

การเพิ่มความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบด้วยฟังก์ชัน Site calibration ในการรังวัด GNSS RTK VRS An Increasing the Accuracy of Horizontal Coordinates Using Site Calibration Function via GNSS RTK VRS Surveying Technique

รจนา คุณพูล¹ ศุภชัย เยาว์ดวง² ดิณณภพ มัชฌิมภาภิโร³ และ จิรวัดน์ จันทองพูน^{4,*}

^{1,2,3,4} หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: jirawat.j@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกรูปแบบการวางตำแหน่งหมุดควบคุมในการใช้งานฟังก์ชัน Site calibration ด้วยเทคนิคการรังวัด GNSS RTK VRS เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio กับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS และค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS ที่ใช้ฟังก์ชัน Site calibration ซึ่งกำหนดรูปแบบตำแหน่งหมุดควบคุมเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นขนานกับพื้นที่ศึกษา รูปแบบที่ 2 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นตัดผ่านพื้นที่ศึกษา และรูปแบบที่ 3 หมุดควบคุมกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบจากหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด พบว่าพิกัดจากการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบ 0.016 เมตร และค่า RMSE เท่ากับ 0.034 เมตร ซึ่งมีความแม่นยำกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS เป็น 1.81 เท่า สามารถใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งหมุดควบคุมในการใช้ฟังก์ชัน Site calibration เพื่อให้ได้ค่าพิกัดจากการรังวัดที่ให้ค่าความถูกต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดขอบเขตของงานรังวัดที่กำหนด และเพื่อให้เกิดความถูกต้องของค่าพิกัด

คำสำคัญ: การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนในทันที, การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนในทันทีที่ใช้หลักการของสถานีอ้างอิงเสมือน, ฟังก์ชัน Site calibration

Abstract

The aim of this study is to determine the optimal position of control points for the Site Calibration function by utilizing GNSS RTK VRS surveying technique. The objective is to compare the horizontal coordinate accuracy between coordinates obtained from GNSS RTK Radio surveying, GNSS RTK VRS and GNSS RTK VRS using Site Calibration function. Three control point positioning formats were defined: Format 1, where the control points are aligned parallel to the study area; Format 2, where the control points distributed to cross over the study area; and Format 3, where the control points are distributed to cover the study area. The analysis of horizontal coordinate accuracy from 166 test points showed that coordinates obtained from RTK VRS surveying using Site Calibration Format 3 had the highest accuracy, with a horizontal error of 0.016 meters and an RMSE

of 0.034 meters. This accuracy is 1.81 times greater than that of RTK VRS surveying without Site Calibration. The results can serve as a guideline for deciding on optimal position of control points for Site Calibration function in GNSS RTK VRS to achieve coordinated with accuracy consistent with the specified surveying TOR, ensuring coordinate accuracy.

Keywords: RTK, RTK VRS, The Site Calibration Function

1. บทนำ

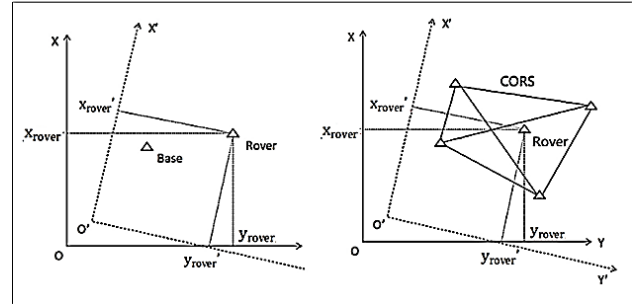
การรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS อาศัยโครงข่ายสถานี CORS จากผู้ให้บริการทั้งภาครัฐและเอกชน ซึ่งค่าพิกัดที่ได้จากแตกต่างกันหมุดควบคุมในพื้นที่สำรวจ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนระดับเซนติเมตรถึงเมตร เพื่อแก้ปัญหา ผู้ผลิตเครื่องรับสัญญาณ GNSS ได้พัฒนาฟังก์ชัน Site calibration ซึ่งมีหลักการใช้งานโดยต้องทราบค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุมและค่าพิกัดจากการรังวัดหมุดควบคุมด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยฟังก์ชันจะทำการคำนวณและปรับแก้ค่าพิกัดให้มีความสอดคล้องกับค่าพิกัดหมุดควบคุม โดยต้องมีหมุดควบคุมอย่างน้อย 2 จุดที่ครอบคลุมพื้นที่สำรวจ อย่างไรก็ตาม การใช้ฟังก์ชันนี้อาจมีข้อจำกัดหากหมุดควบคุมอยู่ไกลจากพื้นที่สำรวจ จึงมีการศึกษาความถูกต้องเชิงตำแหน่งโดยทดสอบการจัดวางหมุดควบคุมใน 3 รูปแบบ ได้แก่ การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS เทคนิค RTK Radio เทคนิค RTK VRS และเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดให้ได้ค่าพิกัดที่แม่นยำและคุ้มค่าสำหรับงานรังวัด การรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS ใช้ระบบโครงข่ายสถานี CORS ที่มีผู้ให้บริการทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ในกรณีการปฏิบัติงานรังวัด ผู้รังวัดอาจมีรหัสผู้ใช้ (User name) จากผู้ให้บริการระบบโครงข่ายสถานี CORS ที่ให้ค่าพิกัดในการรังวัดที่แตกต่างกันค่าพิกัดของหมุดควบคุมที่อยู่ในพื้นที่สำรวจ ซึ่งค่าพิกัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเซนติเมตรหรืออาจสูงถึงหลักเมตร จากปัญหาดังกล่าว ทางบริษัทผู้ผลิตเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้มีการพัฒนาฟังก์ชันเสริมที่มีชื่อว่า ฟังก์ชัน Site calibration โดยฟังก์ชันดังกล่าวจะปรับค่าพิกัดจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ให้มีความสอดคล้องกับค่าพิกัดของหมุดควบคุมในพื้นที่สำรวจ ฟังก์ชัน Site calibration เป็นการปรับแก้ค่าพิกัดเชิงตำแหน่ง (Positioning state) โดยจะใช้ค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุม และค่าพิกัดจากการหมุดควบคุมด้วยดาวเทียม GNSS แล้วนำค่าดังกล่าวมาผ่านกระบวนการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง (Positioning error) ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมหรือเงื่อนไขที่ส่งผลทำให้ค่าพิกัดมีความคลาดเคลื่อน โดยตัวอย่างการรังวัดค่าพิกัดจุดเดียวกัน ระหว่างการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK VRS ดังรูปที่ 1 โดยจากรูปจะเห็นว่าค่าพิกัดที่รังวัดได้มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งโดย

หลักการการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK VRS มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และยังมีปัจจัยด้านระบบพิกัดแต่ละพื้นที่อาจแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้ค่าพิกัดที่รังวัดได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและมีระบบพิกัดที่มีความสอดคล้องกับพื้นที่ จึงจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชัน Site calibration เพื่อให้การปรับค่าพิกัดมีความสอดคล้องกับค่าพิกัดของหมุดควบคุมมากที่สุด ซึ่งการรังวัดค่าพิกัดโดยฟังก์ชัน Site calibration ในบางครั้งอาจมีข้อจำกัดกรณีหมุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอยู่ไกลจากพื้นที่สำรวจ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้หมุดควบคุมดังกล่าว ซึ่งจากคำแนะนำการใช้งานฟังก์ชัน Site calibration อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่มั่นใจในความถูกต้องของค่าพิกัดที่รังวัดได้จากการใช้งานฟังก์ชันดังกล่าว

2. การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS เทคนิค RTK Radio เทคนิค RTK VRS และเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration

การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS เทคนิค RTK Radio ใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS อย่างน้อยสองเครื่อง ได้แก่ สถานีฐานที่ทราบค่าพิกัดและสถานีเคลื่อนที่ที่นำไปวัดค่าพิกัด ณ จุดสำรวจ [1] โดยอาศัยการส่งค่าปรับแก้ผ่านสัญญาณวิทยุหรืออินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถทราบค่าพิกัดได้ทันทีโดยไม่ต้องประมวลผลภายหลัง ซึ่งมีความแม่นยำระดับเซนติเมตรในระยะเส้นฐานไม่เกิน 2 กิโลเมตร [2] แต่มีข้อจำกัดด้านระยะทางเนื่องจากสัญญาณวิทยุไม่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางได้ [3] เทคนิค RTK VRS พัฒนาขึ้นโดยใช้ระบบโครงข่ายสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ถาวรแบบต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง (CORS) ที่ส่งค่าปรับแก้ผ่านเครือข่ายเพื่อเพิ่มความแม่นยำของค่าพิกัด โดยต้องเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการเครือข่ายและใช้หลักการสถานีอ้างอิงเสมือน (VRS) ที่ระบบสร้างขึ้นใกล้จุดสำรวจ ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดของระยะเส้นฐานและเพิ่มความถูกต้องของค่าพิกัด หากมีการเคลื่อนที่ออกจากขอบเขต ระบบจะสร้างสถานีอ้างอิงเสมือนใหม่โดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามค่าพิกัดที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากปัจจัยแวดล้อมหรือระบบพิกัดที่แตกต่างกัน ฟังก์ชัน Site calibration จึงถูกพัฒนาเพื่อปรับแก้ค่าพิกัดให้สอดคล้องกับหมุดควบคุมในพื้นที่สำรวจ โดยใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดร่วมกับค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุม แล้วปรับแก้ข้อผิดพลาดเชิงตำแหน่งเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

ฟังก์ชัน Site calibration เป็นการปรับแก้ค่าพิกัดเชิงตำแหน่ง (Positioning state) โดยจะใช้ค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุม และค่าพิกัดจากการหมุดควบคุมด้วยดาวเทียม GNSS แล้วนำค่าดังกล่าวมาผ่านกระบวนการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง (Positioning error) ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมหรือเงื่อนไขที่ส่งผลทำให้ค่าพิกัดมีความคลาดเคลื่อน โดยตัวอย่างการรังวัดค่าพิกัดจุดเดียวกัน ระหว่างการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK VRS ดังรูปที่ 1 โดยจากรูปจะเห็นว่าค่าพิกัดที่รังวัดได้มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งโดยหลักการการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK VRS มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และยังมีปัจจัยด้านระบบพิกัดแต่ละพื้นที่อาจแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้ค่าพิกัดที่รังวัดได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและมีระบบพิกัดที่มีความสอดคล้องกับพื้นที่ จึงจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชัน Site calibration [4]

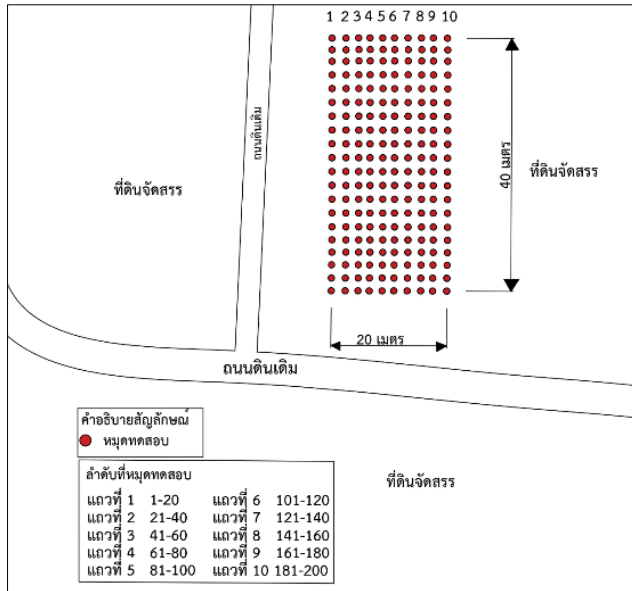


รูปที่ 1 พิกัดที่รังวัดได้โดยใช้สถานีฐานและใช้สถานี CORS [5]

