

การสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์เพื่อการออกแบบและการพัฒนา

นายณรงค์ศักดิ์ ราชูการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SAND DEPOSITS EXPLORATION BY GEOPHYSICAL METHODS
FOR DESIGN AND DEVELOPMENT

Mr. Narongsak Rachukarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering
Department of Mining and Petroleum Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์
	เพื่อการออกแบบและการพัฒนา
โดย	นายณรงค์ศักดิ์ ราชูการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ทรงวุฒิ อาทิตย์ทอง)

ณรงค์ศักดิ์ ราชการ : การสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์เพื่อการ
 ออกแบบและการพัฒนา (SAND DEPOSITS EXPLORATION BY GEOPHYSICAL
 METHODS FOR DESIGN AND DEVELOPMENT). อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 ผศ.ดร.สุนทร พุ่มจันทร์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.ฐานบ ธิติมากร, 111 หน้า

ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีธรณีฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้กับการหาแหล่งสะสมตัวของทราย โดยการ
 สำรวจธรณีฟิสิกส์ที่นำมาใช้ ประกอบด้วย การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน การสำรวจวัดค่าสภาพ
 ดัชนีทานไฟฟ้า การสำรวจด้วยวิธีธรณีเรดาร์ และการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งผลที่
 ได้จากการสำรวจทั้ง 4 วิธีจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและการพัฒนาบ่อทราย การแปล
 ความหมายข้อมูลจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 แบบ จะได้แบบจำลองการสะสมตัวของชั้นทราย
 และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากหลุมเจาะ ซึ่งผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี
 ธรณีฟิสิกส์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างการกระจายตัวของทราย สามารถสรุปเป็นปริมาณสำรองและ
 ลักษณะการสะสมตัวของทรายได้ จากการแปลความหมายข้อมูลจะได้ขอบเขตและความหนาของ
 ชั้นทราย การวางตัวของเปลือกดิน ระดับน้ำใต้ดินและขอบเขตรอยต่อระหว่างชั้นต่างๆ เมื่อนำ
 แบบจำลองที่ได้จากผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 แบบ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ พบว่า
 การสำรวจวัดค่าสภาพดัชนีทานไฟฟ้า เป็นวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมที่สุดในการหาแหล่ง
 สะสมตัวของทราย โดยแบบจำลองทางธรณีวิทยาที่ได้จากวิธีนี้แสดงความต่อเนื่องของการสะสม
 ตัวของชั้นทรายและขอบเขตระหว่างรอยต่อกับชั้นต่างๆอย่างชัดเจน ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จะส่งผลให้
 การคำนวณปริมาณสำรองมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด และในการปฏิบัติงานภาคสนามสามารถเก็บ
 ข้อมูลและวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว ผลสรุป ในการศึกษาครั้งนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าการสำรวจวัดค่าสภาพ
 ดัชนีทานไฟฟ้าเป็นวิธีที่เหมาะสมและน่าเชื่อถือมากที่สุดในการสร้างแบบจำลองธรณีฟิสิกส์ได้พิ
 ดินเพื่อการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทราย สามารถช่วยลดจำนวนหลุมเจาะและลดค่าใช้จ่ายในการ
 สำรวจและสุดท้ายนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อการออกแบบและการพัฒนาบ่อทรายได้

ภาควิชา	วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา	2556	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370424621: MAJOR GEO-RESOURCE ENGINEERING

KEYWORDS: APPLIED GEOPHYSICS; GEOPHYSICAL METHODS FOR SAND DEPOSITS; SAND EXPLORATION

NARONGSAK RACHUKARN: SAND DEPOSITS EXPLORATION BY GEOPHYSICAL METHODS FOR DESIGN AND DEVELOPMENT. ADVISOR: ASST.PROF. SUNTORN PUMJAN, Ph.D., CO-ADVISOR: THANOP THITIMAKORN, Ph.D., 111 pp.

In this study, four geophysical methods were adapted for the sand deposit exploration. The adapted geophysical exploration methods are seismic survey, resistivity survey, ground penetrating radar survey (GPR) and magnetic survey. The results of subsurface geological features, in this case the distribution of sand formation, will provide the basis for the sand pit design and development. In this attempt, the results interpreted from these four geophysical models will be compared in reference to the actual drill holes data. The geophysical survey provides the spatial images of sand formation distribution and also reveal its physical characteristics which in turns can summarize into its overall quantity of reserve and nature of deposit. The interpreted data also presents the extension and thickness of sand layer, overburden, water table, and the boundaries of other layers. The comparison results of these four derived geological models to the drill hole data lead to the conclusion that the resistivity survey is the most suitable geophysical exploration method for sand deposit exploration. The geological model derived from resistivity data generates the most continuity of sand layer and also provides a sharp distinction along the boundary of the deposit, thus the most reliable information for reserve calculation. In term of field operation, resistivity survey yields fast data collection and analysis. In summary, this study shows that the resistivity survey proven to be most suitable and reliable surface geophysical model for sand deposit exploration. This technique can reduce the number of drill hole, and then reduce the exploration cost and finally improve the sand pit design and development.

Department:	Mining and Petroleum Engineering	Student's Signature.....
Field of Study:	Geo-Resource Engineering	Advisor's Signature.....
Academic Year:	2013	Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์เพื่อการออกแบบและการพัฒนา จะไม่สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงได้ หากขาดซึ่งคุณูปการจากบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการทำป๋อทราย

อาจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการเก็บข้อมูลโดยวิธีธรณีฟิสิกส์ พร้อมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลอง

บริษัท CPAC (บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่เก็บข้อมูลภาคสนามและให้การสนับสนุนด้านเงินทุน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้สนับสนุนด้านเงินทุนสำหรับทำวิทยานิพนธ์

และขอขอบคุณ ดร.สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช นายธนกฤต ทองขาว บุคลากรและน้องๆทุกคนจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนามเก็บข้อมูล

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งงานเก็บข้อมูลภาคสนาม เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยและคำแนะนำต่างๆ ฯลฯ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 การแบ่งประเภทของทราย.....	6
2.1.1.1 ทรายแม่น้ำ.....	6
2.1.1.2 ทรายบก.....	6
2.1.2 ลักษณะของทรายก่อสร้าง.....	7
2.1.3 การผลิตทราย.....	7
2.1.3.1 การผลิตทรายแม่น้ำ.....	7
2.1.3.2 การผลิตทรายบก.....	8
2.1.4 การศึกษาพื้นที่ศักยภาพแหล่งทราย.....	8
2.2 ธรณีฟิสิกส์.....	9
2.2.1 การสำรวจวัดด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์.....	10
2.2.1.1 สนามที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ.....	10
2.2.1.2 สนามที่ต้องสร้างขึ้น.....	10

	หน้า
2.2.2 ข้อมูลที่คาดว่าจะได้รับจากการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทราย โดยวิธีธรณีฟิสิกส์.....	
2.2.3 ประโยชน์ของการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทราย โดยวิธีธรณีฟิสิกส์.....	12
2.3 วิธีสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน.....	13
2.3.1 ส่วนประกอบของคลื่นกล.....	14
2.3.2 คลื่นไหวสะเทือน.....	14
2.3.2.1 คลื่นตัวกลาง.....	15
2.3.2.1.1 คลื่นตามยาว.....	16
2.3.2.1.2 คลื่นตามขวาง.....	16
2.3.2.2 คลื่นผิวดิน.....	16
2.3.2.2.1 คลื่นเรลีย์.....	16
2.3.2.2.2 คลื่นเลิฟ.....	16
2.3.3 ความเร็วคลื่นไหวสะเทือน.....	17
2.3.3.1 สภาพยืดหยุ่น.....	17
2.3.4 วิธีสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน.....	17
2.3.4.1 การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน.....	23
2.3.4.2 การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห.....	23
2.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน.....	23
2.3.6 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดด้วยคลื่นสั้นสะเทือน.....	28
2.4 การสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	31
2.4.1 การวางขั้วอิเล็กโทรด.....	33
2.4.1.1 แบบเวนเนอร์.....	37
2.4.1.2 แบบชลัมเบอร์เจอร์.....	37
2.4.1.3 แบบไดโพล-ไดโพล.....	38
2.4.1.4 แบบโพล-ไดโพล.....	38
2.4.2 เครื่องมือสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	38
2.4.3 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	39
2.5 การสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	41

	หน้า
2.5.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก.....	43
2.5.1.1 เฟอร์โรแมกเนติก.....	43
2.5.1.2 พาราแมกเนติก.....	44
2.5.1.3 ไดอะแมกเนติก.....	44
2.5.2 ความแรงสนามแม่เหล็ก.....	44
2.5.3 ความไหวตัวได้ทางแม่เหล็ก.....	45
2.5.4 เครื่องมือสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	46
2.5.4.1 สเตลาร์แมกนีโตมิเตอร์.....	46
2.5.4.1.1 โปรตอนพรีเซชัน แมกนีโตมิเตอร์.....	46
2.5.4.1.2 ออฟดิคัลลิฟัมพ์ แมกนีโตมิเตอร์.....	48
2.5.4.2 เวกเตอร์แมกนีโตมิเตอร์.....	49
2.5.4.2.1 ฟลักซ์เกตแมกนีโตมิเตอร์.....	49
2.5.4.2.2 สตีดแมกนีโตมิเตอร์.....	50
2.5.5 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	50
2.6 การสำรวจธรณีเรดาร์ (Ground penetrating radar, GPR).....	51
2.6.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	51
2.6.1.1 การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในดิน.....	53
2.6.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดธรณีเรดาร์.....	56
2.6.3 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจธรณีเรดาร์.....	57
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	58
2.8 พื้นที่ศึกษา.....	59
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 การสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW.....	62
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW.....	63
3.1.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW.....	64
3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW.....	66
3.2 วิธีการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	67
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	68
3.2.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	69

	หน้า
3.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพด้านทานไฟฟ้า.....	71
3.3 วิธีการสำรวจchnerเรดาร์.....	72
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจchnerเรดาร์.....	72
3.3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีchnerเรดาร์.....	73
3.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลchnerเรดาร์.....	74
3.4 วิธีการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	75
3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	75
3.4.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	76
3.4.2 การวิเคราะห์ผลและการนำเสนอข้อมูล.....	76
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	77
4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลchnerฟิสิกส์ 4 วิธี.....	77
4.1.1 ผลการสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW.....	77
4.1.2 ผลการสำรวจวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า.....	78
4.1.3 ผลการสำรวจchnerเรดาร์.....	79
4.1.4 ผลการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	80
4.1.5 ข้อมูลหลุมเจาะ.....	80
4.1.6 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลchnerฟิสิกส์กับข้อมูลหลุมเจาะ.....	83
4.2 การสำรวจวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าครอบคลุมทั้งพื้นที่.....	86
4.3 ผลการเก็บข้อมูลทั้งพื้นที่ด้วยวิธีวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า.....	88
4.4 การคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทราย.....	89
บทที่ 5 การออกแบบและการพัฒนาบ่อ.....	92
5.1 การวางแผนงานและการออกแบบบ่อทราย.....	92
5.1.1 การวางแผนดำเนินงาน.....	92
5.1.2 การออกแบบพื้นที่ดำเนินงานและการพัฒนาบ่อทราย.....	93
5.2 ขั้นตอนการผลิตทราย.....	97
5.3 มาตรการและแผนปฏิบัติ ด้านสิ่งแวดล้อมในการขุด ตัก และคูทรายบก.....	98
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
6.1 สรุปผลการวิจัยด้วยวิธีการสำรวจทางchnerฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี.....	100
6.2 สรุปผลการสำรวจทั้งพื้นที่ด้วยวิธีวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า.....	101

	หน้า
6.3 สรุปผลการออกแบบและการพัฒนาบ่อทราย.....	101
6.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	102
6.4.1 วิธีธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมที่สุด.....	102
6.4.2 การลดค่าใช้จ่ายจากหลุมเจาะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการวัดค่าจากสนามธรรมชาติ และสนามที่ต้องสร้างขึ้น.....	11
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบวิธีการสำรวจและสมบัติทางกายภาพที่ตรวจวัด.....	12
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธี วัดคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเห.....	27
ตารางที่ 2.4 แสดงข้อดีข้อด้อยของการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน.....	32
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	42
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	50
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจวัดธรณีเรดาร์.....	58
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์แต่ละวิธี.....	85
ตารางที่ 4.2 แสดงพิกัดและระยะทางของแนวสำรวจ.....	86
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณเปลือกดิน.....	90
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 1.....	90
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 2.....	91
ตารางที่ 6.1 แสดงวิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 2 แบบที่เหมาะสมและปัจจัยต่างๆ.....	102

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงส่วนประกอบของคลื่นกล..... 15
รูปที่ 2.2	แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง..... 16
รูปที่ 2.3	แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเรลีย์และคลื่นเลิฟ..... 17
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความยืดหยุ่นของวัตถุ..... 18
รูปที่ 2.5	แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานคลื่น..... 21
รูปที่ 2.6	แสดงคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน..... 22
รูปที่ 2.7	แสดงการเดินทางของคลื่นจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ..... 24
รูปที่ 2.8	แสดงค่าความถี่ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดต่างๆ..... 28
รูปที่ 2.9	แสดงวงจรภายในตัวรับสัญญาณ..... 29
รูปที่ 2.10	แสดงผลตอบสนองสัมพันธ์กับความถี่ของตัวรับคลื่น..... 30
รูปที่ 2.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์และค่าสภาพต้านทาน.... 34
รูปที่ 2.12	แสดงลักษณะการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง... 35
รูปที่ 2.13	แสดงภาพการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า..... 36
รูปที่ 2.14	แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์..... 37
รูปที่ 2.15	แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบชรัมเบอร์เจอร์..... 38
รูปที่ 2.16	แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบไดโพล-ไดโพล..... 38
รูปที่ 2.17	แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบโพล-ไดโพล..... 39
รูปที่ 2.18	แสดงเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ารุ่น Syscal R1 plus..... 40
รูปที่ 2.19	แสดงสายเคเบิล ที่หนีบสายไฟและแท่งอิเล็กโทรด..... 41
รูปที่ 2.20	แสดงขั้วแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก..... 44
รูปที่ 2.21	ลักษณะของเครื่องโปรตอนพริเชสชัน แมกนีโทมิเตอร์..... 48
รูปที่ 2.22	ลักษณะของเครื่องฟลักซ์เกต แมกนีโทมิเตอร์..... 49
รูปที่ 2.23	ภาพแสดงหลักการการทำงานของเครื่อง GPR..... 52
รูปที่ 2.24	แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 55
รูปที่ 2.25	อุปกรณ์สำรวจธรณีเรดาร์..... 57

	หน้า
รูปที่ 2.27	แสดงพื้นที่ อ.ชุมพวงและพื้นที่ที่ทำการสำรวจทราย..... 60
รูปที่ 3.1	แสดงแนวสำรวจที่ใช้ในการเปรียบเทียบ..... 61
รูปที่ 3.2	แสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW..... 62
รูปที่ 3.3	แสดงขั้นตอนการสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW..... 65
รูปที่ 3.4	แสดงการประมวลผลข้อมูล MASW..... 66
รูปที่ 3.5	แสดงเครื่องมือเครื่องมื่อที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า..... 67
รูปที่ 3.6	แสดงรูปแบบการเก็บข้อมูลโดยโปรแกรม Electre II..... 69
รูปที่ 3.7	แสดงขั้นตอนการสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า..... 70
รูปที่ 3.8	แสดงการกรองข้อมูลด้วยโปรแกรม Prosys II..... 71
รูปที่ 3.9	แสดงเครื่องมือสำรวจธรณีเรดาร์..... 72
รูปที่ 3.10	แสดงการสำรวจด้วยวิธีธรณีเรดาร์..... 74
รูปที่ 3.10	แสดงเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก Proton magnetometer รุ่น G-856..... 75
รูปที่ 3.11	แสดงการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก..... 76
รูปที่ 4.1	แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผล MASW ทั้ง 100 จุด..... 77
รูปที่ 4.2	แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า..... 78
รูปที่ 4.3	แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลธรณีเรดาร์..... 79
รูปที่ 4.4	แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก..... 80
รูปที่ 4.5	แสดงแนวสำรวจอ้างอิงกับตำแหน่งหลุมเจาะ..... 81
รูปที่ 4.6	แสดงข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะเพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลธรณีฟิสิกส์..... 82
รูปที่ 4.7	แสดงผลการเปรียบเทียบข้อมูลหลุมเจาะกับข้อมูลธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี..... 84
รูปที่ 4.8	แสดงแนวการสำรวจครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่..... 87
รูปที่ 4.9	แสดงผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าครอบคลุมทั้งพื้นที่... 88
รูปที่ 4.10	แสดงแนวการสะสมตัวของทรายชั้นแรก..... 89
รูปที่ 5.1	แสดงการจัดสรรพื้นที่ในกระบวนการทำบ่อทราย..... 96
รูปที่ 5.2	แสดงขั้นตอนการผลิตทรายบก..... 97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ทรายเป็นทรัพยากรธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่เหมาะสม ทั้งรูปร่าง ขนาด ความแข็งแรง ความคงทน ฯลฯ ในประเทศที่กำลังพัฒนาการใช้ทรัพยากรทรายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น การขยายเมือง การสร้างถนน อาคาร ตึก ฯลฯ จำเป็นต้องใช้ทรายเป็นส่วนประกอบหลักทั้งสิ้น อีกทั้งการก่อสร้างมีการกระจายไปในหลายพื้นที่ ส่งผลให้แหล่งทรายที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งส่วนใหญ่เป็นแหล่งทรายจากแม่น้ำ ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาแหล่งทรายแหล่งใหม่ๆเพื่อลดต้นทุนในการขนส่งและป้องกันปัญหาการขาดแคลนทรายในอนาคต

ทรายที่เราใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้มาจากการคัดทรายจากแม่น้ำ ซึ่งขณะนี้ปริมาณลดลงอย่างมากและคาดว่าในอนาคตจะไม่เพียงพอต่อการใช้งาน เพราะทรายมีปริมาณที่จำกัดและเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งการคัดทรายจากแม่น้ำก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากการคัดทรายจากแม่น้ำเป็นระบบเปิดยากแก่การควบคุม ก่อให้เกิดปัญหาน้ำขุ่น ตลิ่งพัง เป็นต้น ขณะที่การผลิตทรายจากแหล่งทรายบก เราสามารถทำเป็นระบบปิดได้ ควบคุมได้ง่ายกว่า ช่วยลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและจากแหล่งทรายที่มีอย่างจำกัดทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการขนส่งไปยังที่ต่างๆ ปัจจุบันจึงมีการสนใจหาแหล่งทรายบนบกที่ใกล้กับแหล่งใช้งานเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและแก้ปัญหาที่เกิดจากการคัดทรายแม่น้ำ รวมถึงปัญหาการขาดแคลนทรายในอนาคต การสำรวจหาแหล่งสะสมตัวของทรายบกแหล่งใหม่ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาประเทศในอนาคต

โดยปกติการหาแหล่งสะสมตัวของทรายบกจะกระทำโดยการใช้วิธีทางธรณีวิทยาศึกษาแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศลักษณะของทางน้ำเก่าและลักษณะการสะสมตัวของทราย เพื่อพิจารณาขอบเขตของบริเวณที่จะทำบ่อทราย ซึ่งวิธีการหาแหล่งสะสมตัวของทรายบกแบบนี้จะได้ข้อมูลแบบหยาบ เนื่องจากรู้ขอบเขตความกว้างที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถบอกความหนาความลึกและจำนวนชั้นของทรายได้ นอกจากจะทำการสุ่มเจาะเก็บแท่งตัวอย่างมาวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะแสดงเฉพาะตำแหน่งที่มีหลุมเจาะเท่านั้น หากต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาที่ต่อเนื่องและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างจะต้องเจาะหลุมเป็นจำนวนมาก แต่การสำรวจด้วยวิธีนี้สิ้นเปลืองงบประมาณสูง ดังนั้น การหาแหล่งสะสมตัวของตะกอนทรายด้วยวิธีทางธรณีวิทยาเพียงอย่างเดียว

ให้ข้อมูลที่หายากเกินไป การคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทรายที่ใกล้เคียงค่าจริงทำได้ยาก ส่งผลต่อการตัดสินใจและการออกแบบระบบการดูดทราย ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีทางธรณีฟิสิกส์เข้ามาช่วยในการสำรวจหาแหล่งทราย การสำรวจโดยวิธีนี้เป็นการศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของวัตถุ ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าสภาพต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กและค่าความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนที่ผ่านไปในตัวกลาง เป็นต้น สมบัติที่ต่างกันเหล่านี้สามารถแยกเป้าหมายที่เราต้องการศึกษาออกจากสิ่งรอบข้างได้ เมื่อนำวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้กับการสำรวจหาแหล่งสะสมตัวของทรายจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดและตำแหน่งการกระจายตัวของสมบัติทางกายภาพของตัวกลางชนิดต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์สามารถนำมาแปลความหมายเป็นข้อมูลทางธรณีวิทยา เพื่อบอกตำแหน่งและสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินเป็นภาพต่อเนื่อง 3 มิติได้ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลเกี่ยวกับขอบเขตพื้นที่และความหนาของการสะสมตัว ความหนาของชั้นผิวดิน ความลึกของระดับน้ำ ขอบเขตรอยต่อระหว่างชั้นต่างๆ เราสามารถนำข้อมูลที่ได้นี้มาแยกแหล่งสะสมตัวของตะกอนทรายออกจากสิ่งรอบข้างได้ จากนั้นทำการสุ่มเจาะเก็บแท่งตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลธรณีฟิสิกส์ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทรายที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งข้อมูลทั้งหมดสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจ การออกแบบระบบและกระบวนการผลิตให้เหมาะสมกับพื้นที่และศักยภาพของแหล่งทรายทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เพื่อการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1). สามารถประยุกต์ใช้วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เพื่อหาแหล่งทรายได้
- 2). สามารถนำข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์และข้อมูลหลุมเจาะมาคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทรายได้
- 3). เพื่อประยุกต์และออกแบบระบบการทำบ่อทรายให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะนำวิธีธรณีฟิสิกส์ 4 แบบ ได้แก่ วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า วิธีวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก และวิธีวัดด้วยคลื่นเรดาร์ มาประยุกต์ใช้กับการหาแหล่งสะสมตัวของทรายเป็น เพื่อเลือกวิธีธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมกับการหาแหล่งทรายเป็น โดย การนำผลที่วิเคราะห์ได้จากแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ จากนั้นนำวิธีธรณีฟิสิกส์ที่เลือก มาสำรวจให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่แล้วทำการคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทราย พิจารณา ลักษณะทางธรณีวิทยาที่ได้จากข้อมูลธรณีฟิสิกส์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและการ พัฒนาบ่อทราย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นการสำรวจธรณีฟิสิกส์กับแหล่งทรายเป็นสำคัญ ดังนั้น ใน ส่วนของการออกแบบและการพัฒนาบ่อทรายจะกล่าวในภาพรวมแบบคร่าวๆเพื่อการจัดสรรข้อมูล ที่มีอยู่และพื้นที่ที่เหมาะสม

