



การวิเคราะห์ความถูกต้องความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ โดยการปรับแก้แบบจุดตัดระหว่างแนวนินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา

Analysis of Airborne Gravity Accuracy Using Cross-over Adjustment in Chao Phraya Basin.

ณัฐนันท์ ดวงดี^{1,2} พุทธิพล ดำรงชัย¹ และ ชวิศ ศรีมณี¹

Nuttanon Duangdee^{1,2} Puttipol Dumrongchai¹ and Chawis Srimanee¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย

Chiang Mai University, 50200, Thailand

Royal Thai Survey Department, Royal Thai Armed Forces Headquarters.

E-mail: Nuttanon_d@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ สำหรับการคำนวณหาชื่อยอดบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาด้วยการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน ข้อมูลถูกจำแนกออกเป็นสองกรณี คือ ข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินและข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน จากนั้นนำข้อมูลทั้งสองชุดมาทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ลงสู่ระดับทะเลปานกลางเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน ผลการทดสอบของข้อมูลทั้งสองชุดพบว่า ชุดข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่า โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 3.991 มิลลิแกล ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 4.485 มิลลิแกล และนำข้อมูลทั้งสองชุดมาทำการคำนวณชื่อยอดเพื่อเปรียบเทียบกับความสูงชื่อยอดที่ได้จากหมุดร่วมค่าระดับความสูง ผลการทดสอบของข้อมูลทั้งสองชุดพบว่าชุดข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ดีกว่าเท่ากับ 0.096 เมตร ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 0.100 เมตร

คำสำคัญ: การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน แบบจำลองชื่อยอด การลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ลิสต์แคว์คอลโลเคชั่น

ABSTRACT

This research aims to analyze the airborne gravity data accuracy using cross-over adjustment for geoid determination in Chao Phraya basin. The data sets were categorized into the cases of with and without cross-over adjustment. Both types of the data sets were then reduced to mean sea level by means of downward continuation to be compared with terrestrial gravity data sets. The adjusted data yielded the more accurate result. The root mean square (rms) value of it was 3.991 mGal while the rms value was 4.485 mGal for the case of no data adjustment. The computed geoid heights using both types of the data were compared with the geoid computed using GNSS/Leveling co-points. The geoid using the adjusted data yielded the more accurate result. The rms value of it was 0.096 m. while the rms value was 0.1 m. for the case of no data adjustment.

Keyword: Cross-over Adjustment, Geoid Model, Downward Continuation, Least Squares Collocation, GNSS/Leveling co-points

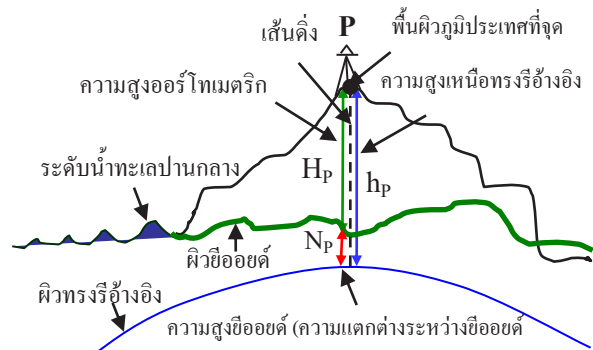
1. บทนำ

เมื่อก้าวถึงระบบพิกัดทางดิ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับแบบจำลองขี้อยอด เนื่องจากขี้อยอดเป็นผิวระดับอ้างอิงของโลกที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าความสูงต่ำของภูมิประเทศและสามารถหาความสูงเหนือระดับทะเลปานกลางร่วมกับเทคโนโลยี GNSS ได้ ที่ผ่านมามีประเทศไทยได้ใช้แบบจำลองขี้อยอดสากล ชื่อว่า EGM96[12] EGM2008 [2] และได้ใช้แบบจำลองขี้อยอดท้องถิ่นบริเวณประเทศไทยชื่อ THAI12H [3] ในการหาค่าระดับความสูง แต่ค่าระดับที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่ที่ประมาณ 5-30 ซม. จึงไม่สามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องที่ดีกว่าได้ เช่น งานทางด้านวิศวกรรมงานบริหารจัดการด้านอุทกภัย เป็นต้น ทำให้ 2-3 ปี ที่ผ่านมามีประเทศไทยได้มีการพัฒนาแบบจำลองขี้อยอดความละเอียดสูงด้วยความร่วมมือระหว่างกรมแผนที่ทหารและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีทั้งการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินและภาคอากาศซึ่งในการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเป็นการรังวัดครอบคลุมทั้งผืนแผ่นดินทั่วทั้งประเทศเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ในการรังวัดประเภทนี้สามารถรังวัดในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น เทือกเขาสูง ป่ารกทึบ และตามแนวชายแดน เป็นต้น งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเท่านั้น ซึ่งเป็นการปรับปรุงข้อมูลให้มีความถูกต้องมากขึ้นเพื่อปรับปรุงความถูกต้องแบบจำลองขี้อยอด งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวบินเป็นหลักการและวิธีที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล [8]

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีในการคำนวณหาขี้อยอด การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวบินและการลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ

2.1 ทฤษฎีการคำนวณหาขี้อยอด



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของโลก ขี้อยอด และทรงรีอ้างอิง

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของผิวโลกจริง ขี้อยอด และ ทรงรีอ้างอิง ซึ่ง ความสูงขี้อยอด (geoid undulation) คือ ระยะที่วัดตามแนวเส้นดิ่งที่ตั้งฉากกับผิวขี้อยอด เขียนเป็นสมการพื้นฐานได้ว่า

$$H_p = h_p - N_p \quad (1)$$

โดยที่ H_p คือความสูงออร์โทเมตริกที่จุด P บนพื้นโลก h_p คือความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง และ N_p คือ ความสูงขี้อยอดหรือค่าความแตกต่างระหว่างพื้นผิวขี้อยอดและพื้นผิวทรงรี การคำนวณแบบจำลองขี้อยอดนั้นจะใช้ทฤษฎีของโมโลเดนสกี (Molodensky's theory) ซึ่งเป็นการคำนวณแบบจำลองขี้อยอด โดยผ่านกระบวนการคำนวณหาความสูงอะนอลมอลี (height anomaly) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถหลีกเลี่ยงสมมุติฐานของสโตกส์ในการเคลื่อนย้ายมวลสารลงสู่ผิวขี้อยอดในการคำนวณสามารถหาความสูงขี้อยอดที่จุดใดๆ (กำหนดให้เป็นจุด P) จากสมการดังนี้ [7]

$$N_p \approx \zeta_p + \frac{\Delta g_B H}{\gamma_0} \quad (2)$$

เมื่อ ζ_p คือความสูงอะนอมอลลี, H คือความสูงออร์โทเมตริก ที่ได้จากแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (digital elevation model), Δg_B คือ บูเกอร์อะนอมอลลี และ γ_0 คือ ความโน้มถ่วงปกติ

