

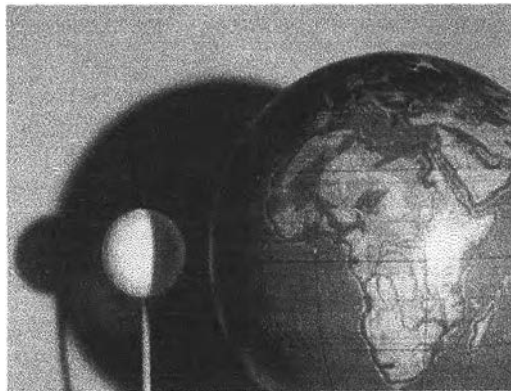
บทที่ 2

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ศึกษา (Related literatures)

2.1 ลักษณะของโลก (The Earth's figure)

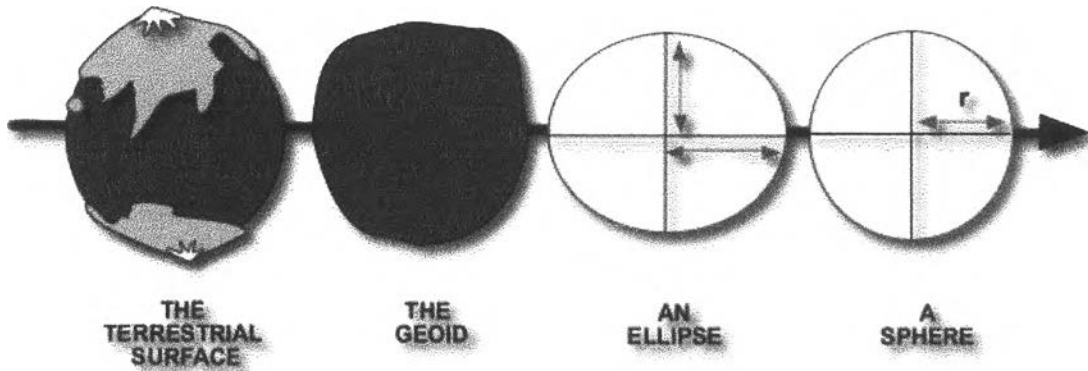
ในอดีตลักษณะของโลกได้ถูกประมาณขึ้นโดยนักเดินเรือ ซึ่งพวกเขากลัวจะตกขอบของโลกถ้าแล่นเรือไปไกลเกินไป หลักการนี้เป็นความเชื่อว่าโลกมีลักษณะกลมแบน จนถึงยุคของอริสโตเติล (Aristotle) และพีธาโกรัส (Pythagoras) ได้อ้างเหตุผลและแนวทฤษฎีว่าโลกมีลักษณะเป็นทรงกลมจากการศึกษาลักษณะส่วนโค้งของเงา (The curved shadow) ของโลกในขณะที่เกิดจันทรุปราคา (Lunar eclipses) ดังรูปที่ 2.1 จนกระทั่ง ประมาณปลายคริสต์ศตวรรษที่ 16 เซอร์ไอแซกนิวตัน (Sir Isaac Newton) ได้อ้างถึงหลักการและทฤษฎีของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ว่าโลกไม่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ แต่ยุบเล็กน้อยบริเวณขั้วโลกทั้งสอง และป่องออกบริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equator) หลักการดังกล่าวได้ถูกพิสูจน์และยอมรับจนถึงปัจจุบันนี้



รูปที่ 2.1 การจำลองลักษณะการเกิด จันทรุปราคา (Demonstration of a lunar eclipse)

(ถ่ายภาพโดย Mark Hamasald)

เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวบนโลกมีความซับซ้อน และยากที่จะกำหนดรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นการทำให้โลกมีรูปแบบที่ง่ายขึ้น ด้วยการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะและตำแหน่ง ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองที่เหมาะสมที่จะใช้แทนโลกในการคำนวณคือ รูปทรงรี แต่ในการคำนวณพื้นที่ขนาดเล็ก การใช้ทรงกลมก็สามารถให้ความถูกต้องเพียงพอ และมีรูปแบบของสมการในการคำนวณที่ง่ายกว่ารูปทรงรี ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ลักษณะของโลกมีทั้งทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

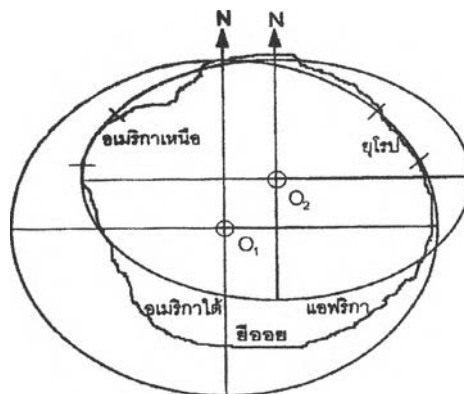


รูปที่ 2.2 สัจฐานของโลกทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์

(ภาพจาก AUSLIG : Australian Surveying & Land Information Group)