1.4 ขอบจำกัดของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการสำรวจพื้นที่แหล่งสะสมตัวของทรายเป็น ซึ่งปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าว ต้องเป็นพื้นดิน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในครั้งนี้ไม่สามารถทำในน้ำได้

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การประยุกต์ใช้วิธีธรณีฟิสิกส์กับแหล่งทรายเป็น ธรณีฟิสิกส์ประยุกต์ การสำรวจแหล่งทรายเป็น

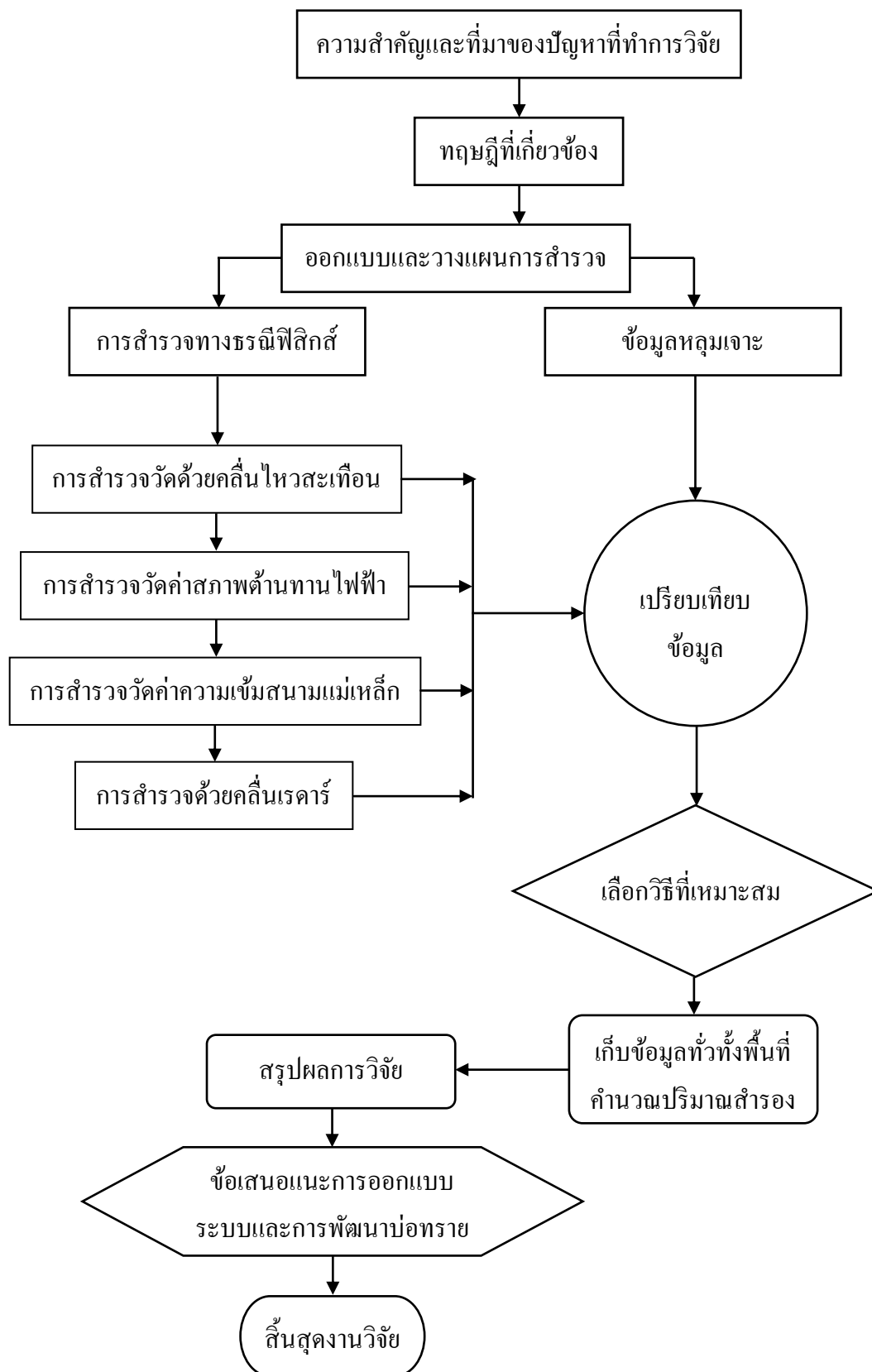
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการ	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง							
2. ศึกษาแผนที่และลักษณะการสะสมตัวของทราย							
3. ออกแบบและวางแผนการสำรวจ							
4. ทำการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์							
5. วิเคราะห์ข้อมูลที่สำรวจได้ พร้อมแปลความหมาย							
6. ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีธรณีฟิสิกส์							
7. ออกแบบระบบกระบวนการทำบ่อทรายให้เหมาะสมกับพื้นที่							
8. วิเคราะห์และสรุปผล							

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1). สามารถใช้วิธีธรณีฟิสิกส์หาแหล่งทรายใหม่ๆให้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานได้
- 2). สามารถหาและคำนวณปริมาณของทรายได้แม่นยำมากขึ้น
- 3). ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตทรายได้
- 4). มีข้อมูลแหล่งทรายเพื่อการใช้งานในอนาคตให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย



บทที่ 2

ข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ทราย (Sand) เป็นตะกอนชนิดหนึ่งที่เกิดจากหินต้นกำเนิด โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่างๆบนผิวโลก ได้แก่ การผุพัง การกัดกร่อนและการเคลื่อนที่ของมวลสาร ปกติหินต้นกำเนิดทรายจะประกอบด้วยแร่ควอตซ์เป็นหลัก เช่น หินแกรนิต หินทราย เป็นต้น หินต้นกำเนิดทรายเป็นได้ทั้ง หินอัคนี หินตะกอนและหินแปร แต่หินที่เป็นหินต้นกำเนิดทรายที่ดี คือ หินแกรนิต เนื่องจากหินแกรนิตมีปริมาณของแร่ควอตซ์สูง เมื่อผ่านกระบวนการต่างๆจะให้ปริมาณตะกอนทรายมาก และเมื่อมีการสะสมตัวกันมากพอก็จะกลายเป็นแหล่งทรายที่มีศักยภาพสูง

2.1.1 การแบ่งประเภทของทราย

ในการแบ่งประเภทของทราย ส่วนใหญ่จะแบ่งตามแหล่งกำเนิดซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1.1 ทรายแม่น้ำ คือ ทรายที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนตามแม่น้ำ โดยแม่น้ำทำหน้าที่ในการกัดเซาะและพัดพาตะกอนทรายและดินมาสะสมรวมกันตามแนวของลำน้ำจากการพัดพาตะกอนของแม่น้ำส่งผลให้ทรายแม่น้ำมีการคัดขนาดที่ดี เนื่องจากการขัดถูทำให้เม็ดทรายค่อนข้างกลมและแข็งแรง โดยเม็ดทรายที่มีขนาดโตจะสะสมตัวกันบนตลิ่งน้ำและทรายละเอียดอยู่บริเวณปลายน้ำ

2.1.1.2 ทรายบก คือ ทรายที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนโดยแม่น้ำ และปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวกลายเป็นพื้นดินไปแล้ว โดยชั้นทรายจะถูกปกคลุมด้วยหน้าดินหรือชั้นเปลือกดิน หากจะนำทรายบมาใช้ประโยชน์ต้องทำการเปิดหน้าดินออกก่อน ปกติหน้าดินจะมีความหนาประมาณ 1-5 เมตร แล้วแต่พื้นที่ โดยพื้นที่ที่มีการสะสมตัวของทรายบกส่วนใหญ่จะเป็นแนวแม่น้ำเก่า พื้นที่น้ำท่วมถึง บริเวณที่ราบเชิงเขา เป็นต้น

2.1.2 ลักษณะของทรายก่อสร้าง

ทรายเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญมากในงานก่อสร้าง งานคอนกรีตทุกประเภทต้องใช้ทรายเป็นส่วนผสมเพื่อความแข็งแรงทนทาน เนื่องจากทรายเป็นแร่ควอตซ์ที่ผ่านกระบวนการผุพัง การกัดกร่อนและการพัดพา มีการขุดสีจนมีขนาดเล็กมากมาย รูปร่างกลมมน ทำให้เม็ดทรายมีความแข็งแรงทนทานและที่สำคัญเป็นตัวช่วยผสมานซีเมนต์ให้ยึดเกาะดียิ่งขึ้น

ทรายสามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิดสำคัญ (สมชัย ชัยเสน, 2545) ได้แก่

ทรายละเอียด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.125-0.25 มิลลิเมตร

ทรายขนาดกลาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.25-0.5 มิลลิเมตร

ทรายหยาบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.5-1 มิลลิเมตร

ทรายหยาบมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-2 มิลลิเมตร

หากเม็ดตะกอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2-64 มิลลิเมตร ให้จัดว่าเป็นกรวด

2.1.3 การผลิตทราย

ในกระบวนการผลิตทราย สามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบด้วยกัน โดยแบ่งตามประเภทของทราย คือ ทรายแม่น้ำและทรายบก ซึ่งกระบวนการผลิตทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันตรงที่ทรายมีแหล่งกำเนิดที่ต่างกันทำให้มีขั้นตอนการขุด ตักและคัดทรายไม่เหมือนกัน แต่ในกระบวนการล้างและคัดแยกทรายสามารถใช้เครื่องมือและวิธีเดียวกันได้ เพื่อให้ได้ทรายที่มีคุณภาพสูง

2.1.3.1 การผลิตทรายแม่น้ำ เป็นการผลิตทรายที่อยู่ในแม่น้ำปัจจุบัน เนื่องจากในแม่น้ำปัจจุบันการไหลของกระแสน้ำ มีการกัดกร่อนและพัดพาตะกอนทรายไปพร้อมกัน ทำให้เกิดการกัดขนาดและสะสมตัวของทรายไปตามแนวของแม่น้ำ ในบางพื้นที่ที่มีปริมาณทรายสูงมากทำให้แม่น้ำบริเวณนั้นตื้นเขิน การผลิตทรายจากแม่น้ำ เริ่มจากการคัดทรายจากท้องน้ำขึ้นมาด้วยเรือคูดโดยตรง ซึ่งบนเรือคูดมีการติดตั้งปั๊มคูดแบบหอยโข่ง คูดทรายพร้อมกับน้ำขึ้นมาผ่านตะแกรงคัดขนาด เก็บไว้บนเรือเพื่อส่งต่อไปยังกระบวนการคัดขนาดต่อไป แต่การผลิตทรายโดยวิธีนี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก ส่งผลกระทบต่อประชาชนที่ใช้น้ำจากลำคลองโดยตรง เนื่องจากเป็นระบบเปิดไม่สามารถควบคุมน้ำขุ่นและการพังทลายของตลิ่งได้

2.1.3.2 การผลิตทรายบก เป็นการผลิตทรายที่เกิดจากการสะสมตัวจากทางน้ำเก่า ซึ่งปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวไม่มีแม่น้ำไหลผ่านแล้ว ส่วนใหญ่พื้นที่ที่ใช้ผลิตทรายบกจะอยู่ใกล้ๆกับแนวแม่น้ำปัจจุบัน เป็นพื้นที่น้ำท่วมถึงหรือมีร่องรอยการตัดผ่านของแม่น้ำเก่าเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายทางอากาศ การผลิตทรายบกเริ่มจากการเปิดชั้นหน้าดินออกก่อน เมื่อเจือชั้นทรายจะใช้รถตัก ตักทรายขึ้นมาเข้าสู่กระบวนการล้างและคัดขนาด เมื่อขุดลึกลงไปใทรายชั้นล่าง จนถึงระดับน้ำใต้ดินและบ่อทรายมีลักษณะเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่จะใช้เรือดูด คุตทรายขึ้นมา

2.1.4 การศึกษาพื้นที่ศักยภาพแหล่งทราย

ในการศึกษาพื้นที่ศักยภาพของแหล่งทราย มีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อประเมินว่าพื้นที่ในบริเวณนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดที่จะใช้เป็นแหล่งผลิตทราย โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าในการลงทุนและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีกระบวนการประเมิน 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้ (กองประสานการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555)

2.1.4.1 การศึกษาหาแหล่งสะสมตัวของทราย จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแผนที่ธรณีวิทยา ในมาตราส่วน 1:50,000 โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาและธรณีฐานของพื้นที่ พิจารณาค้นหาน้ำบาดาลในบริเวณโดยรอบ ดูความลาดชันของพื้นที่ แนวแม่น้ำปัจจุบันและทางน้ำในอดีต รวมทั้งข้อมูลการขุดตักทรายบริเวณใกล้เคียงทั้งในอดีตและปัจจุบัน นำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณาขอบเขตและลักษณะการสะสมตัวของทราย เพื่อกำหนดพื้นที่ศักยภาพทรายเบื้องต้น

2.1.4.2 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศักยภาพเบื้องต้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 เขต ดังนี้

2.1.4.2.1 เขต 0 หมายถึง บริเวณพื้นที่ศักยภาพต่ำ เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับแผนที่ทางธรณีวิทยาแล้วไม่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งทราย เนื่องจากลักษณะทางธรณีวิทยาไม่มีทรายไปสะสมตัวในบริเวณดังกล่าว เช่น บริเวณพื้นที่ภูเขา ได้แก่ ขอบสันห้วยหรือเป็นเขตพื้นที่อนุรักษ์ เช่น พื้นที่ต้นน้ำลำธารหรือเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า เป็นต้น

2.1.4.2.2 เขต 1 หมายถึง บริเวณพื้นที่ศักยภาพปานกลาง เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับแผนที่ทางธรณีวิทยาแล้ว มีศักยภาพในการให้ทรายได้บ้างแต่อยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากปริมาณทรายที่สะสมตัวมีน้อยเกินไปไม่คุ้มค่าในการลงทุน

2.1.4.2.3 เขต 2 หมายถึง บริเวณพื้นที่ศักยภาพสูง เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับข้อมูลทางธรณีวิทยาแล้วมีศักยภาพในการให้ทรายสูง เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีการสะสมตัวของทรายอยู่มาก ได้แก่ บริเวณลาดเชิงเขา ทางน้ำเก่า บริเวณที่มีน้ำท่วมถึง เป็นต้น มีความคุ้มค่าในการลงทุน

2.1.4.3 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยการศึกษาข้อมูลจากพื้นที่บริเวณใกล้เคียงที่มีการขุดตักทรายทั้งในอดีตและปัจจุบัน นำมาพิจารณาร่วมกับข้อมูลการเจาะเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความหนาและขอบเขตการกระจายตัวของแหล่งทราย

2.1.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรวบรวมได้ทั้งข้อมูลเก่าที่ได้จากฐานข้อมูลและการเก็บตัวอย่างจริงในภาคสนาม จากการเจาะสำรวจตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพของทราย พิจารณาความลึกและความหนาของทรายแต่ละชั้น คำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทราย

2.1.4.5 การจัดลำดับความเหมาะสมในการพัฒนาพื้นที่แหล่งทราย โดยการใช้ฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

2.2 ธรณีฟิสิกส์

คือ การนำความรู้ด้านฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้กับธรณีวิทยาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินจากการสำรวจวัดสมบัติทางกายภาพของวัตถุที่ต่างกัน สิ่งสำคัญของการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ คือ ในพื้นที่สำรวจวัตถุแต่ละชนิดต้องมีความแตกต่างทางกายภาพจากสิ่งรอบข้างมากพอและสามารถวัดได้จากเครื่องมือสำรวจ เป็นที่ทราบกันดีว่าวัตถุแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เช่น ความหนาแน่น ความต้านทานและการนำไฟฟ้า การตอบสนองต่อแม่เหล็ก เป็นต้น ดังนั้นวัตถุต่างชนิดกันย่อมมีค่าสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน

การนำวิธีธรณีฟิสิกส์มาสำรวจวัดสมบัติทางกายภาพของวัตถุใต้ผิวดิน ข้อมูลที่วัดได้จะเป็นลักษณะการกระจายตัวของสมบัติทางกายภาพแสดงปริมาณและขอบเขตการสะสมตัว สามารถนำข้อมูลธรณีฟิสิกส์มาแปลความหมายเป็นข้อมูลธรณีวิทยาได้เพื่อใช้จำแนกชนิดของวัตถุและบอกลักษณะการสะสมตัว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการบอกลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน

2.2.1 การสำรวจวัดด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

ในการสำรวจวัดด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ เราสามารถเลือกใช้วิธีการสำรวจได้หลายวิธีขึ้นกับสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวของวัตถุที่เราต้องการสำรวจ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงขนาดและความลึกด้วย โดยการตรวจวัดเราสามารถตรวจวัดได้จากสนาม 2 แบบ คือ

2.2.1.1 สนามที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ ในการสำรวจธรณีฟิสิกส์จากค่าสนามที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ คือ การวัดค่าความผิดปกติหรือหาค่าการรบกวนที่เกิดขึ้นในสนามธรรมชาติเหล่านั้น เช่น การวัดค่าสนามโน้มถ่วง การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็นต้น โดยทั่วไปการสำรวจธรณีฟิสิกส์แบบวัดสนามธรรมชาติสามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว และประหยัด

2.2.1.2 สนามที่ต้องสร้างขึ้น การสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าจากสนามที่สร้างขึ้น คือ การส่งสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นไหวสะเทือน ลงไปได้ผิวดินเพื่อไปรบกวน เหนี่ยวนำ หรือสะท้อนกลับขึ้นมาบนผิวดิน จากนั้นทำการวัดค่าการตอบสนองที่เกิดขึ้น เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการวัดสนามจากธรรมชาติ เนื่องจากต้องมีทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณและตัวรับสัญญาณ แต่วิธีนี้จะให้ความละเอียดของข้อมูลสูงและควบคุมสิ่งรบกวนได้ดีกว่า

ในการปฏิบัติงานจริง เราสามารถเลือกได้ว่าจะใช้สนามที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติหรือสนามที่ต้องสร้างขึ้นเอง โดยขึ้นกับสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวของวัตถุที่เราต้องการหา เช่น หากต้องการทราบขอบเขตการกระจายตัวของแหล่งแร่เหล็ก เราสามารถใช้วิธีวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้เลย เนื่องจากแหล่งแร่เหล็กมีสนามแม่เหล็กในตัวไปรบกวนค่าความเข้มที่เกิดจากสนามแม่เหล็กโลก ทำให้ง่ายต่อการสำรวจเก็บข้อมูลและประหยัดค่าใช้จ่าย ที่สำคัญอุปกรณ์ที่ใช้การสำรวจวัดธรณีฟิสิกส์แต่ละวิธี ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้ตรวจวัดสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวที่แตกต่างกันและให้ค่าความละเอียดของข้อมูลที่แตกต่างกัน ในกรณีที่วัตถุที่ทำการสำรวจวัดมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวหลายอย่าง ทำให้สามารถใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ในการสำรวจได้มากกว่า 1 วิธี เช่น กรณีของทราย เป็นต้น เราสามารถเลือกวิธีการสำรวจที่เหมาะสมได้โดยพิจารณาจากความต้องการของผู้สำรวจ ได้แก่ ความละเอียดของข้อมูล ต้นทุนในการสำรวจ เป็นต้น ซึ่งข้อดีและข้อด้อยของการวัดค่าจากสนามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการวัดค่าจากสนามธรรมชาติและสนามที่ต้องสร้างขึ้น (เพ็ญดา ศาตวรรษ, 2550)

สนามจากธรรมชาติ		สนามที่ต้องสร้างขึ้น	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
มีสนามที่ต้องการวัดอยู่แล้ว ไม่ต้องสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณ	ควบคุมถึงรบกวนได้น้อย	สามารถควบคุมถึงรบกวนได้ดี	ต้องมีแหล่งกำเนิดสนามที่ต้องการวัดค่า
เครื่องมือใช้ง่าย การสำรวจทำได้รวดเร็ว	ไม่สามารถควบคุมความลึกได้	ควบคุมระดับความลึกที่ต้องการสำรวจได้	การสำรวจในสนามมีความซับซ้อนและใช้เวลามาก
ค่าใช้จ่ายในการสำรวจต่ำ	ไม่สามารถให้ผลที่เจาะจงได้	สามารถออกแบบเพื่อตรวจหาความผิดปกติที่สนใจได้เฉพาะจุด	ค่าใช้จ่ายในการสำรวจสูง
แปลความหมายได้รวดเร็วและมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก	แปลความหมายได้เพียงคร่าวๆเท่านั้น	แปลความหมายได้ชัดเจน	มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ผล ใช้เวลามาก

ในการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์แต่ละแบบจะวัดสมบัติทางกายภาพของวัตถุที่แตกต่างกัน โดยวัตถุบางชนิดสามารถตรวจวัดได้ด้วยสนามจากธรรมชาติ เนื่องจากแสดงสมบัติดังกล่าวออกมาสูงกว่าสิ่งรอบข้าง แต่ในวัตถุบางชนิดไม่สามารถตรวจวัดโดยสนามจากธรรมชาติได้ เนื่องจากค่าของสนามธรรมชาติที่แสดงออกมาไม่แตกต่างจากสิ่งรอบข้างมากนักทำให้การแปลความหมายอาจจะคลุมเครือ ส่งผลให้ต้องพิจารณาสมบัติอย่างอื่นแทน ซึ่งอาจจะต้องใช้สนามที่มนุษย์สร้างขึ้นในการสำรวจ

การจะเลือกใช้วิธีใดนั้นต้องศึกษาก่อนว่า วัตถุที่ทำการตรวจวัดนั้นมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวอะไรบ้างที่โดดเด่นและมีความแตกต่างจากวัตถุรอบข้างมากน้อยเพียงใด และยังรวมถึงขนาดและความลึกของเป้าหมายด้วย ดังนั้น การเลือกวิธีธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เพราะในการสำรวจแต่ละวิธีให้รายละเอียดของข้อมูลที่แตกต่างกัน

รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในตารางที่ 2.2 ได้แสดงการตรวจวัดด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์แต่ละแบบ รวมทั้งสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวที่โดดเด่นและค่าของตัวแปรที่สามารถตรวจวัดได้จากสนาม

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบวิธีการสำรวจและสมบัติทางกายภาพที่ตรวจวัด (เพ็งดา สาตวรรษ, 2550)

วิธีสำรวจ	สมบัติทางกายภาพของตัวกลาง	ค่าที่ตรวจวัด
การสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง	ความหนาแน่น	การเปลี่ยนแปลงค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก
การสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	ค่าความสามารถในการเป็นแม่เหล็กและสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก	การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลก
การสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	ความแตกต่างของสภาพความต้านทานไฟฟ้าหรือสภาพนำไฟฟ้า	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า
การสำรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	ความแตกต่างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อถูกเหนี่ยวนำ	ค่าตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
การสำรวจวัดค่าด้วยคลื่นไหวสะเทือน	ความหนาแน่นและสมบัติความยืดหยุ่น	เวลาที่คลื่นไหวสะเทือนใช้ในการเดินทางในตัวกลาง
การสำรวจด้วยเรดาร์	ความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	เวลาของคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ

2.2.2 ข้อมูลที่คาดว่าจะได้รับจากการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์

ในการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์ คาดว่าจะสามารถบอกความหนาของชั้นเปลือกดินได้จากสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างดินและทราย สามารถบอกช่วงความหนาและขอบเขตของการสะสมตัวของทรายได้เนื่องจากมีรอยต่อระหว่างดินและทรายทั้งในแนวราบและ

แนวคิดและบอกความลึกของระดับน้ำใต้ผิวดินได้ เมื่อนำข้อมูลการสำรวจแต่ละวิธีมาพิจารณา ร่วมกันน่าจะสามารถแสดงลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินของการสะสมตัวได้

2.2.3 ประโยชน์ของการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทรายโดยวิธีธรณีฟิสิกส์

ในการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลทำให้รวดเร็ว สามารถแสดงข้อมูลเป็นลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาของการสะสมตัวได้ ส่งผลให้เราสามารถ กำหนดตำแหน่งของหลุมเจาะเก็บแท่งตัวอย่างได้ เป็นประโยชน์ในการลดจำนวนหลุมเจาะและลด เวลาในการเจาะเก็บตัวอย่างที่มากเกินไป เมื่อได้ลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินสามารถ นำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณปริมาณสำรองของทรายร่วมกับข้อมูลหลุมเจาะจะทำให้ข้อมูลที่ได้นี้ มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น จากข้อมูลที่ได้อาจจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเป็นข้อมูลเบื้องต้นช่วยในการ จัดการรวมทั้งเป็นประโยชน์ในกระบวนการออกแบบและการพัฒนาการทำบ่อทราย ในการศึกษา ครั้งนี้จะใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ 4 แบบ ในการสำรวจแหล่งสะสมตัวของทราย ซึ่งประกอบด้วย

วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน เนื่องจากคลื่นใช้เวลาเดินทางในดินและทรายไม่เท่ากัน สามารถ ตรวจวัดขอบเขตระหว่างรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกันได้

วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากดินและทรายมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถบอกขอบเขตของดินและทรายได้

วิธีธรณีเรดาร์ (Ground Penetrating Radar; GPR) เนื่องจากดินและทรายมีค่าไดอิเล็กตริก แตกต่างกันได้สามารถวัดค่าและบอกขอบเขตของดินและทรายได้

วิธีวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เนื่องจากดินและทรายมีการตอบสนองต่อแม่เหล็กที่ไม่ เท่ากัน สามารถตรวจวัดค่าความเข้มแม่เหล็กที่ต่างกันเพื่อกำหนดขอบเขตของการสะสมตัวได้

2.3 วิธีสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน

คือ การส่งคลื่นไหวสะเทือนจากแหล่งกำเนิดคลื่นลงสู่พื้นดินด้านล่าง เพื่อต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยสมบัติเฉพาะตัวเกี่ยวกับความหนาแน่นและความยืดหยุ่นของตัวกลางที่แตกต่างกัน เมื่อคลื่นไหวสะเทือนเดินทาง ไปกระทบกับเขตรอยต่อของตัวกลางที่มีสมบัติทางกายภาพต่างกันจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นมาด้านบน หากมีเครื่องรับสัญญาณอยู่บนพื้นดิน คลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ ข้อมูลที่วัดได้ คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับและแอมพลิจูดของคลื่นไหวสะเทือนนั้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลทั้งสองนี้มาแปลความหมายเป็นลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินได้ โดยการแปลความหมายจะแสดงออกมาในลักษณะของความลึกและความหนาของตัวกลางชนิดต่างๆซึ่งสามารถบอกชนิดของตัวกลางนั้นๆได้จากค่าความเร็วคลื่นที่ใช้เดินทางและแอมพลิจูด

2.3.1 ส่วนประกอบของคลื่นกล

คลื่นกล คือ คลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ สามารถถ่ายทอดพลังงานจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ อนุภาคของตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่น เช่น คลื่นในเส้นเชือก คลื่นเสียง เป็นต้น โดยมีส่วนประกอบหลักๆดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

2.3.1.1 การกระจัด คือ ระยะจากระดับปกติถึงตำแหน่งใดๆบนคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

2.3.1.2 แอมพลิจูด (y_0) คือ ระยะที่คลื่นมีการกระจัดสูงสุด มีหน่วยเป็นเมตร

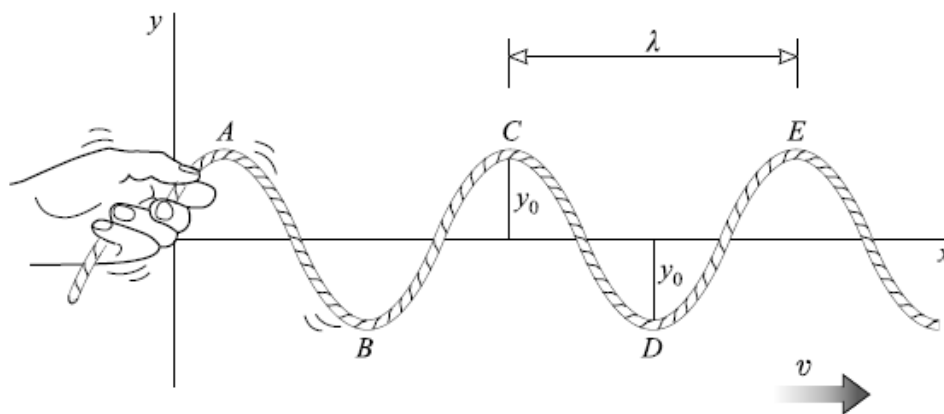
2.3.1.2.1 ยอดคลื่น (C) คือ ตำแหน่งสูงสุดที่สุดของคลื่น มีทิศขึ้น มีหน่วยเป็นเมตร

2.3.1.2.2 ท้องคลื่น (D) คือ ตำแหน่งต่ำสุดของคลื่น มีทิศลง มีหน่วยเป็นเมตร

2.3.1.3 ความยาวคลื่น (λ) คือ ระยะจากยอดคลื่นถึงยอดคลื่นหรือระยะจากท้องคลื่นถึงท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน มีหน่วยเป็นเมตร

2.3.1.4 คาบ (T) คือ เวลาที่คลื่นใช้ในการสั่นครบหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็นวินาที

2.3.1.5 ความถี่ (f) คือ จำนวนรอบที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในเวลาหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือ เฮิรต์



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของคลื่นกล

(Bueche, 1999)

2.3.1.6 อัตราเร็วคลื่น (v) คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

2.3.1.7 หน้าคลื่นและรังสีของคลื่น เมื่อคลื่นไหวสะเทือนเริ่มเดินทางจากแหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นจะแผ่ออกไปทุกทิศทาง หากตัวกลางที่คลื่นไหวสะเทือนเคลื่อนที่ผ่านมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก่อนการแผ่อกของหน้าคลื่นจะมีลักษณะเป็นทรงกลมที่สมมาตร ที่เวลาหนึ่งๆระยะทางจากจุดกำเนิดไปถึงหน้าคลื่นจะเท่ากันทุกทิศทาง ส่วนทิศทางรังสีของคลื่นพลังงานคลื่นจะเดินทางในทิศที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่นทุกทิศทาง

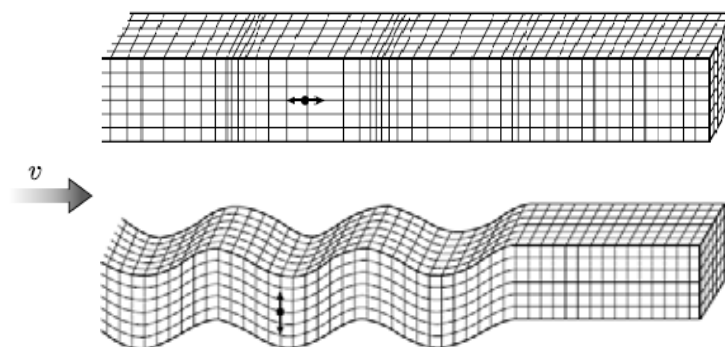
2.3.2 คลื่นไหวสะเทือน

คือ คลื่นที่เกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดคลื่น สามารถส่งผ่านพลังงานไปยังที่ต่างๆได้ เป็นคลื่นกล อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่และเป็นไปตามสมบัติพื้นฐานของคลื่น คือ สามารถสะท้อน หักเห แทรกสอดและเลี้ยวเบนได้ โดยคลื่นไหวสะเทือนที่ใช้ในการสำรวจธรณีฟิสิกส์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ คลื่นตัวกลางและคลื่นผิวผิวน

2.3.2.1 คลื่นตัวกลาง คือ คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางและสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง ประกอบด้วยคลื่น 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

2.3.2.1.1 คลื่นตามยาว (P-Wave) คือ คลื่นที่มีทิศทางการสั่นของอนุภาคในตัวกลางมีทิศเดียวกับการเดินทางของคลื่น เช่น การสั่นของสปริง เป็นต้น คลื่นตามยาวจะเดินทางได้เร็วกว่าคลื่นชนิดอื่น สามารถเดินทางได้ทั้งในตัวกลางของแข็งและของเหลว

2.3.2.1.2 คลื่นตามขวาง (S-Wave) คือ คลื่นที่มีทิศทางการสั่นของอนุภาคในตัวกลางตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น เช่น คลื่นในเส้นเชือก เป็นต้น ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านของเหลวได้



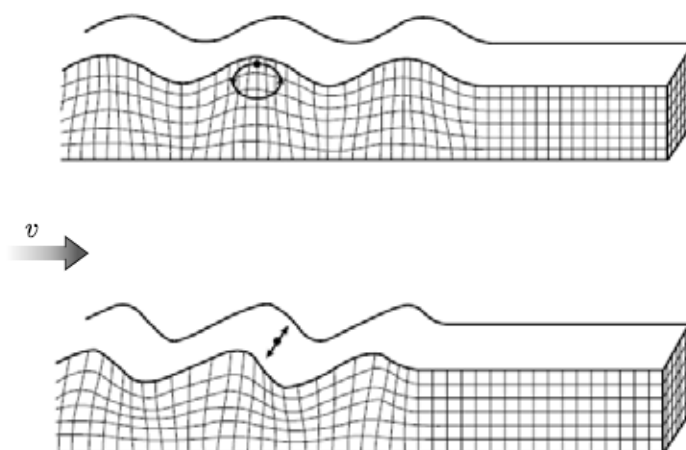
รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

(Kearey, 2002)

2.3.2.2 คลื่นผิวดิน คือ คลื่นที่เคลื่อนที่บนผิวดิน มีทิศทางขนานไปกับผิวดิน มีความถี่ต่ำ มีแอมพลิจูดสูงและมีความเร็วคลื่นต่ำประกอบด้วยคลื่น 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ คลื่นเรลีย์และคลื่นเลิฟ

2.3.2.2.1 คลื่นเรลีย์ (Rayleigh waves) คือ คลื่นที่เคลื่อนที่ขนานกับผิวดิน การสั่นของอนุภาคในตัวกลางมีลักษณะเป็นวงรีในระนาบแนวดิ่ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับทิศการสั่นของอนุภาค มีแอมพลิจูดและความเร็วสูงที่บริเวณใกล้ผิวหน้าของตัวกลางและค่าแอมพลิจูดกับความเร็วจะลดลงตามลึกในตัวกลางนั้น

2.3.2.2.2 คลื่นเลิฟ (Love waves) คือ คลื่นที่เคลื่อนที่ขนานไปกับผิวดิน และสัมผัสกับอากาศ การเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลางมีทิศทางขนานกับผิวน้ำและมีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเรลีย์และคลื่นเลิฟ

(Kearey, 2002)

2.3.3 ความเร็วคลื่นไหวสะเทือน

เป็นที่ทราบกันดีว่า เราสามารถแบ่งวัตถุในโลกออกเป็นสามประเภท ได้แก่ ของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ซึ่งวัตถุที่เป็นของแข็งจะมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ ตามกฎของฮุก และวัตถุที่ต่างชนิดกันจะมีค่าการยืดหยุ่นที่ต่างกัน

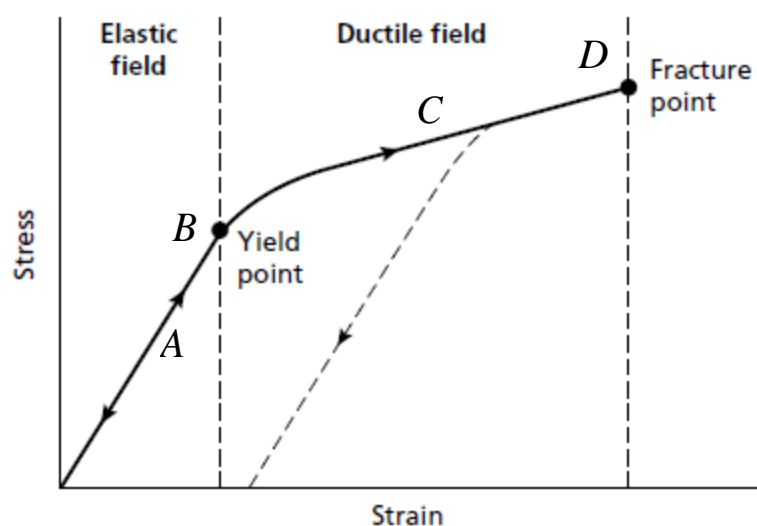
กฎของฮุก กล่าวว่า เมื่อมีแรงจากภายนอกมากกระทำกับวัตถุของแข็งจะส่งผลให้วัตถุนั้นเกิดการยืดหรือหด โดยระยะยืดและระยะหดของวัตถุนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ หากแรงที่มากระทำมีค่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่นของวัตถุนั้น เมื่อนำแรงออกไปวัตถุที่ยืดออกจะหดกลับสู่สภาพเดิม เรียกว่า อยู่ในช่วงยืดหยุ่น แต่หากแรงที่มากระทำมีค่ามากกว่าช่วงยืดหยุ่นจะทำให้วัตถุนั้นเสียรูปไปไม่สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ เช่น ในกรณีของหินแข็งหากแรงที่กระทำต่อหินมีค่ามากกว่าช่วงยืดหยุ่นจะส่งผลให้หินแตกออก เป็นต้น

2.3.3.1 สภาพยืดหยุ่น คือ เมื่อมีแรงจากภายนอกมากกระทำต่อวัตถุ จะส่งผลให้วัตถุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่าง โดยทิศทางและขนาดการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับขนาด

และทิศทางของแรงที่มากระทำ หากแรงที่มากระทำอยู่ในช่วงสภาพยืดหยุ่นของวัตถุ ทั้งขนาดและรูปร่างของวัตถุนั้นจะคืนสู่สภาพเดิม โดยแรงที่มากระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ อธิบายด้วยความเค้นและความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.3.3.1.1 ความเค้น คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดึงหรือแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดที่แรงนั้นกระทำต่อวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

2.3.3.1.2 ความเครียด คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดและรูปร่างของวัตถุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับขนาดเดิม ไม่มีหน่วย



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความยืดหยุ่นของวัตถุ

(Kearey, 2002)

จากรูปที่ 2.4

ช่วง A กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง เป็นไปตามกฎของฮุก ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เมื่อนำแรงกระทำจากภายนอกออกไป ความเค้นก็จะหมดไปด้วย ส่งผลให้วัตถุกลับคืนสู่สภาพเดิม

จุด B คือ ขีดจำกัดของสภาพยืดหยุ่น หากออกแรงกระทำต่อวัตถุมากกว่านี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัตถุจะไม่เป็นไปตามกฎของฮุก เมื่อเอาแรงกระทำออกไปแล้ว วัตถุจะเสียรูปไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้

ช่วง C คือ ช่วงที่วัตถุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร เมื่อนำแรงออกไปวัตถุจะเสียรูปไปจากเดิม สังเกตว่า ความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับความเค้น เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงพลาสติก แต่วัตถุยังไม่เกิดการแตกหัก

จุด D คือ จุดที่แรงมากกระทำต่อวัตถุมีค่าสูงกว่าสภาพรับได้ของวัตถุส่งผลวัตถุเกิดการแตกหักหรือฉีกขาด

2.3.3.2 ค่าคงตัวความยืดหยุ่น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัตถุ ในช่วงที่เป็นไปตามกฎของฮุก ได้แก่ ค่ามอดูลัสของยัง, อัตราส่วนปัวซอง, บัลค์มอดูลัส, มอดูลัสเฉือนและค่าคงตัวของลาม

2.3.3.2.1 มอดูลัสของยัง (Young's Modulus, E) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้น (σ) ต่อความเครียด (ε) ของวัตถุ ดังสมการ

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

2.3.3.2.2 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวขวาง (Δw) ต่อความเครียดในแนวยาว (ΔL) ของวัตถุ ดังสมการ

$$\nu = \frac{\Delta w / w}{\Delta L / L} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2.3.3.2.3 บัลค์มอดูลัส (Bulk Modulus, k) คือ ค่าความสามารถทนต่อการกดอัดของวัตถุ (ΔP) เป็นความเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ (ΔV) เมื่อถูกแรงมากกระทำ โดยวัตถุต่างชนิดกันมีความทนต่อการกดอัดได้ต่างกัน ดังสมการ

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta V / V} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2.3.3.2.4 มอดูลัสเฉือน (Shear Modulus, μ) คือ ความสามารถในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของวัตถุเมื่อถูกแรงเฉือนมากระทำ โดยในของเหลวและแก๊สมีค่ามอดูลัสเฉือนเป็นศูนย์ ดังสมการ

$$\mu = \frac{\sigma_{shear}}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.3.3.2.5 ค่าคงตัวของลามเม (Lame's Constant, λ) คือ ความสัมพันธ์ที่เกิดจากค่าของมอดูลัสของยังและค่าอัตราส่วนปัวซอง ดังสมการ

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.3.3.2.6 ความเร็วคลื่นพี (v_p)

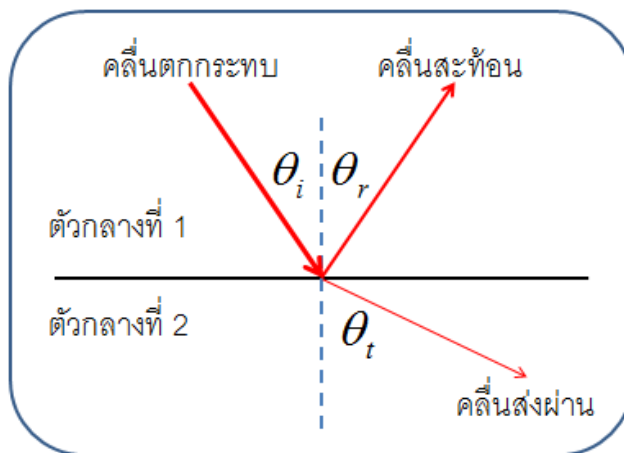
$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.3.3.2.7 ความเร็วคลื่นเฉือน (v_s)

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2.7)$$

จากสมการความเร็วของคลื่นเฉือนจะเห็นว่า คลื่นเฉือนไม่สามารถเดินทางในของเหลวและแก๊สได้เนื่องจากในตัวกลางดังกล่าวมีค่ามอดูลัสเฉือนเป็นศูนย์

เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดเดินทางจากตัวกลางที่ 1 ไปกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 1 และ 2 (รูปที่ 2.5) จะเกิดการสะท้อนพลังงานบางส่วน โดยมุมสะท้อนจะเท่ากับมุมตกกระทบ คิดค่ามุมจากเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อของตัวกลางและพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังชั้นตัวกลางที่ 2



รูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานคลื่น

หากกำหนดให้คลื่นที่เดินทางออกจากแหล่งกำเนิดมีแอมพลิจูดเป็น A_0 เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดเดินทางไปกระทบกับรอยต่อของตัวกลางที่มีสมบัติความยืดหยุ่นต่างกัน พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเริ่มต้นจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นมาบนผิวผิวกำหนดให้มีแอมพลิจูดเป็น A_1 ส่วนพลังงานที่เหลือจากการสะท้อนถูกส่งผ่านลงไปยังชั้นตัวกลางถัดไปกำหนดให้มีแอมพลิจูดเป็น A_2 โดยการสะท้อนของพลังงานคลื่นขึ้นกับค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ ความหนาแน่นของตัวกลางคูณกับความเร็วของคลื่นในตัวกลางนั้น

เขียนสมการได้เป็น

$$Z = \rho v \dots\dots\dots (2.8)$$

- กำหนดให้ Z คือ ค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์
- ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง
- v คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง

เปอร์เซ็นต์การสะท้อนของพลังงานคลื่นจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (R) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T) โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดที่สะท้อนกลับต่อแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ (รูปที่ 2.6) เขียนสมการได้เป็น

$$R = \frac{A_1}{A_0} \dots\dots\dots (2.9)$$

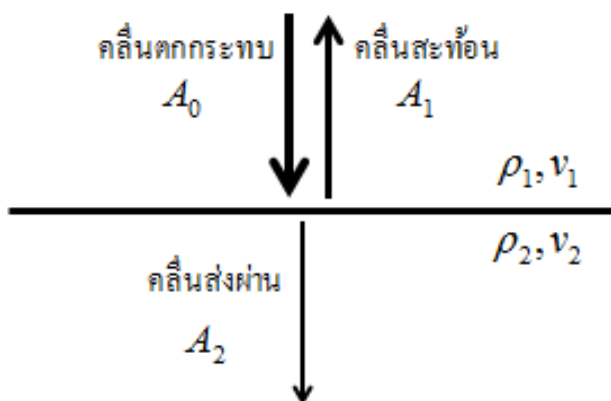
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านพลังงานเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดที่ถูกส่งผ่านต่อแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ เขียนสมการได้เป็น

$$T = \frac{A_2}{A_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

หากคลื่นไหวสะเทือนไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือไม่เกิดการดูดกลืนระหว่างเคลื่อนที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมกันต้องมีค่าเท่ากับ 1

$$R + T = 1 \dots\dots\dots (2.11)$$

ในกรณีที่คลื่นตกกระทบตกตั้งฉากกับรอยต่อของตัวกลางทั้งสองชนิด ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสามารถเขียนสมการได้เป็น