2.2 การปรับแก้วิธีลีสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ

หลักการปรับแก้แบบลีสต์แคว์เป็นการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มาทำการคำนวณปรับแก้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพให้มีความถูกต้อง โดยทฤษฎีของการปรับแก้แบบลีสต์แคว์เริ่มจากสมการพื้นฐานทางลีสต์แคว์

$$Y = AX + e \quad (3)$$

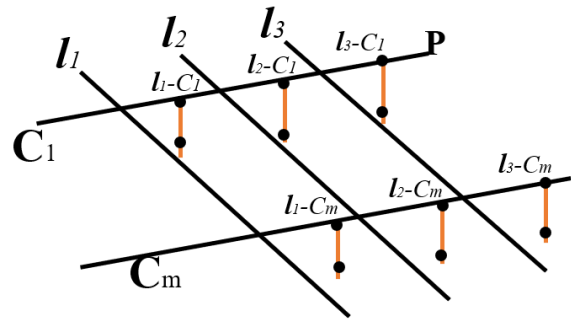
เมื่อ Y คือค่าสังเกต หรือค่าที่ได้จากการรังวัด (observation) A คือค่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ X คือเวกเตอร์ของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบและ e คือค่าเศษเหลือสมการแบบมีเงื่อนไข เขียนได้ว่า

$$K_0 = KX \quad (4)$$

เมื่อ K_0 คือ เวกเตอร์ของค่าความแตกต่างของค่าฟรีแอร์อะนอมอลลี (free-air anomaly หรือเขียนย่อว่า FAA) ซึ่งเป็นค่าความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดได้และได้ถูกลดทอนให้มีขนาดที่เหมาะสมในการคำนวณความสูงขี้อยัดที่จุดตัดระหว่างแนวกบินที่เลือกไว้ใช้เป็นจุดจริง, K คือ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของสมการเงื่อนไขและ X เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ

2.3 การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบิน

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่รังวัดได้หลังจากได้ข้อมูลที่ถูกกรองแล้ว จะนำมาคำนวณปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินเพื่อทำให้ข้อมูลที่รังวัดในแต่ละแนวกบินมีความคงเส้นคงวา อีกทั้งเป็นการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลด้วยว่ามีความคลาดเคลื่อนเท่าใด จากการพิจารณาที่จุดตัดระหว่างข้อมูลแนวกบินเหนือ - ใต้และแนวกบินตะวันออก - ตะวันตก



รูปที่ 2 แสดงจุดตัดระหว่างแนวกบิน

จากรูปที่ 2 เขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ที่แนวกบินตามยาว (along-tracks) ดังสมการที่ (5) และแนวกบินตามขวาง (cross-tracks) ดังสมการที่ (6)

$$y_{l_m} = m_{l_m} X_{l_m} + b_{l_m} \quad (5)$$

$$y_{C_m} = m_{C_m} X_{C_m} + b_{C_m} \quad (6)$$

เมื่อ y_{l_m} คือ ค่า FAA ที่แนวกบินตามยาวแนวกบินที่ m , y_{C_m} คือ ค่า FAA ที่แนวกบินตามขวางแนวกบินที่ m และ X คือ ค่าพารามิเตอร์ของความชันและ b คือ จุดตัดแกน

2.4 ทฤษฎีในการลดทอนอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีลีสต์แคว์คอลโลเคชัน

หลักการสถิติแบบลีสต์แคว์คอลโลเคชัน (least-squares collocation) [1,5,6,11,13] ถูกนำมาใช้ในการลดทอนอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งผนวกข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดต่างระดับความสูงและต่างชนิดของการรังวัดเข้าด้วยกัน โดยคำนึงถึงลักษณะทางสถิติของข้อมูลที่วัดต่างชนิดกัน โดยที่ FAA จะต้องผ่านกระบวนการลดทอนอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลางด้วยระยะกริดที่เหมาะสมดังสมการ (7) ต่อไปนี้

$$\Delta \bar{g} = C_{\Delta g \Delta g} (C_{\Delta g \Delta g} + D_{\Delta g \Delta g})^{-1} \Delta g \quad (7)$$

เมื่อ $\Delta \bar{g}$ คือ ค่าทำนายของฟรีแอร์อะนอมอลลีที่จุดที่ต้องการหาค่า, Δg คือ ชุดข้อมูลที่ได้จากการรังวัดทาง

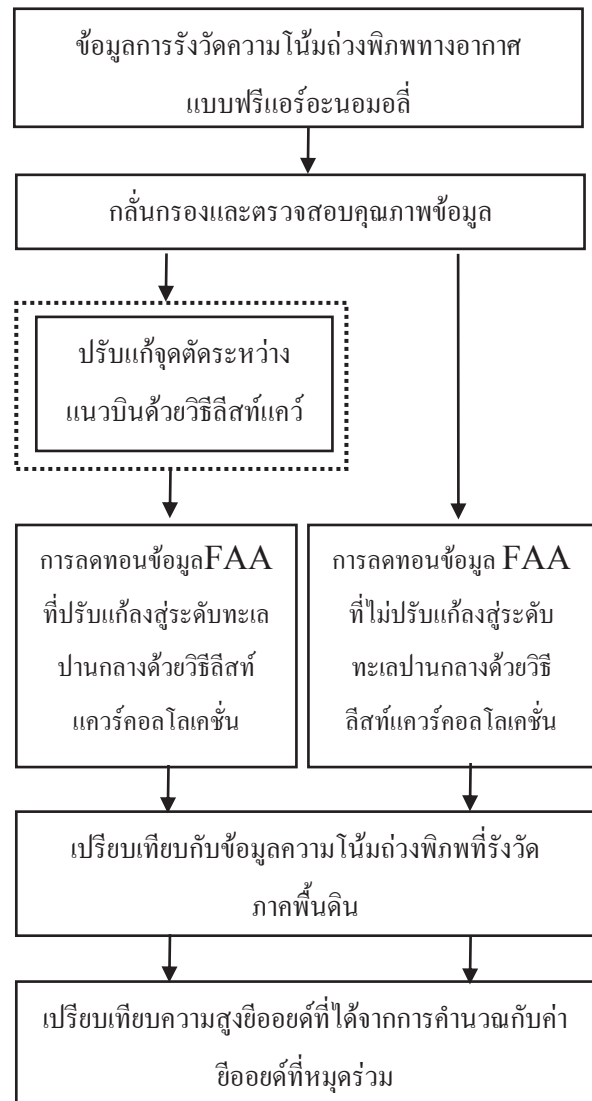
อากาศ $C_{\Delta g \Delta g}, C_{\Delta g \Delta g}, D_{\Delta g \Delta g}$ คือเมตริกความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าทำนายและค่าสังเกต และระหว่างค่าสังเกตด้วยกันและ ค่ารบกวนด้วยกัน ตามลำดับ

3. วิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำวิจัยตั้งแต่การเตรียมข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่กรมแผนที่ทหารทำการรังวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 โดยนำข้อมูลดิบมาทำการวิเคราะห์และตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็นสองชุดคือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวมินและข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวมินด้วยวิธีลิสต์แคว์ และทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลางด้วยวิธีลิสต์แคว์คอลโลเคชั่น ตลอดจนการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดภาคพื้นดินและเปรียบเทียบกับความสูงยิออซด์ที่ได้จากการคำนวณกับค่ายิออซด์ที่ห้มาพร้อม ซึ่งกระบวนการในการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ในรูปที่ 3

3.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศซึ่งได้มาจากการรังวัดโดยใช้เครื่องบิน Beechcharft Super King Air B200 ที่มีการติดตั้งเครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ ชื่อว่า TAGS-6 (Turnkey Airborne Gravity System 6) [9] และในขณะที่ทำการรังวัดต้องมีผู้ควบคุมซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุม ดูแล ตรวจสอบการทำงานของ TAGS-6 แสดงในรูปที่ 4

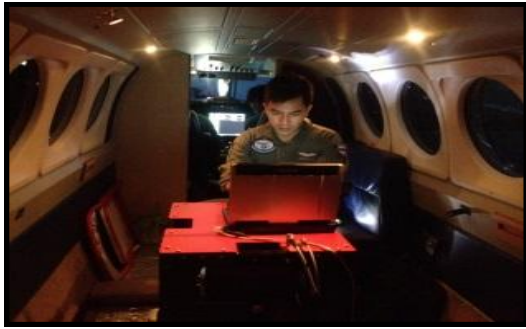


รูปที่ 3 กระบวนการในการวิจัย

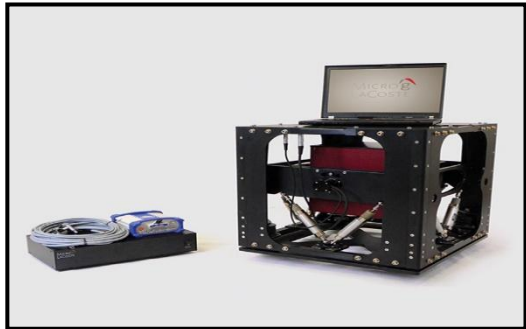


(ก)

รูปที่ 4 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานเก็บข้อมูล
(ก) เครื่องบิน Beechcharft Super King Air B200,
(ข) ผู้ควบคุมในการรังวัด และ (ค) เครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ TAGS-6



(ข)

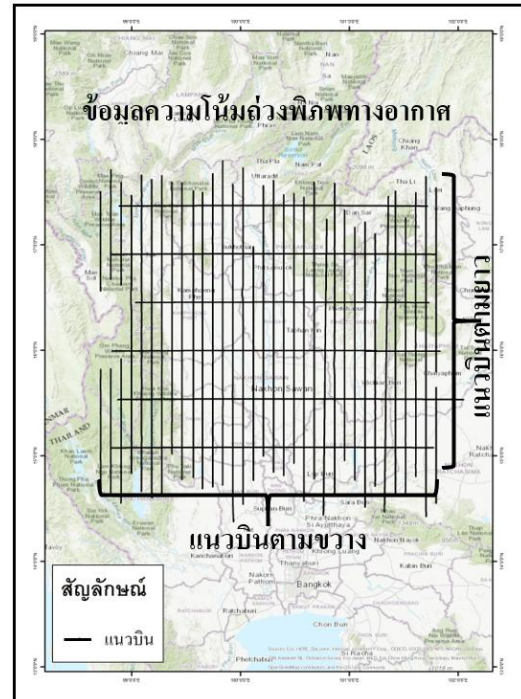


(ค)

รูปที่ 4 (ต่อ) อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานเก็บข้อมูล
(ก) เครื่องบิน Beechcraft Super King Air B200,
(ข) ผู้ควบคุมในการรังวัด และ (ค) เครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ TAGS-6

ในการบินตามแนวยาว (ทิศทางเหนือ-ใต้) ซึ่งแต่ละแนวบินจะห่างกันประมาณ 10 กิโลเมตร และทำการบินตามแนวตัดขวาง (ทิศทางตะวันออก - ตะวันตก) ซึ่งแต่ละแนวบินห่างกันประมาณ 50 กิโลเมตร ในวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ดังแสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่รังวัดใช้โปรแกรม PiperPro ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง TAGS-6 และ โปรแกรม AGSys6 เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศตามแนวบินที่ทำการรังวัด กรองสัญญาณเพื่อเป็นการขจัดสิ่งรบกวน (noise) ที่เกิดจากการรังวัด ข้อมูลที่ทุกๆช่วง 90 วินาที เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและมีคุณภาพมากที่สุด ส่วนข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินเป็นข้อมูลตามมาตรฐานของคณะกรรมการการรังวัดขั้นสูงปี ค.ศ.1984 (Federal Geodetic Control Committee1984 หรือเขียนย่อว่า FGCC1984) [10]

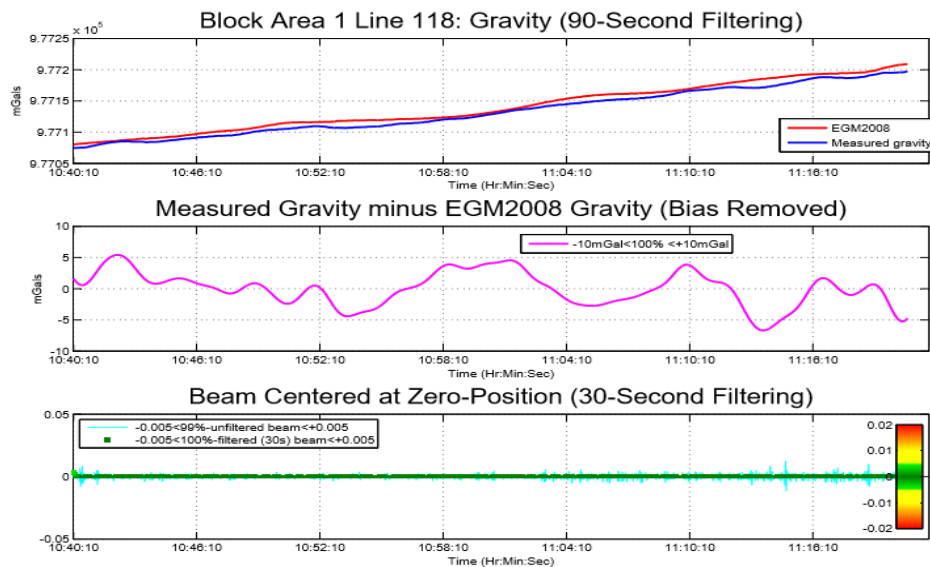
โดยทำการรังวัดด้วยเครื่อง Scintex CG-5 ซึ่งเป็นเครื่องมือรังวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินแบบสัมพัทธ์ผลิตโดยประเทศแคนาดา [11]



