

## บทที่ 2

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

การศึกษาวิจัยได้ใช้วัสดุ อุปกรณ์ และระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### วัสดุ

วัสดุที่ใช้ร่วมกันในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย

1. ตะปุ่นขนาด 3 นิ้ว และฝาขวดน้ำอัดลม ใช้สำหรับทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งจุดวัดของวิธีการสำรวจทางด้านความถ่วง ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก และ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของดิน
2. สีน้ำมันหรือสีพลาสติก (สีแดง) สำหรับเขียนรหัสของจุดวัดบนเส้นทางคมนาคม หรือสถานที่ใดๆที่อยู่ใกล้จุดวัดหรือสังเกตได้ง่าย
3. ฆ้อน แปรงทาสี ทินเนอร์หรือน้ำมันสนใช้ผสมสี
4. สมุดบันทึก ปากกา ดินสอ ยางลบ ไม้บรรทัด ถุงพลาสติก
5. แผ่นคิส์กับันทึกข้อมูล
6. แผนที่ภูมิประเทศ (กรมแผนที่ทหาร, 2533) มาตรฐานส่วน 1:50,000 ระวัง 5123 III
7. ดลับเทปสายวัด

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยซึ่งแยกแสดงตามหัวข้องานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ต้องใช้สำหรับศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่างหิน ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้
  - 1.1 ตัวอย่างหินโผล่ ซึ่งเก็บมาจากพื้นที่ศึกษาจำนวนตำแหน่งเก็บตัวอย่างหิน ตำแหน่งละ 2-10 ก้อน ๆ ละไม่เกิน 3,000 กรัม
2. วัสดุที่ต้องใช้สำหรับวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ของตัวอย่างหินโผล่ในข้อ 1.1
  - 2.1 กล่องพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่างหินโผล่ซึ่งเขียนชนิดของหิน และรหัสแสดงตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างหินไว้เรียบร้อยแล้ว
3. วัสดุที่ต้องใช้สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติ
  - 3.1 น้ำมันเบนซินสำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้แก่เครื่องเจาะหิน
  - 3.2 น้ำเปล่า สำหรับใช้หล่อเย็นหัวเจาะหินซึ่งเป็นหัวเจาะชนิดฝังเพชร

## อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งแยกอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามชนิดประเภทของงานศึกษาวิจัย ดังแสดงไว้ในหัวข้อดังต่อไปนี้

### 1. อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความถ่วง

1.1 เครื่องวัดค่าความถ่วงหรือแกรวิติมิเตอร์ (gravity meter) แบบไม่เสถียรยี่ห้อลาคอสท์และรอมเบิร์ก (LaCoste & Romberg) รุ่น G-565 ที่มีค่าความแม่นยำ 0.01 มิลลิเกิล โดยใช้วัดค่าความถ่วงสัมพัทธ์ระหว่างจุดวัด ผลิตโดยบริษัท Lacoste & Romberg, inc. Austin, Texas, U.S.A. รูปที่ 4

1.2 งานรอกรักษาระดับ เพื่อปรับให้เครื่องแกรวิติมิเตอร์อยู่ในแนวระดับอย่างหยาบ

1.3 นาฬิกาจับบันทึกเวลาหลังจากทำการวัดเสร็จสิ้นในแต่ละจุดวัดเพื่อนำมาใช้ปรับแก้ดริฟท์

1.4 เทอร์โมมิเตอร์เพื่อใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศ

1.5 มาตรวัดระดับความสูง (altimeter) ประเภทความดันบรรยากาศใช้สำหรับวัดระดับความสูงของจุดวัดค่าความถ่วง ผลิตใน U.S.A. โดยบริษัท American Paulin System รุ่น MDM-5 ซึ่งมีพิสัยการวัด -100 ถึง 2,500 เมตร และค่าความละเอียดสุด 0.5 เมตร รูปที่ 5



รูปที่ 4 แก้ววัดมิติเตอร์แบบลาโคสท์และรอมเบิร์ก



รูปที่ 5 มาตรฐานระดับความสูงชนิดความดัน

## 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก

2.1 เครื่องโปรตอนแมกนีโตมิเตอร์ รุ่น GSM-8 ผลิตโดยบริษัท GEM SYSTEMS , CANADA. ใช้วัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก โดยมีความละเอียดถึง  $\pm 1$  nT รูปที่ 6

2.2 เข็มทิศใช้สำหรับบอกทิศทาง

2.3 นาฬิกาไว้นับทีกเวลาเพื่อใช้ในการปรับแก้ค่าดริฟท์



รูปที่ 6 เครื่องโปรตอนแมกนีโตมิเตอร์

## 3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาอำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติของหินเกาะขอม

3.1 เครื่องเจาะเก็บตัวอย่างหิน (portable core-drilling machine) เป็นชนิดใช้เครื่องยนต์ขนาด 40 ซีซี 2 จังหวะใช้น้ำมันเบนซิน โดยใช้หัวเจาะชนิดฝังเพชร และมีระบบหล่อเย็นโดยให้น้ำไหลผ่านด้านในหัวเจาะไปจนถึงตัวอย่างหิน รูปที่ 7

3.2 เข็มทิศแม่เหล็กและเข็มทิศสุริยะ (Magnetic and Sun compasses) โดยเข็มทิศแม่เหล็กใช้ของยี่ห้อ Silva รุ่น T15 ของประเทศสวีเดน และเข็มทิศแสงอาทิตย์จะมีอุปกรณ์วัดการวางตัวของแท่งตัวอย่างติดตั้งร่วมอยู่ด้วย รูปที่ 8

3.3 เครื่องตัดหินที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นชนิดที่ใช้มอเตอร์ทำงานขนาด  $\frac{1}{2}$  แรงม้า ใช้ใบตัดหินชนิดเปียก รูปที่ 9

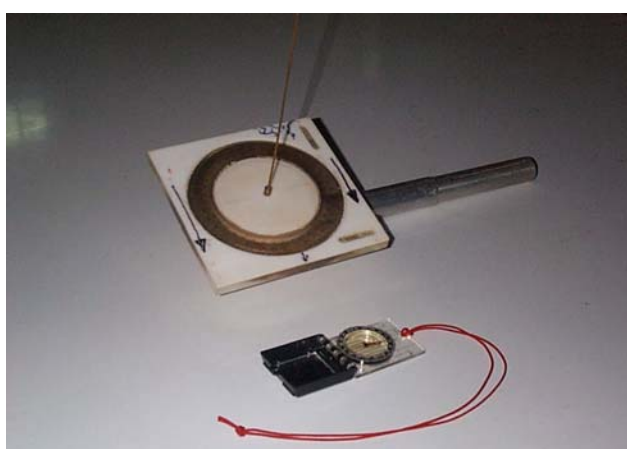
3.4 เครื่องแมกนีโทมิเตอร์แบบหมุน ( Spinner magnetometer ) ยี่ห้อ UGF รุ่น JR-4 ของประเทศสาธารณรัฐเช็ก ตัวเครื่องมีความไว  $2.4 \times 10^{-6} \text{ Am}^{-1}$  ใช้ในการวัดค่าความเข้มและทิศทาง NRM ( Natural Remanent Magnetization ) หรืออำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติ รูปที่ 10

3.5 เครื่องล้างอำนาจแม่เหล็กแบบสนามสลับ ( Alternating field, AF, demagnetizer ) ยี่ห้อ Molspin ของประเทศอังกฤษ ซึ่งสนามล้างแม่เหล็กถูกสร้างโดย AC variometer สามารถผลิตสนามความเข้มสูงสุดประมาณ 95 mT รูปที่ 11

3.6 เครื่องล้างอำนาจแม่เหล็กแบบความร้อน ( Thermal demagnetizer ) ยี่ห้อ Magnetic Measurement รุ่น MMTD-18 ของประเทศอังกฤษ รูปที่ 12



รูปที่ 7 เครื่องเจาะเก็บตัวอย่างหิน



รูปที่ 8 เข็มทิศแม่เหล็กและเข็มทิศแสงอาทิตย์



รูปที่ 9 เครื่องตัดหิน



รูปที่ 10 เครื่องแมกนีโทมิเตอร์แบบหมุน ( Spinner magnetometer )



รูปที่ 11 เครื่องล้างอำนาจแม่เหล็กแบบสนามสลับ ( Alternating Field demagnetizer )





รูปที่ 12 เครื่องล้างอำนาจแม่เหล็กแบบความร้อน ( Thermal demagnetizer )

#### 4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาค่าความหนาแน่นของหิน

4.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลขยี่ห้อ METTLER รุ่น BB3000 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo AG Switzerland มีพิกัดจำกัดวัดได้ไม่เกิน 3,000 กรัม และมีความละเอียดสุด 0.1 กรัม สำหรับชั่งมวลตัวอย่างหิน และตัดแปลงให้สามารถชั่งมวลในน้ำได้ โดยมีแขนพิเศษสำหรับเกี่ยวห่วงตะแกรงที่ใส่ตัวอย่างหินให้จมอยู่ในน้ำ

4.2 ภาชนะบรรจุน้ำ สำหรับใช้ใส่น้ำขณะที่ทำการวัดมวลตัวอย่างหินในน้ำ

4.3 ฝ่อน สำหรับใช้เคาะและทุบหินจากมวลก้อนขนาดใหญ่ให้ได้ขนาดหินตามที่ต้องการ ณ จุดเก็บหินตัวอย่างในภาคสนาม เพื่อนำมาใช้วัดค่าความหนาแน่น และค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

4.4 สกัด สำหรับเจาะจัด/แฉะหินออกจากมวลก้อนขนาดใหญ่

#### 5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินและดิน

5.1 เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ( AGICO Kappabridge ) รุ่น KLY-3S ผลิตโดยบริษัท Geophysical Instrument & Supply ของประเทศสาธารณรัฐเช็ก ใช้สำหรับวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ( magnetic susceptibility,k ) ของตัวอย่างหินโผล่ รูปที่ 13



รูปที่ 13 เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ( AGICO Kappbridge ) รุ่น KLY-3S

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการสำรวจลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับต้น  
การสำรวจลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับต้นของเกาะขอ ได้ดำเนินการสำรวจโดยใช้  
วิธีทางธรณีฟิสิกส์ทั้งสิ้น 2 วิธี โดยมีอุปกรณ์ในแต่ละวิธี ดังนี้

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินโดยใช้เครื่องมือวัดค่า  
สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของชั้นดิน ด้วยเครื่อง ABEM DC TERRAMETER SAS 300B และ  
Booster SAS 2000 รูปที่ 14

6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

6.2.1 Geometrics smartseis<sup>TM</sup> S-24 Seismograph รูปที่ 15 เป็นอุปกรณ์สำหรับบันทึก  
คลื่นไหวสะเทือนสามารถแสดงผลข้อมูลออกทางหน้าจอและมีโปรแกรมที่ช่วยใน  
การแปลความหมาย

6.2.2 จีไอโฟน จำนวน 24 ตัว ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณคลื่นสั้นสะเทือน

6.2.3 สาย cable จำนวน 2 จุด

6.2.4 แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์

6.2.5 อุปกรณ์กำเนิดคลื่นไหวสะเทือน ในที่นี้ใช้แผ่นเหล็กกับฆ้อนปอนด์

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความสูงของพื้นที่สำรวจ รูปที่ 16

