 90 องศาที่บริเวณขั้วโลกเหนือและใต้ (นับเป็น 90 องศาเหนือหรือใต้) พื้นที่ที่มีพิกัดละติจูดต่างกันจะมีสภาพภูมิอากาศ (Climate) และกาลอากาศ (Weather) ต่างกัน ส่วนลองจิจูดจะเป็นพิกัดที่ใช้บอกตำแหน่งโดยการวัดไปทางตะวันออกหรือตะวันตกจากเส้นสมมุติในแนวเหนือใต้ที่เรียกว่า เส้นไพรม์เมริเดียนซึ่งมีหน่วยเป็นองศาเช่นเดียวกับลองจิจูด โดยนับจาก 0 องศา ที่เส้นไพรม์เมริเดียนไปทางตะวันออก +180 องศา (180 องศาตะวันออก) และไปทางตะวันตก -180 องศา (180 ตะวันตก) โดยลองจิจูดจะถูกนำมาใช้ในการแบ่งเขตเวลาของแต่ละพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบอกพิกัดตำแหน่งโดยใช้ละติจูดและลองจิจูดจะมีความสอดคล้องกับความรู้ด้านระบบพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) และด้านตรีโกณมิติ (Trigonometric) ดังแสดงรูปที่ 3



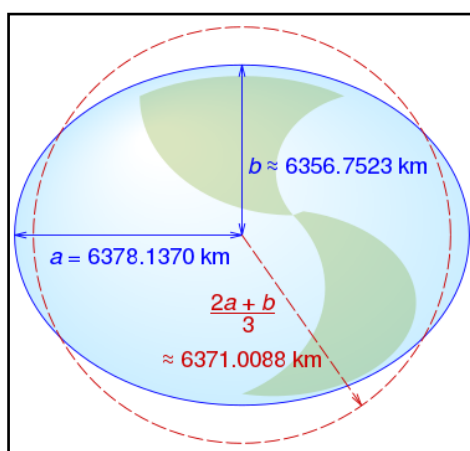
รูปที่ 2 ภาพแสดงเส้นละติจูด (Latitude) และเส้นลองจิจูด (Longitude)



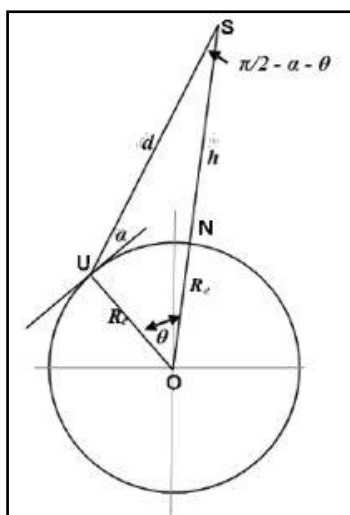
รูปที่ 3 แสดงการตัวอย่างการใช้พิกัดทรงกลมและตรีโกณมิติในการคำนวณ

การกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวโลกให้มีความถูกต้องนั้น นอกจากวิธีที่ใช้ในการรังวัดที่ต้องมีความถูกต้องสูงแล้ว สิ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน คือ พื้นหลักฐานอ้างอิง (Reference datum) ซึ่งใช้เป็นระบบอ้างอิงในการหาตำแหน่ง (Reference system) และโครงข่ายทางยื่อเดซี (Geodetic network) ซึ่งประกอบด้วยหมุดหลักฐานที่รังวัดเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายและมีค่าพิกัดบนระบบอ้างอิง โดยพื้นหลักฐาน

อ้างอิงมี 2 ชนิด ได้แก่ พื้นหลักฐานทางราบและพื้นหลักฐานทางดิ่ง พื้นหลักฐานทางราบที่ใช้ในประเทศไทยมีหลายพื้นหลักฐาน เช่น พื้นหลักฐานอินเดีย พ.ศ. 2518 และ พื้นหลักฐาน WGS 84 (World Geodetic System 1984) พื้นหลักฐานนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นระบบพื้นหลักฐานสากล เนื่องจากเป็นพื้นหลักฐานที่อ้างอิงทั้งโลกซึ่งพัฒนาโดยกระทรวงกลาโหมของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยอาศัยข้อมูลทางกราวิตี้ (Gravity data) ครอบคลุมทั่วโลก ประโยชน์ของพื้นหลักฐานนี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้พัฒนากิจการด้านอวกาศ โดยเฉพาะระบบการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม ที่สำคัญจุดศูนย์กลางของโลกและจุดกำเนิดของพื้นหลักฐานยังเป็นจุดศูนย์กลางของวงโคจรดาวเทียม GPS อีกด้วย พื้นหลักฐานนี้ในปัจจุบันได้รับการยอมรับว่าเป็นพื้นหลักฐานที่มีความละเอียดถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือสูง (ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งศูนย์กลางของโลกประมาณ  $\pm 1$  เมตร) และประเทศไทยได้จัดทำแผนที่ชุดใหม่โดยใช้พื้นหลักฐานนี้อ้างอิงทางราบ คือแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 (ราชวัลย์ กันภัย, <http://kqgnss.blogspot.com>)



รูปที่ 4 สันฐานของโลกในระบบพื้นหลักฐาน WGS 84  
(ที่มา : wikipedia.org)



รูปที่ 5 ภาพตัดย่อยระนาบแนวตั้งของโลกซึ่งมีรูปทรงกลม [6]

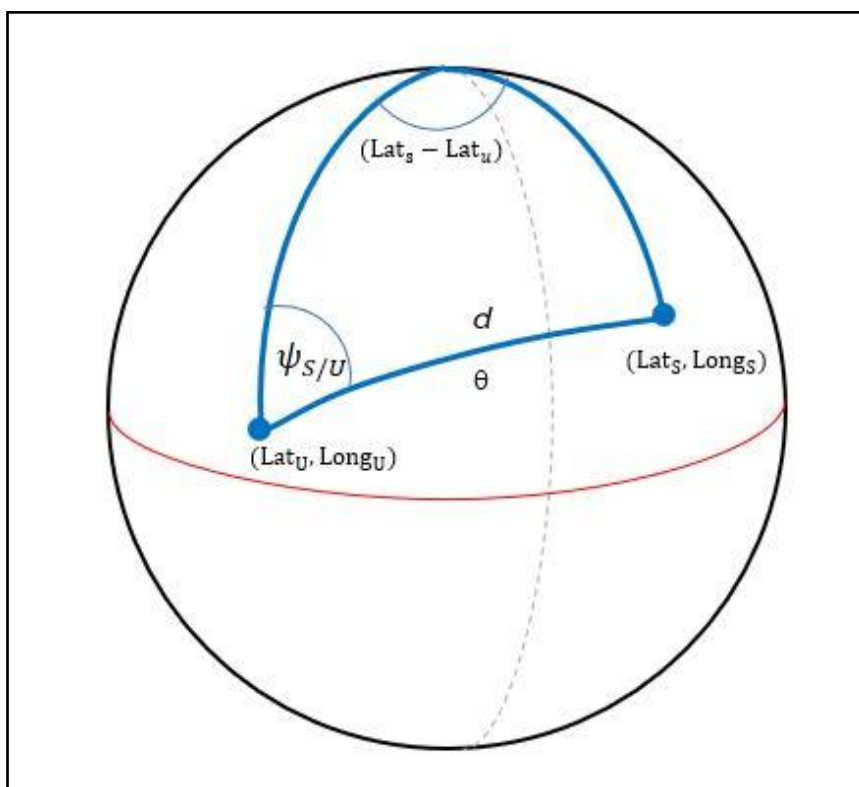
ตามสันฐานของโลกในระบบพื้นหลักฐาน WGS 84 ที่ใช้อ้างอิงในระบบจีพีเอส ดังรูปที่ 4 โลกมีรูปร่างเป็นทรงรี ประกอบไปด้วยระยะรัศมีในแนวเส้นศูนย์สูตร ขนาด 6,378.137 กิโลเมตร และ ระยะรัศมีใน

แนวขั้วโลก ขนาด 6,356.7523 กิโลเมตร ทำให้รัศมีของโลกนั้นไม่เท่ากัน แตกต่างกันตามละติจูด และจากรูปที่ 10.5 สามารถหารัศมีของโลก ณ ละติจูดนั้นๆ ได้ตามสมการที่ (1) (<https://en.wikipedia.org>)

$$R_e(L) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos L)^2 + (b^2 \sin L)^2}{(a \cos L)^2 + (b \sin L)^2}} \quad (1)$$

โดยที่  $a$  คือ รัศมีของโลกในแนวเส้นศูนย์สูตร มีหน่วยเป็นกิโลเมตร  
 $b$  คือ รัศมีของโลกในแนวขั้วโลก มีหน่วยเป็นกิโลเมตร  
 $L$  คือ ตำแหน่งละติจูด มีหน่วยเป็นองศา

เมื่อลากเส้นจากจุดเริ่มต้น ( $Lat_U, Long_U$ ) ไปถึงจุดปลายทาง ( $Lat_S, Long_S$ ) ดังในรูปที่ 6 จะเห็นว่า จะมีทั้งทิศทางและระยะทางเข้ามาเกี่ยวข้องตามทฤษฎีเรื่องระบบพิกัดทรงกลมและศาสตร์ของตรีโกณมิติ ซึ่งทิศทางที่ใช้จะเริ่มต้นจากทิศเหนือและหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือเรียกว่ามุม Azimuth ( $\varphi_{S/U}$ ) และมีระยะทาง ( $d$ ) จากความสัมพันธ์ของพิกัดตำแหน่งจุดเริ่มต้น ( $U$ ) มุม Azimuth และระยะทาง จะทำให้เกิดสมการเพื่อหาพิกัดตำแหน่งที่จุดปลายทาง ( $Lat_S, Long_S$ ) โดยการใช้วิธี Geodesy techniques [5] ดังนี้



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของระยะ  $d$  และมุม Azimuth ต่อปลายทาง (S)

1) การคำนวณหาตำแหน่งละติจูดที่จุดปลายทางโดยการใช้วิธี Geodesy techniques ดังสมการที่ (2)

$$L_S = \sin^{-1} \left( \sin(L_U) \cos \theta + \cos(L_U) \sin \theta \cos(\varphi_{S/U}) \right) \quad (2)$$



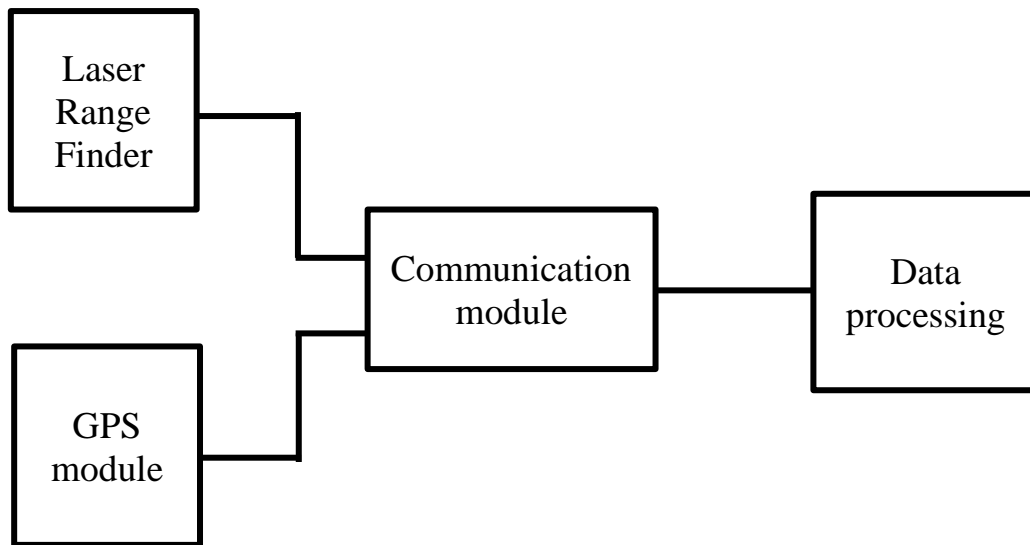
โดยที่	$L_U$	คือ ตำแหน่งละติจูดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นองศา
	$L_S$	คือ ตำแหน่งลองจิจูดปลายทาง มีหน่วยเป็นองศา
	$\varphi_{S/U}$	คือ มุม Azimuth จากจุดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นองศา
	$\theta$	คือ มุมจีโอเซนทริก (Geocentric angle) มีหน่วยเป็นองศา

2) การคำนวณหาตำแหน่งลองจิจูดที่จุดปลายทางโดยการใช้วิธี Geodesy Techniques ดังสมการที่ (3)

$$\lambda_S = \tan^{-1} \left[ \frac{\cos L_U \sin \lambda_U \cos \theta + (\cos \lambda_U \sin \varphi_{S/U} - \sin L_U \sin \lambda_U \cos \varphi_{S/U}) \sin \theta}{\cos L_U \cos \lambda_U \cos \theta + (\sin \lambda_U \cos \varphi_{S/U} + \sin L_U \cos \lambda_U \cos \varphi_{S/U}) \sin \theta} \right] \quad (3)$$

โดยที่	$L_U$	คือ ตำแหน่งละติจูดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นองศา
	$\lambda_U$	คือ ตำแหน่งลองจิจูดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นองศา
	$L_S$	คือ ตำแหน่งละติจูดปลายทาง มีหน่วยเป็นองศา
	$\lambda_S$	คือ ตำแหน่งลองจิจูดปลายทาง มีหน่วยเป็นองศา
	$\varphi_{S/U}$	คือ มุม Azimuth จากจุดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นองศา
	$\theta$	คือ มุมจีโอเซนทริก (Geocentric angle) มีหน่วยเป็นองศา

เมื่อสามารถหาพิกัดปลายทาง ( $Lat_S, Long_S$ ) โดยใช้ข้อมูลจากพิกัดเริ่มต้น ( $Lat_U, Long_U$ ) มุม Azimuth ( $\varphi_{S/U}$ ) และระยะทาง ( $d$ ) ได้ จึงนำมาประยุกต์ใช้กับการหาพิกัดปลายทางในกรณีที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งจากระบบระบุตำแหน่งจีพีเอสได้ โดยใช้ข้อมูลพิกัดเริ่มต้นครั้งแรกจากระบบระบุตำแหน่งจีพีเอส ผนวกกับข้อมูลจากการวัดระยะทางและมุมมาคำนวณตามสมการข้างต้น ซึ่งได้มีการใช้ประโยชน์จากวิธี Geodesy techniques หลากหลายในปัจจุบัน ยกตัวอย่างจากบทความ [7] D. Endrei และคณะ ได้นำเสนอ การสร้างโมดูลเพื่อใช้บอกตำแหน่งโดยการนำเครื่องวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ เข็มทิศและตัวรับสัญญาณจีพีเอส มาบูรณาการร่วมกันเพื่อบอกตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตามข้อมูลในบทความนี้ไม่ได้มีการนำระดับของภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำมาพิจารณาในการคำนวณด้วย ในขณะที่ S.Victor และคณะ [8] ได้นำเสนอระบบนำทางเสมือนบนระบบอากาศยานไร้คนขับโดยนำเทคนิคการสำรวจ Geodesy มาช่วยในการคำนวณ



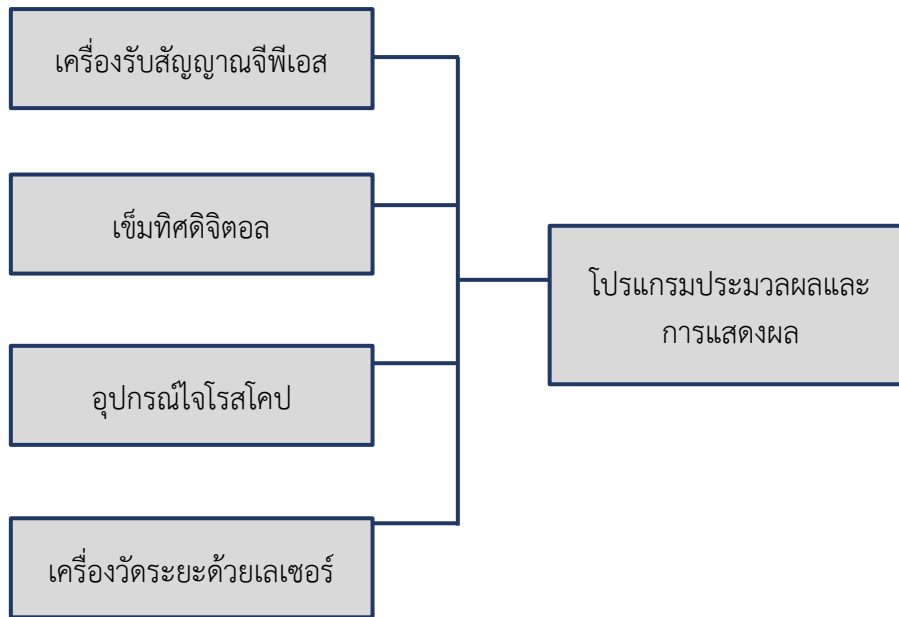
รูปที่ 7 การบูรณาการโมดูล GPS และ Laser Range Finder เข้าด้วยกันเพื่อใช้ระบุตำแหน่ง [7]

## 2. การออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 2.1 การออกแบบระบบระบุตำแหน่งถ้ำ

จากที่ได้มีการทบทวนวรรณกรรมและศึกษาวิธีการสำรวจเพื่อทำแผนที่ภายในถ้ำในอดีต จะใช้อุปกรณ์ต่างๆ ไป เช่น การใช้เข็มทิศ (Compass) อุปกรณ์วัดมุมเอียง (Inclinometer) และสายวัดระยะ (Distance measuring tape) เพื่อวัดทิศทาง มุมเอียง และระยะทาง แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นแผนที่ ซึ่งการสร้างแผนที่แต่ละแห่งนั้นจะต้องใช้ระยะเวลาในการสำรวจเป็นเวลานานและอาจเกิดความคลาดเคลื่อนทั้งจากเครื่องมือวัดและวิธีการวัดที่เกิดจากผู้ดำเนินการเอง ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำโดยอ้างอิงจากเทคนิคในการสำรวจทางยิปโซเดซี (Geodesy technique) ที่ใช้ในการสำรวจทางภูมิศาสตร์ทั่วไป อีกทั้งการออกแบบนี้ยังคำนึงถึงการใช้งานให้มีความเหมาะสมเพื่อใช้ภายในถ้ำเป็นหลัก โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีขนาดกะทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ เป็นต้น

ระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำที่ได้ทำการออกแบบในเบื้องต้น ประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบฯ ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยส่วนการทำงานด้านฮาร์ดแวร์และเซนเซอร์ (Hardware and sensors) ได้แก่ เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ (Laser distance meter) เครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (GPS receiver) อุปกรณ์ไจโรสโคป (Gyroscope) และเข็มทิศดิจิทัล (Digital compass) ส่วนองค์ประกอบที่สองจะเป็นโปรแกรมสำหรับประยุกต์ใช้งาน (Application software) เพื่อทำงานร่วมกับองค์ประกอบส่วนแรก สำหรับใช้ในการประมวลผลและคำนวณตำแหน่งเป้าหมายจากข้อมูลที่ถูกส่งมาจากเซนเซอร์ต่างๆ



รูปที่ 8 องค์ประกอบของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

## 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

### 1) เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์

ปัจจุบันเครื่องมือสำหรับใช้ในการวัดระยะทางนั้นมีหลายชนิด ทั้งที่เป็นกล้องวัดระยะที่ใช้ในงานโยธา เครื่องวัดระยะด้วยอัลตราโซนิก และเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมภายในถ้ำซึ่งอาจเกิดความไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์เข้าไป ทำให้ทั้งกล้องวัดระยะที่ใช้ในงานโยธานั้นมีขนาดใหญ่ไม่สะดวก ส่วนเครื่องวัดระยะด้วยอัลตราโซนิกก็มีระยะการวัดที่สั้นเกินไปและมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบพกพาจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัดระยะทางภายในถ้ำ เนื่องจากมีระยะการวัดที่ค่อนข้างไกลตามวัตถุประสงค์ มีความแม่นยำสูง และมีขนาดกะทัดรัดพกพาง่ายดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องวัดระยะเลเซอร์แบบพกพารุ่น GLM 150C ที่ถูกเลือกมาใช้งานในการทดสอบขั้นต้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 9 เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ รุ่น GLM150 C

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ รุ่น GLM150 C

ระยะการวัด	0.08 – 150.00 เมตร
น้ำหนักโดยประมาณ	230 กรัม
คลาสของเลเซอร์	2
ความแม่นยำในการวัดโดยทั่วไป	±1.5 มิลลิเมตร
แหล่งจ่ายไฟ	3 x แบตเตอรี่ 1.5 โวลต์ LR6 (AA)
การถ่ายโอนข้อมูล	บลูทูธ

## 2) เข็มทิศดิจิทัล ไจโรสโคป และเครื่องรับตำแหน่งจีพีเอส

เข็มทิศเป็นเครื่องมือวัดสำหรับใช้หาทิศทางทางภูมิศาสตร์ มีเข็มแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแรงดึงดูดของแม่เหล็กโลกซึ่งวางตัวจากแนวขั้วโลกเหนือ-ใต้ ปัจจุบันมีการพัฒนาเข็มทิศที่สามารถส่งข้อมูลดิจิทัลไปยังแท็บเล็ตหรือสมาร์ทโฟนเพื่อการใช้งานที่สะดวกขึ้น ส่วนของไจโรสโคปจะเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุนเพื่อรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน โมเมนต์ตัมเชิงมุมของล้อหมุนจะทำให้รักษาตำแหน่งไว้แม้ล้อจะมีการเอียงตัว จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์หรือยานพาหนะต่างๆ ร่วมกับเข็มทิศและเครื่องรับจีพีเอส เมื่อก้าวถึงเฉพาะเครื่องรับจีพีเอสซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระบุตำแหน่งบนพื้นโลกโดยการรับสัญญาณโดยตรงจากดาวเทียมและนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งนั้น โดยทั่วไปเครื่องรับจีพีเอสดังกล่าวสามารถรับสัญญาณได้ทั้งจากดาวเทียมระบบ GPS ของประเทศสหรัฐอเมริกา ระบบ GLONASS ของประเทศรัสเซีย หรือจากระบบ Galileo ของสหภาพยุโรป อย่างน้อยหนึ่งระบบหรือมากกว่าหนึ่งระบบขึ้นไปเมื่อต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้สูงขึ้น ดังนั้นในโครงการนี้ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีเข็มทิศดิจิทัล ไจโรสโคป และเครื่องรับจีพีเอสที่มีคุณสมบัติในการบันทึกข้อมูลตำแหน่งจากกลุ่มดาวเทียมอุปกรณ์ตัวเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยมีข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 2



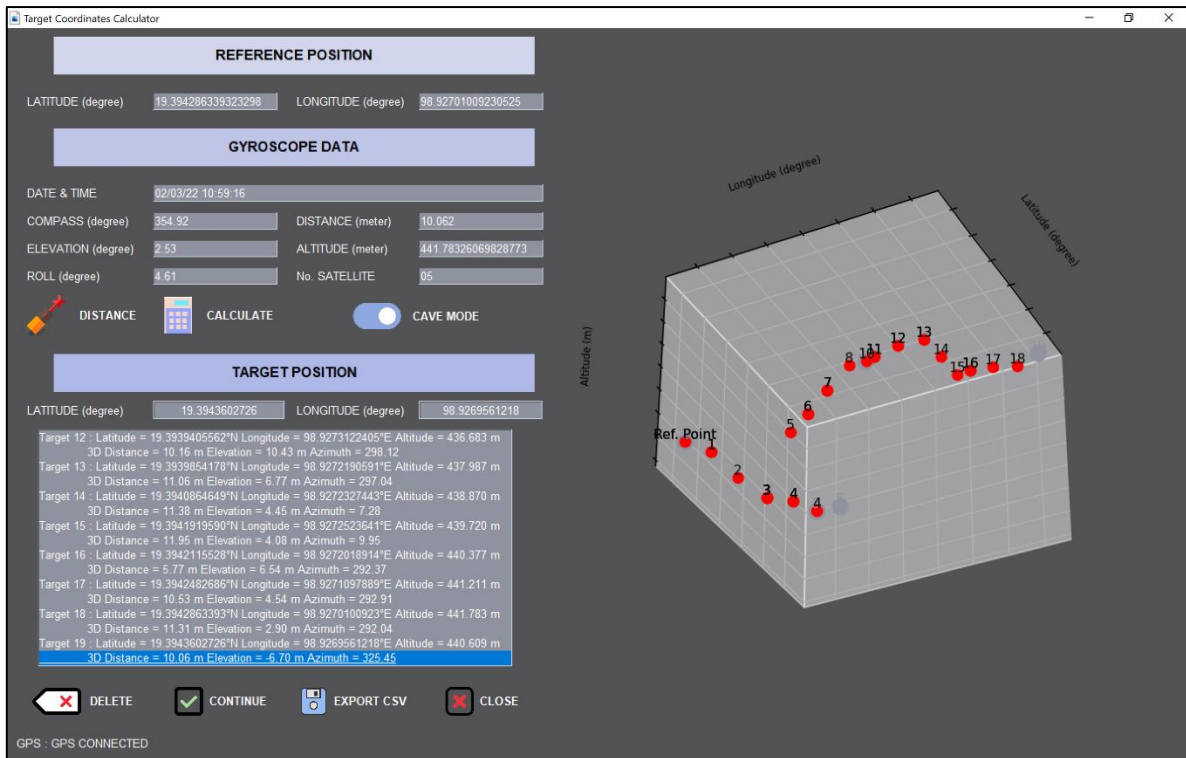
รูปที่ 10 อุปกรณ์เครื่องรับจีพีเอสยี่ห้อ Aeronia

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องรับจีพีเอสยี่ห้อ Aeronia

อุปกรณ์บันทึกข้อมูลตำแหน่งจีพีเอส	
ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสูงสุด	1.8 เมตร
ความเร็วเคลื่อนที่สูงสุด	515 เมตร/วินาที ± 0.1 เมตร/วินาที
ระดับความสูงสูงสุด	18 เมตร
ความไวต่อการรับสัญญาณ	-195 เดซิเบล
แบตเตอรี่ LiPo	650 มิลลิแอมป์ต่อชั่วโมง
ระยะเวลาใช้งานแบตเตอรี่สูงสุด	7 ชั่วโมง
การถ่ายโอนข้อมูล	USB และ การ์ดความจำ
ความคลาดเคลื่อนของเข็มทิศ	1 – 2 องศา
ขนาด ยาว x กว้าง x สูง	102 x 42 x 21 มิลลิเมตร

### 3) โปรแกรมประยุกต์ใช้งานสำหรับคำนวณตำแหน่งภายในถ้ำและแสดงผล

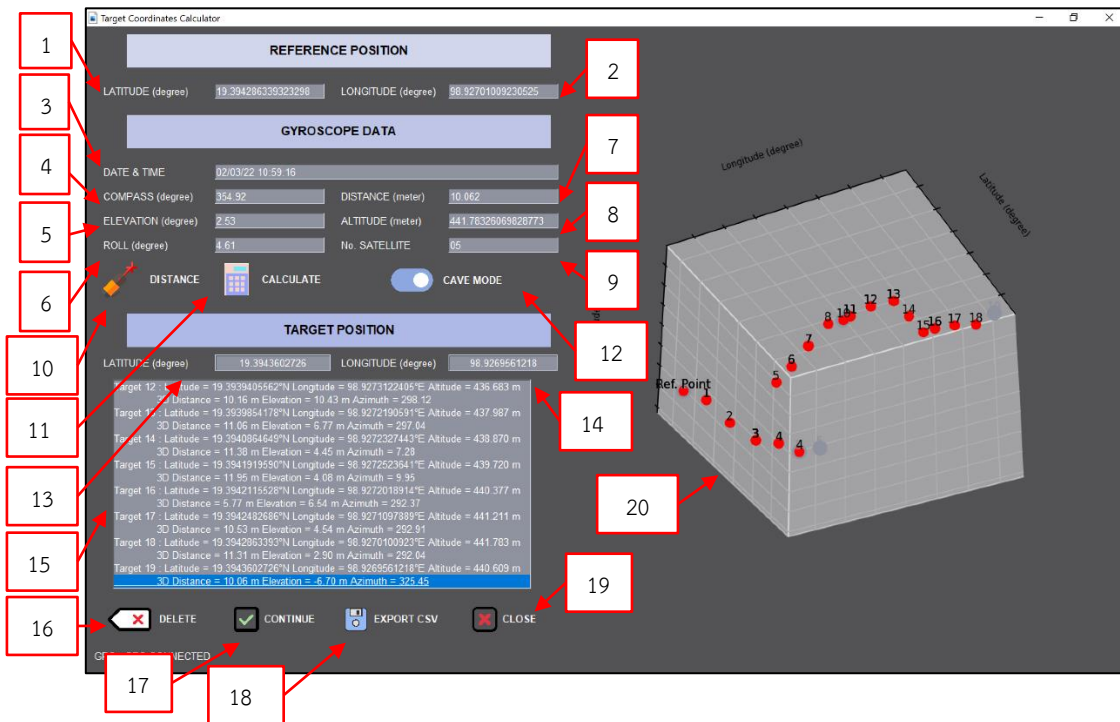
การออกแบบโปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้งานการคำนวณตำแหน่งภายในถ้ำตามระบบที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 นั้น ตัวโปรแกรมที่ออกแบบจะรับข้อมูลจากส่วนฮาร์ดแวร์และเซนเซอร์มาคำนวณโดยอ้างอิงวิธีการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี ส่วนตัวโปรแกรมนั้นได้ใช้ภาษาไพธอน (Python) ในการเขียนหน้าต่างการทำงานตัวเชื่อมประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) ซึ่งจะทำให้การใช้งานโปรแกรมมีความสะดวกและง่ายยิ่งขึ้น โดยในรูปที่ 11 ได้แสดงตัวอย่างหน้าแรกของโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้งานในขั้นต้นเพื่อใช้ในการทดสอบระบบ โดยหลักการทำงานของโปรแกรมนี้อาจจะรับข้อมูลจากเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์และจากเซนเซอร์ภายในเครื่องรับตำแหน่งจีพีเอสทำการบันทึกข้อมูลที่เป็นพิกัดอ้างอิง และข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปซึ่งประกอบด้วย ความสูงจากระดับน้ำทะเลอ้างอิงเริ่มต้น รวมไปถึง ระยะทาง ทิศทาง และมุมเงย ที่ทำการวัดไว้ ณ จุดอ้างอิงเริ่มต้นเพื่อเปรียบเทียบกับพิกัดเป้าหมายถัดไปที่ต้องการทราบ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาใช้คำนวณพิกัดเป้าหมายในตำแหน่งถัดไปให้มีความใกล้เคียงกับที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสซึ่งวัดได้จากภายนอกถ้ำได้มากที่สุด จากนั้นจะแสดงผลพิกัดที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมประยุกต์ดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยโปรแกรมที่ออกแบบนี้จะรองรับกับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) บนแท็บเล็ตหรือบนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 11 ภาพตัวอย่างหน้าจอจากโปรแกรมประยุกต์ใช้งานที่ออกแบบขึ้นในเบื้องต้น

### 2.3 องค์ประกอบของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน

จากรูปที่ 11 โปรแกรมประยุกต์ใช้งานที่ออกแบบประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนของการคำนวณ เป็นช่องสำหรับกรอกข้อมูลหรือแสดงข้อมูลที่รับจากอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เป็นองค์ประกอบของระบบ ได้แก่ จีพีเอส เซลิมทิส และไจโรสโคป และ 2) ส่วนของการแสดงผล เป็นพื้นที่สำหรับใช้แสดงผลจากการคำนวณในรูปแบบตัวเลข ดังแสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนที่เกิดจากการดำเนินการของโปรแกรมที่ออกแบบไว้ในรูปที่ 12 และได้อธิบายความหมายและหน้าที่ของทุกส่วนประกอบไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 12 องค์ประกอบบนหน้าต่างของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของโปรแกรมประยุกต์ใช้งานคำนวณตำแหน่งภายในถ้ำ

หมายเลข	รายการ	คำอธิบาย
1	LATITUDE REF.	พิกัดละติจูดเริ่มต้นจาก GNSS หรือจากการคำนวณก่อนหน้า
2	LONGITUDE REF.	พิกัดลองจิจูดเริ่มต้นจาก GNSS หรือจากการคำนวณก่อนหน้า
3	DATE & TIME	ช่องแสดงเวลา UTC
4	COMPASS	ทิศทางจากเข็มทิศดิจิทัล
5	ELEVATION	มุมเงยจากไจโรสโคป
6	ROLL	มุมเอียงจากไจโรสโคป
7	DISTANCE	ระยะทางจากเลเซอร์
8	ALTITUDE	ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางจาก GNSS หรือจากการคำนวณก่อนหน้า
9	NO. SATELLITE	จำนวนดาวเทียมที่มองเห็นจาก GPS
10	Laser Button	ปุ่มกดเพื่อใช้งานเครื่องวัดระยะเลเซอร์
11	CALCULATE Button	ปุ่มกดเพื่อคำนวณพิกัดเป้าหมาย
12	MODE Button	ปุ่มกดเพื่อเลือกโหมดการทำงาน
13	LATITUDE TARGET	พิกัดละติจูดเป้าหมายจากการคำนวณ

หมายเลข	รายการ	คำอธิบาย
14	LONGITUDE TARGET	พิกัดลองจิจูดเป้าหมายจากการคำนวณ
15	List Box	กล่องแสดงผลการคำนวณ
16	DELETE Button	ปุ่มกดเพื่อลบผลการคำนวณในกล่องข้อความ
17	CONTINUE Button	ปุ่มกดเพื่อนำค่าจากการคำนวณไปใช้คำนวณจุดถัดไป
18	EXPORT CSV Button	ปุ่มกดเพื่อส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel
19	CLOSE Button	ปุ่มกดเพื่อปิดการทำงานโปรแกรม
20	3D GRAPH	กราฟ 3 มิติ แสดงผลจากการคำนวณ

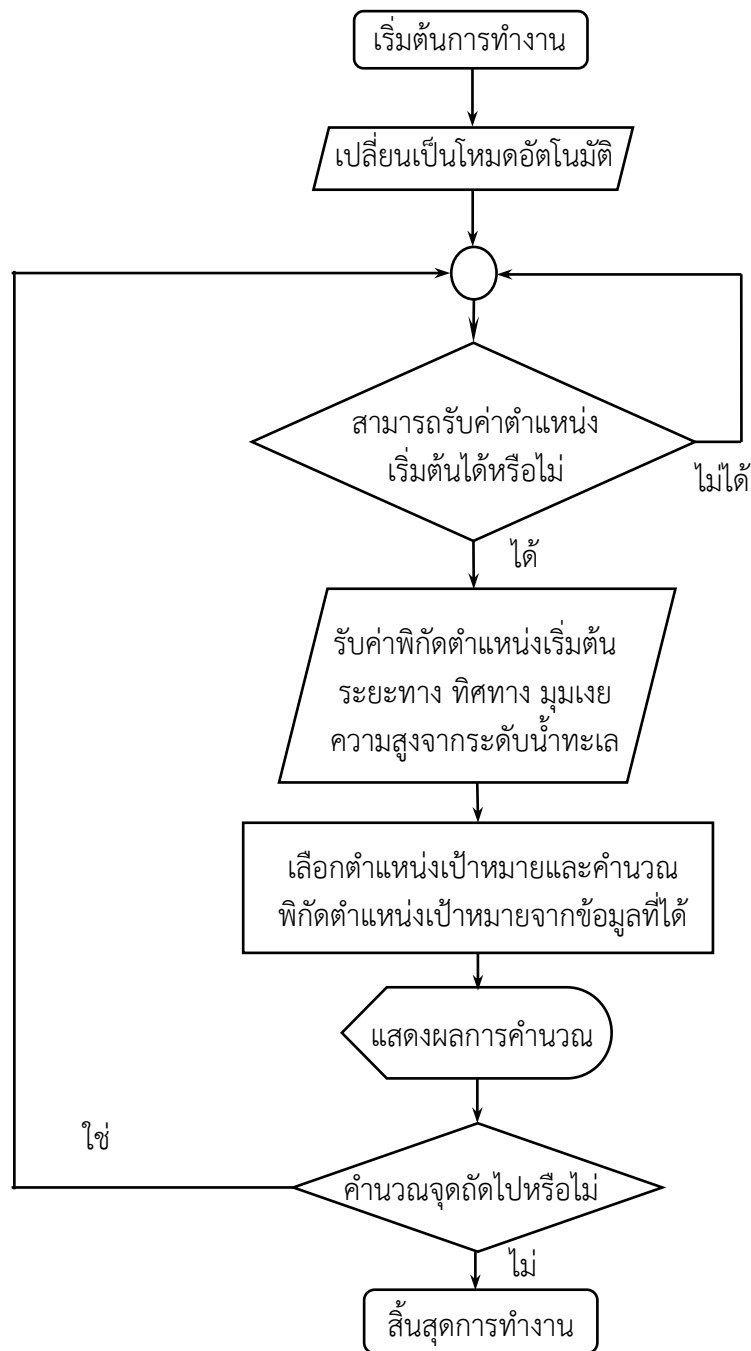
#### 2.4 การทำงานของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์ระบุพิกัดภายในถ้ำประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ใช้วัดค่าต่างๆ ได้แก่ เซนเซอร์ที่ติดจติดกับเครื่องวัดระยะเลเซอร์ และส่วนที่สองจะเป็นระบบประมวลผลหรือโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน เมื่ออุปกรณ์เก็บข้อมูลจากเซนเซอร์เข้ามาแล้วจะส่งข้อมูลไปที่โปรแกรมประยุกต์ใช้งานเพื่อทำการประมวลผล โดยได้ออกแบบให้มีทั้งแบบโหมดการทำงานอัตโนมัติและโหมดการทำงานด้วยมือ

##### 1) โหมดการทำงานอัตโนมัติ (Automatic mode)

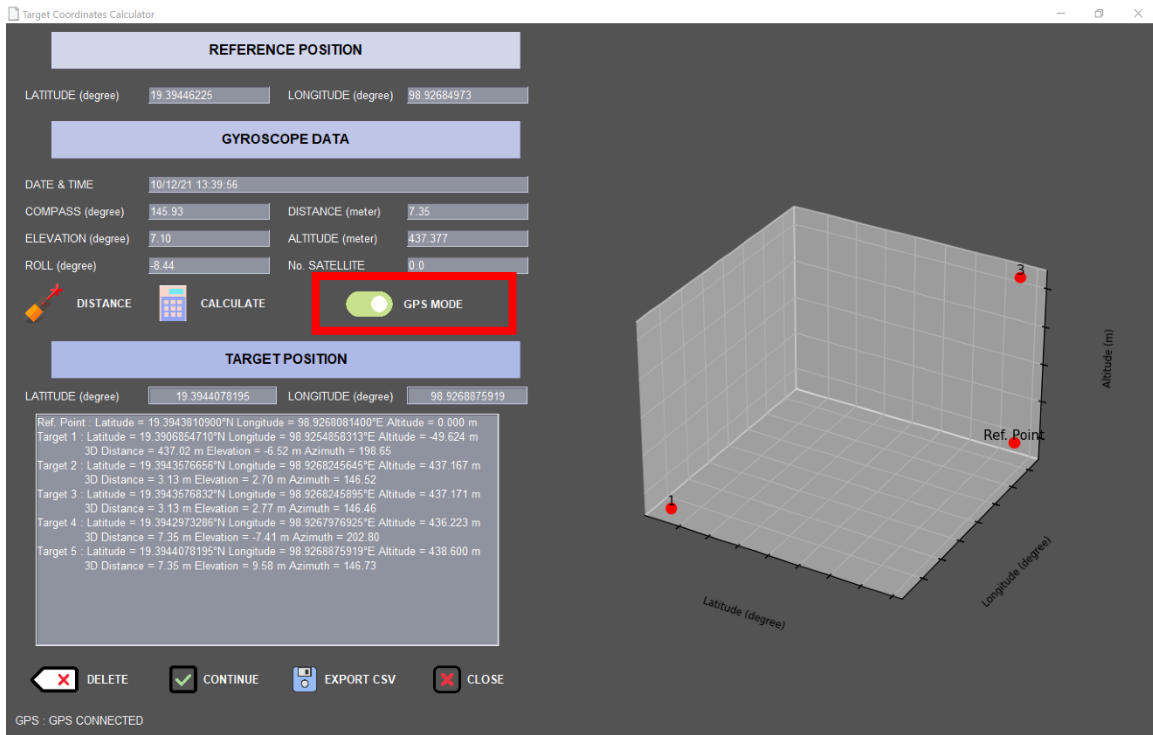
โหมดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน คือ การส่งข้อมูลจากเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ เซนเซอร์ที่ติดจติดกับ ไจโรสโคป และเครื่องรับสัญญาณตำแหน่งจีพีเอส โดยจะกระทำกระบวนการนี้ตลอดเวลา ซึ่งเหมาะสำหรับตำแหน่งการวัดที่สามารถรับสัญญาณจากจีพีเอสได้ ซึ่งผังการทำงานของโปรแกรมในโหมดอัตโนมัตินี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 13