รูปที่ 2.6 แสดงคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (R)

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \dots\dots\dots (2.12)$$

แทนค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์จะได้

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots (2.13)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T)

$$T = 1 - R = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots (2.14)$$

2.3.4 วิธีสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน

การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน มี 2 แบบคือ การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน และการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

2.3.4.1 การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน อาศัยหลักการสะท้อนของคลื่น เมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบกับเขตรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์ต่างกันจะเกิดการสะท้อนขึ้น โดยค่าอคูสติกอิมพีแดนซ์ คือ ค่าความหนาแน่นของตัวกลางคูณกับความเร็วของคลื่นในตัวกลางนั้น ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่า อคูสติกอิมพีแดนซ์เฉพาะตัว อาศัยกฎของสเนลล์ เช่นเดียวกัน มุมของคลื่นตกกระทบเท่ากับมุมของคลื่นสะท้อน สิ่งที่วัดได้จากการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับและแอมพลิจูดของคลื่น

2.3.4.2 การสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห อาศัยหลักการหักเหของคลื่น เมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบกับเขตรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกัน โดยมีเงื่อนไขว่า ตัวกลางที่อยู่ด้านล่างคลื่นสามารถเดินทางได้เร็วกว่าตัวกลางด้านบน อาศัยกฎของสเนลล์ เมื่อปล่อยพลังงานคลื่นไหวสะเทือนจากแหล่งกำเนิดผ่านลงไปในตัวกลางจะเกิดการสะท้อนของคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ

จนกระทั่งตำแหน่งที่ค่ามุมตกกระทบของคลื่นเท่ากับค่ามุมวิกฤติ คลื่นนั้นจะเกิดการหักเหไปตามแนวรอยต่อระหว่างตัวกลางและเมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติคลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมดและวิ่งเข้าสู่ตัวรับสัญญาณบนพื้นดิน สิ่งที่ได้จากการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับและแอมพลิจูดของคลื่นเช่นเดียวกับการสำรวจแบบสะท้อน

กฎของสเนลล์

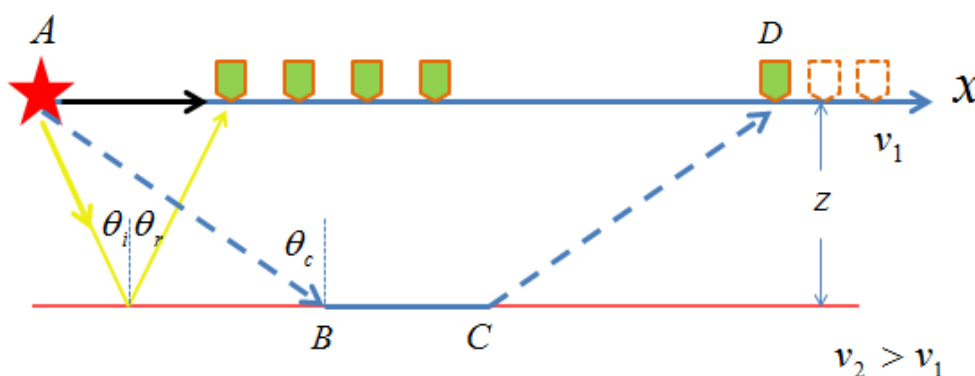
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \dots\dots\dots (2.15)$$

เมื่อมุมตกกระทบของคลื่นมีค่าเท่ากับมุมวิกฤติ จะทำให้คลื่นหักเหมีมุมหักเหเท่ากับ 90 องศา

$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90} = \frac{v_1}{v_2}$$

จะได้มุมวิกฤตเท่ากับ

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \dots\dots\dots (2.16)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการเดินทางของคลื่นจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ

กำหนดให้จุด A เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น(รูปที่ 2.7) เมื่อเกิดคลื่นไหวสะเทือนขึ้นการเดินทางของพลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดมีลักษณะการกระจายออกทุกทิศทางเป็นทรงกลม

หากเราวางตัวรับสัญญาณเป็นแนวเส้นตรงห่างจากแหล่งกำเนิดที่ระยะต่างๆ คลื่นที่วิ่งเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแต่ละตัวจะมาจาก คลื่นตรงที่วิ่งบนผิวดิน คลื่นสะท้อนที่เกิดจากผิวยอดต่อระหว่างตัวกลางและคลื่นหักเหที่เกิดจากการหักเห เราสามารถคำนวณหาค่าเวลาที่คลื่นใช้ในเดินทางจากเส้นทางต่างๆได้

คลื่นตรง (Direct wave) คือ คลื่นที่เดินทางในตัวกลางชั้นแรกเป็นเส้นตรงจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัว โดยเวลาในการเดินทางจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างของแหล่งกำเนิดไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัว

เวลาที่คลื่นตรงใช้เดินทาง คือ

$$t_{direct} = \frac{x}{v_1} \dots\dots\dots (2.17)$$

จากสมการ(2.17) พบว่า คลื่นตรงจะเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นผ่านไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัวด้วยเวลาที่ไม่ว่ากัน โดยเวลาจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น ในการเก็บข้อมูลเครื่องวัดคลื่นไหวสะเทือนจะวัดค่าเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางได้ และเราทราบระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัวจากการวางตำแหน่งบนผิวดิน ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความเร็วที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางชั้นแรกได้

คลื่นสะท้อน (Reflection wave) เป็นคลื่นที่เดินทางผ่านตัวกลางชั้นแรกแล้วไปกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลางและสะท้อนกลับขึ้นมายังตัวรับสัญญาณที่วางอยู่บนพื้นดิน โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ในกรณีที่ตัวกลางมี 2 ชั้น คลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนจะเกิดขึ้นในตัวกลางชั้นแรกเท่านั้น ดังนั้น คลื่นไหวสะเทือนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วในตัวกลางชั้นแรก

เวลาที่คลื่นสะท้อนใช้เดินทาง คือ

$$t_{reflec} = \frac{(x^2 + 4z^2)^{\frac{1}{2}}}{v_1} \dots\dots\dots (2.18)$$

จากสมการเวลาของคลื่นสะท้อน พบว่า คลื่นสะท้อนจะเดินทางเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแต่ละตัวด้วยเวลาที่ไม่ว่ากัน โดยเวลาจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางและความลึกที่เพิ่มมากขึ้น ในการเก็บข้อมูลเครื่องวัดคลื่นไหวสะเทือนจะวัดค่าเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดและสะท้อนกลับขึ้นมาบนผิวดินเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแต่ละตัวได้ เราทราบระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัวจากการวางตำแหน่งบนผิวดิน เราทราบค่าความเร็วคลื่นในชั้นแรกจากสมการคลื่นตรง ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความลึกของรอยต่อระหว่างตัวกลางชั้นแรกกับชั้นที่สองได้

คลื่นหักเห (Refraction wave) คือ คลื่นที่เดินทางผ่านตัวกลางชั้นแรกแล้วไปกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลาง โดยมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับหรือมากกว่ามุมวิกฤติทำให้เกิดการหักเหคลื่นกลับขึ้นมาบนพื้นผิว

เวลาที่คลื่นคลื่นหักเหใช้เดินทาง คือ

$$t_{AD} = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$t_{AD} = \frac{z}{v_1 \cos \theta_c} + \frac{(x - 2z \tan \theta_c)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos \theta_c}$$

$$t_{AD} = \frac{2z}{v_1 \cos \theta_c} + \frac{(x - 2z \tan \theta_c)}{v_2}$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2zv_2 - 2zv_1 \tan \theta_c \cos \theta_c}{v_1 v_2 \cos \theta_c} \quad ; \quad \tan \theta_c = \frac{\sin \theta_c}{\cos \theta_c}$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta_c} \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \sin \theta_c \right) \quad ; \quad \sin \theta_c = \frac{v_1}{v_2}$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta_c} \left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2} \right) \quad ; \quad \cos \theta_c = \left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2} \right)^{1/2}$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z}{v_1 \cos \theta_c} \cos^2 \theta_c$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos \theta_c}{v_1}$$

$$t_{AD} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z}{v_1} \left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.20)$$

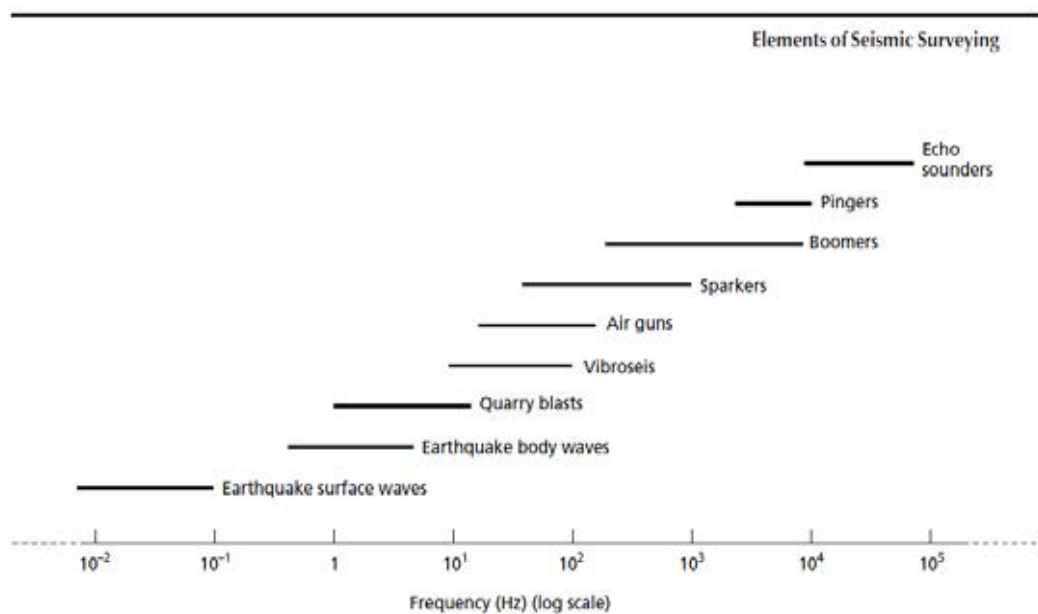
จากสมการ(2.20) การหาเวลาที่คลื่นหักเหใช้เดินทาง พบว่า ค่าเวลาที่คลื่นหักเหใช้ในการเดินทางขึ้นกับตัวแปรตามสมการซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเห (เพิงตา สาตวรรษ, 2550)

การสำรวจแบบสะท้อน		การสำรวจแบบหักเห	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
ใช้ระยะทางระหว่างตัวแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวรับคลื่นน้อย	ใช้ตัวรับคลื่นและตัวกำเนิดคลื่นมากกว่า	ใช้จำนวนตัวรับคลื่นและตัวกำเนิดคลื่นน้อยกว่า	ใช้ระยะทางระหว่างตัวแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวรับคลื่นมาก
ไม่ว่าความเร็วของอนุภาคในชั้นใต้ดินเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความลึกสามารถตรวจสอบได้	ต้องทำการแก้ไขและปรับปรุงข้อมูลเป็นจำนวนมาก	การแปลความหมายทำได้ง่ายและรวดเร็ว	ตรวจสอบได้เฉพาะบริเวณที่ความเร็วของอนุภาคในชั้นใต้ดินที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น
แปลความหมายได้ในลักษณะธรณีวิทยาที่มีโครงสร้างทั้งซับซ้อนและไม่ซับซ้อน	จำนวนข้อมูลที่เก็บมามีจำนวนมากและต้องปรับข้อมูลหลายขั้นตอน	ใช้เวลาในการแก้ไขปรับปรุงข้อมูลน้อย	แปลความหมายได้ในรูปของชั้นดินหินที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น มีการเอียงเทแบบต่างๆ

2.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน

2.3.5.1 ตัวกำเนิดคลื่น คือ อุปกรณ์ที่ใช้สร้างคลื่นชนิดไหวสะเทือน ที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ค้อน, ปืนลูกซอง, ระเบิด, ปืนอัดอากาศ, เครื่องต้น ฯลฯ การเลือกใช้ตัวกำเนิดคลื่นแต่ละแบบขึ้นกับลักษณะของงาน ขนาดและความลึกของสิ่งที่ต้องการหา การเลือกใช้ตัวกำเนิดคลื่นที่เหมาะสมกับงานสำรวจแต่ละที่เป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะตัวกำเนิดคลื่นแต่ละชนิดจะมีค่าแอมพลิจูดและความถี่ของคลื่นที่ปล่อยออกมาไม่เท่ากัน(รูปที่ 2.8) เช่น คลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจากการทุบค้อนลงบนแผ่นเหล็กจะมีค่าแอมพลิจูดที่ต่ำเมื่อเทียบกับคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจากการใช้วัตถุระเบิดเนื่องจากมีพลังงานที่สูงทำให้แอมพลิจูดของคลื่นมีค่ามาก จากความรู้พื้นฐานของคลื่นเป็นที่ทราบกันดีว่าหากวัตถุที่เราสนใจมีขนาดเล็กกว่า $\frac{1}{4}$ ของค่าความยาวคลื่นที่ใช้วัดเราจะไม่สามารถวัดความยาวของวัตถุนั้นได้ นอกจากนั้นการเลือกใช้แหล่งกำเนิดคลื่นที่เหมาะสมกับงานจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ดีและลดค่าใช้จ่ายส่วนเกินอีกด้วย เช่น การสำรวจหาแหล่งน้ำมันในทะเลจะใช้ปืนอัดอากาศเป็นตัวกำเนิดคลื่น เนื่องจากให้คลื่นพลังงานสูงสามารถส่งผ่านลงไปได้ผิวดินได้ลึก เป็นต้น

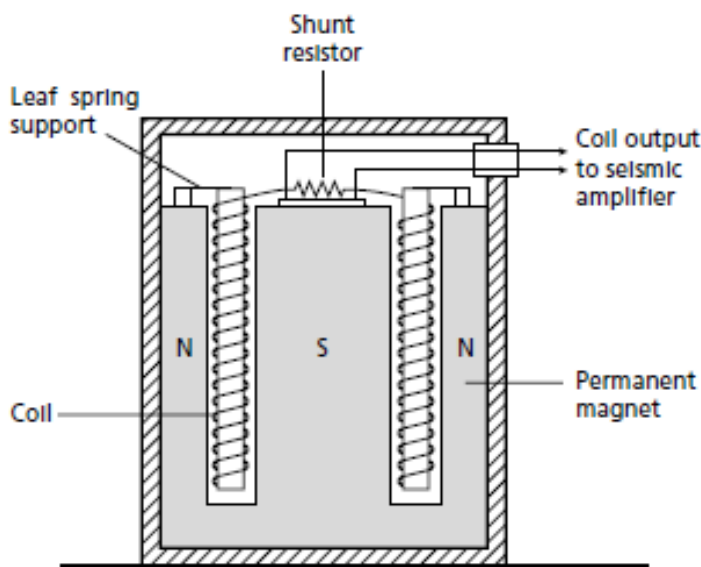


รูปที่ 2.8 แสดงค่าความถี่ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดต่างๆ

(Kearey, 2002)

2.3.5.2 ตัวรับสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณคลื่นที่เกิดจากการสะท้อนและการหักเหกลับขึ้นมาจากรอยต่อของตัวกลางที่ต่างกัน โดยสิ่งที่วัดได้จะเป็นเวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากแหล่งกำเนิดถึงตัวรับสัญญาณและแอมพลิจูดของคลื่น ซึ่งตัวรับสัญญาณจะแบ่งออกตามความถี่ที่ต่างกันขึ้นกับความถี่ของตัวกำเนิดคลื่นที่ใช้ ส่วนประกอบที่สำคัญของตัวรับสัญญาณจะประกอบด้วยแม่เหล็กคิตสปริงสวมรอบแกนเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.9

หลักการทำงาน เมื่อตัวรับสัญญาณรับคลื่นไหวสะเทือนได้ สปริงที่มีปลายติดแม่เหล็กจะเกิดการสั่นในลักษณะเคลื่อนที่ขึ้นลงผ่านแกนเหล็ก จากกฎการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและแม่เหล็กของไมเคิล ฟาราเดย์ กล่าวว่า เมื่อปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านวงลวดมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดนั้น จากทฤษฎีดังกล่าว เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับตัวรับสัญญาณ (Geophone) หลังจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นของขดลวด เมื่อผ่านการขยายสัญญาณแล้วส่งเข้าสู่เครื่องประมวลผลเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขบอกค่าเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดแล้วกลับเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแต่ละตัวได้



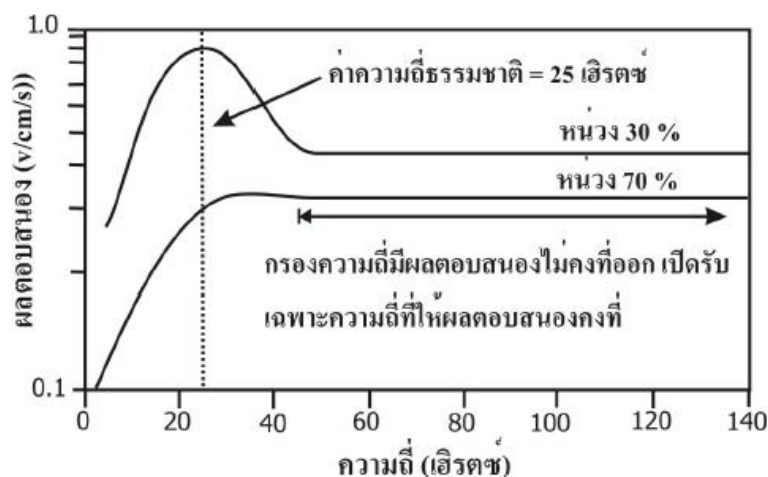
รูปที่ 2.9 แสดงวงจรภายในตัวรับสัญญาณ

(Kearey, 2002)

ในการเลือกใช้ตัวรับสัญญาณให้เหมาะสมกับงานสำรวจเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากตัวรับสัญญาณแต่ละตัวที่ถูกสร้างขึ้นมามีการกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติในการรับคลื่นเอาไว้ โดยค่าความถี่ธรรมชาติของตัวรับสัญญาณจะบอกถึงขีดจำกัดของตัวรับคลื่นนั้น

“ค่าความถี่ธรรมชาติ คือ ค่าความถี่ที่ทำให้วัตถุของเราสั่นด้วยค่าการกระจัดสูงสุด”

ดังนั้น เมื่อตัวรับสัญญาณแต่ละตัวได้รับคลื่นที่มีค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของตัวมันเองสปริงที่อยู่ด้านในตัวรับสัญญาณจะสั่นด้วยค่าแอมพลิจูดทำให้ได้สัญญาณที่ชัดเจน เช่น ตัวรับสัญญาณมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 25 เฮิร์ต หากคลื่นไหวสะเทือนที่วิ่งเข้ามามีค่าความถี่ต่ำกว่า 25 เฮิร์ต แอมพลิจูดของการสั่นจะแปรผันกับความถี่ (รูปที่ 2.10) ซึ่งเราไม่ต้องการให้ค่าแอมพลิจูดแปรผันตามความถี่ แต่เราต้องการให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นแปรผันกับลักษณะทางธรณีวิทยาเท่านั้น ดังนั้น เราต้องกรองช่วงความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของตัวรับสัญญาณออกไป



รูปที่ 2.10 แสดงผลการตอบสนองกับความถี่ของตัวรับคลื่น
(เพียงตา สาตวรรษ, 2550)

ความถี่ของตัวรับคลื่น จะมีค่าคงที่เมื่อห่างจากค่าความถี่ธรรมชาติ ในรูป คือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 45 เฮิร์ต ไปแล้วและมีค่าความหน่วงที่เหมาะสม คือ 70%

2.3.5.3 เครื่องบันทึกข้อมูล คือ อุปกรณ์ที่รับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากตัวรับสัญญาณแล้วแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ให้เป็นลักษณะข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงเวลาในการเดินทางและแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้เป็นแอมพลิจูดของคลื่น โดยเครื่องบันทึกข้อมูลจะเชื่อมต่อกับตัวรับสัญญาณแต่ละตัวด้วยสายเคเบิล

2.3.5.4 สายเคเบิล คือ อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อตัวรับสัญญาณแต่ละตัวเข้าสู่เครื่องบันทึกข้อมูล โดยสายเคเบิลมีลักษณะเป็นสายไฟยาวมีข้อต่อเป็นช่วงๆตามความยาวของสาย ปกติระยะห่างระหว่างข้อต่อแต่ละจุดและความยาวของสายเคเบิลจะขึ้นกับความลึกของสิ่งที่ต้องการสำรวจ

2.3.5.5 เซ็นเซอร์เปิดปิดช่วงการเก็บข้อมูล คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปิดรับสัญญาณของเครื่องบันทึกข้อมูล นับตั้งแต่เริ่มปล่อยคลื่นไหวสะเทือน โดยปกติเซ็นเซอร์เปิดปิดช่วงการเก็บข้อมูลจะถูกติดตั้งไว้บริเวณหัวของค้อน เมื่อค้อนกระทบแท่งลงบนแผ่นเหล็กตัวเซนเซอร์จะเริ่มเปิดสัญญาณการนับเวลาของคลื่นไหวสะเทือน และช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลนั้นกำหนดโดยการพิจารณาจากความลึกของสิ่งที่ต้องการสำรวจและค่าความถี่ของตัวรับสัญญาณ ช่วงเวลาดังกล่าวกำหนดค่าได้ในโปรแกรมเก็บข้อมูล

2.3.5.6 ชุดอุปกรณ์เพิ่มเติม ได้แก่ แบตเตอรี่ภายนอกใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือบันทึกข้อมูล