เมื่อทำการ Site calibration โดยระบบพิกัดของการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS จะสอดคล้องกับระบบพิกัดของหมุดควบคุม โดยค่าพิกัดที่รังวัดได้จะมีระบบพิกัดที่สอดคล้องกับหมุดควบคุมอีกด้วย ข้อเสนอแนะในการใช้ฟังก์ชัน CORS มีหมุดควบคุมอย่างน้อย 2 จุดขึ้นไปครอบคลุมพื้นที่ศึกษา และควรอยู่ใกล้กับพื้นที่ศึกษา และควรอยู่ใกล้กับพื้นที่ศึกษา โดยทั่วไปการ Site Calibration สามารถทำงานได้โดยใช้ค่าพิกัดทางราบ (Plane coordinates) โดยฟังก์ชันทำการปรับแก้ค่าพิกัดเชิงตำแหน่งระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับค่าพิกัดที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม โดยการปรับแก้ค่าอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ ดังนั้นลักษณะตำแหน่งหมุดควบคุมกับพื้นที่ที่สนใจจึงเป็นหนึ่งในการเลือกที่สำคัญต่อการคำนวณและปรับแก้ โดยในระบบของฟังก์ชันข้อมูลค่าพิกัดอ้างอิงจะเป็นระบบกริดและความสูง เป็น Orthometric และค่าพิกัดที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจะถูกแปลงให้อยู่ในพิกัดทางภูมิศาสตร์และความสูงเป็น Ellipsoid [6] การปรับแก้ค่าพิกัดระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุมกับค่าพิกัดจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ระบบจะทำการคำนวณพารามิเตอร์จำนวน 3 รูปแบบ ได้แก่ การหมุน (Rotation) โดยการคำนวณค่าการหมุนจากค่าพิกัดทางราบของหมุดควบคุมจำนวน 2 หมุด ทำการหมุนตำแหน่งของจุดโดยไม่เปลี่ยนแปลงทิศทางหรือรูปร่าง โดยปรับแนวของจุดสอดคล้องกับค่าอ้างอิงมากที่สุด มีลักษณะการหมุน (Rotation) การเลื่อน (Translation) เป็นการเลื่อนจุดโดยใช้หมุดควบคุมจำนวน 1 หมุด ซึ่งทำการเลื่อนจุดให้สอดคล้องกับค่าพิกัดทางราบและค่าพิกัดทางตั้ง ของค่าพิกัดอ้างอิงมากที่สุด และการปรับขนาด (Scale) เป็นการปรับขนาดจุดโดยใช้ค่าพิกัดทางราบของหมุดควบคุมจำนวน 2 หมุดในการคำนวณอัตราส่วนของการปรับขนาด เพื่อปรับค่าพิกัดให้สอดคล้องกับมาตราส่วนที่ถูกต้อง

3. การกำหนดรูปแบบตำแหน่งหมุดควบคุมสำหรับการ Site calibration

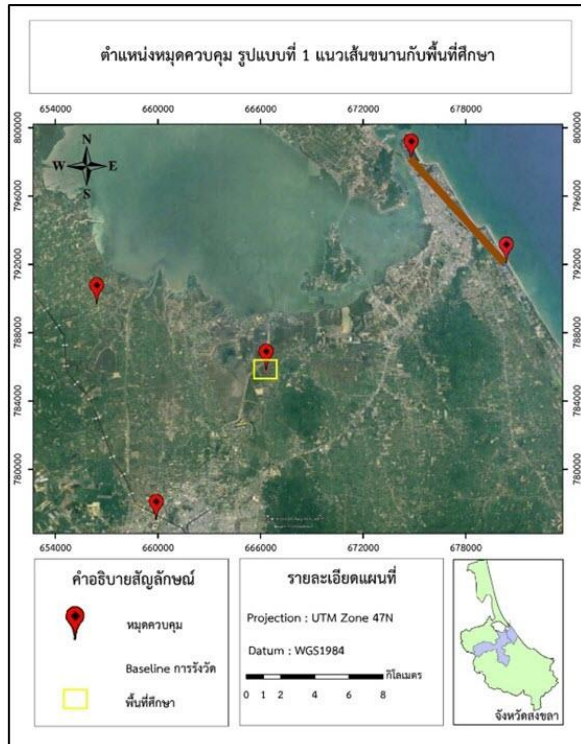
พื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งกว้าง ไม่มีสิ่งกีดขวางบดบังคลื่นสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่อาจจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อน (Multipath errors) ที่ส่งผลความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบ กำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบมีความกว้างประมาณ 20 เมตร ความยาวประมาณ 40 เมตร แต่ละหมุดถูกสร้างแบบตารางกริด ขนาดความกว้างประมาณ 2 เมตร ความยาวประมาณ 2 เมตร จำนวน 200 หมุด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบในพื้นที่ศึกษา

กำหนดรูปแบบตำแหน่งหมุดควบคุมสำหรับการ Site calibration โดยจะแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