รูปที่ 13 ผังแสดงกระบวนการทำงานในโหมดการทำงานอัตโนมัติ

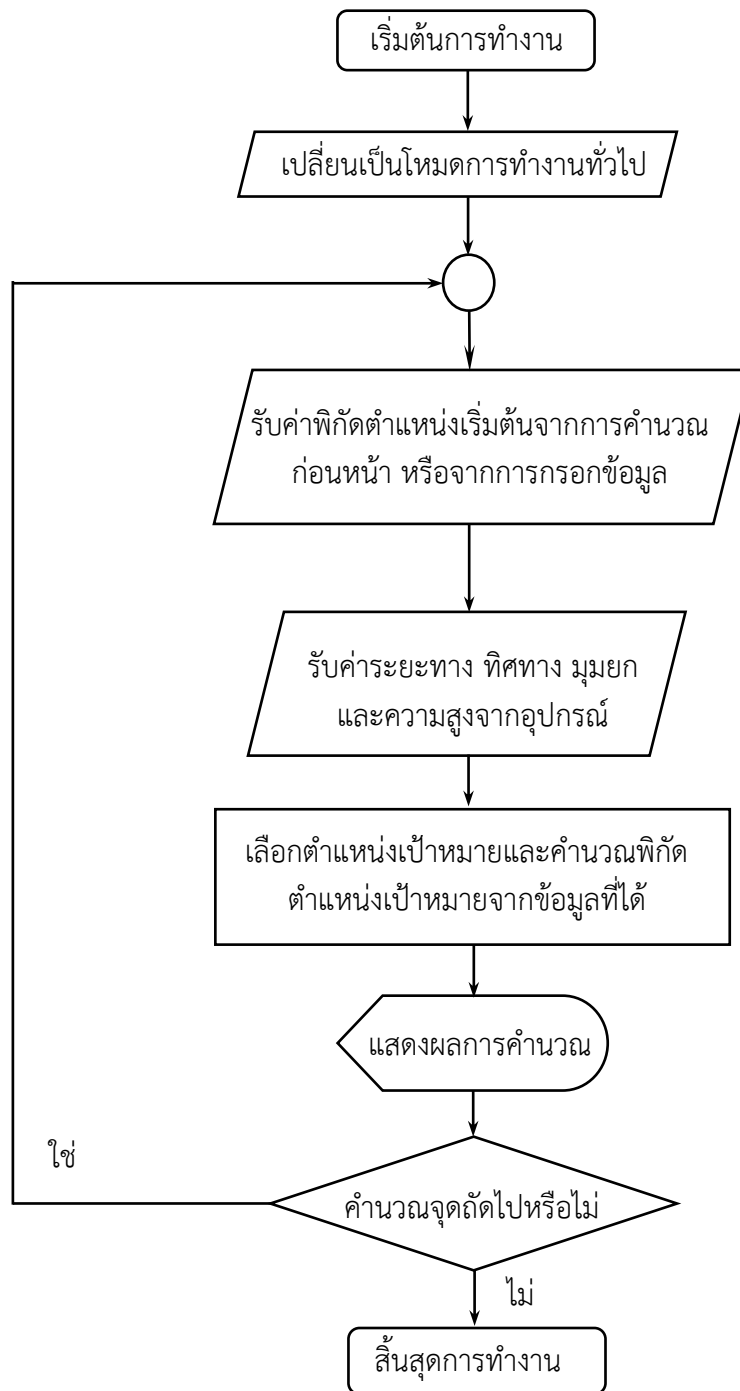
เมื่อโปรแกรมประยุกต์ใช้งานได้รับข้อมูลทั้งหมดจากอุปกรณ์ต่างๆ เข้ามา จะมีการแสดงข้อมูลเหล่านั้นขึ้นมาทันที และหากได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนแล้วผู้ใช้ก็สามารถกดปุ่ม CALCULATE เพื่อสั่งให้โปรแกรมประยุกต์ใช้งานทำการคำนวณและแสดงผลลัพธ์ ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณจะแสดงทั้งในรูปแบบของแถบข้อความหรือในรูปรายการด้านล่าง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ภาพหน้าจอแสดงการทำงานของโปรแกรมทำงานอัตโนมัติ

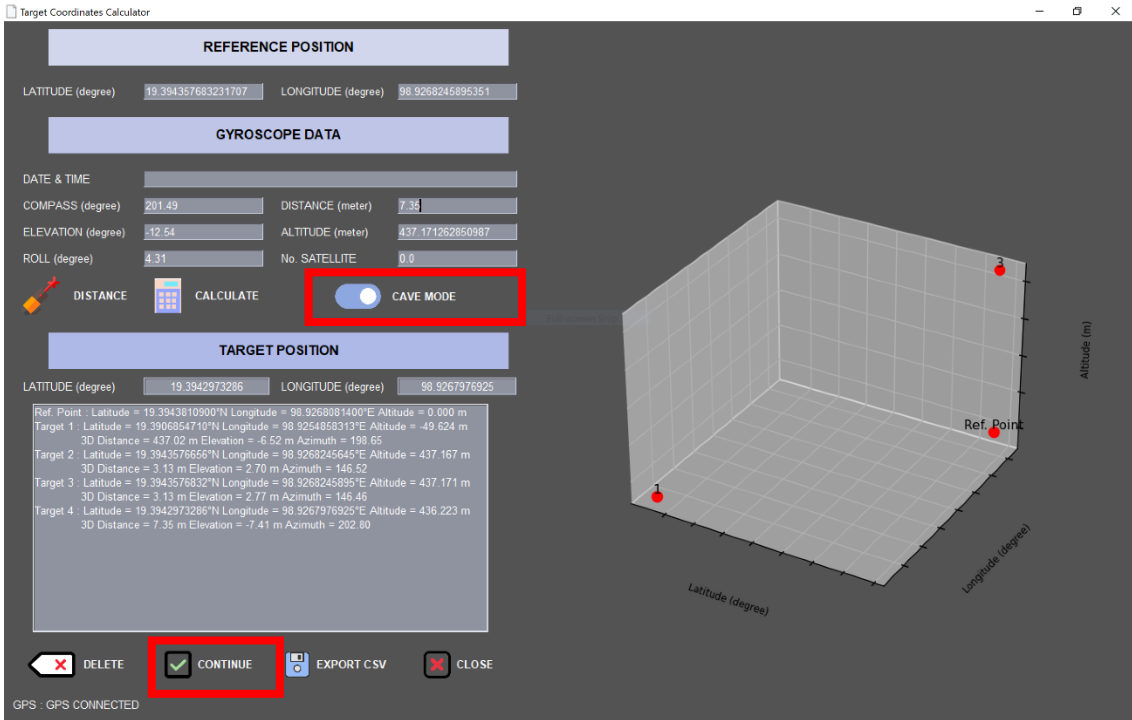
## 2) โหมดการทำงานด้วยมือ (Manual mode)

โหมดการทำงานด้วยมือของโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน คือ การส่งข้อมูลเฉพาะจากเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ เซ็นเซอร์ดิจิทัล และไจโรสโคป โดยไม่มีการส่งข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณตำแหน่งจีพีเอส เพื่อให้เหมาะสำหรับการคำนวณตำแหน่งที่ไม่สามารถรับสัญญาณจากจีพีเอสจากภายในถ้ำได้ โดยการนำโหมดด้วยมือนี้สามารถอธิบายด้วยผังการทำงานตามรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผังแสดงกระบวนการทำงานในโหมดการทำงานด้วยมือ

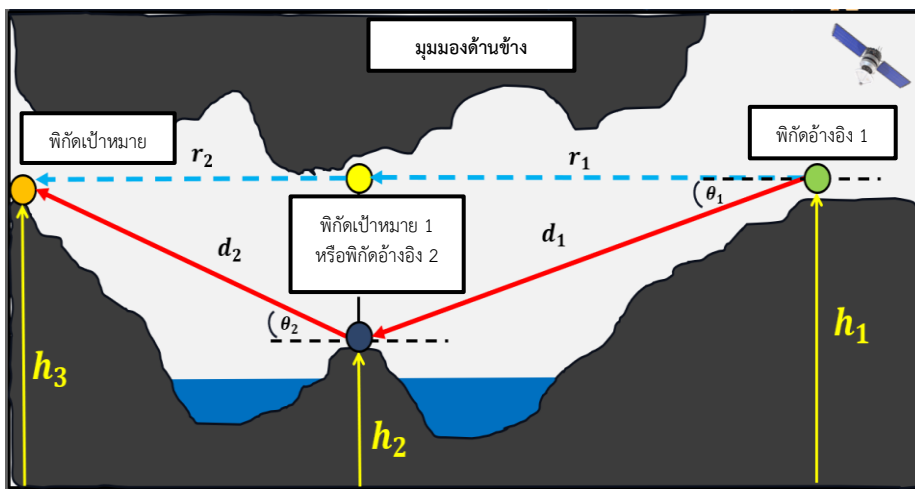
สำหรับโหมดการทำงานด้วยมือนี้ โปรแกรมประยุกต์ใช้งานจะรับข้อมูลจากอุปกรณ์ต่างๆ เข้ามา ยกเว้นข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสและจะแสดงข้อมูลเหล่านั้นทันที จากนั้นจะนำค่าพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้ก่อนหน้านั้นเข้ามาแสดงผล แล้วจึงกดปุ่ม CALCULATE เพื่อคำนวณตำแหน่งพิกัดเป้าหมาย และถ้าหากต้องการนำพิกัดเป้าหมายนี้มาใช้เป็นตำแหน่งพิกัดอ้างอิงถัดไป ให้กดปุ่ม CONTINUE เพื่อที่จะได้นำค่าพิกัดนี้ไปใช้ในคำนวณหาตำแหน่งพิกัดต่อไปได้ ดังแสดงตัวอย่างภาพหน้าจอไว้ในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ภาพหน้าจอแสดงการทำงานในโหมดการทำงานด้วยมือ

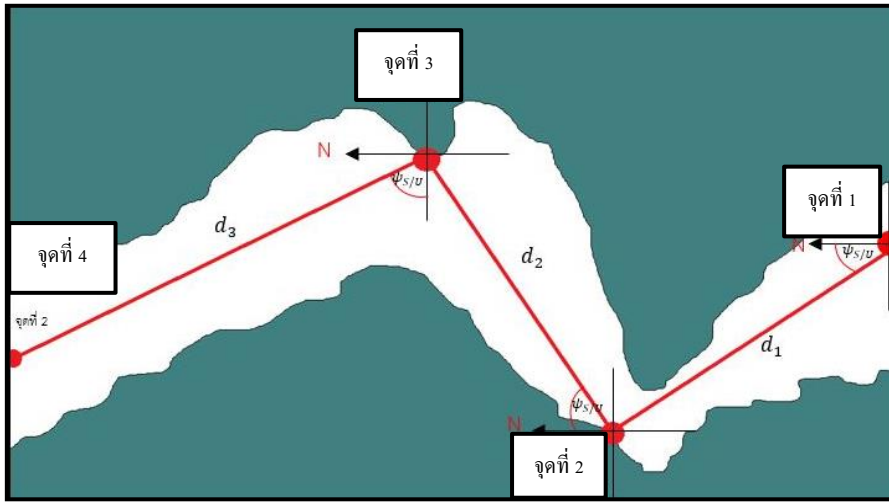
### 3. วิธีการใช้งานระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ

วิธีการใช้ทำงานระบบระบุตำแหน่งในถ้ำจะเริ่มต้นจากการรับค่าพิกัดตำแหน่งและความสูงจากระดับน้ำทะเลในจุดที่สามารถรับสัญญาณจากจีพีเอสได้เพื่อใช้เป็นพิกัดอ้างอิง อาจจะเป็นตำแหน่งบริเวณด้านหน้าถ้ำหรือบริเวณพื้นที่เปิดโล่งใกล้ด้านหน้าถ้ำ หลังจากนั้นกำหนดพิกัดเป้าหมายที่ต้องการทราบ ข้อมูลทั้งมุมเงย ระยะทาง ทิศทาง และความสูงจากระดับน้ำทะเล จะถูกส่งไปยังโปรแกรมประยุกต์ใช้งานที่ออกแบบไว้ ซึ่งสามารถแสดงภาพประกอบหลักการทำงานในมุมมองด้านข้างได้ดังรูปที่ 17 ในกรณีที่เส้นทางภายในโพรงถ้ำมีความสูงชันแตกต่างกัน



รูปที่ 17 ภาพแสดงวิธีการหาตำแหน่งพิกัดในถ้ำที่มีความสูงชันแตกต่างกัน (มุมมองด้านข้าง)

เมื่อได้ตำแหน่งพิกัดเป้าหมายจากการคำนวณเทียบกับพิกัดอ้างอิงในครั้งแรกแล้ว ตำแหน่งพิกัดดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นตำแหน่งพิกัดอ้างอิงที่จุดถัดไป เพื่อคำนวณหาตำแหน่งพิกัดที่อยู่ถัดไปตามเส้นทางของโพรงถ้ำแต่ละที่ซึ่งอาจมีความสูงชันและมีความคดเคี้ยวแตกต่างกัน (มุมมองด้านบน) ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ภาพแสดงวิธีการหาตำแหน่งพิกัดในถ้ำที่มีความคดเคี้ยว (มุมมองด้านบน)

#### 4. ผลการทดสอบเบื้องต้นของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ

##### 4.1 การทดสอบความแม่นยำโดยใช้เทคนิคทางยี่ห้อเดซี

การทดสอบความแม่นยำโดยใช้เทคนิคทางยี่ห้อเดซี ได้ถูกทำการทดสอบขึ้นมาเพื่อประเมินความถูกต้องของเทคนิคข้างต้นก่อนจะนำไปใช้ในสถานการณ์จริง โดยการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นต่อการคำนวณ เช่น พิกัดอ้างอิงเริ่มต้น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ระยะทาง มุมเงย และทิศทางจากพิกัดอ้างอิง เพื่อคำนวณพิกัดเป้าหมายในระยะทางต่างกันและทิศทางที่ต่างกัน เทียบกับการใช้ระบบระบุตำแหน่งบนโลกในการบอกตำแหน่งปลายทาง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำตรงหากนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งภายในถ้ำโดยมีหัวข้อการทดสอบดังนี้

##### 1) ขั้นตอนการทดสอบ

ก. กำหนดพื้นที่ที่นำมาใช้ทดสอบ โดยพื้นที่ต้องมีความกว้าง เปิดโล่ง เป็นพื้นที่ราบ ไร้สิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้ เพื่อต้องการลดปัจจัยต่างๆ เช่น ปัจจัยจากภูมิประเทศ ปัจจัยจากการสะท้อนของสัญญาณ และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณจากดาวเทียมสูงสุด บริเวณที่เลือกใช้ทดสอบคือ บริเวณพื้นที่สนามข้างศูนย์วิจัยมันสำปะหลังภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พื้นที่ดังกล่าวอยู่บริเวณพิกัดละติจูด 14.873 องศาเหนือ และลองจิจูด 102.0187 องศาตะวันออก มีขนาดประมาณกว้าง 150 เมตรและยาว 300 เมตร จึงมีความเหมาะสมตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แสดงดังรูปที่ 19

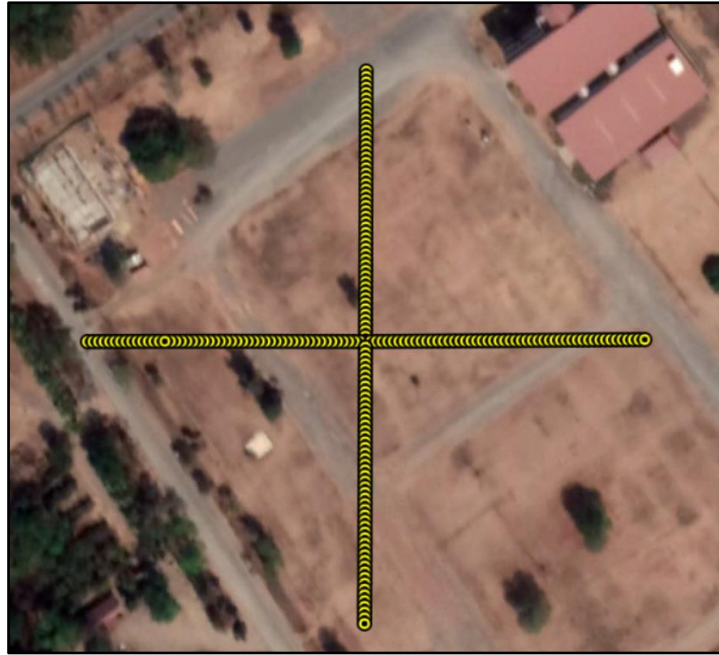


รูปที่ 19 ภาพจากดาวเทียมบริเวณศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง

ข. กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี่ เช่น พิกัดเริ่มต้น ระยะทางและทิศทางจากจุดอ้างอิง เป็นต้น โดยการทดสอบครั้งนี้ได้เลือกพิกัดเริ่มต้นดังรูปที่ 20 คือ พิกัดเริ่มต้นตำแหน่ง 14.8735160 องศาเหนือ 102.01873280 องศาตะวันออก และทิศทางจากจุดเริ่มต้นที่กำหนดเพื่อทดสอบเทคนิคที่อ้างอิงโดยเทียบจากการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวละติจูดและแนวลองจิจูด เช่น มุม 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา จากนั้นกำหนดระยะทางจากจุดเริ่มต้นในแต่ละทิศทางทุก 2 เมตร ทั้งหมด 50 จุด รวมแล้วทิศทางละ 100 เมตร ดังรูปที่ 21 - 23



รูปที่ 20 ภาพจากดาวเทียมแสดงพิกัดเริ่มต้น



รูปที่ 21 แผนที่จากดาวเทียมแสดงระยะทางรวมในแต่ละทิศทาง



รูปที่ 22 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตัวอย่างระยะห่างจุดละ 2 เมตร ทั้งหมด 50 จุด



รูปที่ 23 ภาพแสดงขณะทำการทดสอบความแม่นยำระบบฯ

ค. นำอุปกรณ์ระบุพิกัดด้วยจีพีเอสเก็บข้อมูลพิกัดตามจุดที่กำหนดไว้ ตามทิศทางและระยะทางข้างต้น เพื่อเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิคทางยิปโซเดซี ดังตัวอย่างในรูปที่ 24



รูปที่ 24 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตัวอย่างผลที่ได้จากจีพีเอส (มุม 0 องศา)



2) ผลที่ได้จากการทดสอบ

ก. ผลการทดสอบระหว่างตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี่ เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส ณ ทิศทางมุม 0 องศา ดังรูปที่ 25 – 28



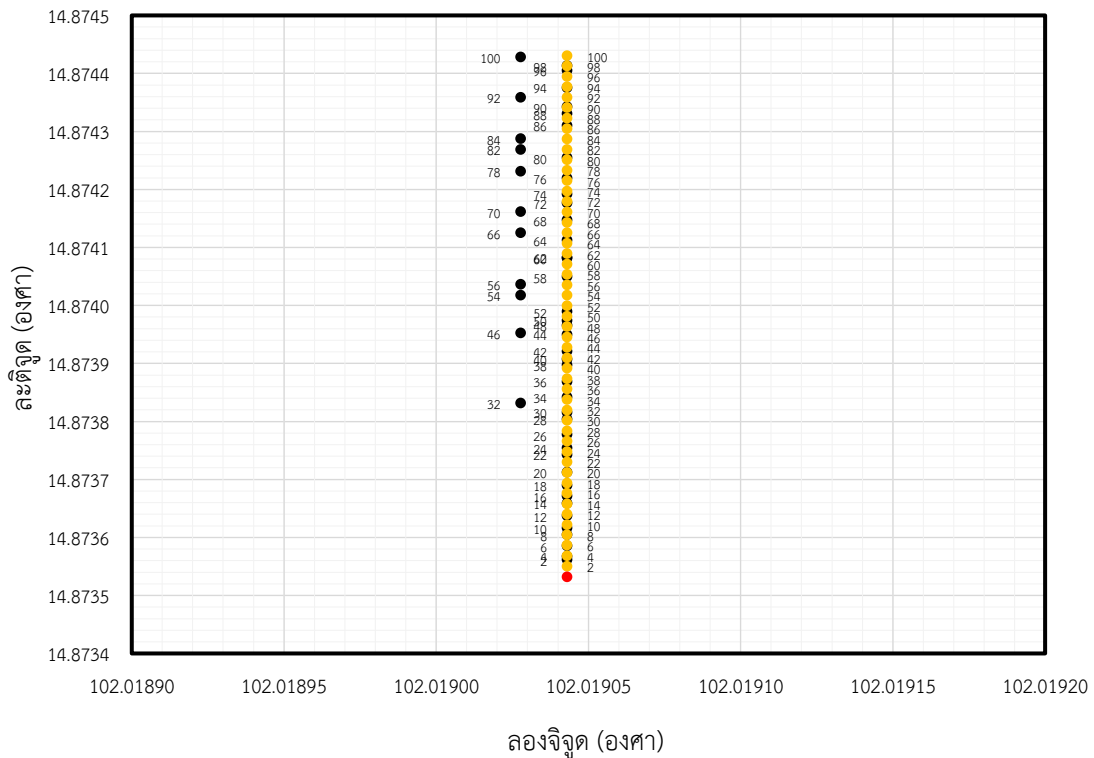
รูปที่ 25 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ (มุม 0 องศา)



รูปที่ 26 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 0 องศา)



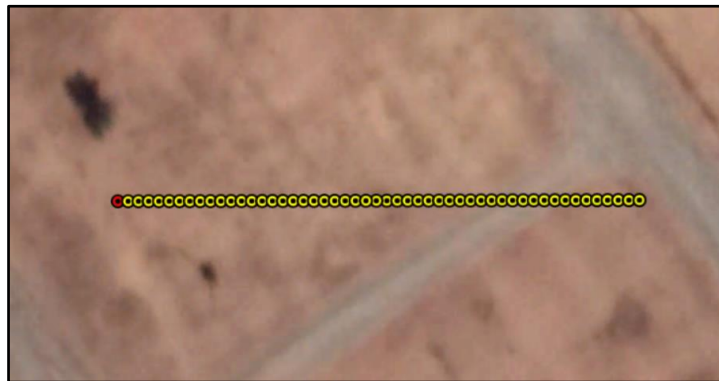
รูปที่ 27 แผนที่แสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 0 องศา)



- ตำแหน่งจากจีพีเอส
- ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ
- ตำแหน่งอ้างอิง

รูปที่ 28 กราฟแสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 0 องศา)

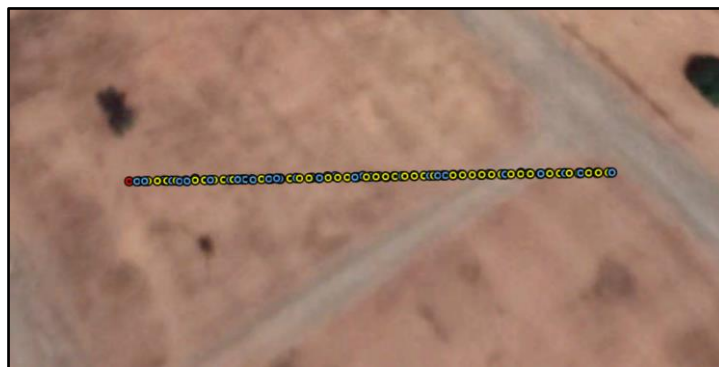
ข. ผลการทดสอบระหว่างตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี่ เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส ณ ทิศทางมุม 90 องศา ดังรูปที่ 29 – 32



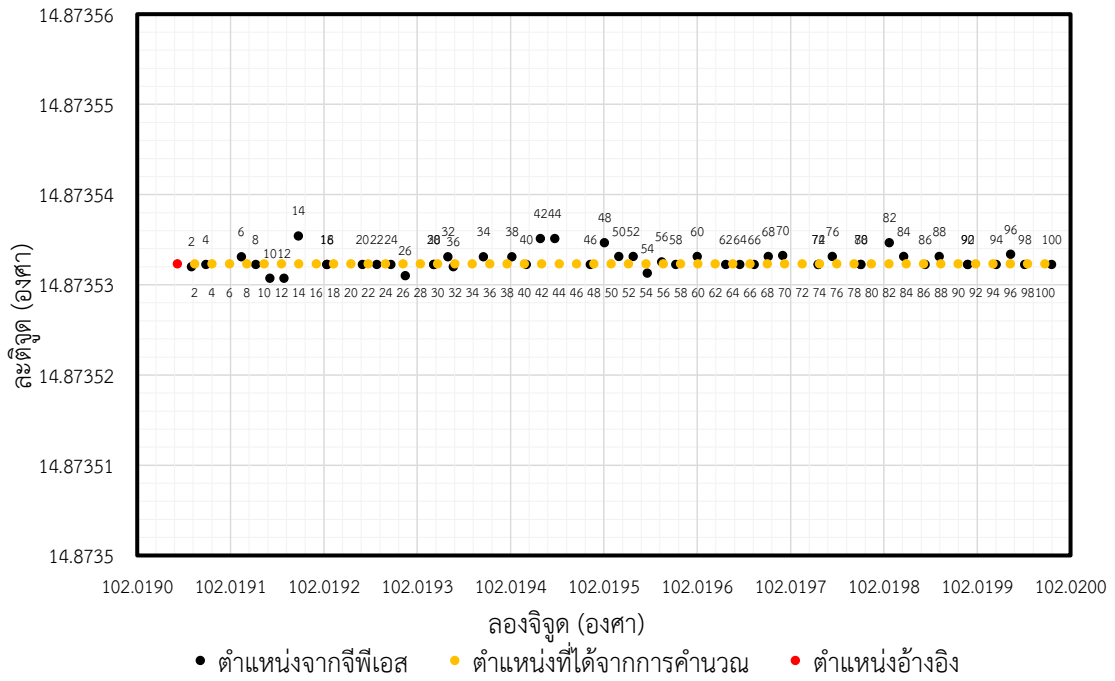
รูปที่ 29 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ (มุม 90 องศา)



รูปที่ 30 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 90 องศา)



รูปที่ 31 แผนที่แสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 90 องศา)



รูปที่ 32 กราฟแสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 90 องศา)

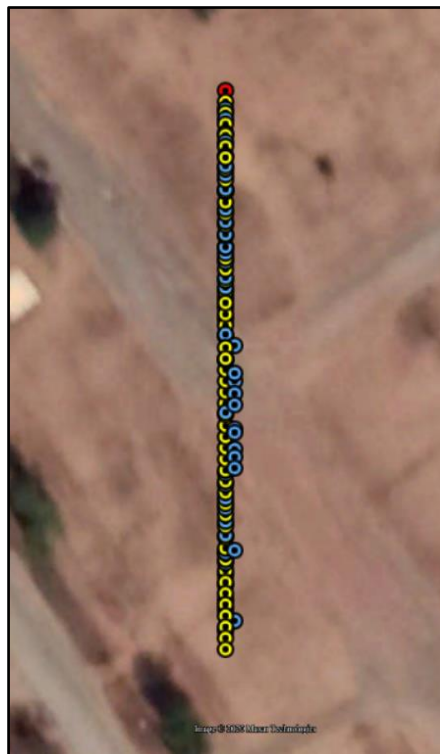
ค. ผลการทดสอบระหว่างตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคทางฮิปอเดซี เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสมุม ทิศทางมุม 180 องศา ดังรูปที่ 33 – 36



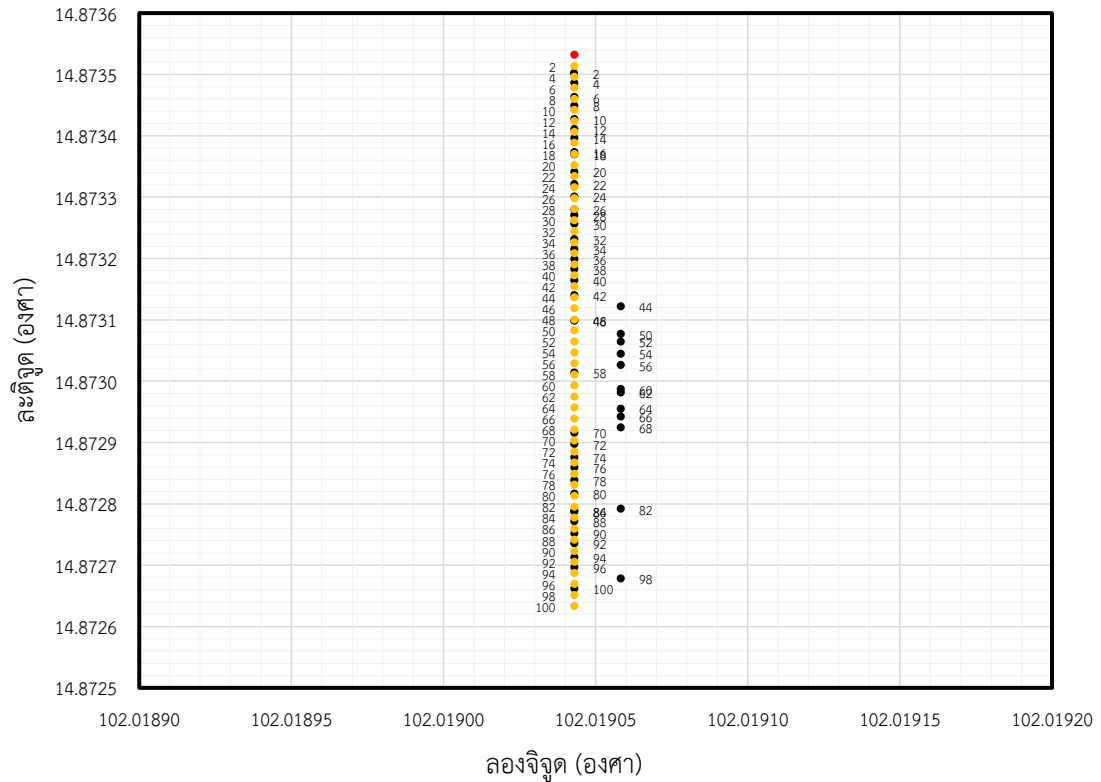
รูปที่ 33 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ (มุม 180 องศา)



รูปที่ 34 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 180 องศา)



รูปที่ 35 แผนที่แสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 180 องศา)



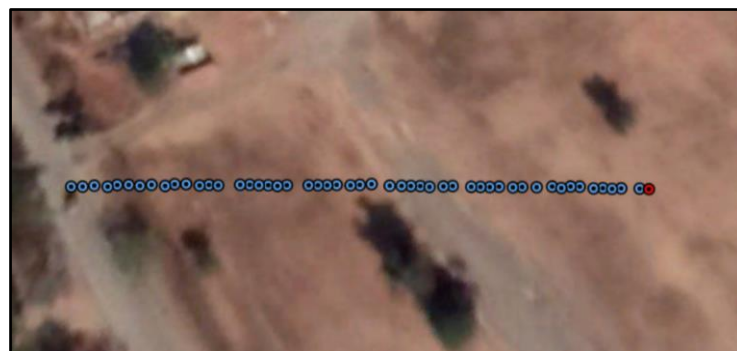
- ตำแหน่งจากจีพีเอส
- ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ
- ตำแหน่งอ้างอิง

รูปที่ 36 กราฟแสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 180 องศา)

ง. ผลการทดสอบระหว่างตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคทางยิปอดซีส์ เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส ณ ทิศทางมุม 270 องศา ดังรูปที่ 37 – 40



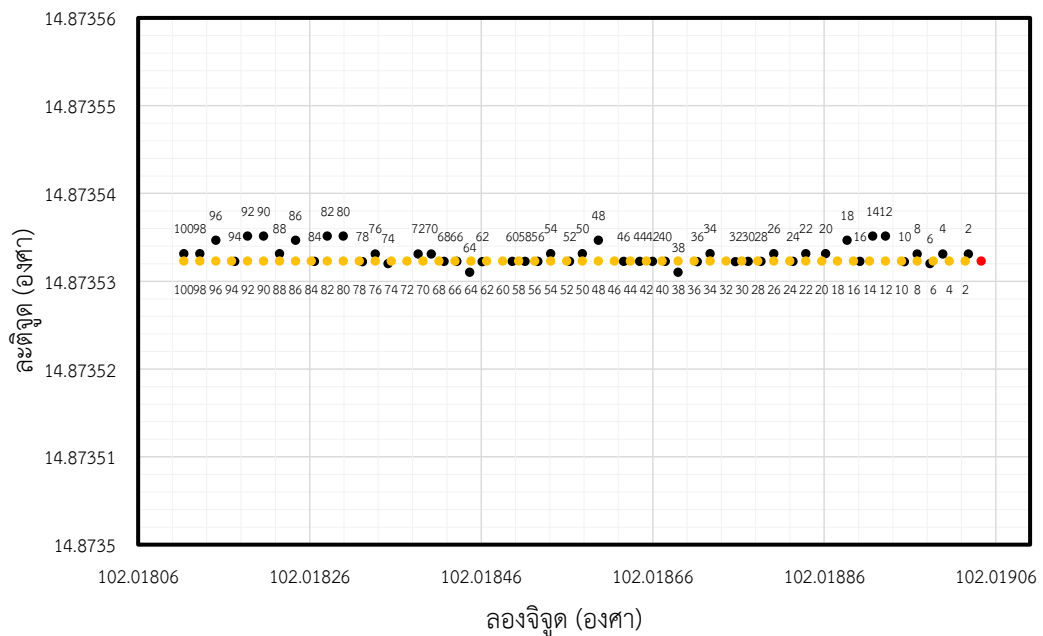
รูปที่ 37 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ (มุม 270 องศา)



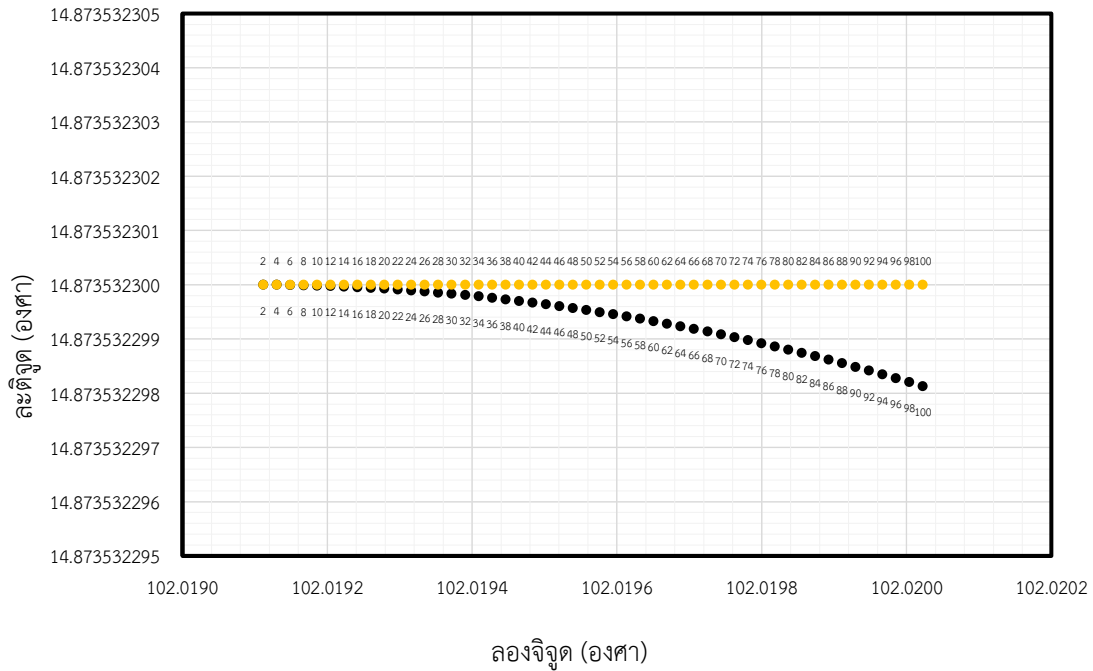
รูปที่ 38 แผนที่จากดาวเทียมแสดงตำแหน่งจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 270 องศา)



รูปที่ 39 แผนที่แสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 270 องศา)

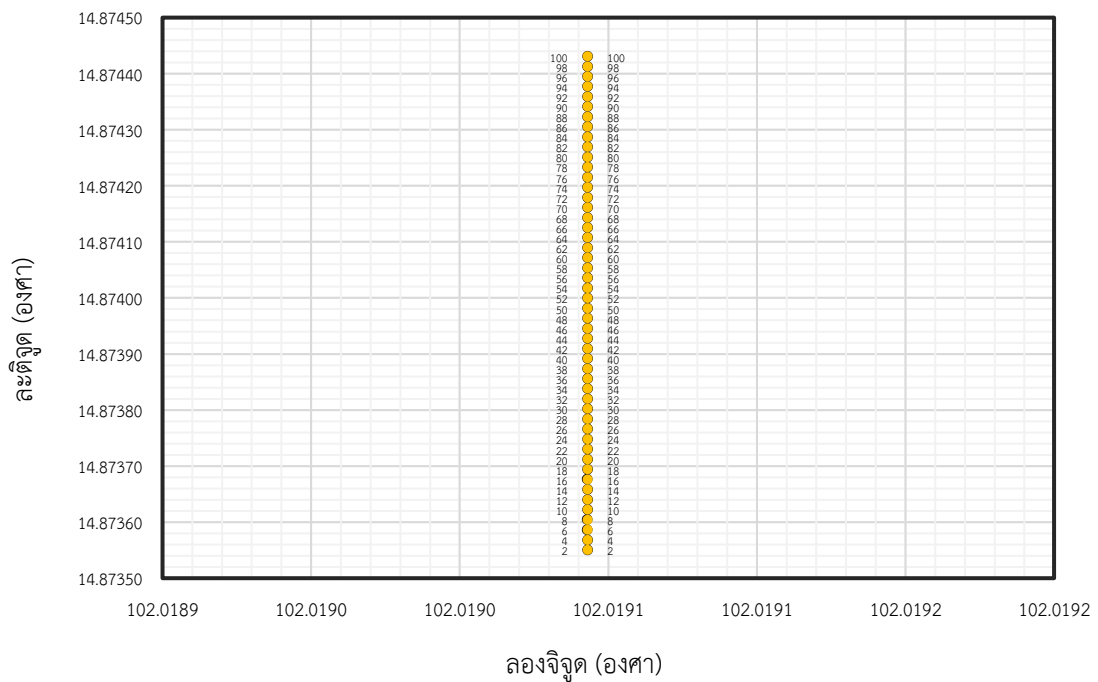


รูปที่ 40 กราฟแสดงตำแหน่งจากการคำนวณและจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (มุม 270 องศา)



- การคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี
- ทฤษฎีพิกัดทรงกลม

รูปที่ 41 กราฟแสดงตำแหน่งจากคำนวณเทียบกับทฤษฎีพิกัดทรงกลมในแนวละติจูด



- การคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี
- ทฤษฎีพิกัดทรงกลม

รูปที่ 42 กราฟแสดงตำแหน่งจากคำนวณเทียบกับทฤษฎีพิกัดทรงกลมในแนวลองจิจูด



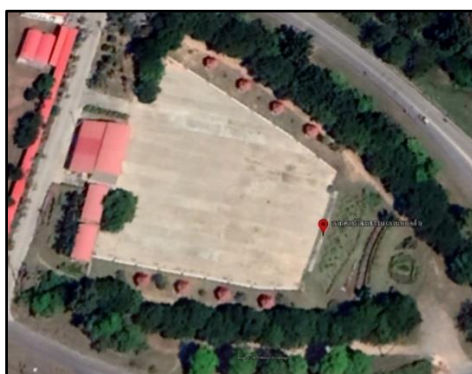
จากการทดสอบการใช้เทคนิคทางยี่ห้อเดซีในการหาตำแหน่งเป้าหมาย โดยกำหนดระยะทางและทิศทางจากพิกัดอ้างอิง ที่ระยะทางไม่เกิน 100 เมตร และทิศทาง 0 องศา 90 องศา 180 องศา และ 270 องศา เปรียบเทียบกับการระบุตำแหน่งด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส พบว่าการคำนวณพิกัดเป้าหมายด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซีที่ได้นำมาใช้งานในการระบุตำแหน่งภายในถ้ำนั้นมีความแม่นยำสูงมาก ในขณะที่การระบุตำแหน่งด้วยอุปกรณ์จีพีเอสนั้นยังเกิดความคลาดเคลื่อน และจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซีเทียบกับทฤษฎีพิกัดทรงกลม ในระยะทาง 100 เมตร จากจุดพิกัดอ้างอิง ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในแนวลองจิจูดตามทฤษฎีพิกัดทรงกลม แต่กลับมีผลความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในแนวละติจูด โดยที่ระยะ 100 เมตร ผลจากการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี เบี่ยงเบนออกจากค่าตามทฤษฎีพิกัดทรงกลม ประมาณ 0.02 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 41 และรูปที่ 42

#### 4.2 การทดสอบความแม่นยำตรงของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส

เนื่องจากการทดสอบการใช้เทคนิคทางยี่ห้อเดซีในการหาตำแหน่งเป้าหมาย จะสังเกตได้ถึง ความแม่นยำตรงของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส ที่มีความคลาดเคลื่อนทั้งในแนวละติจูดและลองจิจูดซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งเพื่อใช้เป็นตำแหน่งพิกัดอ้างอิงเมื่อนำไปใช้งานจริง จึงต้องทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆ เพื่อสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์บอกตำแหน่งภายในถ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพโดย สมมติฐาน คือ ปัจจัยต่างๆ ทั้งความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากทั้งสภาพแวดล้อม สภาพอากาศ ประสิทธิภาพ การมองเห็นจำนวนดาวเทียม และการวางตัวของดาวเทียมจีพีเอสในแต่ละช่วงเวลา

##### 4.2.1 ขั้นตอนการทดสอบเชิงเปรียบเทียบเวลา

1) กำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ โดยพื้นที่ยังคงต้องมีความกว้าง เปิดโล่ง พื้นที่ราบ ไร้สิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้เพื่อต้องการลดปัจจัยต่างๆ เช่น จากภูมิประเทศ จากการสะท้อนของสัญญาณ เป็นต้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณจากจำนวนดาวเทียมสูงสุด ดังนั้นบริเวณที่เลือกใช้ทดสอบคือ ลานศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พื้นที่ดังกล่าวอยู่บริเวณพิกัด 14.894335 องศาเหนือ 102.014419 องศาตะวันออก มีความเหมาะสมตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังแสดงดังรูปที่ 43 และ 44



รูปที่ 43 ภาพจากดาวเทียมบริเวณลานศิลปวัฒนธรรมในพื้นที่มหาวิทยาลัย

2) จากสมมติฐานขั้นต้น ปัจจัยที่ส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส คือ ช่วงเวลาที่ใช้งานอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส ในการทดสอบสมมติฐานนี้จึงกำหนดตัวแปรเวลาที่ใช้รับ

สัญญาณจีพีเอส โดยทำการทดสอบทั้งหมด 4 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 ครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 ครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 และครั้งที่ 4 คือ 28 สิงหาคม 2563

3) การทดสอบแต่ละครั้งจะกำหนดตัวแปรเวลาเวลาที่ทำการทดสอบคือ ช่วงเวลา 06.00 น. ถึง 18.00 น.