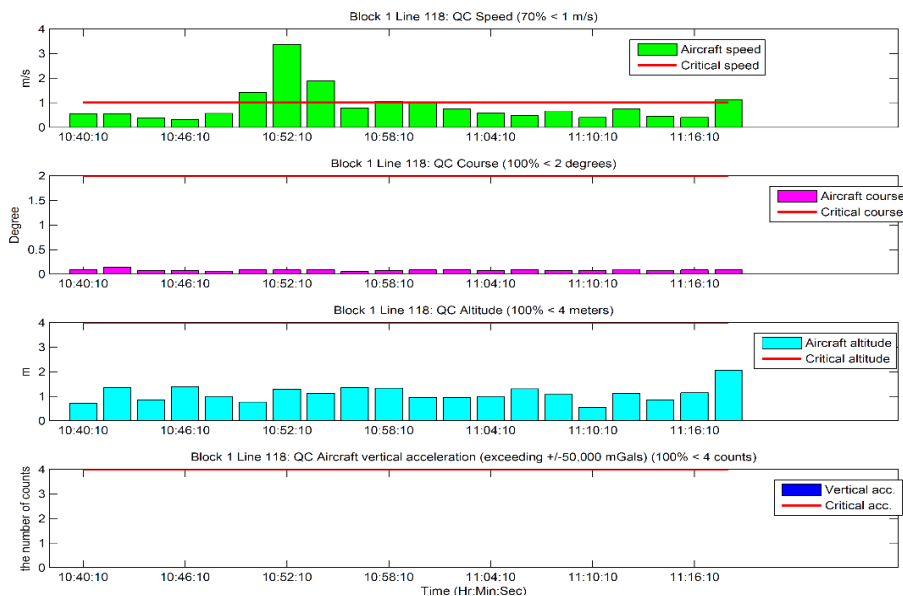
รูปที่ 5 แสดงข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศและพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

3.2 วิเคราะห์ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของข้อมูล

ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพนั้น ทำการนำข้อมูลดิบจากการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศมากรองข้อมูลเบื้องต้น เพื่อขจัดสิ่งรบกวน (noise) [11] ที่ได้จากการรังวัดออก จากนั้นนำข้อมูลไปทำการแสดงในรูปของกราฟเพื่อตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะของกราฟเมื่อเทียบกับEGM2008 เบื้องต้น ว่าข้อมูลดิบที่รังวัดได้นั้นมีแนวโน้มและทิศทางไปในแนวทางเดียวกันหรือไม่ ซึ่งค่าความแตกต่างของความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเมื่อเทียบกับEGM2008 ไม่ควรเกิน ± 10 mGal และค่าความคงที่ของแกนสปริง (spring beam) ไม่ควรเกิน ± 0.005 ตลอดแนวบิน ซึ่งค่าเกณฑ์เหล่านี้เป็นค่าที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทางสถิติว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ตรวจสอบข้อมูลของกรมแผนที่ทหารดังแสดงในรูปที่ 6



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ตัวอย่าง (ก) การกรองสัญญาณการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดทางอากาศกับ EGM2008 และ
(ข) การตรวจสอบการสั่นสะเทือนของเครื่องบินในขณะรังวัด

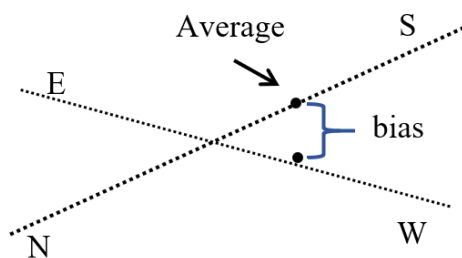
จากรูปประกอบด้วยกราฟแสดงความเร็วคงที่ของเครื่องบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรแปรเปลี่ยนเกิน 1 เมตรต่อวินาที ความสม่ำเสมอของทิศทางเหนือ-ใต้ในแต่ละแนวนบินไม่ควรต่างกันเกิน 2 องศาในแนวเหนือ-ใต้และความสม่ำเสมอของความสูงบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรต่างกันเกิน 4 เมตร กราฟแสดงความ

สม่ำเสมอของความเร่งในแนวดิ่งของเครื่องบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรเกิน 4 ครั้ง เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวได้จากข้อมูลที่เป็นมาตรฐานและเหมาะสมที่สุดทางสถิติในการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศบริเวณประเทศไทย จะสังเกตได้ว่ากราฟที่สูงผิดปกติเกินเกณฑ์ที่กำหนดเนื่องจากเครื่องบินเกิดการสั่นสะเทือนทั้งแนวนราบ

และแนวโค้งซึ่งมีผลทำให้ค่าความโน้มถ่วงพิพผันแปรได้ สาเหตุเนื่องมาจากสภาพอากาศในขณะที่บินเกิดสภาพความปั่นป่วนในอากาศขึ้นเป็นระยะๆ ทำให้ค่าความโน้มถ่วงพิพที่รังวัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น หากพิจารณาแล้วว่าข้อมูลเกิดข้อผิดพลาดสูงจึงจำเป็นที่จะต้องตัดข้อมูลที่คลาดเคลื่อนสูงทิ้งไปหากข้อมูลเกือบ 30 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมดในแนวนั้นๆ เกิดความคลาดเคลื่อนสูงจะทำการขึ้นบินรังวัดแนวนั้นใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ดีที่สุด