2.1.1 ภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก (The terrestrial surface) คือพื้นผิวทางกายภาพที่เป็นจริงบนพื้นผิวโลก ทั้งส่วนที่เป็นพื้นดินและพื้นน้ำ พื้นผิวดังกล่าวเป็นพื้นผิวที่สิ่งมีชีวิตได้อาศัยอยู่ และการรังวัดหาระยะหรือขนาดของพื้นที่ ก็กระทำบนพื้นผิวดังกล่าว แต่เนื่องจากความไม่มีรูปแบบที่แน่นอนของภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2.1.2 ยีออยด์ (The geoid) คือพื้นผิวระดับหรือพื้นผิวที่มีค่าศักย์ภาพความถ่วงที่เท่ากันทุกจุดตามคำนิยามที่ว่า “ถ้าเราพิจารณาถึงน้ำในมหาสมุทร ว่าเป็นสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในสนามความถ่วงของโลก โดยไม่มีแรงอื่นใดมาเกี่ยวข้องเลย ในสภาวะที่สมดุลพื้นผิวของมหาสมุทรในมโนทัศน์นี้จะเป็นพื้นผิวระดับของสนามความถ่วง และถ้าเราขยายพื้นผิวนี้เข้าไปภายใต้พื้นดิน พื้นผิวระดับอันนี้ก็คือนีออยด์ ” (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ 2537) และเนื่องจากยีออยด์มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของมวลสารภายในโลกแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถหาสมการอย่างง่ายมาใช้เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะของยีออยด์ได้ จึงจำเป็นต้องหารูปทรงทางเรขาคณิตซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวยีออยด์มากที่สุดเป็นตัวแทน



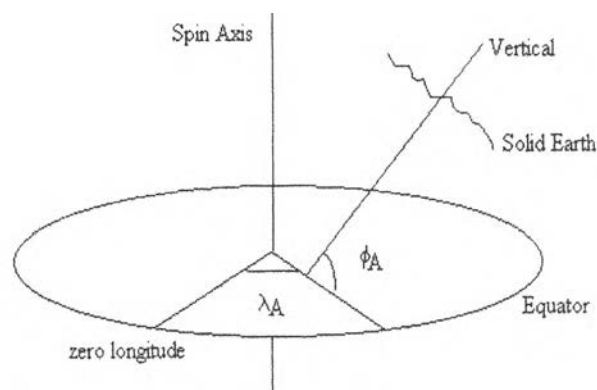
รูปที่ 2.3 รูปทรงรีที่ใช้พื้นฐานของทวีปยุโรป และของทวีปอเมริกาเหนือเปรียบเทียบกับยีออยด์

2.1.3 รูปทรงรี (Ellipsoid) เกิดจากการหมุนวงรีรอบแกนสั้น ตามลักษณะการหมุนของโลก มีลักษณะใกล้เคียงกับสัณฐานที่แท้จริงของโลก คือ มีลักษณะการยุบที่บริเวณขั้ว รูปร่างของรูปทรงรีจะถูกใช้ในการคำนวณเพื่อหาระยะและตำแหน่งบนผิวโลกที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นการที่ผลการคำนวณจะมีความถูกต้องหรือใกล้เคียงความจริงมากที่สุด พื้นผิวของรูปทรงรีที่ใช้ในการคำนวณจำเป็นต้องมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวที่ยืดหยุ่นมากที่สุด ทำให้รูปทรงรีที่เป็นตัวแทนสัณฐานของโลกในการคำนวณมีจำนวนมาก เนื่องจากแต่ละพื้นที่บนโลกมีความโค้งนูนของยอดที่แตกต่างกัน

2.1.4 รูปทรงกลม (Sphere) เป็นอีกรูปทรงหนึ่งซึ่งใช้แทนสัณฐานของโลก ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่ารูปทรงรี ทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น โดยมีตัวแปรเพียงตัวเดียวคือ รัศมีจากจุดศูนย์กลาง (r) แต่รูปทรงกลมไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่บนผิวโลก และไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตที่ใช้แทนสัณฐานของโลกทั้งโลก

2.2 ระบบพิกัด (Coordinate System)

2.2.1 ระบบพิกัดดาราศาสตร์ (Astronomical Coordinate)



รูปที่ 2.4 ระบบพิกัดดาราศาสตร์ (Astronomical Coordinate System)

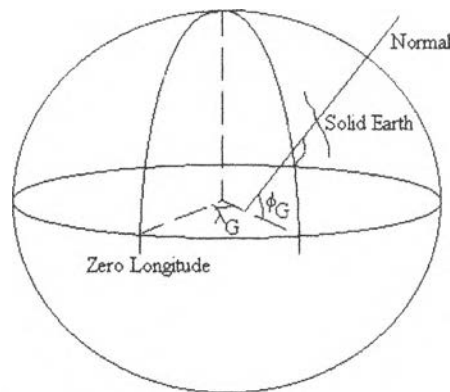
- ระนาบศูนย์สูตร คือระนาบซึ่งตั้งฉากกับแกนหมุนของโลกและผ่านจุดศูนย์กลางมวลสารของโลก
- เมริเดียนหลัก (Zero Meridian) คือระนาบอ้างอิงซึ่งผ่านจุดขั้วทั้งสองของแกนหมุนของโลก ในระบบสากลเป็นที่ยอมรับกันว่าเมริเดียนหลักทางดาราศาสตร์คือเส้นเมริเดียนซึ่งผ่านสถานีที่ทำการตั้งกล้องรังวัดทางดาราศาสตร์ ในเมืองกรีนนิช ประเทศอังกฤษ
- ละติจูดดาราศาสตร์ (Astronomical Latitude) คือ มุมที่วัดบนระนาบเมริเดียน ระหว่างทิศทางของเส้นดึง (The direction of the gravity vector) ของจุดที่พิจารณา กับระนาบ

ศูนย์สูตร มีค่าเป็นบวกเมื่อจุดที่พิจารณาอยู่ทางซีกโลกเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อจุดที่พิจารณาอยู่ทางซีกโลกใต้