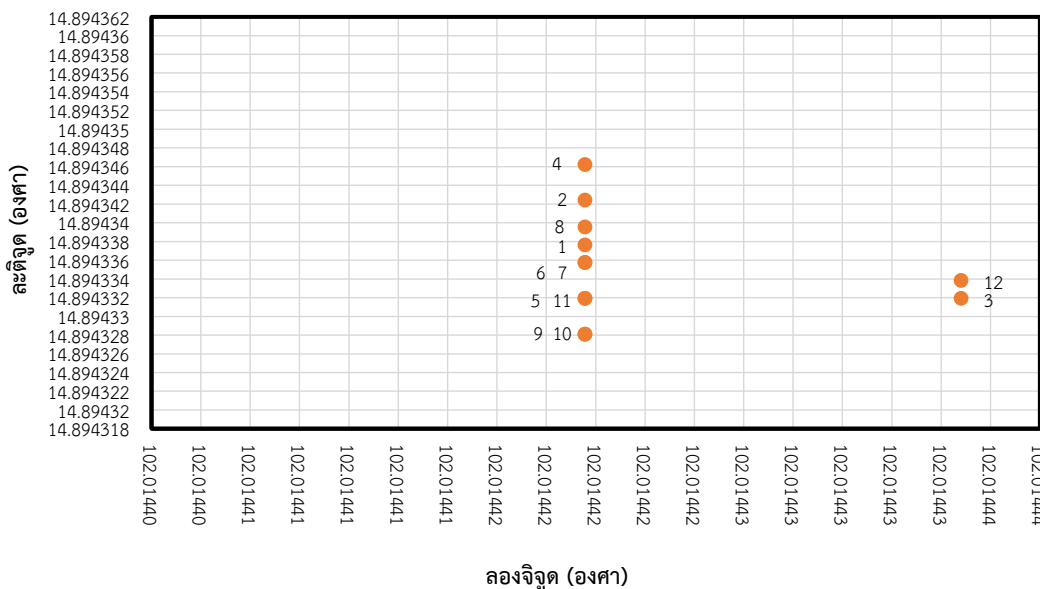


รูปที่ 44 ภาพขณะทำการทดสอบบริเวณลานศิลปวัฒนธรรม มทส.

4) ผลการทดสอบครั้งที่ 1

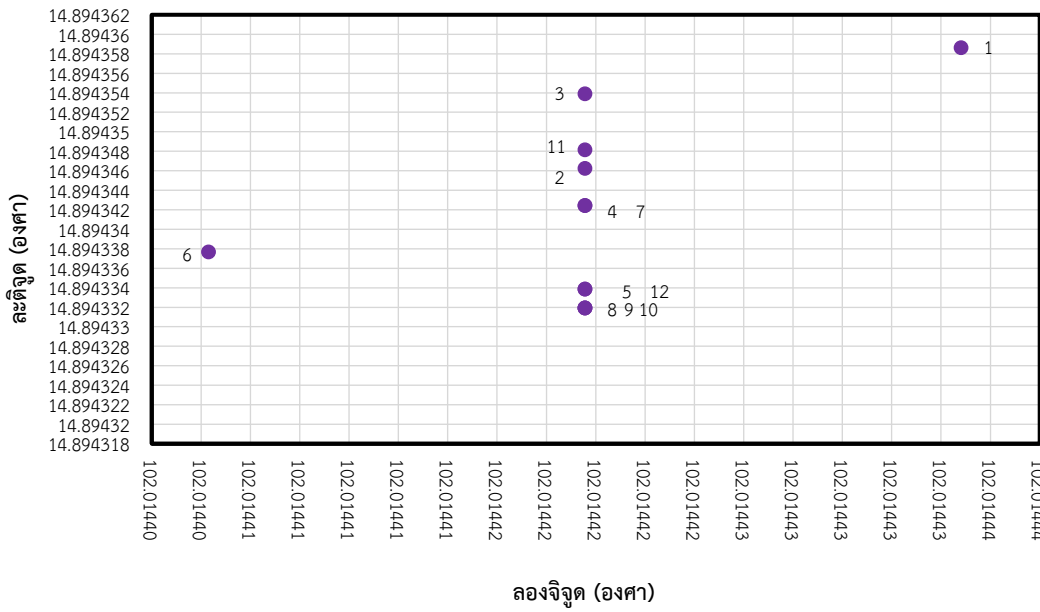
การทดสอบครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 19 มกราคม 2563 เป็นการทดสอบครั้งแรก โดยกำหนดช่วงเวลา คือ 06.00 น. 09.00 น. 12.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาจะทำการวัดทั้งหมด 12 ครั้ง แต่แต่ละครั้งต่างกัน 5 นาที รวมทั้งหมด 60 ครั้ง

ก. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 06.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 45



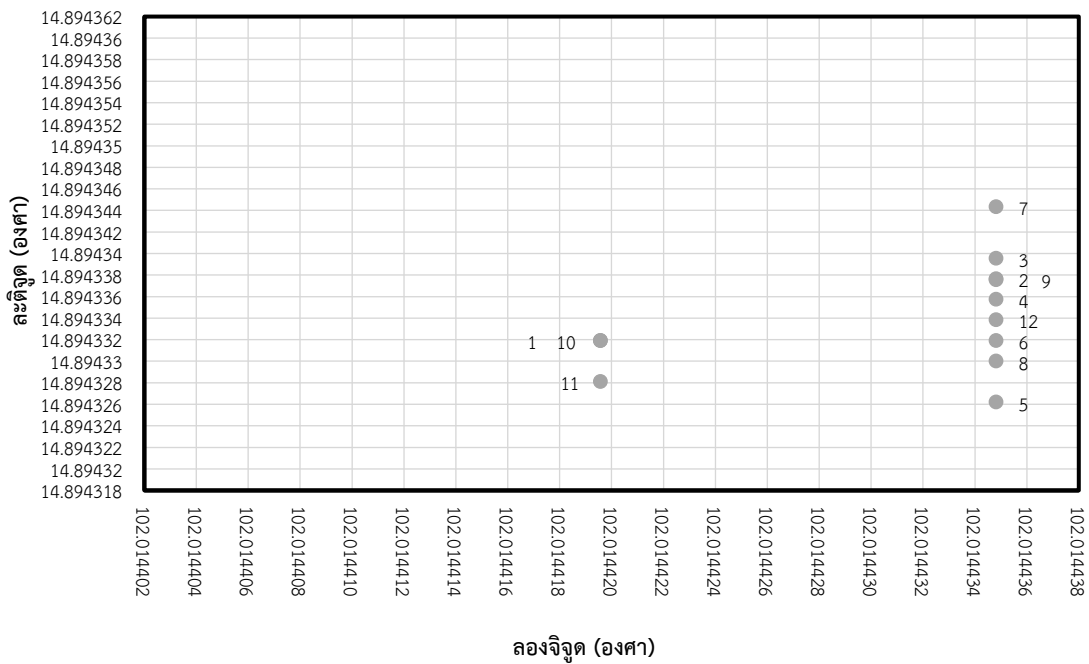
รูปที่ 45 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 เวลา 06.00 น.

ข. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 09.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 46



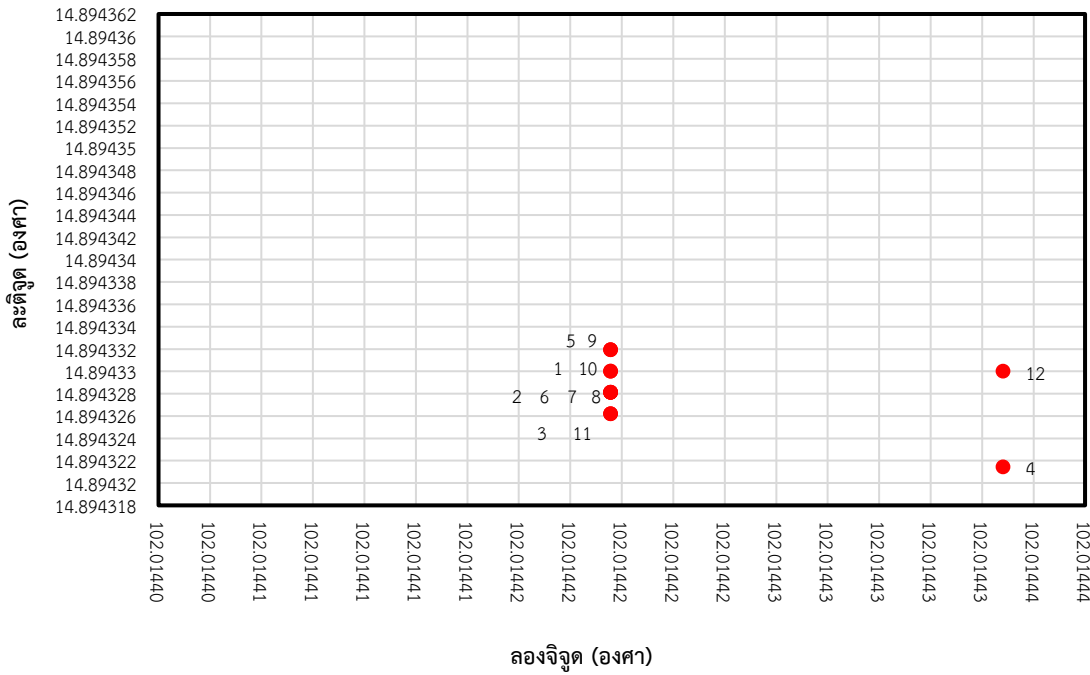
รูปที่ 7.39 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 เวลา 09.00 น.

ค. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 47



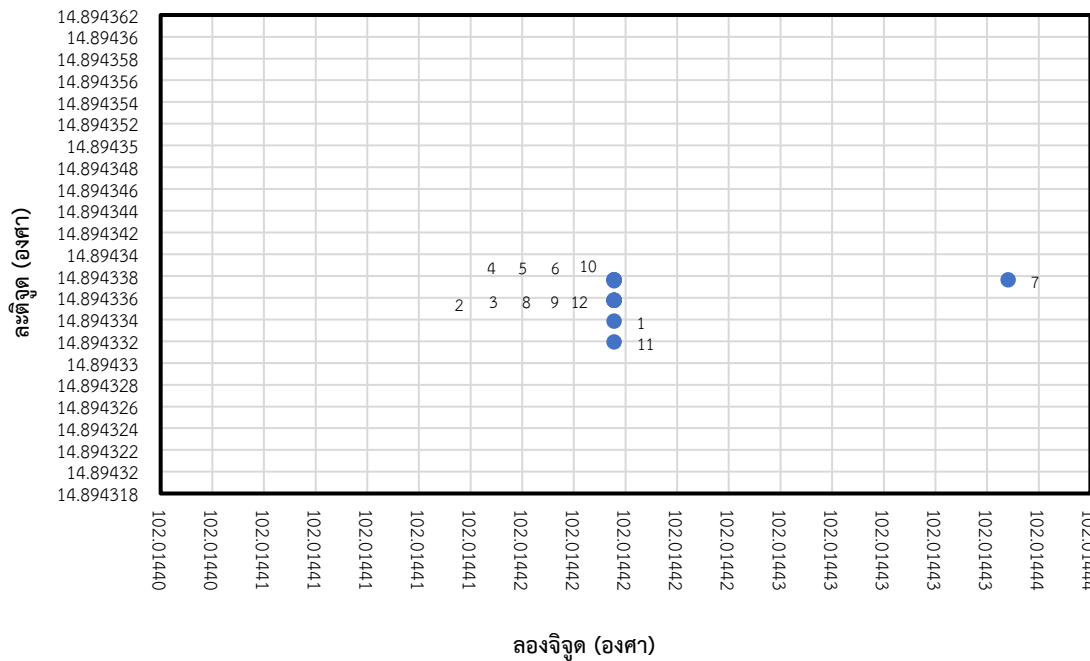
รูปที่ 47 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 เวลา 12.00 น.

ง. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 15.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 48



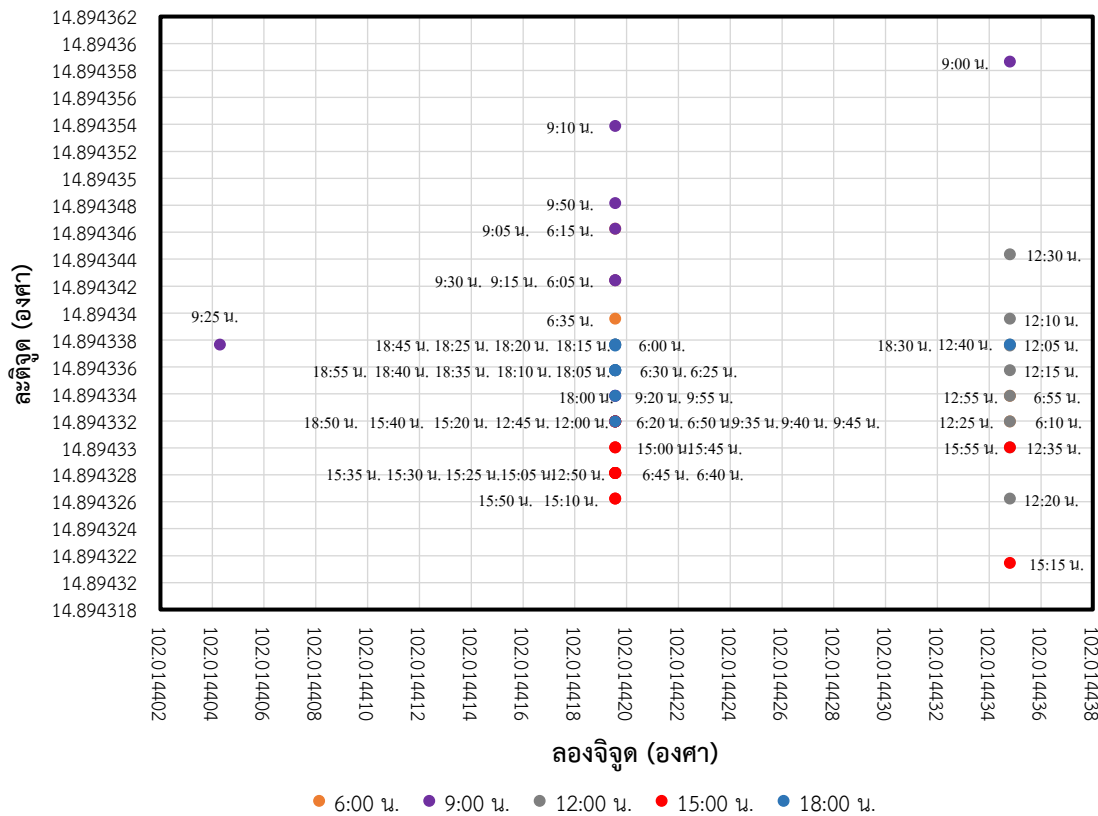
รูปที่ 48 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 เวลา 15.00 น.

จ. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 18.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 49



รูปที่ 49 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 เวลา 18.00 น.

ฉ. ผลการทดสอบรวมทั้งหมด วันที่ 19 มกราคม 2563 ดังแสดงในรูปที่ 50



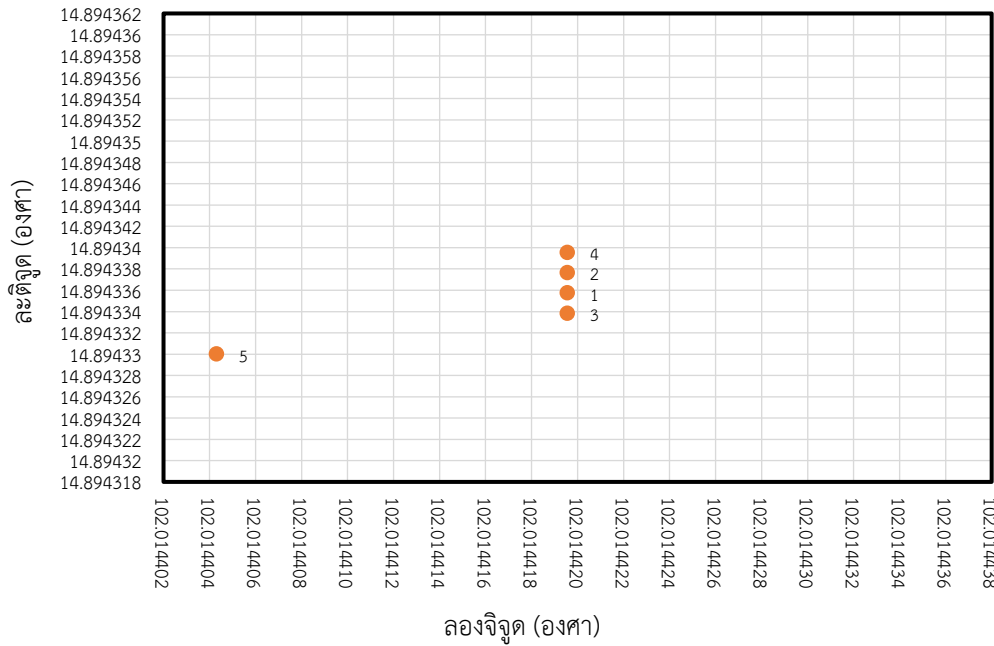
รูปที่ 50 กราฟแสดงผลการทดสอบรวมทั้งหมดครั้งที่ 1

จากกราฟที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 45 – 50 ของการทดสอบครั้งที่ 1 จะเป็นการทดสอบโดยมี สมมติฐานแรกคือการรับสัญญาณจากดาวเทียมในช่วงเวลาที่ต่างกัน จะเกิดกลุ่มของพิกัดตำแหน่งที่แตกต่าง กันไปด้วย ในการทดสอบพบว่า การรับสัญญาณในช่วงเวลา 06.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. มีการรวมกลุ่ม ของตำแหน่งในแนวละติจูดใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงในแนวลองจิจูดเล็กน้อย ต่างจากช่วงเวลา 09.00 น. ที่มีการรวมกลุ่มของตำแหน่งในแนวละติจูดน้อยกว่าและมีการเปลี่ยนแปลงลองจิจูดเบี่ยงทางซ้าย และทางขวาที่ลองจิจูด 102.01440431 และ 102.01443481 องศาตะวันออก ตามลำดับ และในช่วงเวลา 12.00 น. จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงในแนวลองจิจูดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีการรวมกลุ่มส่วนใหญ่ในแนว ลองจิจูดเบี่ยงทางซ้าย ที่ลองจิจูด 102.01443481 องศาตะวันออก จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 1 พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณจากดาวเทียมมีการเปลี่ยนแปลงในแนวลองจิจูดที่สม่ำเสมอ อยู่ที่ 0.00001525 องศา หรือประมาณ 1.6 เมตรที่ตำแหน่งละติจูดที่ 14.8943 องศาเหนือ เพื่อวิเคราะห์สมมติฐานที่ตั้งไว้จึงได้ ทดสอบครั้งที่ 2 ต่อไป

5) ผลการทดสอบครั้งที่ 2

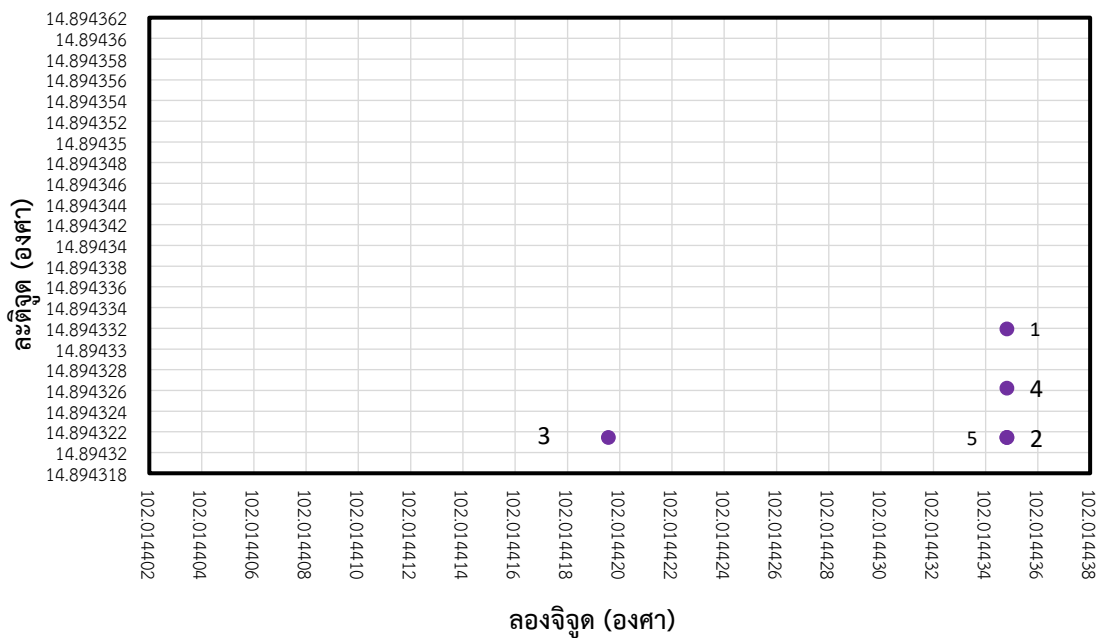
การทดสอบครั้งที่ 2 ได้กระทำขึ้นในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 โดยช่วงเวลาของการทดสอบได้ กำหนดไว้ที่เวลา 06.00 น. 09.00 น. 12.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. ในแต่ละช่วงเวลา จะทำการวัด ทั้งหมด 5 ครั้ง แต่ละครั้งต่างกัน 5 นาที รวมทั้งหมด 25 ครั้ง

ก. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 06.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 51



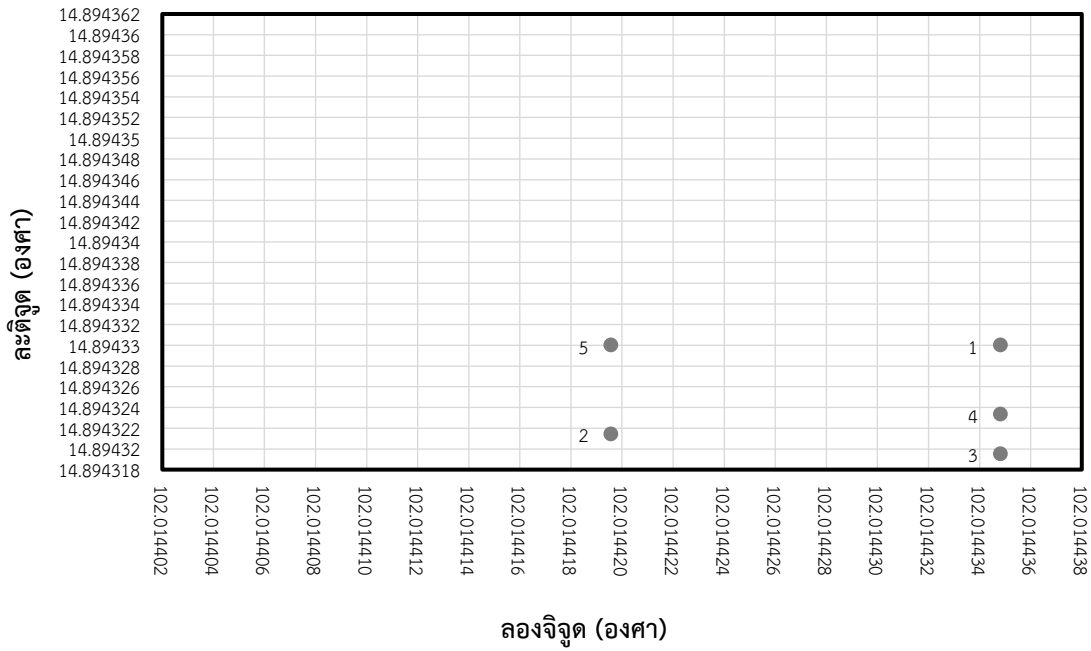
รูปที่ 51 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 เวลา 06.00 น.

ข. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 09.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 52



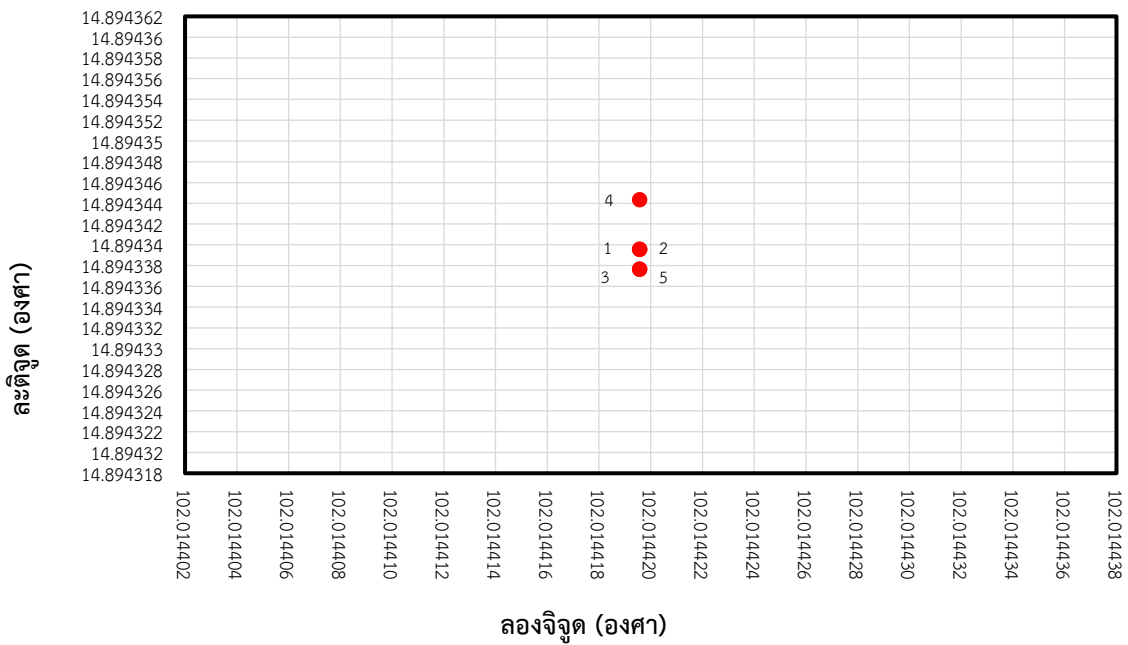
รูปที่ 52 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 เวลา 09.00 น.

ค. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 53



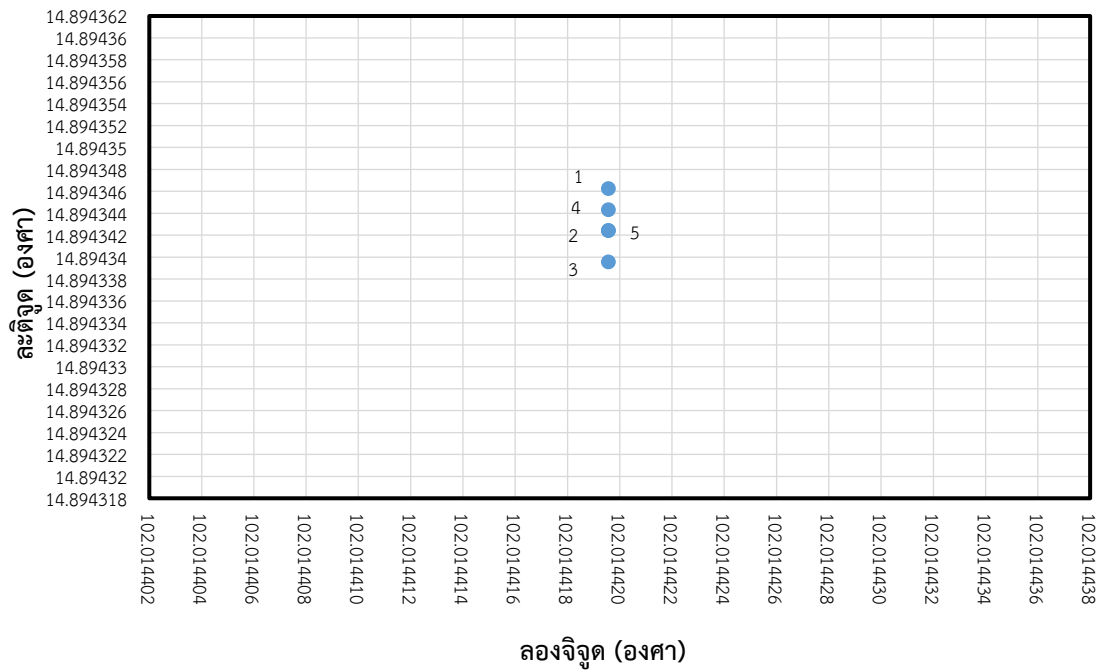
รูปที่ 53 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 เวลา 12.00 น.

ง. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 15.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 54



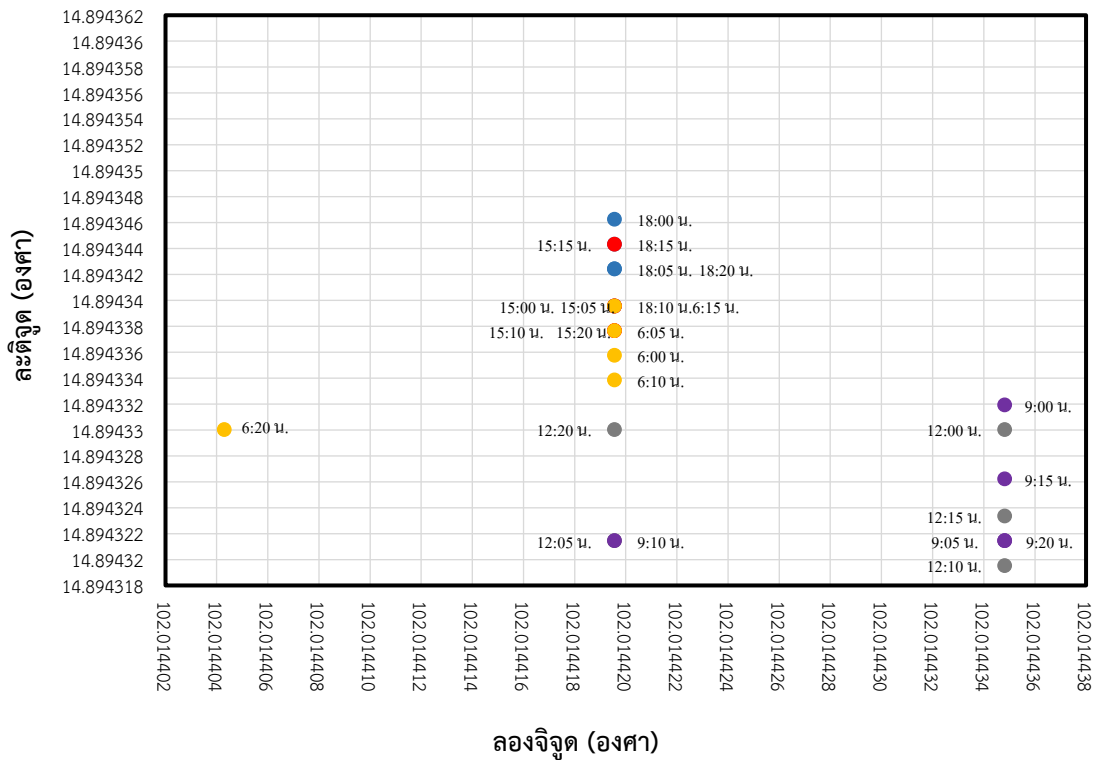
รูปที่ 54 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 เวลา 15.00 น.

จ. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 18.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 55



รูปที่ 55 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 เวลา 18.00 น.

ฉ. ผลการทดสอบรวมทั้งหมด วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 ดังแสดงในรูปที่ 56



รูปที่ 56 กราฟแสดงผลการทดสอบรวมทั้งครั้งที่ 2

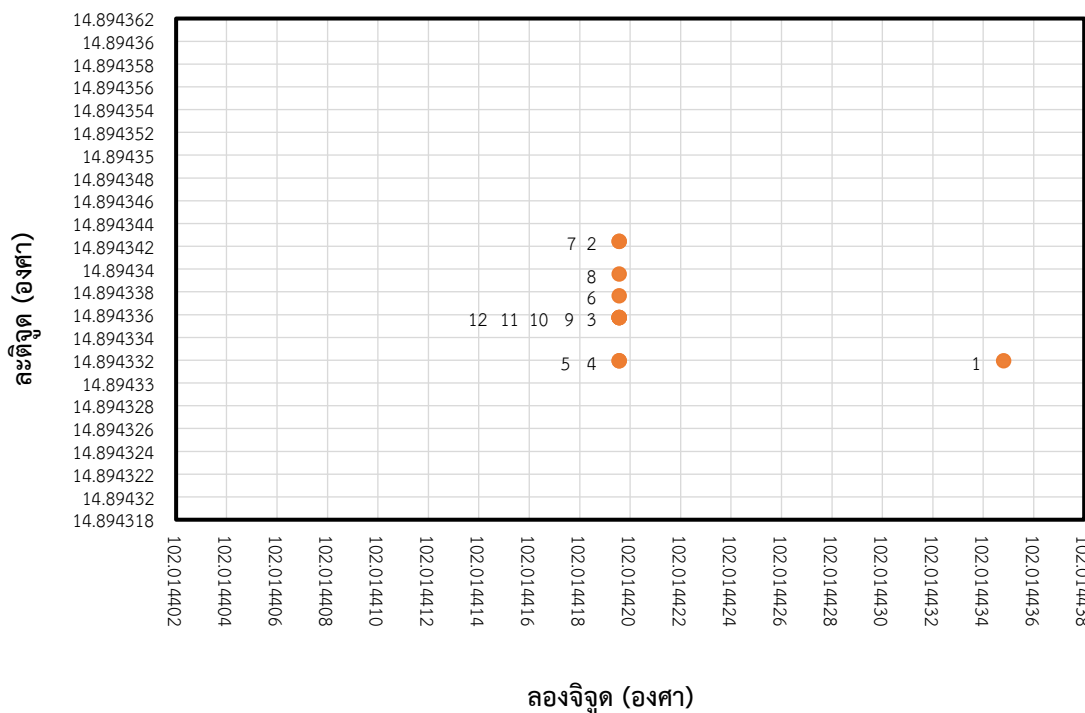


จากกราฟแสดงผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 51 – 56 ซึ่งเป็นการทดสอบครั้งที่ 2 เพื่อวิเคราะห์สมมติฐานในการทดสอบครั้งแรก จากการทดสอบพบว่ารูปแบบการระบุตำแหน่งในช่วงเวลาต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งแรก เนื่องจากวันที่ทำการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีห้วงระยะเวลาใกล้เคียงกัน ทำให้การโคจรของดาวเทียมมีความคล้ายกันด้วย และจากการทดสอบจะเห็นความแตกต่างในกลุ่มของตำแหน่งแต่ละช่วงเวลา ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการทดสอบครั้งที่ 1 ในรูปที่ 50 และการทดสอบในครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 49 ที่เวลา 06.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. มีการขยับใกล้เคียงกันมากขึ้น แต่ในช่วงเวลา 09.00 น. มีความแตกต่างกัน คือตำแหน่งลองจิจูดมีการเบี่ยงเบนส่วนใหญ่ไปทางขวา ที่ตำแหน่งลองจิจูด 102.01443481 องศาตะวันออก จึงเกิดสมมติฐานถัดมาในเรื่องลักษณะการวางตัวของดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลานั้น ๆ ที่กระทำต่อตำแหน่งอุปกรณ์รับสัญญาณ มีลักษณะอย่างไร และมีความสัมพันธ์กับความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งหรือไม่ ทำให้เกิดการทดสอบในครั้งที่ 3 ถัดไป

6) ผลการทดสอบครั้งที่ 3

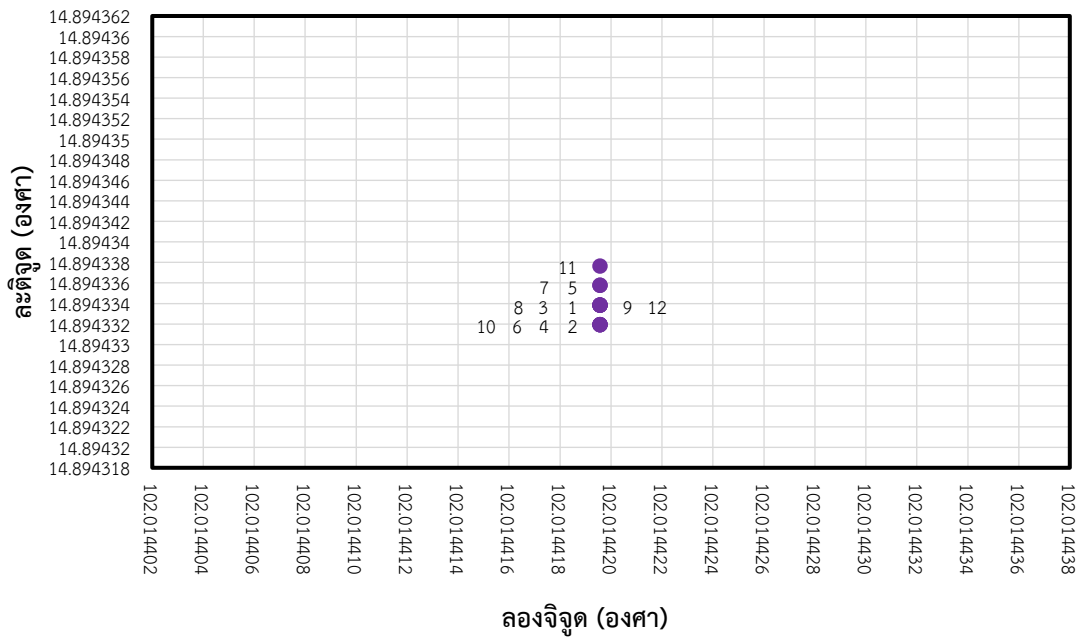
การทดสอบครั้งที่ 3 ได้กระทำเมื่อวันที่ 19 เมษายน 2563 เป็นการทดสอบโดยกำหนดช่วงเวลาคือ 06.00 น. 09.00 น. 12.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. เช่นเดิม และในแต่ละช่วงเวลาจะทำการวัดทั้งหมด 12 ครั้ง แต่ละครั้งต่างกัน 1 นาที รวมทั้งหมด 60 ครั้ง

ก. ผลการทดสอบครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 06.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 57



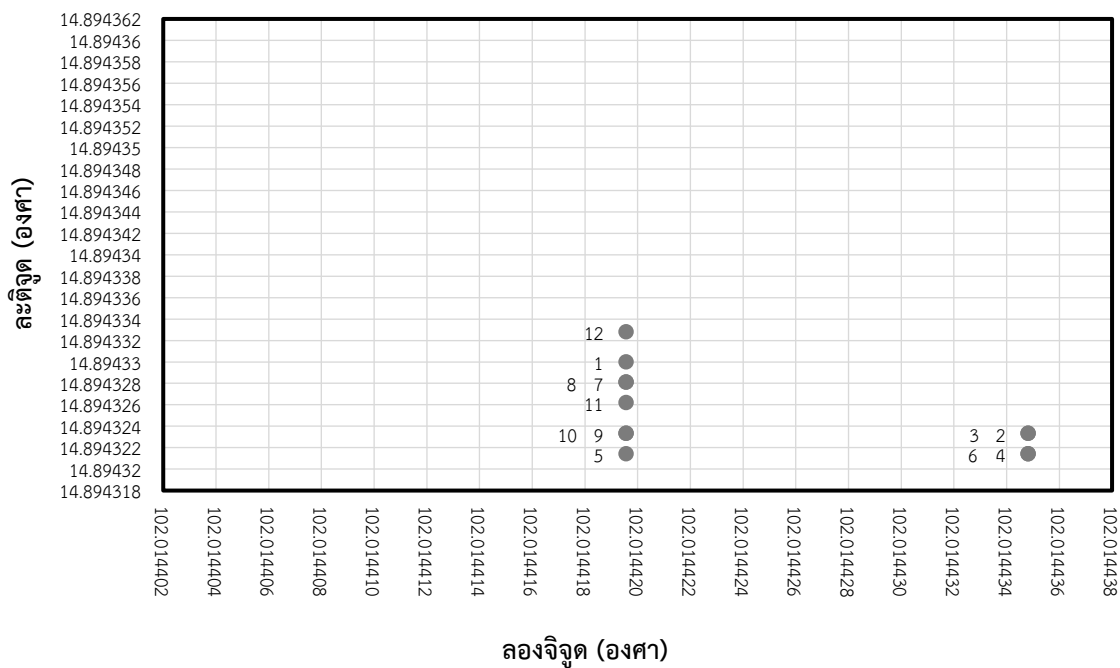
รูปที่ 57 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 เวลา 06.00 น.