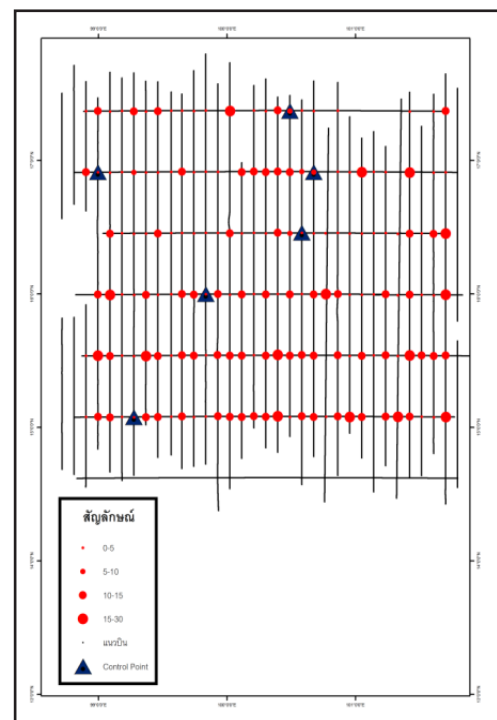
3.3 การพิจารณาจุดตัดระหว่างแนวนบิน

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพที่รังวัดได้หลังจากที่ได้ทำการกรองสัญญาณเพื่อเป็นการขจัดสิ่งรบกวนที่เกิดจากการรังวัดข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและมีคุณภาพมากที่สุด ข้อมูลที่กรองแล้วจะต้องถูกนำมาคำนวณปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินเพื่อที่จะทำให้ข้อมูลที่วัดในแต่ละแนวนบินมีความคงเส้นคงวา อีกทั้งเป็นการตรวจสอบคุณภาพเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูล จากการพิจารณาที่จุดตัดระหว่างข้อมูลแนวนบินเหนือ-ใต้ (along-track) และข้อมูลแนวนบินตะวันออก - ตะวันตก (cross-track) โดยการปรับแก้จุดตัดด้วยวิธีลิสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วค่าความโน้มถ่วงพิพทางอากาศที่จุดตัดระหว่างแนวนบินควรมีค่าความแตกต่างเป็นศูนย์ซึ่งขนาดของค่าความแตกต่างหรือที่เรียกว่า ค่าความเบี่ยงเบน (bias) ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่เกิดขึ้นสามารถนำมาพิจารณาความถูกต้องเบื้องต้นของผลการรังวัดทางอากาศได้จากการพิจารณาค่าทางสถิติของค่าต่างที่จุดตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7 แสดงจุดตัดระหว่างแนวนบินที่จะทำการหาค่าเบี่ยงเบน (bias)

หลังจากคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนครบทุกจุดตัดเรียบร้อยแล้ว จะเลือกจุดตัดที่มีค่าดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของจุดตัดระหว่างแนวนบินหรือความเบี่ยงเบน (bias) ที่น้อยที่สุดโดยจำนวนจุดตัดที่ใช้จริงต้องเลือกให้เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด มาทำการตรึง (fix) ก่อนทำการปรับแก้แบบลิสต์แคว์ จากนั้นนำไปปรับแก้โดยฟอร์มสมการ $y = ax + b$ โดยที่ a คือความชัน (slope) และ b คือ ค่าคงที่ สามารถเขียนในรูปของเมตริกเพื่อนำไปคำนวณในโปรแกรม Matlab เพื่อปรับแก้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศทั้งหมดตามข้อ 2.2 ในงานวิจัยนี้จะเลือกจุดตัดทั้งหมด 6 ค่า เป็นหมุดตรึงแสดงในรูปที่ 8 โดยแต่ละจุดตัดมีความแตกต่างไม่เกิน 2 มิลลิแกล ซึ่ง เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดใน การปรับแก้ลิสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่ได้เลือกตำแหน่งหมุดบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันออกเฉียงใต้เนื่องจากข้อมูลความโน้มถ่วงพิพบริเวณนี้ได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของเครื่องบินค่อนข้างมาก



รูปที่ 8 แสดงการเลือกจุดตัดที่มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดเพื่อใช้ในการตรึง

3.4 การลดทอนลงอย่างต่อเนื่องค่าความโน้มถ่วงพิพทางอากาศ

ในการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศ จะนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบและปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินมาทำการลดทอนข้อมูลรังวัดที่ระดับเพดานบินประมาณ 4,000 เมตร ลงสู่ผิวระดับทะเลปานกลางด้วยระยะกริดที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม Gravsoft ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองฮิโอด [4] สำหรับข้อมูลที่ผ่านกระบวนการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องแล้วจึงทำการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

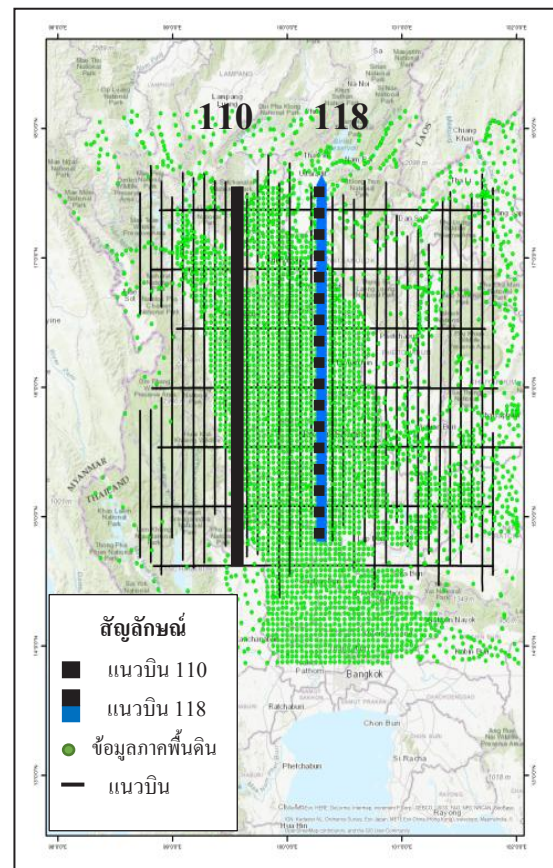
3.5 การวิเคราะห์ผล

3.5.1 การเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิพภาคพื้นดิน

การเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิพภาคพื้นดิน หลังจากที่ได้ทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศก็จะได้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศที่อยู่ระดับทะเลปานกลาง จากนั้นแบ่งข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศออกเป็นสองชุดข้อมูล คือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินกับข้อมูลทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบิน ส่วนข้อมูลภาคพื้นดินนั้นนำมาจากที่ทางกรมแผนที่ทหารรังวัดทั้งหมดประมาณ 2,000 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกันประมาณ 5 กิโลเมตร ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา จากนั้นนำข้อมูลภาคพื้นดินมาทำการประมาณค่าภายใน (interpolation) เพื่อทำให้ข้อมูลภาคพื้นดินอยู่ในรูปของกริดโดยใช้โปรแกรม ArcGIS สำหรับขั้นตอนการเปรียบเทียบผู้วิจัยจะเลือกมาสองแนวนบิน คือแนวนบินที่ 110 และ 118 โดยพิจารณาแล้วว่าเป็นแนวนบินที่มีลักษณะของข้อมูลที่ดีที่สุดและอยู่บริเวณที่มีข้อมูลความโน้มถ่วงภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควรเพื่อให้การเปรียบเทียบนั้น ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในการประเมินผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติในการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองหรือ root mean square (rms.) เพื่อประเมินความถูกต้องดังสมการ (8) ต่อไปนี้

$$rms = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (8)$$

เมื่อ x คือ ค่า FAA ที่รังวัดทางอากาศ, $\bar{X}$ คือ ค่า FAA ที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดิน, n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด หลังจากทำการเปรียบเทียบก็จะนำข้อมูลทั้งหมดคือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบิน ข้อมูลทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินและข้อมูลความโน้มถ่วงพิพภาคพื้นดิน มาวิเคราะห์ในลักษณะของกราฟเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกันแล้ว



