การคำนวณหาแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบสำหรับกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทย

A CORRECTION MODEL OF HORIZONTAL COORDINATE FROM THE ITRF2005 TO ITRF2008 OF THAILAND

กรกฎ บุตรวงษ์[1,*], ทยาทิพย์ ทองต้น[2], เฉลิมชนม์ สถิระพจน์[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[2] กลุ่มงานมาตรฐานปฐมภูมิไฟฟ้าเวลาและความถี่, ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า, สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
[*]Corresponding author address: 6270004421@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกส่งผลกระทบโดยตรงต่อการระบุตำแหน่งด้วยค่าพิกัดและการอ้างอิงค่าพิกัดของตำแหน่งเดียวกันบนพื้นหลักฐานหรือกรอบพิกัดอ้างอิงสากลที่ต่างกันย่อมให้ค่าพิกัดที่แตกต่างกันด้วย โดยองค์กรและหน่วยงานในระดับสากลได้ปรับปรุงกรอบพิกัดอ้างอิงสากล (The International Terrestrial Reference Frame; ITRF) ให้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกมากยิ่งขึ้น ซึ่งหน่วยงานในประเทศไทยได้ศึกษาเรื่องการปรับปรุงระบบพิกัดอ้างอิงมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานสากล บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบสำหรับ ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย (1)พารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐานใช้วิธีการแปลงค่าพิกัดฉากสามมิติโดยพารามิเตอร์ 7 ตัวแปรด้วยแบบจำลอง Bursa-Wolf และแบบจำลอง Molodensky-Badekas และ (2)แบบจำลองค่าเศษเหลือ ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง 4 วิธีคือ IDW, Kriging, Natural Neighbor และ Spline แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง ผลปรากฏว่าแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Molodensky-Badekas และแบบจำลองค่าเศษเหลือด้วยวิธี IDW, Kriging, Natural Neighbor และ Spline ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อยู่ที่ 2.7, 2.4, 2.6 และ 2.7 ซม.ตามลำดับ ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองมาใช้ในการปรับแก้ค่าพิกัดทางราบสำหรับ ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ให้มีความถูกต้องอยู่ในระดับต่ำกว่า 3 ซม.ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงค่าพิกัดระหว่างหน่วยงานให้สอดคล้องกันและสามารถใช้งานค่าพิกัดร่วมกันระหว่างหน่วยงานในประเทศไทยได้

คำสำคัญ: *กรอบพิกัดอ้างอิงสากล, แปลงพื้นหลักฐาน, พารามิเตอร์, ประมาณค่าในช่วง, แบบจำลองค่าเศษเหลือ*

Abstract

Tectonic plate movement has a directly affect with coordinates and reference coordinates of the same position based on different datum or ITRF, will be different coordinates also. Nowadays, International organizations have been improving the International Terrestrial Reference Frame in accordance with plate tectonics. In Thailand, study to continuously improve of the coordinate reference system in accordance with the International Terrestrial Reference System. The objective of this article is to generate a correction model of horizontal coordinates from the ITRF2005 to ITRF2008 of Thailand; consisting of (1)Transformation Parameters to transform the three dimensional cartesian coordinates with 7 parameters by Bursa-Wolf and Molodensky-Badekas model and (2)Grid Residuals to interpolate using 4 methods by IDW, Kriging, Natural Neighbor and Spline method. Compared horizontal positioning accuracy by Root Mean Square Error (RMSE). The result shows that the correction model of horizontal coordinates by applying transformation parameters of Molodensky-Badekas model and grid residuals of IDW, Kriging, Natural Neighbor and Spline method give horizontal coordinate accuracy of confidence level 95% about 2.7, 2.4, 2.6 and 2.7 cm. respectively. Thus, this can improve the accuracy horizontal coordinates from the ITRF2005 to ITRF2008 in a few centimeters and can connect to the coordinates of other users in Thailand.

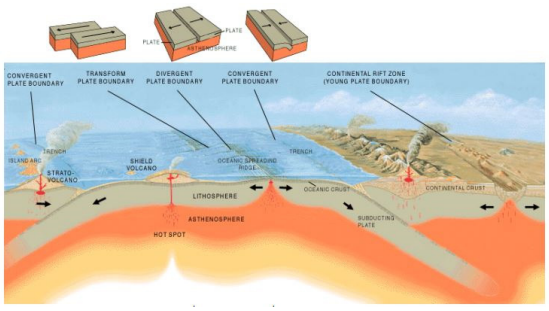
Keywords: *ITRF, Datum Transformation, Transformation Parameters, Interpolation, Grid Residuals*

1. บทนำ

ปัจจุบันองค์กรและหน่วยงานในระดับสากลได้กำหนดระบบพิกัดอ้างอิงสากล (The International Terrestrial Reference System; ITRS) และกรอบพิกัดอ้างอิงสากล (The International Terrestrial Reference Frame; ITRF) ให้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกมากยิ่งขึ้น ซึ่งถูกปรับปรุงดูแลโดยหน่วยงาน International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) โดยการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกนั้นจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการอ้างอิงค่าพิกัดจะทำให้การระบุตำแหน่งด้วยค่าพิกัดไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงของการเคลื่อนตัวของแผ่น