- ลองจิจูดดาราศาสตร์ (Astronomical Longitude) คือ มุมที่วัดบนระนาบศูนย์สูตร ระหว่างระนาบเมริเดียนหลัก กับระนาบเมริเดียนที่ผ่านจุดที่พิจารณา (Local Meridian) มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางตะวันออก และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางตะวันตก

2.2.2 ระบบพิกัดทางยื่อเดติก (Geodetic Coordinate)

ตำแหน่งทางยื่อเดติกของจุดใดๆบนผิวโลก สามารถกำหนดได้จากระบบพิกัดบนรูปทรงรี ซึ่งเกิดจากเส้นที่ลากจากจุดพิจารณา ตั้งฉากกับพื้นผิวของรูปทรงรี (normal line) ณ ตำแหน่งบนผิวทรงรี จะเป็นตำแหน่งที่ใช้บอกตำแหน่งทางราบของจุดที่พิจารณา

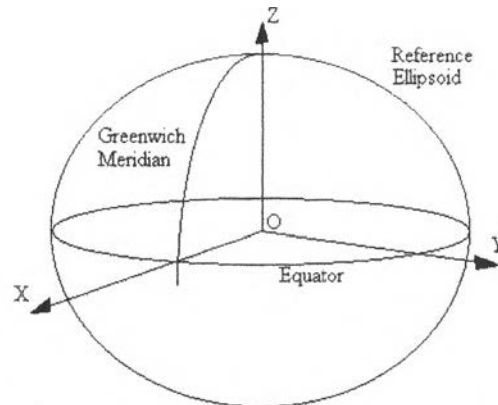


รูปที่ 2.5 ระบบพิกัด ยื่อเดติก (Geodetic Coordinate System)

- ยื่อเดติกละติจูด (Geodetic Latitude) คือ มุมบนระนาบเมริเดียน ซึ่งเกิดจากการทำมุมระหว่างแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรูปทรงรี ของจุดที่พิจารณากับระนาบศูนย์สูตรของรูปทรงรี ที่ใช้อ้างอิงระบบพิกัด
- ยื่อเดติกลองจิจูด (Geodetic Longitude) คือ มุมตามระนาบศูนย์สูตรของรูปทรงรี ซึ่งเกิดจากการทำมุมระหว่างระนาบเมริเดียนที่ผ่านจุดที่พิจารณากับระนาบเมริเดียนหลัก
- ความสูงเหนือพื้นรูปทรงรี (ellipsoidal height) คือความสูงในแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวทรงรี ของจุดที่พิจารณา เมื่อเทียบกับพื้นผิวของรูปทรงรีที่ใช้อ้างอิง

2.2.3 ระบบพิกัดฉากสามมิติ (Cartesian Coordinate System)

ในการบอกตำแหน่งของวัตถุใดๆ นอกจากจะสามารถบอกในรูปแบบของระบบพิกัดยื่อเดติก ยังมีระบบพิกัดอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถบอกตำแหน่ง โดยอ้างอิงกับศูนย์กลางของรูปทรงรีหรือศูนย์กลางมวลสารของโลก ขึ้นอยู่กับการกำหนดจุดศูนย์กำเนิดของระบบ ระบบพิกัดดังกล่าวคือระบบพิกัดฉากสามมิติ หรือระบบพิกัด X, Y และ Z โดยมีแกน Z ตั้งฉากกับระนาบศูนย์สูตร แกน X อยู่บนระนาบศูนย์สูตร ตัดกับแนวระนาบเมริเดียนหลักและแกน Y ตั้งฉากกับแกนทั้งสอง



รูปที่ 2.6 ระบบพิกัดฉากสามมิติ (Cartesian Coordinate System)

ตามหลักทฤษฎีในการสร้างระบบพิกัด แกนทั้งสามที่ใช้กำหนดตำแหน่งทางย็ออเดติกของรูปทรงรี จะขนานกับระบบแกนอ้างอิงของโลก คือ แกน Z อยู่ในแนวแกนหมุนของโลก , แกน X อยู่บนระนาบศูนย์สูตรตัดกับแนวระนาบเมริเดียนหลัก , แกน Y ตั้งฉากกับแกนทั้งสอง ดังนั้นในการแปลงค่าพิกัดจากพื้นหลักฐานหนึ่งไปเป็นอีกพื้นหลักฐานหนึ่ง จึงมีตัวแปรที่จำเป็นเพียง 3 ตัวแปร คือตัวแปรในการย้ายจุดศูนย์กำเนิดของพื้นหลักฐาน (ΔX , ΔY และ ΔZ) อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติจริงการแปลงระบบพื้นหลักฐานอาจต้องใช้ตัวแปรอื่นๆเข้าร่วมด้วย เช่น ค่าการหมุนของแกนทั้งสาม (rotation of the axes) เป็นต้น

ระบบพิกัดฉากสามมิติ ดังกล่าว สามารถที่จะแปลงให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดย็ออเดติก และความสูงเหนือพื้นรูปทรงรี ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\tan \lambda_G = \frac{Y}{X}$$

$$\tan \phi_G = \frac{Z + e^2 v \sin \phi_G}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$h = \frac{X}{\cos \phi_G \cos \lambda_G} - v$$

เมื่อ

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi_G}}$$

a = semi major axis of ellipsoid

e = eccentricity of ellipsoid

h = ellipsoidal height of point

จากสมการข้างต้นแม้ว่าจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบที่ง่าย แต่ในการแก้สมการดังกล่าวเพื่อหาค่า ϕ_G ต้องทำการวนซ้ำ ค่าประมาณในครั้งแรกของ ϕ_G สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\tan \phi_G = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[1 + \frac{e^2}{1 - e^2} \right]$$