ข. ผลการทดสอบครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 09.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 58



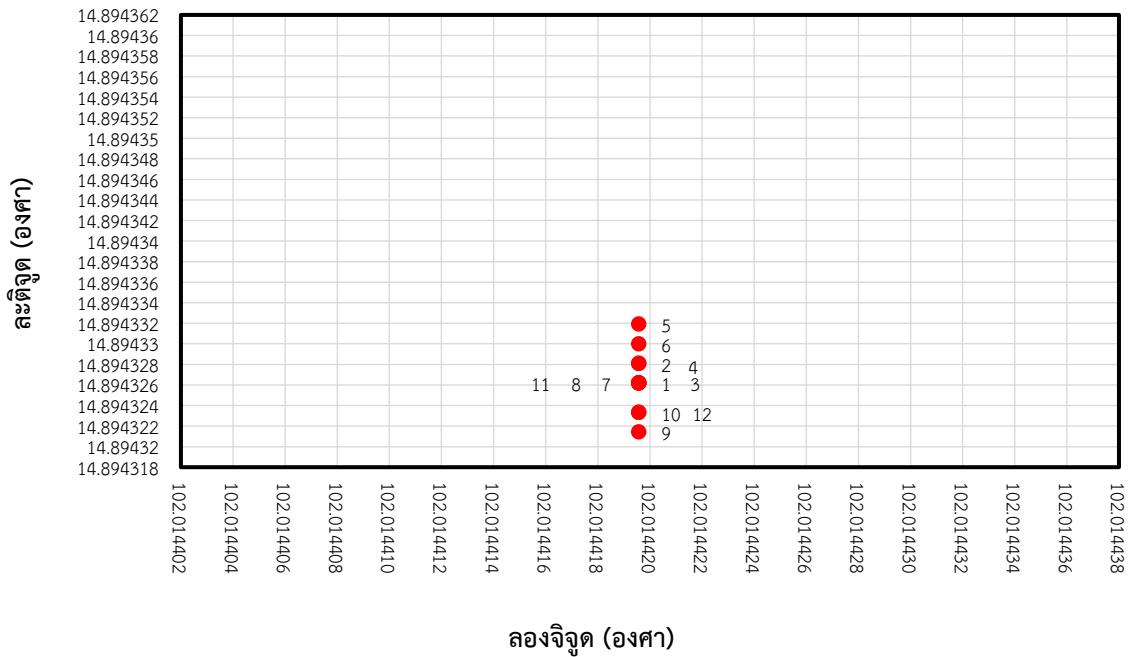
รูปที่ 58 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 เวลา 09.00 น.

ค. ผลการทดสอบครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 59



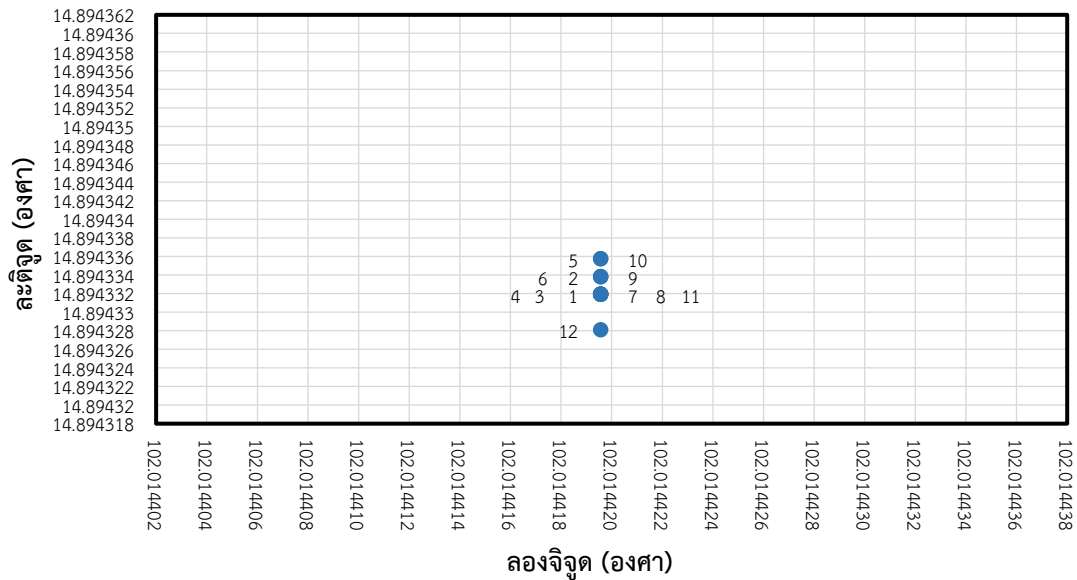
รูปที่ 59 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 เวลา 12.00 น.

ง. ผลการทดสอบครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 15.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 60



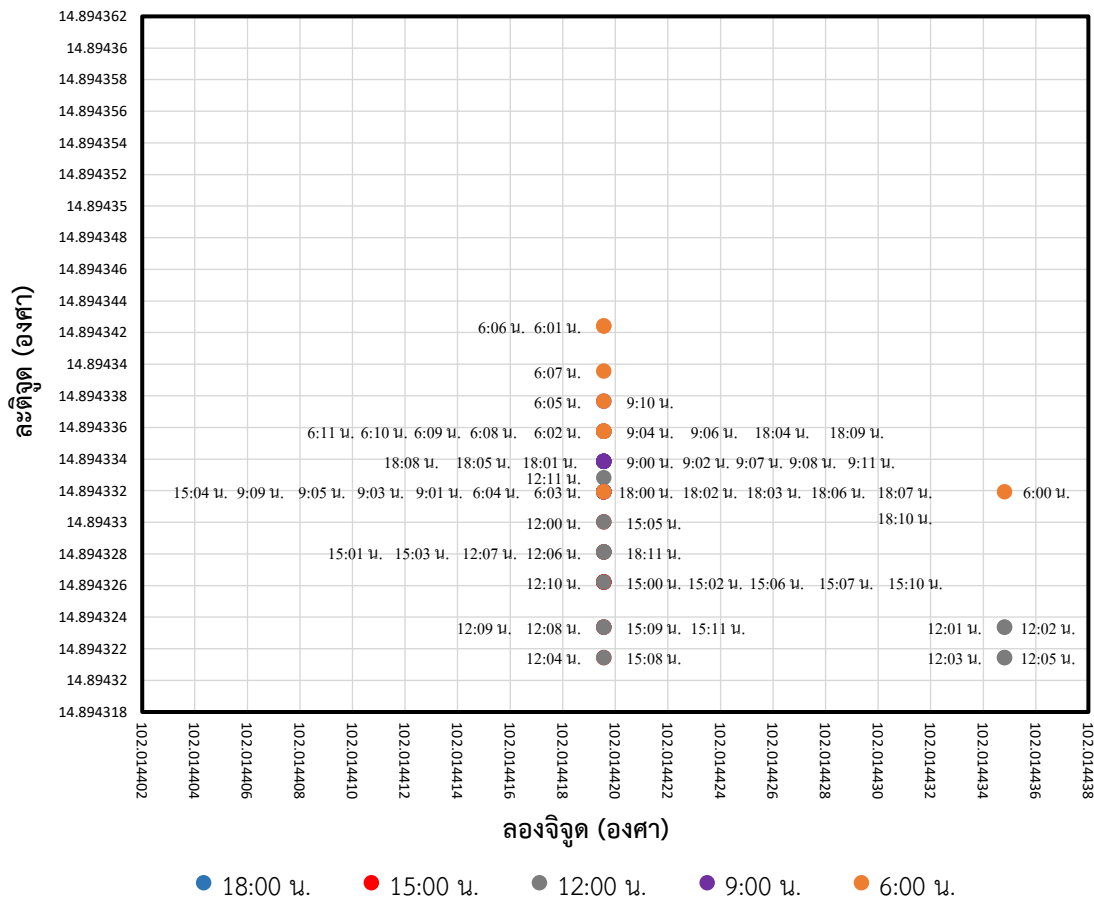
รูปที่ 60 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 เวลา 15.00 น.

จ. ผลการทดสอบครั้งที่ 3 วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 18.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 61



รูปที่ 61 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 เวลา 18.00 น.

ฉ. ผลการทดสอบรวมทั้งหมด วันที่ 19 เมษายน 2563 ดังแสดงในรูปที่ 62



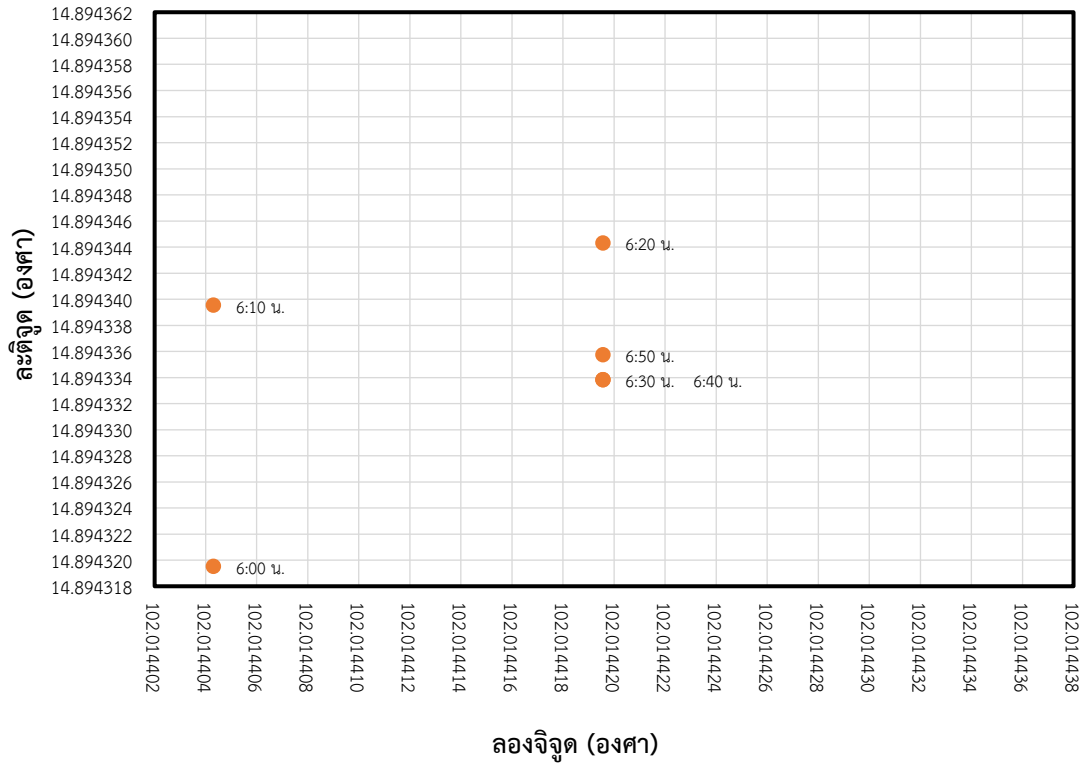
รูปที่ 62 กราฟแสดงผลการทดสอบรวมทั้งหมดครั้งที่ 3

ในการทดสอบครั้งที่ 3 ดังแสดงผลเป็นกราฟในรูปที่ 57 – 62 เป็นการทดสอบโดยวิเคราะห์ถึงการวางตัวของดาวเทียมที่ทำให้มีผลต่อการระบุตำแหน่ง ได้ทำการลดระยะเวลาเก็บข้อมูลพิกัดตำแหน่งในแต่ละช่วงเวลาลง เพื่อสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูลลง ทำให้การเปลี่ยนแปลงในแนวลองจิจูดลดลงด้วย ซึ่งอาจเกิดจากห้วงเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสั้นลง ทำให้ปัจจัยในเรื่องของการเคลื่อนที่ของดาวเทียมที่โคจรเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลานั้นมีผลกระทบน้อยลงตามไปด้วย และจากการทดสอบครั้งที่ 3 จะเห็นว่า รูปแบบของตำแหน่งพิกัดมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบครั้งที่ 1 แต่มีการรวมกลุ่มของตำแหน่งในแนวลองจิจูดมากขึ้น และในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงในแนวละติจูด ที่มีการขยับลงทางด้านล่างมากขึ้น เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ช่วง 06.00 น. ถึง 18.00 น. จึงได้ทำการทดสอบครั้งที่ 4 ถัดไป

## 7) ผลการทดสอบครั้งที่ 4

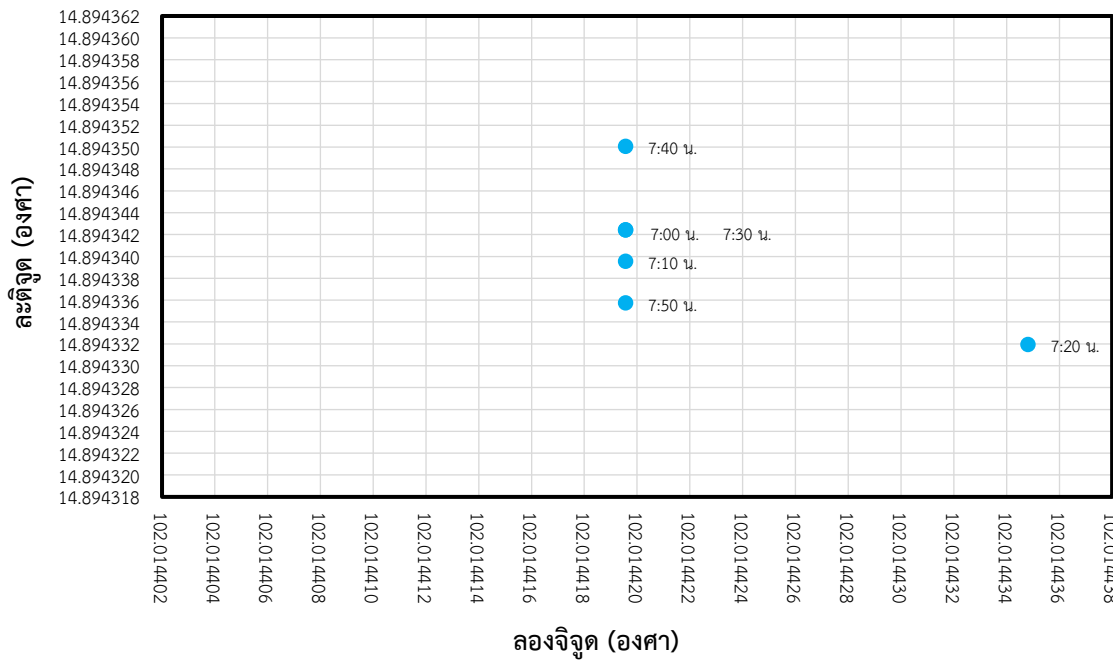
การทดสอบครั้งที่ 4 เมื่อวันที่ 28 สิงหาคม 2563 ยังคงเป็นการทดสอบโดยกำหนดช่วงเวลาตั้งแต่ 06.00 น. ถึง 18.00 น. โดยการทดสอบครั้งนี้จะทำการวัดทั้งหมด 79 ครั้ง แต่แต่ละครั้งต่างกัน 10 นาที

ก. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 06.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 63



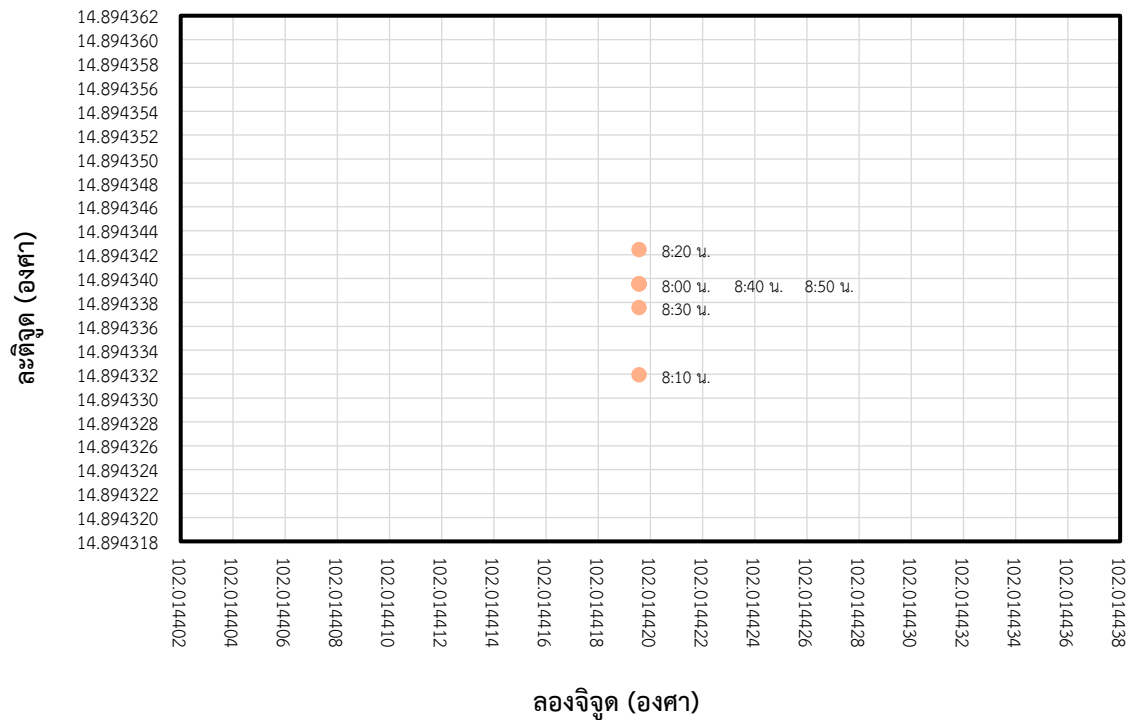
รูปที่ 63 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 06.00 น.

ข. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 07.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 64



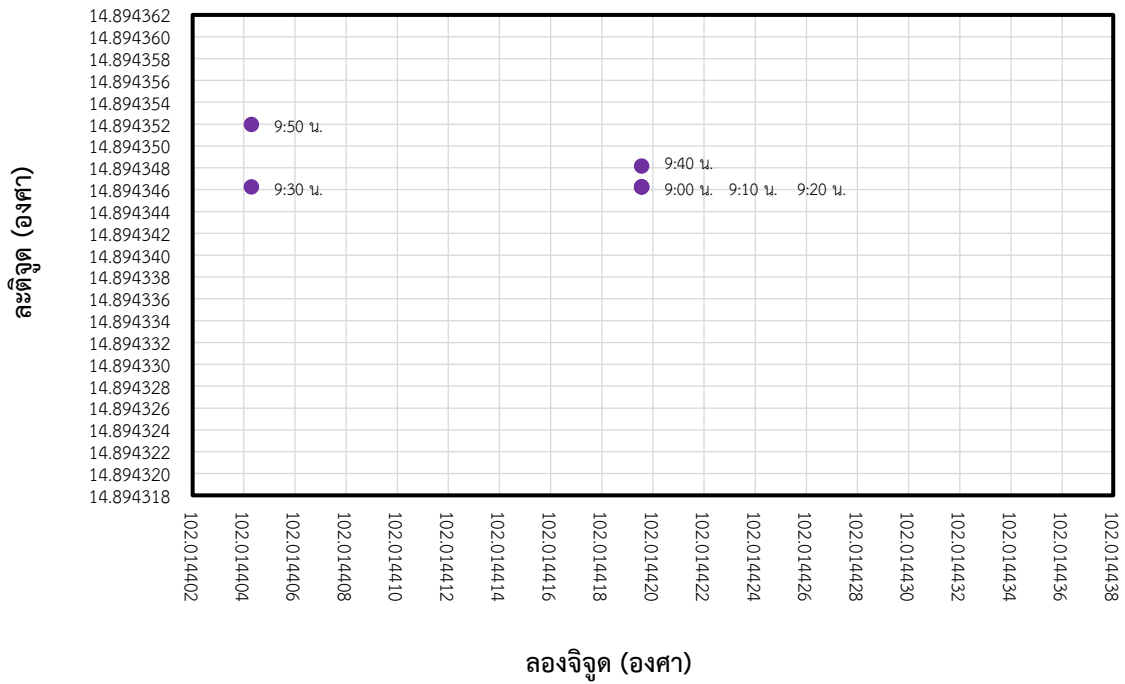
รูปที่ 64 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 07.00 น.

ค. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 08.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 65



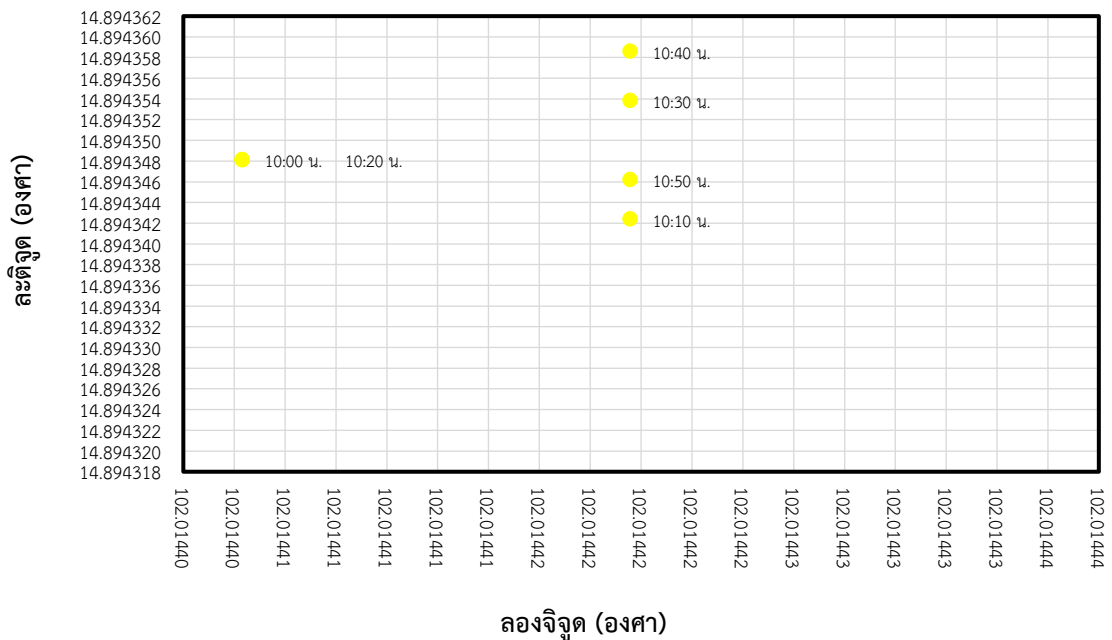
รูปที่ 65 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 08.00 น.

ง. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 09.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 66



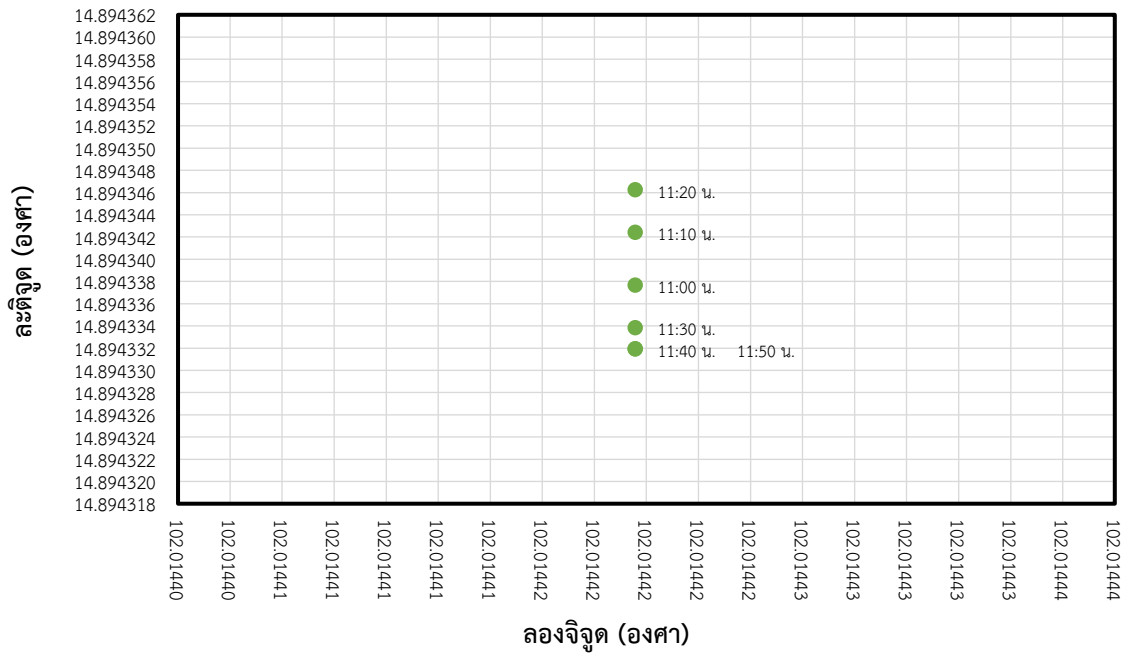
รูปที่ 66 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 09.00 น.

จ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 10.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 67



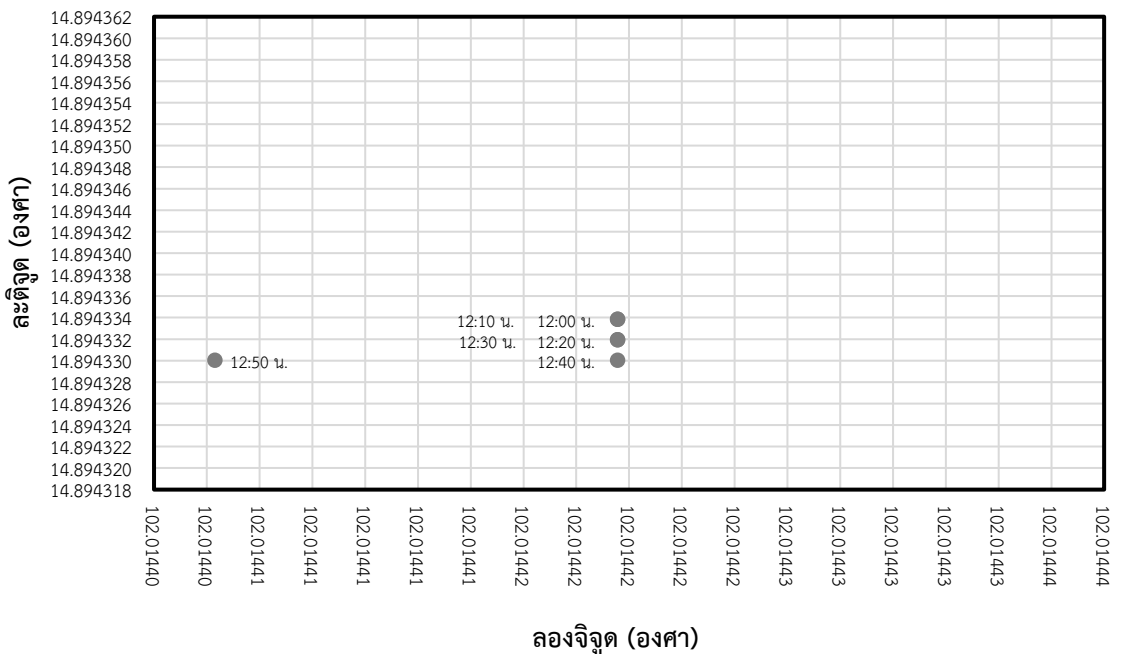
รูปที่ 67 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 10.00 น.

ฉ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 11.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 68



รูปที่ 68 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 11.00 น.

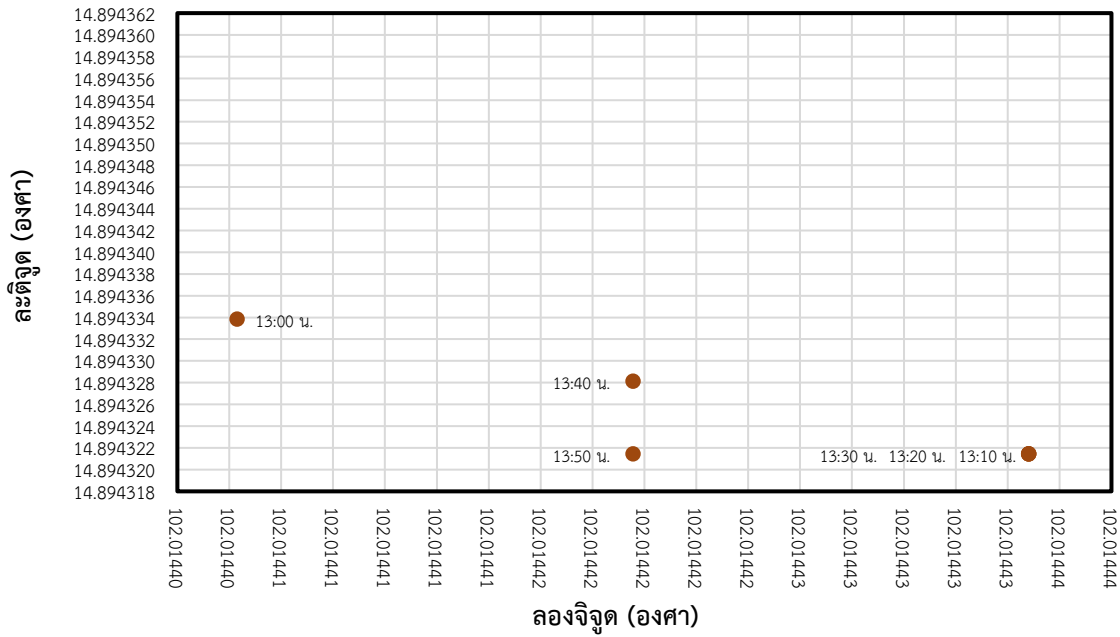
ช. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 69



รูปที่ 69 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 12.00 น.

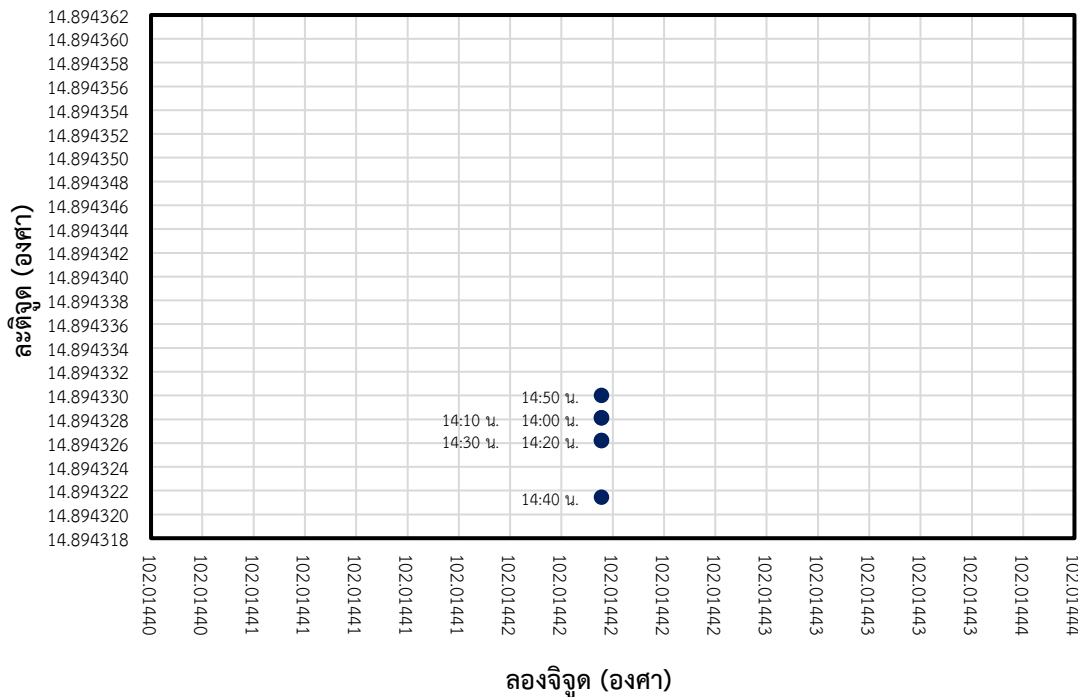


ช. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 13.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 70



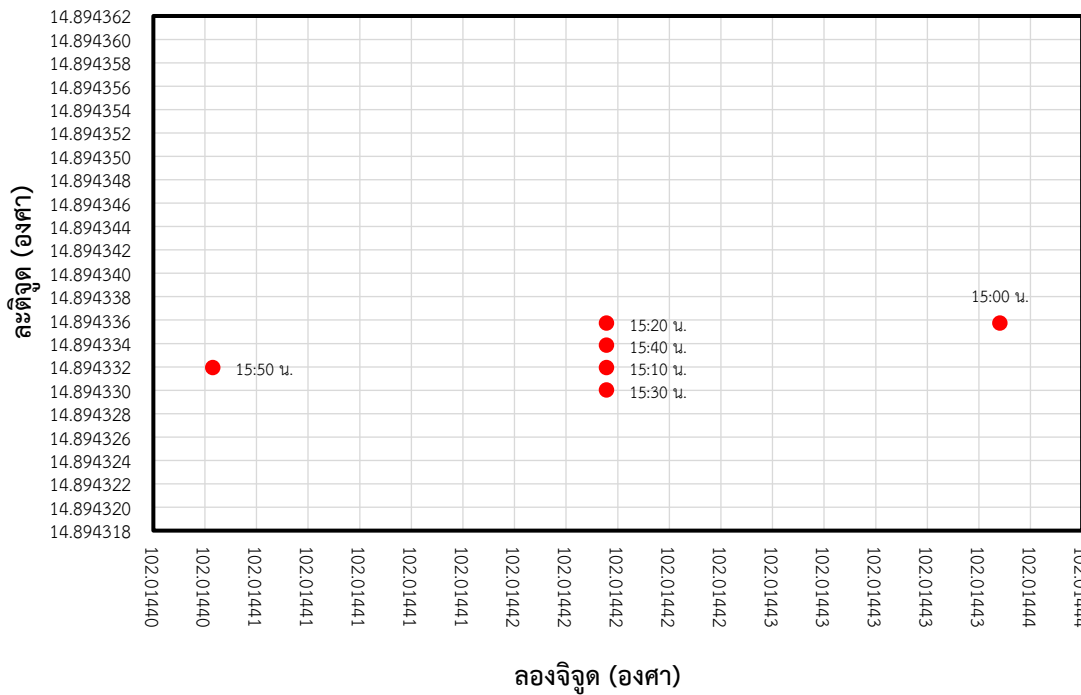
รูปที่ 70 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 13.00 น.

ฉ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 14.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 71



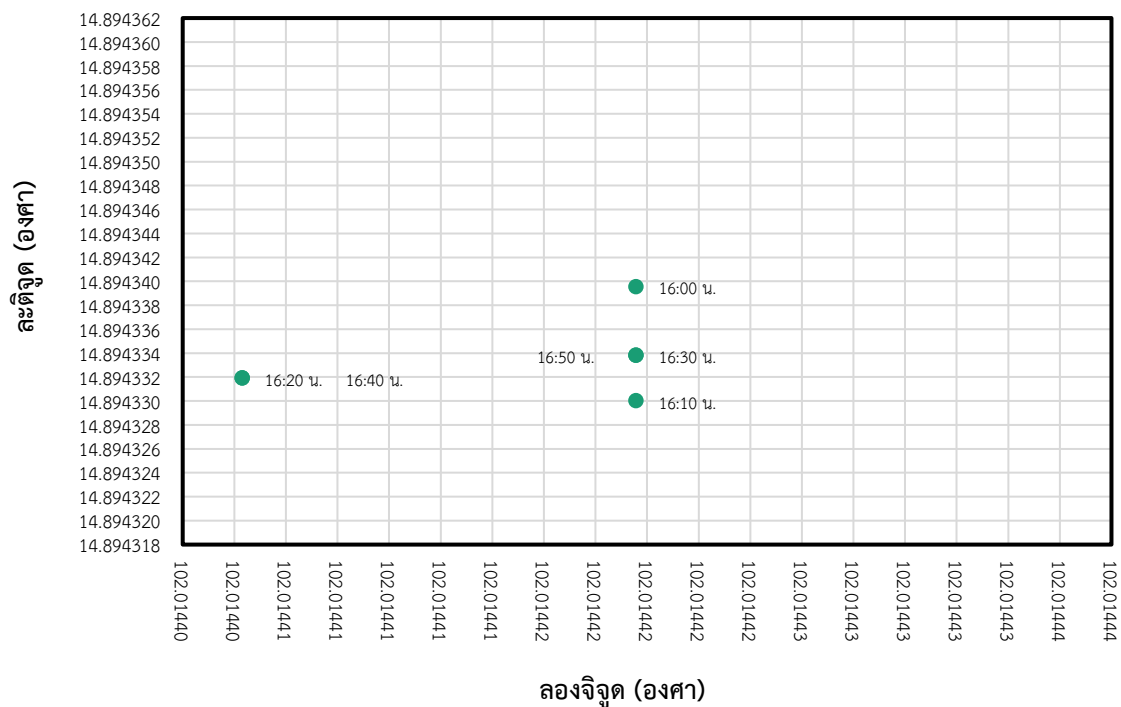
รูปที่ 71 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 14.00 น.

ญ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 15.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 72



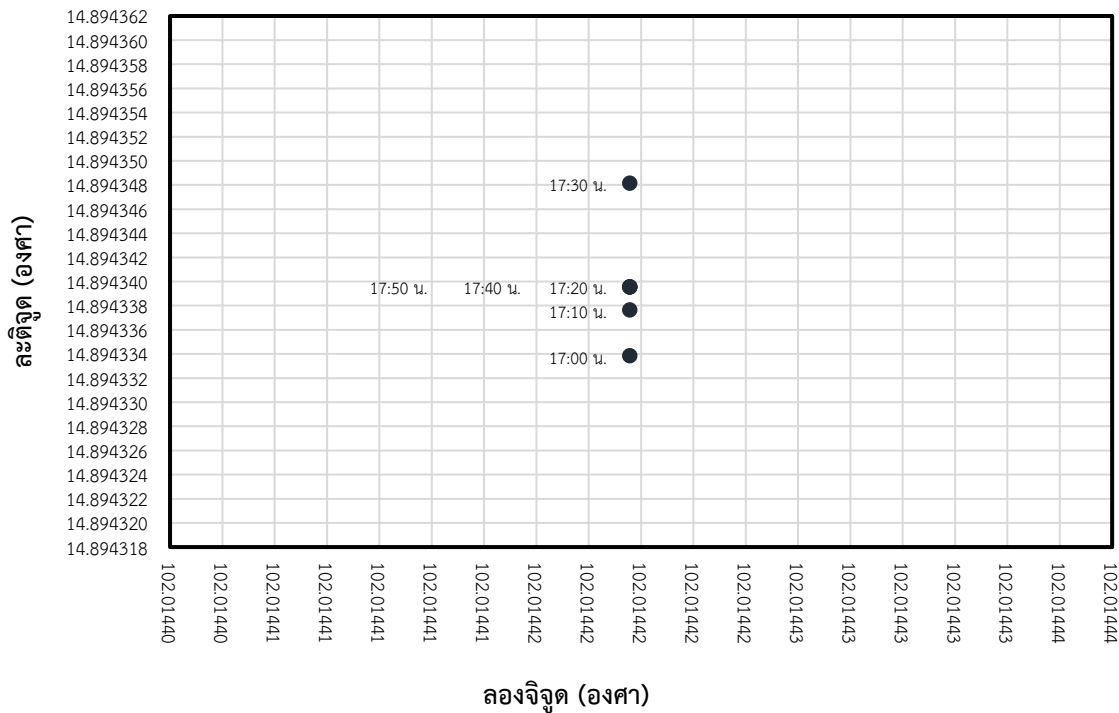
รูปที่ 72 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 15.00 น.

ฎ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 16.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 73



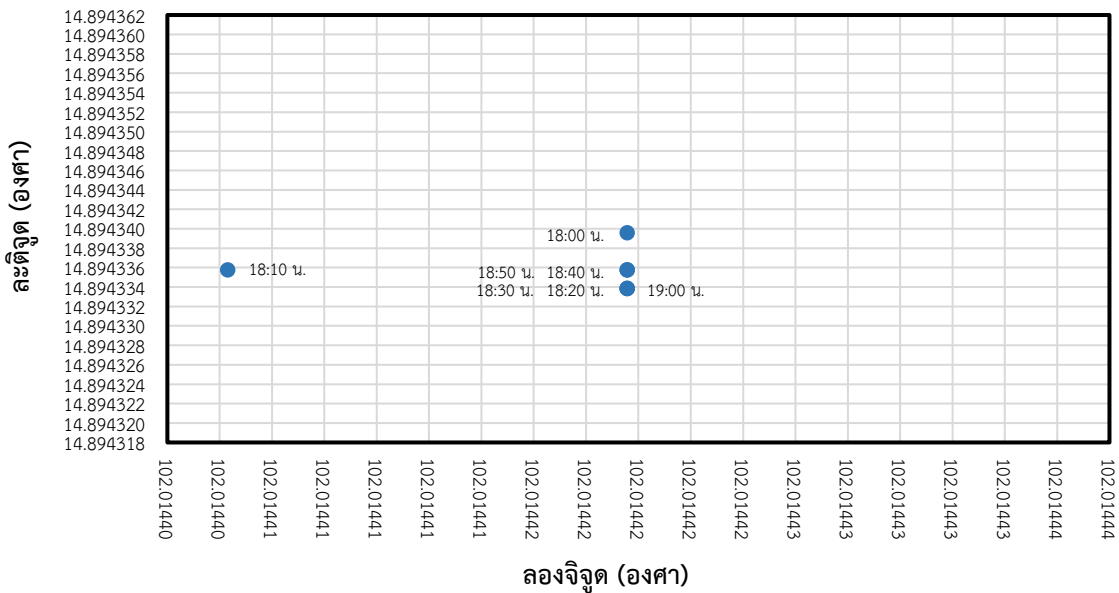
รูปที่ 73 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 16.00 น.