รูปที่ 9 ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศเลือกสองแนวนบินเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดิน

3.5.2 เปรียบเทียบความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่หุดร่วม

ในการเปรียบเทียบความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่คำนวณได้จากหุดร่วม GNSS และค่าระดับโดยหลังจากที่ได้ทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศลงสู่ระดับทะเลปานกลางที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 ลิปดา ซึ่งเป็นระยะกริดที่เหมาะสมที่สุด [11] โดยนำข้อมูลทั้งสองชุดคือข้อมูลที่ไม่ปรับแก้และข้อมูลที่ปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนินมาคำนวณแบบจำลองขี้อยอด ซึ่งในการคำนวณแบบจำลองขี้อยอดนั้น จะใช้ทฤษฎีของโมโลเดนสกี [13] ซึ่งเป็นการคำนวณขี้อยอด โดยผ่านกระบวนการคำนวณหาความสูงอะนอลมอลลี (height anomaly) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถหลีกเลี่ยงสมมุติฐานของสโตกส์ในการเคลื่อนย้ายมวลสารลงสู่ผิวขี้อยอด

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณขี้อยอดหรือเรียกว่าแบบจำลองขี้อยอดเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเปรียบเทียบกับความสูงขี้อยอดที่ได้จากหุดร่วมซึ่งเป็นหุดที่มีทั้งพิภพทางราบ - ทางดิ่งและค่าความโน้มถ่วงพิภพตามมาตรฐานชั้นที่ 1 โดยหุดร่วมที่จะนำมาทำการเปรียบเทียบบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยามีทั้งหมด 56 หุด โดยการหาความแตกต่างของความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่หุดร่วมโดยสามารถหาได้จากสมการ (9) ดังนี้

$$e = (h - H_{Kolak}) - N_{MSL} \quad (9)$$

โดยที่ e คือ ความแตกต่างความสูงขี้อยอด, h คือ ความสูงเหนือทรงรีได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS, H_{Kolak} คือ ความสูงออร์โทเมตริกที่อ้างอิงจุดกำเนิดจากเกาะหลักและ N คือ ความสูงขี้อยอดที่ได้จากแบบจำลองขี้อยอด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินนั้น โดยจะนำข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้และข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนินที่ลดทอนลงสู่ระดับทะเลปานกลาง ในการเปรียบเทียบของแต่ละชุดข้อมูลจะเลือกแนวนินที่ดีที่สุดสองแนวนิน งานวิจัยนี้จะเลือกแนวนิน 110 และ 118 จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องซึ่งได้ผลทางสถิติในตารางที่ 1

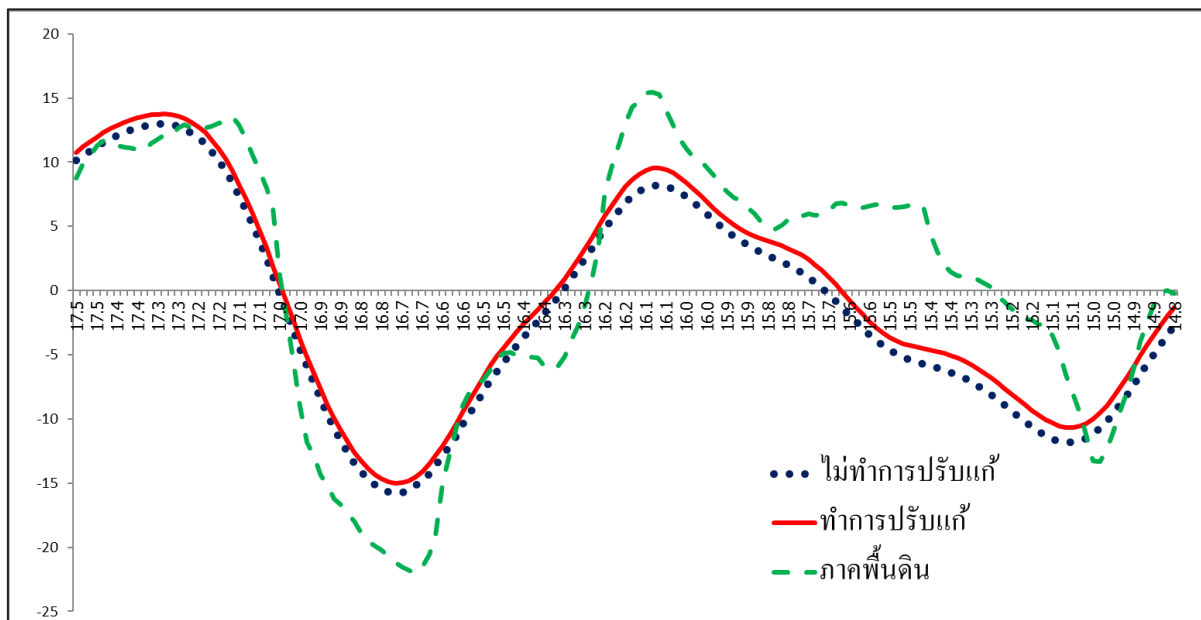
ตารางที่ 1 ค่าทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

เปรียบเทียบข้อมูลภาคพื้นดิน (mGal)				
ชนิดข้อมูล	Min	Max	Mean	RMS
ไม่ทำการปรับแก้	-12.355	8.463	-0.096	4.485
ทำการปรับแก้	-11.203	7.505	-0.246	3.991

ผลจากการเปรียบเทียบทางสถิติจากตารางที่ 1 พบว่าข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนินแล้วจะมีค่าความถูกต้อง (rms) อยู่ที่ 3.991 มิลลิแกล ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนินซึ่งมีค่า (rms) อยู่ที่ 4.485 มิลลิแกล ผลการเปรียบเทียบสะท้อนให้เห็นว่า ข้อมูลที่ได้รับการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนินแล้วนั้นส่งผลทำให้ค่าความแตกต่างของค่าความโน้มถ่วงพิภพแต่ละจุดดัดระหว่างแนวนินมีความกระชับเข้าใกล้กันมากขึ้นกว่าข้อมูลเดิม และข้อมูลที่ปรับแก้แล้วมีค่าความชันที่มีความคงเส้นคงวามากขึ้น