เปลือกโลก โดยหน่วยงานในประเทศไทยได้ศึกษาเรื่องการปรับปรุงระบบพิกัดอ้างอิงมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานสากล อาทิเช่น กรมที่ดินได้คำนวณปรับแก้หมุดดาวเทียมจำนวน 370 หมุดโดยโยงยึดเข้ากับหมุดควบคุมในโครงข่ายหลักของกรมแผนที่ทหารบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ที่ epoch2008.11 และได้ประกาศใช้ในราชการเมื่อตุลาคม พ.ศ.2552 ซึ่งใช้เป็นหมุดควบคุมหลัก (Major Control Points) ในการสร้างหมุดควบคุมย่อย (Minor Control Points) สำหรับงานขยายโครงข่ายหมุดหลักฐานแผนที่และงานรังวัดออกโฉนดที่ดินโดยวิธีแผนที่ชั้นที่หนึ่งให้กับประชาชน [1] ในเวลาต่อมากรมแผนที่ทหารซึ่งเป็นหน่วยงานหลักที่กำหนดโครงข่ายอ้างอิงของประเทศ (Zero Order Geodetic Network) ได้คำนวณปรับแก้หมุดควบคุมในโครงข่ายหลักจำนวน 18 หมุดใหม่โดยส่งข้อมูลรังวัดทั้งหมด 7 วัน เมื่อตุลาคม พ.ศ.2556 ไปประมวลผลค่าพิกัดที่สถาบัน Delft Institute for Earth-Oriented Space research (DEOS) ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยค่าพิกัดที่ได้อ้างอิงบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2008 ที่ epoch2013.10 และได้ประกาศใช้ในราชการตั้งแต่ปี พ.ศ.2557 เป็นต้นมา [2] ซึ่งจะพบว่ามีการใช้ค่าพิกัดบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากลที่ไม่สอดคล้องกัน จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผู้ใช้งานค่าพิกัดเกิดความสับสนและไม่สามารถนำค่าพิกัดไปใช้งานร่วมกันระหว่างหน่วยงานได้ โดยการอ้างอิงค่าพิกัดของตำแหน่งเดียวกันบนพื้นหลักฐานหรือกรอบพิกัดอ้างอิงสากลที่ต่างกันย่อมจะให้ค่าพิกัดที่แตกต่างกันด้วย

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นหลักฐานทั้งสองในการแปลงค่าพิกัดสำหรับกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทย ซึ่งจะเป็นการเชื่อมโยงค่าพิกัดระหว่างหน่วยงานให้สอดคล้องกัน เพื่อรองรับการปรับเปลี่ยนพื้นหลักฐานและปรับปรุงกรอบพิกัดอ้างอิงสากลของหน่วยงานในประเทศไทยให้เป็นมาตรฐานเดียวกันให้มีความถูกต้องสัมพันธ์ตามการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกมากยิ่งขึ้น อีกทั้งจะเป็นการเอื้อประโยชน์ต่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานสำรวจรังวัดหรือจัดทำแผนที่ในประเทศไทยต่อไป



รูปที่ 1 การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาการสร้างแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบและเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบสำหรับกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทย

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

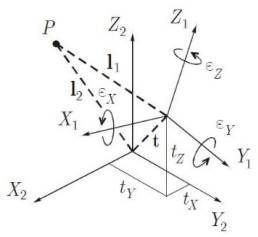
3.1. กรอบพิกัดอ้างอิงสากล (THE INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAMES)

ปัจจุบันกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF เป็นระบบพิกัดอ้างอิงที่มีความละเอียดสูงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานของโลก ปรับปรุงดูแลโดยหน่วยงาน IERS (International Earth Rotation Service) โดยถูกสร้างและพัฒนามาจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการรังวัดทางด้านยีออเดติกจากการรับสัญญาณจากอวกาศ (Space geodetic techniques) ประกอบด้วย Global Navigation Satellite System (GNSS), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Lunar and Satellite Laser Ranging (LLS, SLR) และ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) [3]

3.2. การแปลงพื้นหลักฐาน (DATUM TRANSFORMATION)

การแปลงพื้นหลักฐานเป็นการแปลงระบบพิกัดฉากสามมิติจะทำการแปลงค่าพิกัดให้อยู่ในรูปของค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียนและใช้พารามิเตอร์ 7 ตัวแปรด้วยแบบจำลองแบบ Helmert Transformation โดยใช้เทคนิคการปรับแก้ด้วยวิธีลีสแควร์ ประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ การเลื่อนแกน (Translation), การหมุนแกนรอบจุดกำเนิด (Rotation) และอัตราส่วนย่อขยาย (Scaling) ซึ่งจะใช้แบบจำลอง Bursa-Wolf และแบบจำลอง Molodensky-Badekas สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐาน

3.2.1. แบบจำลอง BURSA-WOLF

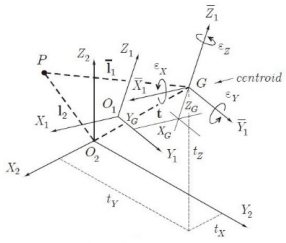


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Bursa-Wolf [4]

$$\boldsymbol{X = T + (1 + \Delta s)RU} \quad (1)$$

โดยที่ X คือ ค่าพิกัดฉากพื้นหลักฐานที่หนึ่ง, U คือ ค่าพิกัดฉากพื้นหลักฐานที่สอง, T คือ ค่าเลื่อนระหว่างจุดกำเนิดพื้นหลักฐานทั้งสอง (ΔX, ΔY, ΔZ), ΔS คือ ค่าต่างอัตราส่วนย่อขยาย และ R คือ ค่ามุมหมุนแกนรอบจุดกำเนิดของ U (R_X, R_Y, R_Z)

3.2.2. แบบจำลอง MOLODENSKY-BADEKAS



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Molodensky-Badekas [4]

$$\boldsymbol{X = T + (1 + \Delta s)R(U - U_G)} \quad (2)$$

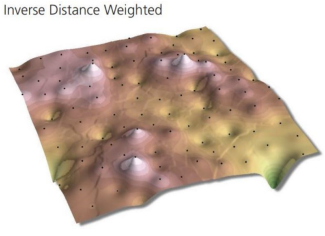
โดยที่ U_G คือ ค่าพิกัดฉากของจุดศูนย์ถ่วง (X_0, Y_0, Z_0)