ฎ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 17.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 74



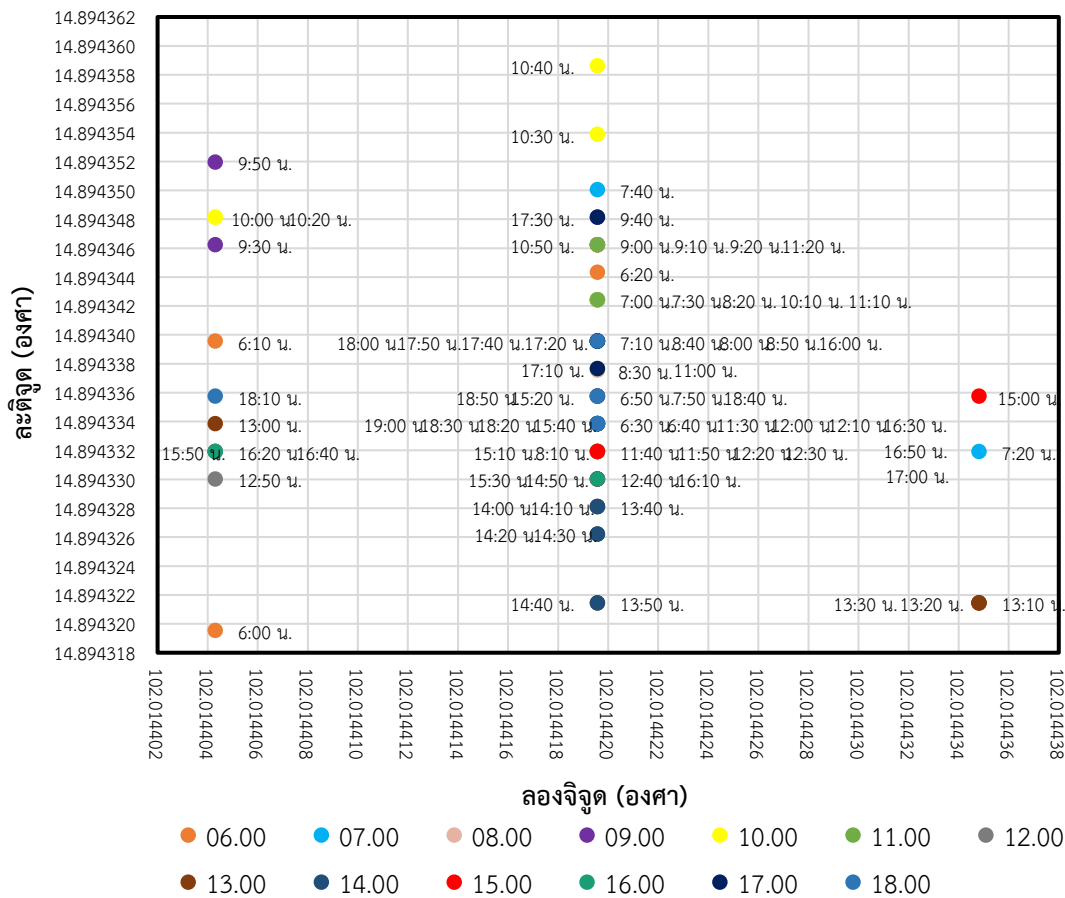
รูปที่ 74 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 17.00 น.

ฐ. ผลการทดสอบครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 18.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 75



รูปที่ 75 กราฟแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 4 เวลา 18.00 น.

๗. ผลการทดสอบรวมทั้งหมด วันที่ 28 สิงหาคม 2563 ดังแสดงในรูปที่ 76



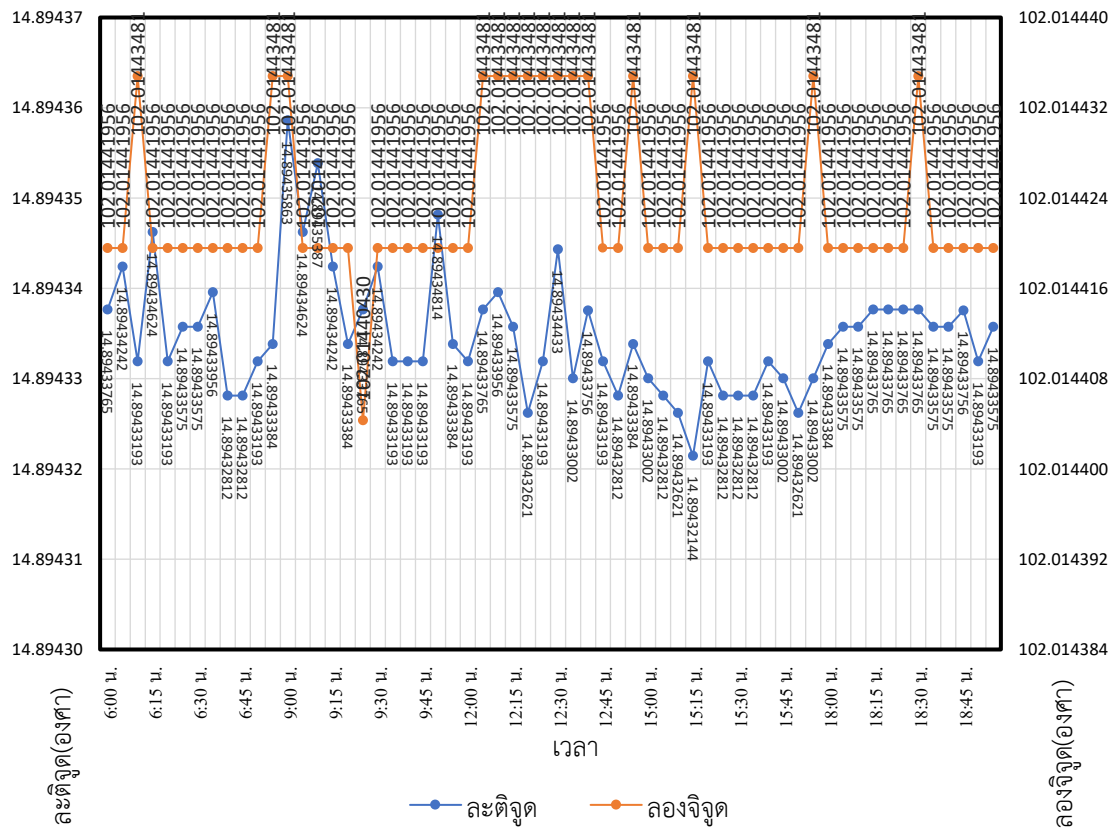
รูปที่ 76 กราฟแสดงผลการทดสอบรวมครั้งที่ 4

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 63 – 76 เป็นการทดสอบครั้งที่ 4 โดยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 06.00 น. ถึงเวลา 19.00 น. เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการระบุตำแหน่งอย่างต่อเนื่องทางเวลา จากการทดสอบพบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคือ มีการเบี่ยงเบนในแนวลองจิจูดทางซ้าย ตำแหน่งลองจิจูดที่ 102.01440430 องศาตะวันออก มากขึ้นจากการทดสอบที่ผ่านมา และมีการรวมกลุ่มในแนวละติจูดคล้ายคลึงกับการทดสอบที่ 1 และ 2 และยังคงพบว่าที่เวลาช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน จะมีการระบุตำแหน่งใกล้เคียงกันด้วย

#### 4.2.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเวลา

จากการทดสอบทั้งสิ้นครั้งที่ผ่านมามีพบว่าในช่วงเวลาที่ต่างกันในวันเดียวกัน และวันที่ทำการทดสอบที่ต่างกัน ทำให้การระบุพิกัดของจีพีเอสนั้นมีความคลาดเคลื่อนที่ต่างกัน นอกจากนี้ในหัวข้อที่ผ่านมาจะแสดงผลการทดสอบเชิงพิกัดตำแหน่งแล้ว ในหัวข้อนี้จะแสดงผลที่ได้เปรียบเทียบกับเชิงเวลาดังรูปที่ 77 – 80

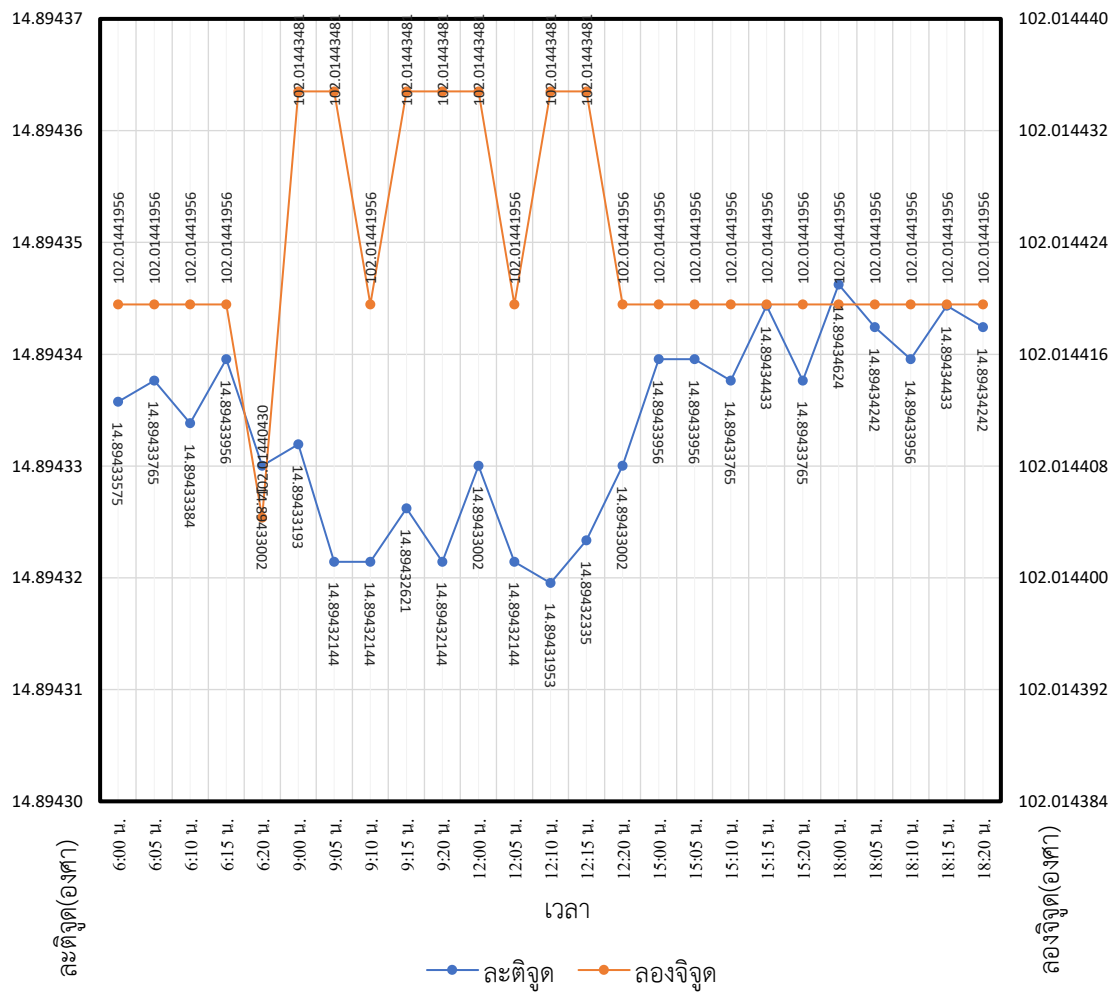
1) ผลการทดสอบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส ในแกนละติจูดและลองจิจูดเปรียบเทียบในแกนเวลา วันที่ 19 มกราคม 2563 ดังแสดงในรูปที่ 77



รูปที่ 77 กราฟแสดงผลการทดสอบเทียบเวลาครั้งที่ 1

ในการทดสอบครั้งที่ 1 เมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 77 จะเห็นว่าช่วงเวลาที่มีความเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทั้งในแนวละติจูดและแนวลองจิจูดน้อยที่สุด หรือมีกลุ่มของตำแหน่งใกล้เคียงกันที่สุด คือช่วงเวลา 15.00 น. และช่วงเวลา 18.00 น.

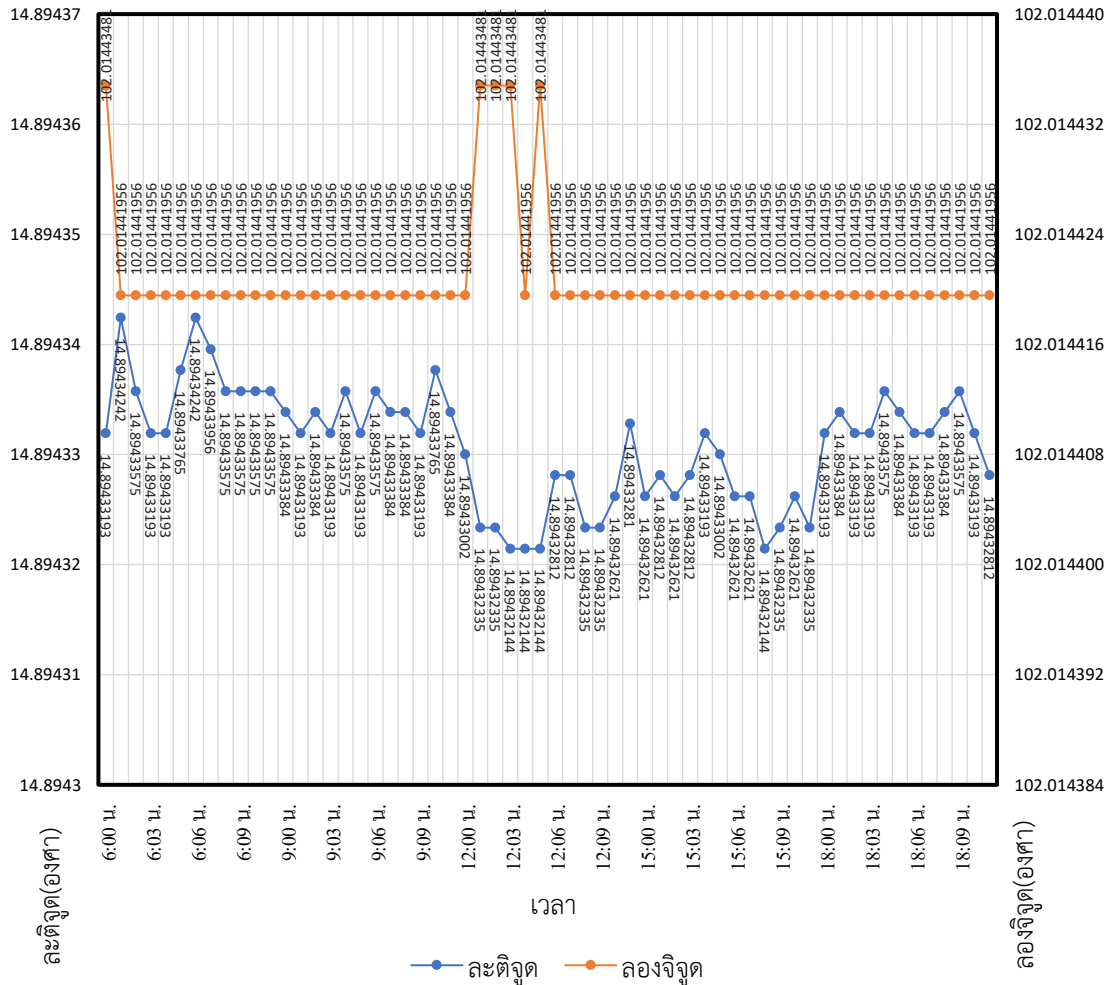
2) ผลการทดสอบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส ในแกนละติจูดและลองจิจูดเปรียบเทียบในแกนเวลา วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 ดังแสดงในรูปที่ 78



รูปที่ 78 กราฟแสดงผลการทดสอบเทียบเวลาครั้งที่ 2

ในการทดสอบครั้งที่ 2 เมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 78 จะเห็นว่าช่วงเวลาที่มีความเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทั้งในแนวละติจูดและแนวลองจิจูดน้อยที่สุด หรือมีกลุ่มของตำแหน่งใกล้เคียงกันที่สุด คือช่วงเวลา 18.00 น.

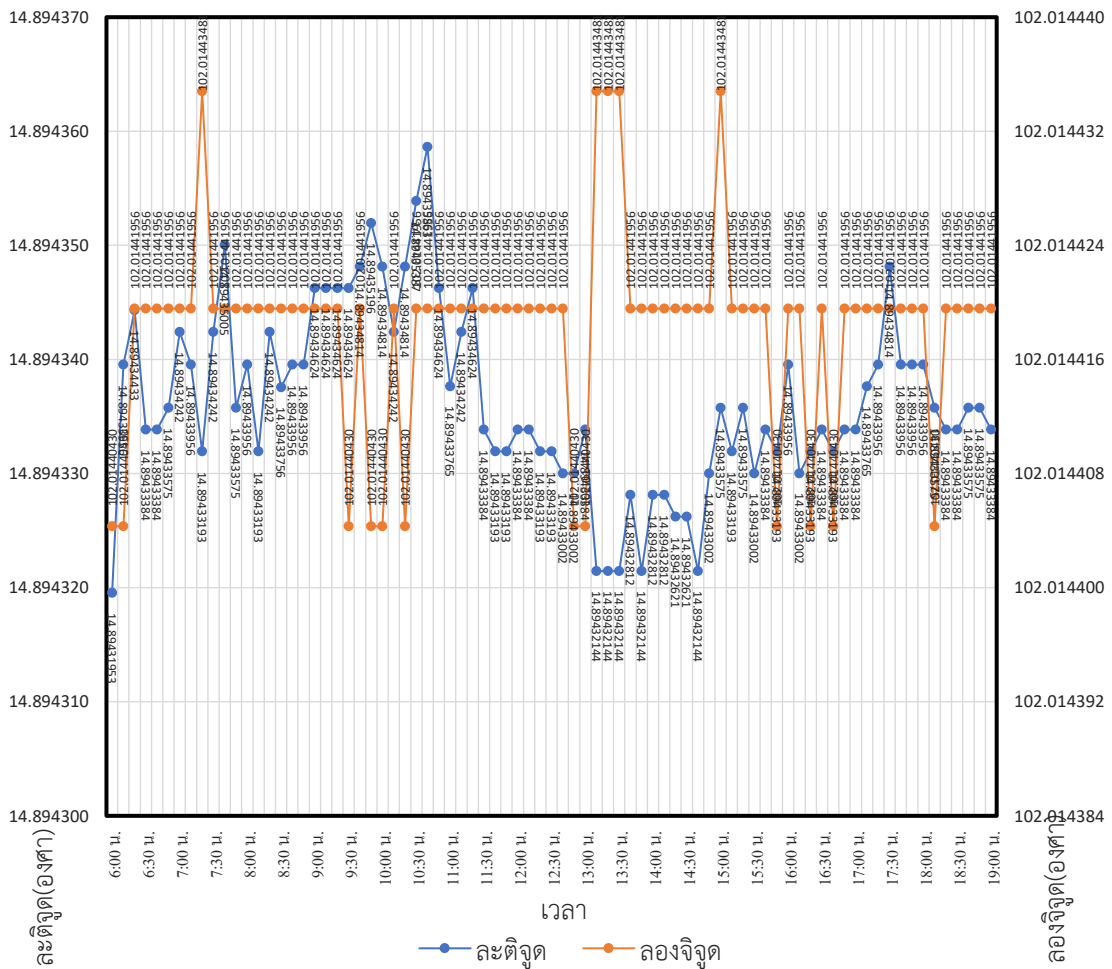
3) ผลการทดสอบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส ในแกนละติจูดและลองจิจูดเปรียบเทียบในแกนเวลา วันที่ 19 เมษายน 2563 ดังแสดงในรูปที่ 79



รูปที่ 79 กราฟแสดงผลการทดสอบเทียบเวลาครั้งที่ 3

ในการทดสอบครั้งที่ 3 เมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 79 จะเห็นว่าช่วงเวลาที่มีความเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ทั้งในแนวละติจูดและแนวลองจิจูดน้อยที่สุด หรือมีกลุ่มของตำแหน่งใกล้เคียงกันที่สุด คือช่วงเวลา 09.00 น.

4) ผลการทดสอบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส ในแกนละติจูดและลองจิจูดเปรียบเทียบในแกนเวลา วันที่ 28 สิงหาคม 2563 ดังแสดงในรูปที่ 80



รูปที่ 80 กราฟแสดงผลการทดสอบเทียบเวลาครั้งที่ 3

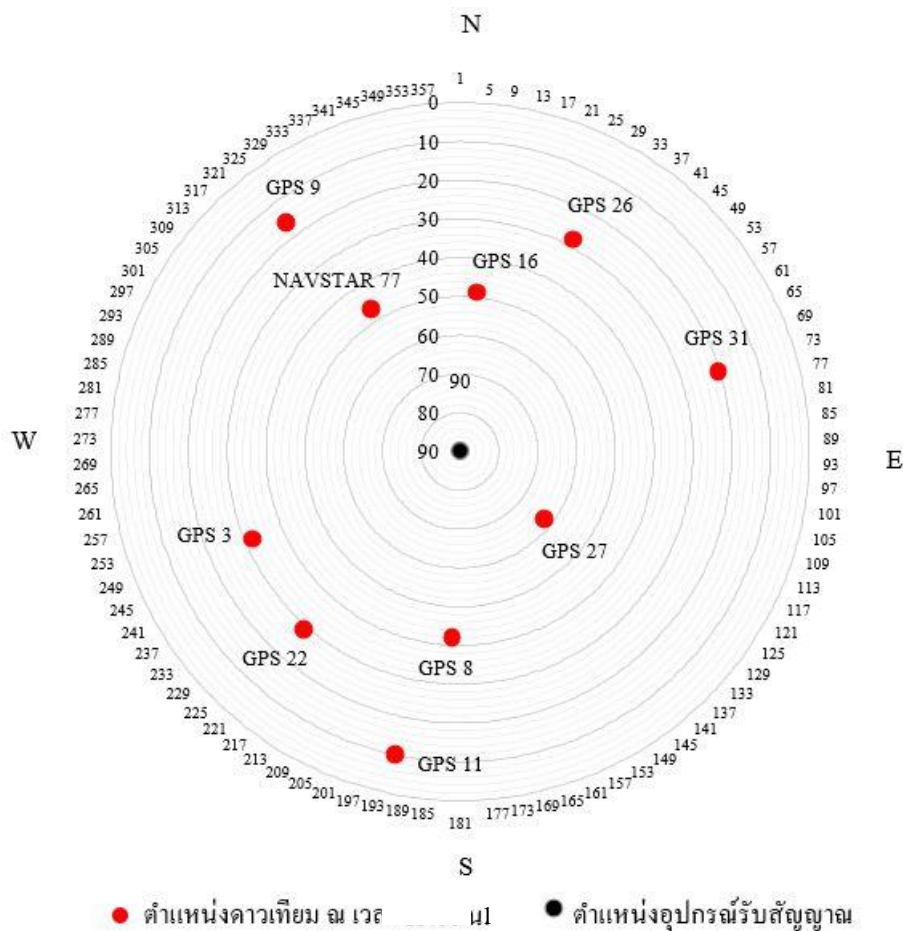
เมื่อเปรียบเทียบพิกัดตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดในเส้นแกนเวลา จะพบว่า ในการทดสอบครั้งที่ 1, 2 และ 3 นั้นเป็นการทดสอบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ทำให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ เมื่อทำการทดสอบครั้งที่ 4 ซึ่งมีความต่อเนื่องกัน จะเห็นถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะต่อเนื่องกันในแนวละติจูด และจากการเก็บข้อมูลพิกัดที่มีการระบุตำแหน่งเดิมต่อเนื่องหลายครั้งที่ผ่านมา จะพบว่าช่วงเวลาที่เกิดความต่อเนื่องในการระบุพิกัดเดิมน้อยครั้งที่สุดหรือเกิดจุดพิกัดซ้ำกันมากที่สุดคือช่วงเวลา 06.00 น. และ 18.00 น.



#### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลที่ได้

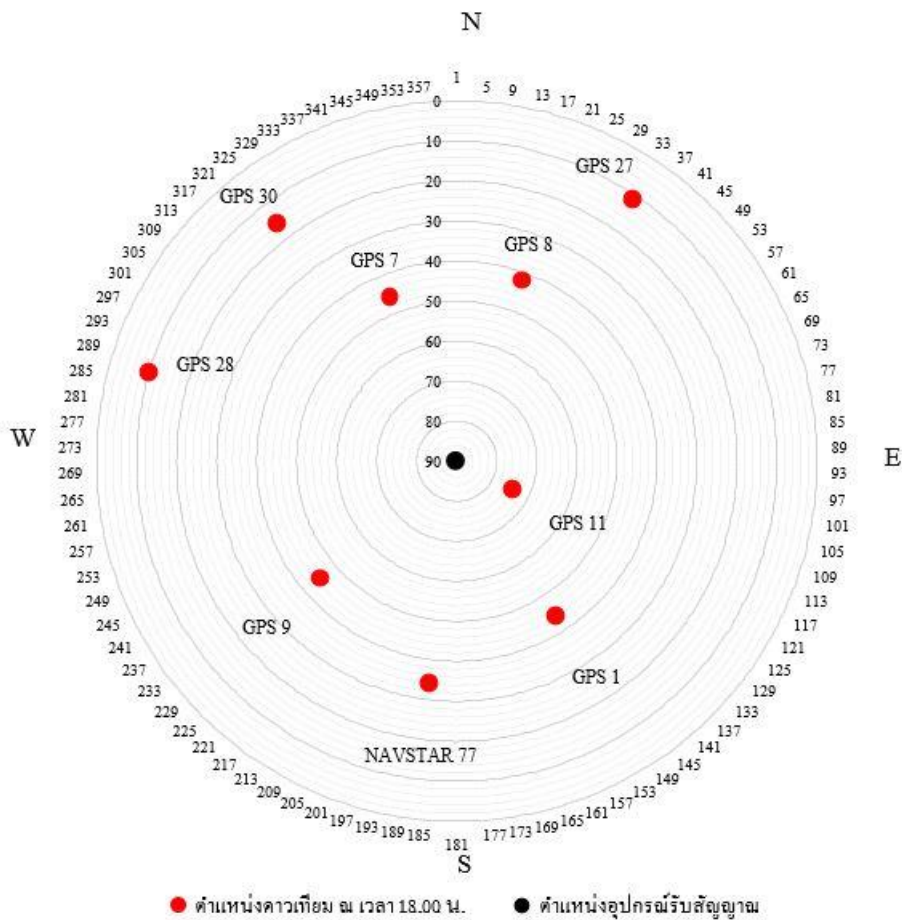
ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้เปรียบเทียบกับปัจจัยต่างๆ ตามสมมติฐานข้างต้น โดยนำข้อมูลการประมาณการตำแหน่งของดาวเทียมจีพีเอสที่ได้จาก Two-Line Element Set หรือ TLEs โดยอ้างอิงจากข้อมูลกองบัญชาการป้องกันอวกาศนาอเวอโร (North American Aerospace Defense Command : NORAD) จากนั้นจะนำข้อมูลมาวิเคราะห์กับผลของช่วงเวลาที่มีการระบุพิกัดได้ใกล้เคียงกันมากที่สุดหรือเป็นกลุ่มมากที่สุดในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 81 -

1) ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 15.00 น. (การทดสอบครั้งที่ 1)



รูปที่ 81 ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 15.00 น.

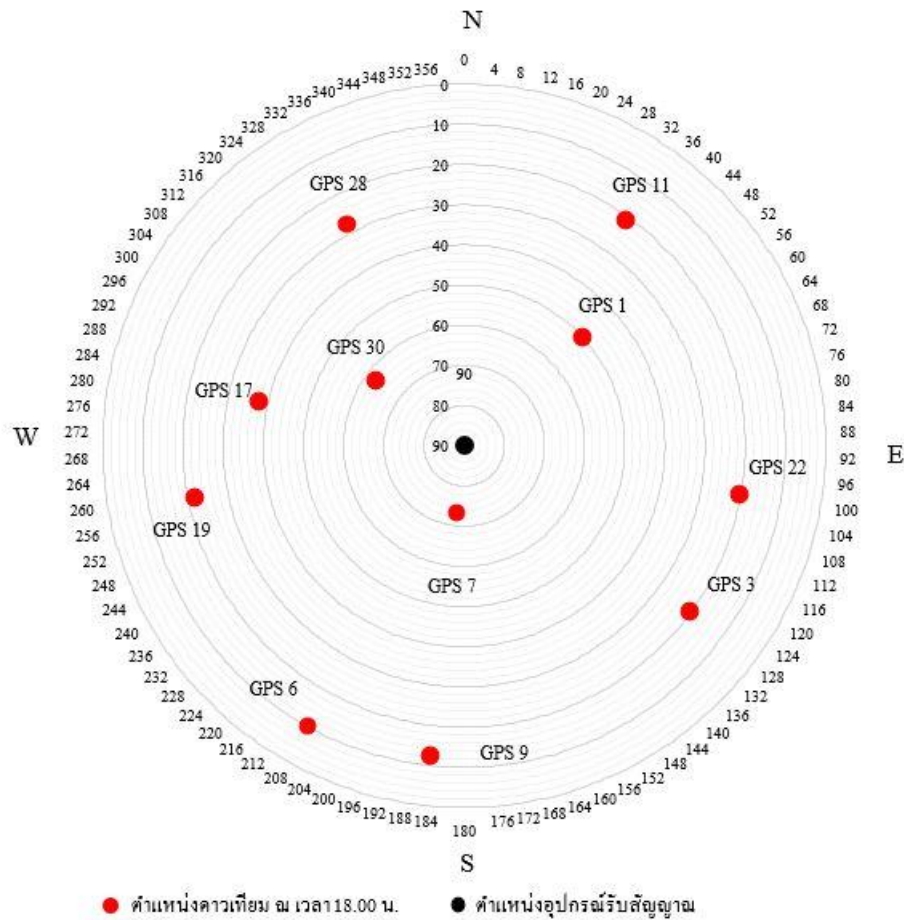
2) ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 18.00 น. (การทดสอบครั้งที่ 1)



รูปที่ 82 ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 มกราคม 2563 เวลา 18.00 น.

จากรูปที่ 81 และ 82 เป็นการทดสอบครั้งที่ 1 เมื่อเทียบผลที่ได้เข้ากับตำแหน่งของดาวเทียมในแต่ละเวลานั้น พบว่าที่เวลา 15.00 น. และเวลา 18.00 น. สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้จำนวนมากที่สุด คือ 10 ดวง ที่เวลา 15.00 น. และ 9 ดวง ที่เวลา 18.00 น. ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส ที่มีการรวมกลุ่มมากขึ้นกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ในการทดสอบครั้งเดียวกัน

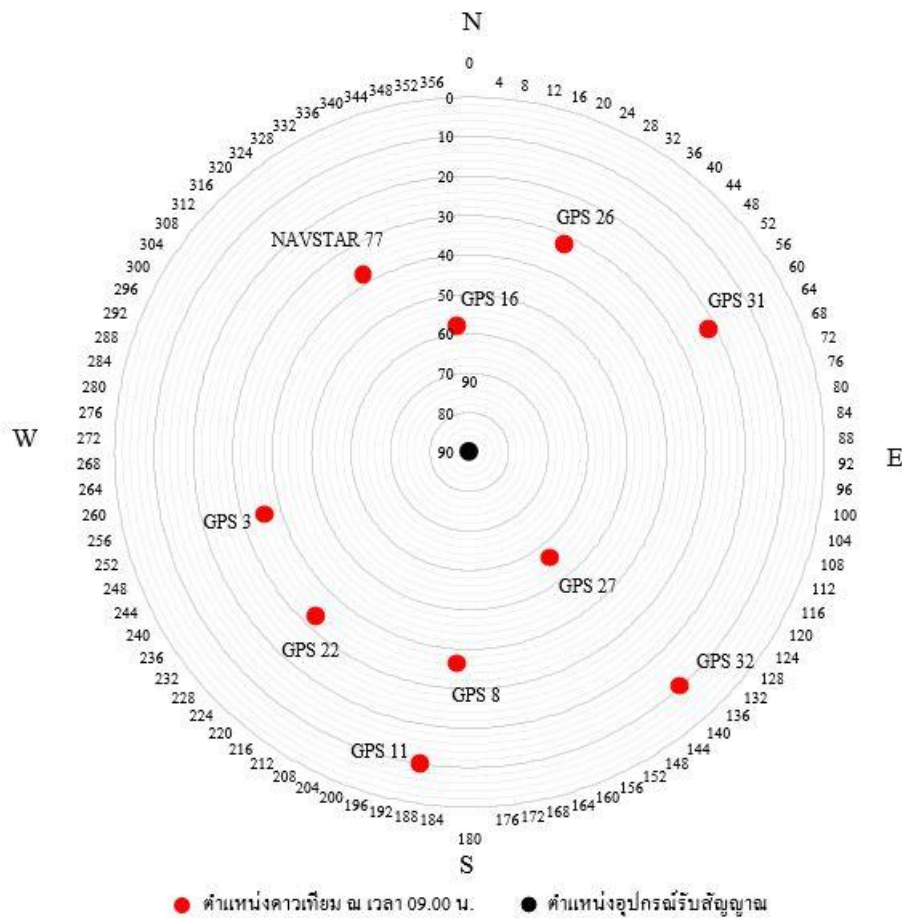
3) ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 18.00 น. (การทดสอบครั้งที่ 2)



รูปที่ 83 ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2563 เวลา 18.00 น.

รูปที่ 83 เป็นผลจากการทดสอบครั้งที่ 2 เมื่อเทียบผลที่ได้เข้ากับตำแหน่งของดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลานั้น พบว่าที่เวลา 18.00 น. สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้จำนวนมากที่สุด คือ 11 ดวง และยังมีกระจายตัวของดาวเทียมที่ล้อมรอบจุดรับสัญญาณอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส ที่มีการรวมกลุ่มมากขึ้นกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ในการทดสอบครั้งเดียวกัน

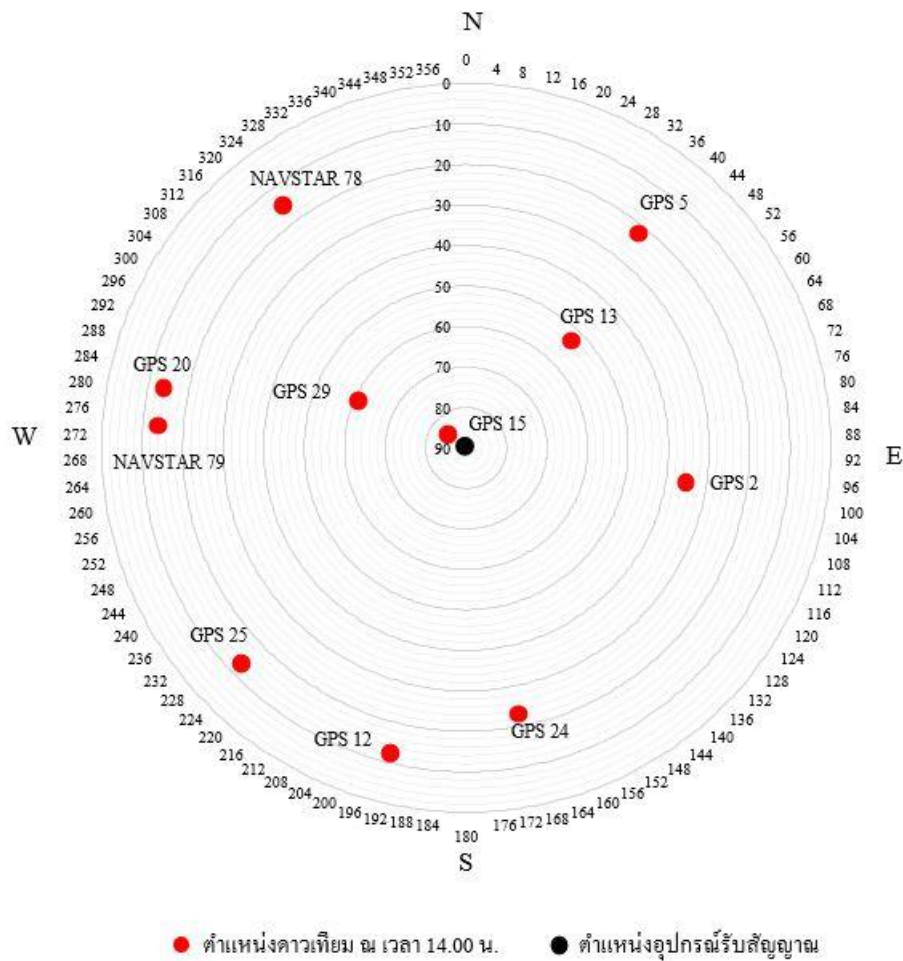
4) ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 09.00 น. (การทดสอบครั้งที่ 3)



รูปที่ 84 ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 19 เมษายน 2563 เวลา 09.00 น.

จากการทดสอบครั้งที่ 3 ตามรูปที่ 84 เมื่อเทียบผลที่ได้เข้ากับตำแหน่งของดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลานั้น พบว่า ที่เวลา 09.00 น. มีผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอสที่มีการรวมกลุ่มมากขึ้นกว่าช่วงเวลาอื่นๆ แม้ว่าจะรับสัญญาณจากดาวเทียมได้จำนวนน้อยกว่า ทั้งนี้เมื่อสังเกตการณ์วางตัวของดาวเทียม จะเห็นว่าดาวเทียมมีการวางตัวล้อมรอบจุดรับสัญญาณเป็นอย่างดีและมีดาวเทียมหลายดวง ที่มีระยะห่างจากดาวเทียมไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณใกล้เคียงกันอีกด้วย

5) ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 14.00 น. (การทดสอบครั้งที่ 4)



รูปที่ 85 ตำแหน่งของดาวเทียม ณ วันที่ 28 สิงหาคม 2563 เวลา 14.00 น.