หรือ

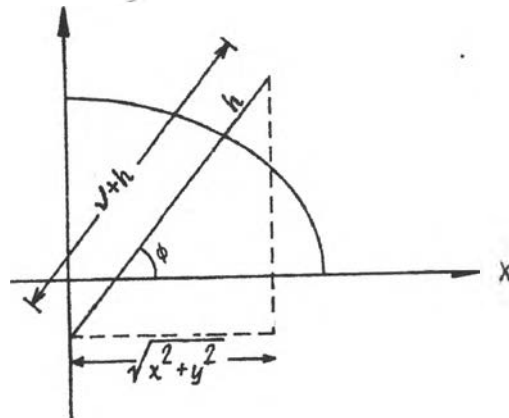
$$\tan \phi_G = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[\frac{1}{1 - e^2} \right]$$

ค่าพิกัดในระบบพิกัดขี้ออคติค สามารถแปลงกลับมาสู่ระบบพิกัดฉากสามมิติได้จากสมการ

$$X = (v + h) \cos \phi_G \cos \lambda_G$$

$$Y = (v + h) \cos \phi_G \sin \lambda_G$$

$$Z = (v(1 - e^2) + h) \sin \lambda_G$$

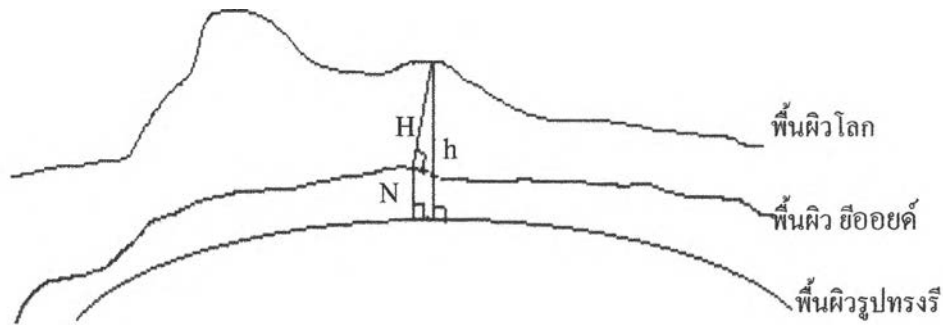


รูปที่ 2.7 รูปตัดตามแนวเมริเดียนซึ่งแสดงตำแหน่งของจุดเหนือผิวรูปทรงรี

2.2.4 ความสูง (Height)

การอ้างอิงตำแหน่งของจุดใดๆ อีกมิติหนึ่งที่มีความสำคัญคือความสูง ในระบบพิกัดขี้ออคติค ความสูงที่ใช้ในการบอกตำแหน่งของจุดที่พิจารณา คือความสูงเหนือรูปทรงรีอ้างอิง เป็นการบอกระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวของรูปทรงรีอ้างอิงถึงจุดที่พิจารณาตามแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรูปทรงรี การบอกความสูงในลักษณะดังกล่าวของระบบพิกัดขี้ออคติค ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลกได้ เช่น ทิศทางการไหลของน้ำ เป็นต้น ดังนั้นการทำการระดับเพื่อหาความสูง (orthometric height leveling) จากระดับทะเลปานกลาง (mean sea level) ย่อมอธิบายปรากฏการณ์ด้านความสูงที่สัมพันธ์กับแรงดึงดูดของโลกได้ดีกว่าการบอกความสูงเหนือรูปทรงรี ความสูงออร์โธเมตริกของจุดที่พิจารณา เป็นระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวที่มีค่าศักย์ภาพความถ่วงที่เท่ากันทุกๆจุด (equipotential surface) ถึงจุดที่พิจารณาตามแนวสายดิ่ง (plumb line) หรือทิศทางของแรงดึงดูดของโลก (The gravity vector)

พื้นผิวขี้ออยด์ เป็นพื้นผิวอ้างอิงที่มีค่าศักย์ภาพความถ่วงที่เท่ากันทุกๆจุด และสัมพันธ์กับระดับทะเลปานกลาง ค่าความต่างระหว่างความสูงเหนือรูปทรงรี (h) และความสูงออร์โธเมตริก (H) สามารถอธิบายได้ด้วยค่าความสูงขี้ออยด์ (geoidal height : N) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความสูงทั้งสองชนิด ได้ด้วยสมการ $h = N + H$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงออร์โธเมตริก (H) ความสูงเหนือรูปทรงรี (h) และความสูงยีออยด์ (N)

2.3 พื้นหลักฐานทางราบ (Horizontal Datums)

พื้นหลักฐาน เสมือนเป็นตัวแทนของรูปโลก ประกอบด้วยรูปทรงรีที่มีขนาดคณฐานและการจัดวางที่แน่นอน เพื่อใช้เป็นกรอบ (frame work) หรือระบบอ้างอิงในการกำหนดค่าพิกัด

ปัจจุบันมีพื้นหลักฐานเป็นจำนวนมาก ใช้เป็นระบบอ้างอิงในการกำหนดค่าพิกัดของประเทศต่างๆ สำหรับการวิจัยครั้งนี้ จะกล่าวถึงพื้นหลักฐานที่เกี่ยวข้องเพียง 3 พื้นหลักฐาน คือ พื้นหลักฐาน Indian 1975 , พื้นหลักฐาน WGS84 และระบบพิกัด ITRF