3.3. การประมาณค่าในช่วง (INTERPOLATION)

การประมาณค่าในช่วงเป็นการวิเคราะห์และคาดการณ์โดยอาศัยจุดข้อมูลตัวอย่างด้วยการใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างข้อมูลพื้นผิวที่มีความต่อเนื่อง ได้เลือกใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง 4 วิธีประกอบด้วย Inverse Distance Weighted (IDW), Kriging, Natural Neighbor และ Spline สำหรับสร้างพื้นผิวค่าเศษเหลือ ซึ่งในแต่ละวิธีจะให้ข้อมูลพื้นผิวที่แตกต่างกัน และเลือกใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่ (Bi-Linear) สำหรับการทดสอบแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ

3.3.1. วิธี INVERSE DISTANCE WEIGHTED (IDW)

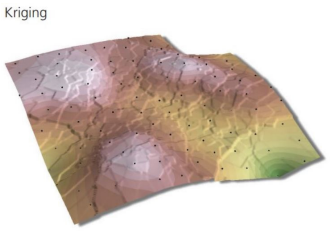
เป็นวิธีการประมาณค่าโดยคำนวณค่าจากจุดข้อมูลตัวอย่างแต่ละจุดสัมพันธ์กับระยะทาง ถ้าจุดที่ต้องการประมาณค่าอยู่ใกล้จุดข้อมูลตัวอย่างก็จะมีผลกระทบของค่ามาก แต่ถ้าอยู่ไกลออกไปจะมีผลกระทบน้อยลง



รูปที่ 4 พื้นผิวที่ประมาณค่าด้วยวิธี IDW [5]

3.3.2. วิธี KRIGING

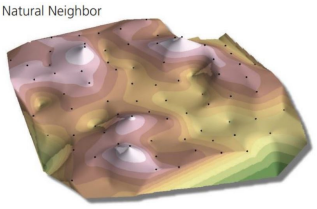
เป็นวิธีการประมาณค่าที่สันนิษฐานจากระยะทางหรือทิศทางระหว่างจุดข้อมูลตัวอย่างแต่ละจุด โดยเลือกสมการคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับจุดข้อมูลตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าทางสถิติจากความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างจุดข้อมูลตัวอย่างด้วยแบบจำลองเซมิเวริโอแกรม (Semi-Variogram) และระยะทาง (Distance) เพื่อนำมาใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักในการประมาณค่าจุดที่ต้องการทราบค่า



รูปที่ 5 พื้นผิวที่ประมาณค่าด้วยวิธี Kriging [5]

3.3.3. วิธี NATURAL NEIGHBOR

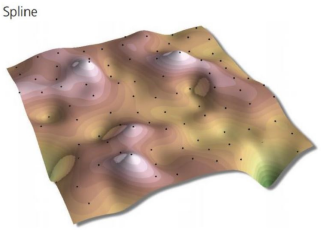
เป็นวิธีการประมาณค่าโดยอาศัยค่าน้ำหนักตามความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ของรูปโพลิกอนที่เรียกว่าโวโรนอย (Voronoi) ในเบื้องต้นจะสร้างโวโรนอยรอบจุดข้อมูลตัวอย่างขึ้นมาก่อน จากนั้นจะสร้างโวโรนอยรอบจุดที่ต้องการประมาณค่าขึ้นมาใหม่ แล้วคำนวณค่าน้ำหนักตามอัตราส่วนขนาดพื้นที่ของโวโรนอยที่ซ้อนทับกัน โดยจะใช้จุดข้อมูลตัวอย่างที่อยู่ใกล้เคียงและล้อมรอบจุดที่ต้องการประมาณค่าทุกจุดในการคำนวณ



รูปที่ 6 พื้นผิวที่ประมาณค่าด้วยวิธี Natural Neighbor [5]

3.3.4. วิธี SPLINE

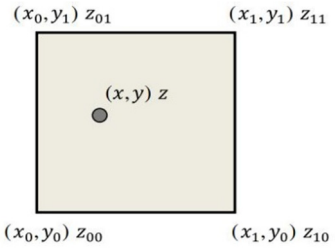
เป็นวิธีการประมาณค่าให้พอดีเป็นพื้นผิวที่มีความโค้งเว้าอย่างน้อยตามจุดข้อมูลตัวอย่างที่นำเข้ามาเหมือนกับการบิดงอของแผ่นยางให้ผ่านจุดข้อมูลตัวอย่าง โดยพยายามให้มีแนวโน้มสร้างสมการให้ความโค้งเข้าหาจุดข้อมูลตัวอย่าง เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างเส้นโค้งเล็ก ๆ บนระนาบหรือแผ่นแบน ๆ โดยต้องผ่านจุดข้อมูลตั้งต้นเสมอ



รูปที่ 7 พื้นผิวที่ประมาณค่าด้วยวิธี Spline [5]