2.3.6 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน

ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน เริ่มจากการกำหนดพื้นที่และเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ เลือกแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณที่มีค่าความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากขนาดและความลึกของสิ่งที่ต้องการสำรวจ หากวัตถุที่ต้องการสำรวจอยู่ที่ความลึกไม่เกิน 25 เมตร สามารถใช้ค้อนปอนด์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นได้เลย หากวัตถุที่ต้องการสำรวจอยู่ที่ระดับความลึกมากกว่า 25 เมตร อาจจะใช้ปืนลูกซองหรือลูกตุ้มกระทบแท่งเป็นแหล่งกำเนิด เมื่อเลือกแหล่งกำเนิดและตัวรับสัญญาณที่เหมาะสมแล้ว วางแนวการสำรวจ ความยาวของเคเบิลและจำนวนตัวรับสัญญาณจะขึ้นกับสิ่งที่สำรวจ เช่น การสำรวจน้ำมันสายเคเบิลจะมีความยาวเป็นกิโลเมตรและตัวรับสัญญาณมีจำนวนมาก โดยปกติการสำรวจขนาดเล็กจะใช้ตัวรับสัญญาณประมาณ 24-48 ตัว กำหนดระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณแต่ละตัว เช่น 2, 5, 10 เมตร โดยขึ้นกับขนาดของวัตถุและพลังงานของคลื่นที่ใช้สำรวจ หากใช้ค้อนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณไม่ควรเกิน 5 เมตร เนื่องจากพลังงานคลื่นจะมีไม่เพียงพอที่จะเดินทางไปสู่ตัวรับสัญญาณที่อยู่ไกลๆ จากนั้นทำการเชื่อมต่อสายเคเบิลกับตัวรับสัญญาณแต่ละตัวพร้อมต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล ทำการปล่อยสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนจากตัวกำเนิดคลื่นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางและไปกระทบกับ

รอยต่อของตัวกลางที่มีสมบัติยืดหยุ่นแตกต่างกันจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ตัวรับสัญญาณจะเก็บข้อมูลบันทึกแอมพลิจูดและค่าเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปกลับ จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้มาคำนวณหาความถี่ของวัตถุแต่ละชั้น และค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางสามารถบอกได้ว่า วัตถุนั้นอยู่ในช่วงดินหรือหินชนิดใด

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อดีข้อด้อยของการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน (เพียงตา ศาตวรรษ, 2550)

การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน	
ข้อดี	ข้อด้อย
สามารถหาขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน-หินได้ทั้งแนวแนวราบและในแนวตั้ง	ต้องบันทึกข้อมูลเป็นจำนวนมาก ในการที่จะแปลความ
สามารถแสดงข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างใต้ผิวดินในรูปของคลื่นที่มีความแตกต่างทางช่วงกว้างของคลื่นและความถี่	เป็นการสำรวจที่เสียค่าใช้จ่ายสูง และต้องเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบที่มีความยุ่งยากกว่าวิธีสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ประเภทอื่น ๆ
สามารถแบ่งขอบเขตของชั้นดิน-หิน และสามารถแปลความหมายเพื่อบ่งบอกถึงการสะสมตัวของตะกอนต่างๆได้	การจัดเก็บและปรับแก้ข้อมูลเสียเวลามาก และต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูง ในการทำงาน เนื่องจากมีข้อมูลมาก
ผลของการสำรวจขึ้นอยู่กับ การตอบสนองต่อคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของชั้นดิน-หิน ที่มีคุณสมบัติทางความยืดหยุ่น และความหนาแน่น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่องว่าง การกดอัด หรือช่องว่างถูกแทนที่ด้วยน้ำ จะสามารถตรวจวัดได้ และแปลความหมายเชิงปริมาณได้ค่อนข้างแม่นยำ	อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสำรวจจะมีราคาแพงมากกว่าการสำรวจแบบอื่นๆ เป็นอย่างมาก และมีจำนวนมาก
การตรวจสอบสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนอาจตรวจวัดได้	ไม่สามารถตรวจหาสารพิษที่ปนเปื้อนได้

2.4 การสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

คือ วิธีการสำรวจด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดลงสู่พื้นดินด้านล่าง เพื่อต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน วิธีนี้จะใช้อิเล็กโตรด 2 อัน ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านลงไปได้ผิวดิน จากนั้นใช้อิเล็กโตรดอีก 2 อัน วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งและระยะห่างของอิเล็กโตรด สามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุ หากในพื้นที่ศึกษามีวัตถุต่างชนิดกัน โดยอาศัยสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันด้าน ไฟฟ้าของตัวกลางชนิดต่างๆ จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ผิวดินได้ เมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มาแสดงเป็นภาพ 2 มิติ จะสามารถแปลความหมายเป็นลักษณะทางธรณีวิทยาได้

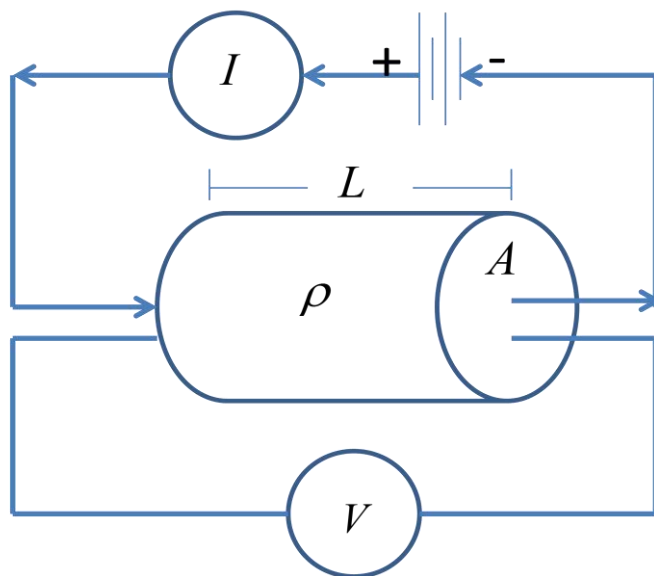
การสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย แปลผลรวดเร็วและค่อนข้างแม่นยำ โดยวัตถุชนิดต่างๆย่อมมีการตอบสนองต่อไฟฟ้าที่ต่างกัน บางชนิดนำไฟฟ้าได้ดีมาก เรียกว่า ตัวนำ บางชนิดไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเลย เรียกว่า ฉนวน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) คือ สมบัติทางกายภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุที่บอกความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า ข้อมูลที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆเมื่อนำมาแสดงใน 2 มิติ จะบอกขนาดและลักษณะการกระจายตัวของสภาพต้านทานไฟฟ้าใต้ผิวดิน เราสามารถแปลความหมายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่างกันให้เป็นข้อมูลแสดงลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาได้ ปัจจัยที่ส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าใต้ผิวดินมีค่าต่างกัน คือ วัตถุนั้นมีค่าสภาพต้านทานไม่เท่ากัน, มีความเป็นรูพรุนต่างกัน, มีน้ำในช่องว่างต่างกัน เป็นต้น หากพื้นที่สำรวจเป็นบริเวณที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือเป็นน้ำเค็มค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าต่ำ ส่วนบริเวณช่องว่างที่ไม่มีน้ำอยู่จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูง

วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประยุกต์มาจากกฎของโอห์ม หากเราต้องการทราบสภาพต้านทานของวัตถุใดให้เราปล่อยกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านวัตถุนั้น ใช้แอมมิเตอร์อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยไป แล้ววัดค่าความต่างศักย์ (V) ที่เกิดขึ้นด้วยโวลต์มิเตอร์ สามารถคำนวณหาความต้านทาน (R) ได้จากสมการ

$$V = IR \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานไม่ใช่ค่าคงที่ที่สามารถบอกชนิดของวัตถุได้ เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความยาวและขนาดของพื้นที่หน้าตัด หาก

ตัวกลางที่ทดสอบยังมีความยาวเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกัน หากพื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานก็จะลดน้อยลง ดังนั้นหากต้องการวัดค่าคุณสมบัติที่แท้จริงของวัตถุจะต้องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากไม่ขึ้นกับระยะทางและพื้นที่หน้าตัด แต่เป็นคุณสมบัติของวัตถุนั้น โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดและความยาวของวัตถุที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.11

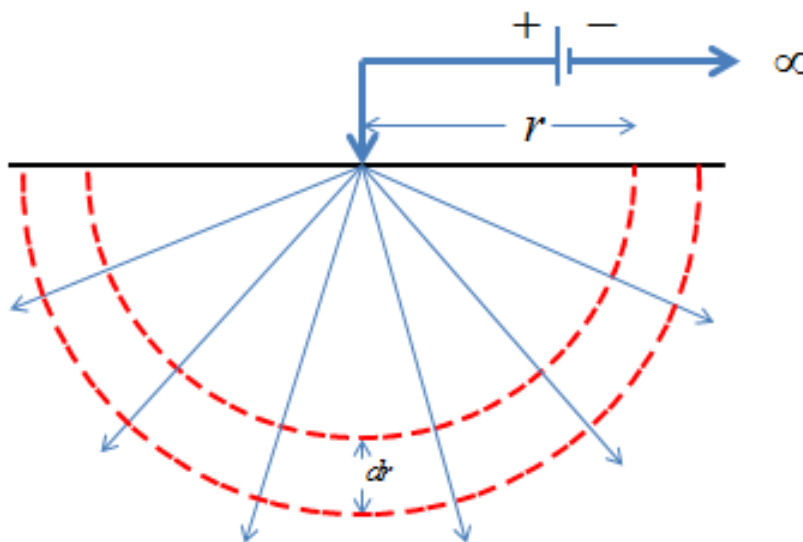


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์และค่าสภาพต้านทาน

จากกฎของโอห์ม $V = \rho I \frac{L}{A}$ (2.22)

- โดยที่ คือ V ความต่างศักย์ไฟฟ้า
- ρ สภาพต้านทานไฟฟ้า
- I กระแสไฟฟ้าที่ปล่อยผ่านวัตถุ
- L ความยาวของวัตถุ
- A พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

เมื่อเราปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดผ่านไปในตัวกลางที่มีเนื้อเดียว (รูปที่ 2.12) ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าจะกระจายออกทุกทิศทางเป็นทรงกลมและเมื่อรัศมีการกระจายตัวมากขึ้นศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

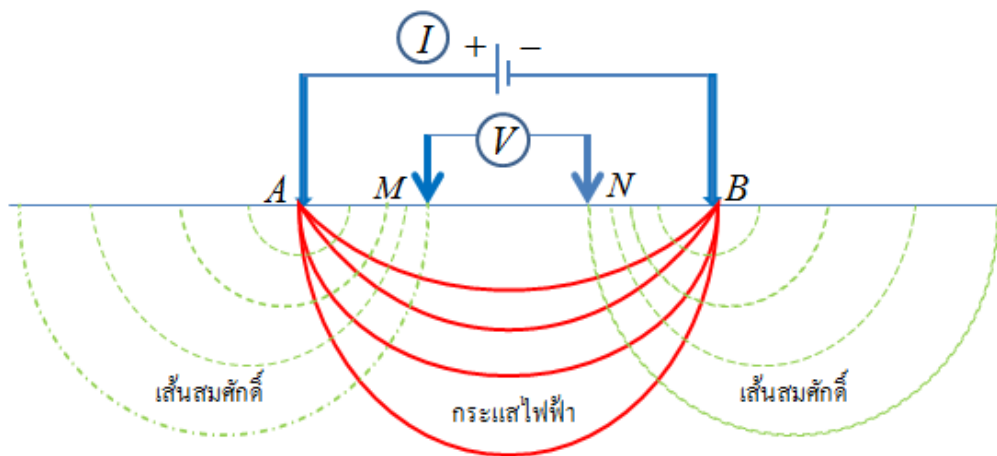
หากเรากำหนดให้พื้นที่ที่ทรงกลมมีการกระจายออกทีละนิคการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$-\int_r^\infty dV = \rho I \int_r^\infty \frac{dr}{2\pi r^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

ศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆจะเป็นไปตามสมการ

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r} \dots\dots\dots (2.23)$$

เมื่อเราจัดวงจรไฟฟ้า (รูปที่ 2.13) โดยให้ขั้ว (A,B) เป็นขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าและให้ขั้ว (M,N) เป็นขั้ววัดค่าความต่างศักย์



รูปที่ 2.13 แสดงภาพการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากรูปกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด M เป็น

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด N เป็น

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

และให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด M และ N เป็น

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

จะได้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} K \dots\dots\dots (2.27)$$

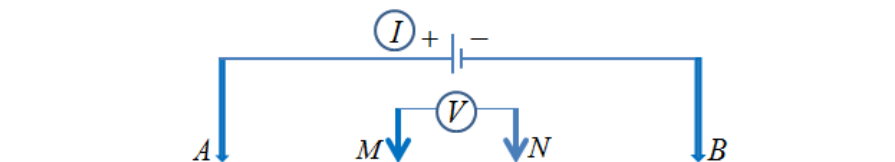
โดยที่
$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}\right)}$$

เมื่อเราต้องการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ผิวดิน เราสามารถ ออกแบบและจัดรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าตามต้องการได้

2.4.1 การวางขั้วอิเล็กโทรด

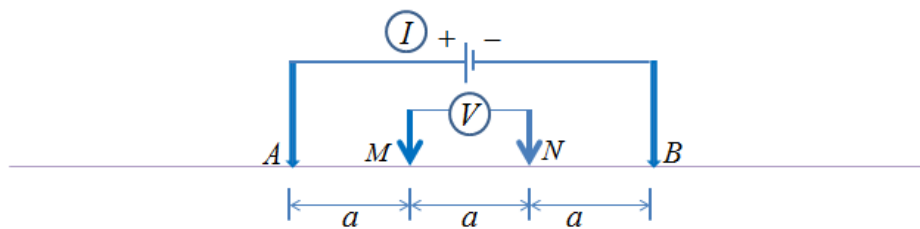
ในการจัดวางขั้วอิเล็กโทรด เราสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยพิจารณาจากความลึก และความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด อีกทั้งยังสามารถออกแบบตำแหน่งและจำนวน ข้อมูลที่ต้องการเก็บค่าได้อีกด้วย ในการวางขั้วอิเล็กโทรดมี 4 รูปแบบที่เป็นที่นิยม คือ

2.4.1.1 แบบเวนเนอร์ (Wenner array) การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์เป็นการ วางขั้วปล่องกระแสไฟฟ้าไว้ด้านนอกแล้ววางขั้ววัดศักย์ไฟฟ้าไว้ภายใน โดยระยะ \overline{AM} และ \overline{NB} จะเป็นจำนวนเท่าของระยะ \overline{MN} ดังรูปที่ 2.14 การย้ายอิเล็กโทรดจะย้ายจากจุดกึ่งกลางขยาย ออกไปทั้งสองข้าง โดยความลึกจะขึ้นกับระยะของขั้วกระแสที่ขยายออกไป การวางขั้วอิเล็กโทรด แบบเวนเนอร์สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานในแนวดิ่งได้ดี



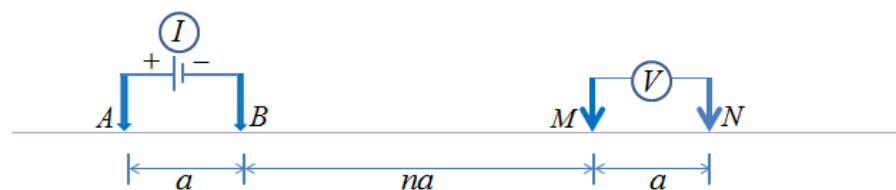
รูปที่ 2.14 แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์

2.4.1.2 แบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger array) การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบชลัมเบอร์เจอร์เป็นการวางขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไว้ด้านนอกแล้ววางขั้ววัดศักย์ไฟฟ้าไว้ภายใน เช่นเดียวกับการวางขั้วแบบเวนเนอร์ต่างกันที่มีระยะ \overline{AM} , \overline{MN} , และ \overline{NB} เท่ากัน ดังรูปที่ 2.15 การย้ายอิเล็กโทรดจะย้ายจากจุดกึ่งกลางขยายออกไปทั้งสองข้าง โดยความลึกจะขึ้นกับระยะของขั้วกระแสที่ขยายออกไป การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบนี้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานทั้งในแนวคิ่งและแนวนอนได้ดีปานกลาง



รูปที่ 2.15 แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบชลัมเบอร์เจอร์

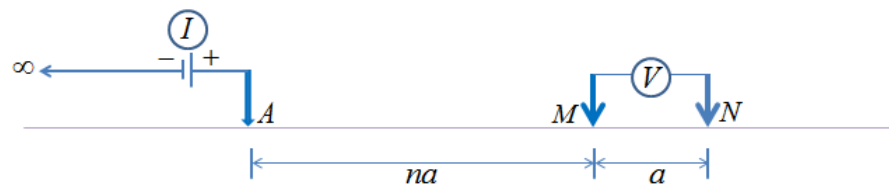
2.4.1.3 แบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole array) การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบไดโพล-ไดโพล คือ การวางขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไว้ด้านนอกแล้ววางขั้ววัดศักย์ไฟฟ้าไว้ภายใน โดยระยะ \overline{AB} และ \overline{NM} วางห่างกันเป็นเป็นจำนวนเท่า ดังรูปที่ 2.16 สามารถตรวจวัดสภาพการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินในแนวราบได้ดี นั่นคือเหมาะสำหรับการตรวจหาโครงสร้างทางธรณีวิทยาแนวคิ่ง เช่น โปรง พนังของหินอัคนี รอยเลื่อน หรือแหล่งสะสมตัวของแร่



รูปที่ 2.16 แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบไดโพล-ไดโพล

2.4.1.4 แบบโพล-ไดโพล (Pole-dipole array) สามารถตรวจวัดสภาพการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินในแนวราบได้ดี นั่นคือเหมาะในการตรวจหาโครงสร้างทางธรณีวิทยาแนวคิ่ง เช่นเดียวกับแบบไดโพล-ไดโพล การวางระยะห่างของขั้วที่ปล่อยกระแสที่ถือว่า

เป็นระยะอนันต์ (ขั้ว B) ดังรูปที่ 2.17 แสดงว่ากระแสไหลลงในพื้นที่ดินได้ระยะทางมากกว่าการสำรวจแบบอื่นๆ กระแสไฟฟ้าไหลครอบคลุมพื้นที่ในแนวราบ (horizontal coverage) ได้กว้างมากกว่า การวางรูปแบบนี้เหมาะในการสำรวจแบบ 3 มิติ



รูปที่ 2.17 แสดงการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบโพล-ไดโพล

2.4.2 เครื่องมือสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

2.4.2.1 เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่พื้นดินและรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หลักการของเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไปพร้อมทั้งอ่านค่าความต่างศักย์ที่ได้และบันทึกค่า เครื่องมือวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ เครื่องวัดแบบธรรมดาและเครื่องวัดแบบอัตโนมัติ

เครื่องวัดแบบธรรมดา วัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ได้ที่ละ 1 ค่า ต้องมีผู้ควบคุมคอยกดปุ่มวัดทุกครั้งที่มีการเก็บข้อมูล ทำการจดบันทึกค่าต่างๆลงในสมุดแล้วนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานจากสมการของโอห์ม ส่วนใหญ่นิยมวัดข้อมูลความลึกแบบ 1 มิติ ใช้ในงานสำรวจน้ำบาดาลเป็นหลัก

เครื่องวัดแบบอัตโนมัติ เป็นเครื่องมือที่วัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์พร้อมทั้งคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ (รูปที่ 2.18) เครื่องมือแบบนี้อิเล็กโทรดแต่ละอันจะทำหน้าที่ได้ทั้งการปล่อยกระแสไฟฟ้าและวัดค่าความต่างศักย์ มีความรวดเร็วในการบันทึกข้อมูลและวัดจุดถัดไปได้โดยอัตโนมัติ เหมาะสำหรับการสำรวจที่ต้องการข้อมูลเป็น 2 มิติ นิยมใช้ในงานสำรวจฐานราก หากลักษณะการวางตัวของชั้นดินชั้นหิน ฯลฯ

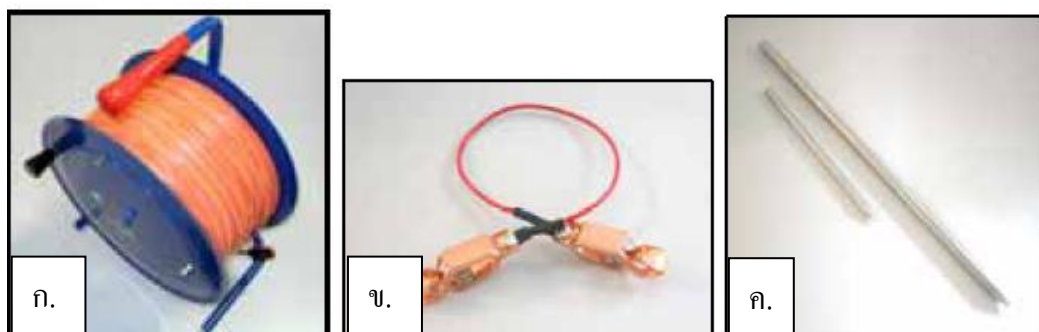


รูปที่ 2.18 แสดงเครื่องวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้ารุ่น Syscal R1 plus
(<http://www.iris-instruments.com/Product/Brochure/syscal.html>)

2.4.2.2 ชุดแท่งโลหะและสายเคเบิล คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่พื้นดินและทำหน้าที่วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (รูปที่ 2.19 ก. และ ค.) โดยถูกควบคุมโดยเครื่องวัดสภาพด้านทาน

ในกรณีของเครื่องวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าแบบธรรมดา จะมีอิเล็กโทรดทั้งหมด 4 อัน 2 อันแรกเป็นสแตนเลสทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า มีสายไฟเชื่อมต่ออิเล็กโทรดกับตัวเครื่องปล่อยกระแสจำนวน 2 เส้น และอิเล็กโทรดอีก 2 อัน ทำหน้าที่วัดค่าความต่างศักย์ส่วนใหญ่จะเป็นแท่งทองแดงและมีสายไฟเชื่อมต่ออิเล็กโทรดกับตัวเครื่องบันทึกค่ามีจำนวน 2 เส้น เช่นเดียวกัน