2.3.1 พื้นหลักฐาน Indian 1975 (อภิชาติ แสงรุ่งเรือง , 2527)

เป็นพื้นหลักฐานที่ประเทศไทยใช้อ้างอิงค่าพิกัดในปัจจุบัน องค์การแผนที่กระทรวงกลาโหม ประเทศสหรัฐอเมริกา (Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center) เป็นผู้ดำเนินการปรับแก้โครงข่ายสามเหลี่ยมชั้นที่ 1 ของประเทศไทยและประเทศพม่า ในปี พ.ศ.2518 ประกอบด้วยหมุดสามเหลี่ยมชั้นที่ 1 จำนวน 426 สถานี โดยใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดด้วยดาวเทียมคอปเปิลอร์ จำนวน 9 สถานี ซึ่งมีความถูกต้องสูงกว่างานสามเหลี่ยม เป็นจุดควบคุมโครงข่ายในการปรับแก้ครั้งนั้น

พื้นหลักฐาน Indian 1975 มีองค์ประกอบดังนี้

จุดศูนย์กำเนิดพื้นหลักฐาน หมุดสามเหลี่ยม เขาสะแกกรัง (หมายเลข 91)

ละติจูด $15^{\circ}22'56''.0487$ เหนือ

ลองจิจูด $100^{\circ}00'59''.1906$ ตะวันออก

ความสูงเหนือพื้นยีออยด์ -22.46 เมตร

รูปทรงรี เอเวอร์เรสต์ 1830

ขนาดของครึ่งแกนยาว (a) 6377276.345 เมตร

อัตราการยุบตัว (f) 1/300.8017

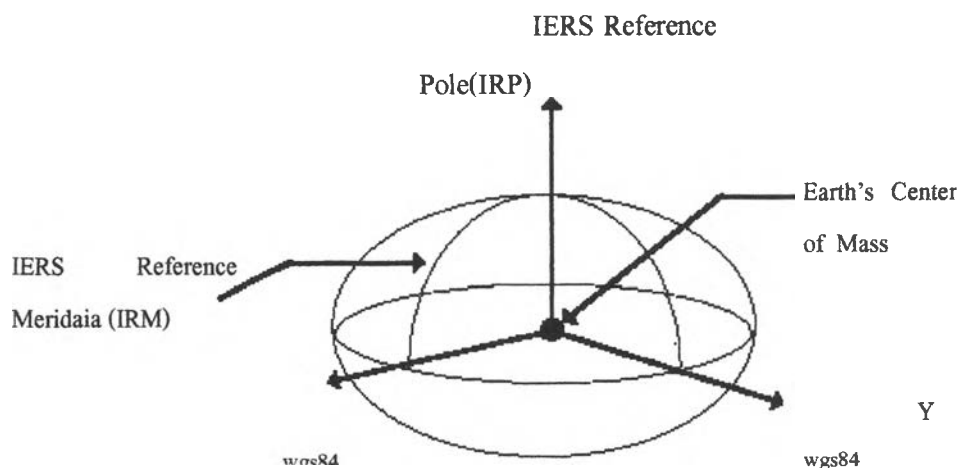
2.3.2 พื้นหลักฐาน WGS84 (NIMA TR8350.2 3rd ed. ,1997)

เป็นพื้นหลักฐานที่อิงอยู่บนระบบพิกัด WGS84 ซึ่งมีคุณสมบัติตามกฎเกณฑ์สากล ของสถาบัน IERS (the International Earth Rotation Service) ดังนี้คือ

- มีจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก รวมถึงส่วนที่เป็นพื้นน้ำและชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก
- ขนาดของรูปทรงรีมีความสมพงษ์กับสัณฐานที่แท้จริงของโลกหรือพื้นผิวฮัยอยด์
- แกนเริ่มต้นในการกำหนดทิศทาง กำหนดโดยสถาบัน BIH (the Bureau International de l'Heure) ที่ช่วงเวลา 1984.0
- ระบบเวลา เริ่มต้นที่แนวเมริเดียนหลักของโลกและไม่มีค่าแตกต่างกับการหมุนของโลก

พื้นหลักฐาน WGS84 ถูกสถาปนาขึ้นในปี ค.ศ.1987 โดยใช้ข้อมูลจากการรังวัดดาวเทียมในระบบทรานซิท (Transit) ของกองทัพเรือสหรัฐ มีองค์ประกอบดังนี้

รูปทรงรี	WGS84	
ขนาดของครึ่งแกนยาว (a)	6378137	เมตร
อัตราการยุบตัว (f)	1/298.257223563	
ความเร็วเชิงมุมของการหมุนรอบตัว(ω)	$7292115.0 \times 10^{-11}$	rad sec ⁻¹
Earth's Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Include)(GM)	3986004.418×10^8	m ³ /s ²



รูปที่ 2.9 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของระบบพิกัด WGS84

2.3.3 ^๕พื้นหลักฐาน ITRF (International Terrestrial Reference Frame) (Claude Boucher and Zuheir Altamimi , 1996)

The Terrestrial Reference Frame Section of the Central Bureau (CB) of the International Earth Rotation Service (IERS) เป็นผู้สถาปนาพื้นหลักฐาน ITRF เพื่อเป็นระบบพิกัดสากล (International Terrestrial Reference System : ITRS) ใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรการหมุนของโลก (Earth Rotation Paramiter) และหาความสัมพันธ์อ้างอิงกับระบบพิกัดทรงกลมฟ้า(Celestial Reference System)