จากการทดสอบครั้งที่ 4 ตามรูปที่ 85 เมื่อเทียบผลที่ได้เข้ากับตำแหน่งของดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลานั้น พบว่า ที่เวลา 14.00 น. สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้จำนวนมากที่สุด คือ 11 ดวง และยังมีกระจายตัวของดาวเทียมที่ล้อมรอบจุดรับสัญญาณ ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอส ที่มีการรวมกลุ่มมากขึ้นกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ในการทดสอบครั้งเดียวกัน

### 4.3 สรุปผลการออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรายงานที่ได้นำเสนอมาข้างต้นได้กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบในขั้นแรก และการสร้างโปรแกรมประยุกต์สำหรับทดสอบการใช้งานเพื่อคำนวณหาพิกัดตำแหน่งถ้ำด้วยเทคนิคยอเดซีก่อนที่จะนำไปทดสอบจริงในถ้ำหลวงเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ โดยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของระบบระบุตำแหน่งบนโลก เช่น หลักการ ข้อมูลทางเทคนิค ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและข้อจำกัดของการระบุตำแหน่งภายในถ้ำ เป็นต้น จากนั้นศึกษาเทคโนโลยีระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ ศึกษาทฤษฎีการสำรวจทางยอเดซี และศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ อุปกรณ์ไจโรสโคป และเข็มทิศดิจิทัล โดยให้อุปกรณ์แต่ละชิ้นทำงานร่วมกันเพื่อส่งข้อมูลให้แก่โปรแกรมประยุกต์ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นได้ทำการคำนวณหาผลลัพธ์ตามที่ต้องการ โปรแกรมดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้ทำงานบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพาที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ หลังจากนั้นทำการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งเบื้องต้นภายในห้องปฏิบัติการและในพื้นที่ภาคสนามภายในมหาวิทยาลัยก่อน โดยทดสอบการคำนวณพิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนดระยะทางและทิศทางจากพิกัดอ้างอิงที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าเทคนิคที่ใช้มีความแม่นยำสูง โดยที่ระยะจากจุดอ้างอิงถึงจุดพิกัดเป้าหมาย 100 เมตรนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากทฤษฎีพิกัดทรงกลมประมาณ 0.02 มิลลิเมตร และในการทดสอบความแม่นยำตรงของอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอสเพื่อให้สามารถเลือกรับสัญญาณพิกัดตำแหน่งจากดาวเทียมในสถานการณ์ที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องที่สุด พบว่าช่วงเวลาที่มีความแม่นยำตรงของเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสมากที่สุดคือ ช่วงเวลา 06.00 น. และ 18.00 น. อีกทั้งจากปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่กล่าวมา ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาบนดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาบนตัวอุปกรณ์เอง ความคลาดเคลื่อนจากวงโคจรของดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนจากการเดินทางของสัญญาณ และความคลาดเคลื่อนจากการวางตัวของดาวเทียม นั้น พบว่ามีปัจจัยที่เกิดจากการวางตัวของดาวเทียมนั้นมีส่วนสำคัญที่สุด จากการทดสอบในขั้นตอนนี้พบว่า หากตำแหน่งของดาวเทียมที่มีระยะทางจากตัวดาวเทียมแต่ละดวงไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณใกล้เคียงกันและมีการกระจายตัวล้อมรอบอุปกรณ์รับสัญญาณ จะสามารถระบุกลุ่มของตำแหน่งได้ใกล้เคียงกัน อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ จำนวนของดาวเทียมที่สามารถมองเห็นได้ในขณะนั้น หากมีจำนวนดาวเทียมที่สามารถมองเห็นได้และมีการวางตัวของดาวเทียมสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของการคำนวณตำแหน่งเพื่อความแม่นยำ จะส่งผลให้มีโอกาสที่จะระบุตำแหน่งได้ถูกต้องแตกต่างกันด้วย โดยไม่จำเป็นต้องมีจำนวนดาวเทียมที่สามารถมองเห็นมากที่สุดเพียงอย่างเดียว การดำเนินการเพื่อหาปัจจัยที่สำคัญในการระบุพิกัดตำแหน่งให้แม่นยำของการวิจัยขั้นตอนนี้ เพื่อที่จะได้พิกัดอ้างอิงสำหรับการคำนวณพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำได้อย่างแม่นยำที่สุดด้วยนั่นเอง

## 5. ระบบระบุตำแหน่งในถ้ำต้นแบบและผลการทดสอบในถ้ำจริงทั้งสองแห่ง

### 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำต้นแบบ

#### 1) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ชนิด Network RTK

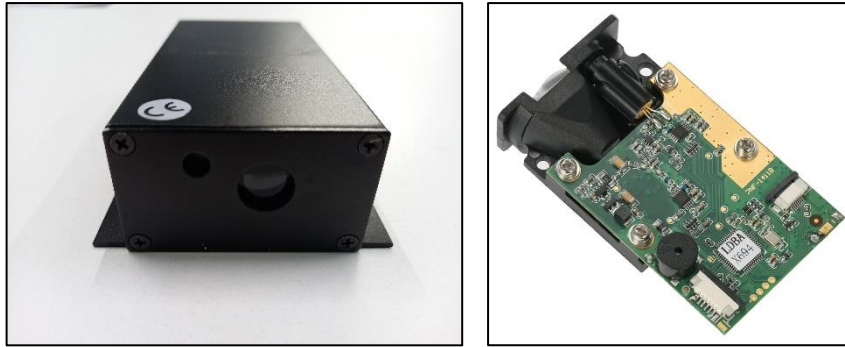
ระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) คือ คำที่ใช้เรียกระบบนำทางด้วยดาวเทียมทุกประเภท ได้แก่ GPS (USA), GLONASS (Russia), GALILEO (EU) Bei Dou (China) และ QZSS (Japan) ซึ่งเครื่องรับดาวเทียมสัญญาณ GNSS สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมนำทางได้หลายระบบพร้อมกันทำให้มีความแม่นยำสูงขึ้น รวมไปถึงการใช้ระบบการรังวัดแบบ Network RTK (Real Time Kinematic) ในเรื่องของค่าแก้ที่จะผ่านมาทางระบบอินเทอร์เน็ตเท่านั้น หลักการคือ ผู้ให้บริการจะต้องมีการวางสถานีฐาน (Base station) ให้กระจายครอบคลุมพื้นที่การให้บริการ ตัวอย่างผู้ให้บริการได้แก่ กรมที่ดิน กรมแผนที่ทหาร หน่วยงานราชการอื่น ๆ โดยเซิร์ฟเวอร์กลางที่รวบรวมค่าแก้จากสถานีต่าง ๆ เราเรียกว่า NTRIP Server ซึ่งจะทำหน้าที่รวบรวมและกระจายค่าปรับแก้ให้กับอุปกรณ์รับ GNSS ผ่านทางอินเทอร์เน็ต การทำงานของระบบจะเป็นการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เรียกว่าระบบ CORS (Continuous Operation Reference Station) ทำให้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ชนิด Network RTK นั้นมีความละเอียดแม่นยำสูง ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GNSS สำหรับใช้ในการระบุพิกัดตำแหน่งอ้างอิงภายนอกถ้ำมาใช้งานเพิ่มเติม (เดิมที่ได้ใช้ของยี่ห้อ Aeronia อย่างเดียว) ดังแสดงในรูปที่ 86



รูปที่ 86 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ชนิด Network RTK

#### 2) เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์

เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะทาง มีหลักการทำงานโดยการปล่อยรังสีเลเซอร์ไปกระทบกับเป้าหมายและสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์เพื่อคำนวณเป็นระยะทาง เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการหาระยะทางระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมาย เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งานร่วมกับแอปพลิเคชันที่ออกแบบโดยสามารถส่งข้อมูลการวัดระยะทางผ่านทางพอร์ต USB ได้ มีความแม่นยำสูง และมีขนาดกะทัดรัดพกพาง่าย เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 87



รูปที่ 87 เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์พร้อมพอร์ต USB

### 3) เข็มทิศดิจิทัล ไจโรสโคป และเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส

เข็มทิศเป็นเครื่องมือวัดสำหรับใช้หาทิศทางภูมิศาสตร์ มีเข็มแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแรงดึงดูดของแม่เหล็กโลกซึ่งวางตัวจากแนวขั้วโลกเหนือ-ใต้ ปัจจุบันมีการพัฒนาเข็มทิศให้สามารถส่งข้อมูลดิจิทัลไปยังแท็บเล็ตหรือสมาร์ทโฟนเพื่อการใช้งานที่สะดวกขึ้น ส่วนของไจโรสโคปจะเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อยหมุนเพื่อรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน โมเมนตัมเชิงมุมของล้อยหมุนจะทำให้รักษาตำแหน่งไว้แม้ล้อยหมุนดังกล่าวจะมีการเอียงตัว จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์หรือยานพาหนะต่างๆ ร่วมกับเข็มทิศและเครื่องรับจีพีเอสได้ โดยทั่วไปเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสสามารถรับสัญญาณได้ทั้งจากดาวเทียมระบบ GPS ของสหรัฐอเมริกา ระบบ GLONASS ของรัสเซีย หรือ ระบบ Galileo ของสหภาพยุโรป อย่างน้อยหนึ่งระบบหรือมากกว่าหนึ่งระบบขึ้นไปเมื่อต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในโครงการนี้ได้เลือกใช้งานในส่วนของฟังก์ชันเข็มทิศดิจิทัลและไจโรสโคป ที่อยู่ในอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณจีพีเอสยี่ห้อ Aeronia ประเทศเยอรมัน ดังแสดงในรูปที่ 88 ซึ่งสามารถบันทึกและส่งออกข้อมูลในส่วนของทิศทางจากเข็มทิศดิจิทัลและข้อมูลมุมเอียงจากไจโรสโคปที่อยู่ในอุปกรณ์ชุดนี้เพื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์เซนเซอร์อื่นๆ ได้เป็นอย่างดี



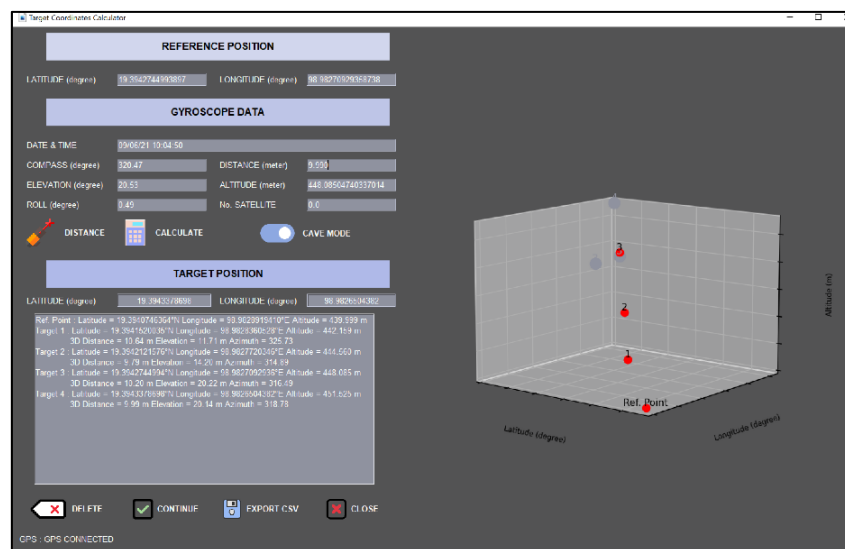
รูปที่ 88 อุปกรณ์เข็มทิศดิจิทัลและเครื่องรับตำแหน่งจีพีเอส

### 4) โปรแกรมประยุกต์ใช้งานสำหรับคำนวณตำแหน่งภายในถ้ำและแสดงผล

โปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้งานการคำนวณพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ ได้ถูกออกแบบและพัฒนาตัวโปรแกรมต่อจากโปรแกรมต้นแบบสำหรับใช้ในการทดสอบค่าความแม่นยำของพิกัดตำแหน่งจากอุปกรณ์รับสัญญาณจีพีเอสที่ได้รายงานไปแล้วในหัวข้อที่ 4 ทั้งนี้ยังคงยึดหลักการการเชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างข้อมูล



ที่ถูกส่งมาจากส่วนฮาร์ดแวร์และเซนเซอร์มาคำนวณหาตำแหน่ง โดยอ้างอิงวิธีการคำนวณด้วยเทคนิคทางยี่ห้อเดซี ส่วนการเขียนโปรแกรมได้ใช้ภาษาไพธอน (Python) ในการเขียนหน้าต่างการทำงานตัวเชื่อมประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) ซึ่งจะทำให้การใช้งานโปรแกรมมีความสะดวกและง่ายยิ่งขึ้น โดยมีหน้าต่างของหน้าต่างสำหรับใช้งานโปรแกรมแสดงไว้ในรูปที่ 89 โดยหลักการทำงานของโปรแกรมประยุกต์นี้จะรับข้อมูลพิกัดตำแหน่งแรก (อ้างอิง) จาก 1) เครื่องรับสัญญาณ GNSS 2) เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ และ 3) จากเซนเซอร์ที่อยู่ภายในเครื่องรับตำแหน่งจีพีเอส ซึ่งประกอบด้วย ความสูงจากระดับน้ำทะเลอ้างอิงเริ่มต้น รวมไปถึง ระยะทาง ทิศทาง และมุมเงย ที่ทำการวัดไว้ ณ จุดอ้างอิงเริ่มต้น เพื่อเปรียบเทียบไปยังพิกัดเป้าหมายที่ต้องการทราบ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจะนำมาใช้คำนวณพิกัดเป้าหมายในตำแหน่งถัดไปให้มีความใกล้เคียงกับที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสซึ่งวัดได้จากภายนอกถ้าได้มากที่สุด จากนั้นจะแสดงผลพิกัดที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมประยุกต์ดังกล่าว โดยโปรแกรมที่ออกแบบนี้จะรองรับกับระบบปฏิบัติการวินโดวส์บนแท็บเล็ตหรือบนคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โดยชุดอุปกรณ์ส่วนฮาร์ดแวร์ของระบบที่พร้อมใช้งานได้แสดงไว้ในรูปที่ 90



รูปที่ 89 โปรแกรมประยุกต์ใช้งานสำหรับคำนวณตำแหน่งภายในถ้ำและแสดงผล



รูปที่ 90 ชุดอุปกรณ์ระบุตำแหน่งภายในถ้ำและเป้ารับเลเซอร์

## 5.2 ขั้นตอนการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

การทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำได้เริ่มต้นดำเนินการครั้งแรกที่ถ้ำปาฎิหาริย์ ต.นาโพธิ์กลาง อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และดำเนินการครั้งที่สองที่ถ้ำหลวงเชียงดาว ต.เชียงดาว ต.บ้านถ้ำ อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เพื่อทดสอบการทำงานของระบบและเพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของระบบที่ออกแบบบริเวณพื้นที่จริงตามที่กำหนดไว้ในโครงการวิจัยฯ ซึ่งการทดสอบการระบุตำแหน่งของถ้ำทั้งสองแห่งนั้นจะมีขั้นตอนการดำเนินการที่เหมือนกัน ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดจุดที่เหมาะสมที่อยู่ภายนอกถ้ำเพื่อเก็บข้อมูลทั้งพิกัดตำแหน่งและความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) เพื่อใช้เป็นพิกัดตำแหน่งอ้างอิง โดยบริเวณดังกล่าวจะต้องเป็นพื้นที่โล่งเพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น ทางเข้าถ้ำ หรือพื้นที่โล่งใกล้ทางเข้าถ้ำ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 91 และ 92



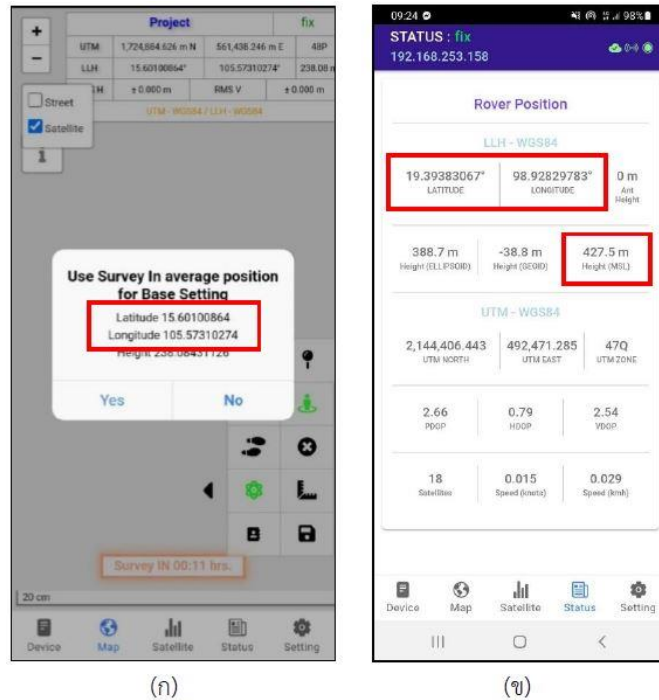
รูปที่ 91 แสดงการกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อใช้เป็นพิกัดตำแหน่งอ้างอิง ณ ถ้ำปาฎิหาริย์



รูปที่ 92 แสดงการกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อใช้เป็นพิกัดตำแหน่งอ้างอิง ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว

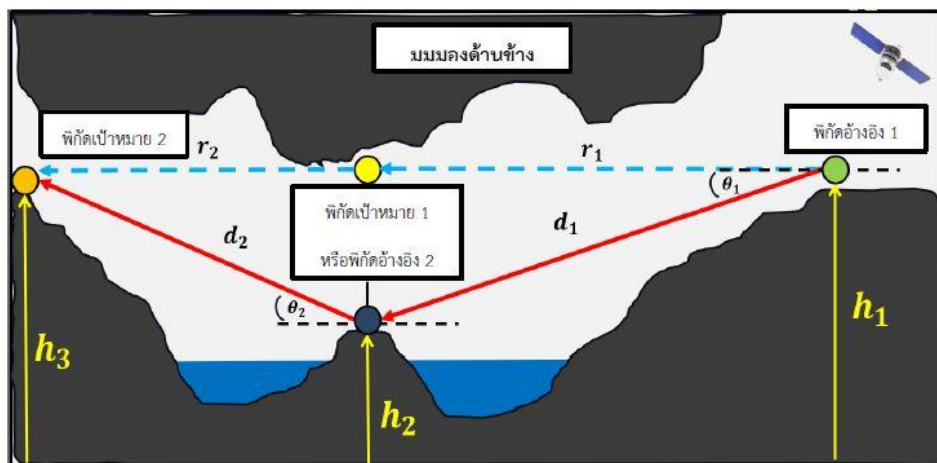
2) เริ่มต้นด้วยการรับพิกัดตำแหน่งและความสูงจากระดับน้ำทะเลในจุดแรก จากระบบ GNSS เพื่อใช้เป็นพิกัดอ้างอิงในการทำงานของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ซึ่งการระบุตำแหน่งด้วยระบบ GNSS ที่ใช้งานทุกครั้งนั้นจะมีทำงานร่วมกับการรับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ที่จะรับสัญญาณจากดาวเทียมหลายระบบหรือ GNSS ร่วมกับข้อมูลจากหอดูดาวมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้ใช้งานร่วมกับฐานข้อมูล RTK ของกรมแผนที่ทหาร RCGN (RTSD GNSS CORS Network) เพื่อให้การระบุพิกัดตำแหน่งมีความแม่นยำสูงสุด ตามรูปที่ 93 พบว่ามีค่าพิกัดตำแหน่งเริ่มต้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงที่ด้านหน้าถ้ำปาฎิหาริย์จะอยู่ที่ละติจูด 15.60100864 องศาเหนือ ลองจิจูด 105.57310274 องศาตะวันออก และมีระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางอยู่ที่

238.08431126 เมตร และกรณีของถ้าหลวงเชียงดาวจะมีพิกัดตำแหน่งอ้างอิงอยู่ที่ละติจูด 19.39383067 องศาเหนือ ลองจิจูด 98.92829783 องศาตะวันออก และมีระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางอยู่ที่ 427.5 เมตร



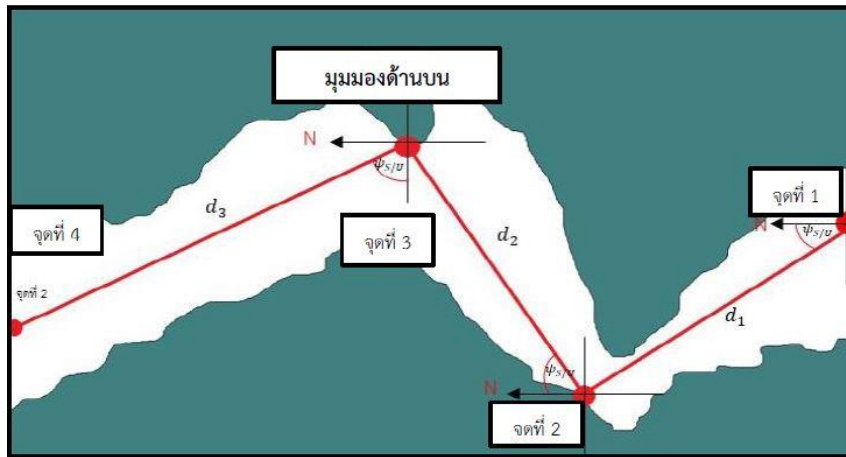
รูปที่ 93 แสดงพิกัดตำแหน่งและความสูงจากระดับน้ำทะเล ณ ตำแหน่งเริ่มต้นจากอุปกรณ์ GNSS ที่ด้านหน้าของ (ก) ถ้าป่าภูทาลัย และ (ข) ถ้าหลวงเชียงดาว

3) เมื่อได้พิกัดจากจุดอ้างอิงจุดแรกแล้ว จึงเริ่มดำเนินการทดสอบระบบระบุตำแหน่งตามเส้นทางภายในถ้ำ โดยกำหนดพิกัดเป้าหมายที่ต้องการทราบเป็นอันดับแรก จากนั้นเซนเซอร์ของระบบระบุตำแหน่งจะทำการวัดไปที่พิกัดนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งมุมองศา ระยะทาง ทิศทาง และความสูงจากระดับน้ำทะเล เพื่อส่งให้กับโปรแกรมที่ติดตั้งอยู่ในคอมพิวเตอร์แท็บเล็ตทำการคำนวณหาตำแหน่งพิกัดของตำแหน่งนั้น ดังแสดงตามภาพประกอบหลักการทำงานในมุมมองด้านข้างตามรูปที่ 94 ในกรณีที่เส้นทางภายในโพรงถ้ำมีความสูงชันแตกต่างกัน



รูปที่ 94 ภาพแสดงวิธีการหาตำแหน่งพิกัดในถ้ำที่มีความสูงชันแตกต่างกัน (มุมมองด้านข้าง)

4) เมื่อได้ตำแหน่งพิกัดเป้าหมายจากการคำนวณเทียบกับพิกัดอ้างอิงในครั้งแรกแล้ว ตำแหน่งพิกัดที่คำนวณได้ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นตำแหน่งพิกัดอ้างอิงที่จุดถัดไป เพื่อคำนวณหาตำแหน่งพิกัดที่อยู่ถัดไปโดยทุกจุดจะเก็บข้อมูลพิกัดบริเวณกลางเืองทางเดินของถ้ำซึ่งอาจมีความสูงชันและมีความคดเคี้ยวแตกต่างกัน (ตามมุมมองด้านบน) ดังแสดงในรูปที่ 95 จนครบเส้นทางของถ้ำ



รูปที่ 95 ภาพแสดงวิธีการหาตำแหน่งพิกัดในถ้ำที่มีความคดเคี้ยว (มุมมองด้านบน)

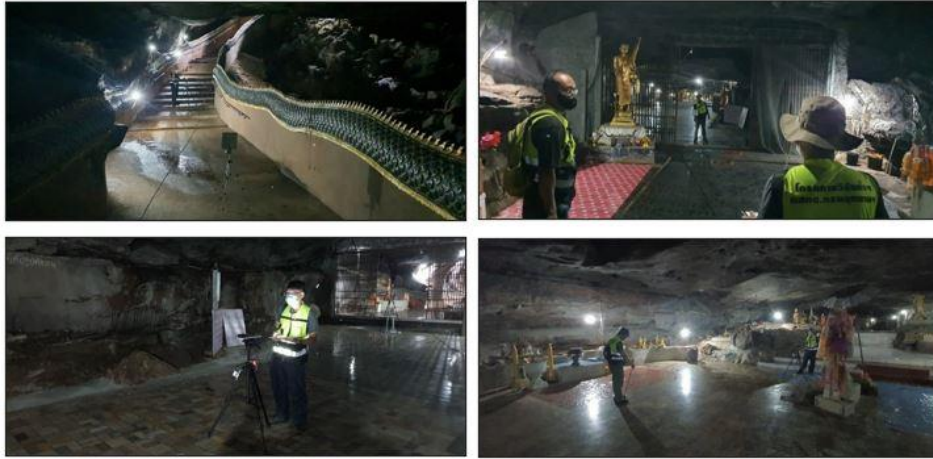
## 6. ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

### 6.1 การดำเนินการทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

การทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำแห่งแรกได้ทดสอบ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ ต.นาโพธิ์กลาง อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี เพื่อทดสอบถึงการใช้งานจริงของอุปกรณ์ โปรแกรมประยุกต์ และขั้นตอนวิธีการใช้งานตามที่อธิบายไว้หัวข้อที่ 6 โดยมีพิกัดตำแหน่งอ้างอิงอยู่ที่บริเวณปากทางเข้าถ้ำปาฏิหาริย์ ดังแสดงในรูปที่ 96 และการวัดพิกัดตำแหน่งถัดไปตั้งแต่บันไดพญานาคทางลงเข้าถ้ำปาฏิหาริย์มุ่งเข้าสู่ภายในโพรงถ้ำ ตามรูปที่ 97

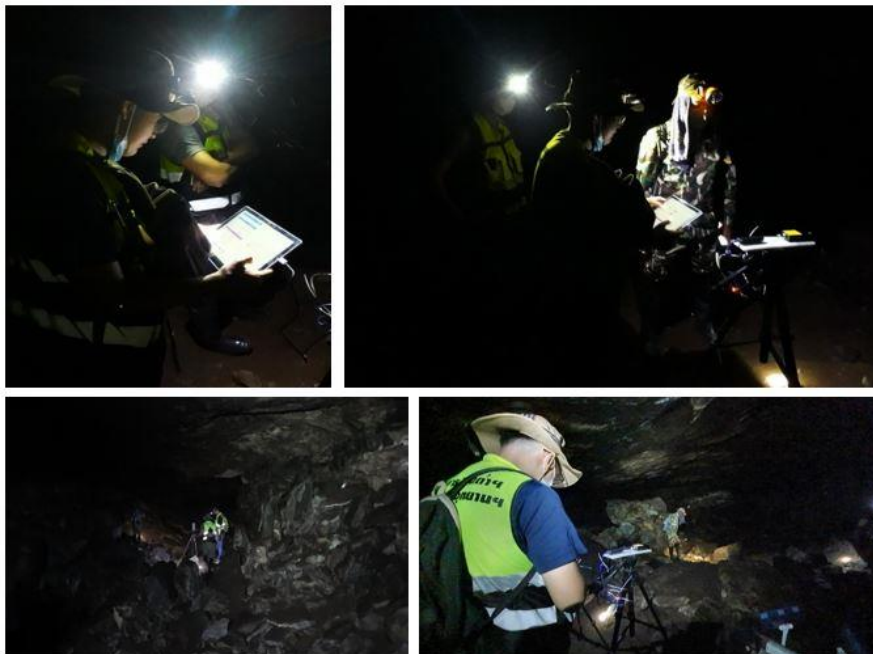


รูปที่ 96 แสดงตำแหน่งการวัดพิกัดตำแหน่งแรกเพื่อใช้เป็นพิกัดอ้างอิง

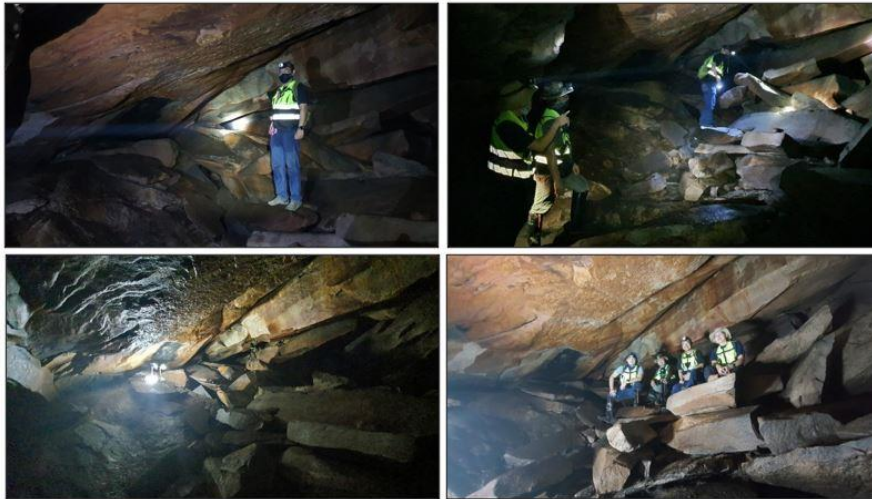


รูปที่ 97 แสดงการทดสอบระบบประปาตำแหน่งภายในถ้ำจากบริเวณบันไดทางเข้าถ้ำปาฏิหาริย์

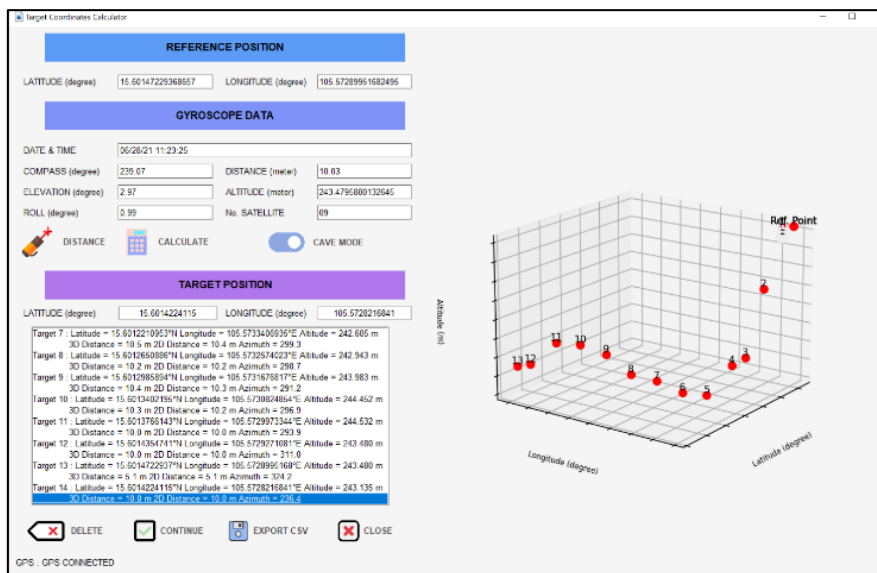
ในรูปที่ 98 เป็นภาพที่ถูกบันทึกไว้ในขณะที่คณะผู้วิจัยกำลังปฏิบัติการทดสอบระบบประปาพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำปาฏิหาริย์หลังจากที่ทำการทดสอบจากปากทางเข้าถ้ำลงผ่านบันไดนาคเข้าไปสู่เป้าหมายที่ปลายโพรงถ้ำ ตามรูปที่ 99 รวมการทดสอบของระบบดังกล่าวทั้งหมด 50 พิกัดตำแหน่ง และได้ตัวอย่างพิกัดที่คำนวณได้จำนวน 13 ตำแหน่งแรกไว้ในรูปที่ 100



รูปที่ 98 แสดงการดำเนินการทดสอบระบบประปาตำแหน่งภายในส่วนกลางของถ้ำปาฏิหาริย์



รูปที่ 99 ตำแหน่งสิ้นสุดที่ปลายโพรงถ้ำปาฏิหาริย์

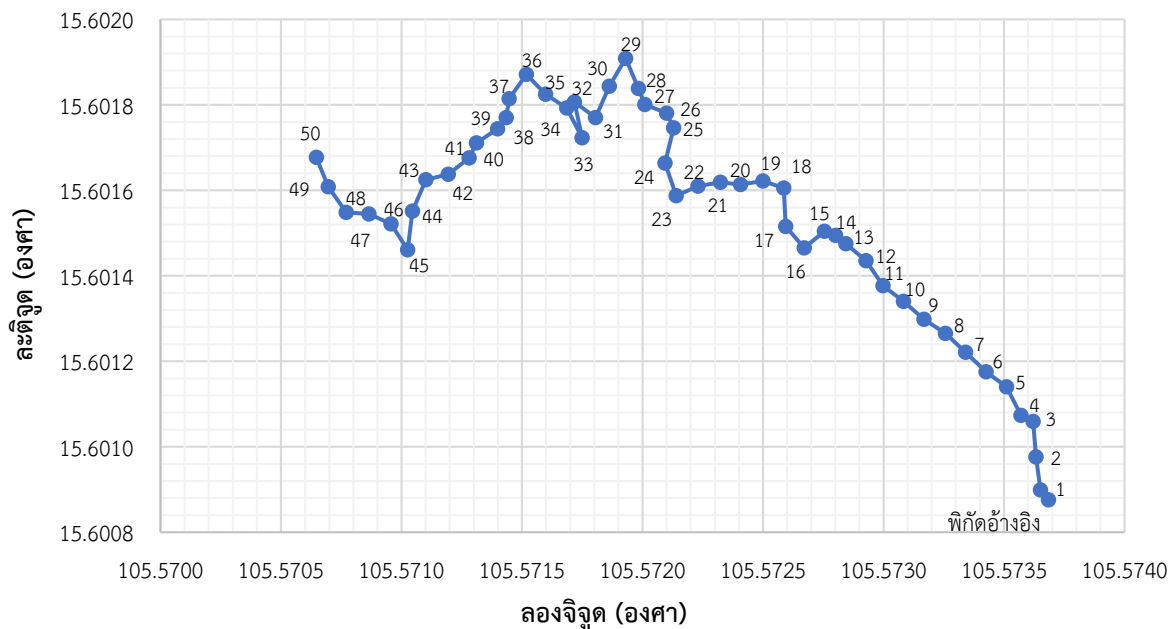


รูปที่ 100 แสดงหน้าต่างโปรแกรมประยุกต์ของระบบฯ ขณะกำลังทำการทดสอบ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

จากรูปที่ 100 จะเห็นได้ว่าภาพที่ปรากฏด้านซ้ายจะเป็นข้อมูลของพิกัดตำแหน่งต่างๆ ที่ผ่านการคำนวณตั้งแต่ตำแหน่งแรกภายนอกถ้ำ (ตำแหน่ง 0) ไหลเรียงลงไปในโพรงถ้ำจนกระทั่งถึงตำแหน่งสุดท้ายที่ปลายโพรงถ้ำ ขณะที่ภาพด้านขวาจะแสดงเป็นกราฟแบบสามมิติที่แสดงให้เห็นถึงพิกัดตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของแต่ละตำแหน่ง (จุดวงกลมสีแดง) ที่ได้ทำการทดสอบและคำนวณผลออกมา นอกจากนี้ยังได้แสดงถึงระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของแต่ละตำแหน่งด้วยกราฟในแนวตั้งไปพร้อมกันด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นโยชน์ในการพิจารณาสภาพภูมิประเทศของโพรงถ้ำที่เป็นเป้าหมายได้อย่างชัดเจน

## 6.2 ผลทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

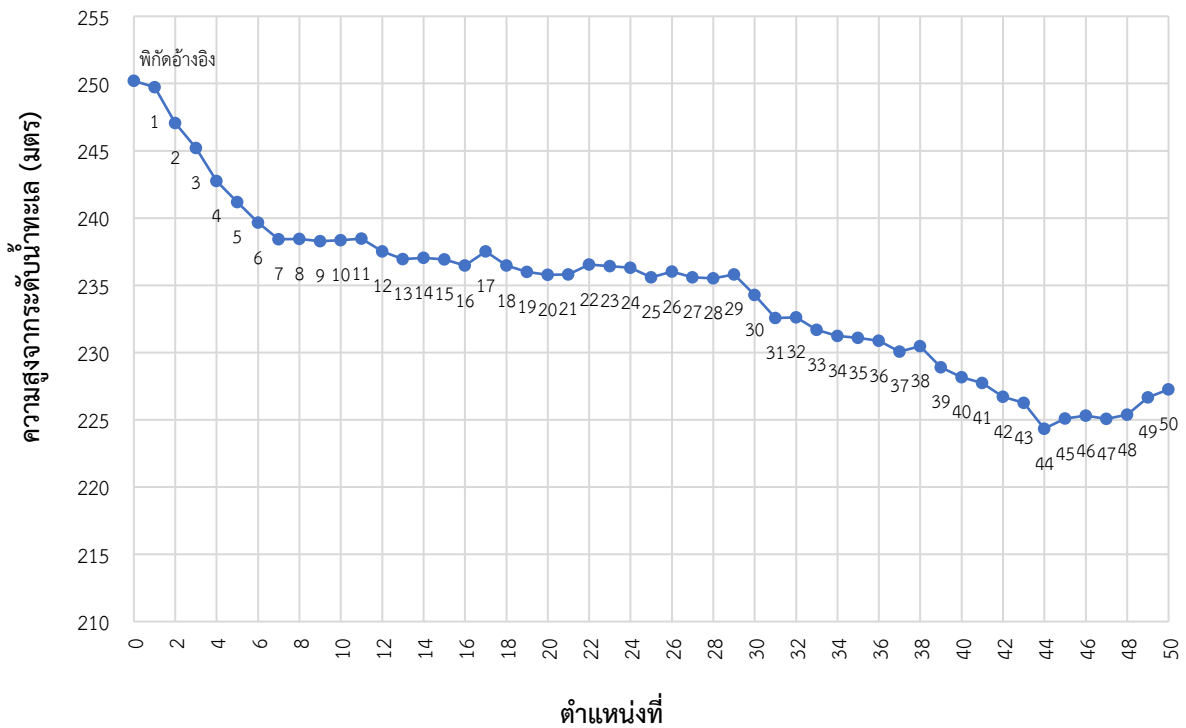
จากขั้นตอนการการระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำปาฏิหาริย์ที่ได้อธิบายผ่านมา เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้จากการทดสอบทั้ง 50 ตำแหน่งมาแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 101 จะทำให้ทราบได้ว่าเส้นทางของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์นี้มีลักษณะและทิศทางของโพรงถ้ำเป็นอย่างไร และเมื่อนำค่าพิกัดตำแหน่งทั้ง 50 ตำแหน่งมาพล็อตบนแผนที่ดาวเทียมของกูเกิล (Google map) ก็จะทำให้เห็นถึงเส้นทางของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์เปรียบเทียบกับสภาพภูมิประเทศในมุมมองด้านบน (Top view) ที่อยู่บนภูเขาเหนือโพรงถ้ำได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 102 และเมื่อนำเฉพาะค่าระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของแต่ละตำแหน่งมาพล็อตเป็นกราฟในรูปที่ 103 ก็จะทำให้เห็นถึงระดับความสูงของแต่ละพิกัดตำแหน่งตลอดแนวโพรงถ้ำได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ได้นำค่าพิกัดตำแหน่งทั้ง 50 ตำแหน่งบันทึกไว้ในตารางที่ 4 เพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการพิจารณาค่าของแต่ละพิกัดตำแหน่งโดยเฉพาะไว้ด้วย



รูปที่ 101 กราฟแสดงผลการระบุพิกัดตำแหน่งภายในโพรงถ้ำปาฏิหาริย์



รูปที่ 102 แผนที่แสดงผลการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่ง ณ ถ้ำป่าภูหารีย์



รูปที่ 103 กราฟแสดงระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลของแต่ละพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำป่าภูหารีย์



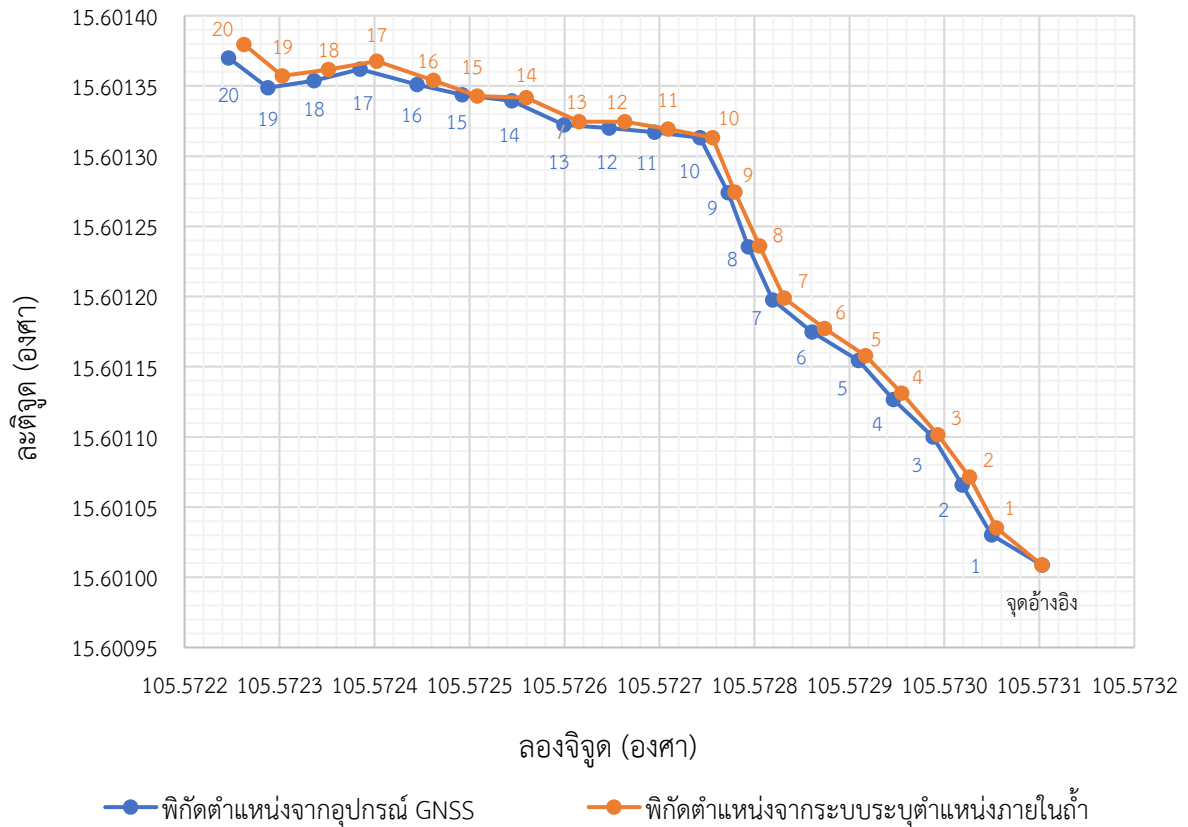
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
จุดอ้างอิง	15.60087580	105.57368400	250.20
1	15.60089869	105.57365090	249.74
2	15.60097610	105.57363320	247.05
3	15.60105913	105.57362100	245.20
4	15.60107338	105.57356980	242.76
5	15.60114008	105.57351080	241.19
6	15.60117514	105.57342560	239.65
7	15.60122110	105.57334070	238.41
8	15.60126509	105.57325740	238.44
9	15.60129859	105.57316770	238.29
10	15.60134022	105.57308250	238.35
11	15.60137661	105.57299730	238.47
12	15.60143547	105.57292710	237.51
13	15.60147536	105.57284360	236.95
14	15.60149457	105.57280140	237.03
15	15.60150456	105.57275510	236.91
16	15.60146499	105.57267160	236.46
17	15.60151522	105.57259390	237.51
18	15.60160526	105.57258580	236.46
19	15.60162196	105.57250030	236.00
20	15.60161396	105.57240750	235.79
21	15.60161883	105.57232300	235.80
22	15.60160966	105.57222990	236.53
23	15.60158778	105.57214020	236.42
24	15.60166376	105.57209330	236.30
25	15.60174612	105.57212900	235.60
26	15.60178058	105.57210030	236.01
27	15.60180117	105.57200980	235.59
28	15.60183810	105.57198290	235.52
29	15.60190894	105.57193000	235.80
30	15.60184369	105.57186260	234.27
31	15.60177006	105.57180580	232.55
32	15.60180680	105.57171810	232.60
33	15.60172301	105.57174940	231.69

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
34	15.60179283	105.57168530	231.23
35	15.60182504	105.57159800	231.09
36	15.60187106	105.57151840	230.88
37	15.60181416	105.57144620	230.07
38	15.60177006	105.57143510	230.48
39	15.60174407	105.57139880	228.91
40	15.60171102	105.57131080	228.15
41	15.60167574	105.57128060	227.75
42	15.60163733	105.57119390	226.72
43	15.60162519	105.57110070	226.26
44	15.60155112	105.57104510	224.34
45	15.60146068	105.57102550	225.09
46	15.60152176	105.57095680	225.31
47	15.60154472	105.57086540	225.06
48	15.60154879	105.57077100	225.38
49	15.60160848	105.57069690	226.67
50	15.60167707	105.57064646	227.25