3.3.5. วิธี Bi-Linear

เป็นการประมาณค่าด้วยจุดข้อมูลตัวอย่างในลักษณะ กริด จำนวน 4 ตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียงและล้อมรอบตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า โดยการคำนวณตามระยะทางและให้ค่าน้ำหนักกับจุดข้อมูลตัวอย่างที่อยู่ใกล้มากกว่าจุดข้อมูลตัวอย่างที่อยู่ไกล



$$z = f(x) = (1-s)(1-t)z_{00} + (1-s)tz_{01} + s(1-t)z_{10} + stz_{11}$$

โดยที่ $s = \frac{x-x_0}{x_1-x_0}$

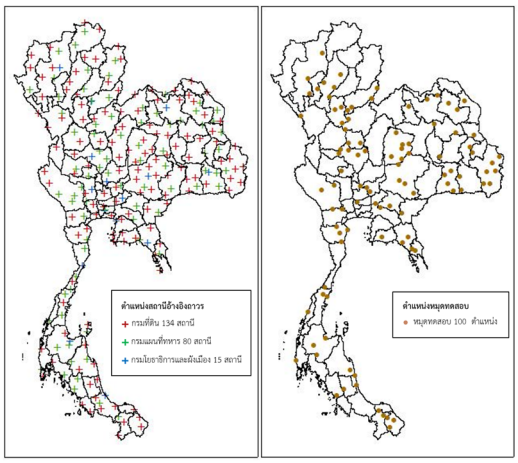
$t = \frac{y-y_0}{y_1-y_0}$

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของการประมาณค่าวิธี Bi-Linear [6]

4. ขอบเขตการวิจัย

4.1. พื้นที่ในการศึกษา

โครงข่ายสถานีอ้างอิงถาวร 229 สถานี ประกอบด้วย กรมที่ดิน 134 สถานี, กรมแผนที่ทหาร 80 สถานี และกรมโยธาธิการและผังเมือง 15 สถานี และหมุดทดสอบ 100 ตำแหน่งที่กระจายตัวทั่วพื้นที่ประเทศไทย



รูปที่ 9 ตำแหน่งสถานีอ้างอิงถาวรและหมุดทดสอบ

4.2. ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย (1)ข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ ได้แก่ ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ของสถานีอ้างอิงถาวร 229 สถานีในห้วง 1-6 มีนาคม พ.ศ.2563 และค่าพิกัด ITRF2005 และ ITRF2008 ของสถานีอ้างอิงถาวร และ (2)ข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ ได้แก่ ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ของสถานีอ้างอิงถาวรและหมุดทดสอบ 100 ตำแหน่งในห้วง 8-26 พฤศจิกายน พ.ศ.2563

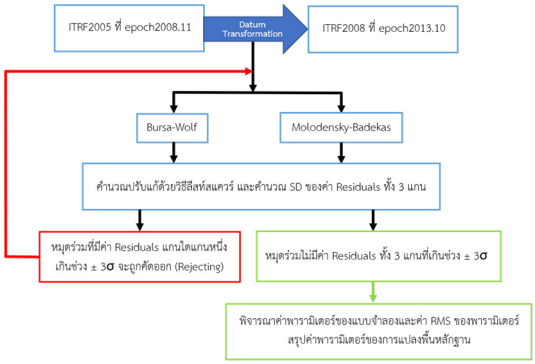
5. วิธีดำเนินการวิจัย

5.1. ประมวลผลค่าพิกัดของหมุดร่วมและหมุดทดสอบบนพื้นหลักฐานทั้งสอง

การประมวลผลค่าพิกัดของหมุดร่วม 214 สถานี ประกอบด้วย กรมที่ดิน 134 สถานี และกรมแผนที่ทหาร 80 สถานีจะใช้วิธีการเลือกเส้นฐานอิสระในการสร้างโครงข่ายที่มีจำนวนรูปปิดสามเหลี่ยมย่อย ๆ ให้มากที่สุด แล้วประมวลผลเส้นฐานโดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double differencing) แล้วตรวจสอบความคลาดเคลื่อนและคุณภาพของเส้นฐานตามเกณฑ์งานชั้น B ของ FGCC1989 [7] จากนั้นคำนวณปรับแก้โครงข่ายร่วมกันด้วยวิธีปรับแก้ลีสท์สแควร์แบบ Fully Constrained โดยการยึดตรึงค่าพิกัด ITRF2005 ที่ epoch2008.11 และ ITRF2008 ที่ epoch2013.10 เข้ากับโครงข่ายตามลำดับ ในส่วนการประมวลผลค่าพิกัดของหมุดร่วมจากกรมโยธาธิการและผังเมือง 15 สถานีและหมุดทดสอบ 100 ตำแหน่งจะใช้การโยงยึดค่าพิกัด ITRF2005 ที่ epoch2008.11 และ ITRF2008 ที่ epoch2013.10 ของโครงข่ายหมุดร่วมที่อยู่ใกล้ที่สุด 2 สถานีตามลำดับ

5.2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐาน

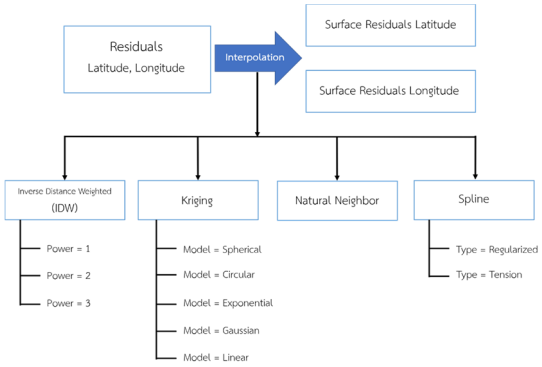
การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแปลงพื้นหลักฐานจาก ITRF2005 ที่ epoch2008.11 และ ITRF2008 ที่ epoch2013.10 ด้วยแบบจำลอง Bursa-Wolf และแบบจำลอง Molodensky-Badekas ซึ่งการคำนวณจะใช้เทคนิคการปรับแก้แบบลีสท์สแควร์ จากนั้นพิจารณาค่าเศษเหลือของหมุดร่วมที่คลาดเคลื่อนเกินช่วง $\pm 3\sigma$ ออกจากการคำนวณครั้งต่อไปจนกว่าจะไม่มีหมุดร่วมที่มีขนาดใหญ่หลงเหลืออยู่