ในการสถาปนาค่าพิกัด ใช้ค่าพิกัดของกลุ่มสถานีรังวัดหลายประเภทร่วมกัน ในส่วนของอัตราเร็วในการเคลื่อนตัว ใช้เทคนิคการรังวัดจากอวกาศ (space-geodetic techniques) เช่นการรังวัด VLBI, LLR, SLR, GPS* และ DORIS** (Doppler Orbitography and Radiopositioning Intergrated by Satellite)

คุณสมบัติของระบบพิกัด ITRS มีดังนี้คือ

- มีจุดศูนย์กลางของพื้นหลักฐานอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก (รวมถึงส่วนที่เป็นพื้นน้ำและชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก)
- ขนาดของรูปทรงรีมีความสมพงษ์กับสัณฐานที่แท้จริงของโลกหรือพื้นผิวย็อยด์
- แกนเริ่มต้นในการกำหนดทิศทาง ประกอบด้วยค่าอ้างอิงในระบบ BIH (the Bureau International de l'Heure) ที่ช่วงเวลา 1984.0 และมีความละเอียดถูกต้องตามเกณฑ์ของสถาบัน IUGG (International Union of Geodesy and Geophysic) และสถาบัน IAU (International Astronomical Union)
- ระบบเวลา เริ่มต้นในแนวเดียวกับแนวเมริเดียนอ้างอิงของโลก

พื้นหลักฐาน ITRF มีองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

บนระบบพิกัดอ้างอิง	ITRS	
รูปทรงรี	WGS84	
ขนาดของครึ่งแกนยาว (a)	6378137	เมตร
อัตราการยุบตัว (f)	1/298.257223563	

ค่าพิกัดบนพื้นหลักฐาน ITRF มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากแผ่นเปลือกโลกได้รับอิทธิพลจากแรงเคลื่อนไหวของธรณีแปรสัณฐาน ทำให้ตำแหน่งบนพื้นหลักฐาน ITRF มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการที่จะกล่าวถึงค่าพิกัดตำแหน่งที่อ้างอิงกับพื้นหลักฐาน ITRF จึงมีความจำเป็นต้องอ้างอิงถึง ระยะเวลา (epoch) ของพื้นหลักฐานด้วย

*เริ่มใช้เทคนิค GPS ในปี พ.ศ.2534

**เริ่มใช้เทคนิค DORIS ในปี พ.ศ.2537

2.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นหลักฐาน WGS84 และพื้นหลักฐาน ITRF

พื้นหลักฐาน WGS84 ได้ถูกปรับแก้ใหม่โดยใช้ค่าตัวแปร 7 ตัวแปร ขณะเวลา G730 (สัปดาห์ที่สอง ของเดือน มกราคม ค.ศ.1994) ทำให้ค่าพิกัดของพื้นหลักฐาน WGS84 มีความถูกต้องมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดของพื้นหลักฐาน ITRF92 ปรากฏว่าพื้นหลักฐานทั้งสองมีค่าต่างกันประมาณ 10 ซม. และได้มีการเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันอีก โดยเปรียบเทียบพื้นหลักฐาน WGS84 ณ ขณะเวลา G873** กับ พื้นหลักฐาน ITRF94 ผลที่ได้ยังคงเป็นลักษณะเดิม และในการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม ของหน่วยงาน NIMA ที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS84 เปรียบเทียบกับหน่วยงาน IGS ที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน ITRF ปรากฏว่ามีความต่างกันไม่เกิน 2 เซนติเมตร ดังนั้นในการปฏิบัติงานด้านแผนที่ สามารถพิจารณาได้ว่าพื้นหลักฐานทั้งสองเหมือนกัน (NIMA TR8350.2 3rd ed., 1997)

2.4 การกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GPS เพื่องานรังวัดขั้นสูง

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการกำหนดตำแหน่งและหาค่าพิกัดด้วยระบบดาวเทียม GPS ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีการนำระบบดาวเทียม GPS ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อย่างมากมาย ทั้งทางด้านการนำหน ซึ่งต้องการความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งไม่มากนัก จนถึงงานสร้างหมุดควบคุมโครงข่าย หรืองานทางด้านวิทยาศาสตร์เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกซึ่งต้องการความถูกต้องของพิกัดตำแหน่งในระดับ เซนติเมตรและมิลลิเมตรตามลำดับ และได้มีเอกสารที่เกี่ยวกับระบบ GPS ทั้งในทางทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ ออกเผยแพร่อย่างมากมาย ในเอกสารการวิจัยนี้ จึงไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดทางทฤษฎีของระบบดาวเทียม GPS แต่จะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ หากต้องการรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ้างอิงได้จากหนังสือทางวิชาการทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษดังนี้ King et al. (1985) , Well et al. (1986) , Hoffmann – Wellenhof et al. (1994) , Leick (1995) , Kaplan (1996) และเอกสารประกอบการฝึกอบรม การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GPS (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ ,2537) เป็นต้น

*สัปดาห์ของระบบดาวเทียม GPS ที่ 730 ตรงกับสัปดาห์ที่สอง ของ เดือน มกราคม ค.ศ.1994