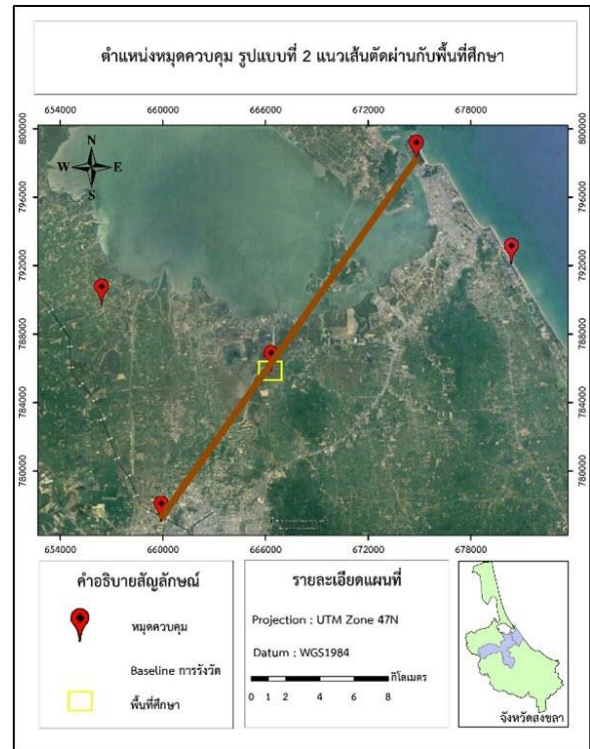
รูปแบบที่ 1 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นขนานกับพื้นที่ศึกษา รูปที่ 3 ตำแหน่งของหมุดควบคุมโดยใช้หมุด SC1 และ 101404 เป็นหมุดควบคุม ซึ่งทั้ง 2 หมุด อยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาประมาณ 15 กิโลเมตร วางตัวเป็นแนวขนานกับพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 3 ตำแหน่งหมุดควบคุมรูปแบบที่ 1 แนวเส้นขนานกับพื้นที่ศึกษา

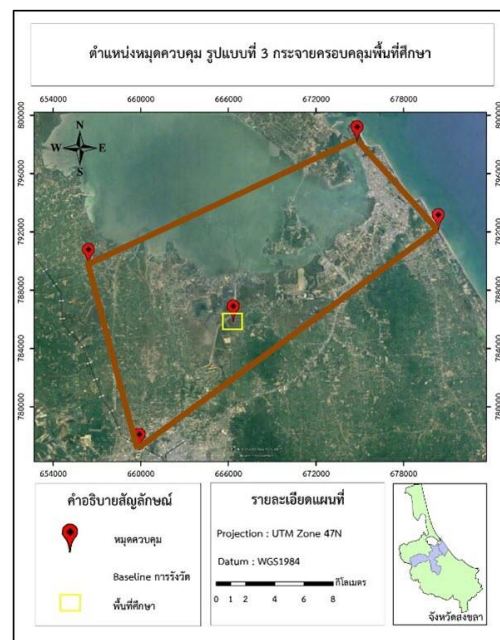
รูปแบบที่ 2 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นตัดผ่านกับพื้นที่ศึกษา รูปที่ 4 ตำแหน่งของหมุดควบคุม โดยใช้หมุด SC1 และหมุด SC3

เป็นหมุดควบคุม ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาประมาณ 15 กิโลเมตรและ 11 กิโลเมตร ตามลำดับ และวางตัวเป็นแนวตัดผ่านกับพื้นที่ศึกษา



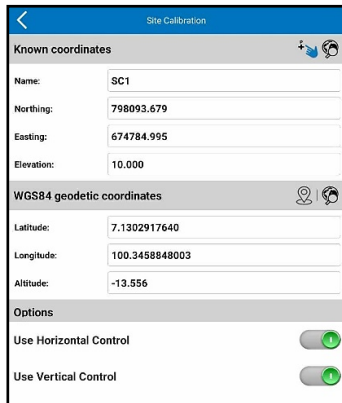
รูปที่ 4 ตำแหน่งหมุดควบคุมรูปแบบที่ 2 แนวเส้นตัดผ่านกับพื้นที่ศึกษา

รูปแบบที่ 3 หมุดควบคุมกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ศึกษา รูปที่ 5 ตำแหน่งของหมุดควบคุมโดยใช้หมุด SC1 หมุด 101404 หมุด SC3 และหมุด SC4 เป็นหมุดควบคุมตามลำดับ ซึ่งจุดแรกอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาประมาณ 15 กิโลเมตร และหมุดคู่ที่สองอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาประมาณ 11 กิโลเมตร โดยทั้ง 4 หมุด วางตัวครอบคลุมกับพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 5 ตำแหน่งหมุดควบคุมรูปแบบที่ 3 กระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจะเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ เมื่อทดสอบครบทั้ง 3 รูปแบบ นำค่าพิกัดการรังวัดหมุดควบคุมมาทำการ Site calibration ประกอบไปด้วยข้อมูลค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS และค่าพิกัดจากการประมวลผลภายหลัง ดังรูปที่ 6 พิกัดระบบยูทีเอ็มเป็นค่าพิกัดของหมุดควบคุมจากการประมวลผลภายหลังและพิกัดระบบภูมิศาสตร์เป็นค่าพิกัดของหมุดควบคุมจากการรังวัดดาวเทียม RTK VRS เมื่อทำการ Site calibration ระบบจะทำการปรับค่าพิกัดดาวเทียมให้สอดคล้องกับค่าพิกัดหมุดควบคุม



The screenshot shows a 'Site Calibration' interface. It has two main sections: 'Known coordinates' and 'WGS84 geodetic coordinates'. Under 'Known coordinates', there are fields for Name (SC1), Northing (798093.679), Easting (674784.995), and Elevation (10.000). Under 'WGS84 geodetic coordinates', there are fields for Latitude (7.1302917640), Longitude (100.3458848003), and Altitude (-13.556). At the bottom, there are two toggle switches: 'Use Horizontal Control' (checked) and 'Use Vertical Control' (checked).