7.1 กล้องวัดระดับ ยี่ห้อ Pentax สำหรับอ่านค่าความสูงของจุดวัด

7.2 ไม้สตาฟ

7.3 เทปวัดระยะ

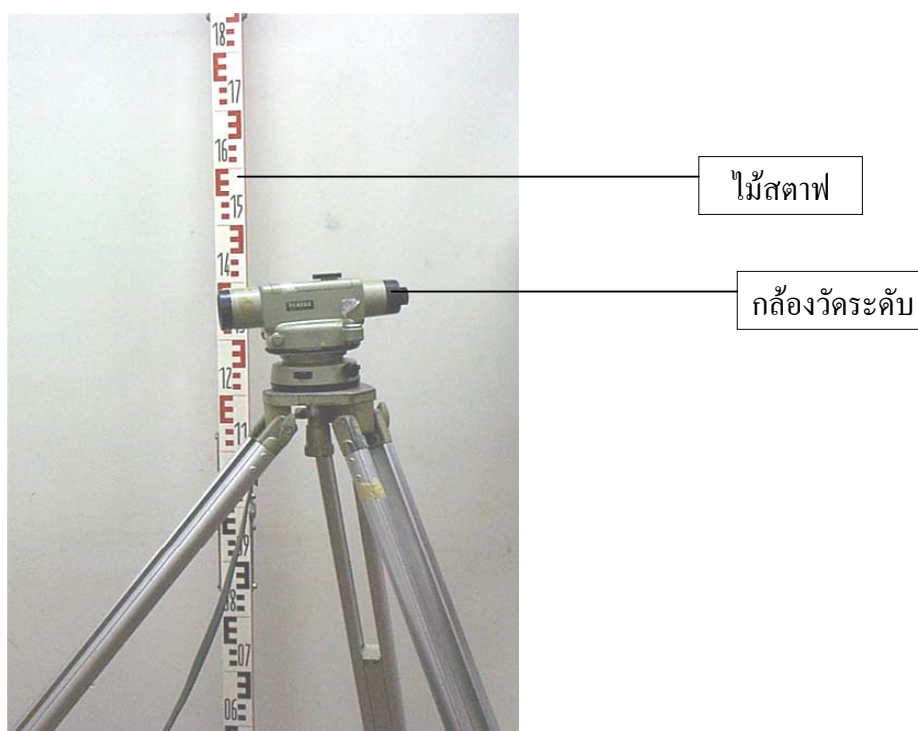




รูปที่ 14 เครื่องมือวัดสภาพค่าต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน ยี่ห้อ ABEM TERRAMETER SAS 300B และ Booster SAS 2000



รูปที่ 15 เครื่องมือวัดคลื่นไหวสะเทือนรุ่น Geometrics SmartSies™ S-24 Seismograph



รูปที่ 16 กล้องวัดระดับและไม้วัดระดับความสูง

## 8. อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ร่วมกัน

### 8.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

#### 8.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้วิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูล

8.2.1 โปรแกรม Microsoft Excel version 7.0 สำหรับการปรับแก้ค่าต่าง ๆ และการวิเคราะห์ข้อมูล

8.2.2 โปรแกรม Winsurf version 5.0 สำหรับทำแผนที่คอนทัวร์และภาคตัดขวางของความถ่วงความเข้มสนามแม่เหล็กกรมของโลกและค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของดิน

8.2.2 โปรแกรม Grapher version 1.22 สำหรับทำกราฟและแสดงแผนภาพโครงสร้างทางธรณีวิทยา

8.2.4 โปรแกรม Geo Vista AB-GMM, version 1.31 สำหรับสร้างแบบจำลอง ภาคตัดขวางของข้อมูลความถ่วงและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรมของโลกซึ่งเป็นรูปแบบปริซึม 2.5 มิติ

- 8.2.5 โปรแกรม ABEM SUPER-VES สำหรับหาจำนวนชั้นดิน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น
- 8.2.6 โปรแกรม SIP ( Seismic Interpretation Program ) สำหรับหาจำนวนชั้นดิน ความเร็วคลื่นไหวสะเทือนในดินแต่ละชั้น และความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น
- 8.2.7 โปรแกรม IAPD สำหรับทำการวิเคราะห์ Principal Component Analysis ( PCA ) ของข้อมูลการล้างแม่เหล็กแบบลำดับขั้น ( progressive stepwise demagnetization experiment )
- 8.2.8 โปรแกรม JR4 สำหรับทำการวัดค่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติ( NRM ) ของตัวอย่างหินที่ทำการเจาะสำรวจจากพื้นที่ศึกษาวิจัย
- 8.2.9 โปรแกรม Susar สำหรับทำการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินที่ทำการเจาะสำรวจจากพื้นที่ศึกษาวิจัย
- 8.2.10 โปรแกรม Susam สำหรับทำการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของดินที่ทำการเก็บจากพื้นที่ศึกษาวิจัย
- 8.2.11 โปรแกรม Geosoft GRIDEPTH สำหรับคำนวณหาความลึกของวัตถุใต้ดินที่สนใจ โดยการกำหนดรูปร่างลักษณะของวัตถุ
- 8.2.12 เครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม( GPS ) ยี่ห้อ Trimble Basic Pathfinder สำหรับอ่านตำแหน่งของจุดวัดค่าความถ่วงและความสูง รูปที่ 17



รูปที่ 17 เครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม ( GPS ) ยี่ห้อ Trimble Basic Pathfinder

## วิธีการวิจัย

กระบวนการวิจัยประกอบด้วย

1. วางแผนและกำหนดจุดเก็บข้อมูล
2. เก็บตัวอย่างหินและดิน
3. การวัดค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหิน
4. การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินและดิน
5. การวัดค่าความถ่วง
6. การวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลค่าความถ่วง
7. การวัดค่าสนามแม่เหล็กกรรมของโลก
8. การวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลค่าสนามแม่เหล็กกรรมของโลก
9. การเจาะเก็บตัวอย่างหิน
10. การวิเคราะห์อำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติของหิน
11. การสำรวจลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาด้วยเทคนิควิธีทางด้านไฟฟ้าและคลื่นไหวสะเทือนของพื้นที่ศึกษา
12. แปลผลโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

อนึ่งการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ได้แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 ตอน  
ประกอบด้วย

ตอนที่ 1 การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

ตอนที่ 2 การดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

### ตอนที่ 1 การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม ได้แบ่งไปตามประเภทของหัวข้องานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านความถ่วง

1.1 กำหนดจุดวัดค่าความถ่วงบนเส้นทางคมนาคมที่มีอยู่เดิมในพื้นที่ศึกษา รูปที่ 18 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดวัดเท่ากับ 250 เมตร รวมทั้งสิ้น 134 จุดวัด แสดงไว้ใน(ภาคผนวก ก) ตำแหน่งของจุดวัดกำหนดโดยเครื่องบอกพิกัดภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม GPS และแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ระวัง 5123 III (กรมแผนที่ทหาร, 2533)

1.2 ทำเครื่องหมายของจุดวัดลงบนเส้นทางคมนาคม โดยใช้ตะปูซึ่งมีฝาขุดน้ำอัดลมรองหัวตะปูแล้วเขียนรหัสของจุดวัดด้วยสีน้ำมันลงบนเส้นทางคมนาคม ต้นไม้ เสาไฟฟ้า หรือสิ่งที่อยู่ใกล้กับจุดวัดมากที่สุด เพื่อความสะดวกในการทำการวัดซ้ำจุดเดิมเมื่อครบวงรอบในครั้งต่อไป

1.3 วางจานรักษาระดับครอบเครื่องหมายของจุดวัด และปรับลูกน้ำรักษาระดับให้อยู่ตรงกลางแล้วจึงยกแเกรวิติมิเตอร์ออกจากกล่องมาวางบนจานรักษาระดับปรับลูกน้ำทั้งซ้ายขวาให้สมดุล หลังจากนั้นจึงเปิดปุ่มสวิชต์ไฟและคลายปุ่มล็อกมวล (unclamp) ปรับสเกลให้ได้ตรงตำแหน่งเส้นอ่าน (reading line) แล้วจึงบันทึกหรัสของจุดวัด เวลาคณะที่ทำการวัด ค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์ของแเกรวิติมิเตอร์ และอุณหภูมิ หลังจากนั้นล็อกมวล (clamp) ปิดสวิชต์ไฟ

1.4 วางมาตรวัดระดับความสูงลงบนจานรักษาระดับ ปรับเข็มที่อ่านค่าให้ตรงกับจุดศูนย์ แล้วบันทึกค่าความสูงที่อ่านได้

1.5 ทำการบันทึกค่าความสูงเฉลี่ยของภูมิภาค ลงในตารางบันทึกค่าปรับแก้ภูมิภาค ตัวอย่างในตารางที่ 1 โดยทำการบันทึกในโซน B ถึง E โดยแต่ละโซนเป็นการบันทึกค่าความแตกต่างของค่าความสูงเฉลี่ยของแต่ละห้องของโซนต่าง ๆ กับความสูงของจุดวัดโดยอาศัยการประมาณค่าทางสายตา โดยที่รัศมีและจำนวนห้องของแต่ละโซนมีแสดงไว้ในตารางที่ 2

1.6 อ่านค่าพิกัดของตำแหน่งจุดวัดด้วยเครื่อง GPS หรืออ่านจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1: 50,000

1.7 วัดระยะกับมาตรวัดระยะทางของรถ เพื่อที่จะกำหนดจุดวัดต่อไป ตามที่ได้กำหนดไว้แล้วในข้อ 1.1

1.8 เมื่อทำการวัดนานประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วจะต้องกลับไปวัดที่จุดอ้างอิง (Base station) ก็จะได้จุดที่ทำการวัดเป็นวงรอบ รูปที่ 19 ซึ่งในวงรอบที่ 1 T0 เป็นจุดอ้างอิง T1 - T13 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง ส่วนในวงรอบที่ 2 T13 เป็นจุดอ้างอิง T14 - T30 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง และในวงรอบที่ 3 T30 เป็นจุดอ้างอิง T31 - T45 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง โดยแต่ละวงรอบไม่ควรใช้เวลานานเกิน 3 ชั่วโมง และตัวอย่างผลที่บันทึกได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการบันทึกค่าปรับแก้ภูมิประเทศในโซน B ถึง E

PROJECT....การศึกษาโครงสร้างธรณีวิทยาของเกาะขอม จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

AREA...เกาะขอม.... OBSERVER...นายชาญยุทธ ฟองสุวรรณ.... DATE 29/08 /2542

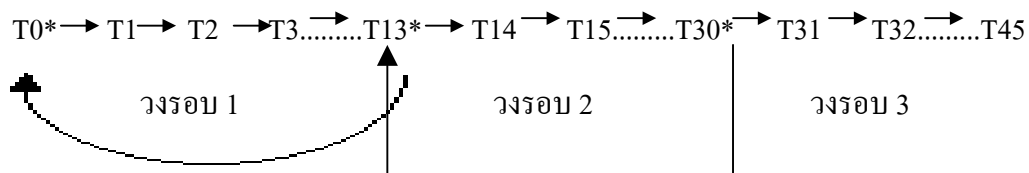
STATION....T0*.....ALTIUDE.....TOTAL CORRECTION.....		1	2	3	4	5	6	7	8	
ZONE										
A										
	ALT.									
B	DIF.	-1.5	-1.0	0.2	0					
	COR.									
	ALT.									
C	DIF.	-1	-1	-1	0.3	-2.5	-2.5			
	COR.									
	ALT.									
D	DIF.	-1	-0.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5			
	COR.									
	ALT.									
E	DIF.	-1	-1	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	
	COR.									

ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้ปรับแก้ภูมิประเทศในโซน B ถึง E

โซน	รัศมีวงใน (m)	รัศมีวงนอก (m)	จำนวนห้อง
B	2.0	16.6	4
C	16.6	53.3	6
D	53.3	170.1	6
E	170.1	390.1	8



รูปที่ 20 การจัดวางขั้วขบวนไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์



รูปที่ 19 ตัวอย่างวงรอบของการวัดค่าความถ่วงและความสูงโดยใช้เวลาวงรอบละ 1-3 ชั่วโมง

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลความถ่วงและความสูงในภาคสนาม

วันที่	รหัส	พิกัดกริด (E)	พิกัดกริด (N)	เวลา (hr:min)	ค่ามิเตอร์ (mgal)	ความสูง (m)	อุณหภูมิ (°C)
29 ส.ค. 42	T0*	672297	791224	11:10	1681.968	13	32
	T1	671985	791538	11:27	1682.368	9	32
	T2	671867	791621	11:34	1683.018	9	34
	T3	671788	791820	11:43	1684.424	11	34
	T4	671647	791946	11:49	1685.208	16	34
	T5	671343	792025	11:58	1684.548	15	34
	T6	671246	792213	12:07	1685.285	14	34
	T7	671143	792430	12:15	1686.035	16	35
	T8	671067	792687	12:21	1686.850	17	34
	T9	670998	792842	12:33	1687.658	21	35
	T10	671060	793170	12:41	1688.537	17	36
	T11	670981	793333	12:50	1688.397	20	36
	T12	670910	793498	12:57	1689.150	21	36
	T13	670823	793757	13:04	1688.640	21	35
	T0*	672297	791224	13:18	1681.865	22	35.5

## 2. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านความหนาแน่นของหินโผล่

2.1 เก็บตัวอย่างหินโผล่(outcrop)ประมาณ 4-10 ก้อนในแต่ละบริเวณที่มีมวลหินโผล่ โดยการประมาณค่าก้อนละไม่เกิน 3,000 กรัม เพื่อนำไปวัด ค่าความหนาแน่น โดยจะทำการเก็บตัวอย่างหินหลังจากทำการวัดค่าความถ่วง และความสูงในพื้นที่ศึกษาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้เพื่อใช้เวลาสำหรับการวัดค่าความถ่วงในแต่ละวงรอบให้น้อยลง

2.2 เขียนรหัสของจุดวัดติดไว้ที่ตัวอย่างหินทุก ๆ ก้อน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกต่อการกำหนดตำแหน่งของตัวอย่างหินในแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:50,000

2.3 อ่านค่าพิกัดของตำแหน่งจุดวัดด้วยเครื่อง GPS หรืออ่านจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1: 50,000

## 3. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินและดิน

3.1 ใช้ตัวอย่างหินโผล่(outcrop)เหมือนในข้อ 2.1 ถึง 2.3 และตัวอย่างแท่งเจาะในหัวข้อ 5.2 เพื่อนำไปวัด ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

3.2 เก็บตัวอย่างดินใส่ในภาชนะหรือถุงพลาสติกให้ได้ปริมาตรของดินในภาชนะมากกว่า 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรขึ้นไป โดยเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มและครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 5 ตารางเมตรต่อหนึ่งจุดวัด ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดวัดค่าความถ่วงและจุดวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก รวมจุดเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 128 จุด อนึ่งให้พิจารณาและเลือกเก็บตัวอย่างดินที่เป็นดินท้องถิ่นดั้งเดิม

3.3 เขียนรหัสของตัวอย่างดินไว้ข้างภาชนะหรือถุงพลาสติกและอ่านค่าพิกัดของตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องอ่านพิกัดภูมิศาสตร์ GPS หรืออ่านจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1: 50,000

## 4. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก

4.1 กำหนดจุดวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกบนเส้นทางคมนาคมที่มีอยู่เดิมในพื้นที่ศึกษารูปที่ 18 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดวัดเท่ากับ 250 เมตร รวมทั้งสิ้น 126 จุดวัด (ภาคผนวก ก) ตำแหน่งของจุดวัดกำหนดโดยเครื่อง GPS และแผนที่ภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5123 III (กรมแผนที่ทหาร, 2533)

4.2 ทำเครื่องหมายของจุดวัดลงบนเส้นทางคมนาคม โดยใช้ตะปูซึ่งมีฝาขวดน้ำอัดลมรองหัวตะปูแล้วเขียนรหัสของจุดวัดด้วยสีน้ำมันลงบนเส้นทางคมนาคม ต้นไม้ เสาไฟฟ้า หรือสิ่งที่อยู่

ใกล้กับจุดวัดมากที่สุด เพื่อความสะดวกในการทำการวัดซ้ำจุดเดิมเมื่อครบวงรอบในครั้งต่อไป ซึ่งตำแหน่งจุดวัดโดยส่วนใหญ่จะซ้ำกับตำแหน่งจุดวัดค่าความถ่วง

4.3 ทำการวัดค่าความเข้มนามแม่เหล็กรวมของโลกโดยใช้เครื่อง โพรตอนแมกนีโทมิเตอร์ GSM-8 โดยห้ววัดจะอยู่สูงจากพื้นประมาณ 3 ฟุต และแกนของห้ววัดวางตัวในแนวทิศ ตะวันออก-ทิศตะวันตก โดยดูทิศจากเข็มทิศ ข้อควรระวังในขณะที่ทำการสำรวจ ผู้ทำการสำรวจไม่ควรสวมใส่เครื่องแต่งกายที่ประดับด้วยส่วนผสมที่เป็นเหล็ก และจุดที่วัดไม่ควรอยู่ใกล้เสาไฟฟ้า หรือสายไฟฟ้า ถนนที่มีรถวิ่งผ่านไปมา กัมแพง สังกะสี หรือสิ่งอื่นใดที่ทำการรบกวนค่า สนามแม่เหล็กขณะทำการวัด

4.4 อ่านค่าและบันทึกค่าสนามแม่เหล็กและเวลาขณะทำการวัดเพื่อนำไปปรับแก้ค่าดริฟท์

4.5 อ่านค่าพิกัดของตำแหน่งจุดวัดด้วยเครื่องอ่านพิกัดภูมิศาสตร์ GPS หรืออ่านจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1: 50,000

4.6 วัดระยะกับมาตรวัดระยะทางของรถ เพื่อที่จะกำหนดจุดวัดต่อไป ตามที่ได้กำหนดไว้แล้วในข้อ 4.1

4.7 เมื่อทำการวัดนานประมาณ 1-2 ชั่วโมง แล้วจะต้องกลับไปวัดที่จุดอ้างอิง

(Base station) ก็จะได้จุดที่ทำการวัดเป็นวงรอบซึ่งคล้ายกับกรณีที่วัดค่าความถ่วง

## 5. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านอำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติของหิน เกละยอ

5.1 การเลือกหิน โผล่ (outcrop) รูปที่ 42 เพื่อเก็บตัวอย่างหินในทางปฏิบัติแล้วควรเลือก ตำแหน่งที่จะเจาะเก็บตัวอย่างหินในรายละเอียดข้างล่างนี้แต่ในพื้นที่ที่เกาะยอซึ่งเป็นหินตะกอนและ ได้ผ่านกระบวนการแปรสภาพไปแล้วนั้นก็สามารเลือกได้ในหัวข้อ 5.1.5 โดยมีวิธีการพิจารณาดัง นี้

5.1.1 หิน โผล่จะต้องมีลักษณะของเนื้อหินที่สดที่สุด

5.1.2 หิน โผล่จะต้องมีแนวรอยเลื่อน รอยแยก และรอยแตกของชั้นหินน้อยที่สุด หรือไม่มีเลย

5.1.3 หิน โผล่จะต้องไม่ถูกขบวนการแปรสภาพเนื่องจากอุณหภูมิและความร้อน จนกระทั่งกลายเป็นหินแปร

5.1.4 หิน โผล่จะต้องไม่ถูกขบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะอย่างรุนแรง

5.1.5 หิน โผล่ที่เป็นหินชั้น ควรจะแสดงแนวของชั้นหินให้เห็นได้อย่างชัดเจน

## 5.2 การเก็บตัวอย่างหินด้วยวิธีวัดการวางตัว(oriented sampling)

### 5.2.1 ตัวอย่างแท่งเจาะ ( cored samples )

เป็นการเจาะเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะมือขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านเจาะ 1 นิ้ว ตัวอย่างที่เก็บจะต้องมีความยาวของแท่งเจาะประมาณ 3 ถึง 5 นิ้ว จะมีการทำเครื่องหมายลงบนหิน และมีการบันทึกค่า magnetic strike ค่ามุมเงาสุริยะ (shadow angle) ของมุมบ่ายเบน (declination) และมุมเท (dip) ของหินจากแท่งเจาะ โดยมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า เข็มทิศสุริยะ เป็นตัววัดค่ามุมทั้งสอง เมื่อได้ตัวอย่างหินแล้วจะนำไปทำการตัดออกเป็นขนาด 1 นิ้ว เพื่อนำไปใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการต่อไป

5.3 อ่านค่าพิกัดของตำแหน่งจุดวัดด้วยเครื่อง GPS หรืออ่านจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1: 50,000

5.4 บันทึกค่าตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ และเวลาที่ขณะทำการวัด

## 6. การดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้านการสำรวจลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาในระดับต้น

ได้แบ่งลักษณะการตรวจสอบถึงสภาพโครงสร้างของชั้นดินไว้ 2 วิธีด้วยกันคือวิธีวัดค่าสภาพด้านทานทางไฟฟ้าและวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหซึ่งมีวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

### 6.1 วิธีวัดสภาพด้านทานทางไฟฟ้าของชั้นดิน (electrical method) แบบ depth sounding

#### 6.1.1 จัดวางขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ ( Schlumberger configuration)

รูปที่ 20 โดยเริ่มต้นกำหนดขั้วไฟฟ้าศักย์ M และ N ห่างกัน 0.5 เมตร

และขั้วกระแส A และ B ห่างจากจุดกึ่งกลาง MN เท่ากับ 1.5 เมตร (AB/2)

#### 6.1.2 ปล่อยกระแสไฟฟ้าพร้อมทั้งบันทึกค่าความต้านทานที่วัดได้ ลงในตารางบันทึกค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

#### 6.1.3 เพิ่มระยะระหว่างขั้วกระแส (AB/2) เป็น 1.5, 2, 3,4,5, 7, ... , 300 เมตร

แล้วทำซ้ำข้อ 6.1.2 เมื่อความต้านทานที่วัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำ ก็เพิ่ม

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าศักย์ M และ N เป็น 2, 7, 10, 20 และ 40 เมตร

ตามลำดับ

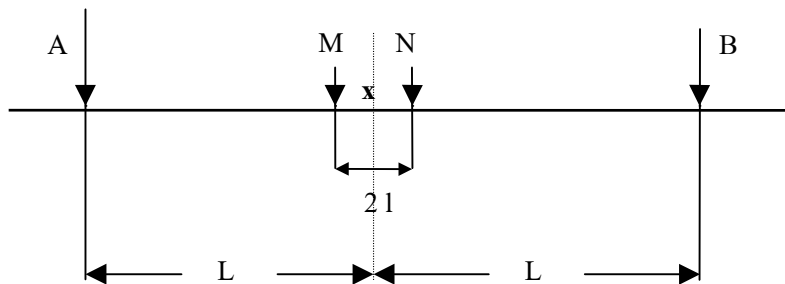
## 6.2 วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห ( Seismic Refraction Method )