ในกรณีของเครื่องวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ จะมีแท่งอิเล็กโทรด 12, 48, 72, และ 96 อัน ตามลำดับ ซึ่งจำนวนอิเล็กโทรดที่ต่างกันขึ้นกับค่ากำลังของเครื่องหากเครื่องมีกำลังน้อยก็จะใช้จำนวนอิเล็กโทรดน้อย และเครื่องที่มีกำลังมากจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้ก็จะมากตามไปด้วย ยิ่งอิเล็กโทรดมีจำนวนมากความยาวและความลึกของการสำรวจก็จะเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับเครื่องมือสำรวจแบบอัตโนมัตินี้จะใช้สายเคเบิล 2 หรือ 4 เส้น ในการเชื่อมต่ออิเล็กโทรดแต่ละอันกับเครื่องบันทึกค่า โดยบนสายเคเบิลแต่ละเส้นจะมีข้อต่อเป็นระยะ แต่ละจุดห่างกัน 5 เมตร หรือ 10 เมตร ขึ้นกับการเลือกใช้งาน



รูปที่ 2.19 แสดงสายเคเบิล ที่หนีบสายไฟและแท่งอิเล็กโทรด

(http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/Accessories_Rho+IP.pdf)

2.4.2.3 ชุดอุปกรณ์เพิ่มเติม ได้แก่ แบตเตอรี่ภายนอกใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือวัดสภาพต้านทานและที่หนีบสายไฟ (รูปที่ 2.19 ข.) ใช้หนีบแท่งอิเล็กโทรดกับสายเคเบิลตรงข้อต่อ

2.4.3 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เริ่มจากกำหนดพื้นที่และเป้าหมายที่ต้องการสำรวจทำการเลือกรูปแบบการวางขั้วอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับงาน เช่น การสำรวจวัดชั้นน้ำบาดาลควรวางขั้วอิเล็กโทรดแบบซัลมเบอร์เจอร์ ได้ข้อมูลแบบหนึ่งมิติ หากต้องการสำรวจโครงสร้างธรณีวิทยาการวางตัวเอียงเทของชั้นหินควรวางขั้วอิเล็กโทรดแบบไดโพล-ไดโพล จะได้ข้อมูลแบบสองมิติ เป็นต้น ในกรณีของการเก็บข้อมูลแบบสองมิติด้วยเครื่องมือวัดอัตโนมัติ เราสามารถออกแบบตำแหน่ง ความลึกและจำนวนจุดของการเก็บข้อมูลได้ เมื่อเลือกวิธีเก็บข้อมูลแล้ววางแผนการสำรวจ กำหนดระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดแต่ละตัว โดยพิจารณาจากขนาดและความลึกของสิ่งที่ต้องการสำรวจ ยิ่งวางแท่งอิเล็กโทรดแต่ละตัวห่างกันมากความละเอียดของข้อมูลก็จะน้อยลงตามไปด้วย เมื่อวางอิเล็กโทรดแล้วทำการเชื่อมต่อสายเคเบิลกับแท่งอิเล็กโทรดแต่ละตัวพร้อมต่อเข้าเครื่องวัดสภาพต้านทาน เริ่มเก็บข้อมูลโดยการปล่อยสัญญาณไฟฟ้าลงสู่พื้นดินพร้อมทั้งวัดค่าต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในกรณีเครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติ จะทำการคำนวณค่าสภาพต้านทานออกมาโดยอัตโนมัติ

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

การสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	
ข้อดี	ข้อด้อย
การวางแผนสำรวจทำได้ง่าย รวดเร็ว	การมีตัวนำไฟฟ้าอยู่ใกล้ๆ พื้นที่สำรวจ กระแสไฟฟ้าจะไหลไปในตัวนำมากกว่าที่จะไหลไปในตัวกลางที่มีสภาพความนำไฟฟ้าน้อยกว่า
สามารถกำหนดจำนวนจุดและรูปแบบการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติได้	กระแสไฟฟ้าไม่ไหลลงไปในระดับลึกหากเจอชั้นดินเหนียว
ประหยัดและวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว	ความแม่นยำของการแปลความหมายอยู่ในระดับปานกลาง
	ความสูง-ต่ำของพื้นที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวของการไหลของกระแสไฟฟ้า อาจส่งผลให้ตำแหน่งของค่าความผิดปกติผิดรูปไป

2.5 การสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

คือ การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆในพื้นที่สำรวจ เพื่อต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันด้านแม่เหล็กวัตถุแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเฉพาะตัว หากในพื้นที่สำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ค่าต่างกัน เราสามารถจำแนกและบอกชนิดของวัตถุชั้นใต้ พร้อมทั้งแปลความหมายเป็นข้อมูลธรณีวิทยาได้

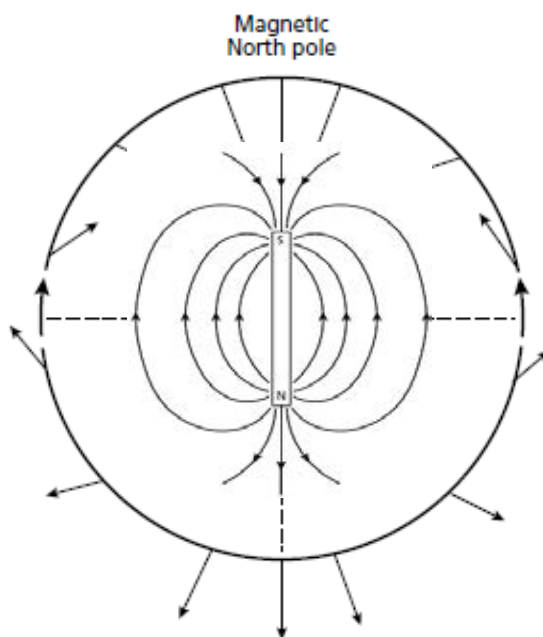
2.5.1 ทฤษฎีสานแม่เหล็ก

โลกของเราถูกห่อหุ้มด้วยสนามแม่เหล็ก โดยขั้วโลกเหนือแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ และขั้วโลกใต้แสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ จากทฤษฎีแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ ส่งผลให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกมีทิศพุ่งจากขั้วโลกใต้ไปยังขั้วโลกเหนือ (รูปที่ 2.20) ดังนั้น ทุกๆตำแหน่งบนพื้นผิวโลกเราสามารถวัดค่าความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กได้และหากไม่มีสนามแม่เหล็กจากแหล่งอื่นมารบกวนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลก ณ ตำแหน่งต่างๆสามารถคำนวณค่าได้ เรียกค่านี้ว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกมาตรฐานวัตถุแต่ละชนิดภายในโลกมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเฉพาะตัวขึ้นกับค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility, χ) ซึ่งค่านี้สามารถทำให้วัตถุบางชนิดถูกเหนี่ยวนำให้แสดงอำนาจแม่เหล็กได้เมื่อถูกกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้ในบริเวณนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกมาตรฐาน ซึ่งค่าความเข้มที่ต่างกันนี้เราสามารถบอกขอบเขตของวัตถุแต่ละชนิดออกจากกันได้ โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำจะขึ้นกับค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กหากวัตถุนั้นมีค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กสูง ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะสูงตามไปด้วย เราสามารถแยกประเภทของวัตถุที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

2.5.1.1 เฟอร์โรแมกเนติก เป็นสารแม่เหล็กที่มีอำนาจแม่เหล็กค่อนข้างแรงและยังเป็นพวกแม่เหล็กถาวรด้วยเมื่อสารเฟอร์โรแมกเนติกอยู่ในบริเวณของสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจะพยายามจัดตัวเองในแนวขนานกัน จึงทำให้มีสถานะแม่เหล็กต่อจากนั้นถึงแม้จะไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกการจัดระเบียบของโมเมนต์แม่เหล็กดังกล่าวก็ยังคงอยู่

2.5.1.2 พาราแมกเนติก เมื่อสารพาราแมกเนติกอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กจะพยายามจัดตัวตามสนามแม่เหล็ก ในขณะที่พลังงานความร้อนที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ก็จะทำให้เป็นแบบสุ่ม จนในที่สุดก็จะเข้าสู่สภาวะสมดุลของการจัดตัว ลักษณะดังกล่าวนี้เอง ที่เวกเตอร์การทำให้เป็นแม่เหล็กขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ถ้าสารพาราแมกเนติกไม่อยู่ในอำนาจของสนามแม่เหล็กภายนอก ก็จะกลับคืนสู่สภาพเดิม

2.5.1.3 ไดอะแมกเนติก เป็นสารประเภทหนึ่งซึ่งประกอบด้วยอะตอมที่ไม่มีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กถาวร เมื่อสารไดอะแมกเนติกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก จะเกิดโมเมนต์แม่เหล็กอ่อนๆ ขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านสนามแม่เหล็กนั้น ด้วยเหตุนี้เมื่อพิจารณาสมการ สำหรับกรณีสารไดอะแมกเนติกนี้แสดงว่า ค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กต้องติดลบ



รูปที่ 2.20 แสดงขั้วแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก

(Kearey, 2002)

2.5.2 ความแรงสนามแม่เหล็ก (H)

สนามแม่เหล็ก (B) มีความสัมพันธ์กับความแรงสนามแม่เหล็ก (H) ด้วยค่าคงตัวของคุณสมบัติของตัวกลาง คือ ค่าคงตัวของความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability, μ) เป็นค่าคงตัวของการที่จะทำให้เป็นแม่เหล็ก

สมการความสัมพันธ์

$$H = \frac{B}{\mu} \dots\dots\dots (2.28)$$

โดยที่ $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ แทนค่าในสมการที่ (2.28) จะได้

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} \dots\dots\dots (2.29)$$

เมื่อ	H	คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)
	μ	คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของตัวกลางใดๆมีหน่วยเป็น Wb/A-m หรือ H/m หรือ N/A
	μ_r	คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ไม่มีหน่วย
	μ_0	คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A-m หรือ H/m หรือ N/A

2.5.3 ความไหวตัวได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility, κ , χ)

ความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กเป็นค่าคงตัวของวัตถุที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแรงสนามแม่เหล็ก (H) ต่อค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (M) และสำหรับการวัดหาค่าของความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กมี 2 ลักษณะ คือ

2.5.3.1 ใช้สัญลักษณ์ (κ) (volume susceptibility) เมื่อวัดค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อค่าความแรงสนามแม่เหล็ก โดยพิจารณาค่าทั้งสองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเหมือนกัน ทำให้ค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กในกรณีนี้ไม่มีหน่วย

2.5.3.2 ใช้สัญลักษณ์ (χ) (specific or mass susceptibility) เมื่อวัดค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยมวลและค่าความแรงสนามแม่เหล็ก ในกรณีนี้ ค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m^3/kg)

เขียนสมการได้เป็น

$$\kappa = \frac{M}{H} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\chi = \frac{M}{H} \dots\dots\dots (2.31)$$

เมื่อ H คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก
 M คือ การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก
 κ คือ ค่าคงตัวของความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กของวัตถุไม่มีหน่วย
 χ คือ ค่าคงตัวของความไหวตัวได้ทางเชิงแม่เหล็กของวัตถุมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m^3/kg)

เมื่อวัตถุถูกเหนี่ยวนำให้มีสภาพเป็นแม่เหล็ก ค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก M จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแรงสนามแม่เหล็ก H และค่าความไหวตัวได้ทางแม่เหล็กของวัตถุ κ หรือ χ มีความสัมพันธ์กับความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ μ_r ดังสมการที่ 2.32

$$\kappa = \mu_r - 1 \dots\dots\dots (2.32)$$

2.5.4 เครื่องมือสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

เครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆที่สนใจ โดยค่าที่วัดได้จะแสดงค่าผลรวมความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวโลก ซึ่งมีค่าขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกและสิ่งผิดปกติ ณ ตำแหน่งนั้นๆแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.4.1 สเกลาร์แมกนีโตมิเตอร์ คือ อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โลกรวม ณ ตำแหน่งต่างๆและไม่ต้องเทียบกับค่ามาตรฐาน เช่น โพรตอนพรีเซสชัน แมกนีโทมิเตอร์ และ ออฟดิคัลลิฟัมพ์ แมกนีโทมิเตอร์

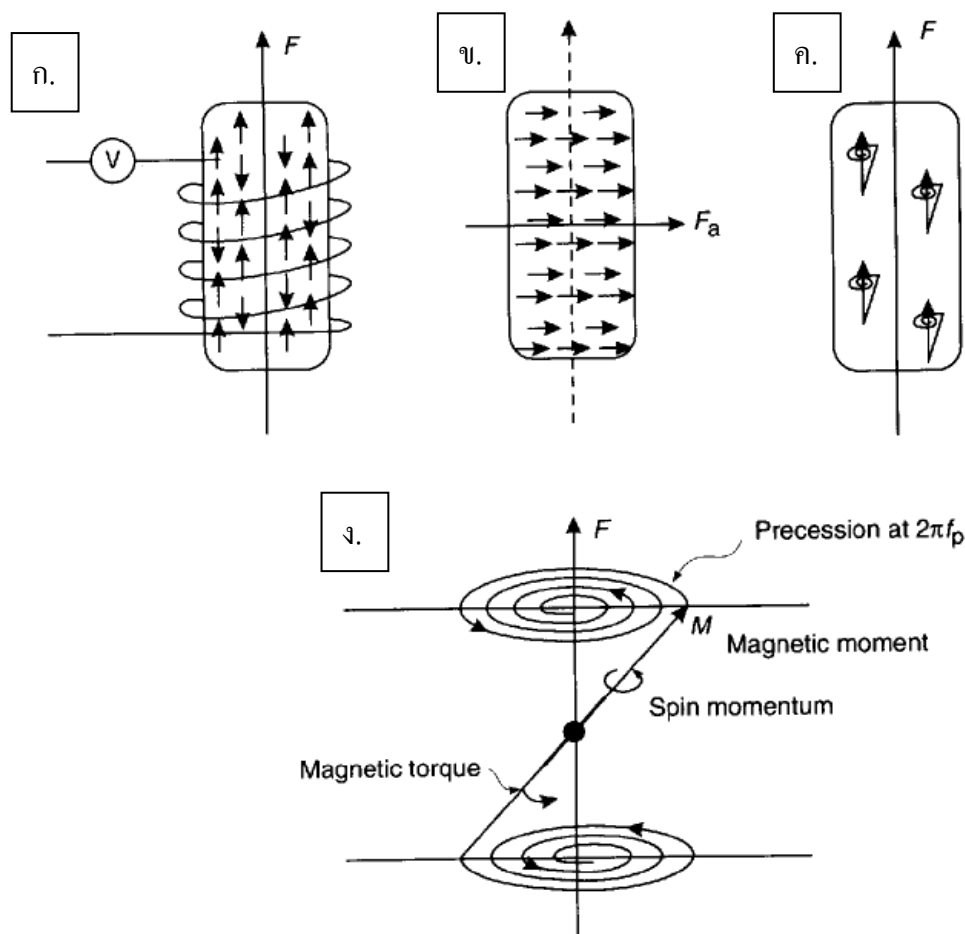
2.5.4.1.1 โพรตอนพรีเซสชันแมกนีโทมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กรวม (รูปที่ 2.21) อาศัยหลัก โมเมนต์เชิงมุมของอนุภาคโปรตอนที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็ก เครื่องมือชนิดนี้ประกอบด้วยกระบอกบรรจุของเหลวที่มีไฮโดรเจนอะตอม

จำนวนมาก เช่น น้ำ คีโรซีน เมทานอล เป็นต้น โดยกระบอกนี้ถูกพันรอบด้วยลวดตัวนำ เมื่อเราปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นส่งผลให้โปรตอนของอะตอมไฮโดรเจนในทรงกระบอกเกิดการหมุนและเรียงตัวตามแนวของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้น จากนั้นเมื่อเราปิดสวิตซ์โปรตอนของอะตอมไฮโดรเจนจะเรียงตัวใหม่ตามแนวของสนามแม่เหล็กโลก ณ ตำแหน่งนั้น จากการหมุนกลับของโปรตอน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลไปในขดลวดอีกครั้งและค่าความถี่การหมุนของกระแสไฟฟ้านี้เป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เราสามารถหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกได้ เมื่อทราบอัตราส่วนของโมเมนต์แม่เหล็กต่อโมเมนต์เชิงมุมของการหมุนของโปรตอน ดังสมการ

$$\omega = \gamma_p B \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

$$B = \frac{2\pi f}{\gamma_p} \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

เมื่อ	ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของโปรตอน
	γ_p	คือ ค่าคงตัวของอัตราส่วน โมเมนต์แม่เหล็กต่อ โมเมนต์เชิงมุมของการหมุนของโปรตอน
	B	คือ สนามแม่เหล็ก
	f	คือ ความถี่การหมุนของโปรตอน



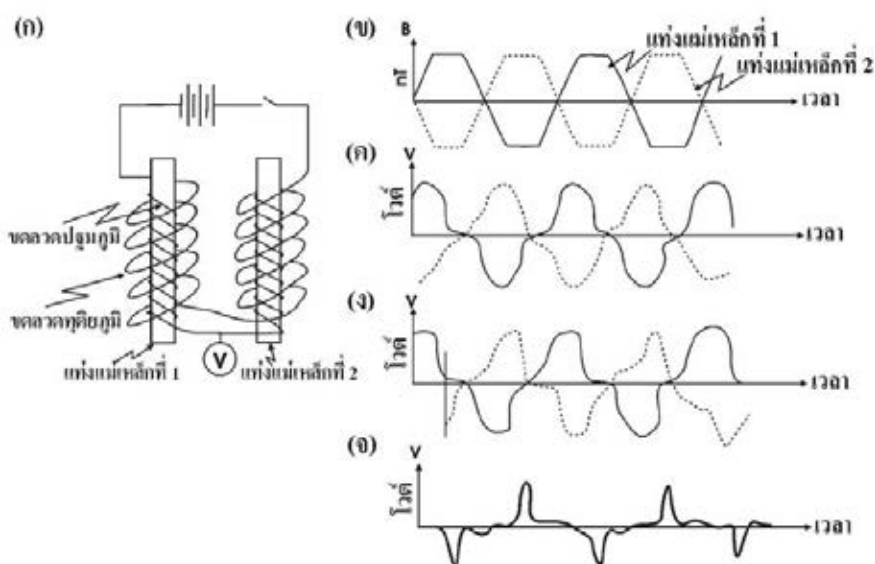
รูปที่ 2.21 ลักษณะของเครื่องโปรตอนพรีเซสชันแมกนีโทมิเตอร์
(เพียงตา สาตวรรษ, 2550)

ก. องค์ประกอบภายใน ข. โมเมนต์แม่เหล็กของโปรตอนเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กภายนอก
ค. โมเมนต์แม่เหล็กของโปรตอนเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการปล่อยกระแสผ่านขดลวด
ที่พันไว้รอบกระบอก ง. โมเมนต์แม่เหล็กของโปรตอนเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อ
ไม่มีกระแสไหลในขดลวด

2.5.4.1.2 ออปติคัลลิฟท์ แมกนีโทมิเตอร์ ใช้หลักการฉายแสงจาก
คลื่นวิทยุความถี่ต่ำเข้าไปในก๊าซฮีเลียมเพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำขึ้นไปอยู่
ในระดับพลังงานที่สูง เมื่อหยุดการรบกวน อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะกลับลงมาอยู่ในระดับ
พลังงานต่ำตามเดิมโดยการคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาสามารถ
คำนวณหาความถี่และใช้หาสนามแม่เหล็กได้

2.5.4.2 เวกเตอร์แมกนิโทมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กโลก โดยวัดองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กแต่ละตำแหน่ง เครื่องมือชนิดนี้ต้องวัดค่าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เช่น ฟลักซ์เกตแมกนิโทมิเตอร์และสคิคแมกนิโทมิเตอร์

2.5.4.2.1 ฟลักซ์เกตแมกนิโทมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยแท่งแม่เหล็ก 2 แท่ง วางอยู่ใกล้กัน (รูปที่ 2.22) แท่งแม่เหล็กแต่ละแท่งจะถูกพันด้วยขดลวด 2 เส้นคือขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยขดลวดทั้งสองจะพันในทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดปฐมภูมิจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น จากนั้นขดลวดทุติยภูมิจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศตรงกันข้ามเพื่อหักล้างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งเราสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิได้และสามารถนำไปหาค่าสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ 2.22 ลักษณะของเครื่องฟลักซ์เกตแมกนิโทมิเตอร์

(เพียงตา สาตริภย์, 2550)

- ก. แท่งแม่เหล็กจำพวกเฟอร์ไรต์พันด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ 2 แท่ง ข. ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อยังไม่มีกระแสเหนี่ยวนำของแท่งแม่เหล็กทั้งสอง ค. ค่าความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในรูป ข.
- ง. ค่าความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิของกรณีฟลักซ์แม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจากสนามแม่เหล็กภายนอก จ) ผลรวมของ ค่าความต่างศักย์ของขดลวดทุติยภูมิระหว่างแท่งแม่เหล็กทั้งสอง

2.5.4.2.2 สคิตแมกนิโทมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ให้ความละเอียดสูง แต่ต้องเก็บในสถานะที่เย็นจัด เนื่องจากต้องใช้ฮีเลียมหรือไนโตรเจนเหลวเป็นส่วนประกอบ ไม่เหมาะจะนำมาสำรวจในภาคสนาม ใช้หลักการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ทางการแพทย์

2.5.5 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ในการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เริ่มจากกำหนดพื้นที่และเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลจากนั้นวางแผนการสำรวจ อาจจะวางแผนเก็บข้อมูลเป็นแนวเส้นตรงแนวเดียวหรือหลายๆแนววางตัดผ่านกันเพื่อให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ โดยปกติการเก็บข้อมูลค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่นิยมกันทำได้ 2 รูปแบบ คือ

2.5.5.1 รูปแบบตารางสี่เหลี่ยม (แบบกริด) ในการเก็บข้อมูลแบบกริด จะบันทึกข้อมูลและเก็บค่าตรงจุดที่เส้นตัดกันจนได้ข้อมูลครอบคลุมทั่วพื้นที่

2.5.5.2 ตามแนวสำรวจ ในการสำรวจข้อมูลตามแนวสำรวจจะเก็บข้อมูลโดยกำหนดระยะห่างระหว่างจุดตามแนวสำรวจ

การเลือกรูปแบบสำรวจวิธีใดนั้นขึ้นกับวัตถุประสงค์เป้าหมายและความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการ โดยพิจารณาจากเป้าหมายที่สำรวจเป็นหลัก

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

การสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	
ข้อดี	ข้อด้อย
1. ทำการเก็บข้อมูลง่าย	1. ไม่สามารถบอกความลึกและจำนวนชั้นได้
2. บอกขอบเขตในแนวราบได้ดี	2. ไม่สามารถแสดงข้อมูลเชิงปริมาณได้
3. ประหยัดและรวดเร็ว	3. ให้ผลแค่ภาพรวมคร่าวๆ