รูปที่ 6 การนำค่าพิกัดหมุดควบคุม เข้าฟังก์ชัน Site calibration

4. สมการทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

สมการหาขนาดกลุ่มตัวอย่าง [7] การคำนวณในสมการของคอคแรน (Cochran) จะทำให้ได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$n = \frac{Z^2}{4e^2} \quad (1)$$

n คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ, Z คือ ความมั่นใจที่ผู้วิจัยกำหนดไว้ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ, e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

สมการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบ [8] การคำนวณในสมการของทาโร ยามาเน (Taro Yamane) จะทำให้ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$n = \frac{N}{1+Ne^2} \quad (2)$$

n คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ, N คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่มตัวอย่าง e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

การประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูล [9] วัดการกระจายของข้อมูลโดยใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นวิธีการวัดการกระจายที่ใช้ข้อมูลทุกค่ามาคำนวณ การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $\sum$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด, $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดที่วัดได้จากกลุ่มตัวอย่าง, x_i คือ ค่าพิกัดที่วัดได้จากกลุ่มตัวอย่าง, n คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่มตัวอย่าง

การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบ [10] ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยหาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย

(Root mean square error, RMSE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ดังนี้

$$RMSE_N = \sqrt{\frac{\sum(N_{data,i} - N_{check,i})^2}{n}} \quad (4)$$

$$RMSE_E = \sqrt{\frac{\sum(E_{data,i} - E_{check,i})^2}{n}} \quad (5)$$

$RMSE_N$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางทิศเหนือ-ใต้, $RMSE_E$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางทิศตะวันออก-ตะวันตก, $N_{data,i}$ คือ ค่าพิกัดทางทิศเหนือ-ใต้ ของการรังวัด, $N_{check,i}$ คือ ค่าพิกัดอ้างอิงทางทิศเหนือ-ใต้ ของการรังวัด $E_{data,i}$ คือ ค่าพิกัดทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัด, $E_{check,i}$ คือ ค่าพิกัดอ้างอิงทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางราบ [10] นำสมการที่ (4) และสมการที่ (5) มาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางราบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_N)^2 + (RMSE_E)^2} \quad (6)$$

$RMSE_r$ คือ RMSE ของตำแหน่งทางราบ (เมตร), $RMSE_N$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางทิศเหนือ-ใต้, $RMSE_E$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางทิศตะวันออก-ตะวันตก

5. ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบด้วยฟังก์ชัน Site calibration ในการรังวัด GNSS RTK VRS

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจะแสดงผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ และในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก โดยทำการแทนสัญลักษณ์ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบแสดงในตารางที่ 1 และสรุปผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากข้อมูลหมุดทดสอบ 200 หมุดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ใช้ในการคำนวณ

สัญลักษณ์	ความหมาย
ΔN_1	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS กับเทคนิค RTK Radio
ΔN_2	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 กับเทคนิค RTK Radio
ΔN_3	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2 กับเทคนิค RTK Radio
ΔN_4	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 กับเทคนิค RTK Radio
ΔE_1	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS กับเทคนิค RTK Radio
ΔE_2	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 กับเทคนิค RTK Radio
ΔE_3	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2 กับเทคนิค RTK Radio
ΔE_4	ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ระหว่างเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 กับเทคนิค RTK Radio

ตารางที่ 2 ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากข้อมูลหมุดทดสอบ 200 หมุด

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ	ΔN_1 (เมตร)	ΔN_2 (เมตร)	ΔN_3 (เมตร)	ΔN_4 (เมตร)
ผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบสูงสุด	-0.134	0.192	0.181	0.161
ผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบต่ำสุด	-0.002	0.001	0.000	0.001
ค่าเฉลี่ยผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบ	-0.042	0.025	0.015	-0.005
ผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบสูงสุด	-0.162	-0.169	0.177	0.158
ผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบต่ำสุด	0.000	0.000	0.001	0.000
ค่าเฉลี่ยผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบ	-0.029	-0.030	0.020	0.014

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบสูงสุดในทางทิศเหนือ-ใต้ มีค่าผลต่างมากที่สุดคือ 0.192 เมตร (ΔN_2) และผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบต่ำสุดในทางทิศเหนือ-ใต้ มีค่าผลต่างน้อยที่สุดคือ 0.000 เมตร (ΔN_3) ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบสูงสุดในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก มีค่าผลต่างมากที่สุด คือ 0.177 เมตร (ΔE_3) และผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบต่ำสุดในทางทิศตะวันออก-ตะวันตกมีค่าผลต่างน้อยที่สุดคือ 0.000 เมตร (ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_4) ค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ มีค่ามากที่สุด คือ -0.042 เมตร (ΔN_1) และมิต่ำน้อยที่สุดคือ -0.005 เมตร (ΔN_4) ค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก มีค่ามากที่สุด คือ -0.030 เมตร (ΔE_2) และมิต่ำน้อยที่สุดคือ 0.014 เมตร (ΔE_4)

6. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ

จากการสรุปผลต่างค่าพิกัดทางราบจากการรังวัดหมุดทดสอบจำนวน 200 หมุด ดังตารางที่ 2 พบว่าข้อมูลผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบสูงสุดมีค่าสูงกว่า ± 10 เซนติเมตร หรือ ± 0.100 เมตร เนื่องจากเกิดข้อผิดพลาดจากการรังวัดค่าพิกัดหมุดทดสอบด้วยเทคนิค RTK Radio โดยมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Outlier) ทั้งหมด 34 หมุด ส่งผลให้การวิเคราะห์และการสรุปข้อมูลมีความคลาดเคลื่อน การวิเคราะห์ผลจึงเลือกวิเคราะห์ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบของหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด โดยสรุปค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากข้อมูลหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากข้อมูลหมุดทดสอบ 166 หมุด

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ	ค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ (เมตร)
ΔN_1	-0.043
ΔN_2	0.025
ΔN_3	0.014
ΔN_4	-0.006
ΔE_1	-0.027
ΔE_2	-0.027
ΔE_3	0.021
ΔE_4	0.015

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ มีค่ามากที่สุด คือ -0.043 เมตร (ΔN_1) และมิต่ำน้อยที่สุดคือ -0.006 เมตร (ΔN_4) ค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก มีค่ามากที่สุดคือ -0.027 เมตร (ΔE_1 , ΔE_2) และมิต่ำน้อยที่สุดคือ 0.015 เมตร (ΔE_4)