รูปที่ 10 ขั้นตอนคำนวณหาพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐาน

5.3. คำนวณหาค่าเศษเหลือและประมาณค่า

หาค่าต่างพิกัดทางราบบนกรอบ ITRF2008 ที่ epoch2013.10 ระหว่างค่าพิกัดทางราบที่ได้จากการประมวลผลค่าพิกัดและค่าพิกัดทางราบที่ได้จากการแปลงพื้นหลักฐานด้วยพารามิเตอร์ในโครงข่ายหมุดร่วม 229 สถานี จากนั้นประมาณค่าเศษเหลือด้วย 4 วิธี ประกอบด้วย (1)วิธี IDW ใช้ค่ายกกำลัง (Power) 1, 2 และ 3, (2)วิธี Kriging ใช้แบบจำลอง (Semi-variogram model) Spherical, Circular, Exponential, Gaussian และ Linear, (3)วิธี Natural Neighbor และ (4)วิธี Spline ใช้ประเภท (Spline type) Regularized และ Tension รวมทั้งหมดเป็น 11 เงื่อนไข โดยกำหนดขนาดเซลล์ (Cell size) ของข้อมูลแรสเตอร์ในการประมาณค่าเท่ากับ 1 ลิปดา หรือประมาณ 1.85 กม.และขอบเขตการประมาณค่าในช่วง (Processing Extent) อยู่ที่ 97° - 106°E และ 5° - 21°N ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย



รูปที่ 11 ขั้นตอนการประมาณค่าเศษเหลือ

5.4. สร้างแบบจำลองค่าเศษเหลือและแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ

สร้างตำแหน่งกริดที่มุมร่วมของกริดที่ระยะ 1 ลิปดา หรือประมาณ 1.85 กม.ให้ครอบคลุมพื้นที่ 97° - 106°E และ 5° - 21°N จากนั้นคำนวณค่าพิกัดทางราบของตำแหน่งกริดและดึงค่าเศษเหลือพิกัดทางราบจากพื้นผิวค่าเศษเหลือพิกัดทางราบมาเก็บไว้ตามตำแหน่งของกริด ซึ่งจะได้ตำแหน่งกริดที่ระยะ 1 ลิปดา หรือประมาณ 1.85 กม.ที่บรรจุค่าพิกัดทางราบและค่าเศษเหลือพิกัดทางละติจูดและลองจิจูดตามตำแหน่งกริดด้วย จากนั้นปรับแก้ไขไฟล์ให้ตรงตามรูปแบบของ CSCS Model [8] ซึ่งเป็นแบบจำลองสำหรับเก็บค่าปรับแก้ค่าพิกัด โดยกำหนดให้แบบจำลองของการปรับแก้ (Model types) เป็นระบบพิกัดภูมิศาสตร์, ใช้วิธีการประมาณค่าเศษเหลือ (Interpolation Method) แบบเชิงเส้นคู่ (Bi-Linear), ใช้ตำแหน่งเริ่มต้นที่มุมล่างซ้าย (5° N, 97° E) และสิ้นสุดที่มุมบนขวา (21° N, 106° E) และให้มีทิศทาง (Reading direction) จากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก (W-E) และทิศใต้ขึ้นไปทิศเหนือ (S-N) ตามลำดับ

5.5. เปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบ

การเปรียบเทียบความถูกต้องค่าพิกัดทางราบในระบบพิกัด UTM ระหว่างค่าพิกัดทางราบบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2008 ที่ epoch2013.10 กับค่าพิกัดทางราบบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ที่ epoch2008.11 ที่ได้จากหัวข้อ 5.1 มาแปลงพื้นหลักฐานด้วยแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ โดยการคำนวณหาค่าต่างทางทิศตะวันออก (ΔE) และทางทิศเหนือ (ΔN) แล้วคำนวณความคลาดเคลื่อนทางราบของหมุดทดสอบและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ

6. ผลการวิจัย

6.1. ค่าพิกัดหมุดร่วมและหมุดทดสอบ

การประมวลผลค่าพิกัดได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Leica Infinity ซึ่งสามารถประมวลผลเส้นฐาน (Baseline Processing) และคำนวณปรับแก้โครงข่าย (Network Adjustment) ของข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยใช้ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (Precise Ephemeris) จาก IGN Global Data Center และ IGS International GPS Service for Geodynamics รวมทั้งค่าแก้ความคลาดเคลื่อนของเสาอากาศเครื่องรับ (Antenna Calibration) จาก National Geodetic Survey ซึ่งได้ค่าพิกัดของหมุดร่วม 214 สถานีจากการประมวลผลเส้นฐานแสดงผลเป็น Fixed Solution มีความคลาดเคลื่อนตามระยะเส้นฐานไม่เกิน 1.0 ppm. (1:1,000,000) และ Ratio ค่าความแปรปรวนในการประมวลผลเส้นฐานซึ่งดีที่สุดเป็นลำดับที่สองกับลำดับที่หนึ่งไม่น้อยกว่า 1.5 ซึ่งมีค่า Variance factor น้อยกว่า 1.5 และเข้าใกล้เคียง 1 โดยผ่านเกณฑ์ทดสอบ F-test และ Chi-square test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และได้ค่าพิกัดของหมุดร่วม 15 สถานีมีระยะเส้นฐานอยู่ที่ 5 - 68 กม. โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะเส้นฐานประมาณ 35 กม. และหมุดทดสอบ 100 ตำแหน่งมีระยะเส้นฐานอยู่ที่ 9 - 72 กม. โดยมี

ค่าเฉลี่ยของระยะเส้นฐานประมาณ 38 กม.จากการประมวลผลเส้นฐานแสดงผลเป็น Fixed Solution ทั้งหมด