2.6 การสำรวจธรณีเรดาร์ (Ground penetrating radar; GPR)

คือ การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยการปล่อยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน เพื่อต้องการทราบสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันด้านไฟฟ้าและแม่เหล็ก เมื่อคลื่นเรดาร์เดินทางไปกระทบกับเขตรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกันจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นมาด้านบน เข้าสู่ตัวรับสัญญาณ ข้อมูลที่วัดได้ คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับและแอมพลิจูดของคลื่น(เหมือนกับการสะท้อนจากคลื่นไหวสะเทือน) สามารถนำข้อมูลทั้งสองนี้มาแปลความหมายเป็นความลึก ความหนา ขอบเขตแนวรอยต่อและลักษณะทางธรณีใต้ผิวดินได้

2.6.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

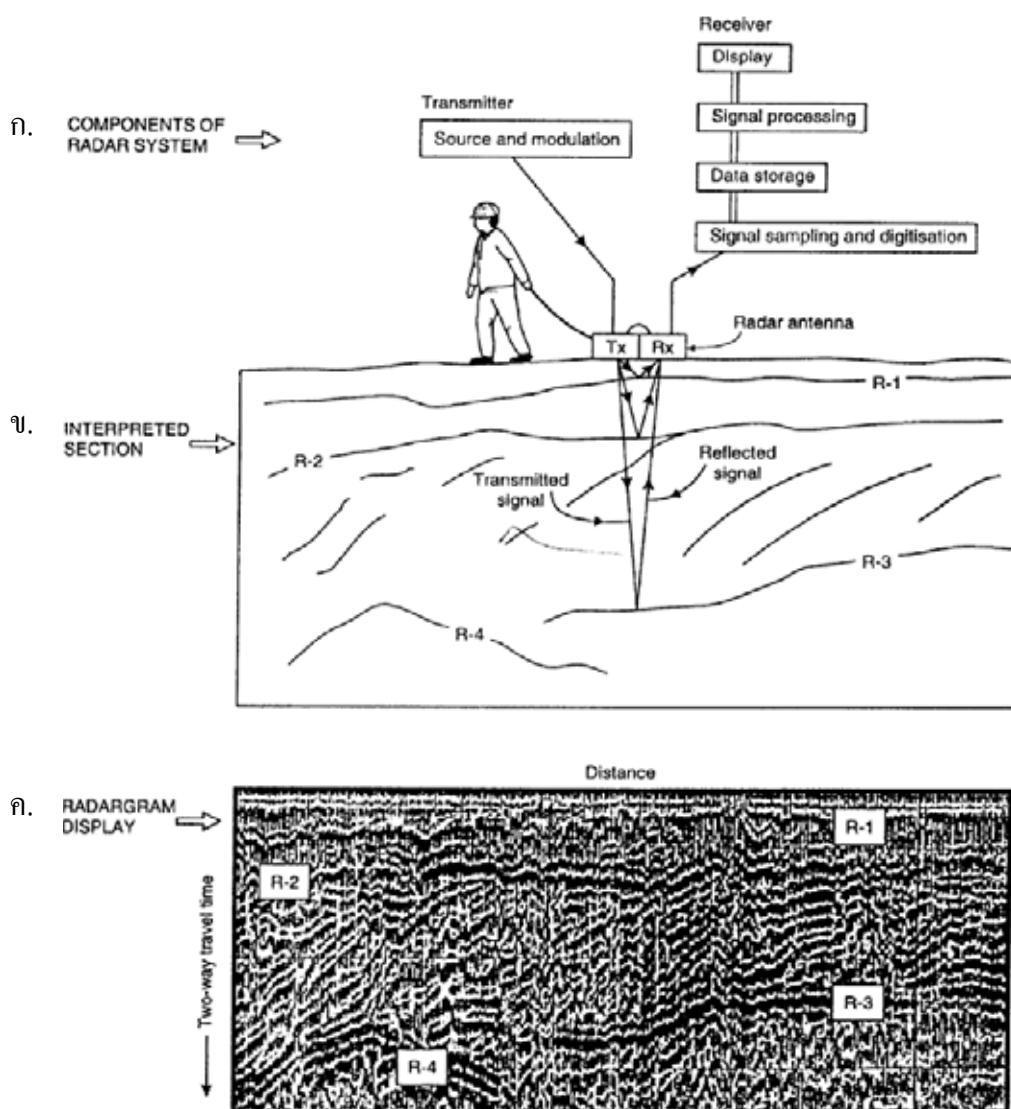
คือ คลื่นที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นด้วยจึงเป็นคลื่นตามขวาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยคลื่นหลายชนิดแบ่งตามความถี่ ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 10^8 - 10^{12} Hz สำหรับการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการสำรวจธรณีฟิสิกส์ จะใช้ความถี่ช่วง 100-1,000 MHz

การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ทำได้โดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นวิทยุความถี่สูง (อยู่ในช่วงคลื่นพลังงานไมโครเวฟ) ลงสู่ใต้ผิวดินโดยใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Antenna) พลังงานที่ถูกส่งผ่านลงไปจะถูกสะท้อนกลับขึ้นมาเมื่อเจอกับเขตรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ต่างกันและเข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณ (Receiver) จากนั้นเครื่องมือจะบันทึกข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลเชิงตัวเลข

การสำรวจธรณีฟิสิกส์วิธีนี้ใช้บอกตำแหน่งและความลึกของวัตถุใต้ผิวดิน โดยแสดงข้อมูลเป็นลักษณะภาพ 2 มิติ หลักการทำงาน คือ การปล่อยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน เมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบกับเขตรอยต่อของวัตถุต่างชนิดกัน ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสะท้อนกลับขึ้นมาเข้าสู่ตัวรับสัญญาณ และพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านลงไปยังชั้นรอยต่อถัดไป

อุปกรณ์ส่งสัญญาณจะถูกลากเป็นระยะทางยาวไปบนพื้นดิน (รูปที่ 2.23 ก.) หรืออาจจะพ่วงติดกับรถเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเก็บข้อมูล เมื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งลงไปใต้ผิวดินกระทบกับวัตถุหรือเขตรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างกัน พลังงานส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยลงไปจะสะท้อนกลับขึ้นมาจากผิวรอยต่อและพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังรอยต่อชั้นต่อไป (รูปที่ 2.23 ข.)

สัญญาณที่สะท้อนกลับขึ้นมาเข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณ จะถูกบันทึกข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลเชิงตัวเลข แสดงเวลาในการเคลื่อนที่เข้าไปและขากลับของสัญญาณในหน่วยนาโนวินาที และแสดงแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยสัญญาณจะปรากฏออกมาเป็นลักษณะของความต่างศักย์ไฟฟ้าและจะถูกพล็อตออกมาบนหน้าจอแสดงผลเป็นแถบสัญญาณต่อเนื่อง (รูปที่ 2.23 ค.) แถบสีที่ต่างกันเกิดจากการแสดงค่าความต่างศักย์ค่าบวกและค่าลบ



รูปที่ 2.23 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง GPR

(Reynolds, 1997)

ความลึกของการสำรวจด้วย GPR ขึ้นกับค่าความถี่ของสัญญาณที่ปล่อยออกมา หากสัญญาณที่ปล่อยออกมามีความถี่ต่ำสามารถสำรวจได้ลึกแต่ข้อมูลที่ได้อาจมีความละเอียดน้อย ส่วนสัญญาณที่มีความถี่สูงสามารถสำรวจได้ในระดับตื้นแต่ข้อมูลที่วัดได้มีความละเอียดสูง

ในตัวอย่างที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ เช่น ทรายแห้ง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสำรวจได้ลึกถึง 30 เมตร และในตัวอย่างที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง เช่น ดินเหนียวและน้ำ แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกทำให้ลดลงส่งผลให้ค่าความลึกของการสำรวจลดลงด้วย

2.6.1.1 การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในดิน โดยปกติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านชั้นดิน ความเร็วของการแผ่คลื่นในดินจะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ_r) และค่าความซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability, μ) ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในสุญญากาศด้วยความเร็ว $C = 3 \times 10^8$ m/s

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \dots\dots\dots (2.35)$$

โดยที่ μ_0 คือ ความซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
 ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ ค่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในตัวกลางนั้นจะเปลี่ยนไปเป็น

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \dots\dots\dots (2.36)$$

โดยที่ μ คือ ความซึมได้ทางแม่เหล็กของตัวกลางใดๆ
 ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ

จัดความสัมพันธ์จากสมการ (2.35) และ (2.36) ได้เป็น

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

เมื่อ $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ และ $\mu_r = \mu / \mu_0$

โดยที่ μ_r คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

จากการแก้สมการแมกซ์เวลล์และคลื่นระนาบ พบว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเวลา เช่น ให้สนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในแกน z จะได้สมการเป็น

$$E(z, t) = E_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

โดยที่ E_0 คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า
 ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
 k คือ เลขคลื่น $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ แต่ในกรณีที่ตัวกลางนำไฟฟ้าเลขคลื่นจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน $k = \alpha + j\beta$ ซึ่ง α เป็นพจน์ของจำนวนจริงและ β เป็นพจน์ของจำนวนเชิงซ้อน

ค่าของ α และ β มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\alpha = \omega \left[\frac{\epsilon' \mu}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1) \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

$$\beta = \omega \left[\frac{\epsilon' \mu}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1) \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

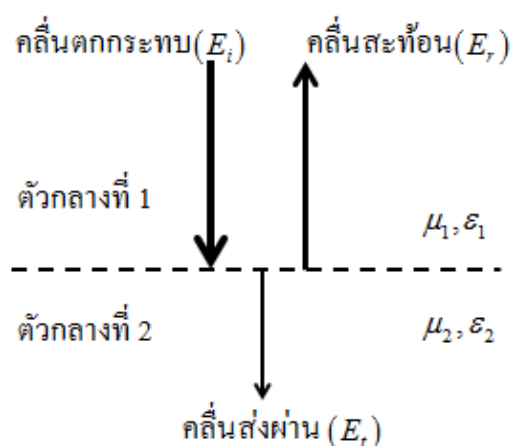
จากสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$\delta = \frac{1}{\alpha}$$

โดยที่ δ คือ ค่าความลึกผิว (Skin depth) เป็นพารามิเตอร์ที่อธิบายการลดลงของแอมพลิจูดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามความลึก

ϵ' คือ ค่าไดอิเล็กตริกโพลาริซ

การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปที่ 2.24) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากตัวกลางที่ 1 และไปกระทบกับรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 1 กับ 2 คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ และพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังชั้นถัดไป ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.24 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$E_i = E_r + E_t \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (R)

$$R = \frac{E_r}{E_i} \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots (2.43)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T)

$$T = \frac{E_t}{E_i} \dots\dots\dots (2.44)$$

$$T = 1 - R = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots (2.45)$$

เมื่อ Z_1 และ Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 1 และ 2 โดยที่ $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$
เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.43) จะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}})}{(\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}})} \dots\dots\dots (2.46)$$

2.6.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดธรณีเรดาร์

2.6.2.1 อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติตัวส่งและตัวรับสัญญาณจะอยู่ในอุปกรณ์ชิ้นเดียวกันและอุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกออกแบบมาให้มีค่าความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสำรวจที่เฉพาะตัว ได้แก่ 2600-1600, 900-270 และ 200-16 MHz ค่าความถี่จะเป็นกำหนดความลึกในการสำรวจและความละเอียดของข้อมูล ยิ่งมีค่าความถี่ต่ำจะสามารถสำรวจได้ลึกแต่ความละเอียดของข้อมูลจะลดลงตามลำดับค่าความถี่ในช่วง 2600-1600 MHz เหมาะกับงานสำรวจโครงสร้างเหล็กในอาคารเพราะมีความละเอียดสูงสามารถแยกระยะห่างของเหล็กได้ ค่าความถี่ในช่วง 900-270 MHz เหมาะกับงานสำรวจโครงสร้างคอนกรีตหนาหรือหาแนวท่อในระดับตื้น ส่วนค่าความถี่ในช่วง 200-16 MHz เหมาะกับงานสำรวจงานทางธรณีวิทยา(รูปที่ 2.25 ก.) งานสิ่งแวดล้อมและแหล่งโบราณคดี โดยปกติอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณธรณีเรดาร์ทุกตัวจะมีอุปกรณ์เสริม คือ สลั้ววัดระยะทาง เนื่องจากเวลาทำการสำรวจจะได้รู้ระยะทางและตำแหน่งที่แน่นอน

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณอีกประเภท เรียกว่า ฮอร์น (Horn Antenna) มีค่าความถี่ 2 GHz และ 1 GHz ใช้ในงานสำรวจชั้นทางโดยติดอุปกรณ์ดังกล่าวไว้กับรถและไม่ต้องวางติดกับพื้นถนน สามารถเก็บข้อมูลได้ลึกประมาณ 1 เมตร

2.6.2.2 อุปกรณ์ควบคุมการส่งสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ควบคุมแหล่งพลังงานที่ใช้ในการปล่อยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปที่ 2.25 ข.)



รูปที่ 2.25 อุปกรณ์สำรวจธรณีเรดาร์

ก. ชุดอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณความถี่ 200 MHz พร้อมล้อวัดระยะทาง ข. อุปกรณ์ควบคุมการการส่งสัญญาณ SIR-20 ค. คอมพิวเตอร์ควบคุมโปรแกรมและเป็นหน้าจอแสดงผล

2.6.2.3 เครื่องบันทึกข้อมูล คือ อุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณที่วัดได้จากตัวรับสัญญาณให้เป็นข้อมูลตำแหน่ง เวลาและแอมพลิจูด (รูปที่ 2.25 ค.) ที่เกิดจากการสะท้อนจากนั้นจะแสดงข้อมูลออกมาในลักษณะภาพ 2 มิติ บอกระยะทางและความลึกสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์และแปลความหมายได้

2.6.3 ขั้นตอนและวิธีการสำรวจธรณีเรดาร์

ในการสำรวจด้วยวิธีธรณีเรดาร์ เริ่มจากการกำหนดพื้นที่และเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ พิจารณานาขและควมลึกของเป้าหมาย ทำการเลือกความถี่ของอุปกรณ์ส่งสัญญาณให้เหมาะกับการสำรวจ เช่น การสำรวจหาขอบเขตของแหล่งโบราณคดีใต้ผิวดินควรใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความถี่ 200 MHz เป็นต้น เมื่อเลือกอุปกรณ์แล้ววางแผนการสำรวจ เชื่อมต่ออุปกรณ์สำรวจให้เรียบร้อย จากนั้นทำการเก็บข้อมูลตามแนวสำรวจ

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการสำรวจด้วยธรณีเรดาร์

การสำรวจด้วยธรณีเรดาร์	
ข้อดี	ข้อด้อย
1. มีความรวดเร็วในการเก็บข้อมูล	1. เก็บข้อมูลได้ในระดับตื้น
2. มีความละเอียดของข้อมูลสูง	2. ความลึกของการสำรวจจะลดลงอย่างมากในดินเหนียว
3. สามารถแสดงข้อมูลได้ทันทีในสนาม	

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lucius et al. (2007) ได้ศึกษาการหาแหล่งทรายบก โดยใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ 5 วิธี ได้แก่ วิธีวัดคลื่นไหวสะเทือน, วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, วิธีวัดด้วยคลื่นเรดาร์, วิธีวัดด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบขึ้นกับเวลาและขึ้นกับความถี่ ทำการศึกษาในพื้นที่แหล่งทรายที่เกิดจากการสะสมตัวเชิงเขาแบบตะกอนรูปพัด ใช้ผลที่ได้จากแต่ละวิธีศึกษาสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน ได้แก่ ความหนาของการสะสมตัว, ความลึกของชั้นรอยต่อต่างๆ, ความหนาของชั้นเปลือกดิน, ระดับน้ำใต้ดินและลักษณะความสัมพันธ์ทางธรณีกับพื้นที่รอบข้าง เพื่อต้องการทราบลักษณะการสะสมตัวของทราย เพื่อประโยชน์ในการจัดการและลดค่าใช้จ่ายในการทำบ่อทราย ผลที่ได้คือ การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนสามารถแยกกรวดและออกจากสิ่งรอบข้างได้ดีและแสดงควมลึกของหินฐานอย่างชัดเจน การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถแยกชั้นกรวดทรายกับชั้นหินฐานได้ แต่แยกชั้นกรวดทรายและดินเหนียวที่ถมตัวด้วยน้ำไม่ดีนัก การสำรวจด้วยวิธีคลื่นเรดาร์

สามารถแยกชั้นเปลือกดินและระดับน้ำใต้ดินได้ดี การสำรวจด้วยวิธีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบขึ้นกับเวลาและขึ้นกับความถี่ สามารถแยกกรวดทรายออกจากแนวหินฐานได้ในแนวราบแต่มีความแม่นยำต่ำและได้ความลึกไม่เกิน 10 เมตร การสำรวจด้วยวิธีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบขึ้นกับความถี่เก็บข้อมูลได้เร็ว สามารถแยกกรวดทรายออกจากแนวหินฐานได้ในแนวราบแต่ไม่สามารถวัดความลึกได้ เมื่อนำผลของสำรวจแต่ละวิธีมาวิเคราะห์ร่วมกันทำให้ข้อมูลที่ได้มีความเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2.8 พื้นที่ศึกษา

อำเภอชุมพวง เป็นอำเภอหนึ่งของจังหวัดนครราชสีมา มีพื้นที่ประมาณ 546.57 ตารางกิโลเมตร อยู่ห่างจากตัวจังหวัดนครราชสีมาประมาณ 98 กิโลเมตร อำเภอชุมพวงมีพื้นที่ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของจังหวัดนครราชสีมา มีอาณาเขตติดต่อกับอำเภอต่างๆดังต่อไปนี้

ทิศเหนือ มีพื้นที่ติดกับอำเภอประทายและอำเภอเมืองยาง

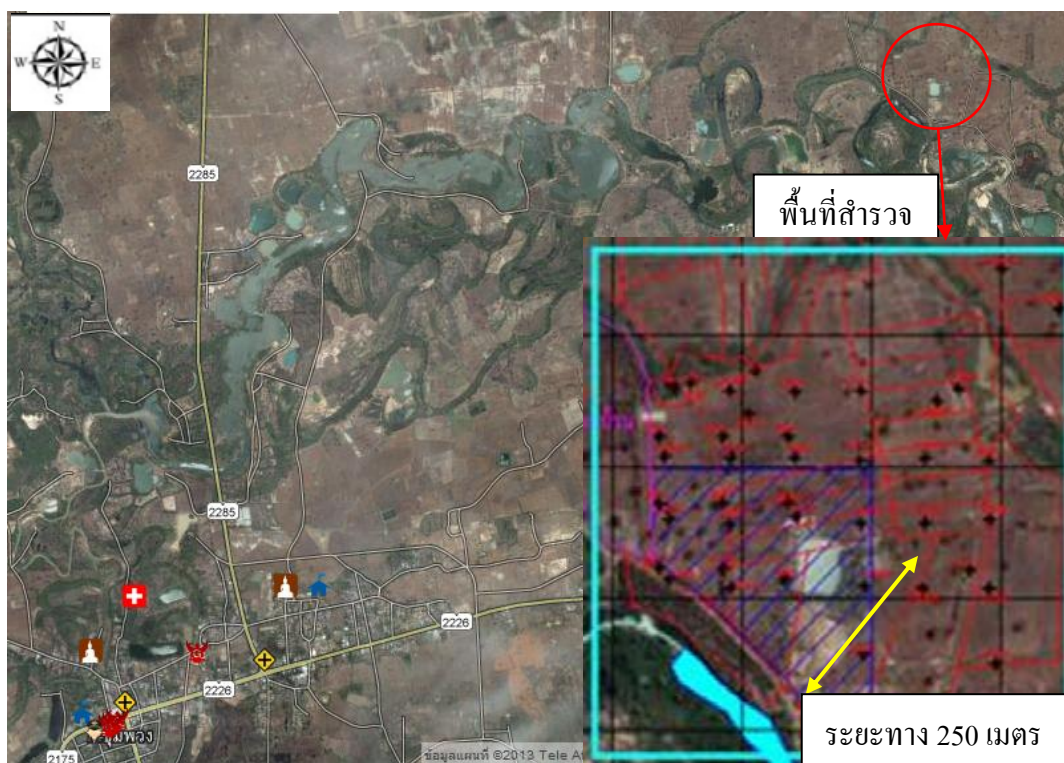
ทิศตะวันออก มีพื้นที่ติดกับอำเภอลำทะเมนชัย

ทิศใต้ มีพื้นที่ติดกับอำเภอห้วยแถลงและอำเภอลำปลายมาศ (จังหวัดบุรีรัมย์)

ทิศตะวันตก มีพื้นที่ติดกับอำเภอมาย

ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของอำเภอชุมพวง เป็นพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำและพื้นที่ส่วนใหญ่ถูกปกคลุมไปด้วยทราย ทรายในอำเภอชุมพวงมาจากการกัดกร่อนหินต้นกำเนิดในกลุ่มหินโคราชและถูกพัดพามาสะสมตัวกันโดยแม่น้ำมูล

พื้นที่อำเภอชุมพวง กิ่งอำเภอลำทะเมนชัย และกิ่งอำเภอเมืองยางรองรับด้วยหมวดหินมหาสารคาม ซึ่งประกอบด้วยหินดินดาน หินทราย หินทรายแป้ง หินโคลนและมีชั้นเกลือหินอยู่ด้านล่าง บริเวณสองฝั่งของแม่น้ำประกอบด้วยกรวดทรายดินเหนียวของแม่น้ำ สภาพน้ำบาดาลส่วนใหญ่กร่อยและเค็ม พื้นที่ส่วนใหญ่ของอำเภอ ความลึกของชั้นน้ำบาดาลในหินร่วนประมาณ 10-40 เมตร และมีระดับน้ำบาดาลที่ 2-10 เมตร โดยเฉลี่ย ในหินแข็งชั้นน้ำจะลึก 20-40 เมตรและมีระดับน้ำบาดาลลึก 5-10 เมตร โดยเฉลี่ยคุณภาพน้ำบาดาล ส่วนใหญ่มีความกร่อย และเค็ม รวมทั้งมีความกระด้างสูงมากกระจายอยู่ในบริเวณพื้นที่ของตำบลเมืองยาง ตำบลประสุข ตำบลกระเบื้องนอก ตำบลตลาดไทร ตำบลบ้านยาง ตำบลหนองหลัก ตำบลโนนอุดม และตำบลโนนรัง และบางส่วนของตำบลสหราษฎร์และตำบลละหานปลาค้าว นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณเหล็กสูงโดยทั่วไป (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2550)