**ตรงกับสัปดาห์สุดท้ายของเดือน กันยายน ค.ศ.1996

2.4.1 คำจำกัดความ

- การหาค่าแห่งจุดเดี่ยว (point positioning) เป็นการหาค่าแห่งสัมบูรณ์ของจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด โดยใช้เครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียว โดยจำเป็นต้องรับสัญญาณระยะทางไปยังดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง การรับสัญญาณเพื่อหาระยะทางไปยังดาวเทียมเรียกว่า การวัดซูดอร์เรนจ์ (psudorange) หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบ GPS ได้ใช้วิธีการเลือกปฏิบัติ (Selective Availability : SA) เพื่อลดความถูกต้องของการหาค่าแห่งของจุดเดี่ยวลง ให้มีความถูกต้องของค่าพิกัดอยู่ระหว่าง +/- 50 ถึง 100 เมตร แต่ในปัจจุบันได้มีการยกเลิกการใช้วิธีการเลือกปฏิบัติ เมื่อ 2 พ.ค.43 จากผลการทดสอบของสถาบัน U.S. National Geodetic Survey ความถูกต้องของการหาค่าแห่งของจุดเดี่ยว เมื่อไม่มี SA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อยู่ระหว่าง +/- 6.3 เมตร (Dennis.Milbert, 2000)
- การหาค่าแห่งแบบสัมพัทธ์ (relative positioning) เป็นการหาค่าแห่งที่ให้ความถูกต้องสูง โดยในขณะที่รับสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด จะต้องมีการรับสัญญาณอีกอย่างน้อยหนึ่งเครื่องตั้งอยู่บนจุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ค่าพิกัดของจุดที่ทราบค่าจะถูกใช้ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดซูดอร์เรนจ์ และนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ไปคำนวณตำแหน่งของจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ความถูกต้องของการรับสัญญาณด้วยวิธีดังกล่าว อยู่ในระหว่าง 2-5 เมตร จนถึงระดับ มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการรับสัญญาณ เทคนิคการรับสัญญาณ การประมวลผล และวิธีการปรับแก้
- การรับสัญญาณแบบสถิต (Static Survey) (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ, 2537) ได้อธิบายถึงการทำงานรับสัญญาณแบบสถิตไว้ดังนี้ “การทำงานรับสัญญาณแบบสถิต เป็นวิธีการทำงานที่เครื่องรับสัญญาณไม่มีเคลื่อนที่ เครื่องรับจะถูกวางไว้ที่จุดปลายของเส้นฐานที่ต้องการหาความยาวหรือตำแหน่งสัมพัทธ์ ระยะเวลาที่รับสัญญาณคือ ระยะเวลาที่นานเพียงพอที่จะนำมาหาค่าเลขปริศนาได้ตามเกณฑ์ความถูกต้องที่ต้องการ ระยะเวลาที่ทำงานรับสัญญาณขึ้นกับความยาวเส้นฐาน จำนวนดาวเทียมรวมทั้งเรขาคณิตของดาวเทียมด้วย”
- จุดควบคุมโครงข่าย (fiducial station) เป็นจุดที่มีค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง และถูกเลือกใช้เป็นจุดคงที่ในการปรับแก้โครงข่าย

2.4.2 การออกแบบโครงข่ายและการรับสัญญาณ

ในการรับสัญญาณค่าพิกัดด้วยระบบดาวเทียม GPS อุปสรรคในเรื่องการมองเห็นกันระหว่างหมุดหลักฐาน ไม่มีผลกระทบต่อโครงข่ายอีกต่อไป ในการออกแบบโครงข่ายจึงควรเพิ่มความสนใจไปในส่วนอื่นๆ เช่นการเลือกจุดควบคุม, การลดและป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น, ระยะเวลาที่เหมาะสมในการรับสัญญาณ เป็นต้น

ทุกๆสถานีในโครงข่ายจะต้องมีการต่อเชื่อมกันและ โยงยึดเข้ากับสถานีควบคุมที่มีความละเอียดถูกต้องสูงเพียงพอที่จะสร้างความเชื่อมั่นในระดับ 95 % ว่าจะไม่เกิดความคลาดเคลื่อนเกินเกณฑ์ สถานีควบคุมควรมีการจัดวางตัวกระจายครอบคลุมพื้นที่ และมีจำนวนมากเพียงพอที่จะควบคุมโครงข่ายได้อย่างเหมาะสม คือในการปรับแก้โครงข่ายทั้งทางราบและทางคิ่งพร้อมกัน จะต้องมียุทธศาสตร์ควบคุมอย่างน้อยทางราบ 2 สถานี และทางคิ่ง 3 สถานี และต้องทราบค่าพิกัดที่อ้างอิงอยู่บนพื้นหลักฐานเดียวกัน

การพิจารณาเลือกค่าการรังวัดหรือเส้นฐาน เฉพาะเส้นฐานที่เป็นอิสระเท่านั้นที่จะถูกเลือกเป็นตัวแทนในโครงข่ายและการปรับแก้ หากมีการเลือกเส้นฐานที่ไม่เป็นอิสระประกอบเข้ามาในโครงข่ายจะส่งผลกระทบต่อค่าการปรับแก้คือ ทำให้ค่า Degree of freedom ผิดไป การคำนวณค่าทางสถิติจากการปรับแก้ย่อมที่จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง สำหรับจำนวนเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดพร้อมกันหลายเครื่องในแต่ละช่วงเวลาการรังวัด จะมีจำนวนเส้นฐานทั้งสิ้น $n \cdot \frac{n-1}{2}$ เมื่อ n คือจำนวนเครื่องรับ แต่จะมีเพียงเส้นฐาน $n-1$ เส้นฐาน ที่ถูกเลือกและนำมาเข้ามาในการปรับแก้