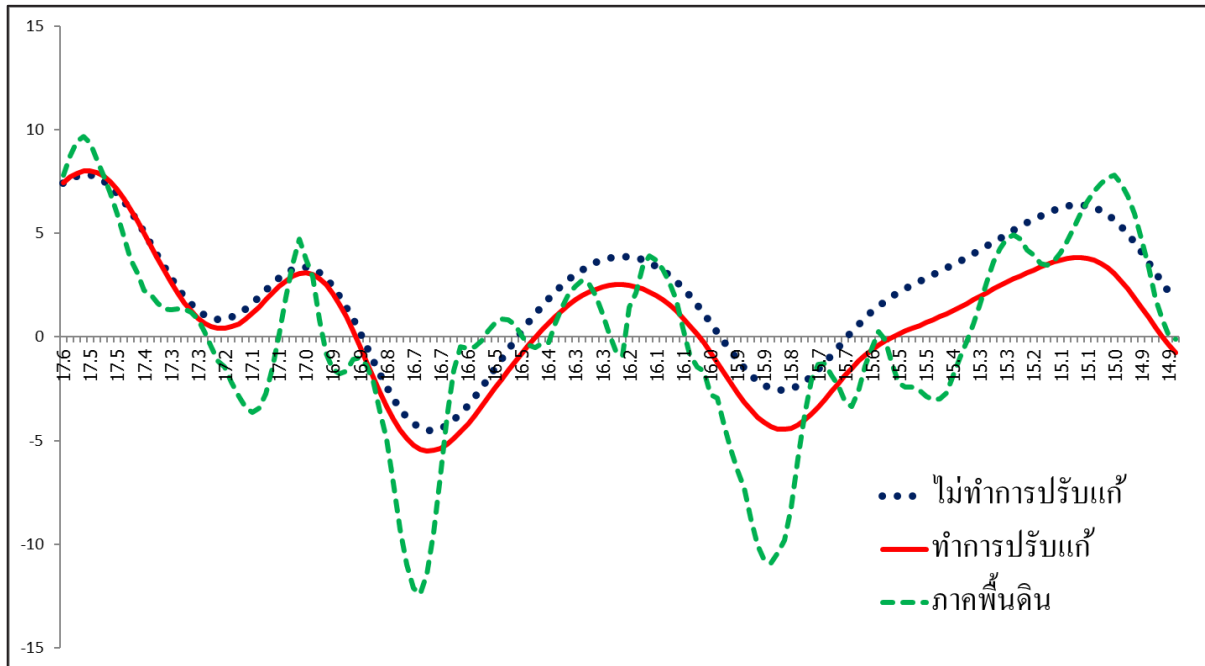
จากรูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้ของแนวนบิน 110 และ 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน ซึ่งเป็นการพิจารณาคุณภาพข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดทางอากาศ ว่าข้อมูลหลังจากทำการเปรียบเทียบกันแล้วมีความสอดคล้องกันของข้อมูลมากน้อยเพียงใด โดยการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดิน ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องค่อนข้างสูงและพิจารณาความสอดคล้องกันของสัญญาณโดยแสดงในรูปของกราฟ ในการเปรียบเทียบเพื่อทำการ

ตรวจสอบนั้นจะเลือกแนวนบินที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะอากาศในระหว่างการบินน้อยที่สุดและแนวนบินนั้นจะต้องอยู่บริเวณพื้นที่ที่มีข้อมูลภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกแนวนบินที่ 110 และ 118 เมื่อวิเคราะห์จากกราฟจะเห็นได้ว่าข้อมูลภาคพื้นดินมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้ นั่นหมายความว่าข้อมูลการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศนั้นมีคุณภาพค่อนข้างดีสอดคล้องกับข้อมูลภาคพื้นดิน



(ก)

รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินของแนวนบิน (ก) 110 และ (ข) 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน



(ข)

รูปที่ 10 (ต่อ) กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินของแนวนิน (ก) 110 และ(ข) 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

4.2 เปรียบเทียบค่าความสูงย้อยยด์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยยด์ที่หมุดร่วม

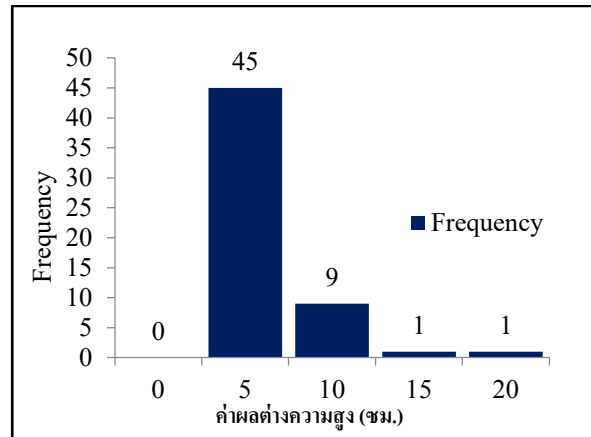
ในการเปรียบเทียบความสูงย้อยยด์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยยด์ที่หมุดร่วมนั้น หลังจากที่ได้ทำการลดทอนของข้อมูลทั้งสองชุดคือข้อมูลที่ไม่ปรับแก้และข้อมูลที่ปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินลงสู่ระดับทะเลปานกลางเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบจะต้องทำการคำนวณแบบจำลองย้อยยด์ของข้อมูลทั้งสองชุดนี้ก่อน โดยใช้โปรแกรม Gravsoft และนำมาเปรียบเทียบกับหมุดร่วม จำนวน 56 หมุด ในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งหมุดเหล่านี้เป็นหมุดที่มีค่าระดับทางดิ่งที่ได้จากการเดินระดับจริง ส่วนค่าทางราบและค่าความโน้มถ่วงพิภพวัดตามเกณฑ์งานชั้นที่ 1 ของกรมแผนที่ทหาร และนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลทางสถิติในการเปรียบเทียบผลต่าง 56

หมุด จะสังเกตได้ว่าความสูงย้อยยด์ที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินซึ่งให้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องที่ดีกว่าอยู่ที่ 9.6 เซนติเมตร ส่วนความสูงย้อยยด์ที่คำนวณจากข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (rms) อยู่ที่ 10 เซนติเมตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความถูกต้องของแบบจำลองย้อยยด์ที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน ดีกว่าและพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นพื้นที่ทำการวิจัยที่ได้รับผลกระทบจากขอบพื้นที่ (edge effect) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศทำให้ข้อมูลมีความคงเส้นคงวามากขึ้น ส่งผลให้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมุดร่วม ย่อมทำให้ความถูกต้องของความสูงย้อยยด์ที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้ดีกว่าข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้