6.2.1 วางแนวสำรวจโดยใช้จีไอโฟน 12 ตัว ( $G_1$  ถึง  $G_{12}$ ) โดยแต่ละตัววางห่างกัน 4 เมตร กำหนดจุดกำเนิดสัญญาณ 7 จุด ให้  $S_1, S_2, \dots, S_7$  เป็นจุดกำเนิด สัญญาณจุดที่ 1, 2, ..., 7 ตามลำดับ จุด  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  อยู่ห่างจากตำแหน่งจีไอโฟนตัวที่ 1 ( $G_1$ ) เป็นระยะ 50 , 26 และ 2 เมตรตามลำดับ ไปทางซ้ายของแนวสำรวจ ส่วนจุด  $S_4$  จะอยู่ตรงกลางระหว่างจีไอโฟนตัวที่ 6 กับ จีไอโฟนตัวที่ 7 จุด  $S_5, S_6$  และ  $S_7$  จะวางห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 12 ( $G_{12}$ )เป็นระยะ 2 , 26 และ 50 เมตร ตามลำดับ ไปทางขวาของแนวสำรวจ รูปที่ 21

6.2.2 ให้กำเนิดสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน Seismic ที่จุดกำเนิดสัญญาณ  $S_1$  พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลที่ได้

6.2.3 ทำซ้ำข้อ 6.2.2 โดยเปลี่ยนจุดกำเนิดสัญญาณเป็น  $S_2, S_3, \dots, S_7$  ตามลำดับ

6.2.4 ทำการรังวัดระดับ (Levelling) ในตำแหน่งจุดที่วางจีไอโฟน และตำแหน่งจุดกำเนิดสัญญาณ







## ตอนที่ 2 การดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการนี้ เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลในภาคสนาม มาทำการวิเคราะห์และปรับแก้ข้อมูล โดยแบ่งตามหัวข้อประเภทของการศึกษาวิจัยมีรายละเอียดแยกได้ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณค่าความถ่วง
2. การวัดค่าความหนาแน่นของหินตัวอย่าง
3. การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่างหินและดิน
4. การวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กรวมของโลกโดยการสำรวจภาคพื้นดิน
5. การวิเคราะห์อำนาจความเป็นแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติของหินเกาะขย
6. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับต้นของเกาะขยโดยเทคนิควิธีทางด้านไฟฟ้าและคลื่นไหวสะเทือน

### 1. การคำนวณค่าความถ่วง

ความแตกต่างในค่าความถ่วงระหว่างจุดอ้างอิงและจุดวัดอื่นใด จะเป็นผลมาจากปัจจัยอื่นหลายประการ นอกเหนือไปจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพธรณีวิทยาใต้ดิน ปัจจัยที่สำคัญอื่นได้แก่ การแปรผันของค่าที่อ่านได้โดยเกรวิติมิเตอร์ที่ตำแหน่งเดิมเมื่อเวลาผ่านไป รูปร่างลักษณะของโลกเป็นทรงกลมแบนขั้ว (oblate spheroid) ระดับความสูงที่แตกต่างกันของจุดวัดและลักษณะภูมิประเทศในบริเวณสำรวจ ด้วยเหตุนี้เองค่าความถ่วงระหว่างจุดอ้างอิง (base station) และจุดอื่น ๆ ต้องได้รับการปรับแก้เพื่อตัดอิทธิพลการแปรผันค่าความถ่วงเนื่องจากสาเหตุที่ไม่เกี่ยวข้องกับสภาพโครงสร้างธรณีวิทยาใต้ดินออกไป อันได้แก่ การปรับแก้คริฟท์ (drift correction) การปรับแก้ละติจูด (latitude correction) การปรับแก้ฟรี-แอร์ (free-air correction) การปรับแก้บูร์แกร์ (Bouguer correction) และการปรับแก้ลักษณะภูมิประเทศ (terrain correction)

การคำนวณค่าความถ่วง ประกอบด้วย

- 1.1 การปรับแก้คริฟท์ที่ความสูงและความถ่วง
- 1.2 การปรับแก้ละติจูด
- 1.3 การปรับแก้อิทธิพลของระดับความสูง
- 1.4 ค่าผิดปกติบูร์แกร์

## 1.1 การปรับแก้ครีฟท์ของระดับความสูงและความถ่วง (drift correction)

### 1.1.1 การปรับแก้ครีฟท์ของระดับความสูงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เนื่องจากค่าระดับความสูงที่อ่านได้จากเครื่องวัดความสูงแบบบารอมิเตอร์ จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้เพื่อหาค่าความสูงแท้จริง เพื่อจะนำไปใช้ในการปรับแก้ค่าความถ่วงต่อไป การปรับแก้ค่าความสูงมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

1.1.1.1 ทำการเปลี่ยนหน่วยเวลาที่ใช้ในการวัดจากหน่วย ชั่วโมง:นาทื เป็น หน่วยชั่วโมง

1.1.1.2 หาค่าความสูงที่แตกต่างของจุดวัดที่อยู่ติดกัน โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta H_n = (H_n^{obs} - H_{n-1}^{obs}) \times \left\{ 1 + 0.0036 \times \left[ \frac{(T_n + T_{n-1})}{2} \right] - 10 \right\} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

$\Delta H_n$  คือ ค่าความสูงที่ปรับเทียบกับอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เมตร

$H_n^{obs}, H_{n-1}^{obs}$  คือ ค่าความสูงที่อ่านได้จากมาตรวัดระดับความสูงที่จุด  $n$  และ  $n-1$  ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เมตร

$T_n, T_{n-1}$  คือ อุณหภูมิขณะทำการวัดที่จุด  $n$  และ  $n-1$  ตามลำดับ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส °C

1.1.1.3 คำนวณค่าความสูงขณะที่ทำการวัดของแต่ละจุดที่เวลาใด ๆ เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเริ่มต้น ดังสมการ

$$H_n^c = \Delta H_n + H_{n-1}^c \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

$H_n^c, H_{n-1}^c$  คือ ค่าความสูงที่เวลาใดๆ ที่ทำการวัดที่จุด  $n$  และ  $n-1$  ตามลำดับ เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเริ่มต้น มีหน่วยเป็น เมตร

1.1.1.4 จากข้อ 1.1.1.2 และ 1.1.1.3 นำมาคำนวณหาค่าครีฟท์ โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Drift = \frac{H_E^C - H_B^C + Dr}{t_E - t_B} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ *Drift* คือ ค่าคริปท์ของการวัดในวงรอบนี้ มีหน่วยเป็น เมตรต่อชั่วโมง

$H_B^C$  คือ ค่าความสูงที่ปรับเทียบแล้วของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้น มีหน่วยเป็น เมตร

$H_E^C$  คือ ค่าความสูงที่ปรับเทียบแล้วของจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัด  
มีหน่วยเป็น เมตร

*Dr* คือ ค่าความแตกต่างของความสูงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นและ  
จุดสิ้นสุดการวัดของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เมตร

$t_B, t_E$  คือ เวลาของการวัดความสูงของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการวัด  
ของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

1.1.1.5 กำหนดค่าความสูงที่ปรับแก้คริปท์แล้วของจุดวัดใดๆ โดยการนำค่า  
ความสูงที่ปรับเทียบ กับจุดวัดเริ่มต้นแล้ว มาหักลบกับค่าคริปท์ของ  
เวลาใด ๆ แล้วจึงรวมกับค่าความสูงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงหลัก  
ดังสมการ

$$H_n^{abs} = H_n^C - [Drift \times (t_n - t_B)] + H_{sc} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

$H_n^{abs}$  คือ ค่าความสูงสัมบูรณ์ของจุดวัดใดๆ ที่ปรับแก้คริปท์แล้ว มีหน่วยเป็น เมตร

$H_n^C$  คือ ค่าความสูงใดๆ ที่ปรับเทียบแล้วกับจุดอ้างอิงที่เริ่มต้น มีหน่วยเป็น เมตร

$t_n, t_B$  คือ เวลาของจุดวัดใด ๆ และจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นของวงรอบ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

$H_{sc}$  คือ ค่าความสูงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงหลักที่ใช้ มีหน่วยเป็น เมตร

สำหรับการวัดค่าความถ่วงในการวิจัยครั้งนี้ ได้อ้างอิงค่าความสูงสัมบูรณ์ของ  
จุดอ้างอิงหลัก SC ที่หน้าอาคารภาควิชาภาษาต่างประเทศ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
(กริด 666000E, 774637N) ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 24.35 เมตร โดยมีตัวอย่างการปรับแก้คริปท์ 34  
ค่าความสูง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการปรับแก้คริปท์ค่าความสูง

วันที่	รหัส	เวลา	ความ	อุณหภูมิ	เวลา	ความ	ความ	ความสูง	คริปท์
--------	------	------	------	----------	------	------	------	---------	--------

	Stn	T (hr:min)	สูง $H^{obs}$ (m)	T (°C)	$\Delta t$ (hr)	แตกต่าง $\Delta H$ (m)	สูง $H^C$ (m)	สัมบูรณ์ $H^{abs}$ (m)	Drift (m/hr)
16 ก.ย. 2542	T13*	9:22	37	30.0	0.00		0.00	8.89	0.53
	TK27	9:37	95	30.0	0.25	62.18	62.18	70.94	
	TK28	9:52	56	30.0	0.50	-41.81	20.37	29.00	
	TK29	10:08	32	35.5	0.77	-25.97	-5.60	2.89	
	TK30	10:18	29	33.5	0.93	-3.26	-8.86	-0.46	
	TK31	10:31	33	33	1.15	4.33	-4.53	3.76	
	TK32	10:39	32	36	1.28	-1.09	-5.62	2.60	
	TK33	10:52	39	35	1.50	7.64	2.03	10.12	
	T13*	11:08	38	34.5	1.77	-1.09	0.94	8.89	
4 เม.ษ. 2543	SC*	8:50	51.0	30.0	0.00		0.00	24.35	-4.63
	T13	9:27	34.0	33.0	0.62	-18.32	-18.32	8.89	
	SC*	10:27	44.0	33.0	1.62	10.83	-7.49	24.35	

1.1.1 การปรับแก้ครีฟท์ความถ่วงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1.2.1 เปลี่ยนเวลาในการวัดจากหน่วย ชั่วโมง:นาที เป็นหน่วย ชั่วโมง

1.1.2.2 นำค่าที่อ่านได้จากตัวนับ (counter) ของแกรวิติมิเตอร์

( gravity meter ) คูณด้วยตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ของแกรวิติมิเตอร์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6 เพื่อเปลี่ยนเป็นค่าความถ่วงในหน่วยมิลลิเกิล (milligal) สำหรับทุกๆ จุด โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g^{mgal} = \{(g^{obs} - A) \times B\} + C \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ  $g^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วง มีหน่วยเป็น มิลลิเกิล ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )

$g^{obs}$  คือ ค่าที่อ่านได้จากตัวนับบนแกรวิติมิเตอร์

$A$  คือ ค่าพิสัยการอ่านของแกรวิติมิเตอร์แบบลาคอสท์และรอมเบิร์ต รุ่น G-565

$B, C$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับค่าของ  $A$

ตารางที่ 6 ตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ของแกรวิติมิเตอร์แบบลาคอสท์และรอมเบิร์ต รุ่น G-565

A	B	C
1600-1699	1629.10	1.01860
1700-1799	1730.96	1.01874

1.1.2.3 จากข้อ 1.1.2.1 และ 1.1.2.2 นำมาคำนวณหาค่าคริฟท์ โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Drift = \frac{(g_E^{mgal} - g_B^{mgal} + Dr)}{t_E - t_B} \dots\dots\dots(6)$$

- เมื่อ *Drift* คือ ค่าคริฟท์ของการวัดในวงรอบนี้ มีหน่วยเป็น มิลลิเกลดต่อชั่วโมง
- $g_B^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วงของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัด มีหน่วยเป็น มิลลิเกลด
- $g_E^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วงของจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัด มีหน่วยเป็น มิลลิเกลด
- Dr* คือ ค่าความแตกต่างของความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัดกับจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัดของวงรอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเกลด
- $t_B, t_E$  คือ เวลาของการวัดความถ่วงของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัดกับจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัดของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

1.1.2.3 นำค่าคริฟท์ที่คำนวณได้ไปหักลบค่าความถ่วงของจุดวัดใด ๆ ในวงรอบ เพื่อให้ได้ค่าความถ่วงที่เวลาเดียวกันทั้งหมด

$$cor\ g_n^{mgal} = g_n^{mgal} - Drift \times (t_n - t_B) \dots\dots\dots(7)$$

- เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$
- $cor\ g_n^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วงใด ๆ ที่ปรับแก้คริฟท์แล้ว มีหน่วยเป็น มิลลิเกลด
- $g_n^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วงจุดใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิเกลด
- $t_n, t_B$  คือ เวลาของจุดวัดใด ๆ และจุดวัดเริ่มต้นของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

1.1.2.4 กำหนดค่าความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดวัดใด ๆ โดยการหาค่าความแตกต่างของความถ่วงที่ปรับแก้คริฟท์แล้วของจุดวัดและจุดอ้างอิงแล้วมารวมกับค่าความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิง

ตั้งสมการ

$$g_n^{abs} = (\text{cor } g_n^{mgal} - \text{cor } g_{n-1}^{mgal}) \times 10 + g_{n-1}^{abs} \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

$g_n^{abs}, g_{n-1}^{abs}$  คือ ค่าความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดวัดที่  $n$  และ  $n-1$  ตามลำดับ  
มีหน่วยเป็น g.u.

$\text{cor } g_n^{mgal}, \text{cor } g_{n-1}^{mgal}$  คือ ค่าความถ่วงที่ปรับแก้คริปท์ของจุดวัดที่  $n$  และ  $n-1$   
ตามลำดับ มีหน่วยเป็น มิลลิเกิล

สำหรับการวัดค่าความถ่วงในการวิจัยครั้งนี้ ได้อ้างอิงค่าความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงหลัก (จุด SC) ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (กริด 666000E, 774637N) ซึ่งมีค่าความถ่วงสัมบูรณ์เท่ากับ 9781219.8 g.u. ( $\mu\text{m/s}^2$ ) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตัวอย่างการปรับแก้คริปท์ความถ่วง

วันที่	รหัส	เวลา	ค่าที่อ่าน	เวลา	ความถ่วงที่	ค่าที่ปรับแก้	ค่าถ่วง	ค่าคริปท์
--------	------	------	------------	------	-------------	---------------	---------	-----------



	Stn	t (hr:min)	$g^{obs}$ (mgal)	$\Delta t$ (hr)	จุดวัดใดๆ $g^{mgal}$ (mgal)	ดริฟต์แล้ว cor $g^{mgal}$ (mgal)	สัมบูรณ์ $g^{abs}$ (g.u.)	Drift (mgal/hr)
16ก.ย. 2542	T13*	9:22	1688.974	0.00	1719.729	1720.88	9781427.9	0.010
	TK27	9:37	1674.247	0.25	1704.728	1705.88	9781277.8	
	TK28	9:52	1683.948	0.50	1714.609	1715.75	9781376.6	
	TK29	10:08	1687.263	0.77	1717.986	1719.13	9781410.4	
	TK30	10:18	1686.795	0.93	1717.509	1718.65	9781405.6	
	TK31	10:31	1686.430	1.15	1717.138	1718.28	9781401.8	
	TK32	10:39	1686.900	1.28	1717.616	1718.75	9781406.6	
	TK33	10:52	1688.160	1.50	1718.900	1720.03	9781419.4	
	T13*	11:08	1688.992	1.77	1719.747	1720.88	9781427.9	
4 เม.ย. 2543	SC*	8:50	1669.678	0.00	1700.074	1700.07	9781219.8	-0.09514
	T13	9:27	1690.048	0.62	1720.823	1720.88	9781427.9	
	SC*	10:27	1669.527	1.62	1699.920	1700.07	9781219.8	

### 1.2 การปรับแก้ละติจูด (latitude correction)

ค่าความถ่วงแปรผันตามละติจูดเนื่องจากโลกมีรูปร่างทรงกลมแบนขั้ว และเนื่องจากความเร็วเชิงมุมของจุดบนผิวโลกมีค่าลดลงจากค่ามากที่สุดที่ศูนย์สูตร จนเป็นศูนย์ที่ขั้วโลก ความเร่งสู่ศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนนี้จะมียอดค่าประกอบในแนวรัศมีโดยมีค่าเป็นลบ ทำให้ค่าความถ่วงลดลงจากขั้วโลกไปยังบริเวณศูนย์สูตร (วารุณี โลหะวิจารณ์, 2542) ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้อิทธิพลดังกล่าว โดยใช้ความสัมพันธ์ (Parasnis, 1997) ดังนี้

$$g_{\phi} = 9.780327 \times \left( \begin{array}{l} 1 + 0.0052790414 \sin^2 \phi + 0.0000232718 \sin^4 \phi \\ + 0.0000001262 \sin^6 \phi \end{array} \right) \dots\dots\dots(9)$$

38

เมื่อ  $g_{\phi}$  คือ ค่าความถ่วงที่ละติจูด  $\phi$  ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง มีหน่วยเป็น g.u.  
 $\phi$  คือ ค่าละติจูดของจุดวัด (องศา)

### 1.3 การแก้ไขระดับความสูง

การปรับแก้อิทธิพลของระดับความสูงที่มีต่อค่าความถ่วงของจุดวัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

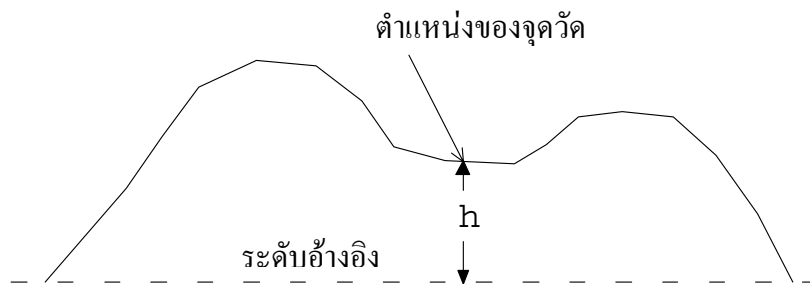
1.3.1 การปรับแก้ฟรี-แอร์ (free-air correction,FAC)

เป็นการปรับแก้การลดลงของค่าความถ่วงกับความสูงในอากาศอิสระ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางจากจุดศูนย์กลางของโลก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 22 สามารถคำนวณค่าปรับลดสำหรับจุดวัดที่ระดับความสูง h มายังระดับอ้างอิง(Parasnis,1997) โดยใช้สมการ

$$FAC = 3.072 \times h \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ FAC คือ ค่าปรับแก้ฟรี-แอร์ จะมีค่าเป็นบวกสำหรับจุดวัดที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็น g.u. ( $\mu\text{m/s}^2$ )

h คือ ค่าความสูงของจุดวัดเหนือระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็น เมตร



รูปที่ 22 การปรับแก้ฟรี-แอร์ของจุดวัดที่ระดับความสูง h เหนือระดับอ้างอิง

1.3.2 การปรับแก้บูร์แกร์ (Bouguer correction,BC)

เป็นการปรับแก้อิทธิพลโน้มถ่วงเนื่องจากความหนาแน่น  $\rho$  ของชั้นหินซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นมวลขนาดใหญ่และวางอยู่ในแนวนอน และมีความหนาเท่ากับ h ดังแสดงในรูปที่ 23 ค่าปรับแก้คำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Parasnis, 1997)

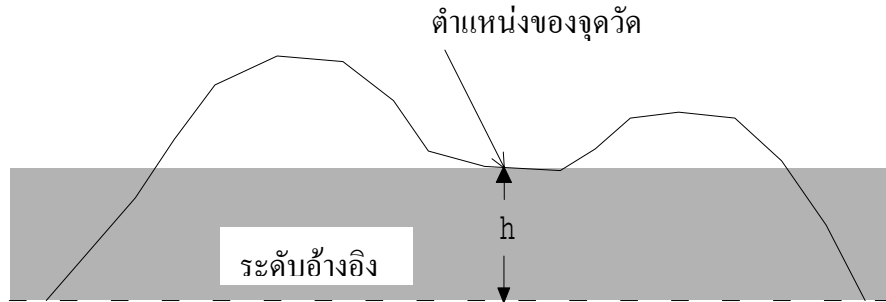
$$BC = 0.0004191 \times \rho \times h \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ BC คือ ค่าปรับแก้บูร์แกร์ มีหน่วยเป็น g.u.

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของหินใต้จุดวัด มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

h คือ ค่าระดับความสูงของจุดวัดเหนือระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตร

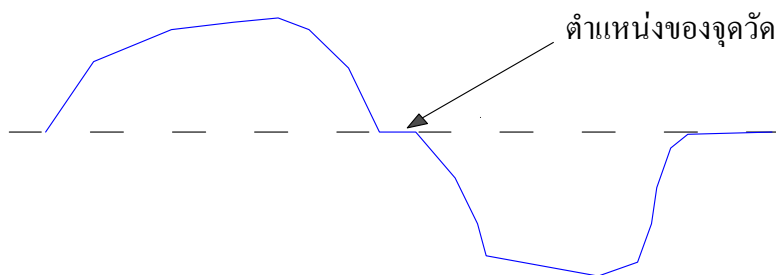
ค่าปรับแก้ BC จะมีค่าเป็นลบ เมื่อ  $h$  เป็นบวก (จุดวัดอยู่สูงกว่าระดับอ้างอิง)



รูปที่ 23 การปรับแก้บูร์แกร์

### 1.3.3 การปรับแก้ภูมิประเทศ (Terrain correction, TC)

ในกรณีที่ภูมิประเทศมีลักษณะสูงต่ำและอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดวัด เช่น การวัดค่าความถ่วงใกล้ภูเขา มวลของภูเขาจะก่อให้เกิดแรงดึงดูดในแนวตั้งขึ้น ทำให้สนามโน้มถ่วงที่อ่านมีค่าน้อย และในทำนองเดียวกันถ้าจุดวัดอยู่ใกล้กับหุบเขาหรือหุบเขาซึ่งมวลในหุบเขานั้นหายไป จึงทำให้สนามโน้มถ่วงที่อ่านได้มีค่าน้อย เพราะฉะนั้นการปรับแก้ภูมิประเทศจึงต้องนำเอาปริมาณของการแก้ไขลักษณะภูมิประเทศ (TC) บวกเพิ่มเข้ากับค่าที่อ่านได้ ณ จุดวัดเสมอไม่ว่าจะเป็นการแก้ไขเนื่องจากภูเขาหรือแอ่งหุบเขาก็ตาม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 24



รูปที่ 24 ลักษณะภูมิประเทศซึ่งมีผลต่อการวัดค่าความถ่วง  
การปรับแก้ภูมิประเทศ มีขั้นตอนดังนี้

1.3.3.1 บันทึกข้อมูลปรับแก้ภูมิประเทศในภาคสนาม ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วใน  
การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

1.3.3.2 บันทึกข้อมูลปรับแก้ภูมิประเทศในห้องปฏิบัติการมีรายละเอียดดังนี้

ก. ใช้แกรตทิคูलगกลม (circular graticule) ซึ่งแบ่งเป็นห้อง ๆ โดยมีรัศมีและเส้นรอบวงของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยมีค่ารัศมีและจำนวนห้องของแต่ละโซน กำหนดดังแสดงไว้ในตารางที่ 8 และเรียกแกรตทิคูलगกลมนี้ว่า แผนภูมิแฮมเมอร์ (Hammer chart) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 25 วางลงบนแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 โดยให้จุดศูนย์กลางของแผนภูมิอยู่ที่ตำแหน่งของจุดวัด แล้วทำการประเมินค่าระดับความสูงเฉลี่ยในแต่ละห้องของแกรตทิคูलगกลมที่ลงในตารางบันทึกข้อมูล ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9

ข. คำนวณอิทธิพลด้านความถ่วงของห้องทุกห้องบนแกรตทิคูलगกลม ดังสมการ

$$T = 0.0004191 \left( \frac{\rho}{n} \right) \left\{ r_2 - r_1 + \left( \sqrt{r_1^2 + z^2} \right) - \left( \sqrt{r_2^2 + z^2} \right) \right\} \dots\dots\dots (12)$$

- เมื่อ T คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละโซน มีหน่วยเป็น g.u.  
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของแผ่นมวลหินใต้จุดวัดเหนือระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
 n คือ จำนวนห้องของแต่ละโซน  
 $r_2, r_1$  คือ รัศมีวงนอกและวงในของแต่ละโซน ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เมตร  
 z คือ ค่าความสูงเฉลี่ยรวมเหนือระดับอ้างอิงของแต่ละโซน มีหน่วยเป็น เมตร

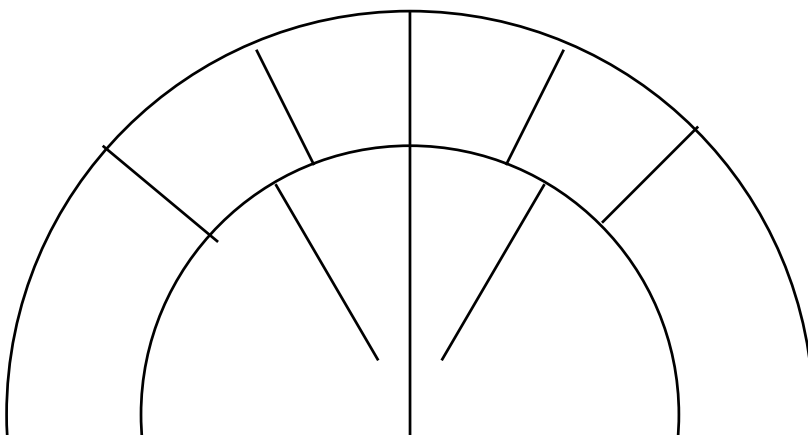
ค. นำค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละแกรตทิคูलगกลมที่ได้ในข้อ ข. มารวมเป็นค่าปรับแก้ภูมิประเทศของจุดวัด ดังสมการ

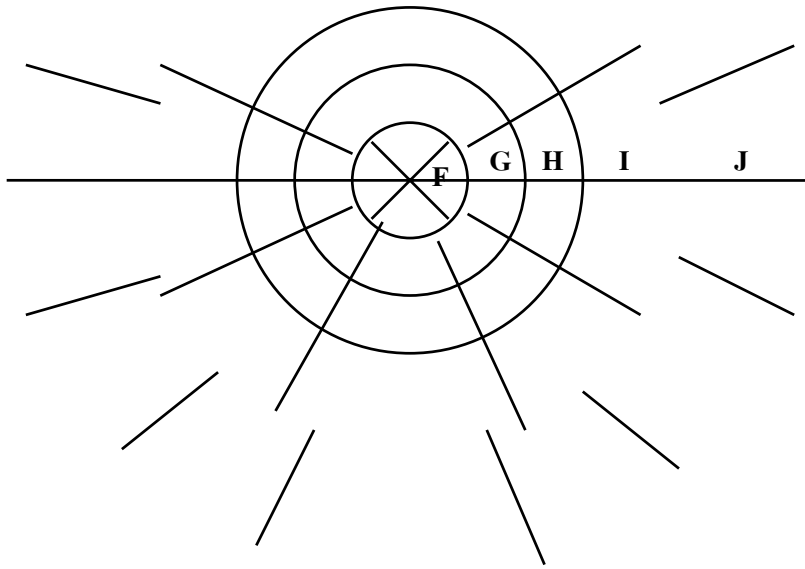
$$TC = T_B + T_C + T_D + T_E + T_F + T_G + T_H + T_I + T_J \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ TC คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของจุดวัด มีหน่วยเป็น g.u.

$T_B, T_C, T_D, T_E, T_F, T_G, T_H, T_I, T_J$  คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละแกรตทิคูलगกลมตั้งแต่

B ถึง J ตามลำดับ มีหน่วยเป็น g.u.





รูปที่ 25 แผนภูมิแฮมเมอร์

ตารางที่ 8 ค่าที่ใช้ปรับแก้ภูมิประเทศในโซน F ถึง J

โซน	รัศมีวงใน (m)	รัศมีวงนอก (m)	จำนวนห้อง
F	390.1	894.8	8
G	894.8	1529.4	12
H	1529.4	2641.4	12
I	2641.4	4468.8	12
J	4468.8	6652.5	16

ตารางที่ 9 ตัวอย่างตารางบันทึกค่าปรับแก้ภูมิประเทศในโซน F ถึง J

PROJECT.....การศึกษาโครงสร้างธรณีวิทยาของเกาะยอ จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

STATION...T0\*.....ALTITUDE....15.....TOTAL CORRECTION.....

COMPARTMENT		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ZONE																	
	ALT.																
F	DIF.	-15	-15	5	0	-15	-15	-10	-10								
	COR.																
	ALT.																
G	DIF.	-15	0	5	85	45	-15	-15	-15	-10	-10	-10					
	COR.																
	ALT.																
H	DIF.	-15	-15	25	5	0	-15	-15	-15	-10	-15	-5	-5				
	COR.																
	ALT.																
I	DIF.	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-5	-5	-5	0	0	0				
	COR.																
	ALT.																
J	DIF.	-15	-10	-10	-10	-5	-5	-5	-5	0	0	0	0	-10	-10	-10	-10
	COR.																

#### 1.4 ค่าผิดปกติบูร์แกร์ (Bouguer anomaly)

1.4.1 เป็นการนำค่าความถ่วงที่ได้รับการปรับแก้จากอิทธิพลของสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.1 ถึง 1.3 เรียกว่า ค่าผิดปกติบูร์แกร์ (Bouguer anomaly) แสดงได้ดังตารางที่ 10 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$BA = g^{abs} - g_{\phi} + FAC - BC + TC \dots\dots\dots(14)$$

เมื่อ BA คือ ค่าผิดปกติบูร์แกร์สัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น g.u.

$g^{abs}$  คือ ค่าความถ่วงสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น g.u.

$g_{\phi}$  คือ ค่าปรับแก้ละติจูด มีหน่วยเป็น g.u.

FAC คือ ค่าปรับแก้ฟรี-แอร์ มีหน่วยเป็น g.u.

BC คือ ค่าปรับแก้บูร์แกร์ มีหน่วยเป็น g.u.

TC คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศ มีหน่วยเป็น g.u.

1.4.2 นำค่าพิคัดของจุดวัดและค่าผิดปกติบูร์แกร์สัมบูรณ์ที่ได้จากข้อ 1.4.1



มาเขียนแผนที่คอนทัวร์ความถ่วง มาตรฐาน 1:50,000 โดยใช้โปรแกรม Winsurf version 5.0 (วิธีการคิดแบบ Inverse Distance Power Two, Search Type: Quadrant, Search radius : 600 m, Data Per Sectors : 3, Minimum Total Data : 2 , Max Empty Sectors : 1, Spacing : 250 m.)

1.4.3 กำหนดภาคตัดขวางของความถ่วงผ่านแผนที่คอนทัวร์ความถ่วง มาตรฐาน 1:50,000 ในแนว AA', BB', CC' รูปที่ 34

1.4.4 นำภาคตัดขวางความถ่วงที่ได้ในข้อ 1.4.3 มาสร้างแบบจำลองภาคตัดขวาง ด้วยโปรแกรม Geo Vista AB-GMM, version 1.31

ตารางที่ 10 ตัวอย่างการคำนวณค่าผิดปกติบูร์แกร์

รหัส	E (UTM)	N (UTM)	ละติจูด $\phi$ (degree)	ค่าปรับแก้ ละติจูด $g_{\phi}$ (g.u.) 9781xxx.x	ความถ่วง สัมบูรณ์ $g^{abs}$ (g.u.) 9781xxx.x	ความสูง ของ จุดวัด H (m)	ค่าปรับแก้ ภูมิประเทศ TC (g.u.)	ค่า ผิดปกติ บูร์แกร์ BA (g.u.)
T13	670823	793757	7.179	133.4	427.9	8.9	8.49	322.8
TK27	670495	792503	7.168	130.9	277.8	70.9	9.95	315.4
TK28	670331	792530	7.168	130.9	376.6	29.0	4.79	315.2
TK29	669893	790760	7.152	127.4	410.4	2.9	0.12	289.6
TK30	670206	790686	7.151	127.2	405.6	-0.5	0.20	277.5
TK31	669948	790374	7.165	130.3	401.8	3.8	0.11	280.0
TK32	669761	790379	7.165	130.3	406.6	2.6	0.30	282.4 <sub>44</sub>
TK33	669278	790869	7.153	127.6	419.4	10.1	0.12	314.6
T13	670823	793757	7.179	133.4	427.9	8.9	8.49	322.8

## 2. การวัดค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหินโผล่

การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างหินโผล่เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการแปลความหมายค่าความถ่วงโดยการสร้างแบบจำลองวัตถุผิดปกติใต้ผิวดิน มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 นำตัวอย่างหินมาทำความสะอาดเพื่อให้ ผิวน ทรายดินและหินที่ไม่ต้องการให้หลุดออกไป

2.2 ย่อยหินตัวอย่างให้มีขนาดน้ำหนักไม่เกิน 3,000 กรัม

2.3 วางเครื่องชั่งน้ำหนักบนโต๊ะที่มีความแข็งแรงและพื้นราบเรียบ ปรับให้ได้ระดับแล้วทำการชั่งมวลของตัวอย่างหินในอากาศ บันทึกค่าเป็น  $W_1$

2.4 แช่ตัวอย่างหินที่ผ่านขั้นตอนข้อ 2.3 แล้วให้จมน้ำในภาชนะที่เตรียมไว้ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวอย่างหินมาชั่งน้ำหนักในน้ำ โดยใช้แขนและตะแกรงพิเศษซึ่งตัดแปลงให้ชั่งน้ำหนักในน้ำได้และบันทึกค่าเป็น  $W_2$

2.5 นำตัวอย่างหินที่ผ่านขั้นตอน 2.4 มาซับผิวให้แห้งแล้วชั่งตัวอย่างหินนี้ในอากาศ และบันทึกค่าเป็น  $W_3$

2.6 คำนวณหาค่าความหนาแน่นสด  $\rho_{\text{fresh}}$  และความหนาแน่นเปียก  $\rho_{\text{wet}}$  ดังสมการ

$$\rho_{\text{fresh}} = \{W_1 / (W_1 - W_2)\} \times \rho_w \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\rho_{\text{wet}} = \{W_3 / (W_3 - W_2)\} \times \rho_w \quad \dots\dots\dots(16)$$

เมื่อ  $\rho_{\text{fresh}}$  คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างหินสด มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$\rho_{\text{wet}}$  คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างหินเปียก มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$\rho_w$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ในการชั่งตัวอย่างหินในน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$W_1$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