6.2. ค่าพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐาน

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐานจะใช้ข้อมูลค่าพิกัดของโครงข่ายหมุดร่วม 229 สถานีบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ที่ epoch2008.11 แปลงพื้นหลักฐานไปสู่ ITRF2008 ที่ epoch2013.10 ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Leica Infinity โดยมีเครื่องมือสำหรับการแปลงพื้นหลักฐาน (Determine Transformation) ด้วยแบบจำลอง Bursa-Wolf และแบบจำลอง Molodensky-Badekas ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณทั้งหมด 5 ครั้งโดยใช้หมุดร่วม 217 สถานี ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

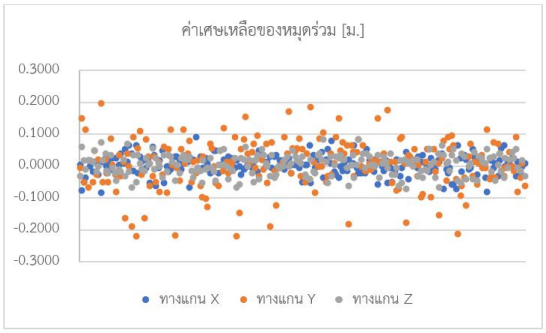
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากการใช้หมุดร่วม 217 สถานี

พารามิเตอร์	Bursa-Wolf	Molodensky-Badekas
X [ม.]	-1.0331 ± 0.1117	-0.3094 ± 0.0034
ΔY [ม.]	-0.2864 ± 0.0550	0.8635 ± 0.0034
ΔZ [ม.]	-0.0341 ± 0.0600	0.2079 ± 0.0034
R_X ["]	-0.00018 ± 0.00192	-0.00018 ± 0.00192
R_Y ["]	0.00330 ± 0.00188	0.00330 ± 0.00188
R_Z ["]	0.03216 ± 0.00358	0.03216 ± 0.00358
ΔS [ppm]	0.1595 ± 0.0082	0.1595 ± 0.0082

สำหรับแบบจำลอง Molodensky-Badekas จุดกำเนิดของการหมุนจะถูกเลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่ง X_0 = -1205221.4281 ม., Y_0 = 6038303.4799 ม. และ Z_0 = 1604085.3636 ม.

ตารางที่ 2 ค่าเศษเหลือของหมุดร่วม 217 สถานี

ค่าทางสถิติ	ค่าเศษเหลือ [ม.]		
	แกน X	แกน Y	แกน Z
ค่าต่ำสุด	-0.0872	-0.2258	-0.0739
ค่าสูงสุด	0.0896	0.1947	0.0801
ค่าเฉลี่ย	0.0000	0.0000	0.0000
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0303	0.0760	0.0315
ช่วง ± 3σ	0.0909	0.2280	0.0945



รูปที่ 12 กราฟค่าเศษเหลือของหมุดร่วม 217 สถานี

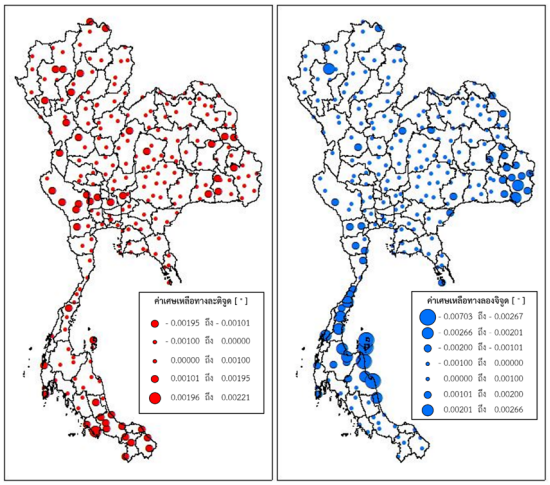
จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์และค่า RMS ของพารามิเตอร์ทั้ง 2 แบบจำลอง พบว่าค่าพารามิเตอร์และค่า RMS ของการหมุนแกนรอบจุดกำเนิดทั้ง 3 แกนและค่าต่างอัตราส่วนย่อขยายมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากค่า RMS ของการหมุนรอบแกน X มีขนาดใหญ่กว่าค่าพารามิเตอร์ของการหมุนรอบแกน X ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่น่าเชื่อถือ และเมื่อพิจารณาค่า RMS ของพารามิเตอร์จากแบบจำลอง Bursa-Wolf จะพบว่ามีค่า RMS สูงแสดงว่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าเลื่อนแกนและค่ามุมหมุนแกนรอบจุดกำเนิดมีความสัมพันธ์กันมาก ในขณะที่แบบจำลอง Molodensky-Badekas มีค่า RMS ต่ำแสดงว่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าเลื่อนแกนและค่ามุมหมุนแกนรอบจุดกำเนิดมีความสัมพันธ์กันน้อย ซึ่งจะมีความเหมาะสมในกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการนำพารามิเตอร์เฉพาะค่าเลื่อนแกนไปใช้แปลงพื้นหลักฐานในขั้นต้น ดังนั้นในการเลือกค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการแปลงพื้นหลักฐานด้วยแบบจำลองทั้งสองจึงเลือกใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง Molodensky-Badekas ประกอบด้วย ΔX = -0.3094 ม., ΔY = 0.8635 ม., ΔZ = 0.2079 ม., R_Y = 0.00330 ", R_Y = 0.03216 " และ ΔS = 0.1595 ppm. โดยที่ X_0 = -1205221.4281 ม., Y_0 = 6038303.4799 ม. และ Z_0 = 1604085.3636 ม.