การรังวัดข้อมูลที่มากเพียงพอ สามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล และการรังวัดซ้ำในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จะเพิ่มศักยภาพในการลดค่าคลาดเคลื่อนอันเป็นระบบ เช่น คลื่นสะท้อน (multipath) , orbit bias , การหักเหในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แม้ว่า การรังวัดจะกระทำคนละวัน ก็ควรรังวัดต่างเวลากัน เพื่อที่จะได้รับข้อมูลจากดาวเทียมที่แตกต่างกัน

การตรวจสอบเครื่องมือก็เป็นข้อพิจารณาที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนได้ แต่ละชิ้นส่วนควรได้รับการตรวจสอบอย่างเหมาะสมและสม่ำเสมอ การรังวัดที่ต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดดีกว่า 0.02 เมตร เครื่องมือควรได้รับการตรวจสอบก่อนการรังวัดไม่เกิน 30 วัน และตรวจสอบซ้ำอีกครั้งในระยะเวลาไม่เกิน 10 วัน หลังจากการปฏิบัติงาน และเพื่อการใช้งานในระยะยาว ควรตรวจสอบทุกๆ 30 วัน สำหรับการรังวัดประเภทอื่นๆ ควรตรวจสอบเครื่องมือทุกๆ 6 เดือน (Gregory A. Helmer, 1996)

2.5 การปรับแก้โครงข่าย GPS แบบลิสต์สแควร์

2.5.1 แบบจำลองการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยระบบดาวเทียม GPS

ในการปรับแก้เพื่อหาตำแหน่งค่าพิกัด ทั้งทางราบและทางคิ่งของ GPS แบบลิสต์สแควร์ วิธีการของสมการค่าสังเกตจะสามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีการของสมการเงื่อนไข ที่ต้องมีการคิดและตรวจสอบไม่ให้เงื่อนไขที่สร้างขึ้นมีความซ้ำซ้อน ข้อด้อยของวิธีสมการค่าสังเกตคือ จะทำให้เกิดระบบสมการสำหรับการคำนวณที่มีขนาดใหญ่ แต่ปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันแทบจะไม่มีผลกระทบต่อค่าการปรับแก้ เพราะทรัพยากรทางด้านหน่วยความจำ และระบบการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว

สมการค่าสังเกต สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ปรับแก้แล้วได้ดังนี้

$$La = F(Xa)$$

เมื่อ La เป็นค่าสังเกตของเส้นฐาน Xa เป็นตัวแปรของค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้

จากสมการค่าสังเกต $La = F(Xa)$ สามารถเขียนเป็นสมการในการปรับแก้โครงข่าย ในระบบพิกัดจากสามมิติ ของเส้นฐานระหว่างคู่สถานี i และ j ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{bmatrix}$$

2.5.2 ค่าความแปรปรวนร่วม (Variance Covariance)

ค่าความแปรปรวนร่วม (Q_x) เป็นการแสดงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อตัวแปรอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากข้อมูลรังวัดที่มีความสัมพันธ์กัน

ในสมการค่าสังเกต $La = F(Xa)$ สามารถแสดงเป็นสมการของค่าความแปรปรวนร่วมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_x &= N^{-1} \\ \text{เมื่อ} \quad N &= A^T P A \\ A &= \frac{\partial F}{\partial X_a} \\ P &= \text{เมตริกของค่าน้ำหนัก} \end{aligned}$$

2.5.3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติจากผลการปรับแก้

การปรับแก้แบบลีสทิงสแควร์ เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จำเป็น เพื่อการวิเคราะห์ผลข้อมูลและค่าพิกัดตำแหน่ง สิ่งสำคัญที่เป็นหัวใจของการปรับแก้โครงข่ายคือ การปรับแก้เพื่อตรวจสอบความเข้ากันของข้อมูลการรังวัดภายในโครงข่ายเอง และการปรับแก้เพื่อโยงยึดเข้ากับหมุดควบคุม ซึ่งผลที่ได้จากการปรับแก้ทั้งสองลักษณะควรได้รับการพินิจและวิเคราะห์อย่างถี่ถ้วน ค่าทางสถิติที่จำเป็นต้องตรวจสอบ มีดังนี้คือ

- The network variance unitweight (Variance Factor) และ Degree of freedom โดยค่า Variance factor จะต้องน้อยกว่า 1.5 และเข้าใกล้ 1.0
- The RMS ค่ารากกำลังที่สองของเศษคงเหลือที่น้อยสุดและมากที่สุด
- ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลค่าพิกัด
- ค่าผลการทดสอบ Tau Criterion ค่าที่เกินเกณฑ์ ควรจะขจัดออกจากการปรับแก้
- การทดสอบ Chi square เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองปริมาณความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่มีความเหมาะสม เมื่อมีการกำหนดค่าควบคุมจากภายนอก
- การตรวจสอบค่าพิกัดและค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี โดยค่าความคลาดเคลื่อนควรคำนวณที่ 95 % (1.96 sigma)

- การตรวจสอบ Error Ellipsoid รูปร่างที่ใกล้เคียงวงกลมและมีขนาดเล็ก แสดงถึงสภาวะที่ดีของโครงข่าย รูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีขนาดใหญ่ชี้ให้เห็นถึงปัญหาของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่และโครงข่ายที่ไม่ดี
- การตรวจสอบค่าพิคคของจุดควบคุมโดย การปรับแก้แบบ free adjustment หรือ minimally constrained adjustment เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของข้อมูลการรังวัด และเปรียบเทียบผลของค่าพิคคที่ได้กับค่าพิคคของสถานีควบคุมที่ทราบค่าพิคคแล้ว เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิคคของสถานีควบคุม