สนามโน้มถ่วงผิดปกติบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนจังหวัดระนอง

Gravity Anomaly of Ranong Geothermal area

เอกชัย สันเมือง

Ekkachai Sanmuang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Geophysics
Prince of Songkla University
2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนจังหวัดระนอง

ผู้เขียน นายเอกชัย สันเมือง

สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(Dr.Helmut Duerrast)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ดร.กำแหง วัฒนเสน)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์)

.....กรรมการ

(Dr.Helmut Duerrast)

.....กรรมการ

(ดร.ภาสกร ปนานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนจังหวัดระนอง

ผู้เขียน นายเอกชัย สันเมือง

สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ได้ทำการวัดค่าสนามโน้มถ่วงจำนวน 292 จุด และการหยั่งลึกสถาพต้านทานไฟฟ้าของดินจำนวน 33 จุด ในพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ระหว่างพิกัด 425000E ถึง 535000E และ 1020000N ถึง 1165000N โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินที่สัมพันธ์กับแหล่งน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษา

ผลการศึกษาได้ตรวจพบแถบค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่มีแอมพลิจูดประมาณ -100 g.u.เหนือบริเวณแนวหินแกรนิตยุคครีเทเชียสในจังหวัดระนองที่ได้รับการแปลความว่าเกิดจากมวลหินแกรนิตดังกล่าวที่มีความหนาประมาณ 1700 เมตร และบริเวณที่ค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างมีค่าต่ำประมาณ -350 g.u ในบริเวณตอนกลางค่อนไปทางใต้ของพื้นที่ศึกษา ที่ได้รับการแปลความว่าเกิดจากมวลหินอัคนีระดับลึกที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าหินท้องที่ประมาณ 200 kg/m^3 ที่ระดับความลึกประมาณ 3500 เมตรเป็นต้นไป โดยคาดว่ามวลหินอัคนีระดับลึกนี้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับแหล่งน้ำพุร้อนต่างๆในพื้นที่ศึกษา นอกจากนั้นผลการศึกษาการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินสามารถกำหนดแนวรอยต่อระหว่างพื้นที่ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงและต่ำในทิศทางเดียวกับแนวรอยเลื่อนระนอง โดยคาดว่ารอยเลื่อนต่างๆในพื้นที่มีบทบาทเป็นเส้นทางลำเลียงน้ำร้อนที่สำคัญในพื้นที่ศึกษา

Thesis Title	Gravity Anomaly of Ranong Geothermal Area
Author	Mr. Ekkachai Sanmuang
Major Program	Geophysics
Academic year	2008

Abstract

Altogether 292 gravity stations and 33 vertical electrical sounding stations were conducted in an area bounded by 425000E to 535000E and 1020000N to 1165000N. The aim of this study was to delineate the subsurface geological structures that might be related to the hot springs in the study area.

Two residual Bouguer anomalies were clearly observed in the study area. The first anomaly of -100 g.u. was observed over the Cretaceous granite ranges in Ranong Province of which the causative body was the granite mass of 1700 m thickness. The second anomaly of -350 g.u. was observed in the southern part of the study area. The causative body of the second anomaly was a deep granite mass whose density was about 200 kg/m^3 less than the country rock at the depth deeper than 3500 m. This deep granite mass was expected to be the heat source of hot springs in the study area. Furthermore, the study of vertical electrical sounding suggested an interface between a high resistivity area and a low resistivity area. This interface aligns in the same direction as the Ranong Fault Zone. Faults and related fractures were supposed to be the important pathways of the hot water from the deep heat source in the study area.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(7)
รายการภาพประกอบ	(8)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 สภาพทั่วไปของจังหวัดระนอง	2
1.3 พลังงานความร้อนใต้พิภพ	6
1.4 การตรวจเอกสาร	12
1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ	27
2. วิธีการวิจัย	28
2.1 วิธีการวิจัยประกอบด้วย	28
2.2 วัสดุ	28
2.3 อุปกรณ์	29
2.4 วิธีดำเนินการวิจัย	34
3. ผลและอภิปรายผล	65
3.1 ผลการศึกษาค่าความหนาแน่น	65
3.2 ผลการศึกษาค่าสนามโน้มถ่วง	68
3.3 ผลการแปลความข้อมูลการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน	82
4. บทวิจารณ์และสรุป	93
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	100
ประวัติผู้เขียน	126

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	สมบัติของหินหนืด	9
1.2	ปริมาณสารกัมตภาพรังสีและปริมาณความร้อนในหินบางชนิด	9
1.3	อัตราการไหลของความร้อนในพื้นที่ต่าง ๆ	11
1.4	ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนวัดตโปทาราม	25
1.5	ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนทุ่งยอ	25
1.6	ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนบ้านพรรั้ง	25
2.1	ตัวอย่างตารางบันทึกข้อมูลที่ใช้ในภาคสนาม	38
2.2	ตารางบันทึกค่าปรับแก้ภูมิประเทศโซน B ถึง J	39
2.3	รัศมีและจำนวนของห้องในแต่ละโซนที่ใช้ปรับแก้ภูมิประเทศ	40
2.4	ระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้า MN และขั้วกระแสไฟฟ้า AB ของการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์	45
2.5	ตัวอย่างการปรับแก้ความสูงที่ได้จากมาตรวัดระดับ	49
2.6	ตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ของแกรวิตีมิเตอร์แบบลาคอสท์และรอมเบิร์ก หมายเลข G-565	51
2.7	ตัวอย่างตารางการปรับแก้ดริฟท์ของความถ่วง	53
3.1	ความหนาแน่นของตัวอย่างหินในพื้นที่ศึกษา	66
3.2	ค่าความหนาแน่นของหินประเภทต่าง ๆในพื้นภาคใต้	67
3.3	ตำแหน่งและค่าผิดปกติบูร์แกร์ควบคุมสำหรับระเบียบวิธีการถดถอยเชิงโพลีโนเมียล	68
3.4	แบบจำลองชั้นดินจากผลการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า	86

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนอง	4
1.2	แผนที่ภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา	5
1.3	ลักษณะโครงสร้างและอุณหภูมิภายในโลก	7
1.4	ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ก่อให้เกิดน้ำพุร้อน	7
1.5	การถ่ายเทความร้อนให้กับหินท้องที่จากการแทรกตัวและการเย็นตัวของหินหนืด	8
1.6	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความลึกใต้ผิวดิน	11
1.7	แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	13
1.8	ภาพตัดธรณีวิทยาแนว A-A’ ของพื้นที่ศึกษา	13
1.9	วิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทยในช่วงยุคไซลูเรียนถึงยุคครีเทเชียส	15
1.10	แนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกต่างที่เป็นหินฐานธรณีของประเทศไทย	16
1.11	รอยเลื่อนตามแนวระดับในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ใต้	17
1.12	แนวหินแกรนิตทั้งสามแนวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	19
1.13	แบบจำลองของแหล่งน้ำพุร้อน	22
1.14	อัตราการไหลของความร้อนในประเทศไทย	23
2.1	เครื่องแกรวิตีมิเตอร์ยี่ห้อลาคลอสท์และรอมเบิร์ก	30
2.2	เครื่องอ่านพิกัด Trimble Pathfinder GPS	30
2.3	มาตรวัดระดับความสูงชนิดความดัน	32
2.4	เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ABEM TERRAMETER SAS 1000	33
2.5	แผนภาพการดำเนินการวิจัยด้วยระเบียบวิธีการวัดค่าความถ่วง	35
2.6	แผนภาพการดำเนินการวิจัยด้วยระเบียบวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	36
2.7	แผนภูมิแฮมเมอร์สำหรับการปรับแก้ภูมิประเทศในโซน F ถึง J	40
2.8	ตัวอย่างวงรอบของการวัดค่าความถ่วงและความสูง ในวงรอบที่ 1, 2,และ 3 โดยใช้เวลาวงรอบละประมาณ 3 ชั่วโมง	41
2.9	ตำแหน่งจุดวัดค่าความถ่วงจำนวน 292 จุด	42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
2.10	ตำแหน่งจุดวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจำนวน 32 จุด	44
2.11	รูปแบบการจัดวางรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์	44
2.12	การปรับแก้ฟรี-แอร์ ของจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่ระดับความสูง h เหนือระดับอ้างอิงที่แตกต่างกันให้เสมือนว่าจุดวัดนั้นๆ วัดค่าโน้มถ่วงที่ระความสูงเดียวกัน	55
2.13	การปรับแก้บูร์แกร์ คือการกำหนดให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้ ณ จุดวัดใดๆ มีอิทธิพลของมวลหินที่มีความหนาแน่น ρ และมีความหนาเท่ากับ h อยู่ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการค่าโน้มถ่วงที่ระดับอ้างอิงจำเป็นต้องลดอิทธิพลดังกล่าว	56
2.14	จากลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบทำให้มีมวลส่วนที่เกินและขาดหายไปมีผลให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้จากสถานีวัดมีค่าผิดไปจากค่าที่ควรจะเป็น	58
2.14	แผนภูมิแฮมเมอร์	55
2.15	การแพร่ของกระแสไฟฟ้ากรณีขั้วไฟฟ้ากระแส 1 ขั้ว	60
2.16	ขั้วไฟฟ้ากระแส 2 ขั้วและขั้วกระแสศักย์ 2 ขั้วบนผิวดินที่มีความเอกพันธ์	61
2.17	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางทางธรณีวิทยาประเภทต่าง ๆ	63
2.18	ตัวอย่างกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RESIST-87 สำหรับแบบจำลองที่กำหนดให้	64
3.1	การกระจายของค่าความหนาแน่นของหินประเภทต่างๆในพื้นที่ศึกษา	66
3.2	(A) แผนที่คอนทัวร์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์ (B) ตำแหน่งของจุดวัดค่าสนามโน้มถ่วง	69
3.3	(A) แผนที่คอนทัวร์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงภูมิภาค (B) แผนที่คอนทัวร์ค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงตำบลที่ระยะห่างระหว่างเส้นคอนทัวร์เท่ากับ 50 g.u.	70
3.4	(A) แผนที่คอนทัวร์ค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงตำบลซ้อนทับบนแผนที่ธรณีวิทยา (B) แนวเส้นสีดำลากเพื่อแสดงหินแกรนิตที่ปรากฏในพื้นที่ศึกษาวิจัย	71
3.5	มวลหินอัครนีระดับลึกที่เกิดจากแรงเฉือนจากอิทธผลของการเคลื่อนที่ของกลุ่มรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย	73
3.6	สัญญาณเชิงวิเคราะห์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในพื้นที่ศึกษา	74
3.7	การกระจายของความลึกถึงมวลผิดปกติรูปทรงกลมในแนวตั้ง ซึ่งประเมินได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Euler Deconvolutionหรือ Grid Depth	74

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3.8	แนวภาพตัดในทิศเหนือ –ใต้ สำหรับการสร้างแบบจำลองมวลผิดปกติใต้ผิวดินทั้ง 5 แนว	75
3.8	แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว A - A′	76
3.9	แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว B - B′	77
3.10	แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว C - C′	78
3.11	แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว D - D′	79
3.12	แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว E - E′	80
3.13	ลักษณะและตำแหน่งของวัตถุต้นเหตุในระดับลึกของสัญญาณค่าผิดปกติบูร์แกร์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยนำมาแสดงซ้อนทับกับแผนที่ธรณีวิทยาพื้นผิว	81
3.14	ตำแหน่งจุดวัดการหยั่งลึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	83
3.15	กราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันตก	84
3.16	กราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันออก	85
3.17	แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับผิวดิน	90
3.18	แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับความลึก 10 m	91
3.19	แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับความลึก 50 m	92

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ด้วยเหตุที่ความต้องใช้การพลังงานของมนุษย์ในแต่ละวันมีอัตราเพิ่มขึ้น มีผลทำให้พลังงานหลักที่มนุษย์นำมาใช้งานมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งในปัจจุบัน คือ พลังงานจากซากฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ มีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต ส่งผลให้ราคาของพลังงานจากซากฟอสซิลมีราคาสูงขึ้น นอกจากนี้พลังงานจากฟอสซิลยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศต่อโลกมนุษย์ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO(,2)) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO(,x)) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO(,2)) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH(,4)) ไนตรัสออกไซด์ (N(,2)O) และอนุภาคมลสาร (SPM) ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นต้นเหตุของวิกฤตการโลกร้อน ทำให้หลายฝ่ายเร่งค้นหาและพัฒนาพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาด เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ เพื่อให้สามารถนำพลังงานทดแทนมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

สำหรับประเทศไทยแล้วพลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นพลังงานทางเลือกทางหนึ่งที่น่าจะมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด สำหรับประเทศไทยแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพส่วนใหญ่ปรากฏให้เห็นในรูปของบ่อน้ำพุร้อน โดยประเทศไทยมีแหล่งน้ำพุร้อนมากถึง 112 แห่ง (กรมทรัพยากรธรณี, 2551) ซึ่งพบเห็นได้ในทุกภาคยกเว้นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แหล่งน้ำพุร้อนส่วนใหญ่จะพบในภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ โดยส่วนใหญ่มุ่งใช้ประโยชน์ในด้านการท่องเที่ยวและการแพทย์ทางเลือก มีส่วนน้อยที่ประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม เช่น การนำมาใช้อบเมล็ดพันธ์พืชหรือผลผลิตต่างๆ หรือพัฒนาใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนใต้พิภพอำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่

จังหวัดระนองเป็นจังหวัดหนึ่งทางภาคใต้ที่มีแหล่งน้ำพุร้อนโดยมีจำนวนถึง 7 แหล่ง ได้แก่ แหล่งน้ำพุร้อนวัดตโปทาราม (RN1) แหล่งน้ำพุร้อนบ้านทุ่งยอ (RN2) แหล่งน้ำพุร้อนบ้านพรรั้ง (RN3) แหล่งน้ำพุร้อนคลองบางริ้น (RN4) แหล่งน้ำพุร้อนค่ายรัตนรังสรรค์ (RN5) แหล่งน้ำพุร้อนบ้านหาดยาย (RN6) และแหล่งน้ำพุร้อนบ้านนา (RN7) โดยแหล่งน้ำพุร้อนเหล่านี้กระจายตัวอยู่ในพื้นที่ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน มีทั้งสัมพันธ์และไม่สัมพันธ์กับหินแกรนิต นอกจากนี้แหล่งน้ำพุร้อนเหล่านี้ยังวางตัวอยู่ในเขตรอยเลื่อนระนอง (Ranong fault) ดังนั้นเพื่อการพัฒนาแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองให้มีศักยภาพทางด้าน

พลังงาน เราจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งสัมพันธ์กับแหล่งน้ำพุร้อนดังกล่าว

วิธีการทางธรณีฟิสิกส์เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งนิยมนำมาใช้เพื่อกำหนดลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาที่สนใจ ตัวอย่างเช่น วิธีการวัดค่าสนามโน้มถ่วงของโลกซึ่งเป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสนามโน้มถ่วงของโลกที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้นหินในแนวราบ หรือ วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินซึ่งตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งในแนวราบและในแนวดิ่ง และนิยมนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งของรอยเลื่อนที่สัมพันธ์กับแหล่งน้ำพุร้อน เป็นต้น ดังนั้นในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้เราจึงนำวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ข้างต้นมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดลักษณะทางโครงสร้างธรณีวิทยาระดับลึกที่สัมพันธ์แหล่งกำเนิดความร้อนที่ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนอง

1.2 สภาพทั่วไปของจังหวัดระนอง

ที่ตั้งและสภาพทางภูมิศาสตร์

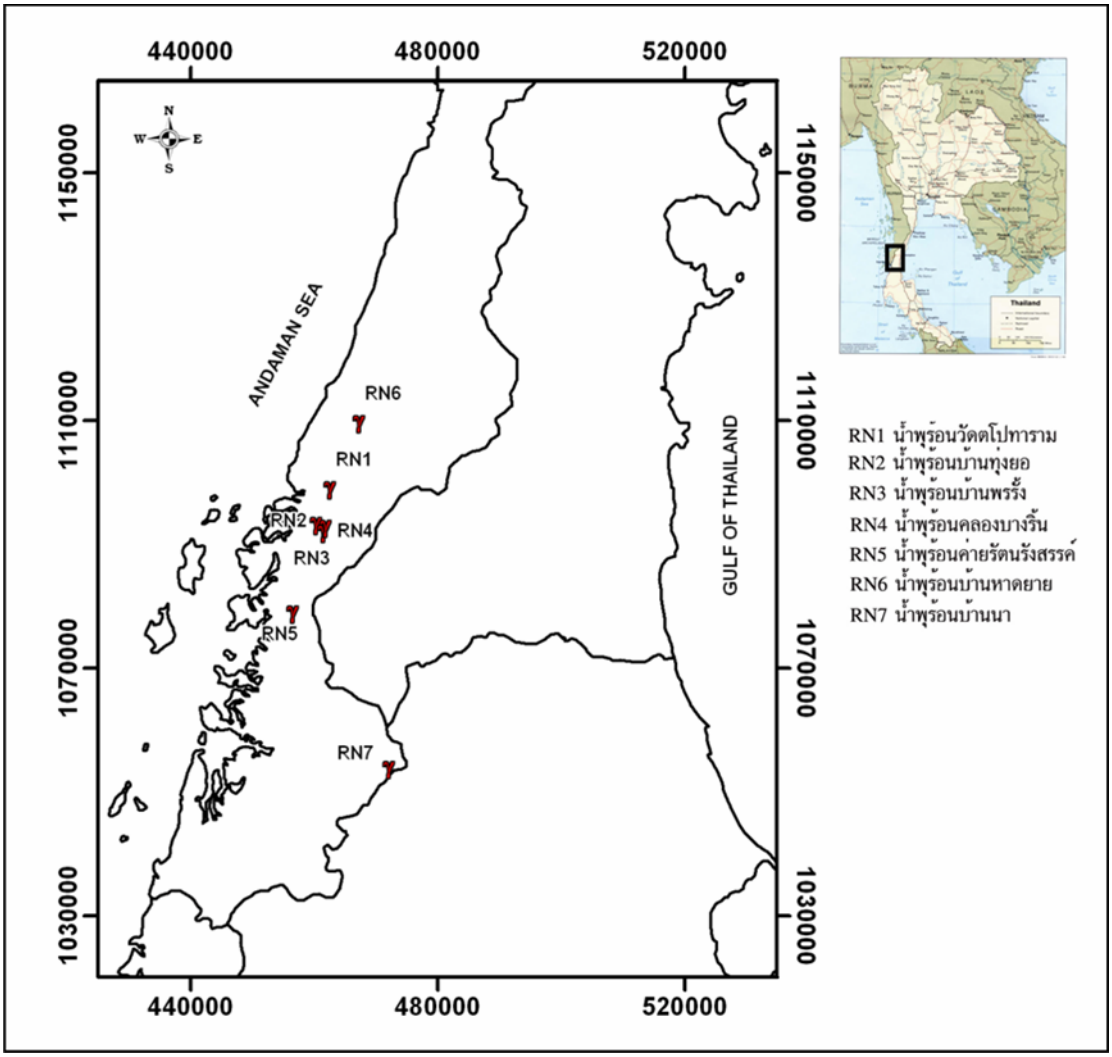
จังหวัดระนองเป็นจังหวัดภาคใต้ตอนบน ซึ่งขอบเขตด้านตะวันตกของจังหวัดระนองติดต่อกับทะเลอันดามันและประเทศพม่า โดยจังหวัดระนองอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 568 กิโลเมตรตามทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4 (เพชรเกษม) จังหวัดระนองมีเนื้อที่ประมาณ 3,298.045 ตารางกิโลเมตร (หรือ 2,061,278 ไร่) ประกอบด้วยพื้นที่ราบ 14% และภูเขา 86 % มีเกาะขนาดใหญ่และขนาดเล็กในทะเลอันดามันจำนวน 62 เกาะ จังหวัดระนองมีอาณาเขตติดต่อกับจังหวัดใกล้เคียงดังนี้ ทิศเหนือติดต่อกับอำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร ทิศตะวันออกติดต่อกับอำเภอเมือง, อำเภอสวี, อำเภอพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร และอำเภอไชยา, อำเภอท่าฉาง, อำเภอบ้านตาขุน กิ่งอำเภอวิภาวดี จังหวัดสุราษฎร์ธานี ทิศใต้ติดต่อกับอำเภอคุระบุรี จังหวัดพังงา และอำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยทิศตะวันตกติดต่อกับประเทศพม่า และทะเลอันดามัน(สำนักงานจังหวัดระนอง, 2549)

ลักษณะภูมิประเทศ

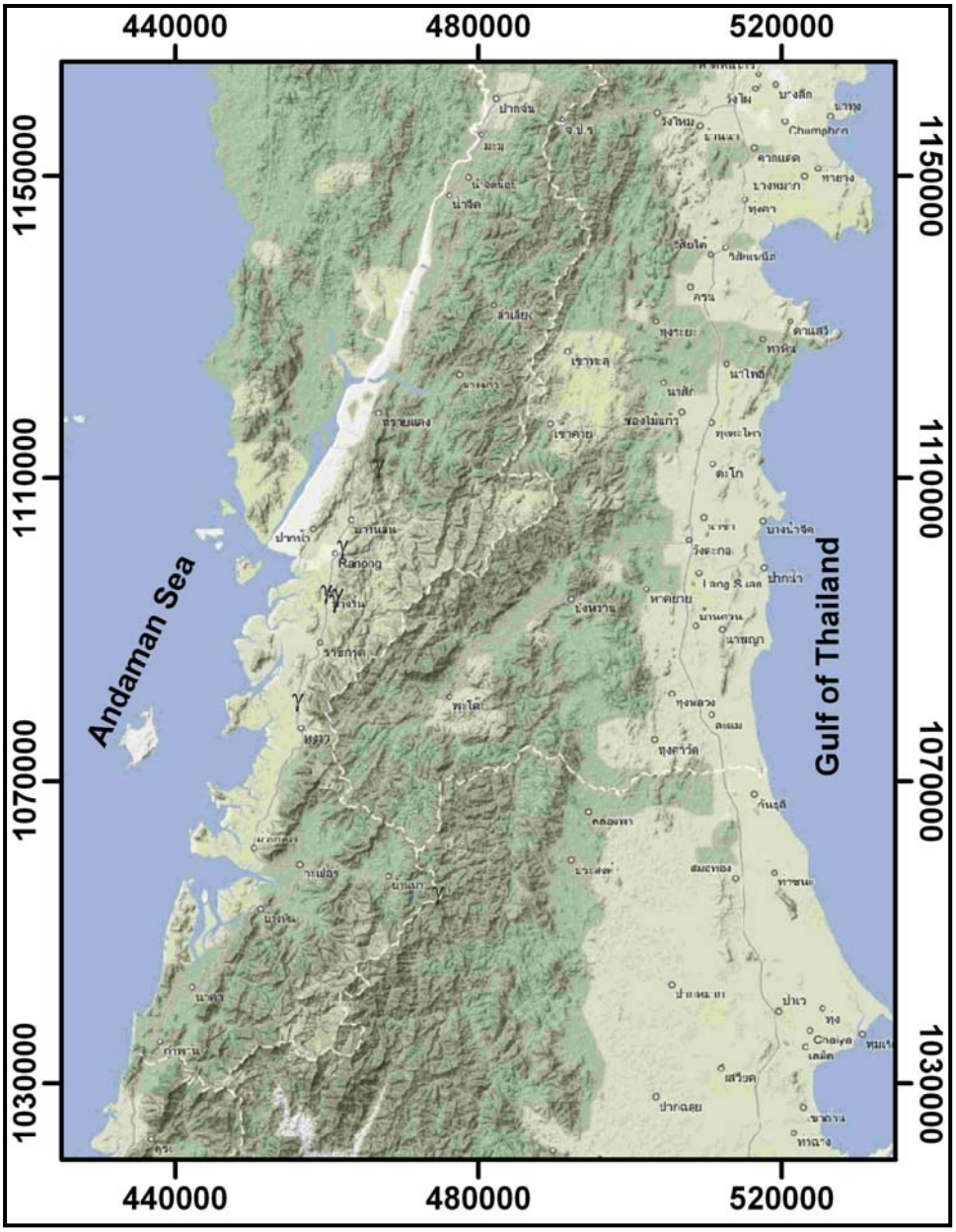
จังหวัดระนองมีลักษณะรูปร่างเรียวยาว มีความยาวจากเหนือสุดจดใต้สุดประมาณ 169 กิโลเมตร มีส่วนที่กว้างที่สุดที่เป็นพื้นดินประมาณ 25 กิโลเมตร และมีส่วนที่แคบที่สุดประมาณ 9 กิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศเป็นทิวเขา หุบเขาสลับซับซ้อน มีป่าปกคลุมพื้นที่ทางทิศตะวันออกของจังหวัด พื้นที่ทางทิศตะวันตกลาดเอียงลงสู่ทะเลอันดามัน ภูเขาพ่อตาโชงโดงเป็นภูเขาที่สูงที่สุดของจังหวัด คือสูงประมาณ 520 เมตร แม่น้ำลำคลองเกิดจากเทือกเขาทางด้านทิศตะวันออกเป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นทางน้ำสายสั้น ๆ ที่มีความยาวประมาณ 20-30 กิโลเมตร โดยทางน้ำทั้งหมดไหลลงสู่ทะเลอันดามันทางด้านทิศตะวันตก แม่น้ำที่สำคัญคือแม่น้ำกระบุรี ที่วางตัวในทิศทางเดียวกับกลุ่มรอยเลื่อนระนองและมีความยาวถึง 95 กิโลเมตร (สำนักงานจังหวัดระนอง, 2549)

ลักษณะภูมิอากาศ

จังหวัดระนองได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมและลมพายุเขตร้อน คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทยทำให้ฝนตกชุกโดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดระนองและเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น สำหรับอิทธิพลของพายุเขตร้อนนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากจังหวัดระนองตั้งอยู่ในพื้นที่ซึ่งได้รับอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนทั้ง 2 ด้าน คือด้านตะวันออก ที่ประกอบด้วยมหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้ และด้านตะวันตกซึ่งประกอบด้วย อ่าวเบงกอลและทะเลอันดามัน ส่งผลให้จังหวัดระนองได้รับไอน้ำและความชุ่มชื้นมาก โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 28.01 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยประมาณ 35.13 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 22.16 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อิทธิพลของมรสุมทั้งสองฤดูทำให้บริเวณจังหวัดมีความชุ่มชื้นและความชื้นสัมพัทธ์สูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้ลักษณะภูมิประเทศบริเวณจังหวัดระนองเกิดการพุพังได้เร็วขึ้น (สำนักงานจังหวัดระนอง, 2549)



ภาพประกอบ 1.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนอง

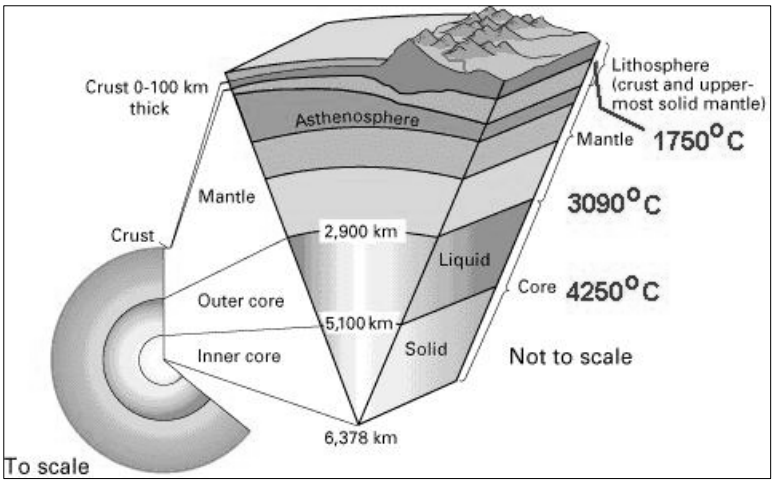


ภาพประกอบ 1.2 แผนที่ภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา (ดัดแปลงจาก Google maps, 2009)

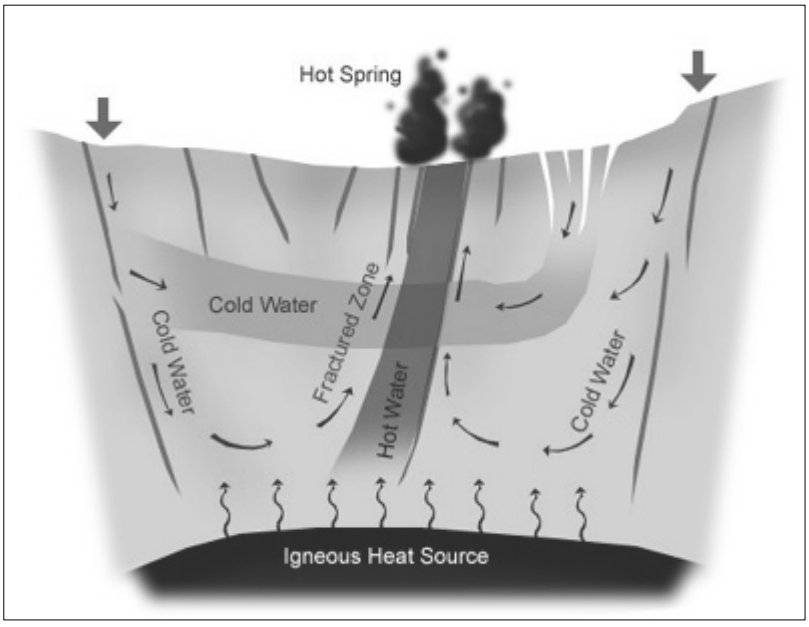
1.3 พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy)

โลกเป็นดาวเคราะห์ทรงรีมีรัศมีประมาณ 6,378 กิโลเมตร (ภาพประกอบ 1.3) โครงสร้างของโลกสามารถจำแนกออกเป็นสามส่วนหลักด้วยกันคือชั้นนอกสุดเป็นชั้นเปลือกโลก (crust) มีความหนาประมาณ 60-70 กิโลเมตร ชั้นถัดไปเป็นชั้นแมนเทล (mantel) มีความหนาประมาณ 3,000 กิโลเมตร บางส่วนของหินอยู่ในสถานะหลอมเหลวเรียกว่าหินหนืด (magma) ชั้นแมนเทิลนี้มีความร้อนสูงมากเนื่องจากหินหนืดมีอุณหภูมิประมาณ 800 - 4300°C ชั้นสุดท้ายเป็นชั้นแกนโลก (core) ซึ่งมีความหน่าแนนสูงมากและอาจมีอุณหภูมิสูงถึงเกือบ 6000 °C ดังนั้นโลกจึงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่สำคัญแหล่งหนึ่ง (U.S. Department of Energy,1999)

พลังงานความร้อนใต้พิภพคือพลังงานธรรมชาติที่มีแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ใต้ผิวโลก พลังงานความร้อนใต้พิภพมักพบเห็นในบริเวณที่มีการไหลถ่ายความร้อน(heat transfer)จากภายในโลกมาสู่ผิวดินมากผิดปกติ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สะท้อนถึงพลังงานความร้อนจากใต้พิภพ เช่น บ่อน้ำร้อน, น้ำพุร้อน, ไอน้ำร้อน, บ่อโคลนเดือด เป็นต้น โดยมีลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมเป็นเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่น การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในบริเวณดังกล่าวทำให้เกิดรอยแตกของชั้นหินใต้ผิวดิน และน้ำฝนและน้ำผิวดินบางส่วนไหลซึมลงสู่ใต้ผิวโลกตามแนวรอยแตกดังกล่าว น้ำเหล่านั้นจะไปสะสมตัวและรับความร้อนจากชั้นหินที่มีอุณหภูมิสูงจนกระทั่งน้ำกลายเป็นน้ำร้อนและไอน้ำแล้วแทรกตัวขึ้นสู่ผิวดินตามแนวรอยแตกของชั้นหิน (ภาพประกอบ 1.4)



ภาพประกอบ 1.3 ลักษณะโครงสร้างและอุณหภูมิภายในโลก ที่มา http://www.our-energy.com/pictures/energy_facts/geothermal_energy_temperatures.jpg, (สืบค้นวันที่ 17 ธันวาคม 2550)



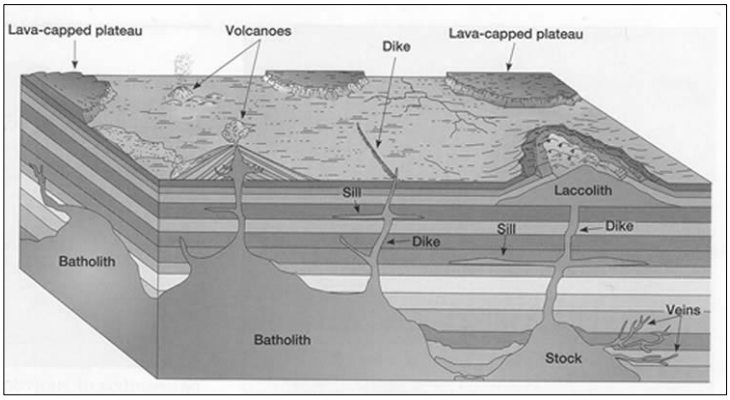
ภาพประกอบ 1.4 ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ก่อให้เกิดน้ำพุร้อน ที่มา http://teenet.chiangmai.ac.th/sci/survey01.php, (สืบค้นวันที่ 21 พฤษภาคม 2550)

แหล่งกำเนิดความร้อน(Heat source)

โดยปกติอุณหภูมิภายใต้ผิวโลกจะเพิ่มขึ้นตามความลึก จึงมีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากใจกลางโลก โดยในบริเวณที่ชั้นเปลือกโลกมีรอยแยกหรือรอยแตกเกิดขึ้น และถ้าหินหนืดมีแรงดันมากพอ หินหนืดที่เคลื่อนตัวอยู่ภายในโลกจะปะทุตัวขึ้นกลายเป็นการระเบิดของภูเขาไฟ โดยมีลาวาปะทุออกมาพร้อมกับความร้อนที่สูงมาก (ตาราง 1.1) และในกรณีที่ความดันไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดของภูเขาไฟ หินหนืดเหล่านั้นก็จะเกิดการเย็นตัวและตกผลึกภายในโลกกลายเป็นหินอัคนีระดับลึก (plutonic rocks) (ภาพประกอบ 1.5) โดยการเย็นตัวภายในผิวโลกทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากหินอัคนีระดับลึกที่ยังคงมีความร้อนสะสมอยู่ไปสู่หินท้องที่ที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

นอกจากพลังงานความร้อนจำนวนมหาศาลที่ใจกลางของโลกแล้ว ยังมีพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก (tectonics) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะ (deformation) ของหิน พลังงานกลจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกนี้ส่วนหนึ่งเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน

นอกจากพลังงานความร้อนข้างต้น ยังมีพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี(Radioactive heat generation) ปริมาณของสารกัมมันตรังสีและปริมาณความร้อนของหินชนิดต่างๆในโลก แสดงไว้ในตาราง 1.2



ภาพประกอบ 1.5 การถ่ายเทความร้อนให้กับหินท้องที่จากการแทรกตัวและการเย็นตัวของหินหนืด ที่มา http://harrimanrocks.rutgers.edu/body-shapes.jpg (สืบค้นวันที่ 18 ธันวาคม 2550)

ตาราง 1.1 สมบัติของหินหนืด (ที่มา Nelson, 2003)

Magma Type	Solidified Volcanic Rock	Solidified Plutonic Rock	Chemical Composition	Temperature °C	Viscosity	Gas Content
Basaltic	Basalt	Gabbro	45-55 SiO2 %, high in Fe, Mg, Ca, low in K, Na	1000 -1200	Low	Low
Andesitic	Andesite	Diorite	55-65 SiO2 %, intermediate in Fe, Mg, Ca, Na, K	800 - 1000	Intermediate	Intermediate
Rhyolitic	Rhyolite	Granite	65-75 SiO2 %, low in Fe, Mg, Ca, high in K, Na	650 - 800	High	High

ตาราง 1. 2 ปริมาณสารกัมตภาพรังสีและปริมาณความร้อนในหินบางชนิด (ที่มา Fowler, 1994)

	Granite	Tholeiitic basait	Alkali basalt	Peridotite	Average continental upper crust	Average oceanic crust	Undepleted mantle
Concentration by weight							
U (ppm)	4	0.1	0.8	0.006	1.6	0.9	0.02
Th (ppm)	15	0.4	2.5	0.04	5.8	2.7	0.10
K (%)	3.5	0.2	1.2	0.01	2.0	0.4	0.02
Heat generation (10^{-10} W kg^{-1})							
U	3.9	0.1	0.8	0.006	1.6	0.9	0.02
Th	4.1	0.1	0.7	0.010	1.6	0.7	0.03
K	1.3	0.1	0.4	0.004	0.7	0.1	0.007
Total	9.3	0.3	1.9	0.020	3.9	1.7	0.057
Density(10^{-3} m^{-3})	2.7	2.8	2.7	3.2	2.7	2.9	3.2
Heat generation (μWm^{-3})	**2.5**	**0.08**	**0.5**	**0.006**	**1.0**	**0.5**	**0.02**

การไหลของความร้อน(Heat flow)

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถถ่ายเทระหว่างระบบ หรือระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุสองชิ้นจะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุทั้งสองนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน และพลังงานความร้อนทางเทอร์โมไดนามิกส์หมายถึงพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านกระบวนการนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (electromagnetic radiation) จนกระทั่งระบบกับสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิที่เท่ากัน

โลกมีการถ่ายเทความร้อนจากใจกลางโลกมาสู่ผิวโลก แต่ด้วยปัจจัยบางประการจึงทำให้อุณหภูมิในแต่บริเวณต่าง ๆที่ผิวโลกมีค่าแตกต่างกัน เช่น เกรเดียนท์ของอุณหภูมิต่างกัน หรือ ค่าสภาพนำความร้อนไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของหินและความหนาของเปลือกโลกในแต่ละบริเวณ

การไหลของความร้อน (heat flow :Q) สามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาตร์ดังนี้

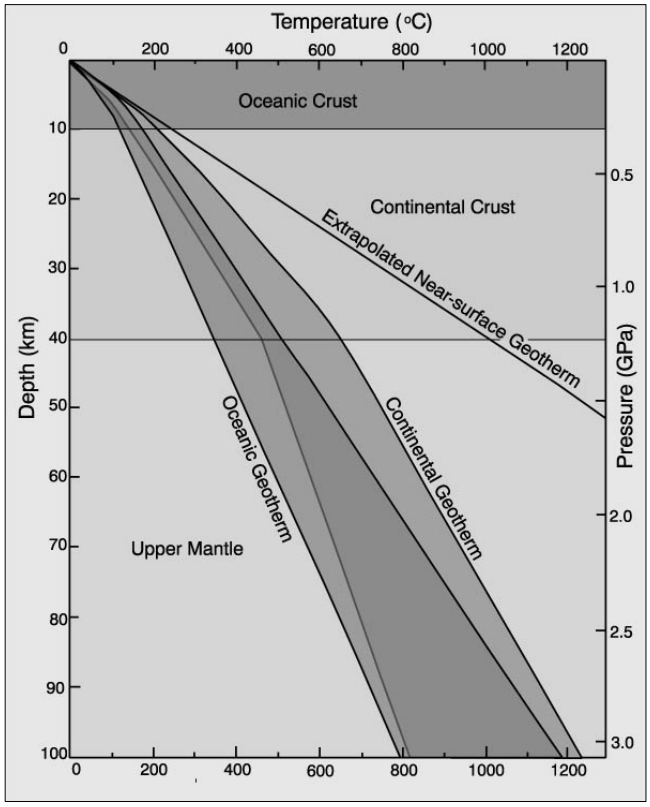
$$Q=K\Delta T/\Delta Z$$

เมื่อ K แทนค่าสภาพนำความร้อน ΔT แทนผลต่างของอุณหภูมิและ ΔZ คือผลต่างของความลึก

ดังนั้นอัตราการไหลของความร้อนในแต่ละบริเวณของผิวโลกแปรผันตามค่าสภาพนำความร้อนของหินซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของหินในแต่ละบริเวณและค่าเฉลี่ยเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ($\Delta T/\Delta Z$) ในกรณีขอหินแกรนิตที่มีค่าสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 3.0 W/mK และมีค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 0.01 K/m อัตราการไหลของความร้อนที่ประเมินได้จะมีค่าเท่ากับ 0.03 W/m^2 ซึ่งอัตราการไหลของความร้อนในบริเวณที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพอาจมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยข้างต้น ดังแสดงในตาราง 1.3

ตาราง 1.3 อัตราการไหลของความร้อนในพื้นที่ต่างๆ (ที่มา Fowler, 1994)

Province	Mean Q (10^{-3} W/m^2)
Sierra Nevada(U.S.)	39
Eastern United States	57
United Kingdom	59
Western Australia	39
Central Australia	83



ภาพประกอบ 1.6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความลึกใต้ผิวดิน (ที่มา Henry, 2008)

1.4 การตรวจเอกสาร

ธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาประกอบขึ้นด้วยชั้นหินที่มีอายุต่าง ๆ มีลักษณะโครงสร้างทางธรณีของชั้นหินคดโค้งเป็นรูปประทุนคว่ำและประทุนหงาย บางแห่งชั้นหินคดโค้งตลบกลับ และมีรอยเลื่อนใหญ่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ รอยเลื่อนนี้เป็นส่วนหนึ่งของรอยเลื่อนระนอง (Kosuwan et al., 2006); (Saman Chaturongkawanich and Santi Leevongchareon, 2000); (สมชาย นาคะผดุงรัตน์ และพิศิษฏ์ สุขวัฒนานันท์, 2529)

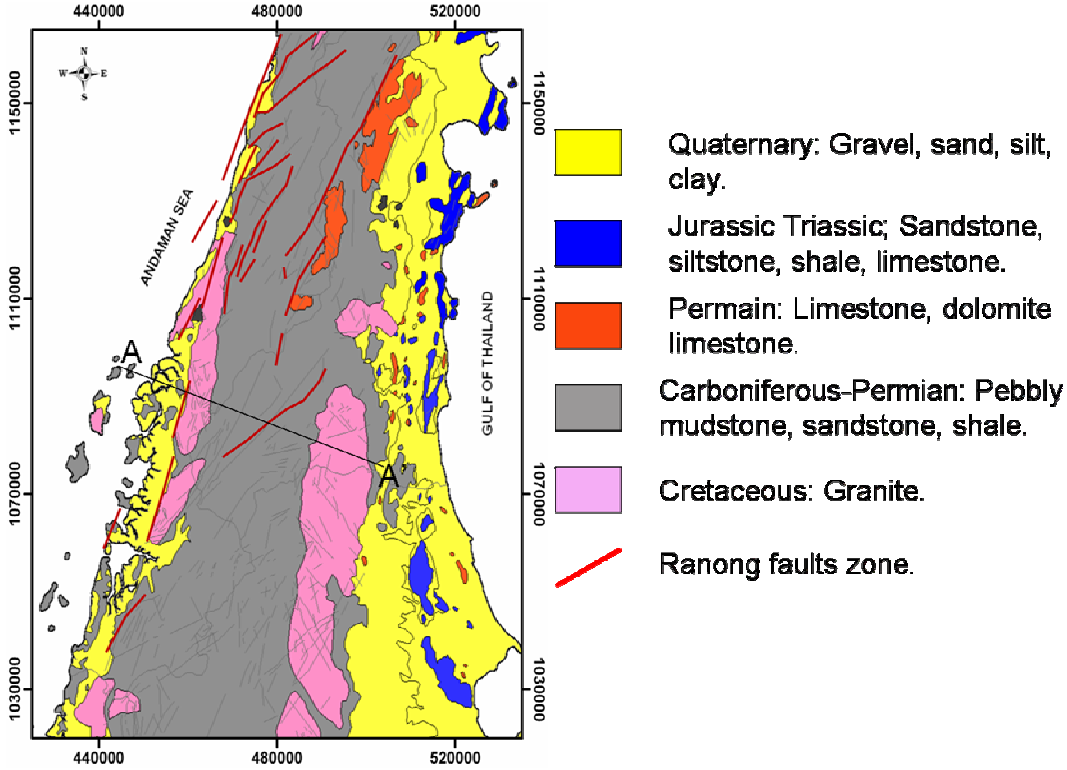
หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน พบหินที่จัดอยู่ในกลุ่มหินแก่งกระจานแผ่กระจายในแนวประมาณเหนือ-ใต้ เป็นบริเวณกว้าง โดยหินในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยหินโคลน หินทรายเนื้อควอรตซ์ หินทรายปนกรวดและหินดินดานปนกรวด โดยมีหินเชิร์ต หินปูนรูปเลนส์ และหินกรวดมน แทรกสลับในบางบริเวณ หินโคลนปนกรวด ซึ่งปรากฏอยู่ตอนกลางของกลุ่มหินแก่งกระจาน มีลักษณะเด่น คือ มีก้อนกรวดของพวกแร่ควอรตซ์ หินควอร์ตไซต์ หินเชิร์ต หินปูน หินดินดานสีดำและหินแกรนิต ขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 80 เซนติเมตร กระจายอยู่ทั่วไป

หินยุคเพอร์เมียน หรือเรียกว่า กลุ่มหินราชบุรี วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ส่วนมากมีลักษณะเป็นเขาโดดๆ หินโดยทั่วไปเป็นหินปูนแสดงชั้นเนื้อแน่น มักมีก้อนหินเชิร์ตแทรกอยู่ด้วย ในบางแห่งพบว่าเนื้อหินเป็นหินปูนโดโลไมต์ ส่วนหินยุคเพอร์เมียนตอนล่างจะเป็นหินทรายและหินดินดานที่สะสมตัวต่อเนื่องมาจากหินโคลนปนกรวด ของกลุ่มหินแก่งกระจาน

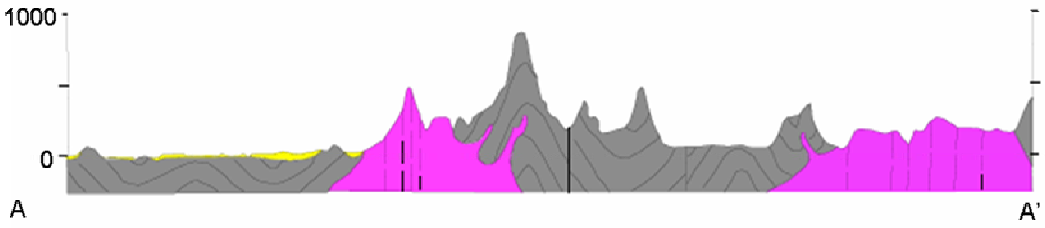
หินยุคจูแรสซิก-ครีเทเชียส โผล่ให้เห็นตั้งแต่ ประกอบด้วยหินทรายสีน้ำตาลแดง หินทรายแป้ง หินดินดานและหินกรวดมน ในชั้นหินดังกล่าวจะพบลักษณะของการวางชั้นเฉียงระดับด้วย นอกจากนี้ก็มีหินปูนเนื้อดินที่เกิดในสภาพแวดล้อมที่เป็นสิ่งทับถมภาคพื้นทวีป และหินทัฟฟ์แทรกสลับในบางแห่ง ในหินชุดนี้พบซากดึกดำบรรพ์ ยุคจูแรสซิกตอนกลางถึงปลายยุคครีเทเชียส

ตะกอนควาเทอร์นารี ส่วนใหญ่เป็นชั้นตะกอนลุ่มน้ำและตะกอนทะเลร่วนที่ยังจับตัวไม่แน่นปกคลุมบริเวณชายฝั่งทะเลทั้ง 2 ฟาก ชั้นตะกอนเกิดจากการกระทำของแม่น้ำและกระแสน้ำชายฝั่งทะเล จำแนกได้เป็นหลายแบบ คือ ตะกอนตะพักลุ่มน้ำ ประกอบด้วยชั้นตะกอนของกรวด ทราย ดิน ดินลูกรังและคราบปูน ตะกอนน้ำพา ได้แก่ ตะกอนที่เกิดจากแม่น้ำปกคลุมในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มตั้งแต่ชายฝั่งทะเลขึ้นมาถึงตะพักลุ่มน้ำ ตะกอน ประกอบด้วย กรวด ทราย ดินเหนียวและโคลน ตะกอนชายหาด ได้แก่ตะกอนที่สะสมตัวตามชายฝั่งทะเล ส่วนใหญ่ประกอบด้วยทราย ทรายแก้ว ปะปนด้วยเศษเปลือกหอยและปะการัง ตะกอนดินโคลนเขตป่าชายเลน ตะกอนชนิดนี้จะมีสีเทา ประกอบด้วยโคลนและทรายแป้ง

หินอัคนี ที่แทรกตัวทั้งสองฝั่งของพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยหินแกรนิตเนื้อดอกหยาบ หินแกรนิตเนื้อหยาบและหินแกรนิตเนื้อละเอียด หินแกรนิตมีอายุอยู่ในยุคครีเทเชียส



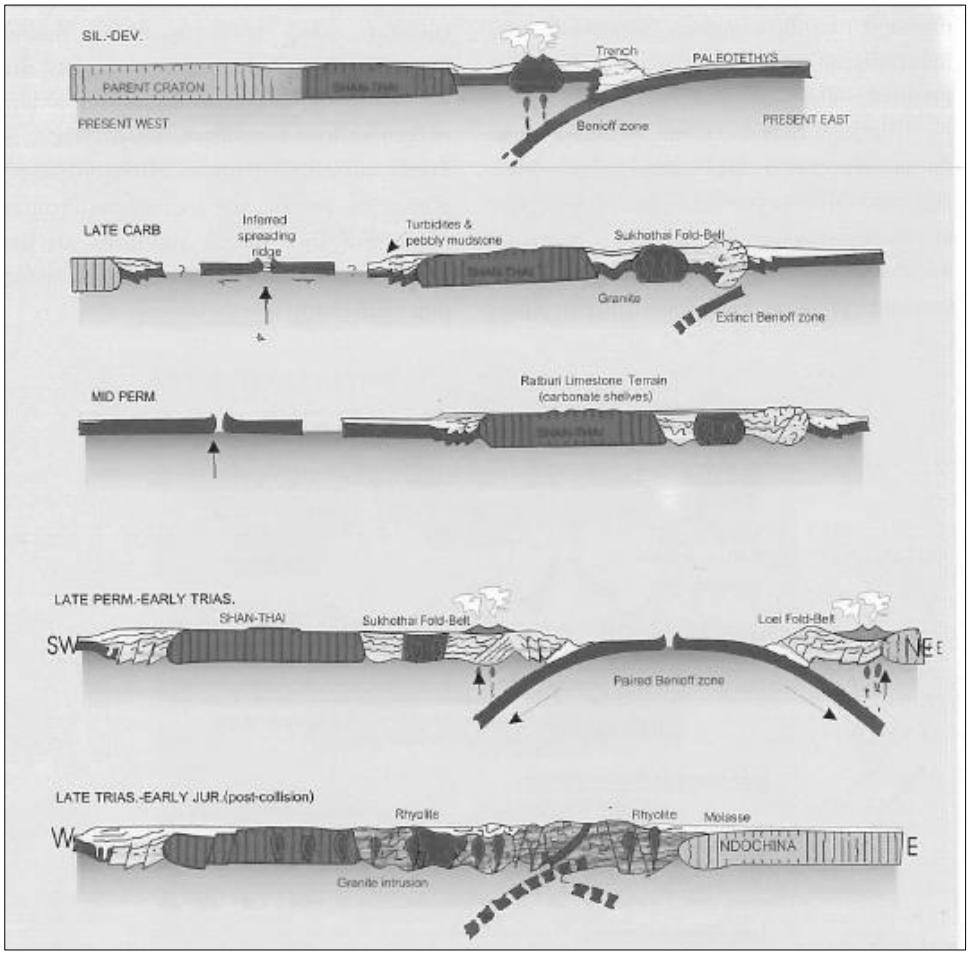
ภาพประกอบ 1.7 แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา (ดัดแปลงจาก กองธรณีวิทยา, 2528)



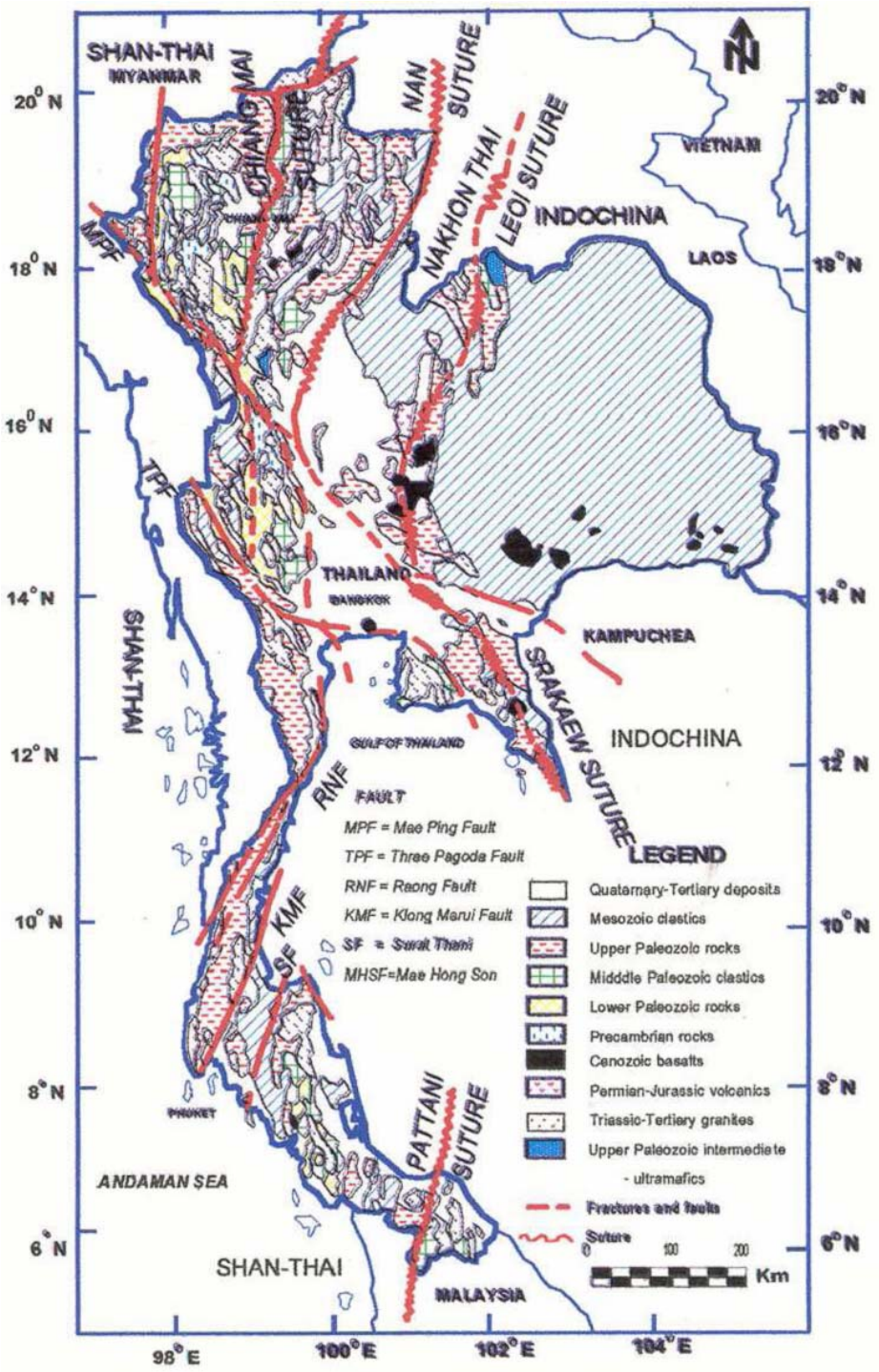
ภาพประกอบ 1.8 ภาพตัดธรณีวิทยาแนว A-A' ของพื้นที่ศึกษา (ดัดแปลงจาก กองธรณีวิทยา, 2528)

วิวัฒนาการของธรณีวิทยาแปรสัณฐานของประเทศไทย

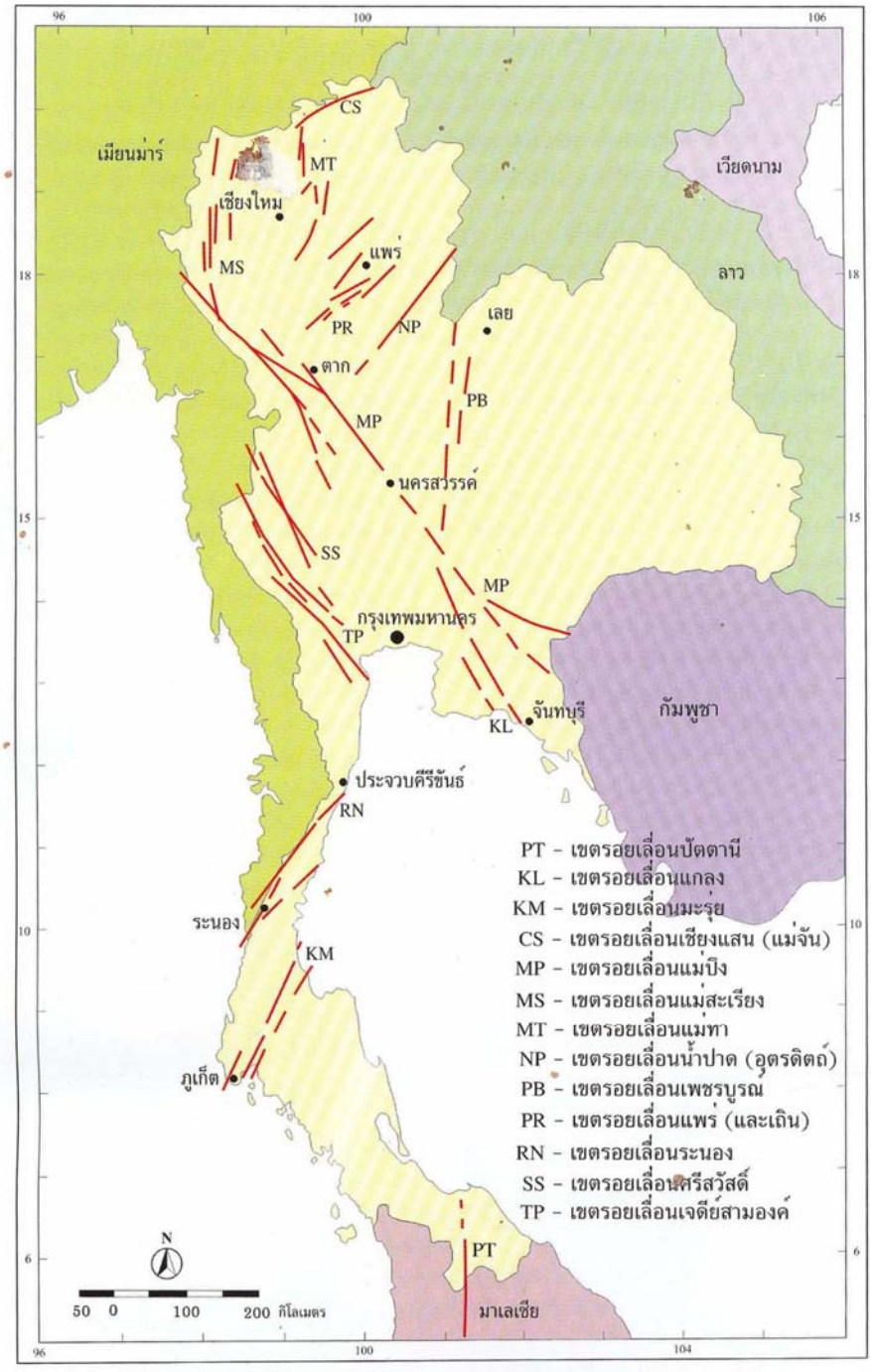
ประเทศไทยในปัจจุบันประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลกที่เป็นหินฐานธรณีอย่างน้อยสองแผ่นคือหินฐานธรณีฉานไทยและหินฐานธรณีอินโดจีน(Shan-Thai and Indochina Cratons) โดยหินฐานทั้งสองเชื่อมต่อกันที่รอยต่อน่าน (Nan Suture) ด้วยการกำหนดข้างต้นพื้นที่ศึกษาปัจจุบันจึงอยู่ในส่วนของหินฐานธรณีฉานไทย โดยมีวิวัฒนาการของธรณีวิทยาแปรสัญฐานดังนี้คือ ในช่วงมหายุคพรีแคมเบรียนจนถึงมหายุคพาลีโอโซอิกตอนต้น หินฐานธรณีทั้งสองนี้ยังเป็นส่วนหนึ่งของทวีปออสเตรเลียกอนด์วานาที่อยู่ทางซีกโลกใต้ (Gondwana Australia) ต่อมาในช่วงมหายุคพาลีโอโซอิกตอนกลางหินฐานธรณีฉานไทยและหินฐานธรณีอินโดจีนจะเริ่มแยกจากแผ่นดินกอนด์วานาพร้อมกับเคลื่อนตัวในแนวระนาบจากส่วนล่างของซีกโลกใต้ไปยังส่วนล่างของซีกโลกเหนือระหว่างช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัสตอนต้นถึงยุคไทรแอสซิกตอนต้น ต่อมาในยุคไทรแอสซิกตอนกลางหินฐานฉานไทยเริ่มเชื่อมต่อกับหินฐานอินโดจีน โดยหินฐานอินโดจีนมุดตัวเข้าไปอยู่ใต้หินฐานฉานไทยผลจากการปะทะกันทำให้เกิดเทือกเขาตามรอยต่อระหว่างสองทวีป โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอบของหินฐานธรณีฉานไทยที่ถูกดันจนเกิดรอยเลื่อนย้อนกลับมุมต่ำ (thrust fault) ในขณะเดียวกันมีหินแกรนิตแทรกดันตัวขึ้นมาในชั้นหินของเปลือกโลกจนถึงยุคไทรแอสซิกตอนต้น และการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกอินเดียเข้ามาชนกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเซียในช่วงยุคเทอร์เชียรีทำให้ชั้นหินของแนวสุโขทัย (Sukhothai Fold Belt) และชั้นหินแนวเลย-เพชรบูรณ์ (Loei-Petchabun Fold Belt) ซึ่งอยู่ระหว่างขอบรอยต่อของหินฐานธรณีฉานไทยและหินฐานธรณีอินโดจีนเกิดการคดโค้งตัว และพัฒนาเกิดแนวรอยเลื่อนที่ สำคัญในประเทศไทยหลายแนวด้วยกัน อาทิ รอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike-slip fault) ในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ เช่น รอยเลื่อนแม่ปิง รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ และในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้เช่น รอยเลื่อนอุตรดิตถ์-น่าน รอยเลื่อนระนอง รอยเลื่อนคลองมะรุ่ย เป็นต้น (Bunopas and Vella, 1978; Helmcke and Lindenberg, 1983; Hahn et al., 1986; Wolfart, 1987; Audley-Charles, 1988; Cooper et al., 1989; Metcalfe, 1990; Panjasawatwong, 1991; Singharajwarapan, 1994; Chaodumrong, 1992; Sashida, 1995; และ Hada, et al., 1997)



ภาพประกอบ 1.9 วิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทยในช่วงยุคไซลูเรียนถึงยุคครีเทเชียส (ที่มา: Bunopas, 1981)



ภาพประกอบ 1.10 แนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกต่างที่เป็นหินฐานธรณีของประเทศไทย (ปัญญา จารุศิริ และคณะ, 2545)



ภาพประกอบ 1.11 รอยเลื่อนตามแนวระดับในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้และในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (แสงอาทิตย์ เชื้อวิโรจน์, 2534)

(Charusiri et al, 1991) และ (Putthapiban, 2002) ศึกษาพบว่าหินแกรนิตในประเทศไทยเป็นส่วนหนึ่งของแนวหินแกรนิตที่พาดผ่านภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีความยาวประมาณ 2,500 กิโลเมตร และมีขนาดความกว้างประมาณ 600 กิโลเมตร สำหรับแนวหินแกรนิตของประเทศไทยและของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 แนวย่อยด้วยกัน คือ แนวตะวันตก แนวตะวันออก และแนวกลาง โดยถือเอาความแตกต่างในเรื่องสภาวะแวดล้อมทางธรณีวิทยา ลักษณะสภาพหินแกรนิต และอายุหินแกรนิตเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง

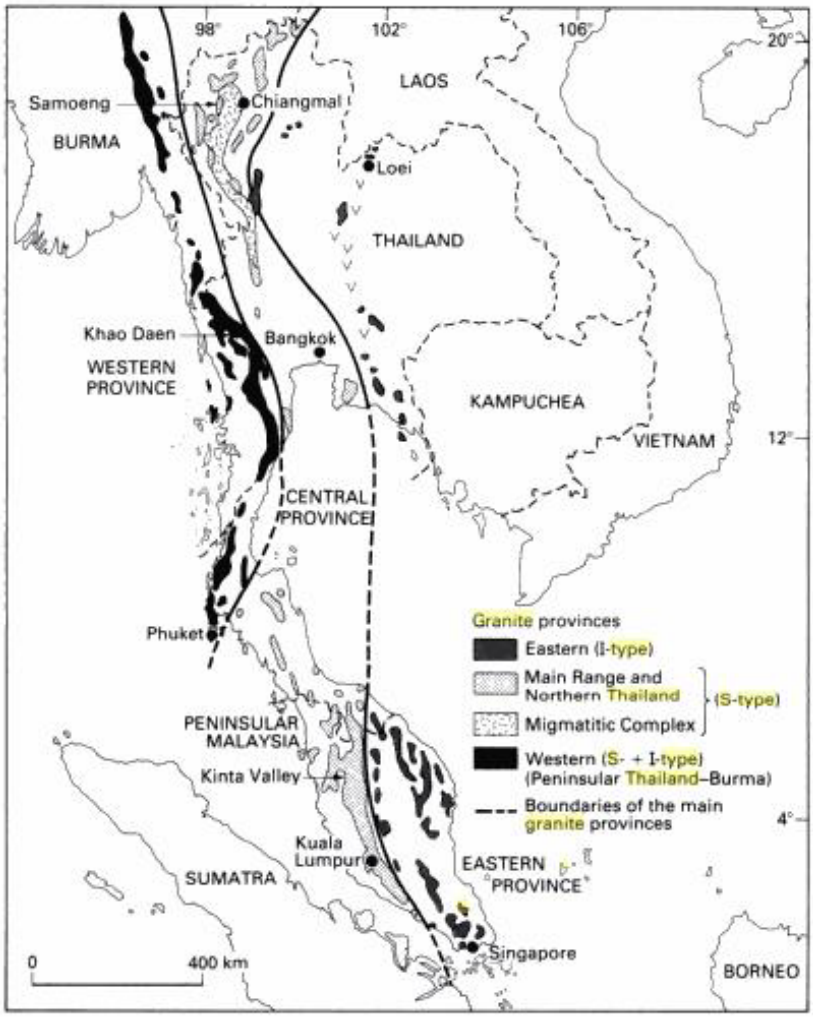
หินแกรนิตแนวตะวันออก (Eastern belt or eastern province granites) ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นมวลหินขนาดเล็ก (small pluton) แต่บางแห่งก็พบเป็นมวลหินขนาดใหญ่ (batholith) ซึ่งเกิดจากการแทรกทับและซ้อนกันอยู่ของมวลหินขนาดเล็ก บางแห่งมีลักษณะเป็นโซน (zoned plutons) และบางแห่งยังพบหินแปลกปลอมที่เป็นหินอัคนีสีเข้ม นอกนี้ยังพบว่าหินแกรนิตแนวตะวันออกตัดและแทรกเข้าไปในหินตะกอนมหายุคพาลีโอโซอิกตอนบน หินแกรนิตแนวตะวันออกนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการเย็นตัวจากหินหนืดจากใต้ผิวโลก (I-Type granites) ตัวอย่างเช่น หินแกรนิตที่บริเวณจังหวัดตาก

หินแกรนิตแนวตอนกลาง (Central belt or central province granites) มักปรากฏเป็นมวลหินขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นแนวยาวติดต่อกัน บางแห่งมีการเรียงตัวของเม็ดแร่ที่มีขนาดใหญ่และแร่ที่มีลักษณะเป็นแผ่น หินแกรนิตนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการหลอมละลายของหินตะกอน (S-Type granites) หินแกรนิตที่เป็นตัวแทนของหินแกรนิตแนวตอนกลาง ได้แก่ หินแกรนิตอุทัยธานี

หินแกรนิตแนวตะวันตก (Western belt or western belt granites) ส่วนมากมักปรากฏเป็นมวลหินขนาดเล็กที่แทรกซอนทับกันเป็นแนวยาว (composite plutons) โดยส่วนใหญ่จะแทรกตัดเข้าไปในหินตะกอนมหายุคพาลีโอโซอิกตอนบน หินแกรนิตแนวตะวันตกนี้ส่วนใหญ่เกิดจากหินตะกอนที่หลอมละลายเช่นเดียวกับหินแกรนิตแนวตอนกลาง และหินแกรนิตที่เป็นตัวแทนหินแกรนิตแนวตะวันตก ได้แก่ หินแกรนิตเกาะภูเก็ต

สมชาย นาคะผดุงรัตน์และนายพิศิษฏ์ สุขวัฒนานันท์(2529) รายงานว่าการแผ่กระจายตัวของหินแกรนิตมักอยู่ในแนวเหนือใต้ขนานกับแนวเทือกเขา ในแต่ละบริเวณหินแกรนิตมีเนื้อหินหลายชนิดเกิดร่วมกัน เช่น หินไบโอไทต์แกรนิตเนื้อดอก, ฮอร์นเบลนด์-ไบโอไทต์แกรนิตเนื้อดอก, ไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิตเนื้อละเอียดถึงหยาบปานกลาง, มัสโคไวต์แกรนิต, มัสโคไวต์-ทัวร์มาลีนแกรนิต เป็นต้น หินแกรนิตเหล่านี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดแร่ต่างๆในภาคใต้โดยเฉพาะแร่ดีบุกและดินขาว อายุของหินแกรนิตปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม หินแกรนิตกลุ่มที่อยู่ทางด้านตะวันตกของรอยเลื่อนคลองมารุยในเทือกเขาภูเก็ตมีอายุในช่วงยุคครีเทเชียส หรือประมาณ 70 ถึง 80 ล้านปี จึงอยู่ในกลุ่มเดียวกันกับหินแกรนิตแนวตะวันตกของประเทศไทย กลุ่มที่สองที่อยู่ด้านตะวันออกของรอยเลื่อนคลองมารุยในเทือกเขา

นครศรีธรรมราชและเทือกเขาสันกาลาคีรีมีอายุอยู่ในยุคไทรแอสซิก หรือประมาณ200 ล้านปี ดังนั้นหินแกรนิตกลุ่มนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของแนวหินแกรนิตตอนกลางของประเทศไทย



ภาพประกอบ 1.12 แนวหินแกรนิตทั้งสามแนวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ดัดแปลงจาก Lehmann, 1990)

การศึกษาทางด้านธรณีวิทยาของแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพที่ผ่านมาแล้ว

สำหรับประเทศที่อยู่ในเขตภูเขาไฟปัจจุบัน เช่น ฟิลิปปินส์ ญี่ปุ่น และอินโดนิเซีย เป็นต้น แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพมีต้นกำเนิดมาจากภูเขาไฟ แต่สำหรับประเทศไทยหินภูเขาไฟที่พบในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อน ส่วนใหญ่มีอายุมากเกินกว่าที่จะเป็นต้นกำเนิดความร้อนได้

ในประเทศไทยแหล่งน้ำพุร้อนเกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ เช่น บริเวณหินอัคนี บริเวณรอยเลื่อนที่มีพลัง บริเวณที่มีรอยเลื่อนปกติที่วางตัวในทิศเหนือ-ใต้ตัดผ่าน และในบริเวณที่มีการไหลถ่ายของความร้อนสูง (Raksakulwong,1999) ดังนี้

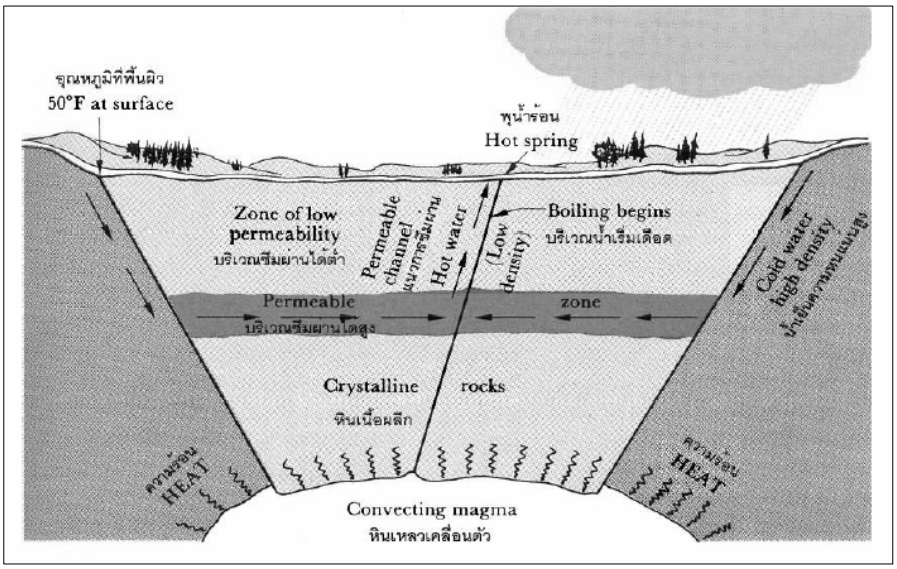
1.แหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณหินแกรนิต อาจได้รับความร้อนจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ซึ่งหินแกรนิตในประเทศไทยมีปริมาณของยูเรเนียมเท่ากับ 4.8 ppm ทอเรียมเท่ากับ 21.5 ppm และโพแทสเซียมเท่ากับ 3-4 % ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐานของโลก (กิตติชัย วัฒนานิกร, 1982) ซึ่ง Takashima et al.(1989) คำนวณการผลิตความร้อนของหินแกรนิตในภาคเหนือของประเทศไทยพบว่ามีพิสัยระหว่าง 3.6 ถึง 7.6 $\mu W \cdot m^{-3}$ และปริมาณการไหลถ่ายความร้อนที่ประเมินได้สำหรับชั้นหินแกรนิตหนา 10 km จะเท่ากับ $33 mWm^{-2}$ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอาจมากเพียงพอที่ทำให้น้ำบาดาลในบริเวณข้างเคียงมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเคลื่อนตัวตามแนวรอยเลื่อนและรอยแตกกลับขึ้นสู่ผิวดินได้

2. แหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณรอยเลื่อนที่มีพลัง อาจได้รับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน เช่น รอยเลื่อนระนอง และรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย

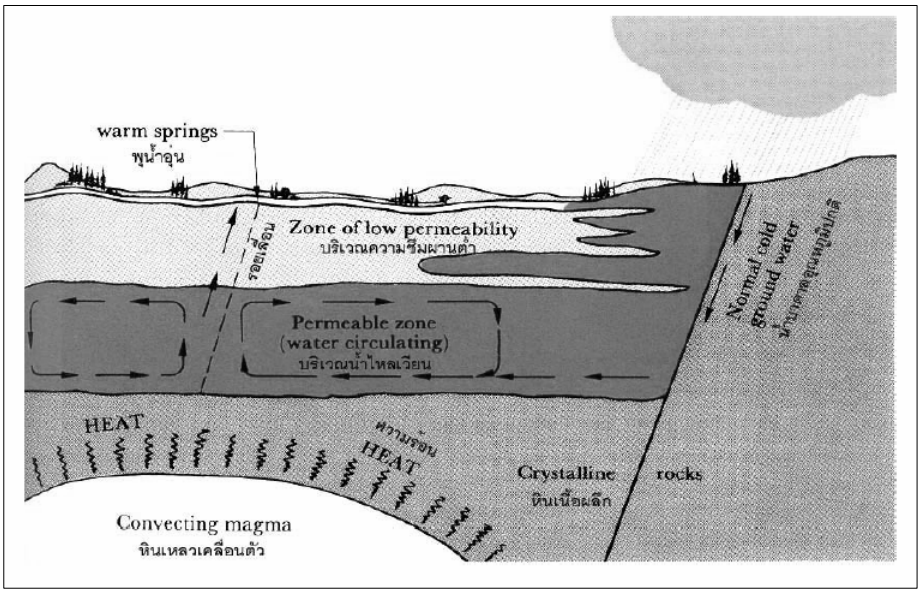
3. แหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณรอยเลื่อนปกติซึ่งมีแนวการวางตัวในทิศทางเหนือ-ใต้ โดยรอยเลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากจากแรงดึงในขบวนการธรณีแปรสัณฐานที่เกิดภายหลังยุคเทอร์เชียรี โดยรอยเลื่อนเหล่านี้เป็นช่องทางนำความร้อนจากภายในโลกขึ้นสู่ผิวดิน

4. แหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณที่มีค่าไหลถ่ายความร้อนสูง ซึ่งมานพ รักษาสกุลวงค์ (2535) พบว่าการไหลถ่ายความร้อนที่มีค่าสูงกว่า $100 mWm^{-2}$ สัมพันธ์กับพื้นที่ต่อไปนี้ คือ พื้นที่ที่ปกคลุมด้วยหินแกรนิต พื้นที่ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับแหล่งน้ำพุร้อน หรือ พื้นที่ซึ่งมีสำรวจหินน้ำมันและปิโตรเลียม

มานพ รักษาสกุลวงศ์ (2544) กล่าวว่าเนื่องจากแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทยมีความสัมพันธ์หรืออยู่ภายใต้อิทธิพลของรอยแตก รอยเลื่อนทั้งที่เป็นรอยเลื่อนเก่าและรอยเลื่อนใหม่ ทำให้สามารถเขียนแบบจำลองของแหล่งน้ำพุร้อนได้ 2 ลักษณะ คือ แบบจำลองที่หนึ่งเกิดจากการที่น้ำฝนหรือน้ำในแม่น้ำลำคลองไหลซึมผ่านช่องว่างหรือรอยแตกของหินลงไปใต้ผิวดินในระดับลึก เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากหินใต้ผิวโลก เช่น หินแกรนิต จะทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความดันเพิ่มมากขึ้น น้ำร้อนจึงไหลกลับสู่ผิวโลกตามแนวรอยแตกรอยเลื่อนเกิดเป็นน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิใกล้เดือด(ภาพประกอบ 13 A) ส่วนในแบบจำลองที่สอง แหล่งน้ำพุร้อนมักเกิดในบริเวณที่มีหินเนื้อตันปิดทับหินแกรนิต โดยน้ำผิวดินไหลลงสู่ใต้ดินตามรอยแตกรอยเลื่อนและรูพรุนของหินจนถึงความลึกระดับหนึ่งจะได้รับการถ่ายเทความร้อน แล้วน้ำร้อนจะไหลกลับสู่ผิวดินตามรอยแตกรอยเลื่อนของหินเกิดเป็นน้ำพุร้อนหรือบ่อน้ำอุ่น(ภาพประกอบ 13 B) ดังนั้นรอยแตกรอยเลื่อน จึงมีบทบาทของการไหลผ่านของน้ำร้อนในบริเวณแหล่งน้ำพุร้อน

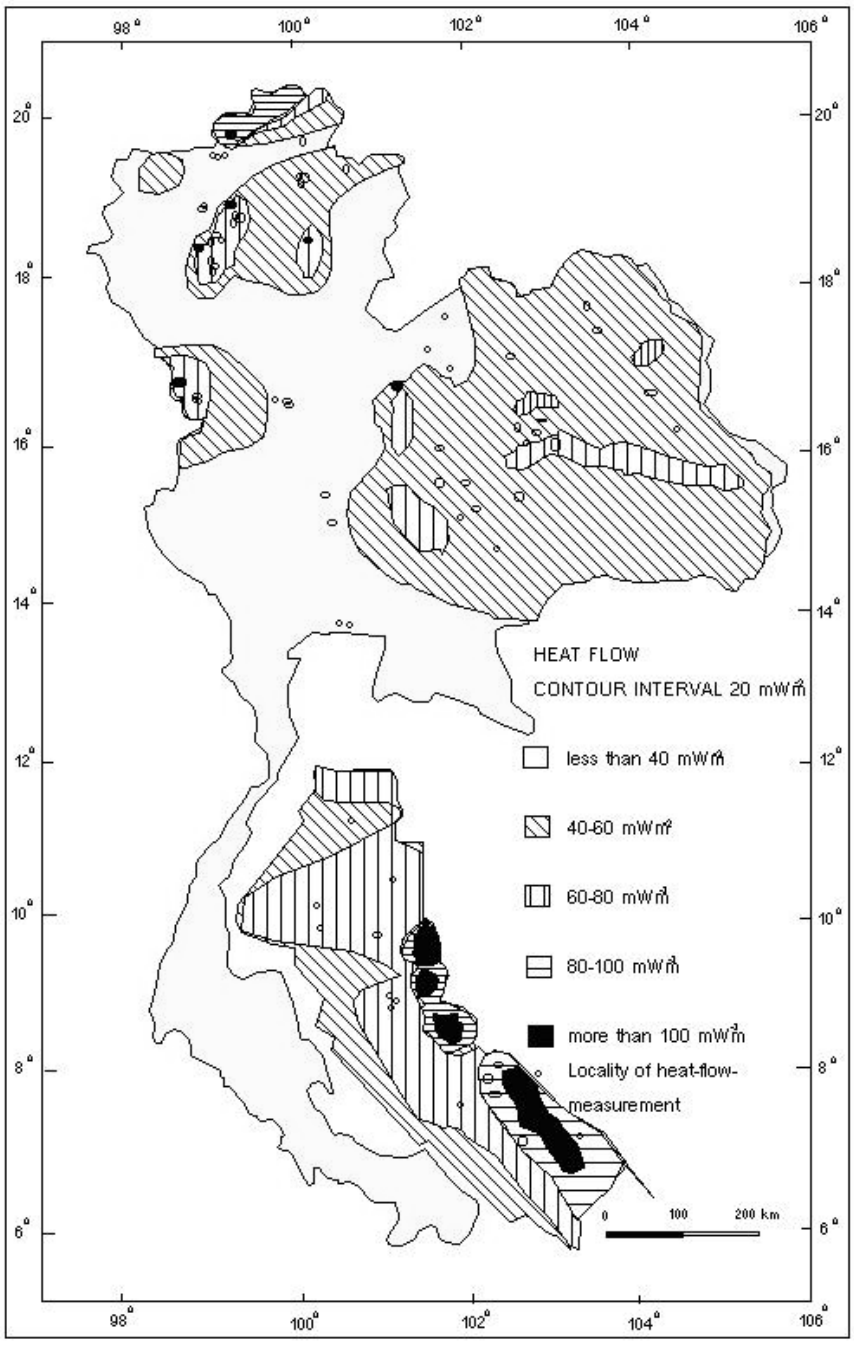


(A)



(B)

ภาพประกอบ1.13 แบบจำลองของแหล่งน้ำพุร้อน (A) น้ำพุร้อนเกิดร่วมกับหินอัคนีเช่นหินแกรนิต (B) น้ำพุร้อนเกิดอยู่ในบริเวณที่มีหินเนื้อตันเช่นหินปูนปิดทับหินอัคนี (ที่มา Cargo and Mallory,1977)



ภาพประกอบ 1.14 แผนที่การไหลถ่ายความร้อนของประเทศไทย ซึ่งได้จากการศึกษาการไหลถ่ายความร้อนได้กระทำในหลุมเจาะน้ำบาดาล และหลุมเจาะสำรวจแหล่งแร่และหลุมเจาะสำรวจปิโตรเลียม ในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และในอ่าวไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1977 เป็นต้นมา (ที่มา Raksaskulwong and Thienpasert, 1995)

การศึกษาแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองที่ผ่านมาแล้ว

Chaturongkawanich and Leevongchareon (2000) ศึกษาแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองจำนวน 4 แหล่งด้วยเทคนิคทางธรณีวิทยา ธรณีเคมี และธรณีฟิสิกส์ ได้ผลดังนี้ แหล่งน้ำพุร้อนแต่ละแหล่งประกอบด้วยบ่อน้ำพุร้อนธรรมชาติจำนวนมากกว่า 1 บ่อ โดยมีอุณหภูมิที่พื้นผิวอยู่ในช่วง 40 – 65 องศาเซลเซียส โดยทั้ง 4 แหล่งมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตยุคครีเทเชียสในสองหมวดหินคือหมวดหินแกรนิตคลองบางริ้น (Kgr-br) และหมวดหินแกรนิตคลองหงาว (Kgr-ng) โดยหินทั้งสองหมวดนี้มีดอกเม็ดหยาบซึ่งแสดงว่าหินแกรนิตเกิดจากการเย็นตัวของหินหนืดอย่างช้าๆในระดับลึก แหล่งน้ำพุร้อนทั้ง 4 แหล่งมีลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่เหมือนกัน คือรอยเลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ รอยเลื่อนในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ยกเว้นแหล่งแหล่งน้ำพุร้อนวัดตโปทารามที่รอยเลื่อนอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตกตามแนวคลองบางริ้น นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำในแหล่งน้ำพุร้อนวัดโปทารามที่วัดได้มีค่าประมาณ 3.5 ลิตร/วินาที จากตรวจสอบสมบัติทางเคมีของน้ำร้อนจากแหล่งน้ำพุร้อน 3 แหล่ง (ไม่รวมแหล่งน้ำพุร้อนคลองบางริ้น) พบว่ามีปริมาณธาตุต่างๆ ใกล้เคียงกัน (ตารางที่1-3) ดังนี้คือ น้ำร้อนมีสภาพเป็นด่างเล็กน้อย มีธาตุ Na, K, Ca และ Cl ในปริมาณต่ำซึ่งแสดงว่าน้ำดิบที่ป้อนให้กับแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองไม่ใช่น้ำทะเล แต่เป็นน้ำจากผิวดิน ปริมาณของ Mn, Fe และ Mg ในน้ำร้อนมีน้อยมาก และปริมาณของ Mg จำนวนน้อยมากในน้ำร้อนแสดงว่าน้ำร้อนแหล่งนี้ไม่มีการผสมกับน้ำเย็นใต้ดิน และอุณหภูมิของน้ำร้อนใต้ผิวโลกที่แหล่งกักเก็บซึ่งคำนวณจากปริมาณของ SiO_2 มีค่าประมาณ 117-126 องศาเซลเซียส

ตาราง 1.4 ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนวัดตโปทาราม (ที่มา Chaturongkawanich and Leevongchareon (2000)

เครื่องหมาย	pH	TDS	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	HCO_3	F	SO_4	Cl	SiO_2	T SiO_2
(code)		มิลลิกรัม/ลิตร (mg/l)												°C
RN1-1 (บ่อพ่อ)	8.3	330	48	2.8	44	0	0.0	0.1	182	7.0	19.3	4.8	79	124.5
RN1-2 (บ่อแม่)	8.4	330	45	2.9	45	0	0.0	0.1	216	7.5	20.2	5.2	81	125.9
RN1-3 (บ่อลูกสาว)	8.4	330	46	2.8	44	0	0.0	0.1	219	7.0	21.0	5.6	80	124.7

ตาราง 1.5 ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนทุ่งยอ (ที่มา Chaturongkawanich and Leevongchareon (2000)

เครื่องหมาย	pH	TDS	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	HCO_3	F	SO_4	Cl	SiO_2	T SiO_2
(code)		มิลลิกรัม/ลิตร (mg/l)												°C
RN2 (บ่อพ่อ)	8.3	330	46.4	3.2	44.1	0.03	0.0	0.0	189	5.4	44.9	11	75.5	121.9

ตาราง 1.6 ธรณีเคมีของแหล่งน้ำพุร้อนบ้านพรรั้ง (ที่มา Chaturongkawanich and Leevongchareon (2000)

เครื่องหมาย	pH	TDS	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	HCO_3	F	SO_4	Cl	SiO_2	T SiO_2
(code)		มิลลิกรัม/ลิตร (mg/l)												°C
RN3-1	8.4	330	46.9	3.0	44.3	0.01	0.0	0.0	190	5.4	44.9	10	72.0	119.58
RN3-2	8.3	320	44.2	3.1	43.9	0.01	0.0	0.0	186	5.7	45.3	11	75.0	119.62
RN3-3	8.4	300	42.8	3.0	441.3	0.03	0.0	0.0	200	5.2	24.7	11	72.5	119.94

การศึกษาทางธรณีฟิสิกส์

Bruno et al.(2000) ได้ใช้วิธีคลื่นไหวสะเทือน วิธีสนามโน้มถ่วง และวิธีสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ศึกษาลักษณะโครงสร้างของแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศอิตาลี โดยสามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยชั้นหินตะกอนภูเขาไฟ และชั้นของลาวา โดยภายใต้ชั้นเหล่านี้เป็นชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ และการไหลของน้ำร้อนเกิดขึ้นตามแนวของรอยเลื่อน

Corinne et al. (1998) ได้ทำการศึกษาวัดค่าสนามโน้มถ่วงบริเวณแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศนิวซีแลนด์พบค่าผิดปกติบูแกร์เชิงตำบลประมาณ -50 g.u. ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 20 km^2 ซึ่งผู้วิจัยอธิบายว่าสัมพันธ์กับชั้นหินโคลนและหินกรวดที่ปกคลุมด้วยหินบะซอลต์และน้ำร้อนไหลผ่านพื้นที่ศึกษาในบริเวณซึ่งมีค่าสภาพต้านทานประมาณ 10 โอห์ม-เมตร

Lohawijarn et al. (2007) ใช้วิธีสนามโน้มถ่วงและวิธีสนามแม่เหล็กโลกศึกษาโครงสร้างธรณีวิทยาของแหล่งน้ำพุร้อนระนอง โดยนำเสนอว่าค่าสนามโน้มถ่วงที่มีค่าประมาณ -100 g.u.เกิดจากหินอัคนีชนิดกรดที่ระดับลึกประมาณ 10-25 กิโลเมตร และค่าสนามแม่เหล็กโลกผิดปกติที่เป็นมีค่าประมาณ -25 นาโนเทสลา เกิดจากไดส์ (dikes) ของหินอัคนีชนิดเบส และค่าผิดปกติของสนามแม่เหล็กโลกประมาณ 35 นาโนเทสลาที่แผ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง เกิดจากอิทธิพลของหินอัคนีในระดับตื้น โดยหินอัคนีเหล่านี้น่าจะสัมพันธ์กับหินหนืดที่ยังร้อนอยู่ในระดับลึกและประพฤติตัวเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองและพื้นที่ข้างเคียง

Prasad et al. (2005) และ Ndougsa-Mbarga et al. (2007) ได้ใช้ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติที่เป็นลบเพื่อกำหนดขอบเขตและความลึกของแอ่งตะกอน Malengreau et al. (1999), Rybakov et al. (2000) และ Cella et al. (2007) อธิบายค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติที่มีลักษณะเป็นวงปิดและมีค่าเป็นบวกว่าเกิดจากการเย็นตัวของหินหนืดใต้ผิวโลก นอกจากนั้น Nunes et al. (2006) วัดและวิเคราะห์ค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติบริเวณภูเขาไฟบนเกาะพิโก (Pico) ที่มีค่าเป็นลบว่าเกิดจากการสะสมตัวของหินหนืดในระดับที่ค่อนข้างตื้นใต้แนวภูเขาไฟพิโก ในขณะที่ Loke(1992) ให้เหตุผลว่าค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติที่เป็นลบในคาบสมุทรมาเลย์ว่าเกิดจากหินอัคนีระดับลึกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหินหินปูนที่อยู่ข้างเคียง

Stanley and Blakely (1995) ได้ใช้วิธีสนามโน้มถ่วงศึกษาแหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพประเภทไกเซอร์ในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเมินว่าแหล่งกักเก็บหินหนืดอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 7 กิโลเมตร

1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ในการกำหนดลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนใต้พิภพที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดระนอง เช่น ความลึกของชั้นหินที่เป็นต้นกำเนิดความร้อน ชนิดของหินที่เป็นต้นกำเนิดความร้อน

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วิธีการวิจัยประกอบด้วย

2.1.1 การสำรวจลักษณะทางธรณีวิทยาและเก็บตัวอย่างหินในภาคสนาม

2.1.2 การวัดค่าความหนาแน่นของหินตัวอย่าง

2.1.3 การวัดข้อมูลค่าโน้มถ่วงในภาคสนาม

2.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลสนามโน้มถ่วง

2.1.5 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง

2.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง

2.1.7 กำหนดโครงสร้างธรณีเชิงภูมิภาคของพื้นที่ศึกษาวิจัย

2.2 วัสดุ

วัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงตามหัวข้อต่อไปนี้ คือ

2.2.1 วัสดุที่ต้องใช้สำหรับการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่างหิน ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

2.2.1.1 ตัวอย่างหินโผล่ ซึ่งเก็บมาจากพื้นที่ศึกษา

2.1.2.2 น้ำเปล่า สำหรับใช้ในการหามวลของตัวอย่างหินในน้ำ

2.2.2 วัสดุที่ต้องใช้สำหรับการศึกษาค่าสนามโน้มถ่วง ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

2.2.2.1 ตะปูขนาด 3 นิ้ว สำหรับทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งของจุดวัดค่าสนามโน้มถ่วงและความสูง บนเส้นทางคมนาคม

2.2.2.2 สีน้ำมัน/สีพลาสติก (สีขาว) สำหรับเขียนรหัสของจุดวัดไว้บนเส้นทางคมนาคม หรือต้นไม้ หรือเสาไฟฟ้า ที่อยู่ใกล้จุดวัดมากที่สุด

2.2.2.3 ฝาขวดน้ำอัดลม สำหรับรองหัวตะปูที่ใช้ทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งของจุดวัดค่าความถ่วงและความสูง

2.2.3 วัสดุที่ต้องใช้สำหรับค่าความสูงของพื้นที่ศึกษาวิจัย เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความสูงคือตำแหน่งเดียวกับการศึกษาค่าความถ่วง ดังนั้นจึงใช้วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาค่าความถ่วงนั้นเอง

2.2.4 วัสดุที่ต้องใช้สำหรับการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง

2.2.4.1 สายไฟฟ้าจำนวน 4 เส้น

2.2.4.2 เทปพันสายไฟฟ้า

2.2.4.3 เชือก

2.3 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้แบ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ แยกตามประเภทของแต่ละส่วนของการวิจัย ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาค่าความหนาแน่น

2.3.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลขยี่ห้อ METTLER รุ่น BB3000 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo AG Switzerland มีพิกัดจำกัด 3,000 กรัม และมีความละเอียดสุด 0.1 กรัม สำหรับชั่งมวลตัวอย่างหิน

2.3.1.2 ภาชนะบรรจุน้ำ สำหรับใช้ใส่น้ำขณะที่ทำการวัดมวลตัวอย่างหินในน้ำ

2.3.1.3 ฆ้อน สำหรับใช้แบ่งหินจากมวลหินโผล่ก้อนขนาดใหญ่ ณ ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

2.3.2 อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับวัดค่าโน้มถ่วงและความสูงมี ดังต่อไปนี้

2.3.2.1 เครื่องแกรวิมิเตอร์ (gravimeter) แบบไม่เสถียรยี่ห้อลาคลอสท์และรอมเบิร์ก (Lacoste & Romberg) รุ่น G-565 ที่มีความแม่นยำ 0.01 มิลลิเกล เพื่อใช้วัดค่าความโน้มถ่วงระหว่างจุดวัด ผลิตโดยบริษัท Lacoste & Romberge, inc. Austin, U.S.A. (ภาพประกอบ2.1)

2.3.2.2 จานรองเพื่อปรับให้แกรวิมิเตอร์อยู่ในแนวระดับอย่างหยาบ

2.3.2.3 นาฬิกา สำหรับอ่านเวลาขณะที่ทำการวัดค่าโน้มถ่วงแต่ละจุดวัด เพื่อนำผลต่างของเวลาที่ได้ไปปรับแก้ไขค่าโน้มถ่วง

2.3.2.4 เครื่องอ่านพิกัดตำแหน่ง (GPS) ยี่ห้อ Trimble Basic Pathfinder สำหรับอ่านตำแหน่งของจุดวัดค่าโน้มถ่วง (ภาพประกอบ2.2)

ภาพประกอบ 2.1 เครื่องแกรวิมิเตอร์ยี่ห้อลาคลอสท์และรอมเบิร์ก

ภาพประกอบ 2.2 เครื่องอ่านพิกัด Trimble Pathfinder GPS.

2.3.2.5 แผนที่ภูมิประเทศ (กรมแผนที่ทหาร, 2532) มาตราส่วน 1:50,000 ระวางต่างๆดังนี้

2.3.2.5.1 ระวาง4627 1 กิ่งอำเภอสุขสำราญ

2.3.2.5.2 ระวาง4627 2 บ้านบางเบน

2.3.2.5.3 ระวาง4727 1 บ้านยางโพรง

2.3.2.5.4 ระวาง4727 1 บ้านยางโพรง

2.3.2.5.5 ระวาง4727 4 คลองท่าฉาง

2.3.2.5.6 ระวาง4728 1 อำเภอพะโต๊ะ

2.3.2.5.7 ระวาง4728 2 คลองโสด

2.3.2.5.8 ระวาง4728 3 อำเภอกะเปอร์

2.3.2.5.9 ระวาง4729 1 บ้านวิสัยใต้

2.3.2.5.10 ระวาง4729 2 อำเภอละอุ่น

2.3.2.5.11 ระวาง4729 3 บ้านทรายแดง

2.3.2.5.12 ระวาง4728 4 อำเภอกระบุรี

2.3.2.5.13 ระวาง4730 2 บ้านปากจั่น

2.3.2.5.14 ระวาง4828 3 อำเภอท่าชนะ

2.3.2.5.15 ระวาง4829 3 อำเภอสวี

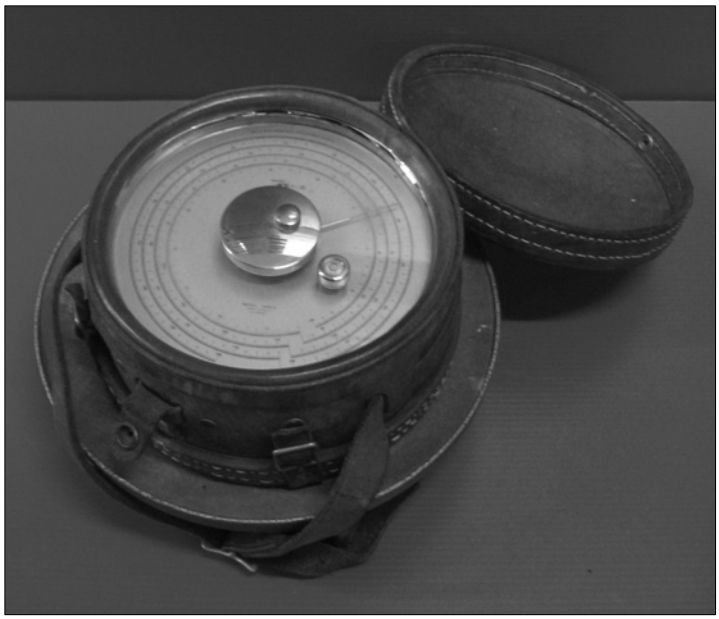
2.3.2.5.16 ระวาง4829 4 จังหวัดชุมพร

2.3.2.6 แผนที่ธรณีวิทยา (กรมทรัพยากรธรณี, 2828) มาตราส่วน 1:250,000

2.3.2.6.1 ระวางที่ NC47-10

2.3.2.7 เทอร์โมมิเตอร์ปรอท (0 -100 $^{\circ}$C) สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศขณะที่ทำการวัดค่าความสูง

2.3.2.8 มาตรระดับความสูง (altimeter) ประเภทความดันบรรยากาศ สำหรับวัดระดับความสูงของจุดวัดค่าโน้มถ่วง ผลิตใน U.S.A โดยบริษัท American Paulin System รุ่น MDM-5 (ภาพประกอบ2.3) ซึ่งมีพิสัยการวัด –100 ถึง 2,500 เมตร โดยมีค่าความละเอียดสุด 0.5 เมตร สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรระดับความสูงนี้ พวงทิพย์ ร่างเล็ก (2528) ได้เปรียบเทียบผลการวัดจากมาตรระดับความสูงและการทำรังวัดระดับ จากจำนวนจุดวัดเปรียบเทียบ 8-10 จุดวัด มีพิสัยของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.2 เมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3 เมตร พบว่าลักษณะภาคตัดขวางของความถ่วงคล้ายกัน แต่ระดับของค่าความถ่วงต่างกัน โดยค่าความถ่วงซึ่งความสูงของจุดวัดได้จากการทำรังวัดระดับมีค่าสูงกว่าค่าความถ่วงซึ่งความสูงของจุดวัดได้จากการใช้มาตรระดับความสูงประมาณ 40 g.u.



ภาพประกอบ 2.3 มาตรระดับความสูงชนิดความดัน Americal Paulin System altimeter MDM-5.

2.3.3 อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

2.3.3.1 เครื่องวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ABEM DC TERRAMETER SAS1000 (ภาพประกอบ2.4)

2.3.3.2 แท่งสแตนเลส สำหรับเป็นขั้วอิเล็กโทด จำนวน 4 ขั้ว

2.3.3.3 สายไฟฟ้าทที่มีความยาว 500 เมตร จำนวน 2 เส้น ยาว 100 เมตร จำนวน 2 เส้น

2.3.3.4 ฆ้อนสำหรับตอกเพื่อปักขั้วอิเล็กโทดลงบนดิน

2.3.3.5 แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์

ภาพประกอบ 2.4 เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ABEM TERRAMETER SAS 1000

2.3.4. อุปกรณ์อื่นๆ

2.3.4.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

2.3.4.2. โปรแกรม Lotus 123

2.3.4.3. โปรแกรม Surfer version 7.0

2.3.4.4 โปรแกรม Grapher version 3.0

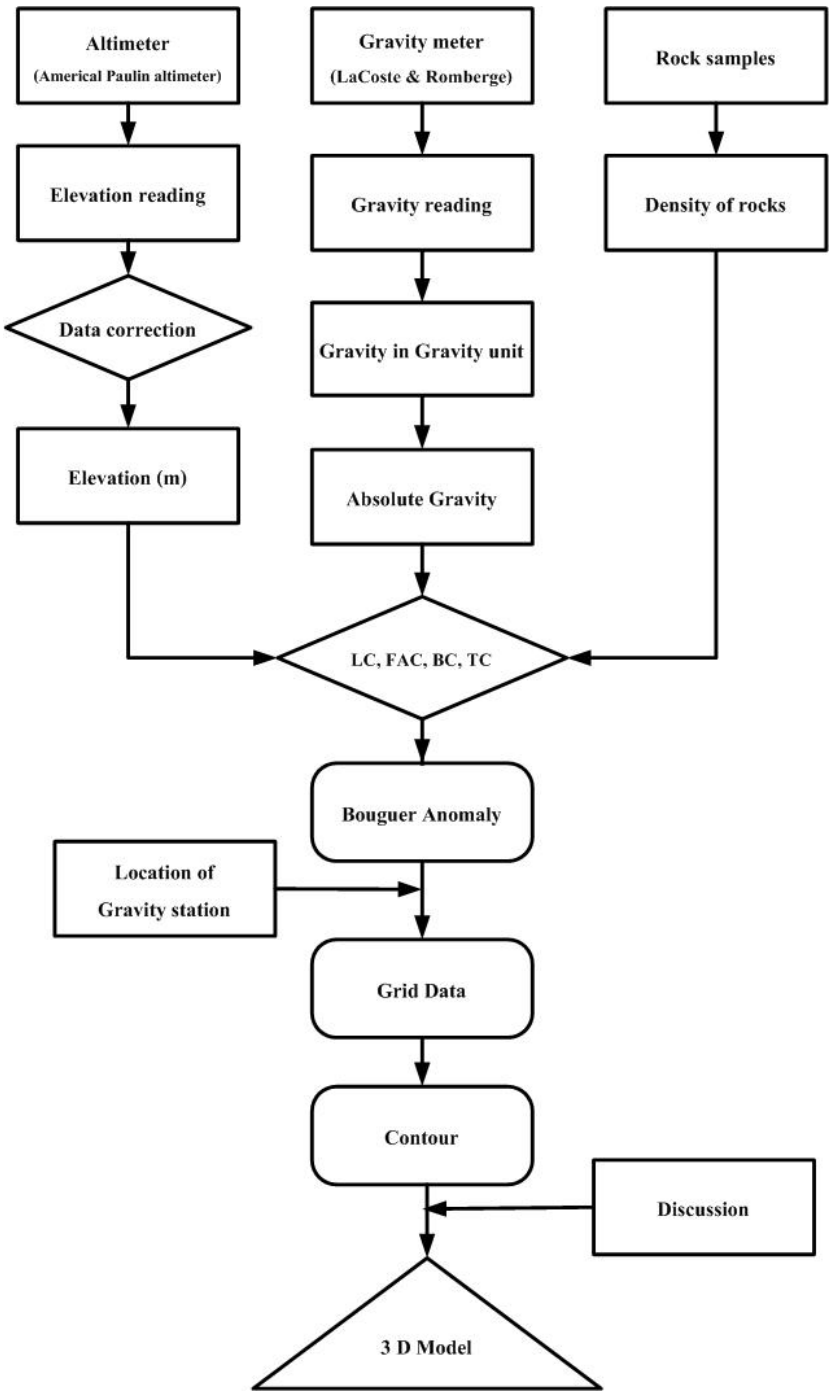
2.3.4.5 โปรแกรม Geo Vista AB-GMM, version 1.31

2.3.4.6 โปรแกรม Resist version 1.0

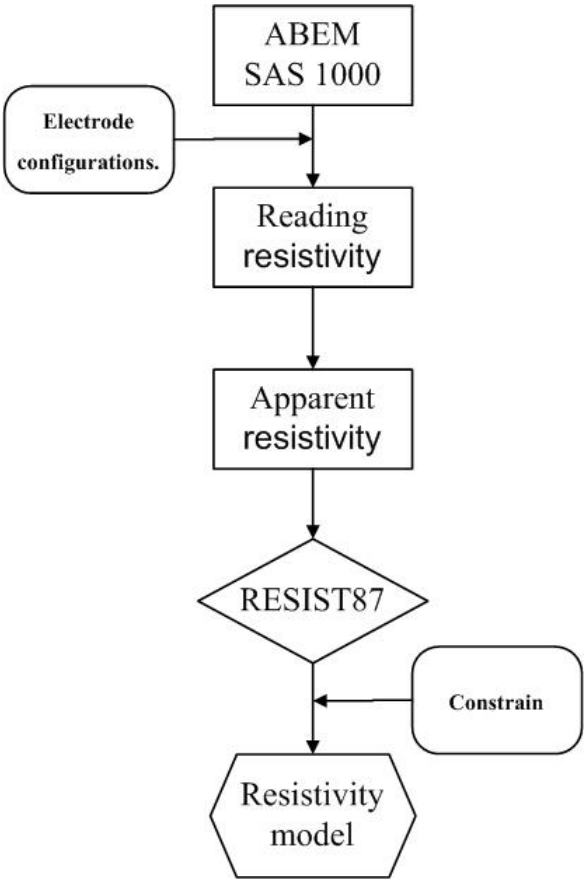
2.4 วิธีดำเนินการ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการวิจัยด้วยระเบียบวิธีทางธรณีฟิสิกส์ 2 ระเบียบวิธี คือ

- การดำเนินการวิจัยด้วยตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสนามโน้มถ่วง
- การดำเนินการวิจัยด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2.5 แผนภาพการดำเนินการวิจัยด้วยระเบียบวิธีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสนามโน้มถ่วง



ภาพประกอบ 2.6 แผนภาพการดำเนินการวิจัยด้วยระเบียบวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน

2.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

2.4.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้วยระเบียบวิธีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสนามโน้มถ่วง

2.4.1.1.1 กำหนดจุดวัดค่าโน้มถ่วง (ภาพประกอบ2.7) บนเส้นทางคมนาคมที่มีอยู่เดิมในพื้นที่ที่ศึกษา โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดวัดแค่ละจุดห่างกันประมาณ 0.5 กิโลเมตรในแนวตะวันออก-ตะวันตก และ 1 กิโลเมตร ในแนวเหนือ-ใต้ รวมทั้งหมด 292 จุด คือตั้งแต่รหัสที่ E001 ถึง E292 (ภาคผนวก ก.) อ่านตำแหน่งจุดวัดโดยเครื่องอ่านพิกัด GPS ประกอบกับแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน1:50,000

2.4.1.1.2 ทำเครื่องหมายของจุดวัดลงบนขอบเส้นทางคมนาคม โดยใช้ตะปูซึ่งมีฝาขวดน้ำอัดลมรองหัวตะปูแล้วเขียนรหัสของจุดวัดลงบนผ้าแล้วทำเครื่องหมายด้วยสีน้ำมันทาลงบนขอบเส้นทางคมนาคม หรือต้นไม้ หรือเสาไฟฟ้า ที่อยู่ใกล้จุดวัดมากที่สุด เพื่อความสะดวกในการทำการวัดซ้ำจุดเดิมเมื่อครบวงรอบ

2.4.1.1.3 วางจานรักษาระดับคร่อมเครื่องหมายของจุดวัด ปรับลูกน้ำรักษาระดับให้อยู่ตรงกลาง แล้วจึงนำแกรวิมิเตอร์ออกจากกล่องมาวางบนจานรักษาระดับ ปรับลูกน้ำทั้งซ้ายและขวาให้สมดุลหลังจากนั้นจึงเปิดปุ่มสวิชต์ไฟและคลายปุ่มล็อกมวล (Clamp)

2.4.1.1.4 อ่านค่าโน้มถ่วงที่ได้จากเครื่องแกรวิมิเตอร์ โดยการปรับสเกลให้ได้ตรงตำแหน่งเส้นอ่าน (reading line) แล้วจึงบันทึกรหัสของจุดวัด เวลาขณะที่ทำการวัด และค่าของแกรวิมิเตอร์ที่อ่านได้ ลงในตารางบันทึกข้อมูล ดังตัวอย่างในตาราง 2.1 หลังจากนั้นล็อกปุ่มล็อกมวล ปิดสวิชต์ไฟ เก็บแกรวิตีมิเตอร์เข้ากล่อง

2.4.1.1.5 วางมาตรระดับความสูงลงบนจานรอง ปรับเข็มที่อ่านค่าให้ตรงกับจุดศูนย์ อ่านค่าความสูง และอุณหภูมิที่ได้ แล้วบันทึกค่าความสูงที่อ่านได้ลงในตารางบันทึกข้อมูล ดังตัวอย่างในตาราง 2.1

2.4.1.1.6 วัดพิกัดตำแหน่งของจุดวัดค่าโน้มถ่วง ด้วยเครื่องอ่านพิกัด GPS แล้วบันทึกพิกัดลงในตารางบันทึกข้อมูล ดังตัวอย่างในตาราง 2.1

2.4.1.1.7 บันทึกค่าความแตกต่างระหว่างความสูงเฉลี่ยของภูมิประเทศกับจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่อยู่ในโซน B ถึง E ลงในตารางบันทึกค่าปรับแก้ภูมิประเทศ ดังตัวอย่างในตาราง2.2 สำหรับความแตกต่างระหว่างความสูงเฉลี่ยของภูมิประเทศกับจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่อยู่ในโซน F ถึง J ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างโดยแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1: 50000 โดยที่รัศมีและจำนวนของห้องของแต่ละโซนแสดงดังตาราง 2.3 และภาพประกอบ 2.7

2.4.1.1.8 เก็บเครื่องมือขึ้นรถ แล้ววัดระยะกับมาตรวัดระยะทางของรถเพื่อที่ทำการวัดค่าความโน้มถ่วงที่จุดวัดจุดต่อไป ทำข้อ 2.4.1.1.2 - 2.4.1.1.7 อีกครั้ง

2.4.1.1.9 เมื่อทำการวัดค่าความถ่วงนานประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วต้องกลับไปวัดที่จุดอ้างอิง (base station) ก็จะได้จุดที่ทำการวัดเป็นวงรอบ ดังภาพประกอบ2.8 กำหนดให้ในวงรอบที่ 1 มี E001- E005 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง โดย E001 เป็นจุดอ้างอิง

2.4.1.1.10 ทำการวัดค่าความถ่วงในวงรอบที่ 2 และวงรอบที่ 3 โดยจุดอ้างอิงของวงรอบที่ 2 จะต้องเป็นจุดวัดค่าความถ่วงที่อยู่ในวงรอบที่ 1 ส่วนจุดอ้างอิงของวงรอบที่ 3 จะต้องเป็นจุดวัดค่าความถ่วงที่อยู่ในวงรอบที่ 1 หรือ 2 ก็ได้ ดังภาพประกอบ2.8 กำหนดให้ในวงรอบที่ 2 มี E006 - E010 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง โดย E001 เป็นจุดอ้างอิง ส่วนวงรอบที่ 3 มี E011 - E014 เป็นจุดที่วัดค่าความถ่วง โดย E010 และ E005 เป็นจุดอ้างอิง

2.4.1.1.11 ทำการวัดค่าสนามโน้มถ่วงและความสูงของจุดวัดจนครบทุกจุดวัด

ตาราง 2.1 ตัวอย่างตารางบันทึกข้อมูลที่ใช้ในภาคสนาม

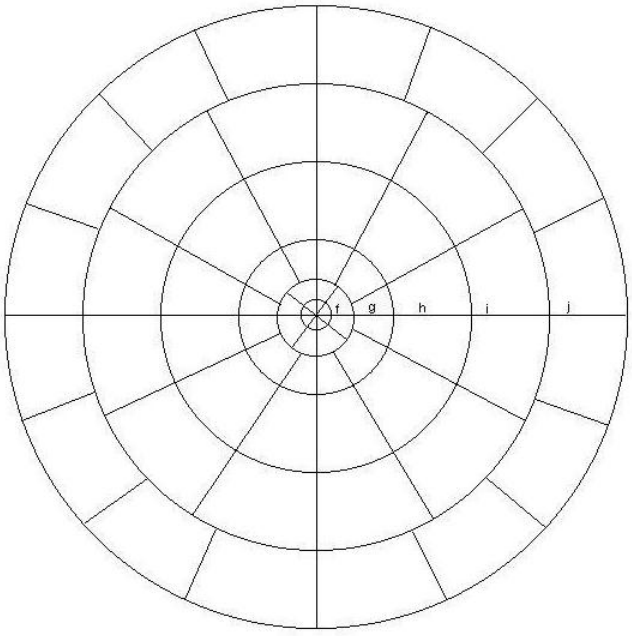
Date	Stn	E	N	Time (hr:min)	Graity reading	Altimeter reading	Temp (°F)
5Apr06	*E001	459847	1099574	15:15	1735.450	1464.0	98.0
	E002	460970	1101067	15:42	1733.502	1471.0	97.0
	E003	460990	1103003	16:00	1736.705	1466.0	98.1
	E004	461812	1104627	16:16	1734.509	1474.0	98.0
	E005	462311	1106530	16:30	1734.580	1479.0	96.0
	E006	462287	1108555	16:45	1735.135	1482.0	98.0
	E007	462694	1110002	17:00	1728.575	1523.0	97.0
	E008	462576	1111489	17:15	1723.407	1567.0	95.0
	E009	463361	1112905	17:31	1725.009	1548.5	96.0
	E010	463565	1113882	17:46	1740.311	1472.5	95.0
	E011	463985	1115733	18:00	1742.091	1468.5	93.0
	*E001	459847	1099574	18:32	1735.372	1466.0	91.5

ตาราง 2.2 ตารางบันทึกค่าปรับแก้ภูมิประเทศโซน B ถึง J

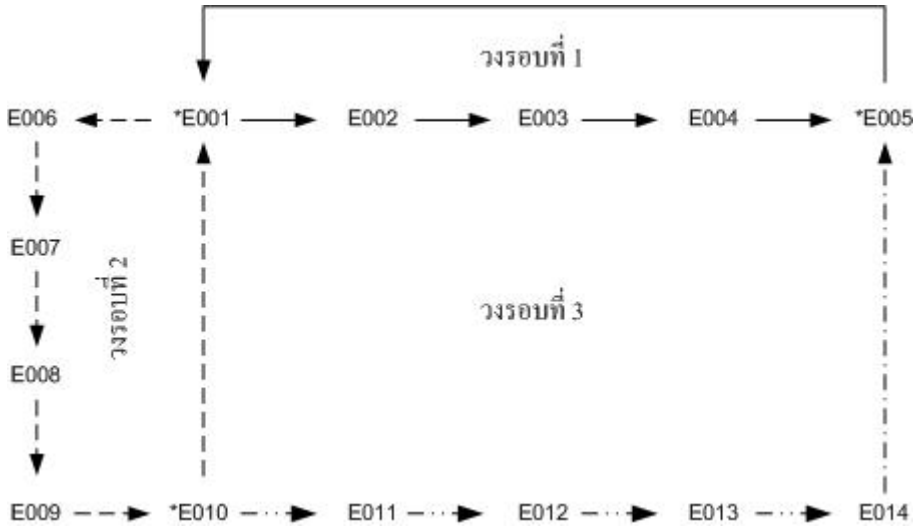
GEOPHYSICS LABORATORY, DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE,														
												GRAVITY TERRAIN CORRECTION		
PRINCEOF SONGKLA UNIVERSITY, HATYAI, 90110												**HAMMER FORM**		
TEL.074-211030 EXT.2676,2677 FAX.074-212601														
CLIENT…*Geothermal Resources in* Ranong…AREA…A…OBSERVER Ekkachai Sanmuang…DATE..4/8/48														
STATION..A1..ALTITUDE.0.28...TOTAL CORRECTION……									***0.31*** g.u.					sum
COMPARTMENT		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	
ZONE														
B	ALT.	-	-	-	-									
	DIF.	0.5	0	0	-0.5									
	COR.	0.000	0.000	0.000	0.000									**0.00**
C	ALT.	-	-	-	-	-	-							
	DIF.	-2	0	-2	-2	0	-2							
	COR.	0	0	0	0	0	0							**0.00**
D	ALT.	0	0	0	0	0	0							
	DIF.	0	0	0	0	0	0							
	COR.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000							**0.00**
E	ALT.	0	0	0	0	0	0	0	10					
	DIF.	0	0	0	0	0	0	0	-10					
	COR.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000					**0.02**
F	ALT.	10	0	0	0	0	0	0	10					
	DIF.	-10	0	0	0	0	0	0	-10					
	COR.	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009					**0.02**
G	ALT.	30	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	
	DIF.	-30	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-50	
	COR.	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	**0.07**
H	ALT.	40	5	0	0	0	0	0	10	10	0	40	100	
	DIF.	-40	-5	0	0	0	0	0	-10	-10	0	-40	-100	
	COR.	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.019	0.116	**0.16**
I	ALT.	30	0	0	0	0	0	0	10	10	30	60	40	
	DIF.	-30	0	0	0	0	0	0	-10	-10	-30	-60	-40	
	COR.	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.006	0.024	0.011	**0.05**
J	ALT.	30	0	0	0	0	0	0	10	10	30	60	40	
	DIF.	-30	0	0	0	0	0	0	-10	-10	-30	-60	-40	
	COR.	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.006	0.024	0.011	**0.05**

ตาราง 2.3 รัศมีและจำนวนของห้องในแต่ละโซนที่ใช้ปรับแก้ภูมิประเทศ

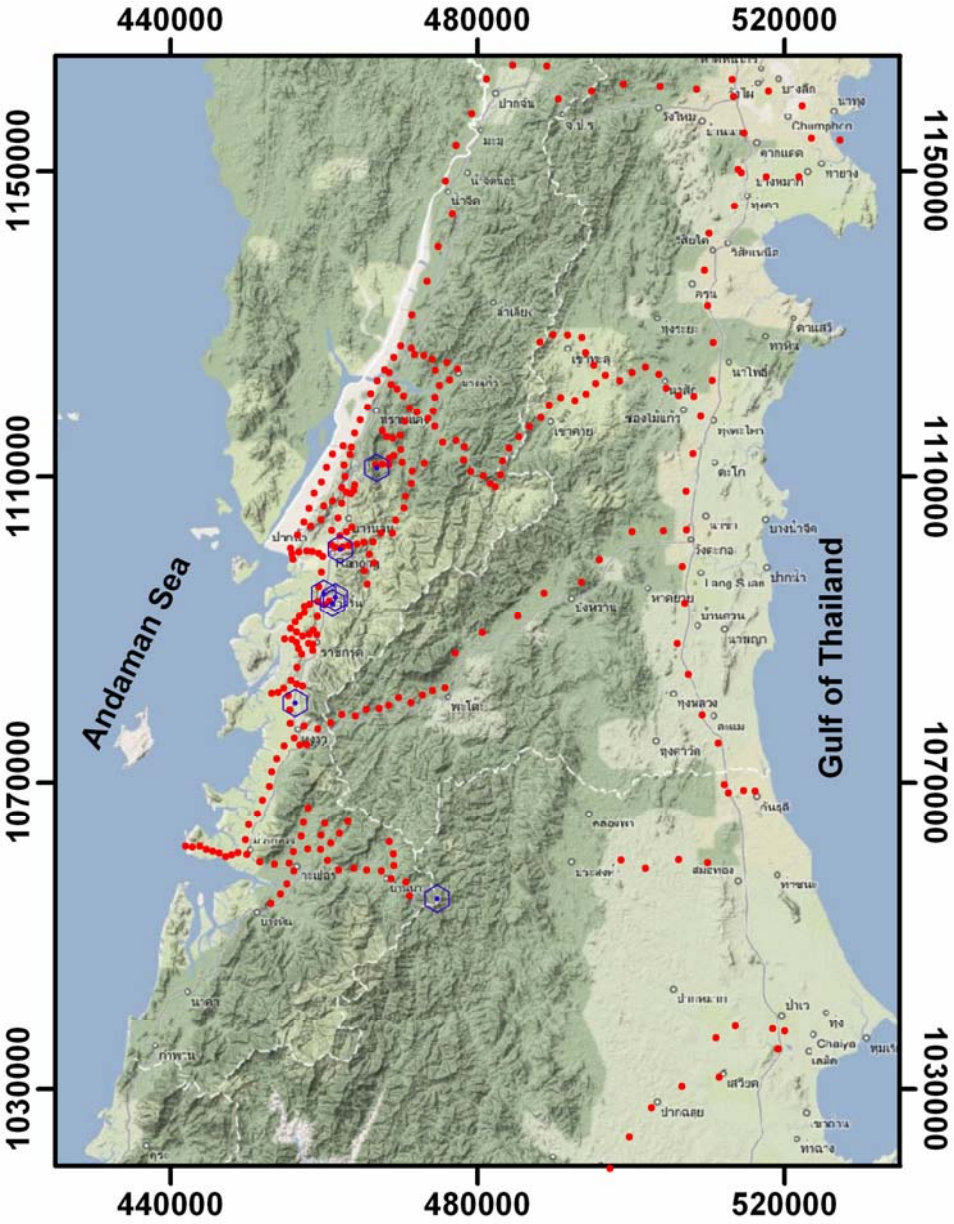
โซน	r_1(m)	r_2(m)	n
B	2.0	16.6	4
C	16.6	53.5	6
D	53.5	170.1	6
E	170.1	390.1	8
F	390.1	894.8	8
G	894.8	1529.4	12
H	1529.4	2614.4	12
I	2614.4	4468.8	12
J	4468.8	6652.2	16



ภาพประกอบ2.7 แผนภูมิแฮมเมอร์สำหรับการปรับแก้ภูมิประเทศในโซน F ถึง J



ภาพประกอบ 2.8 ตัวอย่างวงรอบของการวัดค่าความถ่วงและความสูง ในวงรอบที่ 1, 2,และ 3 โดยใช้เวลาวงรอบละประมาณ 3 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 2.9 ตำแหน่งจุดวัดค่าสนามโน้มถ่วงจำนวน 292 จุดวัด โดย # แทนตำแหน่งวัดค่าสนามโน้มถ่วง

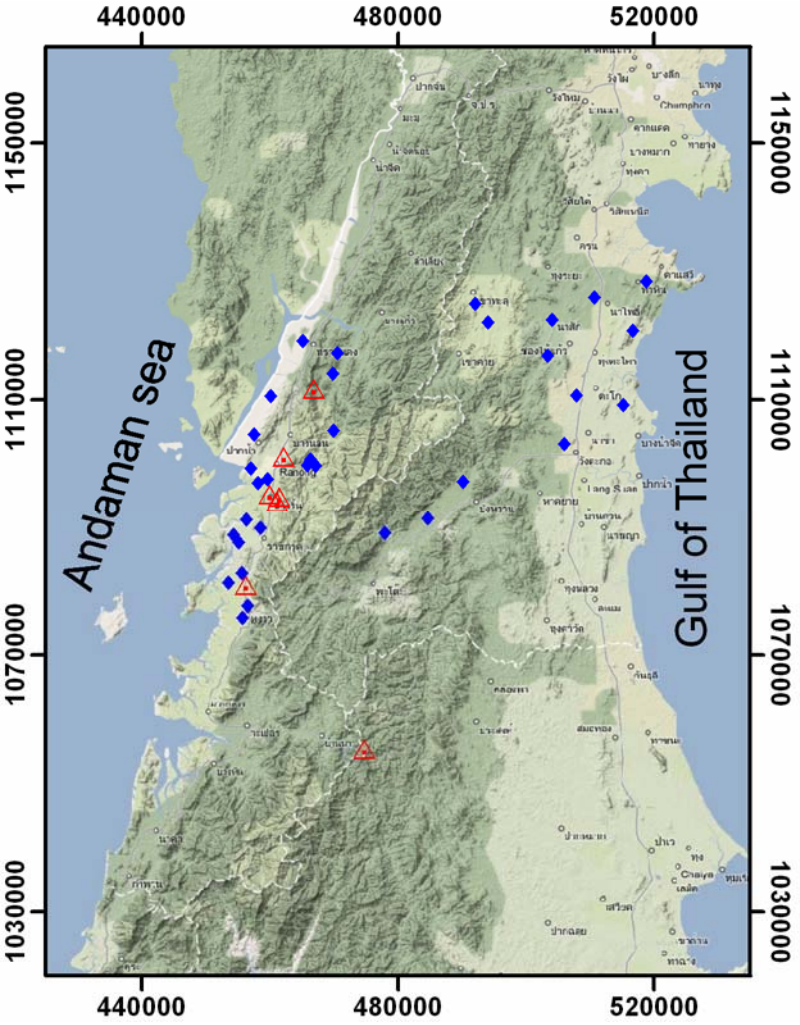
2.4.1.2 วิธีการดำเนินการวิจัยในภาคสนามของการศึกษาวิจัยด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

2.4.1.2.1 กำหนดจุดวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ในพื้นที่ศึกษาวิจัยดังภาพประกอบ 2.10

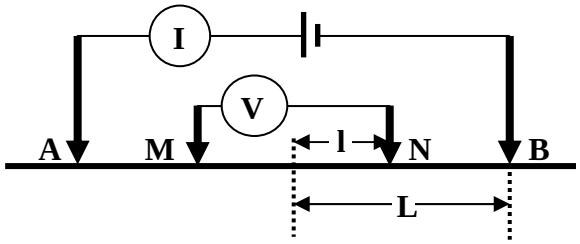
2.4.1.2.2 จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์ (Schlumberger configuration) ดังภาพประกอบ 2.11

2.4.1.2.3 กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้า MN และขั้วกระแสไฟฟ้า AB ดังตาราง 2.2

2.4.1.2.3 ปล่อยกระแสไฟฟ้า แล้วทำบันทึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่อง SAS1000



ภาพประกอบ 2.10 ตำแหน่งจุดวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจำนวน 32 จุด ถูกแทนด้วย ♦



ภาพประกอบ 2.11 รูปแบบการจัดวางรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์

ตาราง 2.4 ระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้า MN และขั้วกระแสไฟฟ้า AB ของการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์

Survey no.001		**Location E456367 N1091144**				**Date: March 9, 2007**		
Line no.		**Operator**				**Time: 9.15h**		
Electrode spacing in meters		**TERRAMETER Reading in Ohms**		**K**	**Calculated Apparent Res. in Ohm-Meters**			**Comments**
$C_1C_2/2$ AB/2	**$P_1P_2/2$ (MN/2)**	**R_1**	**R_2**		**ρ_1**	**ρ_2**	**ρ_{ave}**	
1.5	**0.5**			**6.283**				
2.0	**0.5**			**11.781**				
3.0	**0.5**			**27.488**				
4.5	**0.5**			**62.831**				
7.0	**0.5**			**153.153**				
7.0	**2.0**			**35.342**				
10.0	**0.5**			**313.374**				
10.0	**2.0**			**75.398**				
15.0	**2.0**			**173.573**				
20.0	**2.0**			**311.018**				
20.0	**6.0**			**95.295**				
30.0	**6.0**			**226.195**				
45.0	**6.0**			**520.719**				
45.0	**10.0**			**302.378**				
60.0	**10.0**			**549.779**				
60.0	**20.0**			**251.327**				
90.0	**20.0**			**604.757**				
90.0	**30.0**			**376.991**				
150.0	**30.0**			**1130.970**				
150.0	**50.0**			**628.319**				
225.0	**50.0**			**1511.890**				
225.0	**30.0**			**2603.590**				
350.0	**50.0**			**3769.910**				

2.4.2 วิธีการดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

2.4.2.1 การวัดค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหิน

ค่าความหนาแน่นของหินมีความสำคัญต่อการปรับแก้บูแกร์และการนำไปใช้สำหรับการแปลความข้อมูลความโน้มถ่วงซึ่งค่าความหนาแน่นของหินสามารถกำหนดได้โดยการวัดบนตัวอย่างหินโดยตรง โดยตัวอย่างหินจะถูกชั่งในอากาศและในน้ำ ค่าความแตกต่างของน้ำหนักจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรของตัวอย่างหินทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของหินได้ โดยมีขั้นตอนของการศึกษา ดังต่อไปนี้

2.4.2.1.1 ย่อยตัวอย่างหินให้มีขนาดไม่เกิน 3000 กรัม ทำความสะอาดให้เศษหินและฝุ่นที่เกาะติดอยู่ภายนอกตัวอย่างหินหลุดออกไป

2.4.2.1.2 นำเครื่องชั่งน้ำหนักวางบนโต๊ะที่มีความแข็งแรงและพื้นโต๊ะราบเรียบ ปรับให้ได้ระดับแล้วทำการชั่งมวลของตัวอย่างหินในอากาศโดยบันทึกค่าเป็น M_1

2.4.2.1.3 นำตัวอย่างหินที่ผ่านขั้นตอนข้อ 2.4.2.1.1 แล้ว มาแช่ให้จมน้ำในภาชนะตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน เมื่อครบกำหนดแล้วนำมาชั่งในน้ำ โดยที่ใช้แขนพิเศษและตะแกรงซึ่งดัดแปลงให้ชั่งในน้ำได้ ค่าที่ได้จะบันทึกเป็น M_2

2.4.2.1.4 นำผลที่ได้ในข้อ 2.4.2.1.2 และข้อ 2.4.2.1.3 มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังสมการ

$$\rho_d = (M_1/M_1-M_2)\times\rho_W \qquad (2.1)$$

เมื่อ

ρ_d คือ ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหิน มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

ρ_W คือ ความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ในการชั่งตัวอย่างหินในน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

M_1 คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

M_2 คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ชั่งในน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

2.4.2.2 การคำนวณความสูงที่ได้จากมาตรระดับความสูงชนิดความดัน

เนื่องจากมาตรระดับความสูง (altimeter) อาศัยหลักการของบาโรมิเตอร์ กล่าวคือระดับความสูงจะแปรผกผันกับความกดดันของบรรยากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความกดดันของบรรยากาศแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิด้วย ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากมาตรระดับความสูงจึงจำเป็นต้องได้รับการปรับแก้อิทธิพลของอุณหภูมิ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

2.4.2.2.1 เปลี่ยนเปลี่ยนรูปแบบเวลาที่ใช้ในการวัดจาก ชั่วโมง: นาที เป็น ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น ทำการระดับความสูง ณ เวลา 9: 30 น. ต้องเปลี่ยนรูปแบบเวลาเป็น 9.50 ชั่วโมง

2.4.2.2.2 ปรับแก้อิทธิพลของอุณภูมิที่มีต่อความแตกต่างของความสูงของจุดวัดที่ n กับจุดวัดที่ n-1 โดยอาศัยสมการ 2.2

$$\Delta h_n = \left(\mathrm{h}_{\mathrm{n}} - h_{n-1}\right)\left[\left(1+0.0036\right)\times\left(\frac{\mathrm{Temp}_{\mathrm{n}} + \mathrm{Temp}_{\mathrm{n\text{-}1}}}{2}\right)-10\right] \qquad (2.2)$$

เมื่อ

n คือ ลำดับของจุดวัด โดย n = 1, 2, 3…

Δh คือ ผลต่างของความสูงระหว่างจุดวัดที่ n เทียบกับจุดวัดที่ n-1 หลังการปรับแก้อิทธิพลของอุณหภูมิแล้ว

$\mathrm{h_n}$, $\mathrm{h_{n\text{-}1}}$ คือ ความสูงที่ตำแหน่งจุดวัดที่ n และจุดวัดที่ $n-1$ ที่อ่านได้จากมาตรวัดระดับ

$Temp_n$, คือ อุณหภูมิของอากาศขณะทำการวัดที่จุด n มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)

$Temp_{n-1}$ คือ อุณหภูมิของอากาศขณะทำการวัดที่จุด $n-1$ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)

2.4.2.2.3 คำนวณค่าความสูงสัมพัทธ์ของทุกจุดวัดเทียบกับจุดวัดเริ่มต้นของแต่ละวงรอบ ด้วยสมการ (2.3) ซึ่งในแต่ละวงรอบกำหนดให้ความสูงสัมพัทธ์ของจุดวัดเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$$Corh_n = Corh_{n-1} + \Delta h_n \qquad (2.3)$$

เมื่อ

n คือ ลำดับของจุดวัดในวงรอบของการวัด โดย n = 1, 2, 3…

$Corh_n$ คือ ความสูงของจุดวัดที่ n เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเริ่มต้น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$Corh_{n-1}$ คือ ความสูงของจุดวัดที่ $n-1$ เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงเริ่มต้น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

Δh_n คือ ค่าความสูงที่ปรับเทียบอุณหภูมิมีหน่วยเป็นเมตร (m)

2.4.2.2.4 ปรับแก้อิทธิพลของดริฟท์ หรืออิทธิพลของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสูงที่อ่านได้ตามเวลา คำนวณได้จากสมการ (2.4) ดังนี้

$$Drift = \left(\frac{corh_E - corh_B + Dr}{t_E - t_B} \right) \qquad (2.4)$$

เมื่อ

$Drift$ คือ ค่าดริฟท์ของวงรอบการวัด มีหน่วยเป็นเมตรต่อชั่วโมง (m/hr)

$corh_B$ คือ ค่าความสูงสัมบูรณ์ของจุดวัดอ้างอิงแรกของวงรอบ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$corh_E$ คือ ค่าความสูงสัมพัทธ์ของจุดวัดอ้างอิงสุดท้ายของวงรอบ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

Dr คือ ค่าความแตกต่างของความสูงสัมบูรณ์ของจุดวัดอ้างอิงแรกกับจุดวัดอ้างอิงสุดท้ายวงรอบ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

t_E , t_B คือ เวลาที่ทำการวัดค่าความสูงของจุดวัดอ้างอิงแรกและจุดอ้างอิงสุดท้ายของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

2.4.2.2.5 ปรับแก้อิทธิพลของดริฟท์ที่ทุกๆจุดวัด โดยใช้สมการ (2.5)

$$hobs_n = corh_n - \left(Drift \times \left(t_n - t_B\right)\right) \qquad (2.5)$$

เมื่อ

n คือ ลำดับของการวัด โดย n = 1, 2, 3…

$hobs_n$ คือ ค่าความสูงสัมพัทธ์ของจุดวัดหลังปรับแก้อิทธิพลของดริฟท์แล้ว มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$corh_n$ คือ ค่าความสูงสัมพัทธ์ของจุดวัดก่อนการปรับแก้อิทธิพลของดริฟท์ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

t_n , t_B คือ เวลาที่ทำการวัดค่าความสูงของจุดวัดที่ n และจุดวัดอ้างอิงแรกของวงรอบ ตามลำดับ มีหน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

ตาราง 2.5 ตัวอย่างการปรับแก้ความสูงที่ได้จากมาตรวัดระดับ

Stn	t (hr:min)	t (hr)	h (m)	Temp (°C)	h_n-h_{n-1} (m)	Δh_n (m)	$Corh_n$ (m)	$hobs_n$ (m)	Drift
E001	11:35	11.58	150.00	36			0	0	1.973
E002	12:05	12.08	147.50	31	-2.50	-2.71	-2.71	-3.69	
E003	12:28	12.47	150.50	30.5	3.00	3.22	0.51	-1.23	
E004	12:42	12.70	149.40	31	-1.10	-1.18	-0.67	-2.87	
E005	12:58	12.97	154.50	31	5.10	5.48	4.82	2.08	
E006	13:12	13.20	153.50	30	-1.00	-1.07	3.74	0.55	
E007	13:27	13.45	158.50	29	5.00	5.35	9.09	5.41	
E008	13:46	13.77	157.00	27	-1.50	-1.59	7.49	3.19	
E001	13:59	13.98	154.40	27	-2.60	-2.76	4.74	0	

2.4.2.3 การคำนวณและวิเคราะห์ค่าโน้มถ่วง

2.4.2.3.1 การปรับแก้ดริฟท์ (drift correction)

โดยปกติค่าโน้มถ่วงที่อ่านได้จากเครื่องแกรวิมิเตอร์ที่นำไปใช้ในที่ต่างๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วนำกลับมาวัดค่าโน้มถ่วง ณ ตำแหน่งเดิม หรือแม้แต่ทิ้งแกรวิมิเตอร์ไว้ ณ ที่เดิมตลอดเวลา ค่าโน้มถ่วงที่อ่านได้จากเครื่องแกรวิมิเตอร์จะมีค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของค่าโน้มถ่วงเมื่อเวลาผ่านไปนี้เรียกว่า ดริฟท์ (drift) ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ ประการแรก การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเครื่องมือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การยืดของสปริงหรือการกระแทกในขณะการขนย้ายเมื่อไม่ได้ยึดกลไกต่างๆ ของแกรวิมิเตอร์ ประการที่สอง อิทธิพลของแรงดึงดูดระหว่างโลกและดวงจันทร์ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่และการหมุนรอบตัวเองของโลกเทียบกับดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ วิธีการแก้ไขเพื่อปรับลดอิทธิพลของดริฟท์ ที่มีผลต่อค่าโน้มถ่วงทำได้เช่นเดียวกับการปรับแก้ดริฟท์ความสูง กล่าวคือการกลับมาอ่านค่าโน้มถ่วงที่สถานีฐานทุกๆ ช่วงเวลาหนึ่ง ในการศึกษานี้กำหนดคาบของการกลับมาวัด ณ สถานีฐานทุกๆ 2-3 ชั่วโมงเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าโน้มถ่วงต่อหน่วยเวลา (ชั่วโมง) มีขั้นตอนดังนี้

2.4.2.3.1.1 เปลี่ยนรูปแบบเวลาที่ใช้ในการวัดจาก ชั่วโมง: นาที เป็น ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น ทำการวัดค่าสนามโน้มถ่วง ณ เวลา 9: 30 น. ต้องเปลี่ยนรูปแบบเวลาเป็น 9.50 ชั่วโมง

2.4.2.3.1.2 นำค่าที่อ่านได้จากตัวนับ (count) ของแกรวิมิเตอร์ (gravimeter) คูณด้วยตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ของเครื่องแกรวิมิเตอร์ เพื่อเปลี่ยนเป็นค่าสนามโน้มถ่วงในหน่วยมิลลิเกล (mgal) สำหรับทุกๆ จุด โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g_n = \{(g_{read} - A) \times B\} + C \qquad (2.6)$$

เมื่อ

n	คือ รหัสสถานีวัดค่าโน้มถ่วง 001 ถึง 292
g_n	คือ ค่าโน้มถ่วง มีหน่วยเป็นมิลลิเกล(10^{-5} m/s^2)
g_{read}	คือ ค่าที่อ่านได้จากตัวนับบนแกรวิมิเตอร์
A	คือ ค่าเฉพาะในช่วงการอ่านของแกรวิมิเตอร์ลาคอสท์และรอมเบิร์ก หมายเลข G-565
B, C	คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับค่าของ A ในตารางปรับเทียบ

ตารางประกอบ 2.6 ตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ของแกรวิตีมิเตอร์แบบลาคอสท์และรอมเบิร์ก หมายเลข G-565

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

2.4.2.3.1.3 จากข้อ 2.4.2.3.1.1.2 และ 2.4.2.3.1.1.2 นำมาคำนวนหาค่าดริฟท์ โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Drift} = \frac{(g_E - g_B)}{t_E - t_B} + \text{Dr} \qquad (2.7)$$

เมื่อ

Drift คือ ค่าดริฟท์ของการวัดในวงรอบนี้ มีหน่วยเป็นมิลลิเกลต่อชั่วโมง (mgal/hr)

g_B คือ ค่าโน้มถ่วงของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นวัด มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

g_E คือ ค่าโน้มถ่วงของจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัด มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

Dr คือ ค่าความแตกต่างของค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นกับจุดอ้างอิงที่สิ้นสุดการวัดของวงรอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

T_B, T_E คือ เวลาของการวัดค่าโน้มถ่วงของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นและจุดอ้างอิงสิ้นสุดการวัดของวงรอบ มีหน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

2.4.2.3.1.4 นำค่าดริฟท์ที่คำนวณได้ไปหักลบค่าโน้มถ่วงของจุดวัดใดๆ ในวงรอบเพื่อให้ได้ค่าโน้มถ่วงที่เวลาเดียวกันทั้งหมด

$$g_n^{\text{drift}} = g_n - \text{Drift} \times (T_n - T_B) \qquad (2.8)$$

เมื่อ

n คือ รหัสสถานีวัดค่าโน้มถ่วง 001 ถึง 292

g_n^{drift} คือ ค่าโน้มถ่วงที่สถานีใดๆ ที่ปรับแก้ดริฟท์แล้ว มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

g_n คือ ค่าโน้มถ่วงที่สถานีใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

T_n, T_B คือ เวลาที่จุดวัดใดๆ และจุดวัดเริ่มต้นของวงรอบตามลำดับ มีหน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

2.4.2.3.1.5 คำนวนหาค่าความแตกต่างของค่าโน้มถ่วงที่ปรับแก้ดริฟท์แล้วของจุดวัดและจุดอ้างอิง แล้วมารวมกับค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิง ดังสมการ

$$g_n^{abslute} = (g_n^{drift} - g_b^{drift}) + g_b^{abslute} \qquad (2.9)$$

เมื่อ

n คือ รหัสสถานีวัดค่าโน้มถ่วง 001 ถึง 292

$g_n^{abslute}$ คือ ค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ของจุดวัดที่ n มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

$g_b^{abslute}$ คือ ค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่จุดอ้างอิง มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

g_n^{drift} คือ ค่าโน้มถ่วงที่ปรับแก้ดริฟท์ที่จุดวัดที่ n มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

g_b^{drift} คือ ค่าโน้มถ่วงที่ปรับแก้ดริฟท์ที่จุดอ้างอิง มีหน่วยเป็นมิลลิเกล (mgal)

ตารางประกอบ 2.7 ตัวอย่างตารางการปรับแก้ดริฟท์ของค่าโน้มถ่วง

Stn	Time (hh:mm)	g_{read} (count)	g_n (mgal)	Δt (min)	Drift $\times \Delta t$ (mgal)	g_n^{drift} (mgal)	Δg_n^{drift} (mgal)	$g_n^{abslute}$ (mgal)
*E001	15:15	1735.450	1767.074	0	0.000	1767.074	0.000	978176.949
E002	15:42	1733.502	1765.090	27	-0.011	1765.101	-1.974	978174.975
E003	16:00	1736.705	1768.353	45	-0.018	1768.371	1.297	978178.245
E004	16:16	1734.509	1766.116	61	-0.025	1766.140	-0.934	978176.015
E005	16:30	1734.580	1766.188	75	-0.030	1766.218	-0.856	978176.093
E006	16:45	1735.135	1766.753	90	-0.036	1766.790	-0.285	978176.664
E007	17:00	1728.575	1760.070	105	-0.042	1760.113	-6.961	978169.987
E008	17:15	1723.407	1754.806	120	-0.048	1754.854	-12.220	978164.728
E009	17:31	1725.009	1756.438	136	-0.055	1756.493	-10.582	978166.367
E010	17:46	1740.311	1772.026	151	-0.061	1772.087	5.013	978181.962
E011	18:00	1742.091	1773.840	165	-0.067	1773.906	6.832	978183.781
*E001	18:32	1735.372	1766.995	197	-0.079	1767.074	0.000	978176.949
						Drift = -0.0004 **mgal/min**		

2.4.2.3.2 การปรับแก้ละติจูด (latitude correction)

ด้วยเหตที่ค่าโน้มถ่วงของโลกมีการเปลี่ยนแปลงตามละติจูด เนื่องจากโลกมีรูปทรงกลมแบบขั้ว (Parasnis, 1986) และเนื่องจากความเร็วเชิงมุมของจุดบนผิวโลกมีค่าลดลงจากค่ามากที่สุดที่ศูนย์สูตร จนเป็นศูนย์ที่ขั้วโลก ความเร่งสู่ศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการหมุนนี้จะมีองค์ประกอบในแนวรัศมีที่เป็นลบ ทำให้ค่าโน้มถ่วงลดลงจากขั้วโลกไปยังบริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้อิทธิพลดังกล่าวโดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g_\phi = g_0 \left(1+k_1 \sin^2\phi + k_2 \sin^2 2\phi \right) \qquad (2.10)$$

เมื่อ

g_ϕ คือ ค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่ละติจูด ϕ

g_0 คือ ค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่เส้นศูนย์สูตร มีค่าเท่ากับ 9780318 กราวิตียูนิต (g.u.), 1 g.u. = 1 $\mu m/s^2$

k_1 คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.0053024

k_2 คือ ค่าคงที่เท่ากับ -0.0000059

โดยค่า g_ϕ เป็นค่าโน้มถ่วงที่คาดหมายที่จุดใดๆ ที่ระดับน้ำทะเลบนผิวโลกและจะนำไปหักลบออกจากค่าความถ่วงที่วัดได้เพื่อปรับแก้การเปลี่ยนแปลงค่าโน้มถ่วงตามละติจูด

2.4.2.3.3 การปรับแก้ฟรี-แอร์ (free-air correction)

เนื่องจากตำแหน่งต่างๆบนโลกมีลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกัน ดังนั้นสถานีวัดค่าโน้มถ่วงที่อยู่ในระดับที่ต่างกันก็เปรียบเสมือนว่าสถานีวัดนั้นอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของโลกไม่เท่ากัน ทำให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้จากทั้งสองสถานีมีค่าไม่เท่ากันทั้งๆที่การกระจายของมวลภายใต้สถานีทั้งสองนี้เหมือนกัน ดังนั้นจำเป็นที่ต้องมีการปรับแก้เพื่อลดอิทธิพลจากระดับความสูงต่ำของตำแหน่งสถานีวัดค่าโน้มถ่วงเพื่อให้ค่าโน้มที่วัดได้จากสองตำแหน่งนี้มีค่าเท่ากัน ยกเว้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลใต้ผิวดินระหว่างสถานีทั้งสองเนื่องจากค่าโน้มถ่วงแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางจากศูนย์กลางของโลก นั้นคือ $g \cong -GM/r^2$ เมื่อ M คือ มวลของโลก r คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางโลกมายังสถานีวัด และ G เป็นค่าคงตัวสากล ดังนั้นจุดต่างๆ ซึ่งอยู่ที่ระดับความสูงต่างกันจะมีค่าความถ่วงของจุดวัดต่างๆ ให้เป็นค่าโน้มถ่วงไม่เท่ากันจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับแก้ค่าความถ่วงของจุดวัดต่างๆ ให้เป็นค่าโน้มถ่วงที่ระดับมูลฐาน (a datum level) เดียวกัน ทั้งนี้ยังไม่คำนึงถึงมวลดินหรือมวลหินซึ่งอยู่ระหว่างจุดวัดกับระดับมูลฐานโดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังสมการ (Parasnis,1986)

$$FC = 3.072 \times h \qquad (2.11)$$

เมื่อ

FC คือ ค่าปรับแก้ฟรีแอร์ จะมีค่าเป็นบวกสำหรับจุดวัดที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็นกราวิตียูนิต (g.u.)

h คือ ค่าความสูงของจุดวัดเหนือระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตร (m)

โดยค่า FC จะมีค่าเป็นบวกสำหรับจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิงและจะมีค่าเป็นลบสำหรับจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่อยู่ต่ำกว่าระดับอ้างอิง ดังนั้นการปรับแก้ค่าโน้มถ่วงของสถานีวัดต่างๆ ทำได้โดยการบวกค่า FC เข้ากับค่าสนามโน้มถ่วงที่วัดได้ของสถานีนั้นๆ ดังสมการ

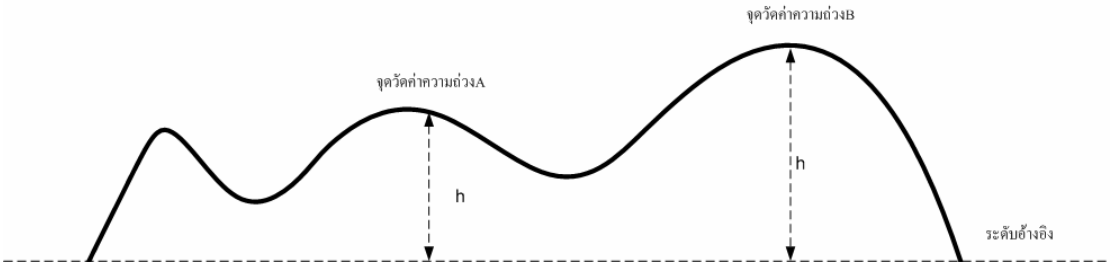
$$FA = g_{obs} - g_{\phi} \pm FC \qquad (2.12)$$

เมื่อ

FA คือ ค่าโน้มถ่วงที่ปรับแก้ฟรี-แอร์แล้ว ในหน่วยกราวิตียูนิต (g.u.)

g_{obs} คือ ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้ ณ สถานีนั้นๆ ในหน่วยกราวิตียูนิต (g.u.)

g_{ϕ} คือ ค่าโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่ละติจูดเดียวกันกับสถานีวัดนั้นๆ ในหน่วยกราวิตียูนิต (g.u.)



ภาพประกอบ2.12 การปรับแก้ฟรี-แอร์ ของจุดวัดค่าโน้มถ่วงที่ระดับความสูง h เหนือระดับอ้างอิงที่แตกต่างกันให้เสมือนว่าจุดวัดนั้นๆ วัดค่าโน้มถ่วงที่ระความสูงเดียวกัน

2.4.2.3.4 การปรับแก้บูร์แกร์ (Bouguer correction, BC)

เป็นการปรับแก้อิทธิพลโน้มถ่วงจากมวลที่มีความหนาแน่นเท่ากับ ρ ที่อยู่ระหว่างจุดวัดและระดับอ้างอิง โดยกำหนดให้มวลดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นมวลขนาดใหญ่และวางอยู่ในแนวนอนโดยมีความหนาเท่ากับ h ดังภาพประกอบ 13 ค่าปรับแก้คำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Parasnis, 1986)

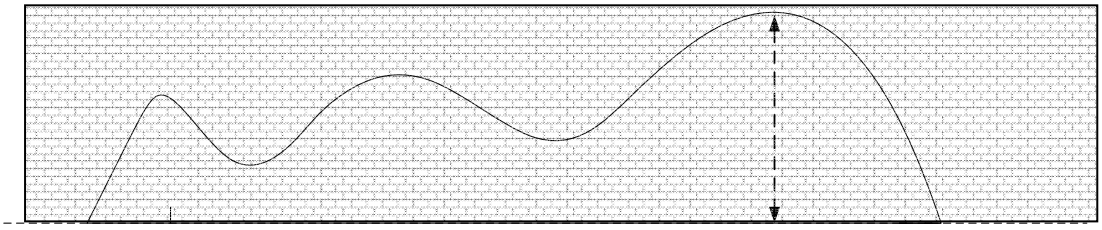
$$BC = 0.0004191 \times \rho \times h \qquad (2.13)$$

เมื่อ

BC คือ ค่าปรับแก้บูร์แกร์ มีหน่วยเป็นกราวิตียูนิต (g.u.)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของมวลหินใต้จุดวัด มีหน่วยเป็นกิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3)

h คือ ค่าระดับความสูงของจุดวัดเหนือระดับอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตร (m)



ภาพประกอบ2.13 การปรับแก้บูร์แกร์ คือการกำหนดให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้ ณ จุดวัดใดๆ มีอิทธิพลของมวลหินที่มีความหนาแน่น ρ และมีความหนาเท่ากับ h อยู่ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการค่าโน้มถ่วงที่ระดับอ้างอิงจำเป็นต้องลดอิทธิพลดังกล่าว

2.4.2.3.5 การปรับแก้ภูมิประเทศ (terrian correction, TC)

จากลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นภูเขา หรือหุบเขา ดังภาพประกอบ2.14 มีผลทำให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้จากสถานีวัดมีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะได้ เนื่องจากทางทฤษฎีกำหนดบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นมวลที่สม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติมีมวลส่วนที่เกินและขาดหายไปจากลักษณะของภูมิประเทศดังกล่าว ดั้งนั้นต้องมีการปรับแก้ค่าที่ขาดหายไปคืนกลับมาโดยมีขั้นตอนดังนี้ (วรวุฒิ โลหะวิจารณ์, 2537)

2.4.2.3.5.1 ใช้แกรติกูลวงกลม (circular graticule) ซึ่งแบ่งออกเป็นห้องๆ โดยมีรัศมีและเส้นรอบวงของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เรียกว่าแผนภูมิแฮมเมอร์ (Hammer chart) ดังภาพประกอบ 3.7 วางลงบนแผนที่ประเทศมาตราส่วน 1:50,000 โดยให้จุดศูนย์กลางของแผนภูมิอยู่ที่จุดวัด แล้วทำการประเมินค่าระดับความสูงเฉลี่ยในแต่ละห้องของแกรติคูลบันทึกลงในตารางบันทึกข้อมูล ดังตารางประกอบ 2.2 โดยมีค่ารัศมีและจำนวนห้องของแต่ละโซน ดังตารางประกอบ 2.3

2.4.2.3.5.2 คำนวณอิทธิพลด้านความถ่วงของห้องทุกห้องบนแกรติคูลดังสมการ

$$T = 0.0004191\ (\frac{\rho}{n})\left\{r_2 - r_1 + (\sqrt{r_2^2 + z^2} - \sqrt{r_1^2 + z^2}\right\} \quad (2.14)$$

เมื่อ

T คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละโซน มีหน่วยเป็นเป็นกราวิตียูนิต (g.u.)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของแผ่นมวลหินใต้จุดวัดเหนือระดับอ้างอิงมีหน่วยเป็นกิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3)

N คือ จำนวนห้องของแต่ละโซน

r_1, r_2 คือ รัศมีวงนอกและวงในของแต่ละโซน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

z คือ ค่าความสูงเฉลี่ยรวมเหนือระดับอ้างอิงของแต่ละโซน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

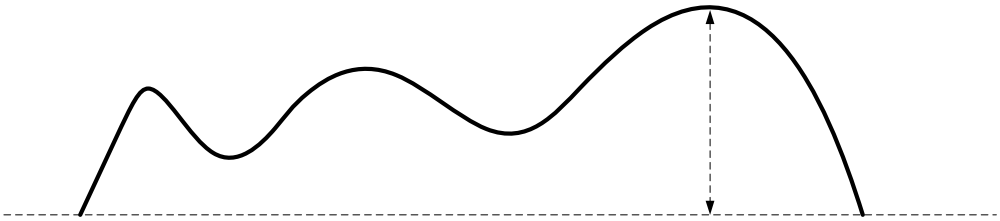
2.4.2.3.5.3 นำค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละแกรติกูลที่ได้ในข้อ 2.4.2.3.5.2 มารวมเป็นค่าปรับแก้ภูมิประเทศของจุดวัด ดังสมการ

$$TC = T_D+T_E+T_F+T_G+T_H+T_I+T_J \quad (2.15)$$

เมื่อ

TC คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของจุดวัด มีหน่วยเป็นเป็นกราวิตียูนิต (g.u.)

T_{D-J} คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศของแต่ละแกรติคูลตั้งแต่ D ถึง J มีหน่วยเป็น (g.u.)



ภาพประกอบ2.14 จากลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบทำให้มีมวลส่วนที่เกินและขาดหายไป มีผลให้ค่าโน้มถ่วงที่วัดได้จากสถานีวัดมีค่าผิดไปจากค่าที่ควรจะเป็น

2.4.2.3.6 ค่าผิดปกติบูร์แกร์ (Bouguer anomaly)

2.4.2.3.6.1 ค่าผิดปกติบูร์แกร์คือค่าโน้มถ่วงผิดปกติที่ถือว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโครงสร้างใต้ผิวดิน โดยตัดอิทธิพลต่าง ๆที่ไม่เกี่ยวของกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นหินใต้ผิวดินออกไป ไม่ว่าจะเป็นอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงละติจูด หรือความแตกต่างของระยะห่างจากจุดศูนย์กลางโลก รวมทั้งค่าปรับแก้อิทธิพลของภูมิประเทศ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$BA = g_{obs} - g_{\phi} \pm FC \mp BC + TC \qquad (2.16)$$

เมื่อ

BA	คือ ค่าผิดปกติบูร์แกร์สัมบูรณ์ เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)
g_{obs}	คือ ค่าความถ่วงสัมบูรณ์ เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)
g_{ϕ}	คือ ค่าปรับแก้ละติจูด เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)
FC	คือ ค่าปรับแก้ฟรีแอร์ เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)
BC	คือ ค่าปรับแก้บูร์แกร์ เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)
TC	คือ ค่าปรับแก้ภูมิประเทศ เป็นกราวิตียูนิต (g.u.)

2.4.2.3.7 คอนทัวร์ค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูแกร์

หลังจากได้ค่าผิดปกติบูแกร์สัมบูรณ์ของตำแหน่งวัดสนามโน้มถ่วงต่างๆ ในพื้นที่แล้ว ได้ทำการสร้างแผนที่คอนทัวร์ค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูร์แกร์ระหว่างพิกัด 425000E – 535000E และ 1020000N – 1165000N โดยใช้ข้อมูลค่าความถ่วงที่วัดได้จำนวน 292 สถานีวัดที่กระจายไปตามถนนเส้นต่างๆในพื้นที่วิจัย ทำการสร้างกริดโดยใช้ระเบียบวิธีคริกกริง (kriging method) กำหนดระยะห่างระหว่างกริดเท่ากับ 2500 เมตร ใช้รัศมีของการค้นหาข้อมูลเท่ากับ 30000 เมตร

สร้างค่าโน้มถ่วงเชิงภูมิภาคโดยการดึงข้อมูลค่าโน้มถ่วงจากตำแหน่งตรงขอบทั้งสี่ด้านของคอนทัวร์ค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูแกร์ที่สร้างไว้ก่อนหน้า ทำการสร้างกริดข้อมูลค่าโน้มถ่วงผิดปกติเชิงภูมิภาคด้วยระเบียบวิธีโพลีโนเมียล รีเกรสชั่น (Polynomial Regression) ด้วยสมการ

$$Z(X,Y) = A00 + A01\ Y + A10\ X \qquad (2.17)$$

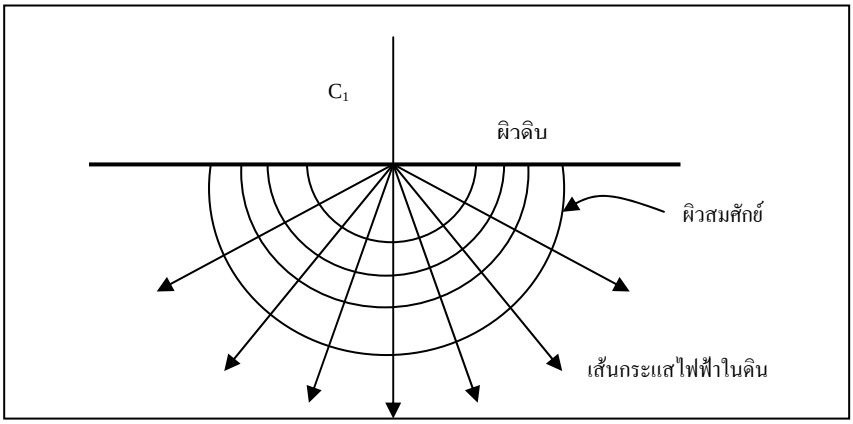
เมื่อ

A00, A01และ A10 คือ ค่าคงที่

ทำการแยกค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูแกร์เชิงตำบลโดยการนำค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูแกร์ที่ได้จากการวัดหักล้างกับค่าโน้มถ่วงเชิงภูมิภาคแบบจุดต่อจุด นำค่าโน้มถ่วงผิดปกติบูแกร์เชิงตำบลไปทำการวิเคราะห์ผลเพื่ออธิบายงานวิจัยต่อไป

2.4.2.4. การวิเคราะห์ข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นหิน

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นหินในพื้นที่ศึกษาโดยอาศัยหลักการคือ เมื่อมีขั้วไฟฟ้ากระแส C_1 อันหนึ่งปักอยู่บนผิวของชั้นดินที่มีลักษณะเอกพันธ์ (homogeneous) ที่จุด C_1 ตามภาพประกอบ โดยชั้นดินดังกล่าวมีความหนาเป็นอนันต์และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ ρ กระแสไฟฟ้าจากจุด C_1 จะแพร่ออกทิศทางในรัศมี r เนื่องจากจุด C_1 ปักอยู่ระหว่างรอยต่อของชั้นดินและอากาศ และในอากาศจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ ดังนั้นการแพร่ของกระแสไฟฟ้ารอบจุด C_1 จึงมีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกลมที่มีพื้นผิวเท่ากับ $2\pi r^2$

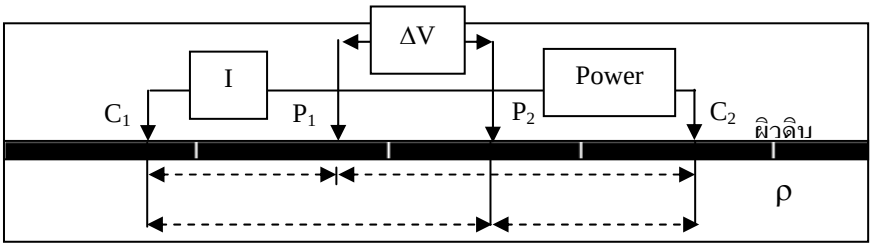


ภาพประกอบ 2.15 การแพร่ของกระแสไฟฟ้ากรณีขั้วไฟฟ้ากระแส 1 ขั้ว

จากสมการของลาปาสและกฎของโอห์ม จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้า V ที่ระยะ r ใดๆ จากจุด C_1 จะขึ้นอยู่กับ สภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน และกระแสไฟฟ้าที่ออกจากจุด C_1 เป็นดังสมการ

$$V = (I.\rho)/2\pi r \qquad (2.18)$$

ดังนั้นหากมีขั้วไฟฟ้ากระแส 2 ขั้วปักบนผิวดินตามภาพประกอบ ศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆ จะเป็นผลรวมของศักย์เนื่องจากขั้วไฟฟ้ากระแสทั้งสอง



ภาพประกอบ 2.16 ขั้วไฟฟ้ากระแส 2 ขั้วและขั้วกระแสศักย์ 2 ขั้วบนผิวดินที่มีความเอกพันธ์

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P_1 เนื่องมาจากขั้วไฟฟ้ากระแส C_1 และ C_2 ตามสมการ

$$V_{p1} = (I\rho/2\pi)(1/r_1 - 1/r_2) \qquad (2.19)$$

และศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P_2 เนื่องมาจากขั้วไฟฟ้ากระแส C_1 และ C_2 ตามสมการ

$$V_{p2} = (I\rho/2\pi)(1/r_3 - 1/r_4) \qquad (2.20)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างจุด P_1 และ P_2 จึงมีค่าตามสมการ

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = (I\rho/2\pi)((1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)) \qquad (2.21)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (Apparent resistivity) ของชั้นหินสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\rho_a = (2\pi\Delta V/ I)(1/(1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)) \qquad (2.22)$$

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้จัดขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์ ตามภาพประกอบ 11 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (ρ_a) จะมีค่าดังสมการ

$$\rho_a = \frac{\pi\left(L^2 - l^2\right)}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.23)$$

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหินจะขึ้นกับความพรุนของชั้นดินและชั้นหินนั้น และสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลายที่มีอยู่ในช่องว่างภายในชั้นดินหรือชั้นหินนั้นตามกฎของอาร์คี (Archie's Law) ดังสมการ (2.24)

$$\rho = a\phi^{-m}s^{-n}\rho_w \qquad (2.24)$$

เมื่อ

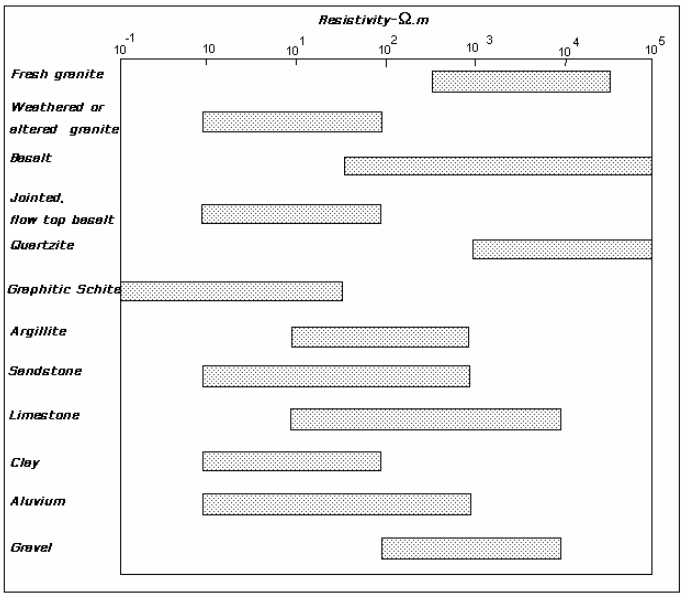
ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหิน

ϕ คือ ค่าความพรุน (porosity) คือ เศษส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรหินทั้งก้อน

ρ_w คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของสารละลายที่แทรกอยู่ในช่องว่าง

n a, m, คือ ค่าคงตัว โดย $n \approx 2$, $0.5 \leq a \leq 2.5$, และ $1.3 \leq m \leq 2.5$

เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นหินแปรผกผันกับค่าความพรุน ดังนั้นชั้นหินเนื้อแน่นและที่มีความพรุนน้อยจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นหินมีความพรุนสูงและมีสารละลายอยู่ภายในช่องว่างมาก ชั้นหินนั้นก็จะนำไฟฟ้าได้ดี ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.18



ภาพประกอบ2.17 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางทางธรณีวิทยาประเภทต่าง ๆ (ที่มา: Ward, 1990)

การประมวลผลข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและแปลความข้อมูลโดยใช้คอมพิวเตอร์ PC ร่วมกับโปรแกรม RESIST87 จุดประสงค์ในการประมวลผลและแปลความข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อกำหนดแบบจำลองของชั้นดินซึ่งประกอบด้วย จำนวนชั้นดิน สภาพต้านทานไฟฟ้า และความหนาของชั้นดิน โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.4.2.4.1 ทำการป้อนข้อมูลซึ่งได้จากการวัดการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้า ลงในโปรแกรม RESIST87 ซึ่งประกอบด้วย ค่ากึ่งหนึ่งของระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแส (AB/2) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่สัมพันธ์กัน

2.4.2.4.2 พล็อตกราฟแบบล็อก-ล็อก ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับค่ากึ่งหนึ่งของระยะระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแส หรือค่า AB/2

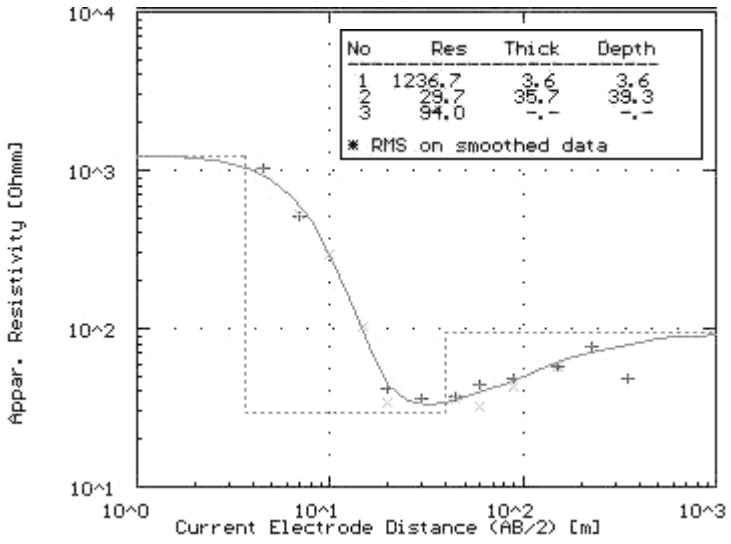
2.4.2.4.3 ป้อนแบบจำลองชั้นดินเบื้องต้นซึ่งประกอบด้วยจำนวนชั้นดิน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น ซึ่งโปรแกรม RESIST87 จะคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่สัมพันธ์กับแบบจำลองชั้นดินที่กำหนดให้

2.4.2.4.4 เปรียบเทียบกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมกับกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏจากการวัด หากกราฟทั้งสองยังไม่ซ้อนทับกัน ก็ให้ทำการปรับแก้แบบจำลองของชั้นดินจนกระทั่งกราฟทั้งสองซ้อนทับกันพอดี

เมื่อกราฟทั้งสองซ้อนทับกันพอดี จะเป็นแบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ดังภาพประกอบที่ 2.24

2.4.2.4.5 สร้างแผนที่เส้นคอนทัวร์ของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่อ่านได้ค่ากึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแสดังนี้ 1.5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 150, 225 และ350 เมตร

2.4.2.4.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองที่ได้จากการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อกำหนดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และความลึกของชั้นดินแต่ละชั้น



ภาพประกอบ 2.18 ตัวอย่างกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RESIST87 สำหรับแบบจำลองที่กำหนดให้

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนแรกเป็นผลการศึกษาเกี่ยวกับความหนาแน่นของตัวอย่างหินในพื้นที่ศึกษา ส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาเกี่ยวกับค่าสนามโน้มถ่วงตั้งแต่การแยกค่าสนามโน้มถ่วงเชิงตำบลออกจากค่าสนามโน้มถ่วงเชิงภูมิภาค การแปลความหมายค่าสนามโน้มถ่วงเชิงตำบลโดยการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา และส่วนที่สามเป็นผลการศึกษาเกี่ยวกับสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินเพื่อกำหนดลักษณะโครงสร้างของชั้นดินในระดับตื้นของพื้นที่ศึกษา

3.1 ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของหิน

ในการศึกษาค่าสนามโน้มถ่วงของโลก เราจำเป็นต้องทราบค่าความหนาแน่นของหินในพื้นที่ศึกษา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามโน้มถ่วงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของหินในแนวราบซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาใต้ผิวดินของพื้นที่ศึกษา ในงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างหินโผล่ในพื้นที่ศึกษามาวัดค่าความหนาแน่นในห้องปฏิบัติการ นอกจากนั้นการออกไปเก็บตัวอย่างหินในพื้นที่ศึกษาทำให้เราสามารถตรวจสอบตำแหน่งที่ตั้งที่ถูกต้องของหน่วยหินต่างๆได้อีกทางหนึ่งด้วย

ตัวอย่างหินซึ่งนำมาศึกษาวิจัยในในครั้งนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มหินแกรนิต กลุ่มหินปูน และ กลุ่มหินตะกอน โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

1. กลุ่มหินแกรนิต จำนวนตัวอย่างหินทั้งสิ้นในกลุ่มนี้เท่ากับ 17 ตัวอย่าง โดยมีพิสัยของค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,420 ถึง 2,710 kg/m^3 มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2,560 kg/m^3 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 80 kg/m^3

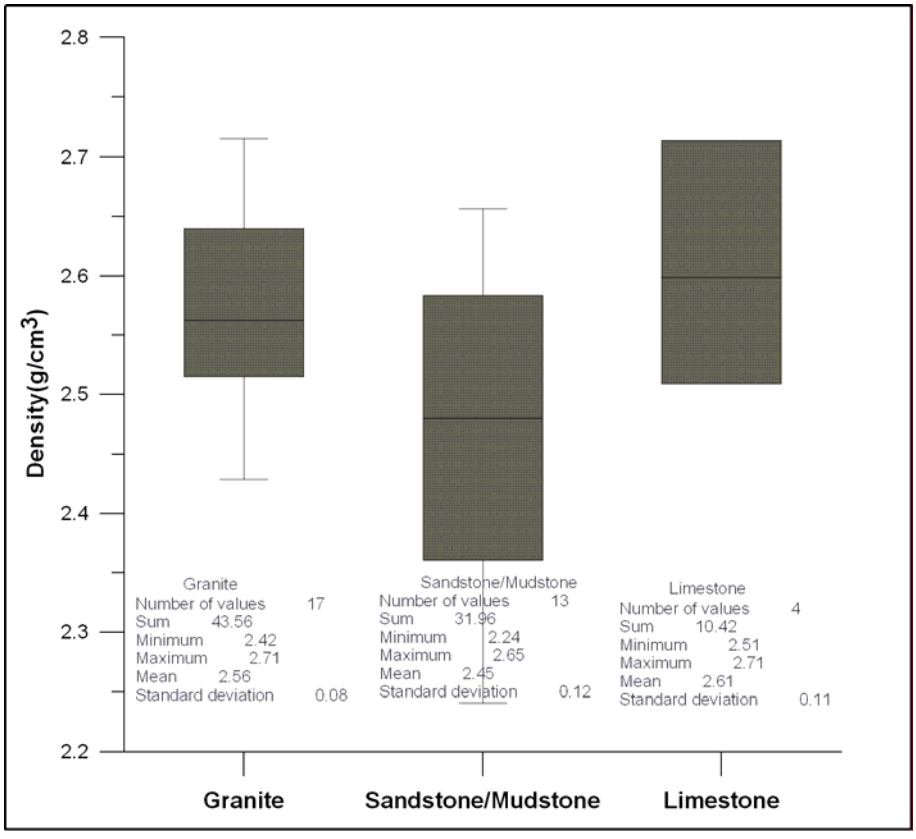
2. กลุ่มหินตะกอน ซึ่งประกอบด้วยหินทราย หินโคลน และหินดินดาน จำนวน 13 ตัวอย่าง โดยมีพิสัยของค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,240 ถึง 2,650 kg/m^3 มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2,450 kg/cm^3 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 120 kg/m^3

3. กลุ่มหินปูน จำนวนตัวอย่างหินทั้งสิ้นในกลุ่มนี้เท่ากับ 4 ตัวอย่าง ค่าความหนาแน่นของกลุ่มหินนี้แยกออกเป็นสองช่วงชัดเจนดังนี้คือ ช่วงแรกซึ่ง มีค่าระหว่าง 2,510 ถึง 2,520 kg/m^3 โดยหินตัวอย่างดังกล่าวมีลักษณะของเนื้อหินผุและเป็นรูกลวงมากจึงเป็นสาเหตุให้มีความหน่าแน่นต่ำ และช่วงที่สองซึ่งมีค่าระหว่าง 2,670 ถึง 2,720 kg/m^3 โดยเนื้อหินของตัวอย่างดังกล่าวมีลักษณะสดกว่าและเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่ได้กับค่าเฉลี่ยมาตรฐานตัวอย่างดังกล่าวน่าจะเป็นตัวอย่างที่ดี ที่จะนำค่าความหนาแน่นมาใช่ในการ

วิเคราะห์ผลสนามโน้มถ่วง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2700 kg/m^3 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 40 kg/m^3

ตาราง 3.1 ความหนาแน่นของตัวอย่างหินในพื้นที่ศึกษา

ชนิดของหิน/ยุค	พิสัยของค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	จำนวนตัวอย่าง
หินแกรนิต ยุคครีเทเชียส	2,420-2,710	2,560±80	17
หินปูน ยุคเพอร์เมียน	2,670-2,720	2,700±40	2
หินตะกอน ยุคคาร์บอนิเฟอรัส –ยุคเพอร์เมียน	2,240-2,650	2,450±120	13



ภาพประกอบ 3.1 การกระจายของค่าความหนาแน่นของหินประเภทต่าง ๆในพื้นที่ศึกษา

การศึกษาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของกลุ่มหินต่าง ๆในพื้นที่ศึกษาวิจัยปัจจุบันกับกลุ่มหินในช่วงอายุเดียวกันในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยพบว่าค่าความหนาแน่นของหินปูนยุคเพอร์เมียน หินแกรนิตยุคครีเทเชียสในพื้นที่ศึกษาวิจัยมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของหินประเภทเดียวกันในพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งอาจแสดงว่าการผุพังของหินในพื้นที่ศึกษามีอัตราสูงกว่าพื้นที่อื่นๆในภาคใต้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความหนาแน่นของหินประเภทต่าง ๆในพื้นภาคใต้

ชนิดหิน/ยุค	**ค่าความหนาแน่น(kg/m^3)**			
	พิสัยของความหนาแน่น			
	เอกชัย (2552)	สุกฤษฎิ์ (2552)	สุวิทย์ (2539)	ประยุทธ (2551)
หินทราย ยุคครีเทเชียส-จูแรสซิก	-	-	2,250 ± 180 1,840-2,710	2,560 ± 70 2,390-2,640
หินปูน ยุคเพอร์เมียน	2,700±40 2,670-2,710	2,770 ± 70 2,700-2,840	2,730 ± 60 2,650-2,820	2,710 ± 60 2,640-2,820
หินดินดาน(เนื้ออ่อน)	-	2,460 ± 50 2,410-2,510	-	2,420 ± 70 2,320-2,530
หินดินคาน(เนื้อแข็ง) ยุคคาร์บอนิเฟอรัส-ดิโวเนียน-ไซลูเรียน	-	-	2,680 ± 37 2,597-2,730	2,770 ± 50 2,730-2,860
หินดินคาน ยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน	2,450±120 2,240-2,650	-	-	-
หินปูน ยุดออร์โดวิเชียน	-	2,709 ± 5 2,704-2,714	2,685 ± 61 2,409-2,813	-
หินทราย ยุคแคมเบรียน	-	2,600 ± 60 2,540-2,660	2,732 ± 57 2,659-2,847	-
หินแกรนิต ยุคจูแรสซิก-ไทรแอสซิก	-	2,600 ± 20 2,580-2,620	2,577 ± 61 2,390-2,644	2,620 ± 70 2,590-2,660
หินแกรนิต ครีเทเชียส	2,560±80 2,420-2,710	-	-	-

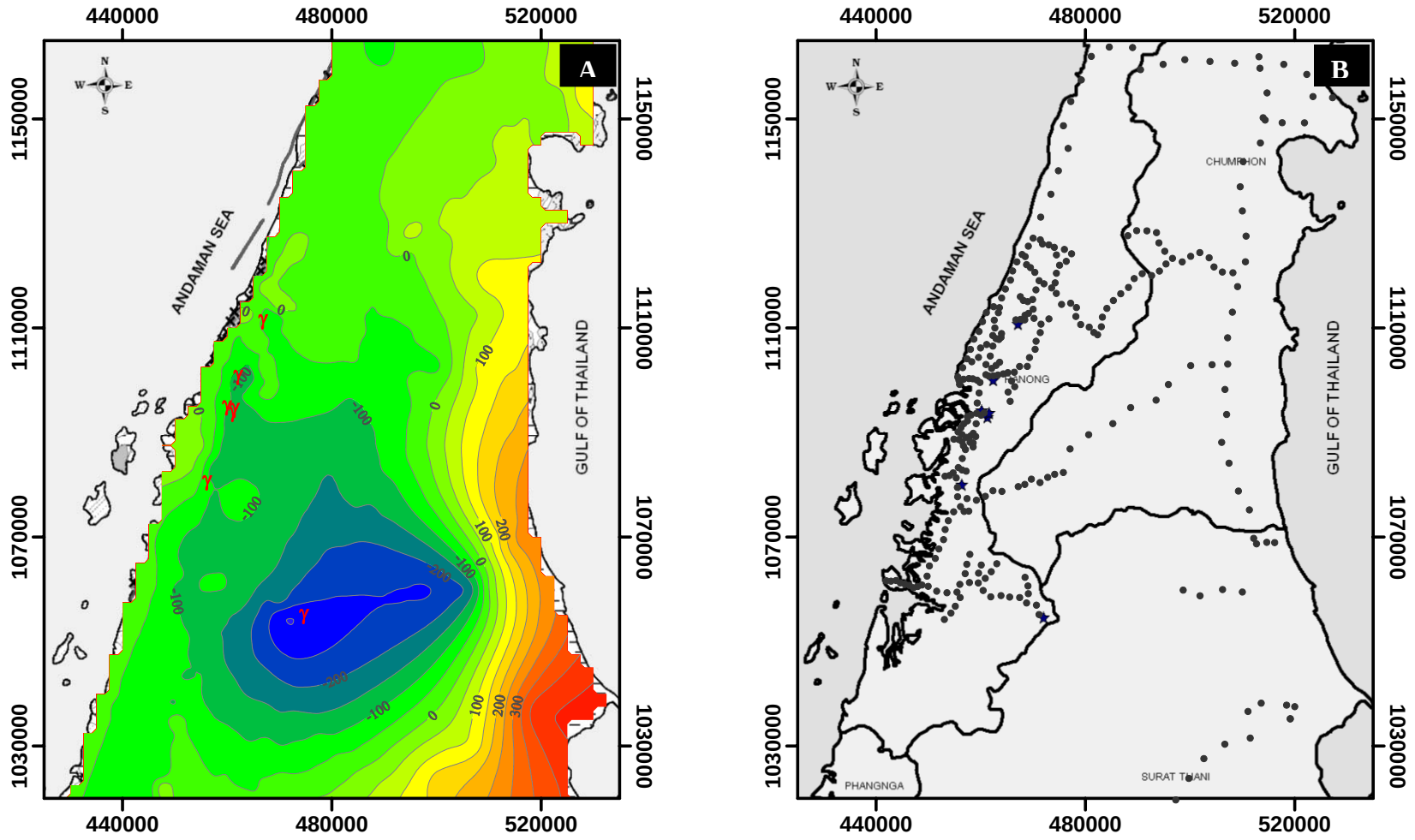
3.2 ผลการศึกษาค่าสนามโน้มถ่วง

แผนที่คอนทัวร์ค่าผิดปกติบูร์แกร์ของพื้นที่ศึกษาวิจัย แสดงไว้ดังภาพประกอบ 3.2 (A) โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากขอบด้านตะวันตกไปยังขอบด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาดังนี้ คือมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่บริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกซึ่งติดกับทะเลอันดามัน และมีค่าสูงประมาณ 300 g.u. ที่บริเวณชายฝั่งด้านตะวันออกซึ่งติดกับอ่าวไทย นอกจากนั้นยังสังเกตุพบว่าค่าผิดปกติบูร์แกร์ซึ่งมีลักษณะเป็นวงปิดและมีค่าต่ำกว่า -250 g.u. ในบริเวณตอนกลางค่อนมาทางทิศใต้ของพื้นที่วิจัย

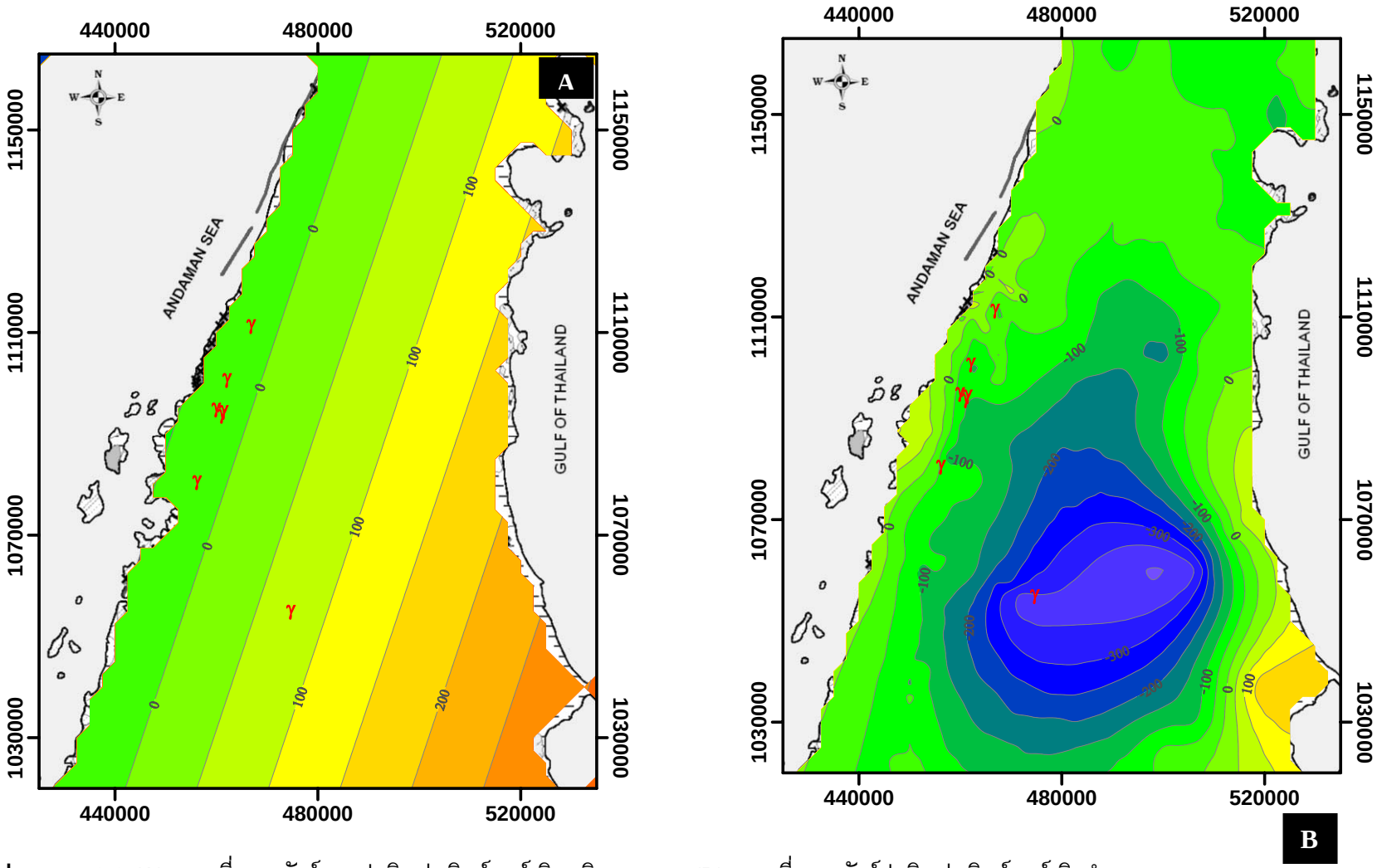
แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าผิดปกติบูร์แกร์จากชายฝั่งด้านตะวันตกไปยังชายฝั่งด้านตะวันออกในพื้นที่ศึกษาถูกพิจารณาให้เป็นอิทธิพลของค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงภูมิภาค (regional Bouguer anomaly) ของพื้นที่ศึกษา โดยแผนที่ค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงภูมิภาคดังกล่าวแสดงไว้ดังภาพประกอบ 3.3A ซึ่งแผนที่ดังกล่าวเขียนขึ้นจากสมการ $\Delta g_B(x,y) = a_0 + a_1 \cdot y + a_2 \cdot x$ เมื่อ $a_0 = -361.034593$, $a_1 = -0.001180$ และ $a_2 = 0.003540$ ที่กำหนดจากระเบียบวิธีการถดถอยเชิงโพลีโนเมียล (polynomial regression) อันดับ 1 และใช้ข้อมูลค่าผิดปกติบูร์แกร์ที่บริเวณขอบของพื้นที่ศึกษาจำนวน 8 จุดเป็นข้อมูลควบคุม ดังตาราง 3.3

ตาราง 3.3 ตำแหน่งและค่าผิดปกติบูร์แกร์ควบคุมสำหรับระเบียบวิธีการถดถอยเชิงโพลีโนเมียล

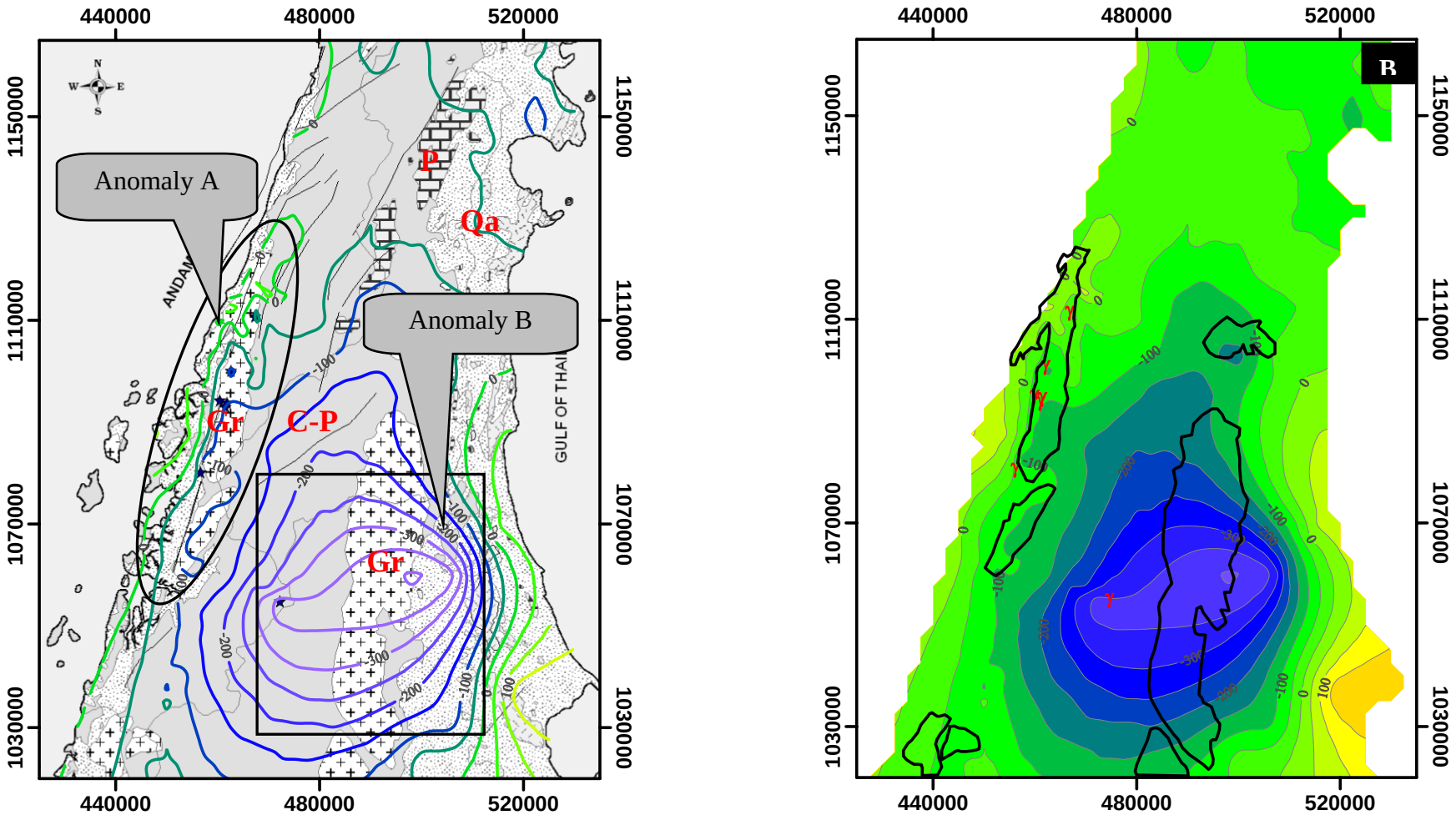
East (m)	North (m)	$\Delta g_B(g.u.)$
523010	1056371	300
514408	1020587	300
503741	1020587	200
517160	1095252	200
509246	116413	0
478623	1020931	0
454882	1095596	0
448688	1079769	0



ภาพประกอบ 3.2 (A) แผนที่คอนทัวร์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์ (B) ตำแหน่งของจุดวัดค่าสนามโน้มถ่วง โดยกำหนดให้ γ แทนแหล่งน้ำพุร้อนและ ♦ แทนจุดวัดค่าสนามโน้มถ่วง



ภาพประกอบ 3.3 (A) แผนที่คอนทัวร์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงภูมิภาค และ (B) แผนที่คอนทัวร์ค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงตำบล ที่ระยะห่างระหว่างเส้นคอนทัวร์เท่ากับ 50 g.u. (1g.u.= 1×10^{-6} m/s^2)



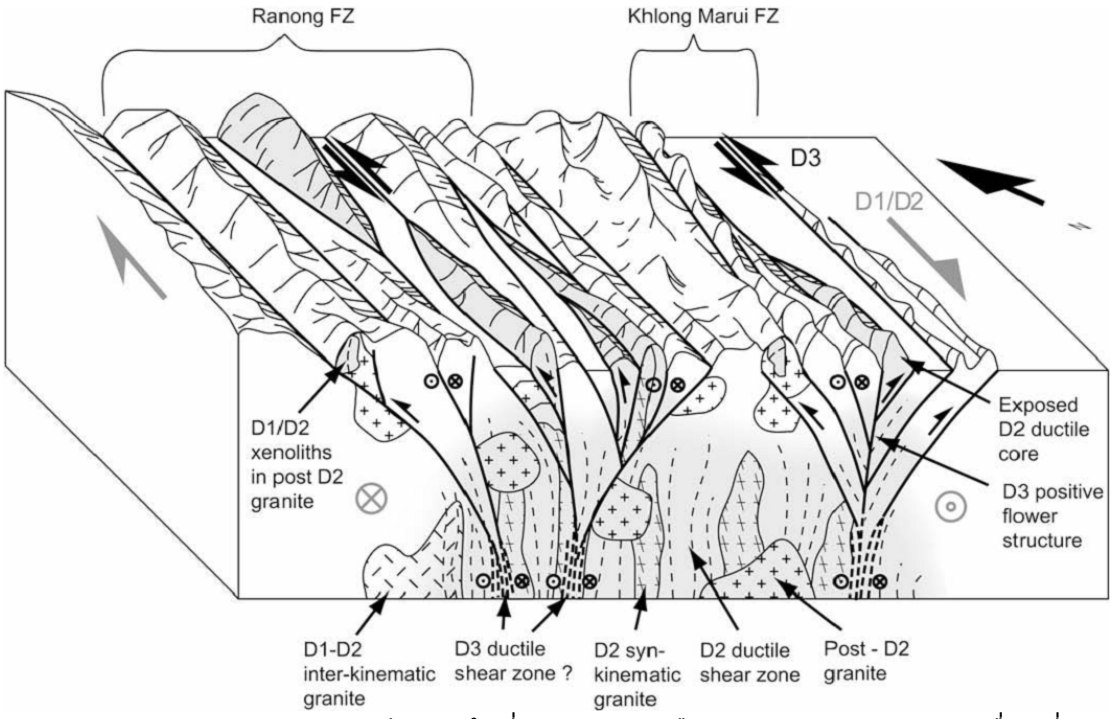
ภาพประกอบ 3.4 (A) แผนที่คอนทัวร์ค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงตำบลซ้อนทับบนแผนที่ธรณีวิทยา (B) แนวเส้นสีดำลากเพื่อแสดงหินแกรนิตที่ปรากฏในพื้นที่ศึกษาวิจัย

การวิเคราะห์ค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างเชิงคุณภาพ

แผนที่ค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้าง (residual Bouguer anomaly map) ซึ่งได้จากการนำค่าผิดปกติบูร์แกร์เชิงภูมิภาคไปหักลบออกจากค่าผิดปกติบูร์แกร์ของพื้นที่ศึกษาดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 3.3 (B) โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่เด่นจะปรากฏให้เห็น 2 บริเวณด้วยกันคือบริเวณแรกที่เรียกว่าบริเวณผิดปกติ A ในพื้นที่ด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษา โดยปรากฏเป็นแถบค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่วางตัวขนานกับชายฝั่งด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษา (ระหว่างพิกัด 1080000N ถึง 1011000N) และมียอดของค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างประมาณ -100 g.u. และบริเวณที่สองที่เรียกว่าบริเวณผิดปกติ B ในพื้นที่ตอนกลางค่อนมาทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษาซึ่งค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างมีลักษณะเป็นวงปิดและมียอดของค่าผิดปกติประมาณ -350 g.u.

บริเวณผิดปกติ A ซึ่งเป็นแถบค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่มียอดประมาณ -100 g.u. ปรากฏอยู่เหนือเทือกเขาหินแกรนิตระนองซึ่งมีอายุในยุคครีเทเชียส (ภาพประกอบ 3.4) โดยในบริเวณเทือกเขาหินแกรนิตดังกล่าวเป็นที่ตั้งของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนองจำนวน 6 แห่งด้วยกัน จากการตรวจเอกสารพบว่าหินแกรนิตมีบทบาทที่สำคัญต่อแหล่งน้ำพุร้อนส่วนใหญ่ในประเทศ เช่น เป็นช่องทางการไหลของน้ำร้อน หรือ เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับแหล่งน้ำพุร้อน และในงานศึกษาวิจัยนี้เราคาดว่าแถบค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลของมวลหินแกรนิต ซึ่งจะทำให้เราสามารถคำนวณขนาดของมวลหินแกรนิตนี้ได้

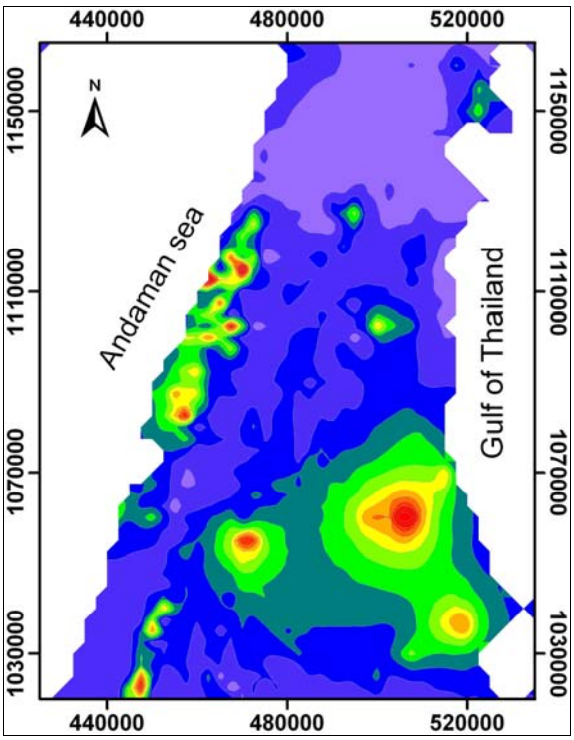
บริเวณผิดปกติ B ซึ่งค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างมีลักษณะเป็นวงปิดที่มียอดประมาณ -350 g.u. โดยเราจะสังเกตุเห็นว่าค่าผิดปกติบูร์แกร์ดังกล่าวมีรูปทรงที่แตกต่างจากรูปทรงของหมวดหินต่างๆที่ปรากฏให้เห็นบริเวณพื้นผิว (ภาพประกอบ 3.4) จึงมีความเป็นไปได้ว่าค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างดังกล่าวสัมพันธ์กับมวลผิดปกติในระดับลึกดังที่ Watkinson และคณะ, 2008 ได้ทำการศึกษาและสรุปว่าบริเวณรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย มีหินอัคนีที่เย็นตัวในช่วงเวลาที่ต่างกันและได้สร้างแบบจำลองขึ้นมาดังภาพประกอบ 3.5 และจากผลการศึกษาสนามโน้มถ่วงพบบริเวณผิดปกติ B ที่อาจเกิดจากกรณีที่มวลหินดังกล่าว เช่น หินอัคนีประเภทกรด (acid igneous rocks) ในระดับลึก หรือหินหนืด (magma) ที่แทรกตัวขึ้นมาในแผ่นพื้นทวีป เช่น แอนดิไซติกแมกมา (Andesitic magma) และไรโดไรติก แมกมา (Rhyolitic magma) มีความหนาแน่นน้อยกว่าหินท้องที่ ซึ่งการเย็นตัวของหินหนืดดังกล่าวใต้ผิวโลกก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและประพฤติตัวเป็นต้นกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณพื้นที่ศึกษาตามที่ Raksaskulwong และคณะ, 2000 ได้สรุปว่าแหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทยมีความสัมพันธ์กับหินหนืดที่มีการเย็นตัวในระดับตื้น



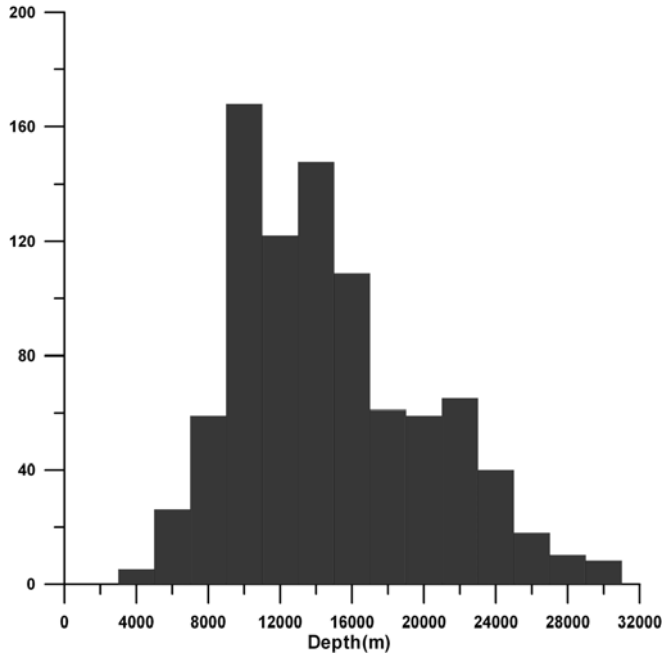
ภาพประกอบ3.5 มวลหินอัครนีระดับลึกที่เกิดจากแรงเฉือนจากอิทธผลของการเคลื่อนที่ของกลุ่มรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย (Watkinson และคณะ, 2008)

การกำหนดตำแหน่งในของมวลผิดปกติใต้ผิวดินที่ก่อให้เกิดค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างทั้งสองข้างต้นสามารถกำหนดได้ด้วยการทำการประเมินสัญญาณเชิงวิเคราะห์ (analytical signal) ดังแสดงในภาพประกอบ3.6 ซึ่งบริเวณที่สัญญาณวิเคราะห์มีแอมพลิจูดสูงแทนขอบเขตในแนวระดับของมวลผิดปกติใต้ผิวดิน

การประเมินความลึกของมวลผิดปกติใต้ผิวดินที่ก่อให้เกิดค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างทั้งสองสามารถประเมินได้ด้วยการทำการวิเคราะห์ Euler Deconvolution หรือที่เรียกว่า Grid Depth ซึ่งในการประเมินนี้เราไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับความหนาแน่นเปรียบต่าง (density contrast) ของมวลผิดปกติใต้ผิวดิน แต่จำเป็นต้องกำหนดลักษณะรูปทรงของมวลผิดปกติใต้ผิวดิน ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดรูปทรงของมวลผิดปกติเป็นวัตถุรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง (vertical cylinder) ซึ่งพบว่าความลึกของมวลผิดปกติที่ประเมินได้มีพิสัยเท่ากับ 4 ถึง 10 km โดยมีค่าความลึกตั้งแต่ประมาณ 4 km (ภาพประกอบ 3.7) ความลึกของมวลผิดปกติที่ประเมินได้นี้จะใช้เป็นตัวควบคุมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างเชิงปริมาณด้วยการสร้างแบบจำลองของมวลผิดปกติที่สัมพันธ์กับโครงสร้างธรณีวิทยาใต้ผิวดินต่อไป



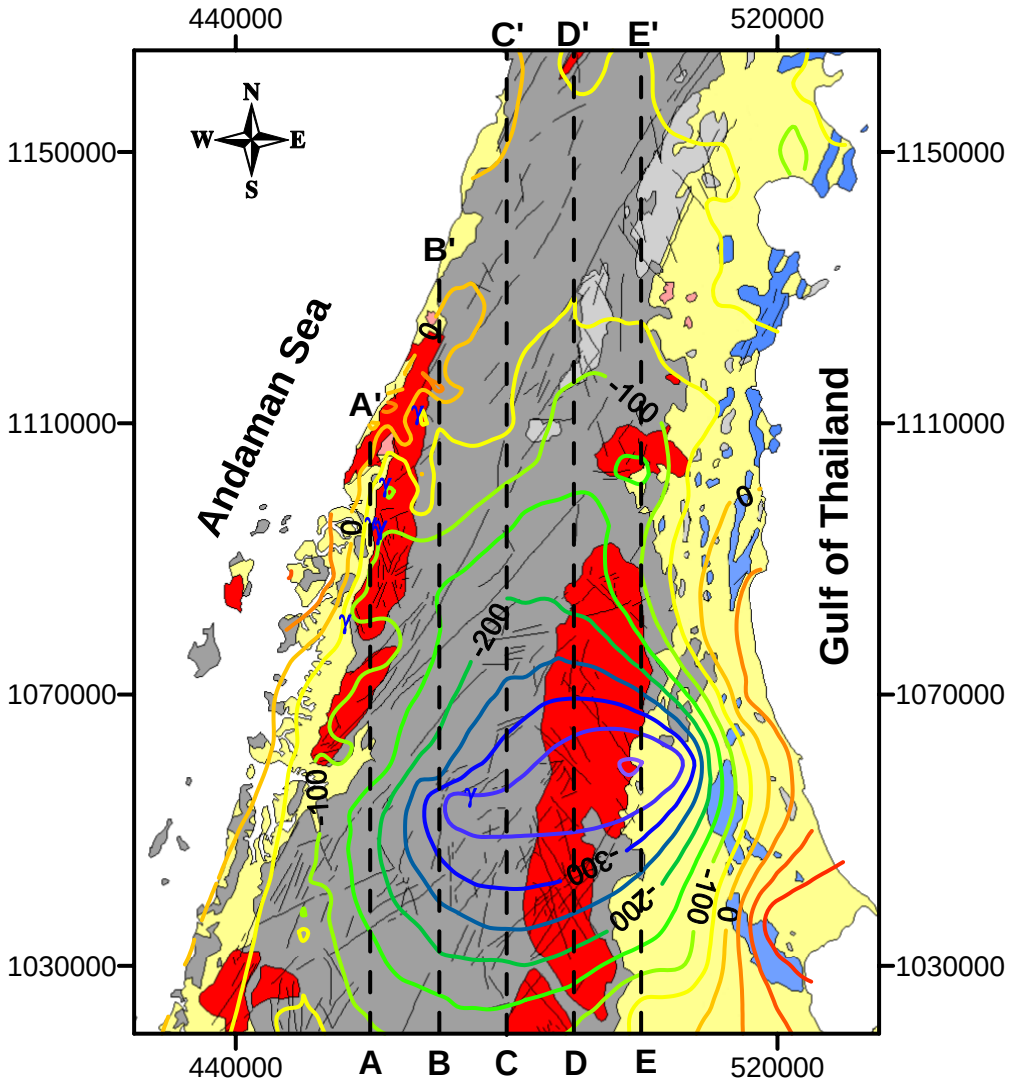
ภาพประกอบ 3.6 สัญญาณเชิงวิเคราะห์ของค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในพื้นที่ศึกษา



ภาพประกอบ 3.7 การกระจายของความลึกถึงมวลผิดปกติรูปทรงกลมในแนวตั้ง ซึ่งประเมินได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Euler Deconvolutionหรือ Grid Depth

การวิเคราะห์ค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างเชิงปริมาณ

ในการกำหนดตำแหน่ง ความลึก และทรวดทรงของมวลผิดปกติใต้ผิวดินที่ก่อให้เกิดค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างบริเวณผิดปกติ A และ B ได้เลือกการแปลความข้อมูลค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองของมวลผิดปกติแบบ 2.5D ในแนวเหนือ-ใต้ จำนวน 5 แนวคือ คือแนว A-A’ (460000E), B-B’ (470000E), C-C’ (480000E), D-D’ (490000), E-E’ (500000E) โดยมีระยะห่างระหว่างแนวเท่ากับ 10 กิโลเมตร ดังภาพประกอบ 3.7

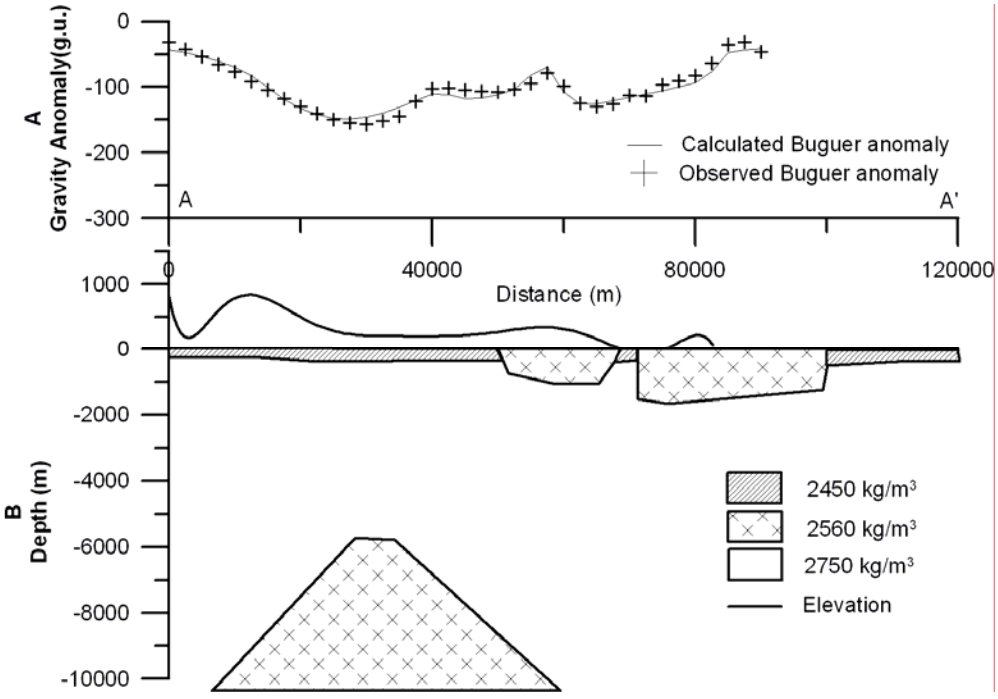


ภาพประกอบ 3. 8 แนวภาพตัดในทิศเหนือ –ใต้ บนเส้นคอนทัวร์ค่าสนามโน้มถ่วงที่มีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 50 g.u. สำหรับการสร้างแบบจำลองมวลผิดปกติใต้ผิวดิน ทั้ง 5 แนว

ภาพตัดแนว A - A′

แนว A - A′ ซึ่งวางตัวในทิศเหนือ-ใต้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษาที่พิกัด 460000E ซึ่งมีลักษณะธรณีวิทยาพื้นผิวประกอบด้วยกลุ่มหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียนและหินแกรนิตยุค ครีเทเชียส โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างจะมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่ปลายด้านใต้และด้านเหนือและมีค่าลดต่ำลงในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่าต่ำประมาณ -160 g.u.ที่ตำแหน่ง 30,000 m และประมาณ -140 g.u. ที่ตำแหน่ง 64,000 m ดังภาพประกอบ 3.8

แบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งอธิบายค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในแนว A-A'ดังกล่าว เป็นมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 แทรกตัวเข้ามาในหินท้องที่ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,750 kg/m^3 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกจะมีความกว้างครอบคลุมระหว่างตำแหน่ง 20,000 m ถึง 60,000 m ที่พิสัยความลึกเท่ากับ 5,000 m และเพื่อให้แบบจำลองมวลผิดปกติในแนวนี้สอดคล้องกับธรณีวิทยาพื้นผิวจึงได้สร้างแบบจำลองมวลหินแกรนิตระดับตื้นสองก้อน ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 โดยก้อนแรกมีความหนาประมาณ 1,000 m ที่ตำแหน่ง 50,000 ถึง 65,000 m และก้อนที่สองมีความหนาประมาณ 1,500 m ที่ตำแหน่ง 70,000 ถึง 100,000 m โดยในส่วนของหินตะกอนที่ปกคลุมพื้นที่ดังกล่าวกำหนดให้มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,450 kg/m^3 ดังภาพประกอบ 3.9

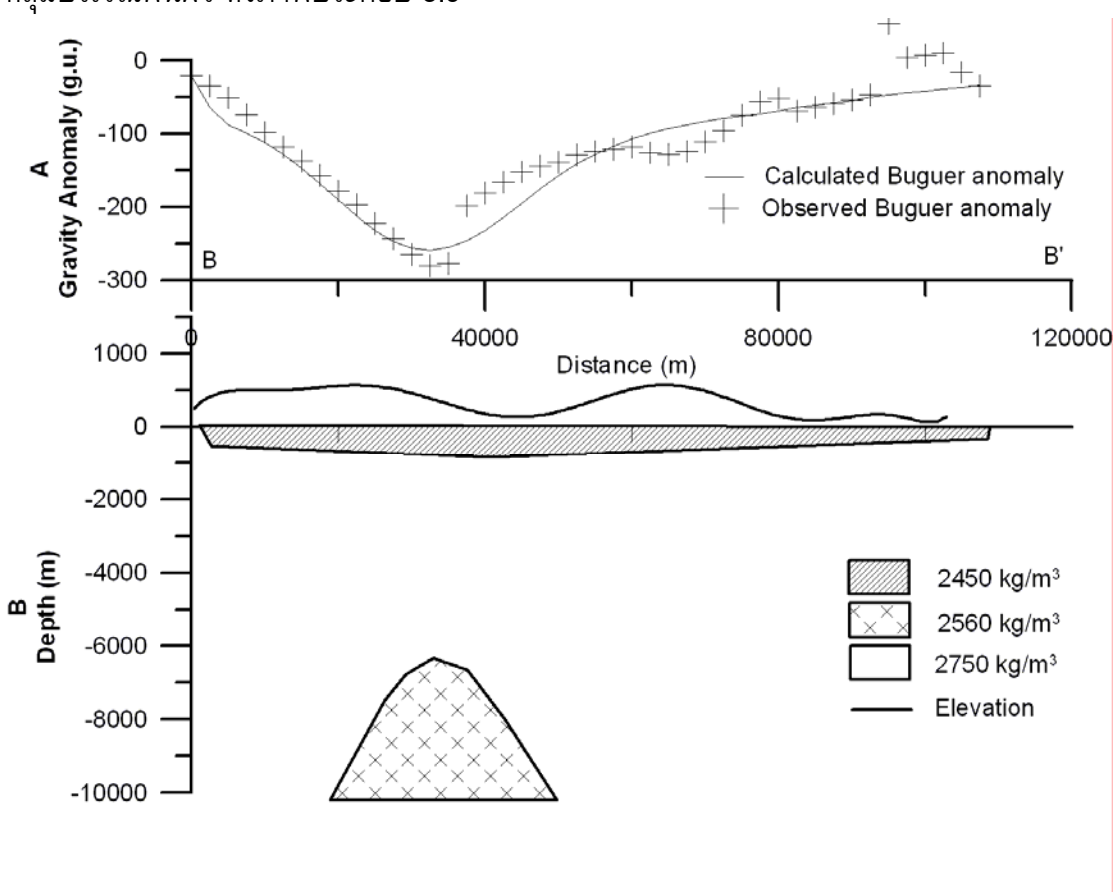


ภาพประกอบ 3.9 แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว A - A′

ภาพตัดแนว B - B′

แนว B - B′ ซึ่งวางตัวในทิศเหนือ-ใต้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษาที่พิกัด 470000E ซึ่งมีลักษณะธรณีวิทยาพื้นผิวประกอบด้วยกลุ่มหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างจะมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่ปลายด้านใต้และด้านเหนือและมีค่าลดต่ำลงในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่าต่ำประมาณ -300 g.u.ที่ตำแหน่ง 30,000 m ดังภาพประกอบ 3.9

แบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งอธิบายค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในแนว B - B′ ดังกล่าว เป็นมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 แทรกตัวเข้ามาในหินท้องที่ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,750 kg/m^3 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกจะมีความกว้างครอบคลุมระหว่างตำแหน่ง 20,000 m ถึง 50,000 m ที่พิสัยความลึกเท่ากับ 6,000 m โดยบริเวณดังกล่าวกำหนดให้หินที่มีความหนาแน่น 2,450 kg/m^3 ปกคลุมบริเวณพื้นผิว ดังภาพประกอบ 3.9

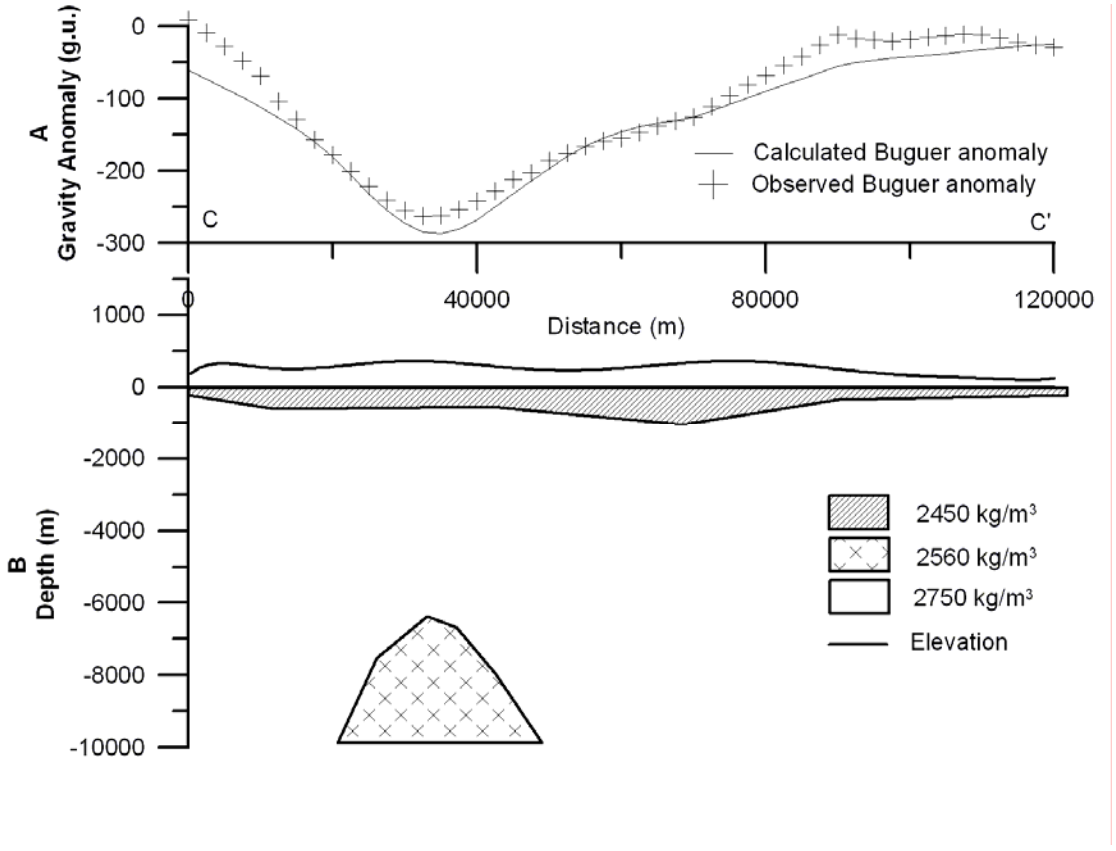


ภาพประกอบ 3.9 แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว B - B′

ภาพตัดแนว C - C′

แนว C - C′ ซึ่งวางตัวในทิศเหนือ-ใต้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษาที่พิกัด 480000E ซึ่งมีลักษณะธรณีวิทยาพื้นผิวประกอบด้วยกลุ่มหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างจะมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่ปลายด้านใต้และด้านเหนือและมีค่าลดต่ำลงในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่าต่ำประมาณ -270 g.u.ที่ตำแหน่ง 35,000 m ดังภาพประกอบ 3.10

แบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งอธิบายค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในแนว C - C′ ดังกล่าว แนวดังกล่าวถูกปกคลุมด้วยมวลหินที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,450 kg/m^3 โดยมีมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 แทรกตัวเข้ามาในหินท้องที่ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,750 kg/m^3 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกจะมีความกว้างครอบคลุมระหว่างตำแหน่ง 30,000 m ถึง 50,000 m ที่พิสัยความลึกประมาณ 6,000 m ดังภาพประกอบ 3.10

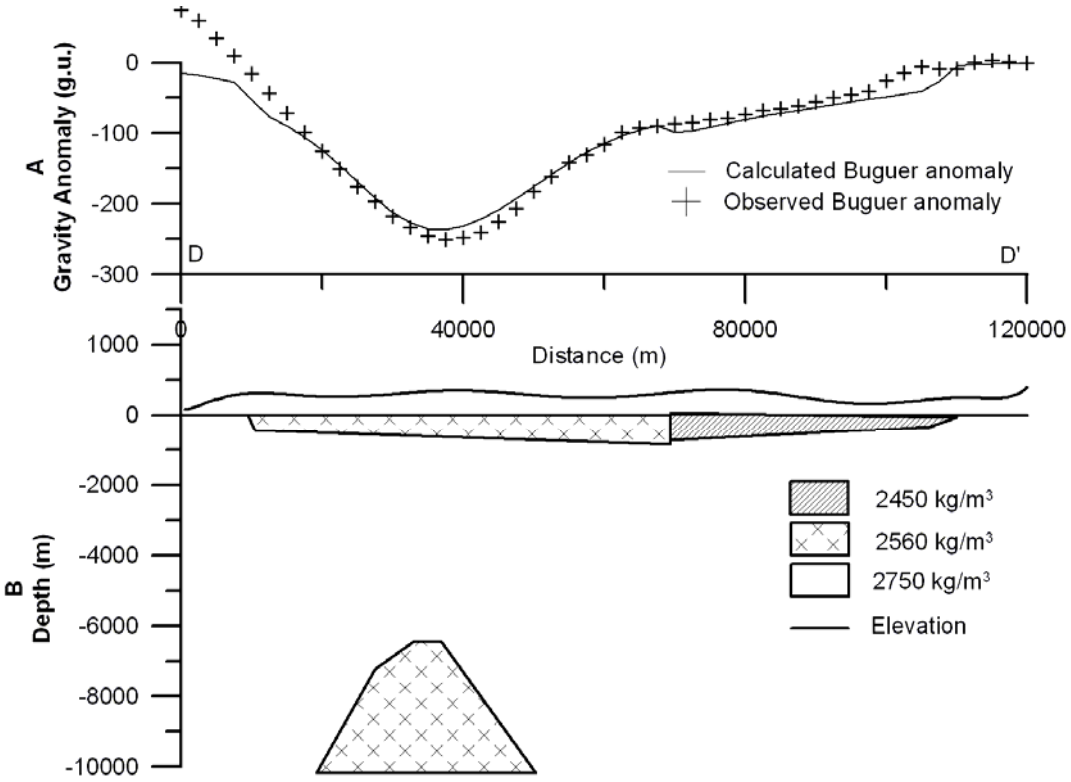


ภาพประกอบ 3.10 แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว C - C′

ภาพตัดแนว D - D′

แนว D - D′ ซึ่งวางตัวในทิศเหนือ-ใต้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษาที่พิกัด 490000E ซึ่งมีลักษณะธรณีวิทยาพื้นผิวประกอบด้วยหินแกรนิตยุคครีเทเชียสและกลุ่มหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างจะมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่ปลายด้านใต้และด้านเหนือและมีค่าลดต่ำลงในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่าต่ำประมาณ -250 g.u.ที่ตำแหน่ง 40,000 m ดังภาพประกอบ 3.11

แบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งอธิบายค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในแนว D - D′ ดังกล่าว เป็นมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 แทรกตัวเข้ามาในหินท้องที่ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,750 kg/m^3 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกจะมีความกว้างครอบคลุมระหว่างตำแหน่ง 20,000 m ถึง 50,000 m ที่ความลึกเท่ากับ 6,000 m ดังภาพประกอบ 3.11(B) และเพื่อให้แบบจำลองมวลผิดปกติในแนวนี้สอดคล้องกับธรณีวิทยาพื้นผิวจึงได้สร้างแบบจำลองมวลหินแกรนิตระดับตื้นหนึ่งก้อนที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 และมีความหนาประมาณ 1,000 ถึง 2,000 m วางไว้ที่ตำแหน่ง 10,000 ถึง 70,000 m ดังภาพประกอบ 3.11

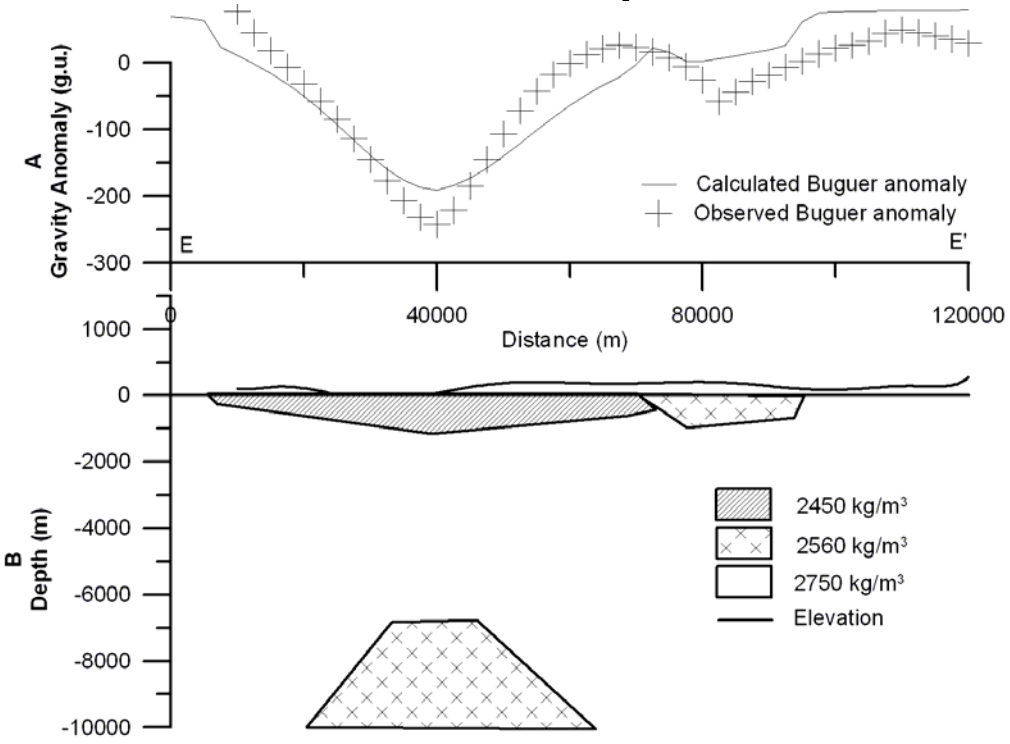


ภาพประกอบ 3.11 แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว D - D′

ภาพตัดแนว E - E′

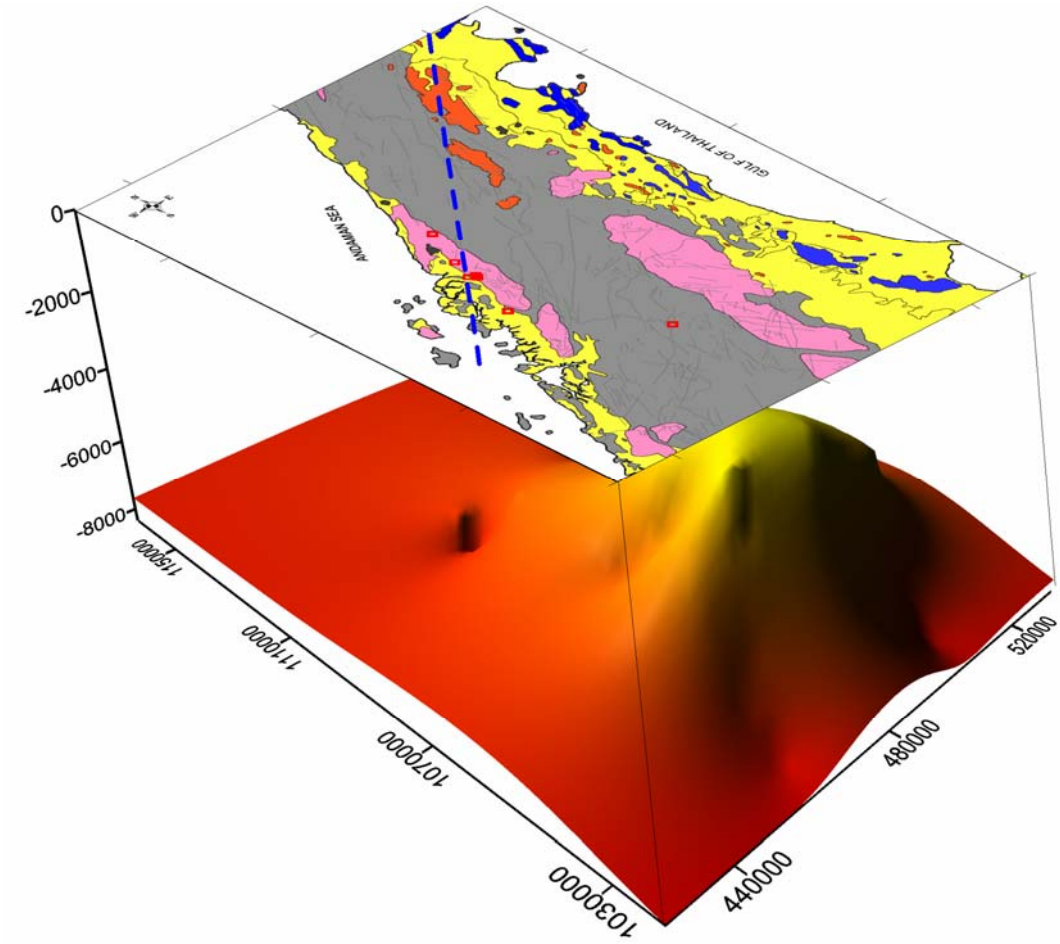
แนว E - E′ ซึ่งวางตัวในทิศเหนือ-ใต้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษาที่พิกัด 500000E ซึ่งมีลักษณะธรณีวิทยาพื้นผิวประกอบด้วยหินแกรนิตยุคครีเทเชียสและกลุ่มหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างจะมีค่าประมาณ 0 g.u. ที่ปลายด้านใต้และด้านเหนือและมีค่าลดต่ำลงในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยมีค่าต่ำประมาณ -300 g.u.ที่ตำแหน่ง 40,000 m และ -100 g.u. ที่ตำแหน่ง 80,000 m ดังภาพประกอบ 3.12(A)

แบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาซึ่งอธิบายค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างในแนว E - E′ ดังกล่าว เป็นมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 แทรกตัวเข้ามาในหินท้องที่ที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,750 kg/m^3 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกจะมีความกว้างครอบคลุมระหว่างตำแหน่ง 20,000 m ถึง 60,000 m ที่ความลึกเท่ากับ 7,000 m ดังภาพประกอบ 3.12(B) และเพื่อให้แบบจำลองมวลผิดปกติในแนวนี้สอดคล้องกับธรณีวิทยาพื้นผิวจึงได้สร้างแบบจำลองมวลหินแกรนิตระดับตื้นที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,560 kg/m^3 ในแนวนี้ โดยมีความหนาประมาณ 1,000 m วางไว้ที่ตำแหน่ง 70,000 ถึง 95,000 m โดยในช่วงตำแหน่งตั้งแต่ 0-7,000 m มีหินที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,450 kg/m^3 ปกคลุม และบริเวณตอนปลายของแนว E-E' ได้แบบจำลองที่มีความหนาแน่น 2,750 kg/m^3 ตื้นขึ้นมายังผิวดินสอดคล้องกับแนวหินปูนในบริเวณดังกล่าว



ภาพประกอบ 3.12 แบบจำลองโครงสร้างธรณีวิทยาในแนว E - E′

ภาพ 3 มิติแสดงตำแหน่งและทรวดทรงของมวลหินแกรนิตระดับลึกที่มีความหนาแน่นประมาณ 2550 kg/m^3 ซึ่งคาดว่าเป็นวัตถุต้นเหตุของค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่มีลักษณะเป็นวงปิดในบริเวณตอนกลางค่อนมาทางด้านใต้ของพื้นที่ศึกษา แสดงไว้ดังภาพประกอบ 3.13 โดยมวลหินแกรนิตระดับลึกนี้อยู่ลึกจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 3000 m และมีบทบาทที่สำคัญในการเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษา

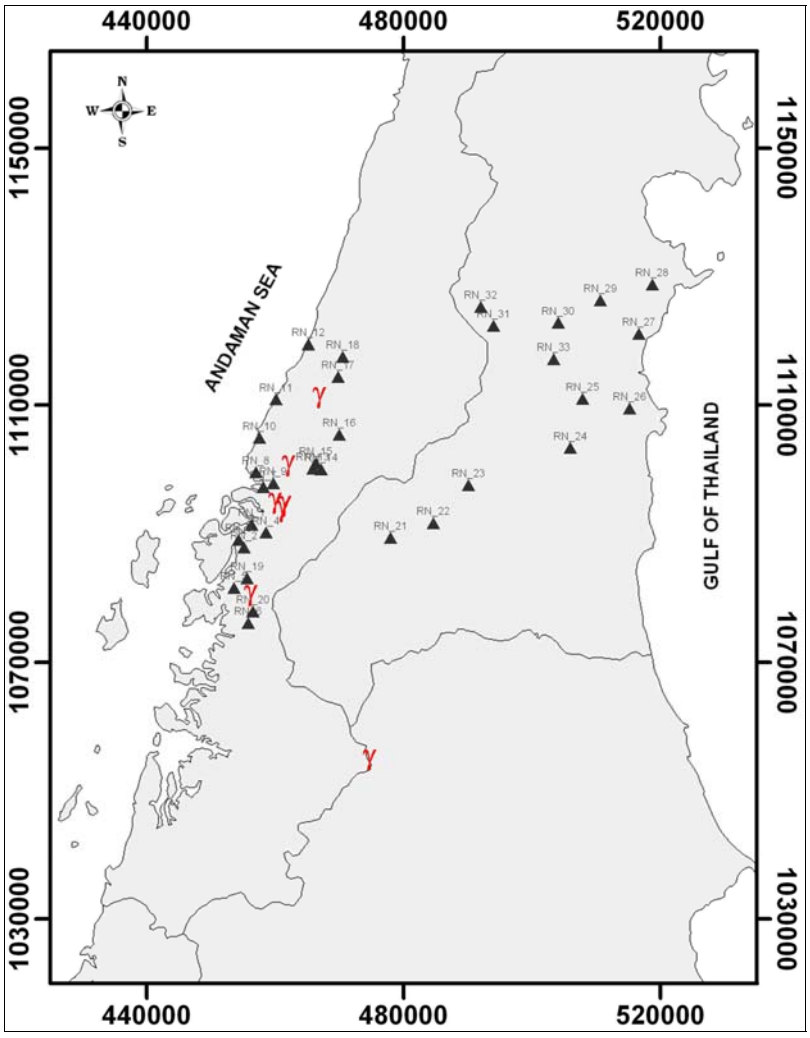


ภาพประกอบ 3.13 ลักษณะและตำแหน่งของวัตถุต้นเหตุในระดับลึกของสัญญาณค่าผิดปกติบูร์แกร์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยนำมาแสดงซ้อนทับกับแผนที่ธรณีวิทยาพื้นผิว

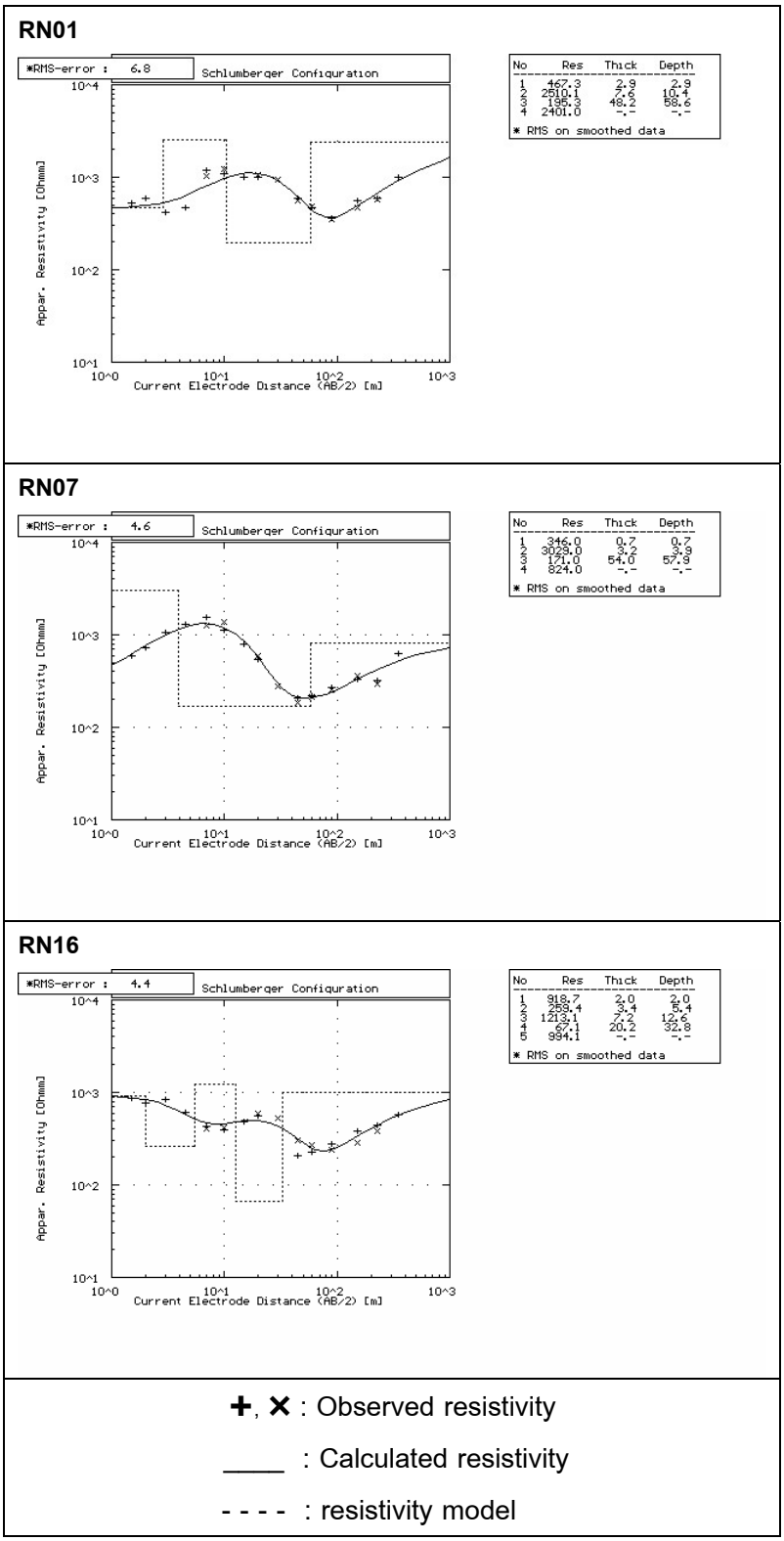
3.3 การแปลความข้อมูลการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน

การวัดการหยั่งลึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน โดยการจัดวางรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์ ได้กระทำที่ตำแหน่งต่างในพื้นที่ศึกษาจำนวน 33 จุดวัด (ภาพประกอบ 3.14) ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินในระดับตื้น (ไม่เกิน 200 เมตร) ทั้งตามแนวราบและแนวดิ่ง โดยคาดหมายว่าการเปลี่ยนแปลงข้างต้นอาจสัมพันธ์กับโครงสร้างธรณีวิทยาในระดับตื้นของพื้นที่ศึกษา

ผลของการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งนำเสนอด้วยกราฟในสเกลล็อก-ล็อกระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของชั้นดินและระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแส โดยทั่วไปกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของพื้นที่ศึกษาเป็นกราฟของโครงสร้างชั้นดินแบบ 3 ชั้น และ 4 ชั้น และสามารถจำแนกกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏตามลักษณะพื้นที่ศึกษาออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มพื้นที่ศึกษาฝั่งตะวันตกที่ประกอบด้วยจุดวัด RN01 – RN21 ซึ่งกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของชั้นดินแสดงชั้นดินที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงกว่า 800 โอห์ม-เมตร ที่ระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแสเท่ากับ 350 เมตร (ภาพประกอบ 3.15) และกลุ่มพื้นที่ศึกษาฝั่งตะวันออกที่ประกอบด้วยจุดวัด RN21 – RN33 ซึ่งกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของชั้นดินแสดงลักษณะชั้นดินที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏต่ำกว่า 800 โอห์ม-เมตร ที่ระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแสเท่ากับ 350 เมตร (ภาพประกอบ 3.16)

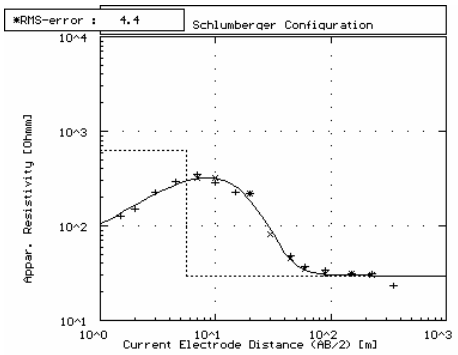


ภาพประกอบ 3.14 ตำแหน่งจุดวัดการหยั่งลึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยกำหนดให้ γ แทนแหล่งน้ำพุร้อนและ % แทนจุดวัดค่าจุดวัดการหยั่งลึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3.15 กราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันตก

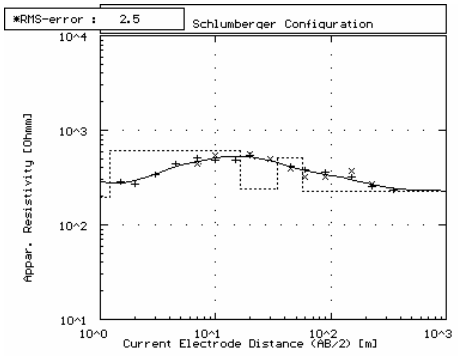
RN23



No	Res	Thick	Depth
1	83.9	0.8	0.8
2	634.1	4.8	5.6
3	29.7	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

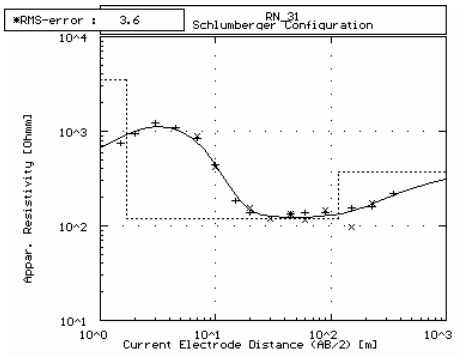
RN28



No	Res	Thick	Depth
1	376.0	0.4	0.4
2	195.5	0.8	1.2
3	605.2	15.3	16.5
4	240.5	17.8	34.3
5	514.8	23.0	57.3
6	226.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

RN16



No	Res	Thick	Depth
1	438.4	0.6	0.6
2	3533.0	1.1	1.7
3	119.9	115.7	117.4
4	375.6	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

+, **×** : Observed resistivity

____ : Calculated resistivity

- - - - : resistivity model

ภาพประกอบ 3.16 กราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันออก

ตาราง 3.4 แบบจำลองชั้นดินจากผลการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า

Stn	Layer	Resistivity (Ohm-m)	Thick (m)	Depth (m)	RMS error
Rn1	1	465	2.7	2.7	6.9
	2	2035	9.5	12.2	
	3	190	45.8	58.0	
	4	2202			
Rn2	1	3213	3.6	3.6	17.6
	2	857			
Rn3	1	1815	0.4	0.4	48.0
	2	1	2.8	3.2	
	3	5502			
Rn4	1	546	0.8	0.8	2.4
	2	290	1.7	2.5	
	3	661	8.1	10.6	
	4	210	31.7	42.3	
	5	2023			
Rn5	1	7281	7.1	7.1	31
	2	2289			
Rn6	1	331	0.6	0.6	4.6
	2	2872	3.4	4.0	
	3	163	46.9	50.9	
	4	742			
Rn7	1	346	0.7	0.7	4.5
	2	3029	3.2	3.9	
	3	171	54.0	57.9	
	4	824			
Rn8	1	1803	0.8	0.8	26.2
	2	3			
Rn9	1	254	0.7	0.7	6.6
	2	488	1.4	2.1	
	3	303	2.4	4.5	
	4	1536	8.7	13.2	
	5	158	48.7	61.9	
	6	2090			
Rn10	1	211	1.6	1.6	2.7
	2	105	37.6	39.2	
	3	2144			

ตาราง 3.4 แบบจำลองชั้นดินจากผลการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า (ต่อ)

Stn	Layer	Resistivity (Ohm-m)	Thick (m)	Depth (m)	RMS error
Rn11	1	559	1	1	5.2
	2	1340	2.7	3.7	
	3	250	23.7	27.4	
	4	1765	37	64.4	
	5	233			
Rn12	1	204	1.5	1.5	2.5
	2	842	63.4	64.9	
	3	400			
Rn13	1	1254	12.6	12.6	6.5
	2	321	13.9	26.5	
	3	985			
Rn14	1	821	0.5	0.5	2.9
	2	2495	1.6	2.1	
	3	159	16.3	18.4	
	4	2308			
Rn15	1	688	0.6	0.6	6.2
	2	1105	9.6	10.2	
	3	136	28.8	39	
	4	14341			
Rn16	1	919	2	2	4.4
	2	259	3.4	5.4	
	3	1213	7.2	12.6	
	4	67	20.2	32.8	
	5	994			
Rn17	1	406	1.6	1.6	12.1
	2	61	52.2	53.8	
	3	1701			
Rn18	1	291	0.7	0.7	4.4
	2	1622	1.9	2.6	
	3	87	15.1	17.7	
	4	887			
Rn19	1	452	2	2	2.6
	2	1747	7.1	9.1	
	3	48	22.8	31.9	
	4	1708			

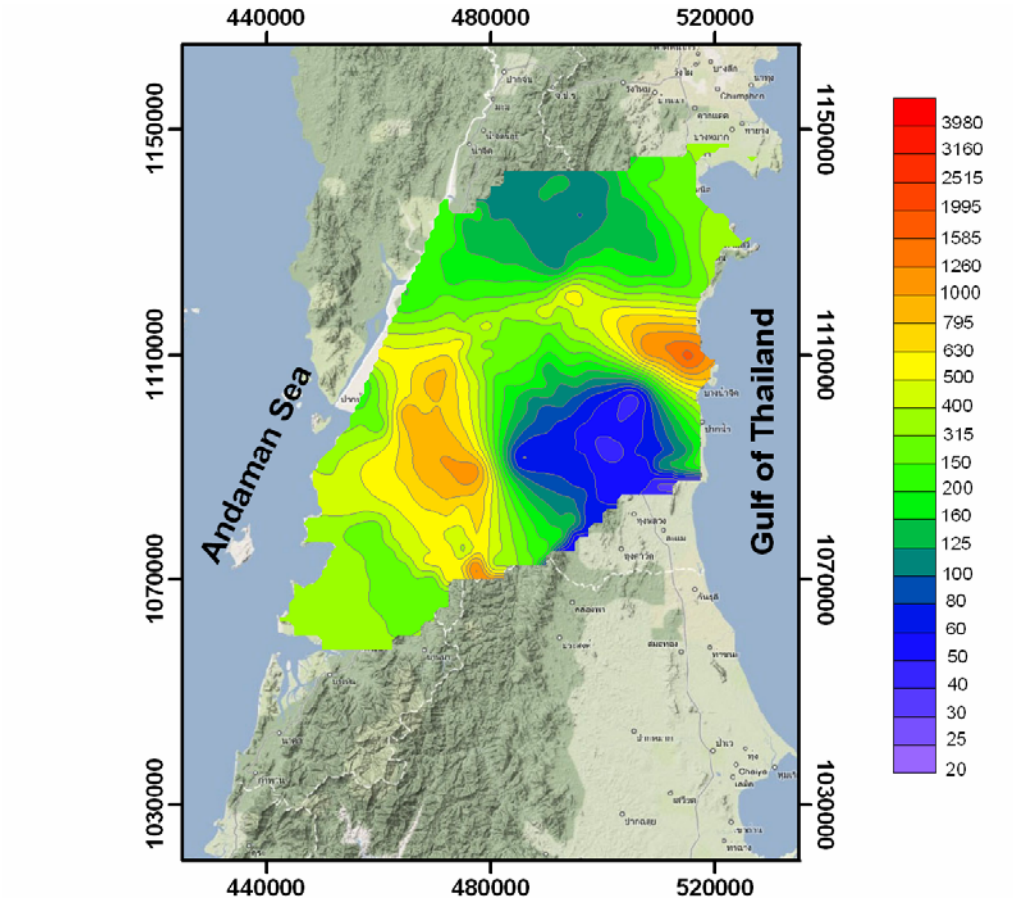
ตาราง 3.4 แบบจำลองชั้นดินจากผลการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า (ต่อ)

Stn	Layer	Resistivity (Ohm-m)	Thick (m)	Depth (m)	RMS error
Rn20	1	233	0.8	0.8	2.7
	2	1317	3.5	4.3	
	3	167	21.9	26.2	
	4	1125			
Rn21	1	1160	2.2	2.2	2.2
	2	632	24.7	26.9	
	3	1104			
Rn22	1	60	0.9	0.9	3.9
	2	136	24.3	25.2	
	3	140	34	59.2	
	4	253			
Rn23	1	84	0.8	0.8	4.4
	2	634	4.8	5.6	
	3	30			
Rn24	1	44	0.7	0.7	4.7
	2	164	5.9	6.6	
	3	60	34	40.6	
	4	159			
Rn25	1	1249	0.5	0.5	4.5
	2	165	1.9	2.4	
	3	265	25.4	27.8	
	4	10	122.9	150.7	
	5	100			
Rn26	1	1807	2.5	2.5	7
	2	29	57.3	59.8	
	3	329			
Rn27	1	270	2.6	2.6	3.7
	2	21	77.5	80.1	
	3	222			
Rn28	1	376	0.4	0.4	2.5
	2	196	0.8	1.2	
	3	606	15.3	16.5	
	4	241	17.8	34.3	
	5	515	23	57.3	
	6	227			

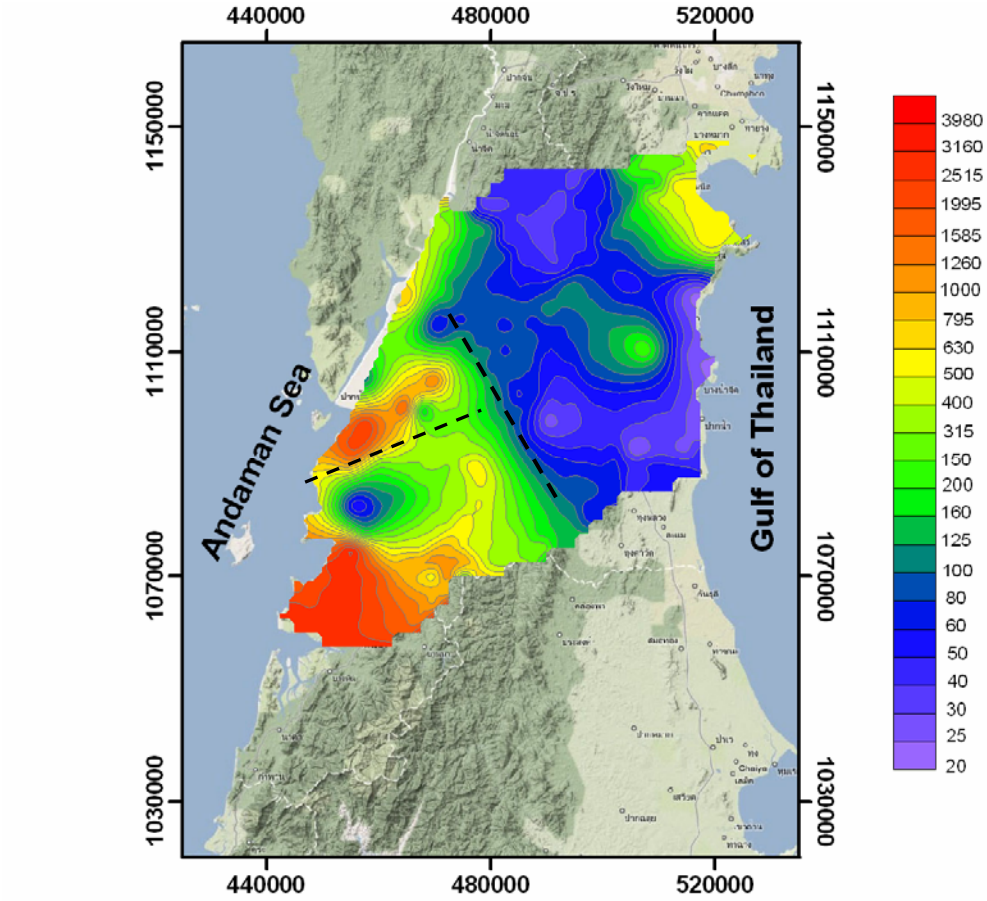
ตาราง 3.4 แบบจำลองชั้นดินจากผลการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า (ต่อ)

Stn	Layer	Resistivity (Ohm-m)	Thick (m)	Depth (m)	RMS error
Rn29	1	160	1.3	1.3	2.5
	2	77	3.6	4.9	
	3	129	6.5	11.4	
	4	57			
Rn30	1	226	2.4	2.4	3.7
	2	52	30.7	33.1	
	3	145			
Rn31	1	500	0.6	0.6	3.8
	2	3160	1.2	1.8	
	3	119	97.3	99.1	
	4	303			
Rn32	1	120	2	2	2.4
	2	40	14	16	
	3	2000			
Rn33	1	669	2.5	2.5	2.4
	2	187	4.9	7.4	
	3	96	54.3	61.7	
	4	186			

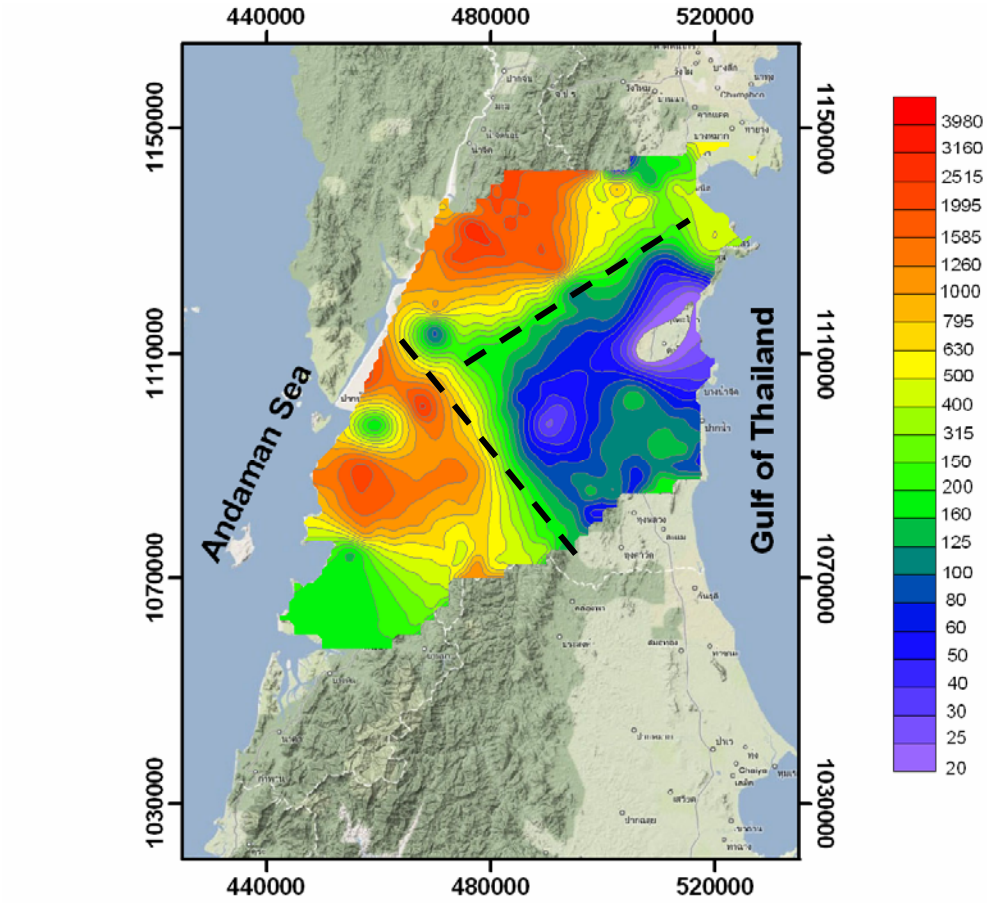
แผนที่สภาพต้านทานไฟฟ้าจริงของดินที่ประเมินได้จากการแปลความกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของจุดวัดการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินในพื้นที่ศึกษาที่ระดับความลึกต่าง ๆที่ระดับความลึก 0 , 10 และ 50 m สามารถจำแนกขอบเขตของกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันตกและกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันออกได้อย่างชัดเจน (ภาพประกอบ 3.17, 3.18 และ 3.19) โดยกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันตกมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า 400 โอห์ม-เมตร ในขณะที่กลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันออกมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 200 โอห์ม-เมตร และเป็นที่น่าสังเกตอย่างยิ่งที่ระดับความลึก 50 เมตร ขอบเขตรอยต่อของสองบริเวณดังกล่าวมีทิศทางที่ขนานกับทิศทางของรอบเลื่อนในพื้นที่ ลักษณะดังกล่าวอาจเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงตำแหน่งรอยเลื่อนด้วย นอกจากนี้บริเวณที่เป็นแหล่งน้ำพุร้อนกลับพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงที่ความลึกประมาณ 50 เมตร ลักษณะดังกล่าวอาจบ่งชี้ถึงช่องทางการไหลของน้ำร้อนก็เป็นได้



ภาพประกอบ 3.17 แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับผิวดิน



ภาพประกอบ 3.18 แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับความลึก 10 m



ภาพประกอบ 3.19 แผนที่คอนทัวร์สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระดับความลึก 50 m

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผล

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ซึ่งประกอบด้วยการวัดค่าสนามโน้มถ่วงและการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเพื่อการกำหนดลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาในพื้นที่ของจังหวัดระนองและพื้นที่บางส่วนของจังหวัดชุมพรและจังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งอยู่ระหว่างพิกัด 425000E ถึง 535000E และ 1020000N ถึง 1165000N ซึ่งภายในพื้นที่ศึกษาดังกล่าวมีแหล่งน้ำพุร้อนจำนวน 6 แหล่ง คือ RN1 RN2 RN3 RN4 RN5 และ RN6 โดยใช้ข้อมูลธรณีวิทยาพื้นผิวจากการศึกษาธรณีวิทยาภาคสนามและแผนที่ธรณีวิทยาเป็นตัวควบคุมการแปลความหมายข้อมูลธรณีฟิสิกส์ข้างต้น

ผลการศึกษาแผนที่ธรณีวิทยาและการเดินสำรวจธรณีวิทยาภาคสนามในพื้นที่ศึกษาพบว่าลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณแหล่งน้ำพุร้อนมีความซับซ้อนอย่างมาก เช่น มีรอยเลื่อนในแนวเหนือ-ใต้ รอยเลื่อนในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และรอยเลื่อนในแนวเกือบตะวันออก-ตะวันตก และพบว่าแหล่งน้ำพุร้อนจำนวน 5 ใน 6 แหล่งตั้งอยู่ในพื้นที่ของเทือกเขาหินแกรนิตยุคครีเทเชียสซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ในบริเวณของรอยเลื่อนระนอง ยกเว้นแหล่งน้ำพุร้อนบ้านนา (RN6) ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ของหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส–เพอร์เมียน อย่างไรก็ตามผลการเดินสำรวจธรณีวิทยาภาคสนามกลับไม่พบแหล่งน้ำพุร้อนในบริเวณของเทือกเขาหินแกรนิตยุคครีเทเชียสที่วางตัวอยู่ทางฝั่งตะวันออกของพื้นที่ศึกษาวิจัยที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณของรอยเลื่อนระนอง ดังนั้นเราอาจสรุปได้ว่ารอยเลื่อนระนองจึงมีบทบาทที่สำคัญต่อแหล่งน้ำพุร้อนดังกล่าว และมวลหินแกรนิตยุคครีเทเชียสในพื้นที่ศึกษาไม่น่าจะเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับแหล่งน้ำพุร้อนในพื้นที่ศึกษา

ผลการวัดค่าสนามโน้มถ่วงในพื้นที่ศึกษาได้ตรวจพบบริเวณที่มีค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างต่ำสองบริเวณคือบริเวณ A เหนือเทือกเขาหินแกรนิตใกล้กับชายฝั่งทะเลด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษาโดยปรากฏเป็นแถบของค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ -100 g.u. ซึ่งได้รับการแปลความว่าเกิดจากมวลหินแกรนิตที่มีความหนาแน่น 2,560 kg/m^3 มีความกว้าง 8 กิโลเมตร มีความยาว 21 กิโลเมตร และมีความลึก 1.7 กิโลเมตร และบริเวณ B ในบริเวณตอนกลางค่อนมาทางด้านใต้ของพื้นที่ศึกษาวิจัย โดยค่าผิดปกติบูร์แกร์ตกค้างมีลักษณะเป็นวงปิดที่ค่อนข้างกลม มีรัศมีประมาณ 20 กิโลเมตร และมีแอมพลิจูดประมาณ -300 g.u. ซึ่งได้รับการแปลความว่าเกิดจากมวลหินอัคนีระดับลึกที่มีรูปทรงกลมหรือทรงกระบอกใน

แนวตั้ง ที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าวัตถุข้างเคียงประมาณ 200 kg/m^3 จากการประเมินจากความลึกของมวลหินอัคนีระดับลึกนี้ด้วยวิธีการ Euler Deconvolution พบว่ามวลหินอัคนีระดับลึกรูปทรงกระบอกในแนวตั้งอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 3500 เมตร ถึง 25000 เมตร

ผลการวัดการหยั่งลึกสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินโดยการจัดวางรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจร์ สามารถจำแนกพื้นที่ศึกษาวิจัยออกเป็นกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันตกที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า 400 โอห์ม-เมตร และกลุ่มพื้นที่ฝั่งตะวันออกที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 200 โอห์ม-เมตร โดยแนวรอยต่อของบริเวณทั้งสองบริเวณวางตัวขนานกับทิศทางของรอบเลื่อนในพื้นที่ศึกษาและอาจแทนตำแหน่งของรอยเลื่อน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลธรณีฟิสิกส์ และข้อมูลธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เราสามารถสรุปเกี่ยวกับระบบของแหล่งน้ำพุร้อนระนองได้ว่า หินแกรนิตยุคครีเทเชียส ไม่ได้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนหลักของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนอง นอกจากนี้พลังงานความร้อนที่ได้มาจากการเปลี่ยนพลังงานกลของรอยเลื่อนก็ไม่ใช่แหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดระนอง แต่รอยเลื่อนและรอยแตกในชั้นหินเป็นเพียงช่องทางให้น้ำร้อนไหลจากแหล่งกักเก็บในระดับลึกไหลขึ้นสู่พื้นผิวภายนอก และมีความเป็นไปได้สูงว่าแหล่งกำเนิดความร้อนของแหล่งน้ำพุร้อนทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาน่าจะเป็นหินอัคนีระดับลึกรูปทรงกระบอกในแนวตั้งที่ตำแหน่ง (480000E, 1070000N) ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 3500 เมตรเป็นต้นไป

บรรณานุกรม

กรมทรัพยากรธรณี. 2551. น้ำพุร้อนในประเทศไทย. เข้าได้จาก: http://www.dmr.go.th/main.php?filename=hotthai) (วันที่สืบค้น 21 ธันวาคม 2551)

ประยุทธ ขาวดี. 2551. การศึกษาธรณีฟิสิกส์ของแหล่งความร้อนใต้พิภพใน อ. กาญจนดิษฐ์ และ อ.บ้านนาเดิม จังหวัดสุราษฎร์ธานี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัญฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.

พวงทิพย์ ล่างเล็ก. 2538. การศึกษาพลูตอนลิวง จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.

มานพ รักษาสกุลวงศ์, 2535. การสำรวจธรณีฟิสิกส์บริเวณแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ. ข่าวสารการธรณี, ประจำเดือนธันวาคม 2535, หน้า 27-37

มานพ รักษาสกุลวงศ์ และ ศิริพร สูงปานเขา, 2544. พลังงานความร้อนใต้พิภพ. กองเศรษฐธรณี, กรมทรัพยากรธรณี, 10 หน้า

ศิริพร สูงปานเขา และ มานพ รักษาสกุลวงศ์, 2544. พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย. วารสารเศรษฐธรณีวิทยา, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, 7 หน้า

สำนักงานจังหวัดระนอง. 2549. บรรยายสรุปจังหวัดระนองประจำปี 2549. สำนักงานจังหวัด: ระนอง 30 หน้า

สมชาย นาคะผดุงรัตน์ และพิศิษฏ์ สุขวัฒนานันท์. 2529. รายงานข้อมูลธรณีวิทยาและแหล่งแร่บริเวณ แนวที่จะขุดคอคอดกระ ฝ่ายสำรวจธรณีวิทยา กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี 16 หน้า

Barr, S.M. and Macdonald, A.S., 1991. Geochemistry and petrogenesis of late Cenozoicbasalts of Southeast Asia, Geol. Soc. Am. Bull., Part II, v.92, pp.1063-1142.

Bunopas, S., 1981, Paleogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia- A plate tectonics interpretation: Victoria University of Willington, unpublished Ph.D. Thesis, pp. 810.

Bunopas, S., and Vella, P., 1978, Late Palaeozoic and Mesozoice structural evolution of Northern Thailand, a plate tectonics model, *in* P. Nutalaya. ed., Proceedings of the Third Regional Conference on Geology and Mineralogy Resources of Southeast Asia, Bangkok Thailand: 1978, pp. 133-140.

Bruno, P.P.G. et.al, 2000. Geophysical exploration for geothermal low enthalpy resource in Lipari Island, Italy. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 98: 173-188.

Cargo, N.D. and Mallory, F.B., 1977. Man and his geologic environment, second edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., p.250-256.

Chaturongkawanich Saman and Leevongchareon Santi. 2000. THE GEOTHERMAL RESOURCES OF CHANGWAT RANONG SOUTHERN THAILAND. World Geothermal Congress 2000. May 28 - June 10, 2000. pp 1049-1052.

Charusiri P. Clark A.H. and Farrar, E., 1991. Miocene (oligocene) events in Thailand: Evidences from 40Ar/39Ar and K-Ar geochronology : Poceedings of the Annual Technical Meeting 1989 and IGCP-246. Department of Geological Sciences, Chiang Mai University. Pp.245-262

Corinne A. Locke, Simon A. Johnson, John Cassidy, and Jeffrey L. Mauk. 1999. Geophysical exploration of the Puhipuhi epithermal area, Northland, New Zealand. Journal of Geochemical Exploration. 65: 91-109.

Curray, J.R., Moore, D.G., Lawver, L.A., Emmel, F.J., Raitt, R.W., Henry, M., and Kieckhefer, R., 1978, Tectonics of the Andaman Sea and Burma – geological and geophysical investigations of continental margin, American Association of Petroleum Geologist, Memoir 29, pp. 189-198

Fowler C.M.R.1994.Heat.The Solid Earth an Introduction to Global Geophysics. U.S.A.:Cambridge. PP 219-267.

Geological Survey Division, 1985. Geological Map of Thailand 1:250,000. Department of Mineral Resources.

Google maps. 2009. Ranong Thailand. http://maps.google.com/maps/ms?ie=UTF8&hl=th&msa=2 (accessed 01/12/09)

Henry Darrell, 2008, introduction to Igneous and Metamorphic Petrology http://www.geol.lsu.edu/henry/Geology3041/lecturws/21Metamorphicintro/GeothermalGradients.jpg (accessed 07/05/08)

Helmcke D. and Lindenberg H. 1983. New data on the " Indosinian" Orogeny from Central Thailand. Geol. Rdsch. 72: 317 – 328.

Hahm L,Koch K.E andWittekindt H. 1986. Outline of the geology and mineral of Thailand. Geologische Jahbuch. 59: 3 – 49.

Kaewtawan, A., Lohawijarn, W. and Tonnayopas, D., 2004. Gravity Anomaly of Chaiya Geothermal Area. Proceeding of International Conference on Applied Geophysics. Chiang Mai, Thailand. 26-27 November 2004. pp. 15-21.

Kosuwa Suwith, Isao Takashima andCharusiri Punya.2006. Active Fault Zones in Thailand. http://www.dmr.go.th/Geohazardearthquake_nActiveFault_Eng.htm.mht (accessed 05/15/08)

Lohawijarn, W., Sanmuang, E., Khoonphunnarai, P. and Duerrast, H., 2007. The origin of hotsprings in Ranong Province, Southern Thailand. Proceedings of the GEOTHAI'07 International Conference. Bangkok. 21-22 December 2007.

Ndougsa-Mbarga Théophile, Manguelle-Dicoum Eliezer, Campos-Enriquez José-Oscar and Yene Atangana Quentin. 2007. Gravity anomalies, sub-surface structure and oil and gas migration in the Mamfe, Cameroon-Nigeria, sedimentary basin. Geofísica Internacional. 44: 129-139.

Parasnis, D.S., 1998. Principles of Applied Geophysics. 5th ed. Chapman and Hall, London, UK, pp. 60-73.

Prasad, A.S.S.S.R.S., Venkateswarlu, N.and Reddy, P.R. 2005. Crustal density model along Gopali- Port Canning profile,West Bengal basin using seismic and gravity data. J. Ind. Geophys. Union. 9(10): 235-239.

Putthapiban, P., 2002. Geology and Geochronology of the Igneous Rocks of Thailand. Proceedings of the Symposium on Geology of Thailand, Bangkok, Thailand, August 26-31, 202, pp. 261-283.

Stephen A. Nelson, 2003, Introduction & Textures & Structures of Igneous Rocks, http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/intro_and_textures.pdf (accessed 08/08/08)

Stanley, W.D. and Blakely, R.J., 1994. The Geysers-Clear Lake Geothermal area, California- An updated Geophysical perspective of heat sources. Geothermics. 24: 187-221

Raksaskulwong, M.,1999, Geothermal energy development and utilization in Thailand, a country report present to the Asia Geothermal Symposium in Conjunction with the 36th Annual Session of CCOP, Hanoi, Vietnam, pp. 17.

Raksaskulwong, M. and Thienprasert, A., 1995, Heat flow studies and geothermal energy development in Thailand, *in* Gupta, M.L., and Yamano, M., (eds.), Terrestrial heat flow and geothermal energy in Asia: New Delhi, Oxford & IBH Publishing, pp.129 -144

Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L., Ben-Gui, Y. 2000. 3-D gravity and magnetic interpretation for the Haifa Bay area (Lsrael). Journal of Applied Geophysics. 44: 353-367

Thienprasert, T., 1983. Geothermal Research and development in Thailand. Conference on Geology and Mineral Resources of Thailand, Bangkok, Thailand, Nov 19-28

Thienprasert, A. and Raksaskulwong, M., 1984, Heat flow in northern Thailand, Tectonophysics, v.103, pp.217-233.

Thienprasert, A., Surinkum, A., and Matsubayashi, O., 1982, Preliminary study of heat generation in Thailand, International Workshop on Terrestrial Heat Flow studies and Structure of Lithosphere, Prague, pp. 14.

Takashima, I., Honda, S., and Raksaskulwong, M., 1989, Heat sources and hydrothermal systems of non-volcanic geothermal resources in northern Thailand, *in* Honda S., ed., Origin and reservoir characteristics of non-volcanic geothermal resources of northern Thailand, Akita University, Japan, pp. 31-49.

Thailand Energy and environment network. 2550. พลังงานความร้อนใต้พิภพ เข้าได้จาก: http://teenet.chiangmai.ac.th/sci/intro01.php (สืบค้นวันที่ 8 สิงหาคม 2550)

U.S. Department of Energy, 1999.Geothermal today. In: Clean energy for the 21st Century. Geothermal Energy Program Highlights, pp 36.

Watkinson, I., Elders, C., Hall, R., 2008. The kinematic history of the Khlong Marui and Ranong Faults, southern Thailand. Journal of Structural Geology. Volume 30, pp 1554–1571.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง

Gravimeter : LACOSTE & ROMBERGE G-565

$$g_lat = 9780318(1 + 0.0053024\sin^2\phi + 0.0000059\sin^2 2\phi)$$

$$FAC = 3.072 \times H$$

$$BC = 0.0004191 \times density \times H \text{ ; } density = 2{,}600 \text{ kg/m}^3$$

$$BA = g_obs - g_lat + FAC - BC + TC$$

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E001	459847	1099574	978176.95	978185.88	0.000	-8.94	0.00	0.000	0.71	-8.23
E002	460970	1101067	978174.97	978186.30	7.336	-11.32	2.25	0.799	0.900	-8.97
E003	460990	1103003	978178.24	978186.83	1.622	-8.59	0.50	0.177	0.500	-7.77
E004	461812	1104627	978176.01	978187.28	10.203	-11.27	3.13	1.112	0.840	-8.41
E005	462311	1106530	978176.09	978187.81	15.505	-11.72	4.76	1.690	0.370	-8.28
E006	462287	1108555	978176.66	978188.38	18.602	-11.72	5.71	2.027	2.130	-5.90
E007	462694	1110002	978169.99	978188.78	63.385	-18.80	19.47	6.907	3.690	-2.54
E008	462576	1111489	978164.73	978189.20	111.323	-24.47	34.20	12.130	1.670	-0.73
E009	463361	1112905	978166.37	978189.59	90.903	-23.23	27.93	9.905	17.310	12.10
E010	463565	1113882	978181.96	978189.87	7.658	-7.91	2.35	0.835	2.220	-4.17
E011	463985	1115733	978183.78	978190.39	3.122	-6.61	0.96	0.340	1.410	-4.58
E012	464697	1117444	978182.64	978190.87	9.971	-8.23	3.06	1.087	2.26	-3.99
E013	465678	1119151	978184.35	978191.35	2.170	-7.00	0.67	0.236	1.40	-5.17
E014	459847	1099574	978187.53	978191.84	-1.500	-4.32	-0.46	-0.163	0.32	-4.29

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	g.u.	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E015	466896	1122646	978188.91	978192.33	-7.208	-3.42	-2.21	-0.785	0.62	-4.23
E016	467897	1124056	978189.63	978192.73	-10.245	-3.10	-3.15	-1.116	0.30	-4.83
E017	468490	1123669	978188.03	978192.62	-1.507	-4.59	-0.46	-0.164	0.34	-4.55
E018	468748	1122113	978190.30	978192.18	-9.892	-1.88	-3.04	-1.078	0.43	-3.41
E019	469488	1121548	978173.26	978192.02	93.966	-18.76	28.87	10.239	5.32	5.19
E020	470332	1120638	978182.15	978191.77	44.365	-9.62	13.63	4.834	1.19	0.36
E021	471148	1119043	978191.47	978191.32	-9.002	0.16	-2.77	-0.981	0.81	-0.82
E022	470545	1117287	978190.43	978190.82	-7.752	-0.40	-2.38	-0.845	0.55	-1.38
E023	469916	1115443	978188.13	978190.31	-2.881	-2.17	-0.88	-0.314	12.50	9.76
E024	470005	1113582	978182.97	978189.78	9.090	-6.81	2.79	0.990	0.59	-4.42
E025	470175	1111850	978183.83	978189.30	-2.147	-5.47	-0.66	-0.234	1.05	-4.85
E026	471506	1110725	978182.56	978188.98	3.290	-6.42	1.01	0.359	1.31	-4.46
E027	471363	1109114	978180.01	978188.53	14.634	-8.53	4.50	1.595	1.89	-3.74
E028	470568	1107462	978177.69	978188.07	16.893	-10.38	5.19	1.841	1.10	-5.93
E029	470386	1105915	978177.05	978187.64	16.473	-10.59	5.06	1.795	1.26	-6.06
E030	469311	1104335	978173.67	978187.20	24.329	-13.53	7.47	2.651	2.10	-6.61
E031	468887	1102649	978167.90	978186.74	50.411	-18.84	15.49	5.493	1.59	-7.26
E032	467420	1102630	978138.48	978186.73	227.627	-48.25	69.93	24.804	3.25	0.12
E033	466407	1101523	978148.82	978186.42	149.655	-37.60	45.97	16.307	1.72	-6.21
E034	465879	1099855	978143.16	978185.96	159.165	-42.80	48.90	17.344	2.02	-9.23
E035	466489	1098764	978129.04	978185.66	255.973	-56.62	78.63	27.892	4.45	-1.42
E036	465223	1097730	978134.30	978185.37	211.402	-51.08	64.94	23.036	3.10	-6.07
E037	465610	1095960	978139.00	978184.88	180.953	-45.88	55.59	19.718	1.73	-8.28
E038	462456	1114062	978184.34	978189.92	-3.457	-5.58	-1.06	-0.377	1.19	-5.07
E039	461067	1112932	978183.81	978189.60	9.346	-5.79	2.87	1.018	1.55	-2.39
E040	460333	1111214	978187.29	978189.12	-14.910	-1.83	-4.58	-1.625	0.78	-4.01
E041	459666	1109322	978185.53	978188.59	-12.906	-3.07	-3.96	-1.406	0.87	-4.75
E042	458684	1107860	978181.83	978188.18	12.169	-6.35	3.74	1.326	1.23	-2.71
E043	458027	1105900	978169.86	978187.64	78.952	-17.78	24.25	8.603	1.04	-1.09
E044	457363	1104104	978184.94	978187.14	-7.293	-2.20	-2.24	-0.795	0.85	-2.79

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E045	456541	1102404	978184.02	978186.67	-0.319	-2.65	-0.10	-0.035	0.27	-2.44
E046	455609	1100639	978184.25	978186.18	-1.507	-1.93	-0.46	-0.164	0.49	-1.73
E047	458271	1103534	978184.48	978186.98	-6.887	-2.50	-2.12	-0.750	0.41	-3.45
E048	459572	1104371	978183.21	978187.21	-4.245	-4.01	-1.30	-0.463	0.65	-4.20
E049	459956	1106170	978173.62	978187.71	42.915	-14.10	13.18	4.676	5.30	-0.29
E050	461117	1106833	978179.05	978187.90	14.263	-8.85	4.38	1.554	0.93	-5.09
E051	469089	1125649	978190.20	978193.18	-7.306	-2.98	-2.24	-0.796	0.71	-3.72
E052	470006	1127182	978192.08	978193.62	-11.061	-1.54	-3.40	-1.205	0.33	-3.40
E053	471377	1126860	978191.06	978193.52	0.679	-2.47	0.21	0.074	1.55	-0.78
E054	471803	1126062	978178.04	978193.30	79.922	-15.25	24.55	8.709	2.35	2.94
E055	473001	1125900	978184.49	978193.25	48.519	-8.77	14.91	5.287	2.62	3.47
E056	474058	1125417	978193.20	978193.12	-0.744	0.08	-0.23	-0.081	0.64	0.58
E057	474460	1123975	978191.43	978192.71	2.408	-1.28	0.74	0.262	0.55	-0.25
E058	475981	1125029	978192.51	978193.01	-1.474	-0.50	-0.45	-0.161	0.81	0.02
E059	477353	1124199	978192.13	978192.77	-5.714	-0.64	-1.76	-0.623	0.76	-1.02
E060	476340	1122745	978183.89	978192.36	37.510	-8.47	11.52	4.087	0.77	-0.26
E061	475060	1122005	978189.60	978192.15	2.738	-2.55	0.84	0.298	1.16	-0.85
E062	474456	1120466	978184.55	978191.72	28.366	-7.17	8.71	3.091	0.38	-1.17
E063	474215	1118629	978189.37	978191.20	-2.010	-1.83	-0.62	-0.219	0.44	-1.79
E064	473541	1117662	978190.68	978190.93	-11.540	-0.25	-3.54	-1.257	0.53	-2.01
E065	472082	1118450	978181.08	978191.15	-7.306	-10.07	-2.24	-0.796	3.24	-8.28
E066	468962	1115044	978186.75	978190.19	-11.061	-3.45	-3.40	-1.205	1.07	-4.57
E067	468125	1115262	978184.11	978190.25	0.679	-6.15	0.21	0.074	1.84	-4.17
E068	467563	1115990	978179.39	978190.46	79.922	-11.07	24.55	8.709	1.74	6.51
E069	469107	1112785	978184.34	978189.56	-3.489	-5.22	-1.07	-0.380	0.80	-5.11
E070	468457	1112429	978182.01	978189.46	5.055	-7.45	1.55	0.551	0.89	-5.55
E071	468412	1111547	978180.52	978189.21	5.072	-8.69	1.56	0.553	0.72	-6.97
E072	467596	1111644	978178.34	978189.24	8.788	-10.90	2.70	0.958	1.16	-8.00
E073	466699	1111548	978172.49	978189.21	21.895	-16.73	6.73	2.386	2.60	-9.79
E074	465168	1101451	978146.20	978186.40	143.720	-40.20	44.15	15.661	2.56	-9.15

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E075	464296	1101217	978150.13	978186.34	112.812	-36.21	34.66	12.293	2.67	-11.17
E076	463279	1101001	978156.85	978186.28	69.507	-29.43	21.35	7.574	2.53	-13.12
E077	462404	1100849	978162.79	978186.24	36.961	-23.44	11.35	4.027	2.18	-13.93
E078	461538	1100800	978169.73	978186.22	14.795	-16.49	4.55	1.612	1.87	-11.69
E079	459286	1100007	978181.69	978186.00	-13.274	-4.31	-4.08	-1.446	0.18	-6.76
E080	458472	1100265	978184.41	978186.07	-5.946	-1.66	-1.83	-0.648	0.26	-2.58
E081	457742	1100315	978185.72	978186.09	-6.426	-0.37	-1.97	-0.700	0.17	-1.48
E082	456708	1100186	978186.13	978186.05	-6.944	0.07	-2.13	-0.757	0.04	-1.26
E083	455839	1099939	978186.22	978185.98	-10.254	0.24	-3.15	-1.117	0.02	-1.77
E084	455944	1099201	978186.47	978185.78	-7.631	0.69	-2.34	-0.832	0.04	-0.78
E085	459679	1097559	978175.36	978185.33	5.210	-9.96	1.60	0.568	0.36	-8.57
E086	459319	1095646	978176.48	978184.80	-1.630	-8.32	-0.50	-0.178	0.75	-7.90
E087	459197	1093668	978174.39	978184.25	-1.461	-9.86	-0.45	-0.159	0.55	-9.60
E088	459122	1091681	978170.16	978183.71	12.185	-13.55	3.74	1.328	1.26	-9.87
E089	458558	1089845	978171.12	978183.20	11.186	-12.08	3.44	1.219	3.46	-6.40
E090	457952	1088110	978171.24	978182.73	12.425	-11.49	3.82	1.354	1.74	-7.28
E091	457080	1086727	978172.06	978182.35	13.128	-10.28	4.03	1.430	1.22	-6.46
E092	456464	1085024	978167.72	978181.88	38.472	-14.16	11.82	4.192	1.39	-5.14
E093	455704	1083289	978171.28	978181.41	20.947	-10.13	6.43	2.283	1.43	-4.55
E094	455309	1081310	978169.68	978180.87	19.556	-11.18	6.01	2.131	1.00	-6.31
E095	455532	1079498	978169.04	978180.37	18.652	-11.34	5.73	2.032	0.85	-6.79
E096	455568	1077711	978169.86	978179.89	11.283	-10.03	3.47	1.229	0.72	-7.08
E097	456130	1075812	978165.92	978179.37	11.449	-13.45	3.52	1.248	0.76	-10.42
E098	454819	1074819	978168.98	978179.11	0.819	-10.13	0.25	0.089	0.68	-9.28
E099	453800	1073113	978168.67	978178.64	0.357	-9.97	0.11	0.039	0.43	-9.47
E100	453188	1071426	978165.57	978178.19	8.477	-12.62	2.60	0.924	0.93	-10.01
E101	452883	1069501	978165.26	978177.67	3.258	-12.41	1.00	0.355	0.83	-10.93
E102	457371	1101217	978163.98	978179.79	13.241	-15.81	4.07	1.443	2.13	-11.05

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E103	459164	1077036	978137.30	978179.71	159.052	-42.40	48.86	17.331	2.65	-8.22
E104	460875	1077787	978132.28	978179.91	191.401	-47.63	58.80	20.856	2.38	-7.31
E105	462325	1078853	978135.50	978180.20	179.492	-44.70	55.14	19.559	1.54	-7.58
E106	464039	1078719	978140.06	978180.16	152.172	-40.10	46.75	16.582	1.43	-8.51
E107	465509	1079531	978143.54	978180.38	131.095	-36.84	40.27	14.285	1.16	-9.70
E108	467165	1079645	978152.69	978180.41	76.910	-27.73	23.63	8.381	1.10	-11.38
E109	468414	1080060	978144.16	978180.53	129.569	-36.36	39.80	14.119	1.42	-9.26
E110	469668	1081068	978152.96	978180.80	75.892	-27.84	23.31	8.270	0.91	-11.88
E111	471324	1080416	978153.05	978180.62	66.618	-27.58	20.47	7.259	0.53	-13.84
E112	472786	1081412	978153.76	978180.90	59.408	-27.13	18.25	6.473	0.52	-14.84
E113	474122	1081996	978158.15	978181.05	44.927	-22.91	13.80	4.895	1.00	-13.00
E114	475776	1082337	978155.52	978181.15	55.370	-25.63	17.01	6.033	0.60	-14.05
E115	451984	1067714	978165.42	978177.19	3.135	-11.76	0.96	0.342	0.23	-10.91
E116	451315	1065902	978164.23	978176.70	4.334	-12.47	1.33	0.472	0.25	-11.36
E117	450177	1064470	978167.59	978176.32	-0.973	-8.72	-0.30	-0.106	0.06	-8.86
E118	449735	1062508	978168.27	978175.79	-6.134	-7.52	-1.88	-0.668	0.78	-7.96
E119	449955	1060561	978165.74	978175.27	-9.116	-9.53	-2.80	-0.993	0.76	-10.58
E120	451578	1059632	978160.62	978175.02	4.108	-14.40	1.26	0.448	1.03	-12.55
E121	453541	1059333	978164.96	978174.94	-6.287	-9.98	-1.93	-0.685	0.44	-10.78
E122	455450	1059447	978165.69	978174.97	-4.692	-9.28	-1.44	-0.511	0.23	-9.98
E123	455997	1060943	978163.01	978175.37	14.650	-12.36	4.50	1.596	0.36	-9.10
E124	457836	1061288	978164.66	978175.46	7.900	-10.80	2.43	0.861	0.49	-8.74
E125	459526	1061208	978162.00	978175.44	14.113	-13.44	4.34	1.538	0.67	-9.97
E126	460455	1059771	978158.55	978175.06	23.591	-16.51	7.25	2.571	1.40	-10.43
E127	461904	1058551	978155.45	978174.73	30.365	-19.28	9.33	3.309	1.34	-11.92
E128	463867	1058788	978154.42	978174.79	24.854	-20.37	7.64	2.708	2.09	-13.35
E129	465524	1058510	978149.02	978174.72	41.979	-25.70	12.90	4.574	0.81	-16.57
E130	467435	1058415	978145.11	978174.70	45.154	-29.58	13.87	4.920	0.91	-19.72
E131	468750	1057382	978139.61	978174.42	64.182	-34.81	19.72	6.994	1.07	-21.02
E132	470637	1056960	978136.07	978174.31	71.878	-38.23	22.08	7.832	4.29	-19.69

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E133	471134	1055162	978130.70	978173.83	42.815	-43.13	13.15	4.665	3.26	-31.39
E134	469086	1059150	978139.43	978174.89	77.788	-35.46	23.90	8.476	1.86	-18.18
E135	469016	1060640	978140.70	978175.29	79.521	-34.59	24.43	8.665	1.29	-17.53
E136	468460	1062283	978143.16	978175.73	74.425	-32.57	22.86	8.110	2.53	-15.29
E137	462906	1107966	978153.91	978188.21	138.843	-34.31	42.65	15.129	2.39	-4.39
E138	463472	1107802	978126.38	978188.17	283.262	-61.78	87.02	30.866	8.07	2.44
E139	463870	1108195	978099.39	978188.28	432.219	-88.89	132.78	47.097	6.80	3.59
E140	463969	1108930	978070.63	978188.48	582.210	-117.85	178.85	63.441	1.07	-1.37
E141	462086	1102253	978172.40	978186.63	11.396	-14.23	3.50	1.242	2.27	-9.70
E142	462910	1102836	978168.97	978186.79	18.301	-17.82	5.62	1.994	5.63	-8.56
E143	463595	1103433	978164.41	978186.95	43.450	-22.54	13.35	4.735	1.17	-12.76
E144	460067	1093305	978167.12	978184.15	21.382	-17.04	6.57	2.330	1.22	-11.58
E145	460657	1093756	978161.72	978184.28	49.015	-22.56	15.06	5.341	1.07	-11.77
E146	458154	1093339	978179.90	978184.16	-10.412	-4.27	-3.20	-1.135	0.46	-5.87
E147	457437	1093043	978181.21	978184.08	-8.869	-2.87	-2.72	-0.966	0.48	-4.14
E148	457459	1092222	978180.79	978183.85	-6.099	-3.06	-1.87	-0.665	0.68	-3.59
E149	456762	1091677	978179.97	978183.70	8.902	-3.73	2.73	0.970	0.57	-1.40
E150	456204	1090912	978182.19	978183.49	-3.066	-1.30	-0.94	-0.334	0.28	-1.63
E151	455657	1090098	978183.15	978183.27	-8.532	-0.12	-2.62	-0.930	0.23	-1.58
E152	456401	1089609	978180.74	978183.14	-8.056	-2.39	-2.47	-0.878	0.47	-3.52
E153	457214	1089073	978177.50	978182.99	-4.114	-5.49	-1.26	-0.448	0.79	-5.51
E154	458056	1089333	978173.68	978183.06	9.423	-9.38	2.89	1.027	1.30	-6.21
E155	459033	1089227	978163.62	978183.03	27.210	-19.42	8.36	2.965	3.27	-10.75
E156	458537	1088009	978166.80	978182.70	21.211	-15.89	6.52	2.311	3.39	-8.30
E157	458540	1087213	978159.78	978182.48	51.280	-22.70	15.75	5.588	1.01	-11.53
E158	456681	1087457	978176.61	978182.55	13.190	-5.93	4.05	1.437	3.67	0.35
E159	456426	1088259	978178.20	978182.77	9.676	-4.57	2.97	1.054	0.68	-1.97
E160	455795	1088649	978181.21	978182.87	5.894	-1.66	1.81	0.642	0.39	-0.10
E161	454856	1088715	978183.70	978182.89	2.033	0.81	0.62	0.221	0.07	1.29
E162	456422	1082824	978164.23	978181.28	31.068	-17.05	9.54	3.385	3.02	-7.87

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E163	457214	1082593	978154.92	978181.22	61.761	-26.30	18.97	6.730	0.64	-13.42
E164	454716	1082275	978175.47	978181.13	10.378	-5.66	3.19	1.131	0.59	-3.01
E165	454015	1081760	978177.71	978180.99	4.684	-3.28	1.44	0.510	0.43	-1.92
E166	453166	1081626	978179.34	978180.95	3.601	-1.61	1.11	0.392	0.20	-0.70
E167	456809	1074890	978159.51	978179.12	41.000	-19.62	12.60	4.468	1.97	-9.52
E168	457708	1074951	978157.41	978179.14	38.651	-21.73	11.87	4.212	2.96	-11.11
E173	457013	1062986	978163.91	978175.92	7.911	-12.01	2.43	0.862	0.36	-10.08
E174	457327	1064784	978160.37	978176.40	20.874	-16.03	6.41	2.275	0.56	-11.33
E175	457918	1066680	978155.46	978176.91	50.581	-21.45	15.54	5.512	1.19	-10.24
E176	459575	1063081	978163.30	978175.94	12.890	-12.65	3.96	1.405	0.44	-9.65
E177	460096	1064638	978161.56	978176.36	18.602	-14.80	5.71	2.027	0.70	-10.42
E178	460858	1062086	978161.96	978175.68	10.713	-13.71	3.29	1.167	0.41	-11.18
E179	462005	1063356	978159.33	978176.02	24.182	-16.68	7.43	2.635	1.17	-10.72
E180	463061	1064889	978155.37	978176.43	43.273	-21.06	13.29	4.715	0.49	-11.99
E169	456060	1058414	978165.30	978174.70	-12.326	-9.40	-3.79	-1.343	0.10	-11.74
E170	455128	1056746	978163.26	978174.25	-5.364	-10.99	-1.65	-0.585	0.15	-11.90
E171	454296	1055445	978165.01	978173.90	-14.073	-8.90	-4.32	-1.533	0.07	-11.62
E172	453043	1054220	978165.11	978173.58	-12.067	-8.47	-3.71	-1.315	0.12	-10.74
E181	448764	1060822	978169.88	978175.34	-14.720	-5.46	-4.52	-1.604	0.29	-8.08
E182	447957	1060532	978171.01	978175.26	-11.591	-4.25	-3.56	-1.263	0.13	-6.42
E183	447135	1060290	978171.94	978175.20	-13.822	-3.26	-4.25	-1.506	0.14	-5.86
E184	446345	1060756	978172.82	978175.32	-15.125	-2.50	-4.65	-1.648	0.07	-5.43
E185	445465	1061005	978174.42	978175.39	-18.422	-0.96	-5.66	-2.007	0.04	-4.58
E186	444626	1061208	978176.10	978175.44	-19.725	0.65	-6.06	-2.149	0.06	-3.20
E187	443809	1061672	978178.41	978175.57	-20.884	2.84	-6.42	-2.276	0.11	-1.19
E188	442840	1061552	978179.79	978175.53	-22.577	4.26	-6.94	-2.460	0.00	-0.22
E189	441945	1061633	978180.69	978175.56	-22.132	5.14	-6.80	-2.412	0.02	0.77
E190	480617	1089577	978163.30	978183.13	34.115	-19.82	10.48	3.717	0.00	-13.06
E191	488651	1094758	978172.40	978184.55	18.541	-12.15	5.70	2.020	0.00	-8.48
E192	495858	1099179	978178.61	978185.77	19.600	-7.16	6.02	2.136	0.00	-3.28
E193	504206	1102963	978185.18	978186.82	21.193	-1.64	6.51	2.309	0.00	2.56

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E194	507194	1103078	978197.46	978186.85	-4.492	10.61	-1.38	-0.489	0.00	-13.42
E195	506983	1093446	978193.48	978184.19	12.5719	9.29	3.86	1.370	0.00	-3.01
E196	507446	1084124	978195.66	978181.64	2.01717	14.02	0.62	0.220	0.00	-1.92
E197	511340	1075186	978200.85	978179.20	-11.4292	21.64	-3.51	-1.245	0.00	-0.70
C019	514657	1068982	978206.17	978177.51	-15.154	28.65	-4.66	-1.651	0.00	25.65
C018	516169	1068928	978204.13	978177.53	-9.55972	26.60	-2.94	-1.042	0.00	24.71
C020	512700	1068693	978195.89	978177.45	-4.9178	18.44	-1.51	-0.536	0.00	17.46
E201	507178	1108118	978206.28	978192.34	-18.063	13.95	-5.55	-1.968	0.00	-11.33
E202	508086	1113021	978204.06	978193.73	-20.728	10.34	-6.37	-2.259		-10.24
E203	509086	1117914	978205.67	978195.09	-22.644	10.58	-6.96	-2.467		-9.65
E204	510585	1122661	978206.15	978196.42	-21.081	9.74	-6.48	-2.297	0.088	-10.42
E205	510705	1127572	978204.22	978197.79	-10.448	6.43	-3.21	-1.139	0.033	-11.18
E206	509992	1132386	978204.56	978198.82	1.744	5.74	0.54	0.190	0.068	-10.72
E207	509583	1137017	978204.36	978200.21	4.859	4.15	1.49	0.529	0.103	-11.99
E208	510139	1141823	978201.10	978191.75	5.984	9.35	1.84	0.652	0.033	-11.74
E209	513439	1145398	978198.15	978191.78	10.161	6.37	3.12	1.107	0.133	-11.90
E210	513966	1150218	978195.55	978192.06	18.081	3.49	5.55	1.970	0.046	-11.62
E211	508184	1120563	978196.65	978192.55	11.023	4.10	3.39	1.201	0.040	-10.74
E212	506175	1120700	978195.13	978192.83	6.861	2.29	2.11	0.748	0.022	-8.08
E213	504568	1121671	978191.97	978192.63	14.821	-0.66	4.55	1.615	0.060	-6.42
E214	503643	1123430	978190.07	978192.33	18.500	-2.26	5.68	2.016	0.035	-5.86
E215	501863	1124417	978187.30	978192.52	30.114	-5.23	9.25	3.281	0.069	-5.43
E216	500116	1123705	978186.23	978192.91	30.049	-6.68	9.23	3.274	0.077	-4.58
E217	498504	1122639	978183.65	978193.36	35.814	-9.71	11.00	3.902	0.546	-3.20
E218	496644	1123318	978188.00	978193.92	21.369	-5.92	6.56	2.329	0.403	-1.19
E219	495161	1124674	978189.04	978194.01	24.491	-4.97	7.52	2.669	0.451	-0.22
E220	494048	1126277	978182.83	978194.02	45.168	-11.19	13.88	4.922	0.303	0.77
E221	493587	1128238	978176.72	978193.75	67.393	-17.03	20.70	7.344	7.832	-13.06
E222	491751	1128581	978186.67	978192.22	22.599	-5.55	6.94	2.463	7.963	-8.48
E223	489790	1128610	978183.87	978191.84	30.413	-7.96	9.34	3.314	0.507	-3.28

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E224	492662	1120018	978177.21	978191.59	50.384	-14.38	15.48	5.490	1.038	-3.35
E225	490854	1120397	978180.19	978191.70	46.557	-11.51	14.30	5.073	0.423	-1.86
E226	489322	1119451	978177.32	978191.43	51.761	-14.11	15.90	5.640	0.684	-3.16
E227	488235	1117756	978173.37	978190.96	60.155	-17.59	18.48	6.555	1.325	-4.34
E228	486747	1116542	978168.93	978190.61	73.823	-21.68	22.68	8.044	1.673	-5.37
E229	485338	1115248	978161.95	978190.25	112.367	-28.30	34.52	12.244	2.165	-3.86
E230	484100	1113740	978153.54	978189.83	149.807	-36.29	46.02	16.324	1.923	-4.67
E231	483241	1112065	978137.26	978189.36	232.196	-52.09	71.33	25.301	2.541	-3.53
E232	483047	1110230	978141.20	978188.85	214.058	-47.65	65.76	23.325	1.645	-3.57
E233	482327	1108695	978140.47	978188.42	216.584	-47.95	66.53	23.600	1.707	-3.31
E234	481610	1109141	978148.21	978188.54	178.256	-40.33	54.76	19.424	3.531	-1.46
E235	480720	1110154	978128.76	978188.82	287.301	-60.06	88.26	31.306	2.421	-0.69
E236	479095	1110649	978178.16	978188.96	26.735	-10.80	8.21	2.913	3.605	-1.90
E237	478174	1112198	978182.32	978189.40	14.012	-7.07	4.30	1.527	2.564	-1.73
E238	478279	1113908	978184.15	978189.88	8.628	-5.72	2.65	0.940	3.131	-0.88
E239	477179	1114735	978186.27	978190.11	5.434	-3.84	1.67	0.592	1.439	-1.32
E240	475441	1114507	978183.45	978190.04	18.341	-6.59	5.63	1.999	2.477	-0.48
E241	474437	1116612	978188.53	978190.63	-4.106	-2.10	-1.26	-0.447	0.404	-2.51
E242	473024	1111740	978189.59	978189.27	-5.115	0.32	-1.57	-0.557	0.293	-0.40
E243	471450	1131209	978194.21	978194.76	-17.528	-0.55	-5.38	-1.910	0.234	-3.79
E244	473406	1135589	978195.45	978196.01	-11.687	-0.55	-3.59	-1.273	0.355	-2.52
E245	474831	1140079	978192.86	978197.29	-2.646	-4.43	-0.81	-0.288	0.155	-4.80
E246	476697	1144355	978193.97	978198.52	2.067	-4.55	0.64	0.225	0.344	-3.79
E247	475792	1148688	978199.94	978199.77	-11.949	0.18	-3.67	-1.302	0.178	-2.01
E248	477211	1153329	978201.68	978201.11	-11.997	0.57	-3.69	-1.307	0.107	-1.70
E249	479216	1157462	978201.49	978202.31	-6.211	-0.82	-1.91	-0.677	0.340	-1.71
E250	481130	1161962	978203.93	978203.62	-10.586	0.31	-3.25	-1.153	0.102	-1.69
E251	484563	1163747	978199.97	978204.14	-0.510	-4.17	-0.16	-0.056	0.327	-3.95
E252	489014	1163652	978194.60	978204.11	9.604	-9.51	2.95	1.047	0.861	-6.74
E253	490533	1159417	978187.43	978202.88	50.864	-15.45	15.63	5.542	0.726	-4.64

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E254	494859	1160433	978193.13	978203.17	33.113	-10.04	10.17	3.608	0.981	-2.49
E255	499001	1161336	978198.87	978203.44	15.266	-4.57	4.69	1.663	1.159	-0.38
E256	503800	1160989	978201.02	978203.34	7.122	-2.32	2.19	0.776	0.167	-0.74
E257	508529	1160654	978203.30	978203.24	-2.975	0.06	-0.91	-0.324	0.194	-0.33
E258	513161	1161896	978207.94	978203.60	-13.624	4.34	-4.19	-1.485	0.003	1.64
E259	517912	1160437	978207.74	978203.17	-18.458	4.56	-5.67	-2.011	0.003	0.91
E260	522305	1158520	978215.07	978202.62	-23.830	12.46	-7.32	-2.597	0.036	7.77
E261	523488	1154273	978209.05	978201.38	-27.085	7.67	-8.32	-2.951	0.036	2.33
E262	527226	1154060	978218.29	978201.32	-25.570	16.96	-7.85	-2.786	0.186	12.08
E263	521869	1149250	978206.11	978199.93	-27.826	6.18	-8.55	-3.032	0.009	0.67
E264	517605	1149270	978211.23	978199.94	-28.973	11.30	-8.90	-3.157	0.007	5.56
E265	514348	1149784	978207.35	978200.08	-15.213	7.26	-4.67	-1.658	0.041	4.29
E266	514712	1154975	978209.60	978201.59	-22.198	8.02	-6.82	-2.419		3.62
E267	513357	1159699	978208.43	978202.96	-21.714	5.47	-6.67	-2.366		1.17
E268	477061	1086849	978161.94	978182.38	40.339	-20.44	12.39	4.396		-12.45
E269	485240	1091697	978167.33	978183.71	24.757	-16.38	7.61	2.698		-11.48
E270	493505	1096192	978173.47	978184.95	21.598	-11.48	6.63	2.353		-7.20
E271	500117	1102788	978173.66	978186.77	35.057	-13.11	10.77	3.820		-6.16
E272	506671	1098230	978196.70	978185.51	-12.930	11.19	-3.97	-1.409		8.63
E273	506044	1088109	978194.69	978182.73	-0.402	11.96	-0.12	-0.044		11.88
E274	509245	1078789	978197.79	978180.18	-1.542	17.60	-0.47	-0.168		17.30
E275	512160	1069740	978193.27	978177.73	-1.634	15.54	-0.50	-0.178		15.21
E276	509990	1059472	978194.86	978194.76	2.233	0.10	0.69	0.243		0.55
E277	506210	1059945	978176.41	978196.01	36.050	-19.59	11.07	3.928		-12.45
E278	501903	1058752	978175.24	978197.29	30.707	-22.06	9.43	3.346		-15.97
E279	498684	1059834	978172.84	978198.52	59.142	-25.68	18.17	6.444		-13.96
E280	511500	1031525	978190.27	978167.61	-4.527	22.66	-1.39	-0.493		21.76
E281	506642	1030356	978175.77	978167.30	10.485	8.47	3.22	1.142		10.55
E282	502643	1027600	978175.60	978166.59	20.684	9.01	6.35	2.254		13.11
E283	499760	1023811	978176.68	978165.61	28.176	11.07	8.66	3.070		16.66

ตาราง 5.1 ข้อมูลความถ่วงที่ได้จากการวัดในพื้นที่จังหวัดระนอง (ต่อ)

Station	east	north	g_obs	g_ref	H	g_lat	FAC	BC	TC	BA
			mgal	mgal	m	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.	g.u.
E284	497269	1019692	978172.48	978164.54	30.139	-10.04	10.17	3.608	0.981	-2.49
E285	511067	1036621	978187.05	978168.94	0.876	-4.57	4.69	1.663	1.159	-0.38
E286	513596	1038211	978189.92	978169.35	26.341	-2.32	2.19	0.776	0.167	-0.74
A005	520010	1037539	978213.258	978168.5677	-7.22	4.34	-4.19	-1.485	0.003	1.64
A081	518445	1037830	978214.44	978169.18	-11.156	4.56	-5.67	-2.011	0.003	0.91
A000	519140	1035206	978212.31	978169.25	-10.620	12.46	-7.32	-2.597	0.036	7.77

ภาคผนวก ข

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ด้วยโปรแกรม Geo Vista AB-GMM, version 1.31 มีดังต่อไปนี้

Model file created by the program GMM
during interpretation of data file : 480.dat
Ranong Geothermal area profile 480.DAT

8	;Total number of bodies in model
41144	;Magnitude of terrestrial field
1.1	;Inclination of terrestrial field
-0.6	;Declination of terrestrial field
2750	;Surrounding density
0.000015	;Surrounding susceptibility

1	;Internal body number
2550	;density of body, 0=surrounding
0.01	;suscept. of body, 0=surrounding
0	;Remanent/induced magnetization
0	;Inclination of remanence, positive down
0	;Declination of remanence, pos. clockwise
21	;Surrounding body, = 21 if none
20606.3	;strike length
1043807	;N-coordinate of body reference point
90	;strike angle from North anti-clockw.

```
                    9   ;Number of corners in body
480000.0   3321.3       ;E-coord & depth of corner   1
490819.3   2543.7       ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
494941.0   2802.9       ;      ---  "  ---          3     --  "  --
505502.5   4012.4       ;      ---  "  ---          4     --  "  --
528944.4   5135.5       ;      ---  "  ---          5     --  "  --
536157.3   6690.5       ;      ---  "  ---          6     --  "  --
545173.4   7208.9       ;      ---  "  ---          7     --  "  --
553416.4   8332.0       ;      ---  "  ---          8     --  "  --
457588.6   8072.8       ;      ---  "  ---          9     --  "  --
---------------------------------------------------------------------
                    3   ;Internal body number
                 2550   ;density of body, 0=surrounding
                0.035   ;suscept. of body, 0=surrounding
                    0   ;Remanent/induced magnetization
                    0   ;Inclination of remanence, positive down
                    0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                    1   ;Surrounding body, =  21 if none
              13403.7   ;strike length
              1057202   ;N-coordinate of body reference point
                   90   ;strike angle from North anti-clockw.

                    4   ;Number of corners in body
480001.6   8072.8       ;E-coord & depth of corner   1
478224.6   4308.0       ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
483608.0   4444.3       ;      ---  "  ---          3     --  "  --
484458.6   8109.3       ;      ---  "  ---          4     --  "  --
-------------------     ------------------------------------------------
```

```
                4   ;Internal body number
             2550   ;density of body, 0=surrounding
            0.005   ;suscept. of body, 0=surrounding
                0   ;Remanent/induced magnetization
                0   ;Inclination of remanence, positive down
                0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
               21   ;Surrounding body, =  21 if none
          31429.3   ;strike length
          1042776   ;N-coordinate of body reference point
               90   ;strike angle from North anti-clockw.

               14   ;Number of corners in body
506207.4   4012.4    ;E-coord & depth of corner   1
519602.5   2889.3    ;     ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
522694.3   2457.3    ;     ---  "  ---          3    --  "  --
530422.3   3407.6    ;     ---  "  ---          4    --  "  --
534028.4   4617.1    ;     ---  "  ---          5    --  "  --
537892.9   6344.9    ;     ---  "  ---          6    --  "  --
544848.4   6863.3    ;     ---  "  ---          7    --  "  --
553349.4   7036.1    ;     ---  "  ---          8    --  "  --
559274.3   6172.2    ;     ---  "  ---          9    --  "  --
567002.3   5653.8    ;     ---  "  ---         10    --  "  --
571638.9   6085.8    ;     ---  "  ---         11    --  "  --
577305.9   6863.3    ;     ---  "  ---         12    --  "  --
585291.9   7813.6    ;     ---  "  ---         13    --  "  --
491524.4   7900.0    ;     ---  "  ---         14    --  "  --
----------------    ------------------------------------------------

               5   ;Internal body number
            2550   ;density of body, 0=surrounding
```

```
                0.01   ;suscept. of body, 0=surrounding
                   0   ;Remanent/induced magnetization
                   0   ;Inclination of remanence, positive down
                   0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                  21   ;Surrounding body, =  21 if none
              9813.5   ;strike length
             1042583   ;N-coordinate of body reference point
                  90   ;strike angle from North anti-clockw.

                  10   ;Number of corners in body
464440.9   4077.2      ;E-coord & depth of corner   1
469566.3   3398.1      ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
474203.2   3138.9      ;      ---  "  ---          3     --  "  --
476135.2   3398.1      ;      ---  "  ---          4     --  "  --
482317.7   6054.6      ;      ---  "  ---          5     --  "  --
514415.9   5977.8      ;      ---  "  ---          6     --  "  --
521306.7   6863.3      ;      ---  "  ---          7     --  "  --
530837.9   7208.9      ;      ---  "  ---          8     --  "  --
539081.1   8332.0      ;      ---  "  ---          9     --  "  --
442995.3   7986.4      ;      ---  "  ---         10     --  "  --
----------------       --------------------------------------------------
                   6   ;Internal body number
                2650   ;density of body, 0=surrounding
                   0   ;suscept. of body, 0=surrounding
                   0   ;Remanent/induced magnetization
                   0   ;Inclination of remanence, positive down
                   0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                  21   ;Surrounding body, =  21 if none
              7426.7   ;strike length
```

```
                1061626   ;N-coordinate of body reference point
                   75.8   ;strike angle from North anti-clockw.

                      5   ;Number of corners in body
456866.3     17.3         ;E-coord & depth of corner   1
472805.5     28.8         ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
469907.6    611.9         ;      ---  "  ---          3     --  "  --
464633.0    639.3         ;      ---  "  ---          4     --  "  --
458952.9    367.1         ;      ---  "  ---          5     --  "  --
--------------------      ----------------------------------------------------
                      7   ;Internal body number
                   2650   ;density of body, 0=surrounding
                      0   ;suscept. of body, 0=surrounding
                      0   ;Remanent/induced magnetization
                      0   ;Inclination of remanence, positive down
                      0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                     21   ;Surrounding body, =  21 if none
                 10815.3   ;strike length
                1079200    ;N-coordinate of body reference point
                   82.9    ;strike angle from North anti-clockw.

                      5   ;Number of corners in body
460000.9     28.8         ;E-coord & depth of corner   1
483957.9     28.8         ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
481059.9    806.3         ;      ---  "  ---          3     --  "  --
466136.7   1583.8         ;      ---  "  ---          4     --  "  --
462126.1   1454.2         ;      ---  "  ---          5     --  "  --
--------------------      ----------------------------------------------------
                      8   ;Internal body number
```

```
                2650   ;density of body, 0=surrounding
                   0   ;suscept. of body, 0=surrounding
                   0   ;Remanent/induced magnetization
                   0   ;Inclination of remanence, positive down
                   0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                  21   ;Surrounding body, =  21 if none
             18031.2   ;strike length
             1026547   ;N-coordinate of body reference point
                  90   ;strike angle from North anti-clockw.

                   6   ;Number of corners in body
497676.8     38.4      ;E-coord & depth of corner   1
562335.1     38.4      ;      ---  "  ---          2 (with strike=0.0)
557183.5    815.9      ;      ---  "  ---          3     --  "  --
539794.9   1889.1      ;      ---  "  ---          4     --  "  --
528331.9   1852.6      ;      ---  "  ---          5     --  "  --
503988.0    593.2      ;      ---  "  ---          6     --  "  --
-------------------    ----------------------------------------------------
                   9   ;Internal body number
                2650   ;density of body, 0=surrounding
                   0   ;suscept. of body, 0=surrounding
                   0   ;Remanent/induced magnetization
                   0   ;Inclination of remanence, positive down
                   0   ;Declination of remanence, pos. clockwise
                  21   ;Surrounding body, =  21 if none
             15445.6   ;strike length
             1097131   ;N-coordinate of body reference point
                  90   ;strike angle from North anti-clockw.
```

```
                    4   ;Number of corners in body
500000.4     38.4       ;E-coord & depth of corner   1
515456.6     38.4       ;      ---  "  ---           2 (with strike=0.0)
513395.7   1075.1       ;      ---  "  ---           3     --  "  --
504122.1   1075.1       ;      ---  "  ---           4     --  "  --
```

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Biological Science and Technology

GRAD-RESEARCH 2007 April 4 - 5, 2007

Biological Science and Technology

PROCEEDINGS

P R O C E E D I N G S

7th National Graduate Research Conference

GRAD-RESEARCH 2007

April 4 - 5, 2007

Prince of Songkla University,
Surat Thani Campus

Gravity Anomaly of Ranong Geothermal Area

E. Sanmuang,[1] W. Lohawijarn, and H. Duerrast

[1]Geophysics Program
Geophysics Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science,
Prince of Songkla University, HatYai, Songkhla.

ABSTRACT

Gravity measurements were conducted in the Ranong geothermal area. The purpose of this work is to determine the subsurface geological structures that might be directly or indirectly related to the hot springs in the Ranong geothermal area. A Low gravity anomaly of about -60 g.u. was observed on the granitic batholith of Cretaceous age with NE-SW strike direction. From gravity modeling, this batholith is at about 4 km depth when the density contrast of this granitic batholith to the surrounding rocks is -100 kg/m³. Most sites of hot springs in this area are on this batholith. It is possible that the heat source of hot spring water is radiogenetic heat generated from this batholith.

KEYWORDS : gravity anomaly, Ranong, hotspring

*Corresponding author Tel: +66-74 288724 E-mail: laek_geo@hotmail.com, warawuth.l@psu.ac.th, helmut.j@psu.ac.th

1. Introduction

Changwat Ranong is located about 590 km south of Bangkok, having seven hot-springs, namely; Wat Thapo tharam hot spring (RN1), Ban Thung Yo hot-spring (RN2), Ban Pom Rang hot-spring (RN3), Khlong Bang Rin hot-spring (RN4), Raet Cha Grood hot-spring (RN5), HatYai hot-spring (RN6) and Ban Na hot-spring (RN7). Previous geological studies reported these hot springs in Changwat Ranong are associated with a granite rock and heat sources of these thermal systems may be high heat flow from heat generating capacity of granite or radiogenetic heat from granitic rock (Chaturongkawanich and Leevongchareon, 2000).

Previous hydro-geological and electrical resistivity sounding investigations disclosed three layers of ground near a hot-spring area in Changwat Ranong. The top layer comprises mainly soil, sand, and clay and its thickness is less than 6 m. The second layer, an aquifer layer, is consisted of sand, gravel, and weathering granite. The thickness of the second layer is about 17 m. The third layer is fresh granite with large fractures at different depths. These fractures are filled with sand and enable groundwater to flow from high potential to low potential areas (Dept. Min, 1997)

Geophysical methods utilize contrasts in physical properties of subsurface structures in delineating subsurface plutons or fault systems within the study area. The common methods are gravity method (Kalong, 1983; Hunt and others, 2002; Kheawtawan, 2004).

In this paper, gravity anomaly of the study area and its preliminary qualitative and quantitative interpretation will be presented. This will enhance an understanding on geology at depths of the study area that might be related to hot-springs.

2. Tectonic and geological setting

Most geothermal resources in Thailand are controlled by tensional and strike-slip tectonics in association with seismically active faults and shallow to deep igneous bodies (Charusiri et al., 2000). The major fault in this study area is Ranong Fault. Its strike lies in NE-SW direction along the Andaman coast with maximum length of 300 km and width of about 50 km. Whereas Chaturongkawanich and Leevongchareon (2000) reported that the strikes of major faults and fractures controlling the hot springs system in Changwat Ranong are in NW-SE, E-W, and N-S directions.

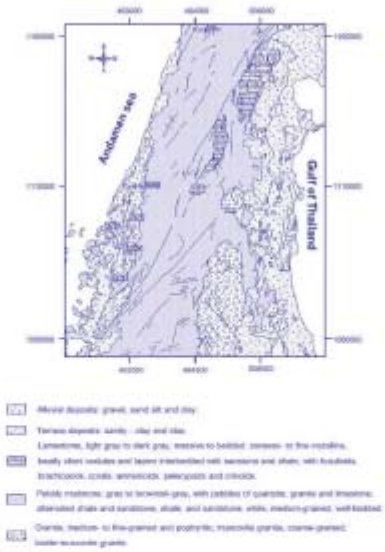


Figure 1. Geological and structure map of Chaugwat Ranong.

The geological map of the study area (Figure 1) shows the distribution of sedimentary and metamorphic rock of Carboniferous to Permian age, granite emplacement in Cretaceous age, and the Quaternary sediment. The Carboniferous rock is in the Kaeng Krachan formation. It comprises mainly sedimentary rock unit are greywacke to pebbly sandstone, siltstone, claystone, arkosic sandstone and conglomeratic sandstone and its metamorphic rock unit is composed of gneiss, schist, quartzite and hornfels. Permian limestone manifests itself as a line of isolated hills in the eastern part of the study area. Along the eastern and the western coasts of the study area lays young sediment of Quaternary age. Igneous rock in this area is granite and it may be heat source of the geothermal system.

3. Research methodology

The gravity measurement was carried out with the LaCoste & Romberge gravity meter, model G565. Two hundred and seventy nine stations were established with a spacing of about 0.5, 1 and 5 km along accessible roads in the study area. The measurements were conducted in leap-frog loops with 2 to 3 hour closing loop period. The location of measuring points was determined with a Trimble Path-Finder basic plus GPS system. The elevation of measuring points was determined with an Americal Paulin altimeter, MDM5.

The measured gravity values were corrected for the effects of instrumental drift and tides, latitude, elevation, and surrounding terrain (Telford et al., 1998). Hammer chart was used for terrain corrections and the largest radius of the Hammer chart for the present study is 4453.74 m. The corrected data, named Bouguer anomaly, is the gravity anomaly at mean sea level. All data were tied to the PSU base station in HatYai whose absolute gravity is 9781219.8 gu.

The Bouguer anomaly map of the study area was drawn for qualitative and quantitative interpretation. The interpretational constrains are the surface geological

information obtained from geological field work and geological map of the study area.

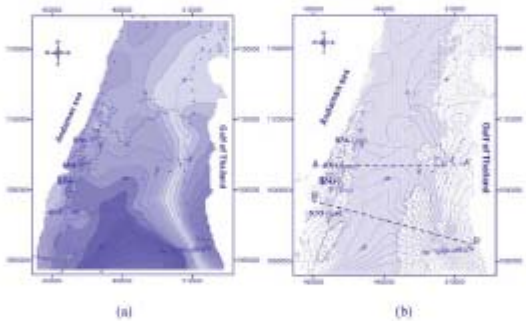
In addition, hand specimens of rocks in the study area were collected from their outcrops and their densities were determined in the PSU geophysics laboratory. The specimens comprise 8 samples of granite rock, 8 samples of Carboniferous-Permian rock and 7 samples of Quaternary sediment. The density information will beused in gravity modeling in order to construct the subsurface geological structure of the study area.

4. Results and discussion

4.1 Bouguer anomaly map

Bouguer anomaly map of the study area with a contour interval of 25 g.u. is shown in Figure 2. The general tread of the Bouguer anomaly is in NE-SW direction, or roughly parallel to the Ranong Fault in the NW of the study area. Bouguer anomaly of less than -125 g.u is observed in the southern part of the study area whereas the anomaly which is greater than 0 g.u. are observed in the eastern coast, and hot-springs are located at areas of intermediate gravity value, i.e. -100 to 0 g.u.

A prominent negative anomaly appears this area; it can be indisputably associated with the presence of less dense rocks in this hot spring area, where numerous granite intrusions outcrop. Measured densities of rock samples in the study are the followings; 2450-2750 kg/m³ for granite rock, 1850-2350 kg/m³ for Quaternary sediment and 2150-2450 kg/m³ for rock of Carboniferous-Permian. The negative anomaly results from density contrast between the intrusive rocks and the surrounding rocks. If assumed density of intrusive rock is 2620 kg/m³, the density of surrounding should be higher than the density of intrusive rocks.



(a) (b)

Figure 2. Caption, then followed with (a) distribution of the gravity stations in the study area. and (b) divided zones of gravity anomaly of the study area into high, intermediate and low anomaly zone.

In the present study, subsurface geological structures of the study area were modeled on two gravity profiles, AA' and BB' as the followings;

4.2. Subsurface geological model of the profile AA'

Gravity anomaly and subsurface geological model of the profile AA' are shown in Figure 4. The profile AA' is about 80 km long and runs across the thermal spring RN1 (Figure 2,b). The anomalies on the western and eastern ends of the profile are about 120 g.u. higher than the anomaly in the central part of the profile (Figure 3). In gravity modeling, rocks with density of 2700 kg/m³ were assigned as the basement rock. Fresh granite of 2630 kg/m³ in density and weathered granite of 2500 kg/m³ in density were modeled to explain low gravity anomaly at x=460,000, whereas Carboniferous-Permian rocks of 2350 kg/m³ in density was modeled to explain large and low gravity anomaly in the central part of the profile. In addition, Permian limestone of 2500 kg/m³ and shallow basement rock was modeled to explain high anomaly at the east end of the profile.

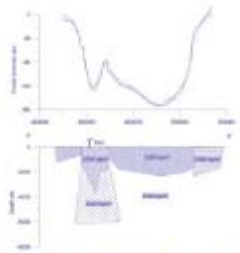


Figure 4. Gravity anomaly on profile AA' and its geophysical model.

4.3 Subsurface geological model of the profile BB'

The profile BB' is about 70 km long and does not runacross anyhot-spring (Figure 5). The residual Bouguer anomaly on the western and eastern ends of the profile are about 170 g.u. higher than the anomaly on the eastern part of the profile. In gravity modeling, Carboniferous-Permian rock of 2350 kg/m^3 in density was modeled to explain large and low gravity anomaly in the central part of the study area. In order to make the interpreted subsurface geological model agree with the surface geological information, granitic rocks of 2630 kg/m^3 in density were modeled at both end of the profile. This makes the calculated anomaly obtained from geological model agrees with observed anomaly at both ends of the profile.

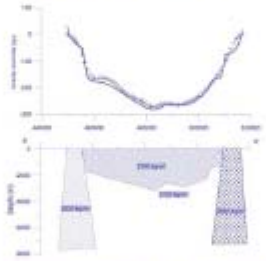


Figure 5. Gravity anomaly on profile BB' and its geophysical model.

5. Conclusion

Subsurface geological structures Ranong geothermal area was, preliminary, modeled from the observed gravityanomaly of the study area. The surface geological information obtained from field investigation and available geological map were used as constrains of the gravity model. It is likely that hot-springs in the study area associate with granitic rocks in the study area and low density in upper part of granite is probably caused by fractures in granitic rock which act as pathways of geothermal water from heat sources at depths.

Acknowledgments

The authors would like to the Thailand Toray Science Foundation and Graduate School of Prince of Songkla University for research fund available for this study. Many thanks also to the International Programmed in the Physical Sciences of Uppsala University in Sweden for research equipment and interpretation softwares.

References

Chaiarongkawanich, S. and Leevongchareon, S. 2000. The Geothermal Resources of Changwat Ranong Southern Thailand, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28-June10, 2000, 1049-1052.

Charusiri, P., Chaiarongkawanich, S., Takashima, I., Kosuwan, S., Won-in, K., and Ngo Ngoccat., 2000, The Geothermal Resources of Changwat Ranong Southern Thailand, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28-June10, 2000, 1049-1052.

Hunt, T., Sugihara, M., Saito, T., and Takemura, T. 2002. Measurement and use of the vertical gravity gradient in correcting repeat microgravity measurements for the effects of ground subsidence in geothermal systems. Geothermics. Volume 31, no. 5, 525-543.

Department of Mineral Resources. 1997. Geothermal resources of Changwat Ranong. Bangkok. Department of Mineral Resources (in Thai).

Kalong, W. 1983. A report of geophysical survey in Ban Pong, Kum, Amphoe Doi Saket, Changwat Chiangmai, Geophysics Section, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp 14 (in Thai).

Khawtawan, A., Lohawijarn, W., and Tonnayopas, D. 2004, International Conference on Applied Geophysics, Chiang Mai, Thailand, November 26-27, 2004, 15-21.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1998. Applied Geophysics Second Edition, Cambridge University, New York, U.S.A., pp. 10-18.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล เอกชัย สันเมือง

รหัสนักศึกษา 4822121

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	สถานศึกษา	ปีการศึกษา
วิทยาศาตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2547

ประวัติการทำงาน

ตำแหน่ง	สถานที่ทำงาน	ปี พ.ศ.
Trainee Mud Logger	International Logging SA.	2550
Mud Logger	Weatherford SLS	2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sanmuang. E, Lohawijarn. W, and Duerrast H. 2007. Gravity anomaly of Ranong Geothermal area. 7th National Graduate Research Conference. Prince of Songkla University Surat Thani Campus. 4-5 April 2007. pp 244-248.

Lohawijarn, W., Sanmuang, E., Khoonphunnarai, P. and Duerrast, H., 2007. The origin of hotsprings in Ranong Province, Southern Thailand. Proceedings of the GEOTHAI'07 International Conference. Bangkok. 21-22 December 2007.