$W_2$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ชั่งในน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

$W_3$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินซึ่งอิมตัวด้วยน้ำและนำมาชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

### 3. การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินและดิน

การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่างหิน โสล์และตัวอย่างดิน มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

#### 3.1 การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่างหิน โสล์

##### 3.1.1 นำหินตัวอย่างมาทำการย่อยให้กลายเป็นหินก้อนขนาดเล็กพอที่จะบรรจุลง

ในกระปุกหรือกล่องพลาสติก (holder) ตัวอย่างหินละ 2-5 ก้อน

3.1.2 ชั่งน้ำหนักหินแต่ละก้อนทั้งในอากาศและในน้ำ ตามขั้นตอนข้อ 2.3 และ 2.4 หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งสนิท บรรจุลงในกระปุก ปิดฝาให้สนิท เขียนรหัสไว้ข้างกระปุก

3.1.3 นำไปวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กโดยใช้เครื่องมือ KAPPABRIDGE รุ่น KLY-3S

3.2 การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของดิน

3.2.1 นำตัวอย่างดินที่เก็บมาจากภาคสนามใส่ในภาชนะที่เตรียมไว้ ในที่นี้ใช้กล่องของฟิล์มถ่ายรูปโดยใช้ตัวอย่างดินไม่เกิน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขียนรหัสไว้ข้างกล่อง และปิดฝาให้มิดชิด

3.2.2 นำไปวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กโดยใช้เครื่องมือ KAPPABRIDGE รุ่น KLY-3S ของ AGICO ประเทศสาธารณรัฐเช็ก

#### 4. การวิเคราะห์และปรับแก้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกที่ได้จากการสำรวจภาคพื้นดิน

โดยปกติแล้วการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกจะใช้วิธีการบินสำรวจหรือที่เรียกว่า airborne magnetic survey เพราะสามารถวัดค่าได้ครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางมาก อีกทั้งยังไม่ถูกรบกวนหรือได้รับสัญญาณรบกวน จากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มนุษย์สร้างขึ้นเนื่องจากกิจกรรมภายในชีวิตประจำวัน แต่อย่างไรก็ดีการบินสำรวจจะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนสำรวจในพื้นที่ที่มีอาณาเขตน้อยเช่น เกาะขอม ดังนั้น การสำรวจภาคพื้นดินจึงเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการลงทุนสำรวจมากกว่าแต่ก็มีการรบกวนของสนามแม่เหล็กที่ไม่พึงประสงค์มากกว่า เพราะฉะนั้นในการสำรวจจึงต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมากอาทิเช่น จุดที่ทำการวัดจะต้องห่างจากสิ่งปลูกสร้างที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบรวมทั้งเครื่องแต่งกายของผู้สำรวจเองก็ต้องปราศจากวัสดุที่มีเหล็กและสารแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบด้วย

46

การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กรวมของโลกโดยการสำรวจภาคพื้นดินประกอบด้วย

##### 4.1 การปรับแก้ค่าคริปท์

4.1.1 นำค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ที่วัดทั้งหมด 5 ค่าต่อหนึ่งจุดวัด มาหาค่าเฉลี่ยและบันทึกเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดวัดใด ๆ

4.1.2 นำมาปรับแก้ค่าคริปท์ ดังสมการ

$$\text{Drift} = \frac{(m_E - m_B) + Dr}{t_E - t_B} \dots\dots\dots(17)$$

- เมื่อ Drift คือ ค่าดริฟท์ของการวัดในวงรอบนี้ มีหน่วยเป็น นาโนเทสลาต่อชั่วโมง
- $m_B$  คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัด มีหน่วยเป็นนาโนเทสลา
- $m_E$  คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัด มีหน่วยเป็น นาโนเทสลา
- Dr คือ ค่าความแตกต่างของความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัดกับจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัดของวงรอบมีหน่วยเป็นนาโนเทสลา
- $t_B, t_E$  คือ เวลาของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัดกับจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัดของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

4.1.3 นำค่าดริฟท์ที่คำนวณได้ไปหักลบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดวัดใด ๆ ในวงรอบ เพื่อให้ได้ค่าความถ่วงที่เวลาเดียวกันทั้งหมด

$$M_n^{cor} = M_n - \text{Drift} \times (t_n - t_B) \dots\dots\dots(18)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

$M_n^{cor}$  คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ณ จุดวัดใด ๆ ที่ปรับแก้ ดริฟท์แล้ว มีหน่วยเป็น นาโนเทสลา

$M_n$  คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกที่จุดวัดใด ๆ มีหน่วยเป็นนาโนเทสลา 47

$t_n, t_B$  คือ เวลาของจุดวัดใด ๆ และจุดวัดเริ่มต้นของวงรอบตามลำดับมีหน่วยเป็นชั่วโมง

#### 4.2 การวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกผิดปกติ

สำหรับความเข้มสนามแม่เหล็กโลกผิดปกติ ได้จากผลต่างของความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกที่ตรวจวัดได้ที่จุดต่างๆกับความเข้มสนามแม่เหล็กโลกอ้างอิงที่คำนวณจาก IGRF 1995-2000 (IGRF; International Geomagnetic Reference Field) โดยมีกระบวนการดังนี้

4.2.1 นำค่าพิกัดของจุดวัดและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกที่ได้จากการสำรวจมาหักลบกับค่าสนามแม่เหล็กโลกอ้างอิงที่ได้จากIGRF(ภาคผนวก ข)

ซึ่งใช้เป็นสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Base) ค่าที่ได้จะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกผิดปกติ

4.2.2 ทำแผนที่คอนทัวร์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลก ผิดปกติ

4.2.3 ตัดภาคตัดขวางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของโลกผิดปกติ

4.2.4 แปลความภาคตัดขวางสนามแม่เหล็กรวมของโลกที่ได้ในข้อ 4.2.3 เพื่อหาวัตถุต้นเหตุ (causative bodies) ที่ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กรวมของโลกผิดปกติ

## 5. การวิเคราะห์ค่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างธรรมชาติของหินเกาะยอ

นำแท่งตัวอย่างที่ไปเจาะสำรวจมาจากภาคสนาม (Sites) มาตัดเป็นแท่ง ๆ โดยแต่ละแท่งยาวประมาณ 22 มิลลิเมตร และทำเครื่องหมายสัญลักษณ์ไว้ที่แท่งตัวอย่างหินแต่ละแท่ง จากนั้นจึงนำมาวัดหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหินและศึกษาอำนาจแม่เหล็กบรรพกาลของหิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของหิน

5.1.1 ทำการวัดค่าความเข้มและทิศทางของค่าแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ (Natural Remanent Magnetization, NRM) ในตัวอย่างหินด้วยเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบหมุน

5.1.2 ทำการวัดค่าสภาพรีบไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินด้วยเครื่อง

AGICO – Kappabridge

### 5.2 การศึกษาอำนาจแม่เหล็กบรรพกาลของหิน

การศึกษาอำนาจแม่เหล็กบรรพกาลของหินตัวอย่างทำได้โดยการนำหินตัวอย่างมาวัด 48  
หาความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง spinner magnetometer ขณะเดียวกันก็นำตัวอย่างไปล้างหรือจัดสภาพแม่เหล็กทุติยภูมิหรือแมกนีไทเซชันในหินโดยการนำหินตัวอย่างทั้งหมดมาล้างอำนาจแม่เหล็กแบบเป็นลำดับขั้นหรือที่เรียกว่า progressive stepwise demagnetization experiment ด้วยวิธีสนามแม่เหล็กสลับ (Alternating field, AF, demagnetization) หรือ วิธีความร้อน (Thermal demagnetization) แล้วจึงทำการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่งค่าต่างๆที่วัดได้จะถูกคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปและเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ข้อมูลของภาวะแม่เหล็กบรรพกาลเบื้องต้นซึ่งเป็นตัวบอกให้ทราบถึงทิศทางและความเข้มของสภาพแม่เหล็กปฐมภูมิ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.2.1 การล้างอำนาจแม่เหล็กโดยวิธีสนามแม่เหล็กสลับ

(Alternating field, AF, demagnetization )

นำตัวอย่างหินมาจัดสภาพความเป็นแม่เหล็กทุติยภูมิ โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กตามลำดับขั้นดังนี้ 5,6,8,10,15,20,25,30,35,40,50,60 และ70 mT ในการทำ AF demagnetization ของตัวอย่างหินแต่ละตัวอย่างต้องกระทำตามลำดับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นให้เสร็จสิ้นเป็นขั้นๆไป ไม่ควรปล่อยทิ้งเอาไว้

#### 5.2.2 การล้างอำนาจแม่เหล็กโดยวิธีความร้อน(Thermal demagnetization )

ในการจัดสภาพแม่เหล็กทุติยภูมิด้วยวิธีการใช้ความร้อนนี้จะให้ความร้อนกับตัวอย่างหิน โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นตามลำดับขั้นดังนี้คือ 100,200,300,400,450, 500,540,560,580,600, 640,660 และ 680 °C โดยที่ทุกครั้งหลังจากจัดสภาพแม่เหล็กทุติยภูมิตามลำดับข้างต้นนี้จะต้อง ทำการวัดค่าความเข้มของสภาพความเป็นแม่เหล็กทุกครั้งไม่ควรปล่อยทิ้งไว้นานเกิน 1 วัน

5.3 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการลบอำนาจแม่เหล็กแบบลำดับขั้นเพื่อหาทิศทางของเวกเตอร์แมกนีไทเซชันโดยใช้โปรแกรม IAPD ซึ่งใช้หลักการของ least square regression ของเวกเตอร์ใน 3 มิติ โปรแกรมสามารถทำการวิเคราะห์ Principal Component Analysis ( PCA ) ของข้อมูลการล้างอำนาจแม่เหล็กแบบลำดับขั้น โดยการพืดเส้นตรงเข้ากับเวกเตอร์ต่างๆที่พล็อตอยู่บน orthogonal plot (Zijderveld plot) ขั้นตอนการพืดข้อมูลทำได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบธรรมดา ค่าทิศทางเฉลี่ยของอำนาจแม่เหล็กตกค้างในหินจากแต่ละ site หรือค่าเฉลี่ยจากหลาย ๆ site คำนวณ โดยวิธี Fisher's statistics

## 6. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับต้นของเกาะยอโดยเทคนิควิธีทางด้านไฟฟ้าและคลื่นไหวสะเทือน

การแปลความลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับต้นของเกาะยอได้ดำเนินการทั้งสิ้น 2 วิธี ดังนี้

### 6.1 วิธีวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของชั้นดิน

โดยปกติแล้วหินหรือแร่ประกอบหินโดยทั่ว ๆ ไปมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เนื่องจากหินและดินทั่ว ๆ ไปนั้นมักจะมีช่องว่าง ซึ่งมีน้ำหรือสารละลายแทรกหรือเก็บกักอยู่ อาจจะเป็น

ในลักษณะเพียงบางส่วนหรืออ้อมตัวทั้งหมด สารละลายหรือน้ำเหล่านี้มีเกลือแร่ละลายอยู่จึงสามารถนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านไปมาในหินหรือดินต่าง ๆ ได้ ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของดินและหิน ขนาด ความหนา และการฟูฟองของหิน หินที่มีเนื้อแน่น เช่น หินปูน หินอัคนี โดยทั่วไปจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าหินหรือดินที่มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ ซึ่งอาจจะมีความชื้น หรือสารละลายบางส่วนเข้าไปแทรกอยู่ ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ เช่น ชั้นหินหรือดินอุ้มน้ำ เป็นต้น

การสำรวจโดยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทำได้โดยอาศัยขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว โดยที่ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าศักย์ และขั้วไฟฟ้าอีก 2 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ากระแส และจัดวางขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger) ขั้วไฟฟ้าศักย์ M, N จะอยู่ภายในระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแส A, B ซึ่งถูกจัดวางอย่างสมมาตรรอบจุดกึ่งกลางของขบวนขั้วไฟฟ้า และกำหนดให้  $MN (=2l) \ll AB (=2L)$  รูปที่ 20

ที่จุด P ใด ๆ ซึ่งอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของแนววัด AMNB เป็นระยะ  $x$  จะได้

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{L+x} - \frac{1}{L-x} \right)$$

และ

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{(L+x)^2} + \frac{1}{(L-x)^2} \right]$$

ที่จุดกึ่งกลาง ( $x=0$ ) ได้

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{I\rho}{\pi L^2}$$

และสภาพต้านทานปรากฏจะเป็น

50

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{I} \left( -\frac{dV}{dx} \right)$$

ถ้าระยะ MN สั้นมาก เราอาจกำหนดให้

$$\left( -\frac{dV}{dx} \right) = \frac{\Delta V}{2l}$$

เมื่อ  $\Delta V$  เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่าง M และ N ดังนั้น

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

เมื่อ  $\frac{\pi L^2}{2l}$  เป็นค่าคงตัวของขบวนขั้วไฟฟ้า

ในการกำหนดลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาด้วยวิธีวัดสภาพด้านทานทางไฟฟ้า มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

6.1.1 กำหนดจุดที่จะทำการสำรวจในแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:50,000 รูปที่ 50

6.1.2 จัดวางขบวนขั้วไฟฟ้าแบบ Schlumberger (Schlumberger) ทำการปล่อยกระแสไฟฟ้า แล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน ด้วยเครื่อง ABEM DC TERRAMETER SAS 300B, และ Booster SAS 2000

6.1.3 นำข้อมูลในข้อ 6.1.1 และ 6.1.2 ไปทำการแปลความ เพื่อกำหนดแบบจำลองของชั้นดิน ด้วยโปรแกรม ABEM SUPER-VES จะได้จำนวนชั้นดิน ค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า และความหนาของดินแต่ละชั้น

## 6.2 วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

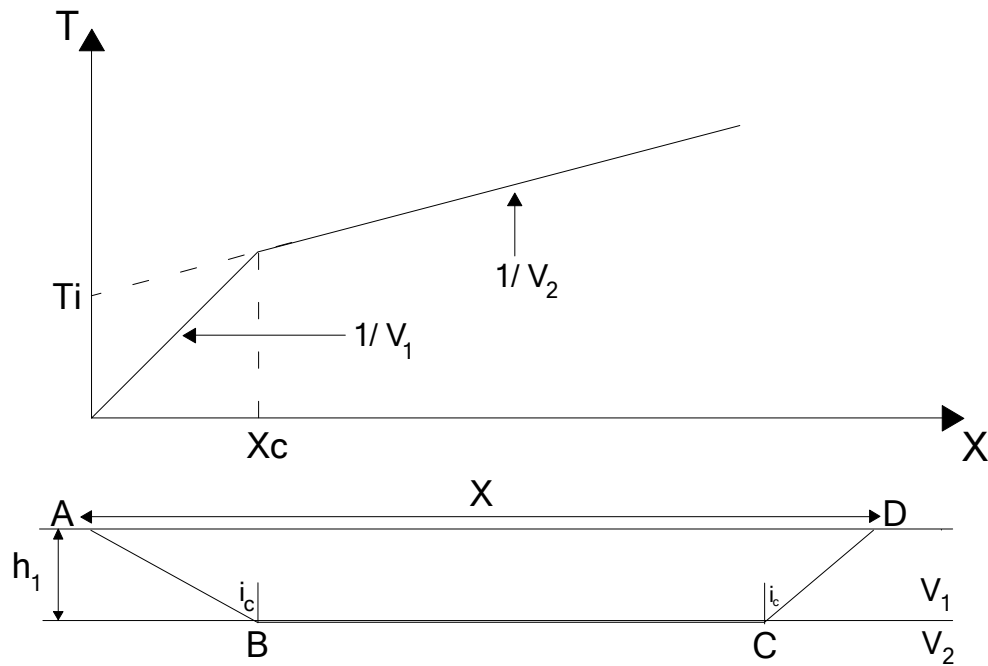
การสำรวจด้วยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห อาศัยหลักการที่ว่าความเร็วของคลื่นสั้นสะเทือน (Seismic wave or shock wave) ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินและหินขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพ คือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) และความหนาแน่นของชั้นหินและดินนั้นๆ เป็นสำคัญ โดยหินและดินที่มีเนื้อแน่น ค่าความหยุ่นและความหนาแน่นสูง คลื่นสั้นสะเทือนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เร็วกว่าหินและดินที่มีค่าความหยุ่นและความหนาแน่นต่ำกว่า ดังนั้นถ้าทำให้เกิดคลื่นสั้นสะเทือนขึ้นซึ่งอาจจะใช้ฆ้อนทุบลงบนแผ่นเหล็กที่วางอยู่บนผิวดิน หรือจุดวัดถูระเบิด แล้ววัดเวลาที่คลื่นสั้นสะเทือนเคลื่อนที่จากจุดกำเนิดไปยังจุดรับคลื่นที่รู้ตำแหน่งแน่นอน โดยอาศัยตัวรับคลื่นที่เรียกว่า จีโอโฟน ( geophone ) ก็สามารถวัดความเร็วของคลื่นที่วัดได้ แปลความหมายถึงชนิดของหินและดินตลอดจนสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินในบริเวณที่ทำการสำรวจ โดยจะ 51 พิจารณาได้สองกรณีคือ รอยต่อระหว่างชั้นดินที่ขนานกัน และ รอยต่อระหว่างชั้นดินที่ไม่ขนานกัน ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีรอยต่อระหว่างชั้นดินที่ขนานกันดังนี้

กรณีรอยต่อระหว่างชั้นดินสองชั้นขนานกัน รูปที่ 26 ให้ S เป็นจุดกำเนิดคลื่น  $G_1, G_2, G_3, \dots$  เป็น จีโอโฟน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวดิน  $h_1$  เป็นความหนาของดินชั้นแรก  $v_1$  และ  $v_2$  เป็นความเร็วของคลื่นในชั้นดินเหล่านั้นโดยที่  $v_2 > v_1$  คลื่นแรกจากแหล่งกำเนิด S ที่มาถึง จีโอโฟน ใกล้เคียง ๆ กับ S จะเป็นคลื่นตรงจะได้ว่า  $T = \frac{X}{V_1}$  จากแหล่งกำเนิดนั้น ส่วนที่ระยะห่างจาก S คลื่นจากการหักเหจะไปถึงจีโอโฟนก่อนคลื่นตรง ทั้งนี้เนื่องจากว่าดินชั้นล่างนั้นมีความเร็วมากกว่าดินชั้นบนนั่นเอง สำหรับคลื่นจากการสะท้อนนั้นจะมาถึงช้ากว่าคลื่นทั้งสองนี้ เวลา (t) ที่คลื่นใช้ในการหักเหกลับมายังผิวดินที่ระยะ X ใดๆ จากแหล่งกำเนิด S หาได้ดังนี้



$$\sin i_c = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{เมื่อ } i_c = \text{มุมวิกฤติ}$$

$$\cos i_c = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}} \quad \tan i_c = \frac{\sin i_c}{\cos i_c} = \frac{v_1}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}$$



รูปที่ 26 การเคลื่อนที่ของคลื่นไหวสะเทือนผ่านชั้นดิน

เวลาที่คลื่นใช้ทั้งหมดในการเดินทางตามแนว ABCD คือ  $T = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD}$

$$T = \frac{h_1}{v_1 \cos i_c} + \frac{(x - 2h_1 \tan i_c)}{v_2} + \frac{h_1}{v_1 \cos i_c}$$

$$T = \frac{2h_1}{v_1 \cos i_c} - \frac{2h_1 \sin i_c}{v_2 \cos i_c} + \frac{x}{v_2}$$

$$T = \frac{2h_1}{v_1 \cos i_c} - \frac{2h_1 \sin^2 i_c}{v_1 \cos i_c} + \frac{x}{v_2}$$

$$T = \frac{2h_1}{v_1 \cos i_c} (1 - \sin^2 i_c) + \frac{x}{v_2}$$

$$T = \frac{x}{v_2} + \frac{2h_1 \cos i_c}{v_1}$$

ซึ่งเป็นสมการของกราฟเส้นตรงเช่นเดียวกันแต่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{v_2}$  และมีจุดตัดของกราฟบนแกนเวลาซึ่งเรียกว่า intercept time ( $T_i$ ) นั่นคือ  $T_i = \frac{2h_1 \cos i_c}{v_1}$

จากรูปกราฟเส้นตรง 2 เส้นจะตัดกันซึ่งระยะที่กราฟคลื่นตรงและคลื่นหักเหตัดผ่านกันนี้เรียกว่า crossover distance ( $X_c$ ) ที่ระยะ  $X$  น้อยกว่า  $X_c$  คลื่นตรงจะเดินทางมาตามผิวตัวกลางด้วยความเร็ว  $v_1$  ส่วนที่ระยะมากกว่า  $X_c$  คลื่นหักเหจากขอบเขตจะเดินทางมาถึงก่อนคลื่นตรง

การหาความลึก  $h_1$  จากผิวถึงขอบเขตสามารถคำนวณได้จาก intercept time หรือจาก crossover distance ในการคำนวณค่า  $h_1$  จาก intercept time สามารถหาได้จากสมการ

$$T_i = \frac{2h_1 \cos i_c}{v_1} \text{ จะได้ว่า } h_1 = \frac{T_i v_1}{2 \cos i_c}$$

ค่า  $T_i$  หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทาง ( time-distance curve ) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัด สำหรับการคำนวณหาค่าความลึก  $h_1$  โดยใช้ crossover distance ก็อาศัยสมการ

$$T_1 = \frac{x}{v_1} \text{ และ } T_2 = \frac{x_2}{v_2} + \frac{2h_1 \cos i_c}{v_1}$$

$$\text{จาก } \cos i_c = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}} = \sqrt{\frac{v_2^2 - v_1^2}{v_2^2}}$$

พิจารณาเวลาที่ตำแหน่ง  $X_c$

$$\frac{X_c}{v_1} = \frac{X_c}{v_2} + \frac{2h_1 \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

$$h_1 = \frac{1}{2} \frac{v_1 v_2 x_c}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right)$$

$$h_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} x_c$$

กรณีชั้นดินหลายชั้นวางตัวในแนวราบโดยมีความเร็วคลื่น  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  และมี ความหนา  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}$  ตามลำดับ เวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากจุดกำเนิดและลงไปหักเหที่ ขอบเขตระหว่างชั้นต่างๆ ก่อนที่จะแผ่ขึ้นมาที่พื้นผิวในกรณีมีคลื่นหักเหตกกระทบขอบเขต ระหว่างตัวกลางที่  $n-1$  กับ ตัวกลางที่  $n$  ด้วยมุมวิกฤติ เวลาทั้งหมดที่ใช้จะเป็น

$$T = \frac{x}{v_n} + \sum_{a=1}^{n-1} \frac{2h_a}{v_a} \cos i_{a,n} \quad \text{โดย } i_{a,n} = \sin^{-1} \frac{v_a}{v_n}$$

$$T = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{a=1}^{n-1} \frac{h_a}{v_a} \sqrt{1 - \frac{v_a^2}{v_n^2}}$$