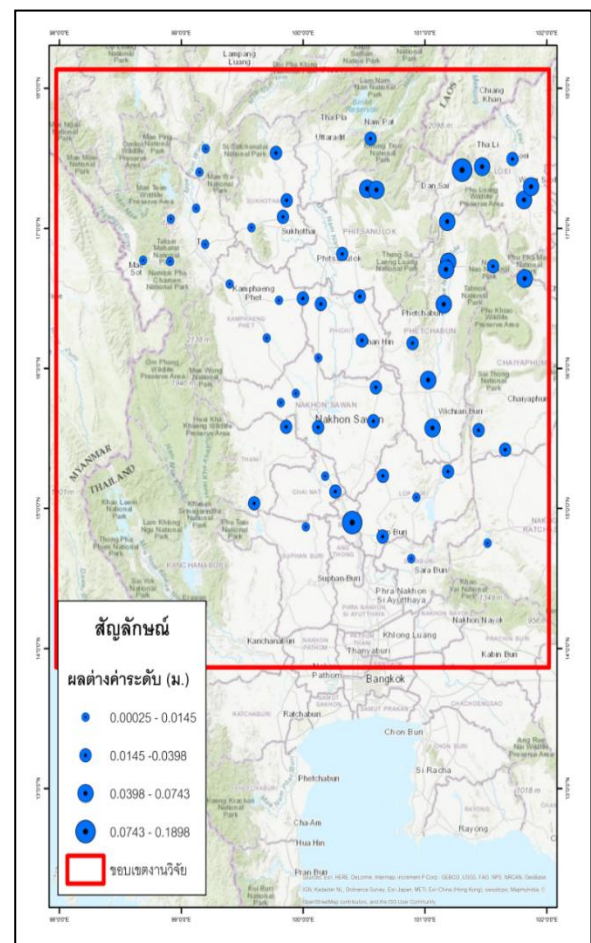
ตารางที่ 2 ค่าทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา

เปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา (m)				
ชนิดข้อมูล	Min	Max	Mean	RMS.
ไม่ทำการปรับแก้	0.710	1.354	0.940	0.100
ทำการปรับแก้	0.693	1.303	0.934	0.096

ส่วนจากรูปที่ 11 แสดงแผนภูมิและตำแหน่งของผลต่างจากการเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดเพื่อทำการตรวจสอบที่ห้มาจำนวน 56 หุมด บริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ที่มีระยะห่างระหว่างหุมดตั้งแต่ 30 – 50 กิโลเมตร ซึ่งหุมดรวมเป็นหุมดที่มีค่าระดับตามมาตรฐานงานชั้นที่ 1 (FGCC1984) จากแผนภูมิจะเห็นว่าหุมดส่วนใหญ่ทั้งหมด 54 หุมด นั้นมีผลต่างไม่เกิน 10 เซนติเมตร แต่มีเพียงสองหุมดที่มีขนาดโตกว่า 10 เซนติเมตร ซึ่งจะอยู่บริเวณเทือกเขาสูงและพื้นที่ราบลุ่มบางพื้นที่ อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ นั้น สาเหตุอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์การรังวัดหรือความคลาดเคลื่อนจากผู้รังวัดในขณะนั้นก็ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 (ก) แผนภูมิแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา (ข) ภาพแสดงตำแหน่งของหุมดรวมจำนวน 56 หุมด บริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา

5. สรุป

จากการวิจัยสรุปได้ว่าข้อมูลที่นำมาใช้ทำวิจัยทั้งหมด นำมาจากทางกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้ทำการรังวัดใน โครงการพัฒนาแบบจำลองฮัยดรอกราฟ ความละเอียดสูงของ ประเทศไทยในปี พ.ศ.2558-2560 ทั้งข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศและข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา กระบวนการตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพข้อมูลเบื้องต้น โดยการนำ EGM2008 มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินด้วยวิธีลีสต์แคว์เพื่อปรับให้ความชัน (slope) ของข้อมูลแนวนินเหนือ -ใต้ และ แนวนิน ตะวันตก - ตะวันออก มีความคงเส้นคงวา ทำให้ค่าความแตกต่างของค่าความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ (FAA) ที่จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น และทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลาง ด้วยวิธีลีสต์แคว์คอลโลเคชัน ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินจากข้อมูลภาคพื้นดินประมาณ 2,000 จุด โดยจะเลือกแนวนินที่ดีที่สุดสองแนวนินและอยู่ ณ บริเวณที่มีข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควร เพื่อเปรียบเทียบผล เมื่อวิเคราะห์ผลปรากฏว่า ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าความถูกต้อง 4.484 มิลลิเมตร

ส่วนข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน มีค่าความถูกต้อง 3.991 มิลลิเมตร จากหมุดร่วมทั้งหมด 56 หมุด ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา เมื่อเปรียบเทียบกับความสูงฮัยดรอกราฟที่ได้จากการคำนวณกับค่าฮัยดรอกราฟผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่า โดยที่ค่าความถูกต้อง 0.096 เมตร ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าความถูกต้อง 0.100 เมตร สามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการรังวัดข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นที่จะทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก พล.ต.ชัยวัฒน์ พรหมทอง หัวหน้าโครงการพัฒนาแบบจำลองฮัยดรอกราฟความละเอียดสูงของประเทศไทย กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย ภายใต้แผนยุทธศาสตร์การบริหารจัดการน้ำระยะเร่งด่วน ปีงบประมาณปี พ.ศ. 2558-2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kotsakis, C. Least-squares collocation with covariance-matching constraints. *Journal of Geodesy*, 2007; 81(10): 661-677.
- [2] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.K. and Factor, J.K. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research*, 2012; 117, B04406, doi: 10.1029/2011JB008916.
- [3] Dumrongchai, P., Wichienchareon, C. and Promtong, C. Local Geoid Modeling for Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 2012; 8(4):15-26.
- [4] Forsberg, R. and Tscherning, C. An Overview Manual for the GRAVSOFIT Geodetic Gravity Field Modelling Programs. National Space Institute (DUT-Space) and Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark, 2008.
- [5] Forsberg, R. A New Covariance Model for Inertial Gravimetry and Gradiometry. *Journal of Geophysical Research*, 1987; 92(B2), 1305-1310.
- [6] Forsberg, R. and Tscherning, C. The Use of Height Data in Gravity Approximation by Collocation. *Journal of Geophysical Research*, 1981; 86(B9): 7843-7854.
- [7] Heiskanen, W. and Moritz, H. Physical Geodesy. WH Freeman, San Francisco, 1967.

- [8] Serpas, J. G. and Jekeli, C. Local geoid determination from airborne vector gravimetry. *Journal of Geodesy*, 2005; 78(10), 577-587.
- [9] Micro-g LaCoste. TAGS Turnkey Airborne Gravity System. *AIR III Hardware & Operations Manual*, 2010.
- [10] Bossler, J.D. Standards and Specifications for Geodetic Control Networks. Federal Geodetic Control Committee, Rockville, Mary Land, USA, 1984.
- [11] พุทธิพล ดำรงชัย, ชัยวัฒน์ พรหมทอง, ชวิศ ศรีมณี. ผลเบื้องต้นของการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ สำหรับการคำนวณหาแบบจำลองขั้วออกซ์บริเวนลุ่มน้ำเจ้าพระยา. *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูล ระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย*, 2560; 18: 269-280.
- [12] Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M. H., Wang, Y. M., Williamson, R. G. Pavlis, E. C., Rapp, R. H. and Olson, T. R. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 20771, 1998.
- [13] Moritz, H. Advanced Physical Geodesy. Herbert Wichman Verlag, Karlsruhe, 1980.