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบ

เทคนิคการรังวัด	ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบ (เมตร)
การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS	0.050
การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1	0.037
การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2	0.026
การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3	0.016

จากตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบจากเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า เทคนิค RTK VRS และจากการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจากเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ารูปแบบที่ 3 มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 1 ตามลำดับ

จากผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบของข้อมูลหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด จึงนำมาแสดงเป็นกราฟเส้นเพื่อวิเคราะห์ลักษณะและแนวโน้มของข้อมูลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยผลต่างจากการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ นำมาแสดงเป็นกราฟ (ก) ถึงกราฟ (ง) ในรูปที่ 7 โดยความหมายของแต่ละกราฟ ดังนี้

กราฟ (ก) คือ กราฟแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบระหว่างการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio กับเทคนิค RTK VRS

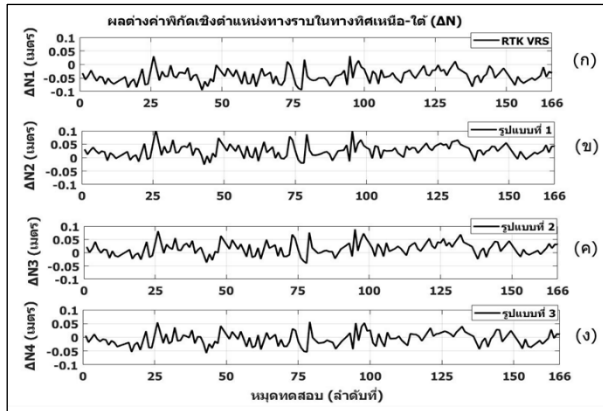
กราฟ (ข) คือ กราฟแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบระหว่างการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio กับเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1

กราฟ (ค) คือ กราฟแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบระหว่างการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio กับเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2

กราฟ (ง) คือ กราฟแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบระหว่างการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio กับเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3

ประกอบไปด้วยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ และในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก รวมไปถึงขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ และในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

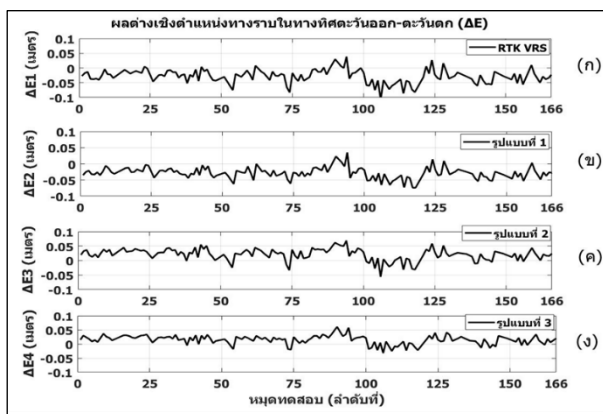
ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ ของการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟเส้น โดยแกนตั้ง คือ ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ และแกนนอน คือ ลำดับของหมุดทดสอบซึ่งกำหนดให้ระดับอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.000 เมตร ดังรูปที่ 7 แสดงกราฟเส้นผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้



รูปที่ 7 ผลต่างค่าพิกัดเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ ทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า ลักษณะของเส้นกราฟมีความใกล้เคียงกัน โดยกราฟ (ก) และ (ง) มีทิศทางและการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.050 ถึง 0.050 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าบวกและค่าลบ แสดงถึงข้อมูลการรังวัดจากทั้ง 2 วิธีการ มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio ส่วนกราฟ (ข) และ (ค) มีทิศทางและการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.100 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าบวกหรือมีค่ามากกว่า 0 แสดงถึงข้อมูลการรังวัดจากทั้ง 2 วิธีการ มีค่าน้อยกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio

ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ของการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟเส้น โดยแกนตั้ง คือ ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ และแกนนอน คือลำดับของหมุดทดสอบ ซึ่งกำหนดให้ระดับอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.000 เมตร ดังรูปที่ 8 แสดงกราฟเส้นผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งประกอบไปด้วยกราฟเส้นของผลต่างจากการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากกราฟ ΔE_1 ถึงกราฟ ΔE_4 ตามลำดับ

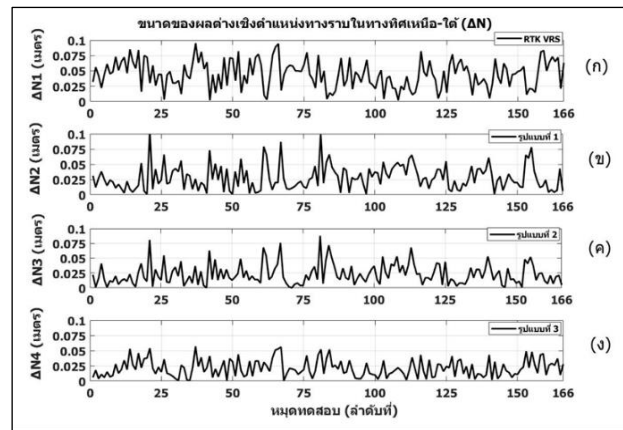


รูปที่ 8 ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก

ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าลักษณะของเส้นกราฟมีความใกล้เคียงกัน โดยกราฟ (ก) และ (ข) มีทิศทางและการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.100 ถึง 0.050 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าบวกและค่าลบ แสดงถึงข้อมูลการรังวัดจากทั้ง 2 วิธีการ มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio ส่วนกราฟ (ค) และ (ง) มีทิศทางและการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.050 ถึง 0.050 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าบวกและค่าลบ

แสดงถึงข้อมูลการรังวัดจากทั้ง 2 วิธีการ มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio

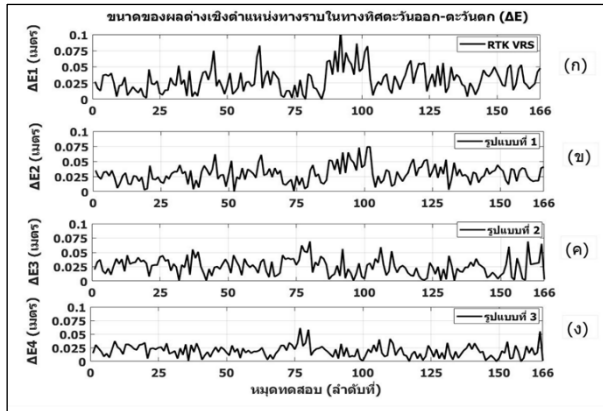
ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ ด้วยขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ไม่คำนึงถึงทิศทาง ของการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟเส้น โดยแกนตั้ง คือ ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ และแกนนอน คือลำดับของหมุดทดสอบ ซึ่งกำหนดให้ระดับอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.000 เมตร ดังรูปที่ 9 แสดงกราฟเส้นของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้ ซึ่งประกอบไปด้วยกราฟเส้นของผลต่างจากการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากกราฟ ΔN_1 ถึงกราฟ ΔN_4 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศเหนือ-ใต้

จากรูปที่ 9 ขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ไม่คำนึงถึงทิศทางในทางทิศเหนือ-ใต้ ทั้ง 4 รูปแบบ มีความแตกต่างกัน กราฟ (ก) มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและมีการกระจายของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.100 เมตร ซึ่งแสดงถึงผลการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS ต่างจากค่าพิกัดที่รังวัดด้วยเทคนิค RTK Radio มากที่สุด ส่วนกราฟ (ข) และ (ค) มีการเปลี่ยนแปลงและการกระจายของข้อมูลใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.075 เมตร ซึ่งแสดงถึงผลการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 2 มีค่าพิกัดใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง กราฟ (ง) มีความเปลี่ยนแปลงข้อมูลน้อยที่สุดและมีการกระจายของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.050 เมตร ซึ่งแสดงถึงผลการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบน้อยที่สุด

ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ด้วยขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ไม่คำนึงถึงทิศทาง ของการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟเส้น โดยแกนตั้ง คือ ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ และแกนนอน คือลำดับของหมุดทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เส้นกราฟอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 0.000 เมตร ในรูปที่ 10 แสดงกราฟเส้นผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งประกอบไปด้วยกราฟเส้นของผลต่างจากการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากกราฟ ΔE_1 ถึงกราฟ ΔE_4 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก

จากรูปที่ 10 แสดงขนาดของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ไม่คำนึงถึงทิศทางในทางทิศตะวันออก-ตะวันตก ทั้ง 4 รูปแบบ มีความแตกต่างกัน กราฟ (ก) และกราฟ (ข) มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและมีการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.075 เมตร ซึ่งแสดงถึงผลการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS และเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ต่างจากค่าที่วัดด้วยเทคนิค RTK Radio มากที่สุด ส่วนกราฟ (ค) มีการเปลี่ยนแปลงและการกระจายของข้อมูลใกล้เคียงกับกราฟ (ง) โดยข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.075 เมตร ซึ่งแสดงถึงการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2 มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง ส่วนกราฟ (ง) มีความเปลี่ยนแปลงข้อมูลน้อยที่สุดและมีการกระจายของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.000 ถึง 0.050 เมตร ซึ่งแสดงถึงการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบน้อยที่สุด

7. ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบด้วยฟังก์ชัน Site calibration ในการรังวัด GNSS RTK VRS

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบด้วยฟังก์ชัน Site calibration ในการรังวัด GNSS RTK VRS ทั้ง 3 รูปแบบ มาจากค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) เพื่อนำมาสรุปผลรูปแบบที่มีค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS รวมไปถึงรูปแบบที่ให้ความแม่นยำมากที่สุดและรูปแบบที่มีค่าความถูกต้องใกล้เคียงการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK Radio มากที่สุด เนื่องจากเกิดข้อผิดพลาดจากการรังวัดค่าพิกัดหมุดทดสอบด้วยเทคนิค RTK Radio โดยมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Outlier) ทั้งหมด 34 หมุด ส่งผลให้การวิเคราะห์และการสรุปข้อมูลมีความคลาดเคลื่อน การวิเคราะห์ผลจึงเลือกวิเคราะห์ข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบของหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด โดยสรุปค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากข้อมูลหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด

จากข้อมูลการรังวัดหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด เพื่อวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ และเป็นสมการที่บ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบที่ใช้เป็นตัวแทนของข้อมูล โดยวิเคราะห์จากผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบจากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS และเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ ผลค่าเฉลี่ยผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบ

รูปแบบการรังวัด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	
	ΔN	ΔE
เทคนิค RTK VRS	0.026	0.023
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1	0.025	0.022
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2	0.025	0.021
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3	0.023	0.018

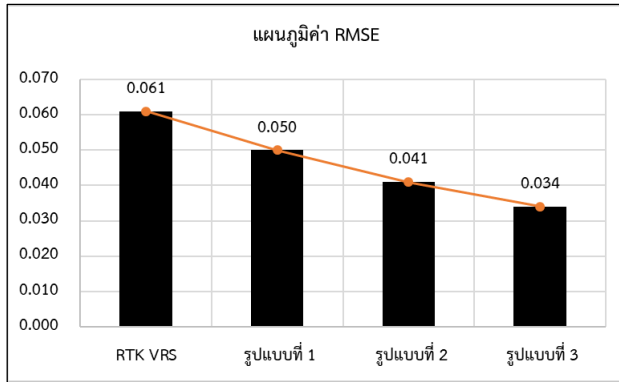
การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS มีค่า SD มากกว่าเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration แสดงถึงผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบมีการเกาะกลุ่มของข้อมูลใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด ส่วนเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 มีค่า SD ใกล้เคียงกัน ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบมีการเกาะกลุ่มของข้อมูลใกล้เคียงกัน ส่วนเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีค่า SD น้อยที่สุด ผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบมีการเกาะกลุ่มของข้อมูลใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยมากที่สุด จากขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ใหญ่และค่า SD ของการรังวัดทั้ง 4 รูปแบบ มีค่าน้อย สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือและเป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนั้น ๆ ได้

ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) วิเคราะห์จากผลต่างเชิงตำแหน่งทางราบของหมุดทดสอบจำนวน 166 หมุด จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS และเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) ของการรังวัดรูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบการรังวัด	RMSE (เมตร)
เทคนิค RTK VRS	0.061
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1	0.050
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2	0.041
เทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3	0.034

พบว่าการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS มีค่า RMSE สูงกว่าเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทุกรูปแบบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.061 เมตร และค่า RMSE ของเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.034 เมตร โดยรูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่า RMSE จึงทำการแสดงแนวโน้มความถูกต้องจากการรังวัดด้วยเทคนิคต่าง ๆ ในรูปแบบแผนภูมิ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนภูมิค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE)

การรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเทคนิค RTK VRS โดยจากการกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่งหมุดควบคุมที่ 1 ถึง รูปแบบที่ 3 มีแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนที่ลดน้อยลงตามลำดับ โดยมีนัยสำคัญ คือ การใช้ฟังก์ชัน Site calibration ให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่าการรังวัดด้วยเทคนิค RTK VRS โดยรูปแบบที่ 3 มีความถูกต้องและความแม่นยำมากที่สุด

8. บทสรุปและประโยชน์การเพิ่มค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบด้วยฟังก์ชัน Site calibration ในการรังวัด GNSS RTK VRS

ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) โดยกำหนดให้ค่าพิกัดจากการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK Radio เป็นค่าพิกัดอ้างอิง เพื่อวิเคราะห์ค่า RMSE ของการรังวัดค่าพิกัดระหว่าง การรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS กับการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS มีค่า RMSE เท่ากับ 0.061 เมตร การรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นขนานกับพื้นที่ศึกษา มีค่า RMSE เท่ากับ 0.050 เมตรการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 2 ตำแหน่งของหมุดควบคุมเป็นแนวเส้นตัดผ่านพื้นที่ศึกษา มีค่า RMSE เท่ากับ 0.041 เมตร และการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 หมุดควบคุมกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ศึกษา มีค่า RMSE เท่ากับ 0.034 เมตร จะเห็นได้ว่าการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบ มีค่า RMSE ที่น้อยกว่า (ความแม่นยำมากกว่า) การรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS และการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 3 มีความแม่นยำและความถูกต้องใกล้เคียงกับการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK Radio มากที่สุด รองลงมาคือ รูปแบบที่ 2 และการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration รูปแบบที่ 1 ให้ค่าความแม่นยำน้อยที่สุด ผลลัพธ์ดังกล่าวอยู่ในระดับ sub-decimeter ซึ่งเพียงพอสำหรับงานโยธาแบบทั่วไป และสามารถนำไปใช้กับการสำรวจเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศหรืองานวางตำแหน่งถนน

จากการวิเคราะห์หาความแม่นยำจากการรังวัดโดยเปรียบเทียบค่า RMSE ระหว่างการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS กับการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibration ทั้ง 3 รูปแบบจะได้ว่า การรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibrationรูปแบบที่ 1 มีความแม่นยำกว่า 1.23 เท่า การรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibrationรูปแบบที่ 2 มีความแม่นยำกว่า 1.48 เท่า และการรังวัดดาวเทียม GNSS ด้วยเทคนิค RTK VRS โดยใช้ฟังก์ชัน Site calibrationรูปแบบที่ 3 มีความแม่นยำกว่า 1.81 เท่า ดังนั้น รูปแบบตำแหน่งหมุดควบคุมในการใช้ฟังก์ชัน Site calibration ซึ่งใช้รังวัดค่าพิกัดที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือ รูปแบบที่ 3 รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 1 ตามลำดับ ผู้วิจัยหวังว่าในอนาคตฟังก์ชัน Site calibration จะมีบทบาทให้ผู้ที่ทำงานรังวัดดาวเทียมทั้งหมดควบคุมอยู่ห่างไกลจากพื้นที่ทำงาน เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] KQ GNSS. (2561). หลักการของระบบ VRS. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gnss-rtk-network.html>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 11 ธันวาคม 2566).
- [2] บริษัท เนคคร่า ไมโครเทค จำกัด. งานรังวัดแบบ RTK (Real Time Kinematic). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://citly.me/1dNRB>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 5 กุมภาพันธ์ 2567).
- [3] KQ GNSS. (2561) ความคลาดเคลื่อนในการรังวัดดาวเทียมระบบ GPS. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gps_11.html. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 15 ธันวาคม 2566).
- [4] TERSUS GNSS. (2022) Site Calibration. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://relink.asia/z6h9F>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 21 ธันวาคม 2566).
- [5] Trimble Access TM. GNSS surveys. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://help.trimblegeospatial.com/TrimbleAccess/2018.10/en/Calibration.htm>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 มีนาคม 2567).
- [6] Trimble DIMENSIONS. Establishing Control and Site Calibration for Construction Site. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://golink.icu/caaQ12Q>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 2 มีนาคม 2567).
- [7] อธิวัฒน์ เอกกุล. (2543) ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://url.in.th/ghawH>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 16 มกราคม 2567).
- [8] คำนวณกลุ่มตัวอย่างด้วยสูตร TARO YAMANE. (2560) สมการคำนวณหาโร ยามาเน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://citly.me/kLpqg>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 24 กุมภาพันธ์ 2567).
- [9] ทวีพร ลิทธิพันธ์. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://n9.cl/h9hiy>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 24 กุมภาพันธ์ 2567).
- [10] นภาพล ศักดิ์สินธิ. การประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานีอ้างอิงเสมือน.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.