6.3. ค่าเศษเหลือและพื้นผิวค่าเศษเหลือพิกัดทางราบ

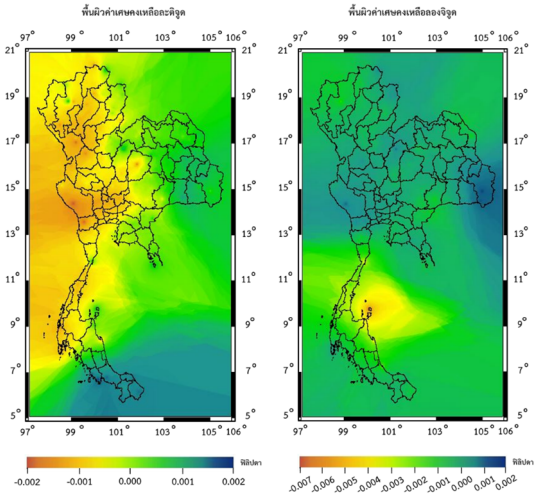
คำนวณหาค่าต่างพิกัดทางราบที่อยู่บน ITRF2008 ที่ epoch2013.10 ของโครงข่ายหมุดร่วม 229 สถานีโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบจำลอง Molodensky-Badekas และประมาณค่าด้วย 4 วิธี 11 เงื่อนไขแยกเป็นค่าพิกัดทางละติจูดและลองจิจูด ซึ่งจะได้พื้นผิวเศษเหลือทั้งหมด 22 พื้นผิว

ตารางที่ 3 ค่าเศษเหลือพิกัดทางราบโครงข่ายหมุดร่วม 229 สถานี

ค่าทางสถิติ	ละติจูด ["]	ลองจิจูด ["]
ค่าต่ำสุด	-0.00195	-0.00703
ค่าสูงสุด	0.00221	0.00266
ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	0.00078	0.00107



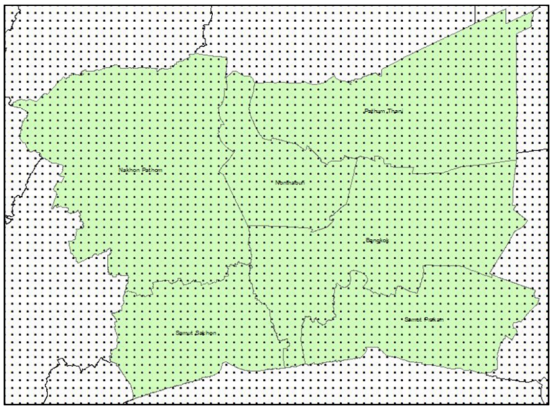
รูปที่ 13 ค่าเศษเหลือพิกัดทางราบโครงข่ายหมุดร่วม 229 สถานี บนแผนที่ประเทศไทย



รูปที่ 14 ตัวอย่างพื้นผิวค่าเศษเหลือพิกัดทางราบด้วยวิธี IDW

6.4. แบบจำลองค่าเศษเหลือและแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ

จะได้แบบจำลองค่าเศษเหลือทางราบบนตำแหน่งกริดที่ระยะ 1 ลิปดา หรือประมาณ 1.85 กม. โดยครอบคลุมพื้นที่ 97° - 106°E และ 5° - 21°N จะได้ตำแหน่งกริดจำนวน 519,901 ตำแหน่งโดยแบ่งในแนวแถว (Rows) เท่ากับ 961 ตำแหน่ง และในแนวคอลัมภ์ (Column) เท่ากับ 541 ตำแหน่ง



รูปที่ 15 ตัวอย่างตำแหน่งกริดที่ระยะ 1 ลิปดาในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

IDW Power1.txt

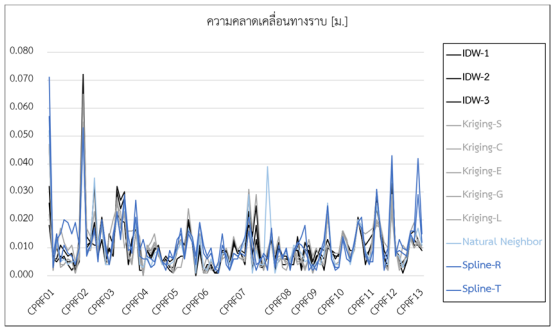
```
IDW Power1
3;0;1
1;2;961;541
349200;18000;60;60
1
-0.00061;-0.00003
-0.00064;-0.00003
-0.00066;-0.00002
-0.00068;-0.00002
-0.00067;-0.00003
-0.00069;-0.00003
-0.00070;-0.00002
-0.00072;-0.00002
-0.00073;-0.00002
-0.00074;-0.00002
-0.00075;-0.00002
-0.00078;-0.00001
-0.00079;-0.00001
-0.00080;-0.00001
[etc.;etc.]
```

รูปที่ 16 ตัวอย่างรูปแบบ CSCS Model ของวิธี IDW

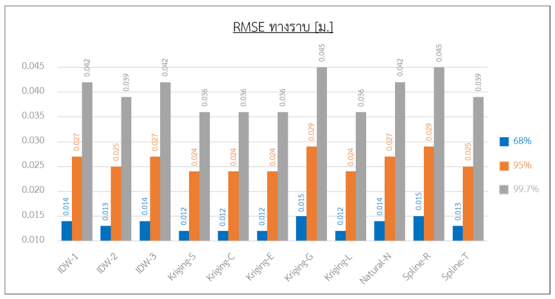
6.5. ความถูกต้องตำแหน่งทางราบของแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบ

ตารางที่ 4 ค่าทางสถิติของความคลาดเคลื่อนทางราบด้วยแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบแบบต่าง ๆ

แบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อนทางราบ [ม.]			
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	RMSE
IDW Power1	0.000	0.076	0.011	0.014
IDW Power2	0.000	0.070	0.010	0.013
IDW Power3	0.000	0.069	0.010	0.014
Kriging Spherical	0.000	0.057	0.009	0.012
Kriging Circular	0.000	0.057	0.009	0.012
Kriging Exponential	0.001	0.057	0.009	0.012
Kriging Gaussian	0.001	0.074	0.012	0.015
Kriging Linear	0.000	0.057	0.009	0.012
Natural Neighbor	0.001	0.052	0.010	0.014
Spline Regularized	0.001	0.050	0.012	0.015
Spline Tension	0.002	0.053	0.010	0.013



รูปที่ 17 กราฟความคลาดเคลื่อนทางราบของหมุดทดสอบ

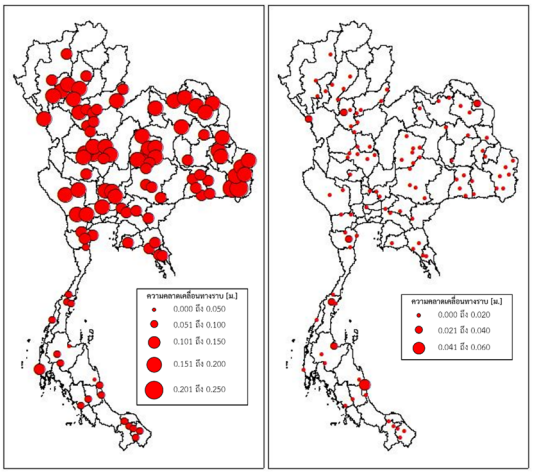


รูปที่ 18 กราฟความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบของแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ

7. สรุปผลวิจัย

โดยสรุปผลการแปลงพื้นหลักฐานของหมุดทดสอบ 100 ตำแหน่งสำหรับกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทยด้วยแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบซึ่งประกอบด้วย พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Molodensky-Badekas และแบบจำลองค่าเศษเหลือพิกัดทางราบด้วยวิธี IDW, Kriging, Natural Neighbor และ Spline ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อยู่ที่ 2.7, 2.4, 2.6 และ 2.7 ซม. ตามลำดับ โดยมีความคลาดเคลื่อนทางราบเฉลี่ยอยู่ที่ 1.1 ± 0.9, 1.0 ± 0.8, 1.0 ± 0.9 และ 1.1 ± 0.8 ซม.ตามลำดับ และมีความความคลาดเคลื่อนทางราบสูงสุดอยู่ที่ 7.6, 6.0, 5.2 และ 5.2 ซม. ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดขนาดของความคลาดเคลื่อนทางราบเฉลี่ยได้ 12.8, 12.7, 12.6 และ 12.7 ซม. ตามลำดับ และลดขนาดของความคลาดเคลื่อนทางราบสูงสุดได้ 19.8, 19.8, 20.4 และ 20.9 ซม.ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบสามารถแปลงพื้นหลักฐานสำหรับกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 ไปสู่ ITRF2008 ของประเทศไทยให้มีความถูกต้องอยู่ในระดับต่ำกว่า 3 ซม.ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี Kriging ให้ความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบดีที่สุด

โดยผลวิเคราะห์ก่อนการแปลงพื้นหลักฐานค่าพิกัดจะอ้างอิงอยู่บนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางราบเฉลี่ยประมาณ 14 ซม.โดยมีความคลาดเคลื่อนทางราบสูงสุดประมาณ 21 ซม.และหลังการแปลงพื้นหลักฐานด้วยแบบจำลองค่าปรับแก้พิกัดทางราบด้วยวิธี Kriging จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางราบเฉลี่ยลดลงมาเหลืออยู่ที่ประมาณ 1 ซม.โดยมีความคลาดเคลื่อนทางราบสูงสุดลดลงมาเหลืออยู่ที่ประมาณ 6 ซม. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ความคลาดเคลื่อนทางราบก่อนและหลังแปลงพื้นหลักฐาน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณหน่วยงานซึ่งประกอบด้วย กรมที่ดิน กรมแผนที่ทหาร และกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ของโครงข่ายสถานีอ้างอิงถาวรและหมุดทดสอบแบบจำลอง และข้อมูลค่าพิกัดของสถานีอ้างอิงถาวรบนกรอบ ITRF2005 และ ITRF2008 รวมถึงให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยนี้เป็นอย่างดี

9. การอ้างอิง

[1] กรมที่ดิน. (2563). แนวทางการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรุงเทพมหานคร: กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน.

[2] กรมแผนที่ทหาร. (2557). รายงานผลการสำรวจแผนที่สนามชุดปฏิบัติงานสนามสำรวจโครงข่ายดาวเทียม GPS งานยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์ ประจำปีงบประมาณ 2557. กรุงเทพมหานคร: กองยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร.

[3] IGN/LAREG. (2020). ITRF 2020 Call for participation. [cited 2020 September 14, 2020]; Available from. http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/CFP-ITRF2020.pdf.

[4] Deakin RE. (2006). A note on the Bursa-Wolf and Molodensky-Badekas transformations. School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, 1-21.

[5] Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. Arc User, July-September, 3235(569), 32-35.

[6] Gabriele G. (2014). Use of NTv2 transformation grids in engineering applications. Earth Science Informatics, 7(2), 139-145.

[7] กรมแผนที่ทหาร. (2539). ระเบียบกองยีออเดซีและยีออฟิสิกส์ว่าด้วยการสำรวจวางหมุดหลักฐานทางราบและทางดิ่ง พ.ศ. 2539. กรุงเทพมหานคร: กองยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร.

[8] LEICA Geosystems AG. (2014). Leica Geo Office Online Help: Leica Geo Office 8.4. Retrieved from. https://leicageosystems.com/products/gnsssystems/software/leica-geo-office.