### 6.3 การทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายนอกถ้าเพื่อการเปรียบเทียบ

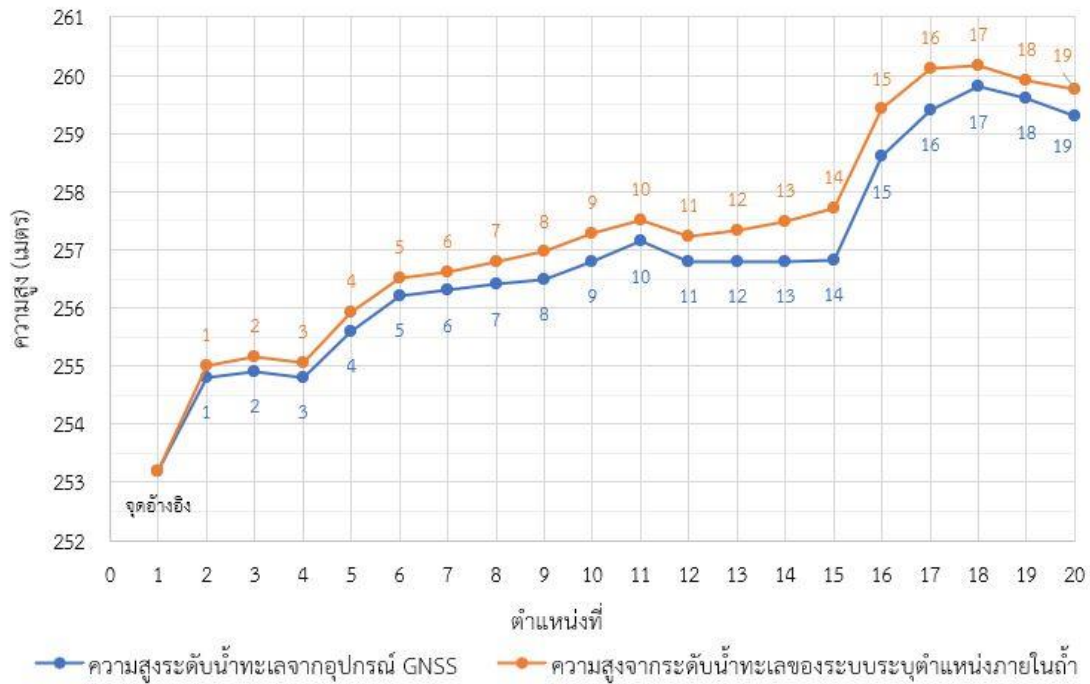
เพื่อพิสูจน์และยืนยันความแม่นยำตรงของค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบและคำนวณโดยระบบระบุพิกัดตำแหน่งที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาของโครงการนี้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างค่าพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้จากระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับ GNSS ในบริเวณพื้นที่โล่งใกล้กับถ้ำปาฏิหาริย์ โดยเลือกตำแหน่งที่สามารถเดินขึ้นไปทำการวัดค่าพิกัดตำแหน่งด้วยเครื่องรับ GNSS บนภูเขาโดยสะดวกจำนวน 20 ตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้จากระบบระบุตำแหน่งในถ้ำที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมา โดยในการวัดทดสอบในครั้งนี้ได้กำหนดตัวแปรของความสูงจากระดับน้ำทะเลและพิกัดตำแหน่งเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับการทดสอบภายในถ้ำปาฏิหาริย์ จากนั้นทำการทดสอบและคำนวณแต่ละตำแหน่งบนภูเขาพร้อมกับใช้เครื่องรับ GNSS วัดค่าพิกัดตำแหน่งด้วยการรับสัญญาณโดยตรงจากดาวเทียมเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการทดสอบเชิงเปรียบเทียบนี้ได้แสดงผลเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 104 จากนั้นนำพิกัดตำแหน่งทั้งสองกรณีไปป้อนข้อมูลในแผนที่ดาวเทียมกูเกิ้ลอีกครั้งหนึ่งเพื่อใช้พิจารณาบนสภาพภูมิประเทศที่อยู่เหนือโพรงถ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 105



รูปที่ 104 แสดงการเปรียบเทียบค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นมากับค่าที่วัดได้จากเครื่องรับ GNSS ที่รับสัญญาณจากดาวเทียมโดยตรง



รูปที่ 105 แสดงผลการระบุตำแหน่งพิกัดของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำเปรียบเทียบกับระบบ GNSS บริเวณพื้นที่โล่งบนภูเขา



**รูปที่ 106** เปรียบเทียบระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของแต่ละพิกัดตำแหน่งที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและจากเครื่องรับ GNSS

จากรูปที่ 104 แสดงกราฟเปรียบเทียบพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้จากระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำเปรียบเทียบกับที่ได้จากการใช้เครื่องรับ GNSS ซึ่งรับสัญญาณจากดาวเทียมโดยตรง ณ จุดเดียวกัน โดยทำการทดสอบในบริเวณพื้นที่โล่งบนภูเขาเหนือถ้ำปาฏิหาริย์ โดยทำการทดสอบที่ระยะทางรวม 106.6 เมตร ทั้งหมด 20 จุด เฉลี่ยแต่ละจุดห่างกัน 5 เมตร จากผลการทดสอบจะเห็นว่าในแต่ละจุดนั้นมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย และเมื่อคำนวณย้อนกลับเพื่อหาระยะทางที่เกิดความคลาดเคลื่อน จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเฉลี่ยอยู่ที่ 1.36 เมตร จากนั้นนำมาแสดงพิกัดบนแผนที่ดาวเทียมก็เกิดดังรูปที่ 105 นอกจากนี้ได้นำค่าระดับความสูงเหนือน้ำทะเลปานกลางมาแสดงเป็นกราฟตามรูปที่ 106 ที่วัดได้จากเซนเซอร์ของระบบระบุตำแหน่งในถ้ำและจากการคำนวณของเครื่องรับ GNSS ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของความสูงที่เกิดขึ้นเฉลี่ยอยู่ที่ 0.44 เมตร ในการแสดงผลเปรียบเทียบของค่าระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลดังกล่าว ได้ทำขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบระบบมีลักษณะภูมิประเทศที่มีการไต่ระดับทั้งขึ้นสูงและลงต่ำซึ่งคล้ายกับสภาพภายในโพรงถ้ำที่ทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบทั้งพิกัดตำแหน่งและระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำกับระบบ GNSS ในบริเวณพื้นที่ทดสอบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการระบุพิกัดตำแหน่งและระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำเปรียบเทียบกับระบบ GNSS บริเวณพื้นที่โล่ง

ตำแหน่ง ที่	การระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบ GNSS			การระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ		
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความ สูง (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความ สูง (เมตร)
จุดอ้างอิง	15.60100864	105.57310274	253.20	15.60100864000	105.57310274000	253.20
1	15.60103017	105.57304969	254.80	15.60103527631	105.57305483980	255.01
2	15.60106567	105.57301885	254.90	15.60107136663	105.57302660350	255.17
3	15.60110000	105.57298800	254.80	15.60110156854	105.57299297703	255.06
4	15.60112650	105.57294615	255.60	15.60113112594	105.57295508046	255.93
5	15.60115436	105.57290943	256.20	15.60115791852	105.57291679301	256.51
6	15.60117483	105.57286083	256.30	15.60117718058	105.57287390527	256.63
7	15.60119752	105.57281936	256.40	15.60119893564	105.57283142483	256.79
8	15.60123533	105.57279370	256.50	15.60123615727	105.57280535814	256.96
9	15.60127400	105.57277250	256.80	15.60127434028	105.57277931716	257.27
10	15.60131322	105.57274269	257.14	15.60131304307	105.57275583594	257.52
11	15.60131691	105.57269485	256.80	15.60131938926	105.57270895307	257.23
12	15.60132000	105.57264717	256.80	15.60132462014	105.57266340747	257.34
13	15.60132231	105.57259947	256.80	15.60132445902	105.57261548650	257.48
14	15.60133940	105.57254458	256.83	15.60134167448	105.57255981547	257.71
15	15.60134373	105.57249222	258.60	15.60134271706	105.57250813924	259.42
16	15.60135100	105.57244464	259.41	15.60135396083	105.57246200448	260.11
17	15.60136195	105.57238473	259.80	15.60136757159	105.57240222436	260.16
18	15.60135362	105.57233641	259.60	15.60136158706	105.57235161988	259.91
19	15.60134867	105.57228767	259.30	15.60135708490	105.57230307458	259.77
20	15.60137000	105.57224633	259.60	15.60137956386	105.57226265048	260.24

#### 6.4 สรุปผลการทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำปาฏิหาริย์

การทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ ดังแสดงในรูปที่ 96 ถึงรูปที่ 100 จะเห็นว่าตามเส้นทางของถ้ำซึ่งมีโถงเส้นทางหลักเพียงเส้นทางเดียว โดยในช่วง 125 เมตรแรกของถ้ำนั้นจะประดิษฐานพระพุทธรูปให้นักท่องเที่ยวเข้าชม ถัดจากนั้นจะเป็นเส้นทางภายในโพรงถ้ำที่ไม่ได้เปิดให้นักท่องเที่ยวเข้าไป เนื่องจากมีความมืดสนิทและมีค้างคาวอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเส้นทางภายในจะค่อนข้างเรียบ ไม่คดเคี้ยว ขนาดโถงทางเดินและความสูงมีขนาดค่อนข้างคงที่ตลอดเส้นทาง อาจมีบางช่วงที่พบเพดานต่ำมาก และเมื่อเข้าไปจนถึงสิ้นสุดเส้นทางเดินจะพบก้อนหินทรายขนาดใหญ่ที่ซ้อนทับกันจน

ไม่มีช่องทางที่ไม่สามารถเดินทางต่อไปได้ดังรูปที่ 99 โดยจากการทดสอบสามารถรวมระยะทางตามเส้นทาง โถงถ้ำตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายรวมทั้งสิ้น 457 เมตร

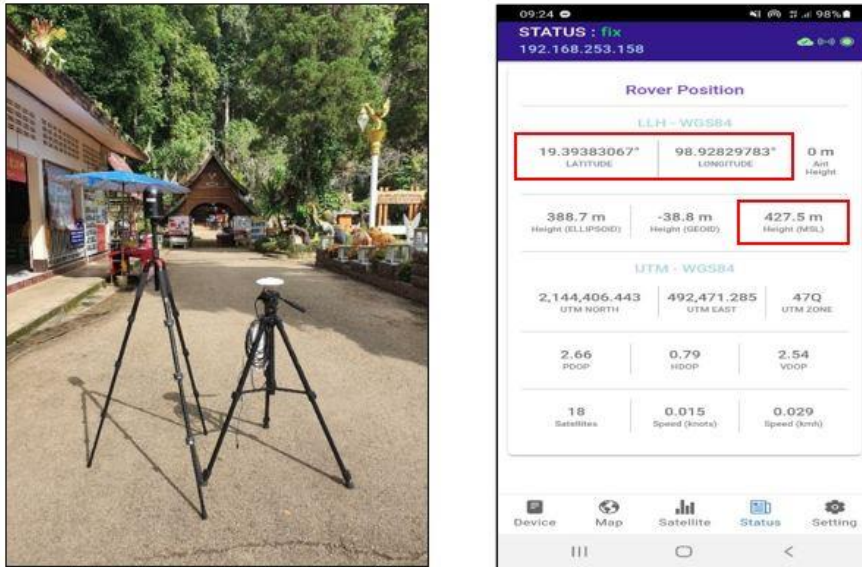
จากกราฟผลการระบุตำแหน่งที่แสดงไว้ในรูปที่ 101 เป็นผลการทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่ง ภายในถ้ำปาฏิหาริย์ กราฟที่ 102 ก็ยังสามารถนำข้อมูลพิกัดมาพล็อตลงบนแผนที่ดาวเทียม Google Earth เพื่อให้เห็นถึงเส้นทางของถ้ำเหนือพื้นดิน ภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมโดยรอบในมุมมองด้านบน และใน กราฟที่ 103 ได้แสดงความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเปรียบเทียบกับแต่ละตำแหน่ง อย่างไรก็ตามได้ทำ การทดสอบความแม่นยำในการระบุพิกัดดังแสดงในรูปที่ 103 ที่เปรียบเทียบค่าพิกัดระหว่างระบบระบุ ตำแหน่งเทียบกับการรับตำแหน่งด้วย GNSS โดยจากการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำนั้นได้ใช้งานใน สภาพภูมิประเทศจริงภายในถ้ำด้วย จึงแสดงข้อมูลความสูงจากระดับน้ำทะเลในแต่ละจุดพิกัดไว้ในรูปที่ 104

การพิสูจน์ความแม่นยำตรงระหว่างค่าพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้ในถ้ำและค่าที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ GNSS ที่ดีที่สุดคือ การเปรียบเทียบตำแหน่งเดียวกัน ณ บริเวณที่มีปล่องถ้ำที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Clear view) ที่เกิดจากสภาพภูมิประเทศมาบดบังสัญญาณ GNSS ที่ส่งลงมาจาดาวเทียม อย่างไรก็ตามถ้ำ ปาฏิหาริย์ไม่มีบริเวณใดๆ บนภูเขาสักแห่งที่มีปล่องตรงดิ่งลงไปบริเวณในโพรงถ้ำในตำแหน่งที่ต้องการพิสูจน์ เปรียบเทียบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวัดทดสอบเปรียบเทียบบนพื้นโล่งระหว่างพิกัดตำแหน่งที่เป็นผลจาก การคำนวณของระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นมากับผลการวัดที่ได้จากระบบ GNSS ซึ่งพบว่ามีความ ผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.44 เมตร ซึ่งถือว่าใกล้เคียงมากและเหมาะสำหรับการนำค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้ไปใช้งานใน การค้นหาตำแหน่งภายในโพรงถ้ำมากกว่าวิธีทางธรณีวิทยาที่ใช้เพียงเข็มทิศและเครื่องวัดระยะทางแบบต่างๆ มาประกอบกันเพื่อคำนวณ

## 7 ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว

### 7.1 การดำเนินการทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

การทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำที่ได้พัฒนาขึ้นมา ได้ทำการทดสอบครั้งที่สอง ณ ถ้ำหลวงเชียง ดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เพื่อทดสอบการใช้งานอุปกรณ์ร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ และขั้นตอนวิธีการใช้ งานตามที่อธิบายไว้ข้างต้น ดังภาพประกอบที่แสดงในรูปที่ 107 ถึง 112 และกรณีของถ้ำหลวงเชียงดาวจะมี พิกัดตำแหน่งอ้างอิงอยู่ที่ละติจูด 19.39383067 องศาเหนือ ลองจิจูด 98.92829783 องศาตะวันออก และมี ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางอยู่ที่ 427.5 เมตร ซึ่งวัดค่าได้จากเครื่องรับ GNSS ดังแสดงในรูปที่ 107 (ด้านขวา)



รูปที่ 107 แสดงตำแหน่งการวัดพิกัดตำแหน่งแรกที่หน้าถ้ำหลวงเชียงดาวเพื่อใช้เป็นพิกัดอ้างอิง

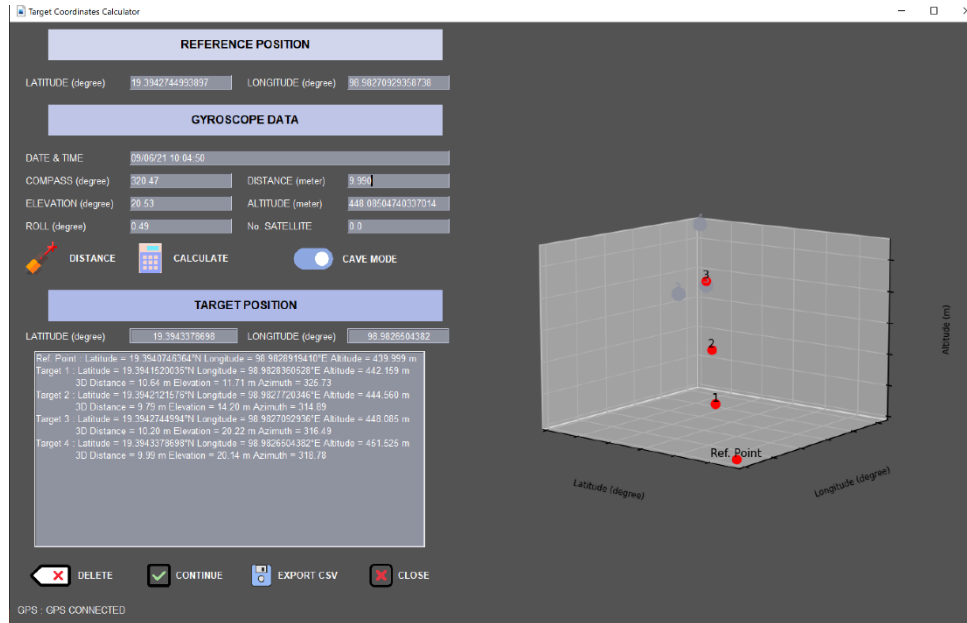


รูปที่ 108 แสดงการทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำจากบริเวณจุดเริ่มต้นทางเข้าถ้ำหลวงเชียงดาว

สภาพภูมิประเทศภายในถ้ำหลวงเชียงดาวมีความแตกต่างจากภายในถ้ำป่าภูทิวอย่างมาก เนื่องจากโพรงถ้ำมีการแยกออกไปยังถ้ำที่อยู่ปลายทางถึงสามเส้นทาง ได้แก่ ถ้ำม้า ถ้ำแก้ว และถ้ำพระนอน-ถ้ำน้ำ เส้นทางตามแนวโพรงถ้ำไม่เป็นทางราบเหมือนกับในโพรงถ้ำป่าภูทิว แต่มีพื้นที่เป็นหินส่วนใหญ่จะมีเฉพาะเส้นทางที่ไปสู่ปลายทางที่ถ้ำน้ำที่มีทางเดินที่ใกล้ถึงปลายทางจะเป็นดินทรายที่สะสมจากการไหลของน้ำที่ล้นจากโพรงน้ำที่ท่วมเข้ามา ยิ่งกว่านั้นระดับของทางเดินส่วนใหญ่ของแต่ละเส้นทางจะมีความสูงจากระดับน้ำทะเลที่แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะที่ถ้ำม้าจะไม่สามารถเข้าไปวัดพิกัดตำแหน่งถึงที่ปลายทางของถ้ำได้ เนื่องจากเป็นเหวนในแนวตั้งมีความลึกประมาณ 50 เมตร โดยบริเวณดังกล่าวได้แสดงด้วยกรอบสีแดงในรูปที่ 112 (ข) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายของการวัดพิกัดตำแหน่งในเส้นทางถ้ำม้า

การเริ่มต้นการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งจะเริ่มต้นด้วยการใช้ระบบ GNSS วัดค่าพิกัดตำแหน่งภายนอกถ้ำที่มีสภาพแวดล้อมโล่งแจ้งและมีผลต่อการคำนวณพิกัดผิดพลาดน้อยที่สุด (อาจวัดหลายครั้ง ณ จุดเดิมเพื่อเลือกค่าที่ซ้ำกันมากที่สุด) เพื่อใช้สำหรับการอ้างอิงในจุดถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 107 และ

108 ซึ่งยังคงใช้โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นมาโดยคณะผู้วิจัยเช่นเดียวกับการวัดทดสอบในถ้ำปาฏิหาริย์ ซึ่งมีภาพหน้าจอตามรูปที่ 109 และค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการดำเนินการตามรูปที่ 109 – 112 ในครั้งนี้ ได้แสดงในรูปของกราฟไว้ในรูปที่ 113



รูปที่ 109 แสดงหน้าต่างโปรแกรมประยุกต์ของระบบฯ ขณะกำลังทำการทดสอบในถ้ำหลวงเชียงดาว



รูปที่ 110 แสดงการดำเนินการทดสอบระบบระบุตำแหน่งของถ้ำพระนอน





รูปที่ 111 แสดงการดำเนินการทดสอบระบบระบุตำแหน่งในส่วนถ้ำม้า



(ก) ปลายทางของถ้ำน้ำ

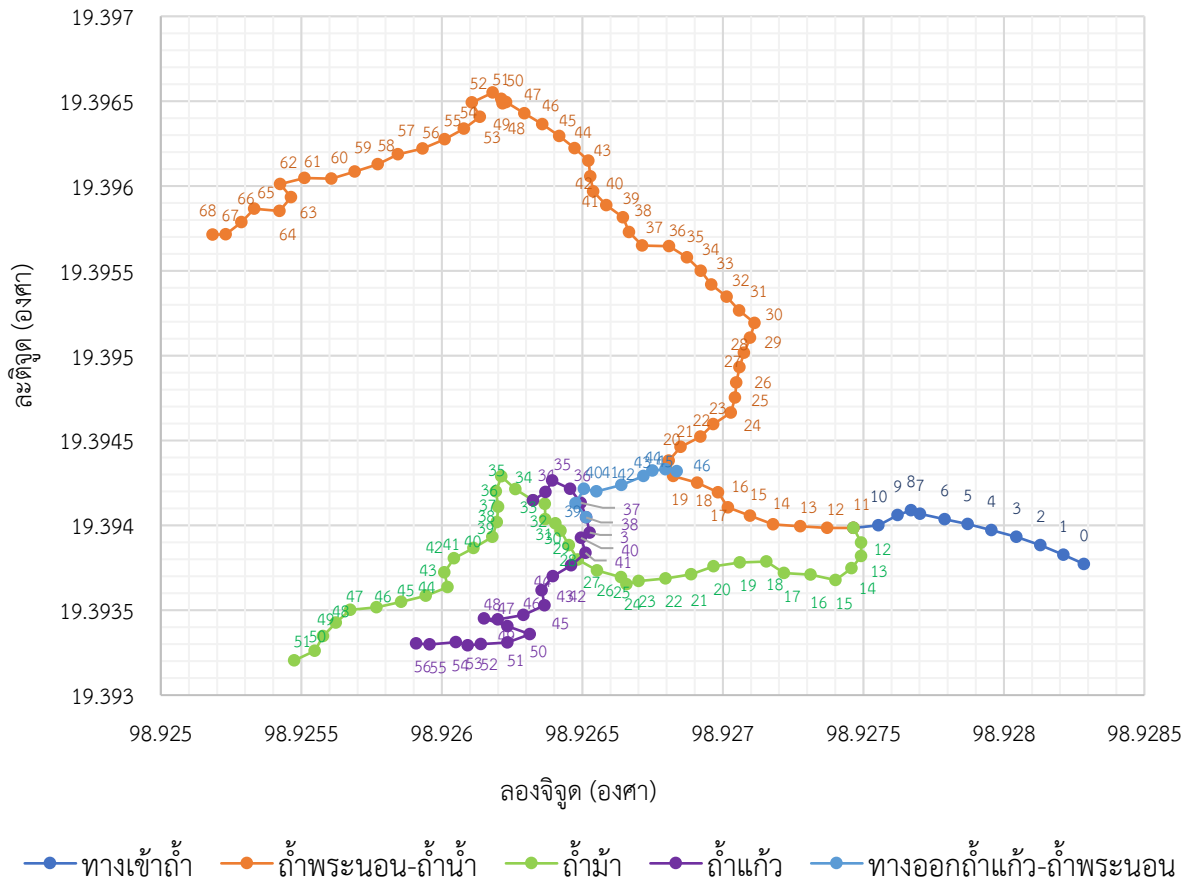
(ข) ปลายทางของถ้ำม้า

รูปที่ 112 ภาพแสดงจุดสิ้นสุดการทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำน้ำ ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว

## 7.2 ผลทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

จากค่าพิกัดตำแหน่งทั้งหมดที่คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดและคำนวณออกมาได้นำมาแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 113 โดยแนวเส้นทางสีน้ำเงินที่ตำแหน่ง 0 คือจุดอ้างอิงที่อยู่ด้านนอกถ้ำ (ประตูเข้าถ้ำอยู่ตำแหน่งที่ 3) จากนั้นทำการถ่ายระดับเข้าไปภายในถ้ำตามแนวเส้นทางเดินทั้งสามแนว ได้แก่

- 1) แนวเส้นทางสีส้มเป็นเส้นทางเดินไปยังปลายสุดที่ถ้ำน้ำโดยผ่านทางถ้ำพระนอน
- 2) แนวเส้นทางสีเขียวเป็นเส้นทางเดินไปยังถ้ำม้าแต่ไม่สามารถไปที่ปลายสุดได้ เนื่องจากมีเหวลึกประมาณ 50 เมตรขวางอยู่
- 3) แนวเส้นทางสีม่วงเป็นเส้นทางเดินไปยังปลายสุดของถ้ำแก้ว
- 4) แนวเส้นทางสีฟ้าเป็นเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างเส้นทางไปถ้ำพระนอน-ถ้ำน้ำ และเส้นทางไปถ้ำแก้ว



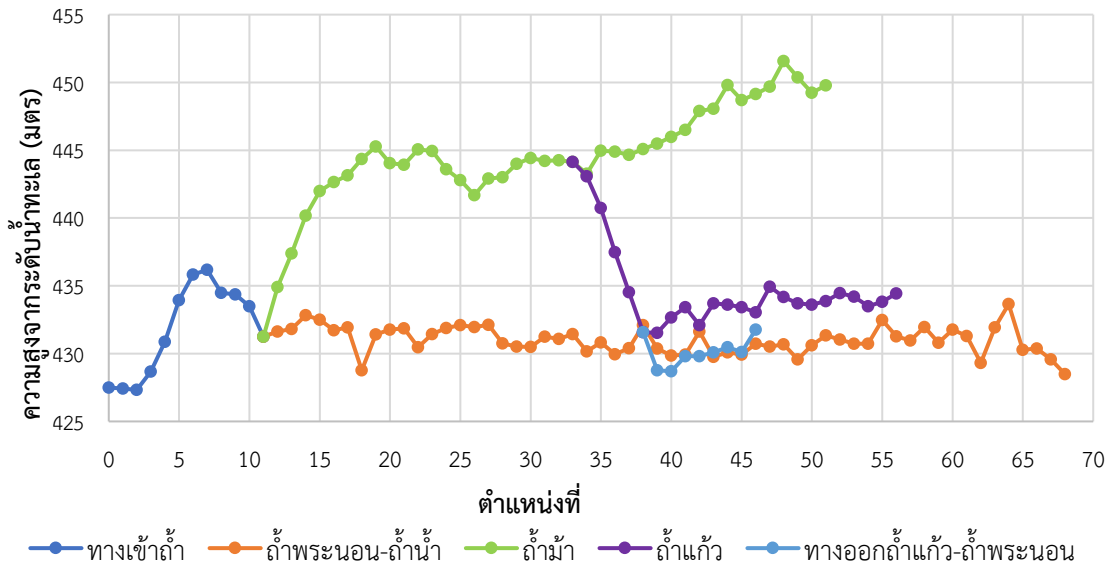
รูปที่ 113 กราฟแสดงค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบและคำนวณโดยระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ



รูปที่ 114 แผนที่แสดงผลการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่ง ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว

จากข้อมูลพิกัดตำแหน่งทั้งหมดตามเส้นทางเดินภายในถ้ำโพรงถ้ำหลวงเชียงดาวจากกราฟในรูปที่ 113 เมื่อป้อนค่าพิกัดตำแหน่งทุกค่าเข้าในแอปพลิเคชัน Google Earth จะทำให้เกิดการแสดงผลเป็นหมุดปักตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ บนแผนที่ดาวเทียมของแอปพลิเคชันนี้ ดังแสดงในรูปที่ 114 ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นแนวเส้นทางของโพรงถ้ำและพิกัดตำแหน่งในแต่ละจุดซึ่งมีพิกัดเดียวกับที่วัดได้บนพื้นโลกภายนอกถ้ำ อย่างไรก็ตาม

ตามการซ้อนทับพิกัดตำแหน่งบนแผนที่ของ Google Earth เกิดจากการนำเข้าข้อมูลพิกัดตำแหน่งเข้าไปและแสดงผลออกมาให้เห็นตามรูป ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบและคำนวณโดยใช้ระบบระบุตำแหน่งในถ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาและได้ทำการทดสอบความแม่นยำตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งเป็นกรณีของถ้าปาฏิหาริย์แล้ว สำหรับค่าระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของแต่ละพิกัดตำแหน่งในทุกเส้นทางของโครงถ้ำหลวงเชียงดาว ได้แสดงเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 115 แล้ว



รูปที่ 115 กราฟแสดงระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของแต่ละพิกัดตำแหน่งในแต่ละเส้นทางที่วัดได้จากระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ

จากกราฟแสดงระดับความสูงในแต่ละตำแหน่งตลอดทุกแนวเส้นทางการเดินในโครงถ้ำหลวงเชียงดาวในรูปที่ 115 จะเห็นว่าระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลในแต่ละโครงถ้ำจะมีความสูงต่ำแตกต่างกันมาก โดยโครงถ้ำม้า (แนวเส้นสีเขียว) จะมีระดับความสูงมากที่สุดและไม่สามารถเดินต่อไปอีกได้เนื่องจากมีเพดานสูงประมาณ 50 เมตร ขวางอยู่ที่ตำแหน่งที่ 51 ในขณะที่แนวเส้นสีม่วงจะเป็นเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างเส้นทางไปถ้ำม้ากับเส้นทางที่ไปยังถ้ำแก้ว ซึ่งเส้นทางจะเป็นบันไดปูนและหินเกือบจะเป็นแนวตั้งลงมาที่ชาวบ้านสร้างขึ้นมาตั้งแต่ในอดีต ดังนั้นประโยชน์จากข้อมูลระดับความสูงของพื้นถ้ำตลอดเส้นทางเดินจะสามารถนำไปคำนวณหาความหนาของชั้นหินที่อยู่เหนือบริเวณนั้นๆ เพียงแค่ทราบความสูงจากระดับน้ำทะเลพื้นภูเขาที่มีพิกัดตรงกัน อย่างไรก็ตามได้สรุปข้อมูลของพิกัดตำแหน่งและระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลในทุกจุดที่คำนวณได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาไว้ในตารางที่ 6 – 9

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ (เส้นทางจากทางเข้า -> ถ้ำพระนอน -> ถ้ำน้ำ)

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)
จุดอ้างอิง	19.39377244	98.92828562	427.50
1	19.39382727	98.92821176	427.43
2	19.39388358	98.92813048	427.32
3	19.39393216	98.92804511	428.67

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
4	19.39397143	98.92795622	430.87
5	19.39400805	98.92787182	433.93
6	19.39403545	98.92778981	435.82
7	19.39406777	98.92770193	436.18
8	19.39408933	98.92766999	434.49
9	19.39406162	98.92762166	434.36
10	19.39400012	98.92755367	433.49
11	19.39398504	98.92746484	431.25
12	19.39398507	98.92737126	431.64
13	19.39399458	98.9272753	431.82
14	19.39400573	98.9271789	432.84
15	19.39405641	98.92709754	432.50
16	19.39410648	98.92701848	431.72
17	19.39419521	98.92698281	431.94
18	19.39425154	98.92690901	428.76
19	19.39429167	98.92682383	431.41
20	19.39438109	98.92680814	431.77
21	19.39446225	98.92684973	431.86
22	19.39452349	98.92692083	430.48
23	19.39459715	98.92696556	431.44
24	19.39466403	98.92702895	431.90
25	19.39475233	98.92704344	432.10
26	19.3948426	98.92704779	431.95
27	19.39493134	98.92705917	432.11
28	19.39501806	98.92707571	430.76
29	19.39510491	98.9270968	430.52
30	19.3951933	98.92711349	430.49
31	19.395267	98.92705796	431.26
32	19.395347	98.92701437	431.08
33	19.39541929	98.9269591	431.45
34	19.39550065	98.92692105	430.15
35	19.39557849	98.92687225	430.83
36	19.39564602	98.92680935	429.96
37	19.39564887	98.92671342	430.50
38	19.39572757	98.92666698	432.09

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
39	19.39581483	98.92664443	430.37
40	19.39588746	98.92658599	429.85
41	19.39596713	98.92653878	429.92
42	19.3960569	98.92652895	431.63
43	19.39614808	98.92652185	429.76
44	19.39622197	98.92647328	430.10
45	19.39629444	98.92641868	429.93
46	19.39636335	98.92635824	430.72
47	19.3964286	98.9262944	430.53
48	19.39649451	98.92622902	430.68
49	19.39648628	98.92621693	429.57
50	19.39651271	98.92621204	430.61
51	19.39655016	98.92618101	431.33
52	19.39649283	98.92610753	431.05
53	19.39640802	98.92613588	430.72
54	19.39633743	98.92607825	430.74
55	19.39627564	98.92600993	432.47
56	19.3962213	98.92593209	431.28
57	19.39618744	98.92584454	430.97
58	19.39612817	98.92577277	431.95
59	19.39608404	98.9256904	430.79
60	19.3960437	98.92560684	431.77
61	19.39604779	98.92551143	431.29
62	19.39601106	98.92542518	429.30
63	19.39593364	98.9254631	431.93
64	19.39585202	98.92542201	433.65
65	19.39586538	98.9253326	430.29
66	19.39578698	98.92528746	430.38
67	19.39571473	98.92523141	429.58
68	19.39571272	98.92518449	428.48

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ (เส้นทางไปยังปลายถ้ำม้า)

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
จุดอ้างอิง จากทางเข้า	19.39398504	98.92746484	431.24
12	19.39389835	98.92749206	434.90
13	19.39381892	98.92749265	437.39
14	19.39374709	98.92745795	440.18
15	19.39367732	98.9274014	441.99
16	19.39371011	98.92731176	442.66
17	19.3937187	98.92721722	443.14
18	19.39378803	98.92715511	444.36
19	19.39378114	98.9270602	445.28
20	19.39375985	98.92696761	444.05
21	19.39371101	98.92688758	443.93
22	19.39368738	98.92679599	445.05
23	19.39367304	98.92670109	444.94
24	19.39365357	98.92665702	443.60
25	19.39369512	98.92663778	442.80
26	19.39373513	98.92655269	441.69
27	19.39379935	98.92648437	442.90
28	19.39388388	98.92645228	443.00
29	19.3939691	98.92642258	443.99
30	19.39401159	98.92640456	444.41
31	19.39403712	98.92636785	444.21
32	19.39412693	98.92636652	444.26
33	19.39414737	98.92632507	444.14
34	19.39421408	98.92626227	443.27
35	19.3942882	98.92621164	444.97
36	19.39419989	98.92619259	444.90
37	19.39411053	98.92620004	444.66
38	19.39401991	98.92619551	445.09
39	19.39393163	98.92617985	445.48
40	19.39386738	98.92611338	445.99
41	19.39380683	98.92604382	446.49
42	19.39372381	98.92600968	447.90
43	19.39363674	98.92602085	448.05

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
44	19.39358594	98.92594277	449.81
45	19.39354976	98.9258554	448.70
46	19.39351698	98.92576806	449.15
47	19.39350236	98.92567443	449.68
48	19.39342645	98.92562355	451.57
49	19.39334749	98.92557696	450.38
50	19.3932616	98.92554738	449.24
51	19.39320409	98.92547471	449.79

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ (เส้นทางไปยังปลายถ้ำแก้ว)

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
จุดอ้างอิง จากถ้ำม้า	19.39414737	98.92632507	444.14
34	19.39419581	98.92636893	443.08
35	19.39426416	98.92639289	440.74
36	19.39421499	98.92645682	437.47
37	19.39413314	98.92649455	434.53
38	19.39404683	98.92651366	431.58
39	19.39395791	98.92652641	431.53
40	19.3939265	98.92649526	432.66
41	19.39383837	98.92651106	433.43
42	19.39376369	98.92645984	432.11
43	19.39369961	98.92639559	433.71
44	19.39361786	98.926355	433.61
45	19.39352862	98.92636561	433.41
46	19.39347194	98.92629087	433.05
47	19.39344541	98.9261989	434.92
48	19.39345121	98.92615097	434.17
49	19.393406	98.92623332	433.71
50	19.39335891	98.92631384	433.62
51	19.3933101	98.92623325	433.88
52	19.39329981	98.92613891	434.46
53	19.39329299	98.9260922	434.21

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
54	19.39331103	98.92604964	433.50
55	19.39329936	98.92595692	433.81
56	19.39330447	98.92590859	434.45

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ (เส้นทางจากทางออกถ้ำแก้ว -> ถ้ำพระนอน)

ตำแหน่งที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)
จุดอ้างอิง จากถ้ำแก้ว	19.39404683	98.92651366	431.58
39	19.39412965	98.92647657	428.76
40	19.39421539	98.92650576	428.70
41	19.3942011	98.92655077	429.81
42	19.39423789	98.92663963	429.82
43	19.39429068	98.92671724	430.09
44	19.39432223	98.92674908	430.47
45	19.39433085	98.92679653	430.12
46	19.39431873	98.92683653	431.77

### 7.3 การทดสอบระบบระบุตำแหน่งภายนอกถ้ำเพื่อการเปรียบเทียบ

การพิสูจน์ความถูกต้องของพิกัดตำแหน่งที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว นั้นมีความพิเศษเนื่องจากบริเวณทางเข้าถ้ำมีปล่องที่เชื่อมไปยังด้านบนเหนือถ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 116 ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของผลการระบุตำแหน่งผู้วิจัยจึงเลือกพิกัดตำแหน่งที่ได้จากพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำบริเวณใกล้เคียงปล่องด้านบน เพื่อทำการระบุพิกัดตำแหน่งบริเวณปล่อง โดยทำการระบุพิกัดทั้งหมด 2 จุด บริเวณปล่องที่ 1 ดังรูปที่ 116(ก) และปล่องที่ 2 ดังรูปที่ 116(ข) จากนั้นจึงเดินเท้าเข้าไปยังตำแหน่งของปล่องที่ 1 และ 2 ที่อยู่บนภูเขาเหนือถ้ำเพื่อทำการวัดพิกัดตำแหน่งด้วยอุปกรณ์ GNSS อีกครั้งหนึ่ง และกำหนดพิกัดตำแหน่งที่ได้ลงในแผนที่ภูมิศาสตร์ดาวเทียมของ Google Earth แสดงผลที่ได้ดังรูปที่ 117





(ก) ช่องที่ 1



(ข) ช่องที่ 2

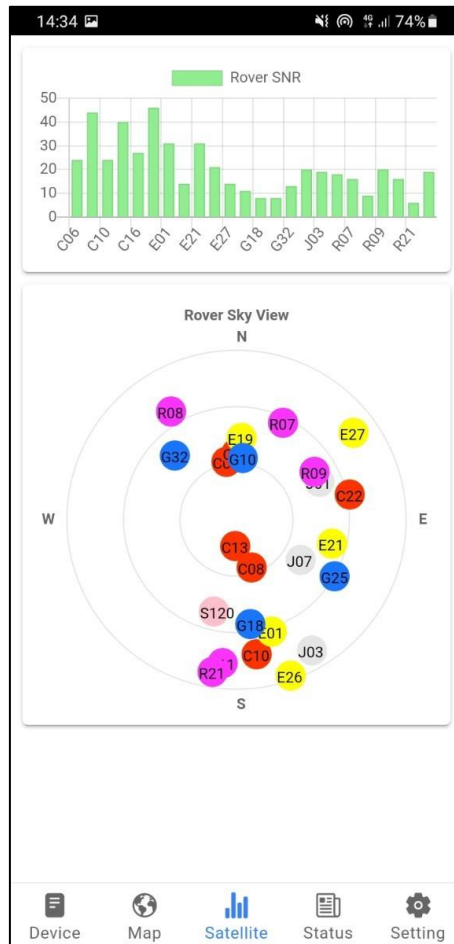
รูปที่ 116 ช่องที่เชื่อมต่อไปยังด้านบนของถ้ำหลวงเชียงดาวซึ่งอยู่ใกล้กับปากทางเข้าถ้ำ



รูปที่ 117 แผนที่แสดงตำแหน่งของช่องซึ่งอยู่ใกล้ปากทางเข้าถ้ำหลวงเชียงดาวซึ่งได้ทำการวัดพิกัดตำแหน่งเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากระบบระบุตำแหน่งในถ้ำ

จากแผนที่ดาวเทียมในรูปที่ 117 จะเห็นว่าพิกัดตำแหน่งจากการรับสัญญาณด้วย GNSS (จุดสีแดงเข้ม) ทั้งบริเวณช่องที่ 1 และ 2 นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดตำแหน่งที่ทดสอบและคำนวณได้โดยระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น (จุดสีดำ) เนื่องจากตำแหน่งของพื้นที่ใกล้ปากช่องทั้งสองซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS เพื่อรับสัญญาณจากดาวเทียมโดยตรงนั้น มีแนวหน้าผาสูงวางตัวตามแนวของช่องถ้ำทั้งสองในแนวทิศตะวันตกด้วย ซึ่งแนวหน้าผาสูงในทิศทางนี้มีส่วนทำให้การรับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS นั้นมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ เนื่องจากไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมที่อยู่ทิศทางหลังแนวหน้าผาได้ ซึ่งสามารถดูได้จากข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมจีพีเอสที่ได้จาก Two-Line Element Set หรือ TLEs โดยผ่านทางแอปพลิเคชันของเครื่องรับ GNSS ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากกองบัญชาการป้องกันอวกาศนาอเมอริกาเหนือ (North American Aerospace Defense Command : NORAD) ตามช่วงเวลาที่ต้องการได้ โปรแกรมนี้จะ

แสดงให้เห็นจำนวนดาวเทียมและระดับของสัญญาณที่รับได้จากดาวเทียมแต่ละดวง (Rover SNR) ได้ในขณะเวลานั้นๆ โดยเทียบกับตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่ติดตั้งอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของวงกลมในสุด ดังแสดงในรูปที่ 118 ซึ่งส่งผลให้การรับพิกัดจาก GNSS มีความคลาดเคลื่อนสูงตามที่ปรากฏ



รูปที่ 118 แสดงจำนวนดาวเทียม GNSS ขณะทำการพิสูจน์พิกัดตำแหน่งเหนือปล่องถ้ำ ถ้ำหลวงเชียงดาว

#### 7.4 สรุปผลการทดสอบการระบุพิกัดตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำหลวงเชียงดาว

การทดสอบระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบระบุตำแหน่งภายในถ้ำ ถ้ำหลวงเชียงดาว ดังแสดงในรูปที่ 107 - 112 ในถ้ำหลวงเชียงดาวนั้นมีเส้นทางของถ้ำที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยประกอบด้วยเส้นทางแรกจะเป็นเส้นทางตรงยาวไปถึงตำแหน่งของถ้ำพระนอน ซึ่งเส้นทางนี้มีการประดิษฐ์ฐานพระพุทธรูปให้นักท่องเที่ยวเข้าชมเป็นระยะ และต่อจากถ้ำพระนอนจะเป็นเส้นทางไปสู่ถ้ำน้ำซึ่งเป็นพื้นที่ห้ามเข้า จึงไม่เปิดให้นักท่องเที่ยวเข้าไป ณ จุดสิ้นสุดของการทดสอบของถ้ำน้ำในขณะนั้นพบมีน้ำขังเต็มโถงทางเดินทำให้ทำการทดสอบต่อไปไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 112 (ก) โดยรวมระยะทางตามทางเดินจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดการทดสอบที่ของถ้ำน้ำได้ระยะทาง 647 เมตร ถัดมาในเส้นทางที่สองจะเป็นทางเดินไปยังส่วนที่เรียกว่าถ้ำม้า ซึ่งเป็นถ้ำที่อยู่สูงกว่าระดับของถ้ำพระนอนและถ้ำน้ำมาก โดยเส้นทางภายในจะมีทั้งโถงขนาดใหญ่ไปจนถึงโพรงขนาดเล็กและในช่วงปลายจะมีเหวลึกประมาณ 50 เมตร ซึ่งเจ้าหน้าที่นำทางของกรมอุทยานแห่งชาติฯ ไม่แนะนำให้เดิน

ทางเข้าไปเนื่องจากอันตราย ดังแสดงในรูปที่ 112 (ข) ในระหว่างทางเดินไปยังถ้ำม้าจะมีเส้นทางแยกเพื่อลงไปยังส่วนที่เรียกว่าถ้ำแก้วและสามารถเดินออกไปยังถ้ำพระนอนได้ รวมระยะทางตามทางเดินตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดของถ้ำม้าเป็นระยะทาง 477 เมตร และเส้นทางที่สามจะเป็นทางเดินไปยังพื้นที่ของถ้ำแก้วซึ่งเป็นพื้นที่อันตรายห้ามนักท่องเที่ยวเข้าไปโดยเด็ดขาด ภายในโพรงถ้ำแก้วนี้เป็นเส้นทางที่ค่อนข้างอันตราย พบโพรงลึกลงสู่ด้านล่าง และขณะทำการทดสอบพบทางเอียงลาดของพื้นทรายลึกมากกว่า 10 เมตร ทำให้ไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ โดยรวมระยะทางจากทางแยกบันไดถ้ำม้ามายังจุดสิ้นสุดถ้ำแก้วมีระยะทาง 202 เมตร และส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนทางออกจากปากทางถ้ำแก้วกลับมายังถ้ำพระนอน เป็นระยะทาง 60 เมตร

สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างพิกัดตำแหน่งที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นมา กับพิกัดตำแหน่งที่ได้จากระบบ GNSS โดยวัดเทียบจากตำแหน่งปล่องที่อยู่เหนือโพรงถ้ำบางตำแหน่งนั้นไม่อาจทำได้เสมอไป เนื่องจากขึ้นอยู่กับภูมิประเทศของพื้นที่บริเวณปล่องนั้นด้วยว่าอยู่ในลักษณะโล่งแจ้ง (Clear view) หรือไม่ จากกรณีของถ้ำหลวงเชียงดาวนั้นพบว่าบริเวณปากปล่อง (ปล่องแจ้ง) มีแผ่นหินเป็นหน้าผาในทิศตะวันตก เครื่องรับสัญญาณ GNSS จึงไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมที่มีอยู่ของระบบ GNSS ในทิศตะวันตกได้เลย ทำให้ผลการวัดพิกัดตำแหน่งผิดพลาดจากความเป็นจริงมากจึงไม่สามารถนำไปอ้างอิงหรือเปรียบเทียบกับตำแหน่งในถ้ำที่อยู่บริเวณใต้ปล่องในโพรงถ้ำได้ อย่างไรก็ตามสามารถใช้วิธีการเดียวกันกับที่ดำเนินการในพื้นที่ของถ้ำปาฏิหาริย์ได้เช่นเดียวกัน

## 8 การติดตั้งป้ายแสดงพิกัดตำแหน่งภายในโพรงถ้ำทั้งสองแห่ง

หลังจากทำการระบุพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำทั้งสองแห่งแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการติดตั้งแผ่นป้ายแสดงพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำ โดยคัดเลือกติดตั้งเฉพาะจุดที่เป็นโถงขนาดใหญ่ให้กระจายทั้งโพรงถ้ำ จากรูปที่ 119 จะเป็นภาพแสดงการออกแบบแผ่นป้ายบอกพิกัดสำหรับถ้ำปาฏิหาริย์ และรูปที่ 120 จะเป็นภาพแสดงการออกแบบแผ่นป้ายบอกพิกัดสำหรับถ้ำเชียงดาว ซึ่งภายในแผ่นป้ายจะแสดงทั้งค่าพิกัดละติจูด (Latitude) ลองจิจูด (Longitude) และความหนาของเพดานถ้ำ (Ceiling thickness) ของแต่ละจุดที่ติดตั้งแผ่นป้าย โดยวัตถุประสงค์ในการทำแผ่นป้ายแสดงพิกัดตำแหน่งภายในถ้ำนั้นจะทำมาจากแผ่นทองเหลือง ซึ่งมีความแข็งแรง สามารถมองเห็นได้ง่าย รวมไปถึงเมื่อโดนความชื้นภายในถ้ำแล้วจะไม่มีสนิมเกิดขึ้นอีกด้วย ภายในถ้ำปาฏิหาริย์จะติดตั้งทั้งหมด 7 จุด และภายในถ้ำเชียงดาวจะทำการติดตั้งทั้งหมด 13 จุด ดังแสดงตัวอย่างการติดตั้งดังรูปที่ 121 - 122



รูปที่ 119 แสดงการออกแบบแผ่นป้ายบอกพิกัดสำหรับถ้ำปาฏิหาริย์



รูปที่ 120 แสดงการออกแบบแผ่นป้ายบอกพิกัดสำหรับถ้ำเชียงดาว



รูปที่ 121 แสดงภาพขณะติดตั้งแผ่นป้ายบอกพิกัด ณ ถ้ำเชียงดาว



รูปที่ 122 แสดงแผ่นป้ายบอกพิกัดหลังติดตั้ง ณ ถ้ำเชียงดาว

ตารางที่ 10 ตำแหน่งติดตั้งแผ่นแสดงพิกัดภายในโรงถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่

ที่	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความหนาเพดานถ้ำ (เมตร)
1	15.60129859	105.5731677	20.8
2	15.60147536	105.5728436	23.9
3	15.60151522	105.5725939	25.4
4	15.60161883	105.5723230	26.6
5	15.60182504	105.5715980	26.4
6	15.60162519	105.5711007	28.3
7	15.60154472	105.5708654	31.1

ตารางที่ 11 ตำแหน่งติดตั้งแผ่นแสดงพิกัดภายในโรงถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่

ที่	ตำแหน่ง	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความหนาเพดานถ้ำ (เมตร)
1	ถ้ำพระนอน (11)	19.3939850415	98.9274648373	23.4
2	ถ้ำพระนอน (17)	19.3941952102	98.9269828088	46.0
3	ถ้ำพระนอน (30)	19.3951932983	98.9271134934	26.8
4	ถ้ำพระนอน (40)	19.3958874557	98.9265859879	58.1
5	ถ้ำน้ำ (46)	19.3963633501	98.9263582351	85.0
6	ถ้ำน้ำ (51)	19.3965501638	98.9261810119	92.9
7	ถ้ำน้ำ (67)	19.3957147306	98.9252314074	112.9
8	ถ้ำม้า (17)	19.3937186987	98.9272172245	27.2
9	ถ้ำม้า (20)	19.3937598500	98.9269676131	30.3
10	ถ้ำม้า (34)	19.3942140840	98.9262622721	70.2
11	ถ้ำม้า (40)	19.3938673800	98.9261133799	83.5
12	ถ้ำม้า (50)	19.3932616021	98.9255473764	134.3
13	ถ้ำแก้ว - ถ้ำพระนอน (43)	19.3942906849	98.9267172359	58.9

## 9. แนวทางพัฒนาระบบระบุตำแหน่งในอนาคต

ปัจจุบันเครื่องมือระบุตำแหน่งที่คณะผู้วิจัยได้ออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบขึ้นมา นอกจากใช้งานด้วยตัวเองโดยอิสระแล้ว ยังสามารถทำงานร่วมกับเครื่องมือสร้างภาพจำลองเสมือนจริงสามมิติในถ้ำซึ่งเป็นผลผลิตของโครงการวิจัยนี้ได้ด้วย คุณสมบัติการทำงานของเครื่องมือระบุตำแหน่งนี้หากพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนคอมพิวเตอร์และจอแสดงผลให้มีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับขนาดของเครื่องมือระบุตำแหน่งที่ได้พัฒนาขึ้นมา จะสามารถนำไปใช้แทนเครื่องมือสำรวจสำหรับงานโยธาขนาดระยะทางปานกลางไม่เกิน 100 เมตรได้โดยพัฒนาฟังก์ชันใช้งานเพิ่มเติมให้ตรงความต้องการของการใช้งานเท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของเครื่องต้นแบบนี้พร้อมสนับสนุนการใช้งานสำรวจอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามในส่วนของการพัฒนา

ใช้งานในถ้ำตามวัตถุประสงค์ของโครงการนั้น ในอนาคตหากสามารถเชื่อมต่อข้อมูลพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการปฏิบัติงานในถ้ำในช่วงเวลานั้นๆ ให้สามารถส่งผ่านระบบสื่อสารทั้งระบบแอนะล็อกและดิจิทัลที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมาในโครงการนี้ จะเกิดประโยชน์ในด้านของความปลอดภัยและผู้ปฏิบัติงานภายนอกถ้ำสามารถทราบพิกัดของผู้ปฏิบัติงานในถ้ำขณะนั้นได้ตามเวลาจริง และยังสามารถรู้เส้นทางของโพรงถ้ำในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานในถ้ำกำลังปฏิบัติงานอยู่ในถ้ำได้ทันที ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานด้านการสำรวจและการกู้ภัยอุบัติเหตุในถ้ำได้อย่างสมบูรณ์แบบที่สูงสุดและยังไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ครอบคลุมภารกิจประเภทนี้จำหน่ายในท้องตลาด

## 10. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

- [1] Kaplan, Elliott, and Christopher Hegarty, "*Understanding GPS: principles and applications*," Artech house, 2006.
- [2] Puricer, Pavel, and Pavel Kovar, "Technical limitations of GNSS receivers in indoor positioning." 2007 17th International Conference Radioelektronika. IEEE, 2007.
- [3] Hameed, Anum, and Hafiza Anisa Ahmed, "Survey on indoor positioning applications based on different technologies." 2018 12th International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics (MACS). IEEE, 2018.
- [4] Zhen-Peng, An, Sui Hu-Lin, and Wang Jun, "Classify and prospect of indoor positioning and indoor navigation," 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015.
- [5] Geyer Michael, "Earth-Referenced Aircraft Navigation and Surveillance Analysis," No. DOT-VNTSC-FAA-16-12. John A. Volpe National Transportation Systems Center (US), 2016.
- [6] M. Geyer, "rosap," 6 2016. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12301>. [Accessed 3-8-2019].
- [7] Drumea Andrei, et al., "Communication module for laser rangefinder with integrated positioning system," 2009 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages (SIITME), 2009.
- [8] Sineglazov Victor and Vitaliy Ischenko, "Intelligent system for visual navigation," 2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2016.

ภาคผนวก ก : โปรแกรมระบุตำแหน่งในถ้ำ

รหัสคำสั่งของโปรแกรม

```

from tkinter import *
import tkinter as tk
import time
from matplotlib.backends.backend_tkagg import (FigureCanvasTkAgg)
from matplotlib.figure import Figure
import numpy as np

import serial.tools.list_ports # For listing available serial ports
import serial
import xlswriter
import math
import ft232
import time
import datetime
import logging

num = 1
las = 0
class Application(Frame):

    def __init__(self, master):
        global num
        Frame.__init__(self, master)
        self.grid()
        self.create_widgets()
        self.latitude_target = 0
        self.longitude_target = 0
        self.altitude = 0
        self.latitude_start = 0
        self.distance = 0
        self.longitude_start = 0
        self.azimuth = 0
        self.elevation = 0
        self.roll = 0
        self.No = 0

```

```

self.row = 0
self.col = 0
self.i = 0
self.Datetime = datetime.datetime.now()

## XLWRITER ##
a = "C:/Users/NBTC Cave Radio/Desktop/Target Result/Target Result
"+self.Datetime.strftime('%H.%M %d_%m_%y')+ ".CSV"
self.workbook = xlswriter.Workbook(a)
self.worksheet = self.workbook.add_worksheet()
self.my_format = self.workbook.add_format()
self.my_format.set_align('center')
self.worksheet.set_column('A:XFD',None,self.my_format)

self.worksheet.set_column(0,0,10)
self.worksheet.set_column(1,1,25)
self.worksheet.set_column(2,2,25)
self.worksheet.set_column(3,3,25)
self.worksheet.set_column(4,4,10)
self.worksheet.set_column(5,5,10)
self.worksheet.set_column(6,6,10)
self.worksheet.set_column(7,7,10)
self.worksheet.write(0, 0, "Target (No.)")
self.worksheet.write(0, 1, "Time")
self.worksheet.write(0, 2, "Latitude (degree)")
self.worksheet.write(0, 3, "Longitude (degree)")
self.worksheet.write(0, 4, "Altitude (m)")
self.worksheet.write(0, 5, "3D Distance (m)")
self.worksheet.write(0, 6, "Elevation (degree)")
self.worksheet.write(0, 7, "Azimuth (degree)")

def create_widgets(self):
    global num
    self.ModerneSansTitle = ['Moderne Sans','12','bold']
    self.ModerneSansBody = ['Moderne Sans','10']
    self.ModerneSansBody2 = ['Moderne Sans','10','bold']
    self.background = '#535354'
    self.background2 = '#8F929F'

```



```

self.foreg = '#FFFFFF'
self.labeRef = '#D1D6ED'
self.labeGyr = '#BEC5E7'
self.labeTar = '#AFB9E8'

#####
#### Start GPS Coordinate ####
#####

#self.text1 = Label(self, text="Origin Location",bg='#C0C0C0',font=('Angsana
New',20))
self.text1 = Label(self, text="REFERENCE
POSITION",bg=self.labeRef,font=self.ModerneSansTitle, height=2, width=65)

self.text1.grid(row=0,column=0,columnspan=4,sticky=N+S+E+W,pady=10,padx=10)

self.label1 = Label(self, text="LATITUDE
(degree)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label1.grid(row=1,sticky=W,padx=10,pady=10)
self.latitude_start = DoubleVar()
self.entry_latitudeStart = Entry(self,textvariable =
self.latitude_start,font=self.ModerneSansBody,background=self.background2,foregrou
nd =self.foreg)
self.entry_latitudeStart.grid(row=1, column=1,sticky=W,pady=10)

self.label2 = Label(self, text="LONGITUDE
(degree)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label2.grid(row=1, column=2,sticky=W,padx=10,pady=10)
self.longitude_start = DoubleVar()
self.entry_longitudeStart = Entry(self,textvariable
=self.longitude_start,font=self.ModerneSansBody,background=self.background2,foregr
ound =self.foreg)
self.entry_longitudeStart.grid(row=1, column=3,sticky=W,pady=10)

#####
##### Gyro Data #####
#####

```

```

self.text2 = Label(self, text="GYROSCOPE
DATA",bg=self.labeGyr,font=self.ModerneSansTitle, height=2, width=65)

self.text2.grid(row=2,column=0,columnspan=4,sticky=N+S+E+W,pady=10,padx=10)

self.label3 = Label(self, text="DATE & TIME
",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label3.grid(row=3,sticky=W,padx=10,pady=10)
self.time = StringVar()
self.entry_date = Entry(self,
textvariable=self.time,font=self.ModerneSansBody,background=self.background2,fore
ground =self.foreg)
self.entry_date.grid(row=3, column=1,columnspan=1,sticky=W)

self.label4 = Label(self, text="COMPASS
(degree)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label4.grid(row=4,sticky=W,padx=10)
self.azimuth = DoubleVar()
self.entry_azimuth = Entry(self,textvariable =
self.azimuth,font=self.ModerneSansBody,background=self.background2,foreground
=self.foreg)
self.entry_azimuth.grid(row=4, column=1,sticky=W)

self.label5 = Label(self, text="DISTANCE
(meter)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label5.grid(row=4,column=2,sticky=W,padx=10)
self.distance = DoubleVar()
self.entry_distance = Entry(self,textvariable =
self.distance,font=self.ModerneSansBody,background=self.background2,foreground
=self.foreg)
self.entry_distance.grid(row=4, column=3,sticky=W)

self.label6 = Label(self, text="ELEVATION
(degree)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label6.grid(row=5,column=0,sticky=W,padx=10,pady=10)
self.elevation = DoubleVar()

```

```

        self.entry_elevation = Entry(self, textvariable =
self.elevation, font=self.ModerneSansBody, background=self.background2, foreground
=self.foreg)
        self.entry_elevation.grid(row=5, column=1, sticky=W, pady=10)

        self.label7 = Label(self, text="ALTITUDE
(meter)", bg=self.background, font=self.ModerneSansBody, foreground=self.foreg)
        self.label7.grid(row=5, column=2, sticky=W, padx=10, pady=10)
        self.altitude = DoubleVar()
        self.entry_altitude = Entry(self, textvariable =
self.altitude, font=self.ModerneSansBody, background=self.background2, foreground
=self.foreg)
        self.entry_altitude.grid(row=5, column=3, sticky=W, pady=10)

        self.label8 = Label(self, text="ROLL
(degree)", bg=self.background, font=self.ModerneSansBody, foreground=self.foreg)
        self.label8.grid(row=3, column=2, sticky=W, padx=10)
        self.roll = DoubleVar()
        self.entry_roll = Entry(self, textvariable =
self.roll, font=self.ModerneSansBody, background=self.background2, foreground
=self.foreg)
        self.entry_roll.grid(row=3, column=3, sticky=W)

#####
##### Button #####
#####
        img_button0 = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/laser.png")
        img_button0 = img_button0.subsample(11, 11)
        self.switch_button0 = Button(self, text="
DISTANCE", fg=self.foreg, bg=self.background, font=self.ModerneSansBody2,
image=img_button0, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT, command =
self.Laser)
        self.switch_button0.grid(row=7,
column=0, columnspan=1, sticky=W+E+N+S, padx=5, pady=10)
        self.switch_button0.image = img_button0

```

```

img_button1 = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/cal.png")
img_button1 = img_button1.subsample(3, 3)
self.switch_button1 = Button(self, text="
CALCULATE",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,
image=img_button1, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT, command =
self.Cal)
self.switch_button1.grid(row=7,
column=1,columnspan=1,sticky=W+E+N+S,padx=5,pady=10)
self.switch_button1.image = img_button1

img_switch = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/switch_off.png")
img_switch = img_switch.subsample(3, 3)
self.switch_button2 = Button(self, text="
DISABLED",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,
image=img_switch, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT,
command=self.ButtonStateON,state=tk.NORMAL)
self.switch_button2.grid(column=2,columnspan=2,
row=7,sticky=W+E,padx=5,pady=10)
self.switch_button2.image = img_switch

img_del = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/delete.png")
img_del = img_del.subsample(3, 3)
self.button_delete = Button(self, text="
DELETE",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,image=img_del
, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT, command = self.delete,
state=tk.NORMAL)
self.button_delete.grid(column=0,row=16,sticky=N+W+E+S,padx=20,pady=5)
self.button_delete.image = img_del

img_select = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/select.png")
img_select = img_select.subsample(5, 5)
self.button_select = Button(self, text="
CONTINUE",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,image=img_
select, border=0, compound=LEFT, command = self.contnue_cal, state=tk.NORMAL)

```

```

self.button_select.grid(column=1,row=16,sticky=N+W+E+S,padx=20,pady=5)
self.button_select.image = img_select

img_save = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/save.png")
img_save = img_save.subsample(5, 5)
self.button_save = Button(self, text="SAVE TO
CSV",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,image=img_save,
border=0, compound=LEFT, command = self.save, state=tk.NORMAL)
self.button_save.grid(column=2,row=16,sticky=N+W+E+S,padx=10,pady=5)
self.button_save.image = img_save

#####
##### Result #####
#####

self.text3 = Label(self, text="TARGET
POSITION",bg=self.labeTar,font=self.ModerneSansTitle, height=2, width=65)

self.text3.grid(row=9,column=0,columnspan=4,sticky=N+S+E+W,pady=10,padx=10)

self.label10 = Label(self, text="LATITUDE
(degree)",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label10.grid(row=10,column=0,sticky=W,padx=10)
self.latT = DoubleVar()
self.label11 = Label(self,textvariable =
self.latT,bg=self.background2,fg=self.foreg,font=self.ModerneSansBody,borderwidth =
2,relief="ridge", compound=LEFT)
self.label11.grid(row=10, column=1,sticky=E+W)
self.label12 = Label(self, text="LONGITUDE (degree)
",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,foreground=self.foreg)
self.label12.grid(row=10,column=2,sticky=W,padx=10)
self.lonT = DoubleVar()
self.label13 = Label(self,textvariable =
self.lonT,bg=self.background2,fg=self.foreg,font=self.ModerneSansBody,borderwidth =
2,relief="ridge", compound=LEFT)
self.label13.grid(row=10, column=3,sticky=E+W)

```

```

self.listbox_result =
Listbox(self,font=self.ModerneSansBody,bg=self.background2,fg=self.foreg,width=60,height = 16)

self.listbox_result.grid(column=0,row=11,rowspan=5,columns=5,sticky=N+W+S+E,
padx=35,pady=10)
self.scrollbar = Scrollbar(self.listbox_result, orient=VERTICAL)
self.listbox_result.config(yscrollcommand=self.scrollbar.set)
self.scrollbar.config(command=self.listbox_result.yview)
# self.scrollbar.pack(side = "right",fill = "y")

# self.listport = StringVar()
self.label14 = Label(self,text= "GYRO : -",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,borderwidth = 0,relief="ridge",
compound=LEFT,foreground=self.foreg)
self.label14.grid(row=18,
column=0,columns=2,sticky=W+S,padx=10,pady=10)
self.label15 = Label(self,text= "LASER : -",bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,borderwidth = 0,relief="ridge",
compound=LEFT,foreground=self.foreg)
self.label15.grid(row=18,
column=2,columns=2,sticky=W+S,padx=10,pady=10)

#####
##### GRAPH #####
#####

self.fig = Figure(figsize=(5, 1), dpi=140,facecolor=self.background)

self.canvas = FigureCanvasTkAgg(self.fig, root) # A tk.DrawingArea.
self.canvas.draw()

self.ax = self.fig.add_subplot(111, projection="3d")
# self.ax.grid(False)
# self.ax.autoscale(enable=False, axis='both', tight=None)
self.ax.set_xlabel('Latitude (degree)',fontsize='6')
self.ax.set_ylabel('Longitude (degree)',fontsize='6')
self.ax.set_zlabel('Altitude (m)',fontsize = '6')

```

```

# self.ax.tick_params(axis='x', labelsz=4)
# self.ax.tick_params(axis='y', labelsz=4)
# self.ax.tick_params(axis='z', labelsz=4)
self.ax.set_xticklabels([])
self.ax.set_yticklabels([])
self.ax.set_zticklabels([])
self.fig.set(facecolor=self.background)
self.ax.set(facecolor=self.background)

self.canvas.get_tk_widget().grid(column=4,row=0,rowspan=4,columns=5,sticky=N+W+S,padx=10,pady=10)

def ButtonStateON(self):
    self.serial_number = 'P03201904642A'

    try:
        #sp = ft232.Ft232(serial_number, baudrate=115200)
        self.sp =
ft232.Ft232(serial_number=self.serial_number,baudrate=625000,stopbits=2,parity='N')
        self.label14 = Label(self,text = 'GYRO :
CONNECTED',bg=self.background,fg=self.foreg,font=self.ModerneSansBody,borderwidth
h = 0,relief="ridge", compound=LEFT)
        self.label14.grid(row=17,
column=0,columns=3,sticky=W+S,padx=10,pady=10)
    except ft232.Ft232Exception:
        pass

    #You may use sp as you would a Serial object
    self.sp.write(b"$PAAG,ID\r\n")
    self.nmea = self.sp.readline()
    #print("ID ==> " + str(self.nmea))
    self.sp.write(b"$PAAG,MODE,START,RATE,35\r\n")
    #root.update()
    if (self.switch_button2['text'] == " DISABLED"):
        img_switch = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/switch_on.png")
        img_switch = img_switch.subsample(3, 3)

```

```

        self.switch_button2 = Button(self, text="
GYROSCOPE",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,
image=img_switch, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT,
command=self.ButtonStateON,state=tk.NORMAL)
        # self.switch_button2 = Button(self, text="
MANUAL",bg='#FFFFFF',font=self.ModerneSansBody,border=0,compound=LEFT,
command=self.ButtonStateON,state=tk.NORMAL)
        self.switch_button2.grid(column=2,columnspan=2,
row=7,sticky=W+E,padx=10,pady=10)
        self.switch_button2.image = img_switch
        # self.entry_latitudeStart.delete(0,END)
        # self.entry_longitudeStart.delete(0,END)
        m1=0
        m2=0

        compass1=[]
        tilt1=[]
        roll1=[]
        try:
            while self.switch_button2['text'] == " GYROSCOPE":

                # time.sleep(0.05)
                self.resp = self.sp.readline()
                #print("Reading ==> " + str(resp))
                self.nmea = self.sp.readline().strip().decode().split(',')
                #print(self.nmea)
                self.Time = datetime.datetime.now()
                self.entry_date.delete(0,END)
                self.entry_date.insert(0,self.Time.strftime("%x"+" %X"))
                #Coordinates reader
                if (str(self.nmea[0]) == "$GPGGA") and
(len(str(self.nmea[2]))>0) and (len(str(self.nmea[4]))>0):

                    # Altitude = str(self.nmea[9])
                    # Altitude_unit = str(self.nmea[10])
                    satellite = str(self.nmea[7])
                    root.update()
                    # self.entry_altitude.insert(0,Altitude)

```



```

#Gyroscope reader
elif str(self.nmea[0]) == "$PAAG" and str(self.nmea[1]) ==
"DATA":

#Compass reader
if str(self.nmea[2]) == "C":
#print("Compass raw value: ", self.nmea)
try:
heading_rad = math.atan2(float(self.nmea[5]),
float(self.nmea[4]))
heading_deg = (heading_rad +
math.pi)*180/math.pi
#logging.info("processing compass values = %s",
str(heading_deg))

compass = str("%.2f" % heading_deg)
if(m1<10):
compass1.append(compass)
# print(x1)

# print(m)
m1=m1+1
elif(m1==10):
k=0
w=0
e=0
for k in range(len(compass1)):
w=w+float(compass1[k])

# print(w)

e=float(w)/10
# print("E = "+str(e))
compass1.clear()
m1=0
compass = str("%.2f" % e)
self.entry_azimuth.delete(0,END)
self.entry_azimuth.insert(0,compass)
except IndexError:

```

```

        logging.warning("Compass reading: IndexError")
        heading_deg = 0.0
        compass = str("%.2f" % heading_deg)
        #print("Compass : ",compass)
        # self.entry_azimuth.delete(0,END)
        # self.entry_azimuth.insert(0,compass)

#Barometer reader
elif str(self.nmea[2]) == "B":
    pressure = str(self.nmea[4])
    #print("Pressure : ",pressure)

#Accelerometer reader
elif str(self.nmea[2]) == "T":
    try:

        # print(nmea)
        x = float(self.nmea[4])/8192
        y = float(self.nmea[5])/8192
        z = float(self.nmea[6])/8192

        tilt      =      math.degrees(-math.atan2(y,
math.sqrt((x*x)+(z*z))))

        # print(tilt)
        if z < 0:
            roll      =      math.atan2(-x,
math.sqrt((y*y)+(z*z)))*180/math.pi
        else:
            roll      =      math.atan2(-x,
math.sqrt((y*y)+(z*z)))*180/math.pi

        tilt = str("%.2f" % tilt)
        roll = str("%.2f" % roll)

    if(m2<10):
        tilt1.append(tilt)
        roll1.append(roll)
        # print(x1)

```

```

        # print(m)
        m2=m2+1
    elif(m2==10):
        i=0
        j=0
        w1=0
        w2=0
        e1=0
        e2=0
        for i in range(len(tilt1)):
            w1=w1+float(tilt1[i])
        for j in range(len(roll1)):
            w2=w2+float(roll1[j])

        # print(w)

        e1=float(w1)/10
        e2=float(w2)/10
        # print("E = "+str(e))
        tilt1.clear()
        roll1.clear()
        m2=0

        tilt = str("%.2f" % e1)
        roll = str("%.2f" % e2)
        self.entry_elevation.delete(0,END)
        self.entry_elevation.insert(0,tilt)
        self.entry_roll.delete(0,END)
        self.entry_roll.insert(0,roll)
    except IndexError:
        logging.warning("Accelerometer          reading:

IndexError")

        tilt = 0.0
        roll = 0.0
        tilt = str("%.2f" % tilt)
        roll = str("%.2f" % roll)

```

```

        else:
            pass
        root.update()

    else:
        pass

    continue

except KeyboardInterrupt:
    pass

    else:
        img_switch = PhotoImage(file="C:/Users/NBTC Cave
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/switch_off.png")
        img_switch = img_switch.subsample(3, 3)
        self.switch_button2 = Button(self, text="
DISABLED",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody2,
image=img_switch, border=0, height=45, width=100, compound=LEFT,
command=self.ButtonStateON,state=tk.NORMAL)
        # self.switch_button2 = Button(self, text="
DISABLED",bg='#FFFFFF',font=self.ModerneSansBody,border=0, compound=LEFT,
command=self.ButtonStateON,state=tk.NORMAL)
        self.switch_button2.grid(column=2,columnspan=2,
row=7,sticky=W+E,padx=10,pady=10)
        self.switch_button2.image = img_switch

    root.update()

def Laser(self):
    global las
    try:

        self.ser = serial.Serial('COM3',19200)
        self.label15 = Label(self,text="LASER : LASER
CONNECTED",fg=self.foreg,bg=self.background,font=self.ModerneSansBody,borderwidt
h = 0,relief="ridge", compound=LEFT)

```

```

        self.label15.grid(row=18,
column=2,columnspan=2,sticky=W+S,padx=10,pady=10)
        root.update()

    except:
        pass

    if (las==0):
        self.ser.write(b'O')
        las = las+1

    else:
        self.ser.write(b'D')
        self.entry_distance.delete(0,END)
        las = 0

self.dis = self.ser.readline().strip().decode().split(',')
self.entry_distance.insert(0,self.dis[0][2:8])
root.update()

def Cal(self):

    self.altitude = float(self.entry_altitude.get())
    self.latitude_start = float(self.entry_latitudeStart.get())
    self.distance = float(self.entry_distance.get())
    self.longitude_start = float(self.entry_longitudeStart.get())
    self.azimuth = float(self.entry_azimuth.get())
    self.elevation = float(self.entry_elevation.get())

    self.latitude_start = math.radians(self.latitude_start)

    self.longitude_start = math.radians(self.longitude_start)

    self.AzRad = math.radians(self.azimuth)

```

```

#####
##### Elevation Distance Cal #####
#####

self.RealDistance =
abs(math.cos(math.radians(float(self.elevation)))*float(self.distance))

#ความสูงใหม่
self.New_altitude =
self.altitude+((math.sin(math.radians(float(self.elevation))))*self.distance )

#คำนวณรัศมีโลก
axisa = (6378.137)
axisb = (6356.752314245)
axisa2 = (axisa**2)
axisb2 = (axisb**2)
self.earth_radius = (math.sqrt (
(((axisa2*math.cos(math.radians(float(self.latitude_start))))**2)+((axisb2*math.sin(math.r
adians(float(self.latitude_start))))**2))/(((axisa*math.cos(math.radians(float(self.latitude
_start))))**2)+(axisb*math.sin(math.radians(float(self.latitude_start))))**2) ))
self.earth_radius = float(self.earth_radius)+(float(self.altitude)/1000)
self.zeta = (self.RealDistance/1000)/self.earth_radius

#คำนวณละติจูดเป้าหมาย
self.latitude_target = math.asin(
(math.sin(self.latitude_start)*math.cos(self.zeta)) +
(math.cos(self.latitude_start)*math.sin(self.zeta)*math.cos(self.AzRad)))
self.latitude_target = (self.latitude_target*180)/math.pi

self.LatT = DoubleVar()
self.LatT.set('%10f'%self.latitude_target)
self.label11 = Label(self,textvariable =
self.LatT,bg=self.background2,fg=self.foreg,font=self.ModerneSansBody,borderwidth =
2,relief="ridge")
self.label11.grid(row=10, column=1,sticky=E+W)

```

```

#คำนวณลองติจูดเป้าหมาย
self.longitude_para2 = ( (math.sin(self.AzRad)*math.sin(self.zeta)) /
((math.cos(self.latitude_start)*math.cos(self.zeta))-
(math.sin(self.latitude_start)*math.sin(self.zeta)*math.cos(self.AzRad)) ) )
self.longitude_target = self.longitude_start + math.atan(self.longitude_para2)
self.longitude_target = (self.longitude_target*180)/math.pi

self.lonT = DoubleVar()
self.lonT.set('%.10f'%self.longitude_target)
self.label13 = Label(self,textvariable =
self.lonT,bg=self.background2,fg=self.foreg,font=self.ModerneSansBody,borderwidth =
2,relief="ridge")
self.label13.grid(row=10, column=3,sticky=E+W)

if(self.latitude_target<0):
    self.latitude_orientation = "S"
else:
    self.latitude_orientation = "N"

if(self.longitude_target<0):
    self.longitude_orientation = "W"
else:
    self.longitude_orientation = "E"

if (self.No==0):
    self.altitude = float(self.entry_altitude.get())
    self.latitude_start = float(self.entry_latitudeStart.get())
    self.longitude_start = float(self.entry_longitudeStart.get())
    # self.ax.set_xlim3d(self.latitude_target-0.00001,
self.latitude_target+0.00001)
    # self.ax.set_ylim3d(self.longitude_target-0.00001,
self.longitude_target+0.00001)

    self.ax.plot(self.latitude_start, self.longitude_start, self.altitude, c='r',
marker='o',linestyle='-')
    # label =
("%.5f"%self.latitude_target+chr(176)+self.latitude_orientation+", "+%.5f"%self.longitud
e_target+chr(176)+self.longitude_orientation+", "+%.3f"%self.New_altitude+" m")

```

```

        # self.ax.text(self.latitude_target, self.longitude_target,
self.New_altitude,label,fontsize='4',horizontalalignment
='center',verticalalignment='bottom')
        self.ax.text(self.latitude_start, self.longitude_start, self.altitude,'Ref.
Point',fontsize='8',horizontalalignment='center',verticalalignment='bottom')

        self.listbox_result.insert(END,"Ref. Point : Latitude =
%.10f"%self.latitude_start+chr(176)+self.latitude_orientation+" Longitude =
%.10f"%self.longitude_start+chr(176)+self.longitude_orientation+" Altitude = %.3f
m"%self.altitude)
        self.Result = ([ "Ref. Point",self.Datetime.strftime("%X"+"
%X"), "%.10f"%self.latitude_start, "%.10f"%self.longitude_start, "%.3f"%self.altitude, "%.1f
"%self.elevation])

        for self.a in (self.Result):
            self.worksheet.write(self.No+1,0,str(self.Result[0]))
            self.worksheet.write(self.No+1,1,str(self.Result[1]))
            self.worksheet.write(self.No+1,2,str(self.Result[2]))
            self.worksheet.write(self.No+1,3,str(self.Result[3]))
            self.worksheet.write(self.No+1,4,str(self.Result[4]))
            self.worksheet.write(self.No+1,5,str(self.Result[5]))

        self.No = self.No+1
        self.listbox_result.insert(END,"Target %d :"%self.No+" Latitude =
%.10f"%self.latitude_target+chr(176)+self.latitude_orientation+" Longitude =
%.10f"%self.longitude_target+chr(176)+self.longitude_orientation+" Altitude = %.3f
m"%self.New_altitude)
        self.listbox_result.insert(END," 3D Distance = %.2f"%self.distance+"
m Elevation = %.2f"%self.elevation+" m Azimuth = %.2f"%self.azimuth)
        self.Result = ([self.No,self.Datetime.strftime("%X"+"
%X"), "%.10f"%self.latitude_target, "%.10f"%self.longitude_target, "%.3f"%self.New_altitu
de, "%.2f"%self.distance, "%.2f"%self.elevation, "%.2f"%self.azimuth])

        for self.a in (self.Result):
            self.worksheet.write(self.No+1,0,str(self.Result[0]))
            self.worksheet.write(self.No+1,1,str(self.Result[1]))
            self.worksheet.write(self.No+1,2,str(self.Result[2]))
            self.worksheet.write(self.No+1,3,str(self.Result[3]))

```



```

        self.worksheet.write(self.No+1,4,str(self.Result[4]))
        self.worksheet.write(self.No+1,5,str(self.Result[5]))
        self.worksheet.write(self.No+1,6,str(self.Result[6]))
        self.worksheet.write(self.No+1,7,str(self.Result[7]))

        self.ax.plot(self.latitude_target, self.longitude_target, self.New_altitude,
c='r', marker='o',linestyle='-')
        self.ax.text(self.latitude_target, self.longitude_target,
self.New_altitude,self.No,fontsize='8',horizontalalignment
='center',verticalalignment='bottom')

    else:
        self.No = self.No+1
        self.listbox_result.insert(END,"Target  %d  :"%self.No+"  Latitude  =
%.10f"%self.latitude_target+chr(176)+self.latitude_orientation+"  Longitude  =
%.10f"%self.longitude_target+chr(176)+self.longitude_orientation+"  Altitude  =  %.3f
m"%self.New_altitude)
        self.listbox_result.insert(END,"          3D Distance = %.2f"%self.distance+"
m Elevation = %.2f"%self.elevation+" m Azimuth = %.2f"%self.azimuth)
        self.Result          =          ([self.No,self.Datetime.strftime("%X"+"
%X"),("%.10f"%self.latitude_target,("%.10f"%self.longitude_target,("%.3f"%self.New_altitu
de,("%.2f"%self.distance,("%.2f"%self.elevation,("%.2f"%self.azimuth)])

        for self.a in (self.Result):
            self.worksheet.write(self.No+1,0,str(self.Result[0]))
            self.worksheet.write(self.No+1,1,str(self.Result[1]))
            self.worksheet.write(self.No+1,2,str(self.Result[2]))
            self.worksheet.write(self.No+1,3,str(self.Result[3]))
            self.worksheet.write(self.No+1,4,str(self.Result[4]))
            self.worksheet.write(self.No+1,5,str(self.Result[5]))
            self.worksheet.write(self.No+1,6,str(self.Result[6]))
            self.worksheet.write(self.No+1,7,str(self.Result[7]))

    self.canvas.draw()

    root.update()

```

```

def delete(self):

    self.ax.plot(self.latitude_target, self.longitude_target, self.New_altitude,
c=self.background2, marker='o',markersize=7 ,markeredgewidth=3 ,
markedgecolor=self.background2)
    self.ax.text(self.latitude_target, self.longitude_target,
self.New_altitude,self.No,fontsize='8',horizontalalignment
='center',verticalalignment='bottom',c=self.background2)
    self.canvas.draw()

    # self.No = self.No-1
    self.x = self.No*2
    # self.x = self.x - 1

    if (self.No>=1) :
        self.listbox_result.delete(self.x-1,END)
        self.No = self.No-1

    elif (self.x<=0) :
        self.No = 0
        self.listbox_result.delete(0,END)
        self.worksheet.write(self.No,0,' ')
        self.worksheet.write(self.No,1,' ')
        self.worksheet.write(self.No,2,' ')
        self.worksheet.write(self.No,3,' ')
        self.worksheet.write(self.No,4,' ')
        self.worksheet.write(self.No,5,' ')
        self.worksheet.write(self.No,6,' ')
        self.worksheet.write(self.No,7,' ')

    else:
        self.No = self.No

def contnue_cal(self):
    self.ax.plot(self.latitude_target, self.longitude_target, self.New_altitude,
c='r', marker='o',linestyle='-')

```

```

        self.ax.text(self.latitude_target, self.longitude_target,
self.New_altitude,self.No,fontsize='8',horizontalalignment
='center',verticalalignment='bottom')
        self.canvas.draw()
        self.latitude_start = self.latitude_target
        self.longitude_start = self.longitude_target
        self.altitude = self.New_altitude
        self.entry_latitudeStart.delete(0,END)
        self.entry_longitudeStart.delete(0,END)
        self.entry_altitude.delete(0,END)
        self.entry_latitudeStart.insert(0,self.latitude_start)
        self.entry_longitudeStart.insert(0,self.longitude_start)
        self.entry_altitude.insert(0,self.altitude)

def save(self):
    global num
    num += 1
    self.workbook.close()
    return self.workbook

if __name__=="__main__":

    root = Tk()
    root.title("Target Coordinates Calculator")
    root.geometry("1600x850")
    root.configure(background='#535354')
    root.resizable(width=True, height=True)
    root.iconbitmap('C:/Users/NBTC
Radio/AppData/Local/Programs/Python/Python39/GUI/image/icon.png')
    app = Application(root)
    app.configure(background='#535354')
    root.mainloop()

##### END of PROGRAM #####

```