รูปที่ 2.26 แสดงพื้นที่ อำเภอลำปางและพื้นที่ที่ทำการสำรวจทราย

จากรูปที่ 2.26 แสดงแผนที่ภาพถ่ายลักษณะของพื้นที่สำรวจ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มของแนวแม่น้ำของลำน้ำมูล ประกอบด้วยทางน้ำปัจจุบันและทางน้ำเก่าเป็นจำนวนมาก ทั้งสองฝั่งของแม่น้ำมูลมีการทำบ่อทรายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีการสะสมตัวของทรายจำนวนมากมีจำนวนชั้นทรายหลายชั้นและเป็นแหล่งทรายศักยภาพสูง

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย

พื้นที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย คือ อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มจากการวางแผนสำรวจอ้างอิงเป็นระยะทาง 250 เมตร โดยจะนำวิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี ซึ่งประกอบด้วย การสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือน, การสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, การสำรวจวัดคลื่นเรดาร์และการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ มาสำรวจวัดค่าตามแนวอ้างอิงดังกล่าว จากการพิจารณาภาพถ่ายดาวเทียมคุณลักษณะการตัดของแม่น้ำ พบว่า แนวอ้างอิงที่เหมาะสมที่จะใช้เปรียบเทียบทั้ง 4 วิธี คือ แนวที่ทำมุม 35 องศากับทิศเหนือ (รูปที่ 3.1) เนื่องจากเป็นแนวที่วางตัดผ่านความกว้างของแม่น้ำ ซึ่งอาจจะเห็นลักษณะของแนวตลิ่งได้



รูปที่ 3.1 แสดงแนวสำรวจที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

ในการสำรวจครั้งนี้ใช้ระบบพิกัด Datum Indian 1975 แนวสำรวจอ้างอิงที่ใช้เป็นแนวเปรียบเทียบข้อมูล โดยทำการสำรวจโดยวิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 แบบ ผ่านแนวสำรวจนี้ โดยมีระยะที่ใช้เปรียบเทียบประมาณ 200 เมตร มีพิกัดดังนี้ มีจุดเริ่มต้น 263751 ตะวันออก, 1702030 เหนือ และจุดสุดท้าย 263904 ตะวันออก, 1702211 เหนือ

3.1 การสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

หลังจากกำหนดแนวสำรวจเรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการสำรวจโดยการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ Multichannel Analysis of Surface Wave; MASW มีรูปแบบการวางตำแหน่งตัวรับสัญญาณและการเก็บข้อมูลเหมือนกับการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบทั่วไป แต่ในกรณีของการเก็บข้อมูลแบบ MASW จะนำคลื่นผิวดินชนิดเรลีย์มาใช้ในการวิเคราะห์ค่า จากนั้นทำการแปลงคลื่นผิวดินให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือนอีกทีหนึ่ง โดยคลื่นผิวดินชนิดเรลีย์เป็นคลื่นที่มีความถี่ต่ำ มีแอมพลิจูดและพลังงานสูงตรวจจับได้ง่าย ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

3.1.1.1 เครื่องรับสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน (Seismograph) ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Geometrics (Model Geode) เป็นเครื่องที่มี 24 ช่องรับสัญญาณ (รูปที่ 3.2)

3.1.1.2 คอมพิวเตอร์ ใช้ในการตั้งค่าและกำหนดคำสั่งต่างๆในโปรแกรม Seismodule control เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ ระยะเวลาห่างระหว่างตัวรับสัญญาณแต่ละตัว ระยะเวลาห่างระหว่างตัวรับสัญญาณตัวแรกกับแหล่งกำเนิดคลื่นและช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล

3.1.1.3 ตัวรับสัญญาณ (Geophones) ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรับสัญญาณ 24 ตัว ทำหน้าที่ในการบันทึกข้อมูลแอมพลิจูดและเวลาที่คลื่นวิ่งเข้ามา โดยตัวรับสัญญาณที่เลือกใช้มีค่าความถี่ธรรมชาติ 4.5 Hz เนื่องจากคลื่นผิวดินเป็นคลื่นที่มีความถี่ต่ำ

3.1.1.4 สายเคเบิล ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างตัวรับสัญญาณทั้ง 24 ตัวกับเครื่องรับสัญญาณ โดยสายเคเบิลนี้มีข้อต่อทั้งสิ้น 24 ช่อง แต่ละช่องมีระยะห่างกัน 5 เมตร

3.1.1.5 อุปกรณ์เปิด-ปิดการรับสัญญาณ (Ticker) อุปกรณ์ชิ้นนี้เป็นสิ่งสำคัญมากในการเก็บข้อมูลด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปิดและปิดช่วงการรับสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน โดย Ticker จะติดอยู่บริเวณหัวค้อนปอนด์และปลายอีกด้านต่อเข้ากับเครื่องรับสัญญาณ เมื่อทุบค้อนลงบนแผ่นเหล็ก Ticker จะเปิดรับสัญญาณ โดยเวลาในการรับสัญญาณสามารถตั้งค่าได้ในโปรแกรม Seismodule control เมื่อครบเวลาที่กำหนดเครื่องจะปิดรับสัญญาณโดยอัตโนมัติทำให้สัญญาณที่เกิดหลังจากนี้ไม่สามารถเข้าสู่เครื่องบันทึกข้อมูลได้ เป็นประโยชน์อย่างมากในการลดคลื่นรบกวนจากภายนอก

3.1.1.6 ค้อนปอนด์ ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือน เนื่องจากการสำรวจในงานวิจัยนี้ต้องการความลึกไม่เกิน 30 เมตร ดังนั้น ค้อนปอนด์จึงเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่เหมาะสมและมีต้นทุนต่ำ

3.1.1.7 แผ่นเหล็ก คือ แผ่นที่ใช้ขยายสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน เมื่อทุบค้อนลงบนแผ่นเหล็กจะทำให้พลังงานคลื่นอัดลงไปดินได้ดียิ่งขึ้น

3.1.1.8 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องบันทึกข้อมูล

3.1.1.9 ตลับเมตร ใช้ในการวางแผนสำรวจและวัดระยะเพื่อวางตำแหน่งของตัวรับสัญญาณแต่ละตัว

3.1.1.10 GPS ระบุตำแหน่ง ใช้ระบุตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของแนวสำรวจ

3.1.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

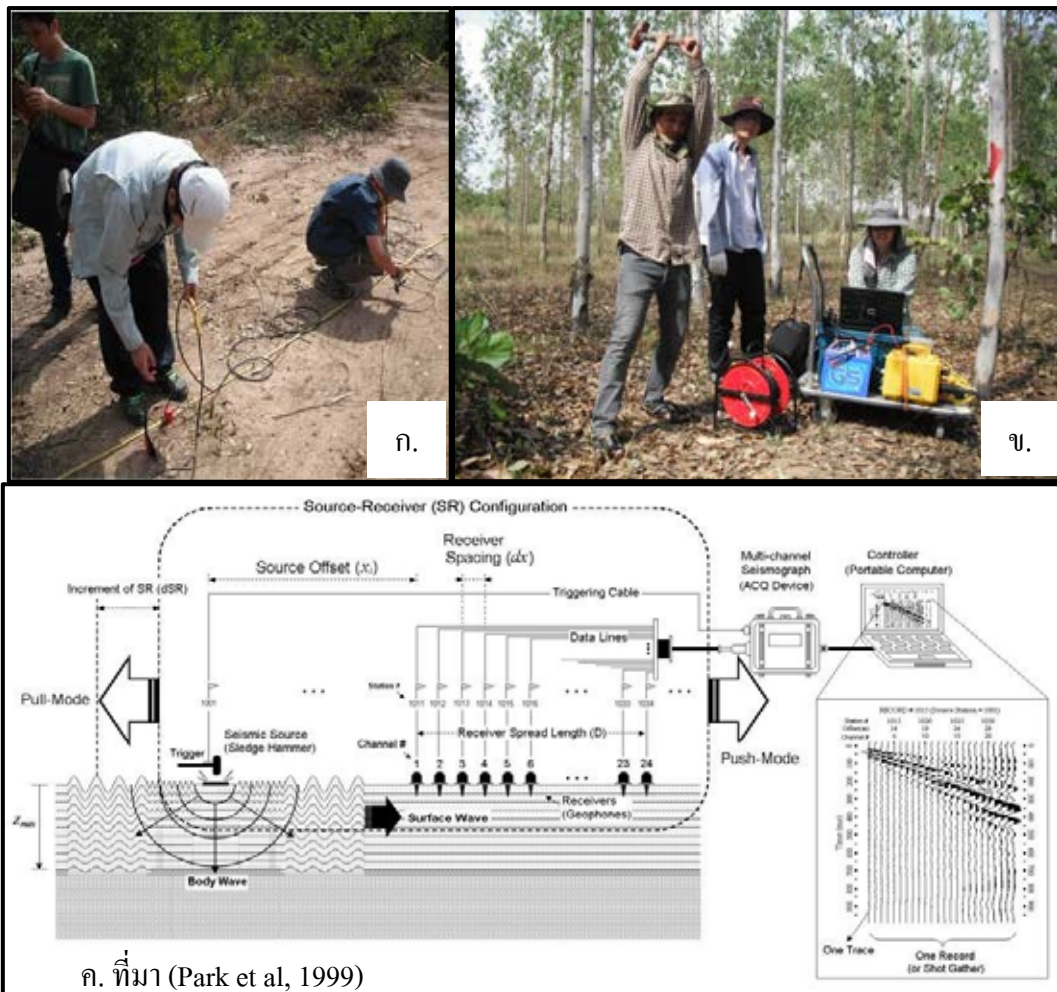
ขั้นตอนในการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW เริ่มจากการวางแนวสำรวจ โดยใช้ GPS ในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของการเก็บข้อมูล จากนั้นใช้เข็มทิศตั้งแนวสำรวจโดยให้ทำมุม 35 องศากับทิศเหนือ เพื่อให้แนวสำรวจวางตัวตัดผ่านแนวแม่น้ำเก่า ใช้ตลับเมตรวางเป็นแนวยาวตามแนวสำรวจ วางตัวรับสัญญาณทั้ง 24 ตัว ตามแนวของตลับเมตร โดยกำหนดให้ระยะระหว่างตัวรับสัญญาณแต่ละตัวห่างกัน 2 เมตร เนื่องจากการวางระยะใกล้กันทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความละเอียดสูง สัญญาณที่เข้าตัวรับสัญญาณแต่ละตัวมีความชัดเจน เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ค้อนปอนด์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือน ดังนั้นระยะของการสำรวจไม่ควรไกลมากนัก

จากนั้นเสียบตัวรับสัญญาณทุกตัวลงไปในพื้นที่ดินตามระยะห่างที่กำหนดไว้ ทำการเชื่อมต่อสายเคเบิลกับตัวรับสัญญาณทั้ง 24 ตัว พร้อมทั้งต่อเข้าเครื่อง Seismograph (รูปที่ 3.3 ก.) เชื่อมต่อ Ticker กับค้อนปอนด์และเครื่อง Seismograph จากนั้นเชื่อมต่อเครื่อง Seismograph เข้ากับแบตเตอรี่และคอมพิวเตอร์ เปิดโปรแกรม Seismodule control ทำการกำหนดค่า ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณแต่ละตัวเป็น 2 เมตร ให้ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณตัวแรกกับแหล่งกำเนิดคลื่นเป็น 2 เมตรและให้ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลเป็น 0.5 มิลลิวินาที

เมื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์เสร็จแล้ว วางแผ่นเหล็กห่างจากตัวรับสัญญาณเป็นระยะ 5 เมตร ตามที่ได้กำหนดค่าไว้ในโปรแกรม จากนั้นทุบค้อนลงบนแผ่นเหล็กเพื่อปล่อยสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนลงสู่พื้นดิน ขณะที่ค้อนกระทบกับแผ่นเหล็ก Ticker จะส่งสัญญาณให้เครื่องบันทึกข้อมูลเริ่มเปิดรับสัญญาณและเมื่อครบเวลา 0.5 มิลลิวินาที เครื่องรับสัญญาณจะหยุดรับสัญญาณโดยอัตโนมัติ เมื่อเก็บข้อมูลและบันทึกผลแล้ว ในการเก็บข้อมูลแต่ละจุดเราสามารถกำหนดได้ว่า จะเก็บข้อมูลกี่ครั้ง เช่น ทำการเก็บข้อมูล 3 ครั้งต่อจุดเพื่อหาค่าเฉลี่ยหรือเลือกไฟล์ที่ให้ข้อมูลชัดเจนมากที่สุด เป็นต้น

ในการการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งสิ่งที่วัดได้ คือ ค่าความเร็วของคลื่นเฉือนเฉลี่ย โดยประมาณว่าค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยตรงกลางของแนวสำรวจและข้อมูลที่วัดได้เป็นข้อมูล 1 มิติ (รูปที่ 3.3 ก.) เป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แตกต่างกันตามแนวดิ่ง เกิดจากคลื่นไหวสะเทือนเดินทางผ่านตัวกลางที่มีสภาพยืดหยุ่นแตกต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้แนวสำรวจใช้ตัวรับสัญญาณ 24 ตัว แต่ละตัววางห่างกัน 2 เมตร มีระยะเป็น 46 เมตร และเมื่อรวมกับระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณตัวแรกกับแหล่งกำเนิดคลื่นจะได้ระยะแนวสำรวจรวมทั้งสิ้น 51 เมตร เมื่อคิดระยะครึ่งหนึ่งของแนวสำรวจจะได้ว่า ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลครั้งแรก คือ ระยะที่ห่างจากจุดเริ่มต้นการสำรวจเป็นระยะ 25.5 เมตร

เมื่อทำการเลื่อนตำแหน่งตัวรับสัญญาณตัวแรกและแผ่นเหล็กไปที่ละ 2 เมตร จากตำแหน่งเริ่มต้นไปตามแนวสำรวจ ทำการเก็บข้อมูลทุกๆตำแหน่งจนครบ 100 จุด จากนั้นนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เก็บได้จากแต่ละจุดมาวางเชื่อมต่อกัน เราจะได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วคลื่นทั้งในแนวราบและแนวตั้ง แสดงข้อมูลเป็น 2 มิติ สามารถแปลความหมายเป็นข้อมูลโครงสร้างทางธรณีวิทยาได้ผิวดินได้

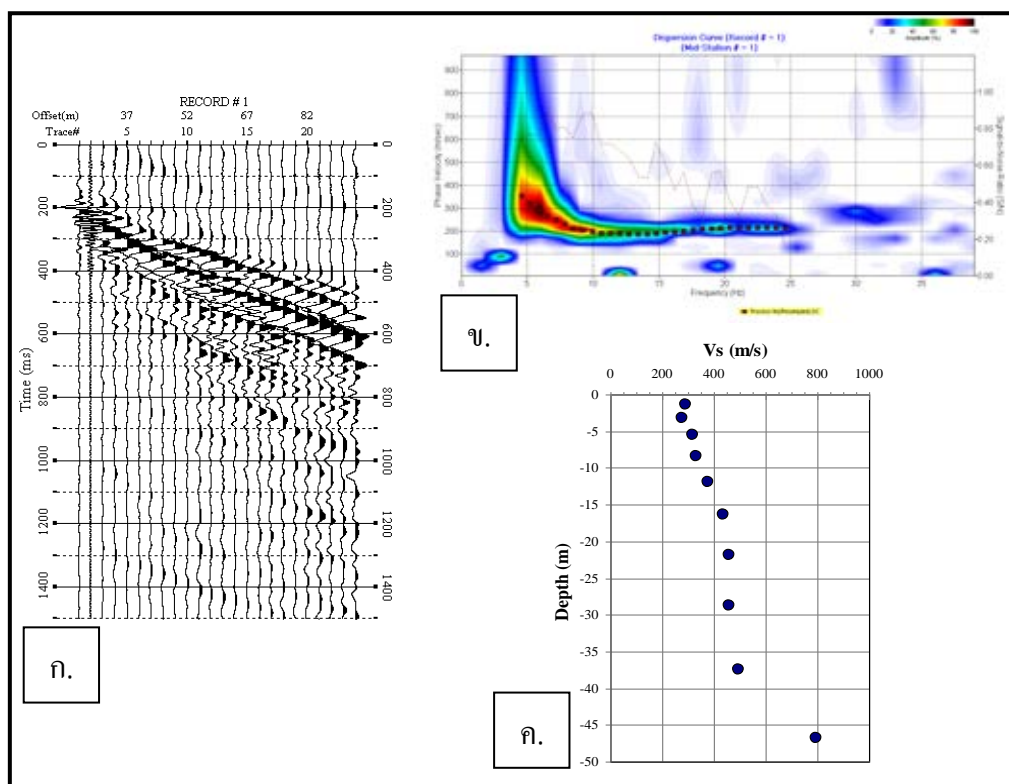


รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

- ก. การเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณแต่ละตัวกับสายเคเบิล
 ข. การทุบค้อนเพื่อเริ่มเก็บข้อมูล
 ค. แผนภาพแสดงกระบวนการเก็บข้อมูลแบบ MASW

3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

จากข้อมูลที่เก็บได้จากภาคสนามแบบ MASW ใช้โปรแกรม SurfSeis 2 ในการประมวลผล เริ่มจากการนำข้อมูลดิบที่ได้จากภาคสนามซึ่งแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณแต่ละตำแหน่งกับระยะทาง (รูปที่ 3.4 ก.) จากนั้นทำการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และแปลงโดเมนของข้อมูลให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่คลื่นผิวดิน (รูปที่ 3.4 ข.) ในขั้นสุดท้ายทำการ Inversion ข้อมูลเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเหมือนกับความลึก (รูปที่ 3.4 ค.) จะเห็นว่าในการเก็บข้อมูลหนึ่งครั้งสิ่งที่ได้ คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเหมือนกับความลึกหนึ่งแนว หากต้องการข้อมูลที่ต่อเนื่องกันเป็นแนวยาวต้องทำการเลื่อนตำแหน่งและเก็บข้อมูลหลายครั้ง จากนั้นนำข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละจุดมาเชื่อมต่อกันจะได้ข้อมูลเป็น 2 มิติ



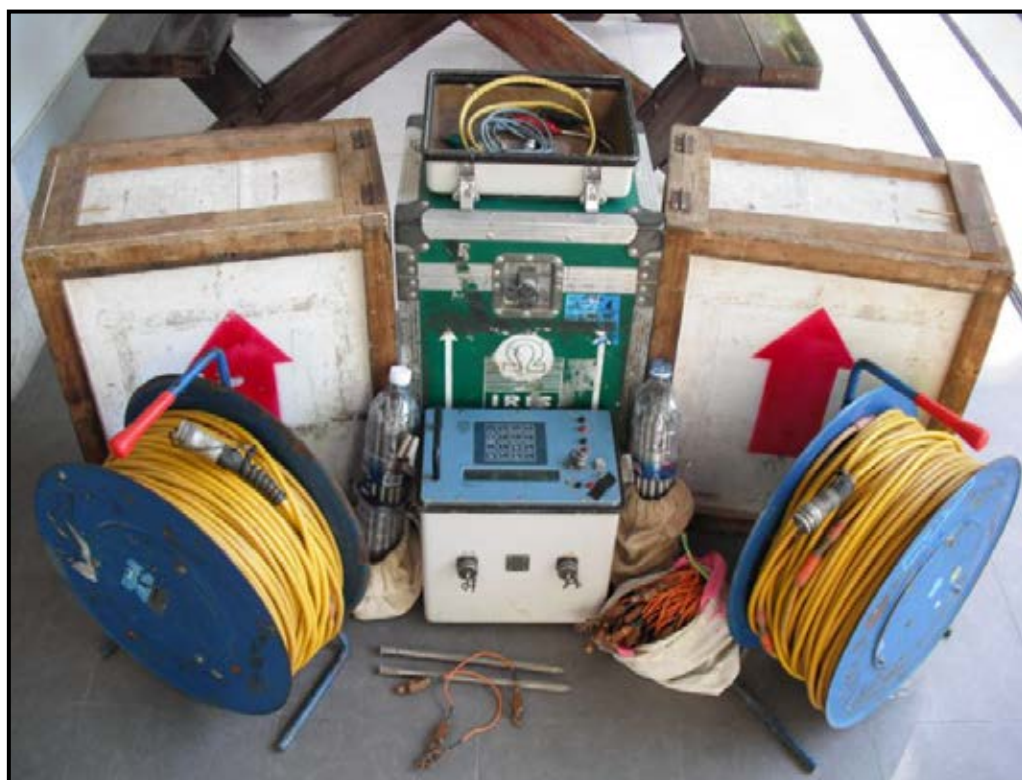
รูปที่ 3.4 แสดงการประมวลผลข้อมูล MASW

(Park et al, 1999)

- ก. ข้อมูลดิบที่ได้จากการเก็บข้อมูล ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่
ค. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วกับความลึก

3.2 วิธีการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

หลังจากเก็บข้อมูลธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW บนแนวอ้างอิงเรียบร้อยแล้ว ทำการเก็บข้อมูลบนแนวเดิมอีกครั้งด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ในการเก็บข้อมูลด้วยวิธีนี้ต้องการค่าความลึกของการสำรวจประมาณ 30 เมตร โดยจะใช้เครื่องมือวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าชนิดอัตโนมัติ เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลได้รวดเร็ว กำหนดจำนวนจุด ตำแหน่งที่ต้องเก็บข้อมูลและความลึกของการสำรวจได้ ที่สำคัญต้องการทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง เพื่อคู่ลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยา ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

3.2.1.1 เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity meter) ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ายี่ห้อ IRIS (Model SYSCAL R1 Plus) มี 48 ช่องรับสัญญาณ ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 วัตต์ อ่านค่าความต่างศักย์และค่ากระแสสูงสุดได้ 600 โวลต์ และ 2.5 แอมแปร์ ตามลำดับ คุณสมบัติของเครื่องรุ่นนี้สามารถทำการเก็บข้อมูลได้แบบอัตโนมัติ โดยจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาและวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ที่สำคัญสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าออกมาโดยอัตโนมัติ (รูปที่ 3.5)

3.2.1.2 แท่งอิเล็กโทรด (Electrodes) เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากสแตนเลส ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดินและวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น มีทั้งหมด 48 อัน ในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งใช้อิเล็กโทรด 2 อัน ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าและอีก 2 อัน ในการวัดค่าความต่างศักย์ โดยระยะห่างของอิเล็กโทรดแต่ละอันสามารถกำหนดได้จากรูปแบบการเก็บข้อมูล ซึ่งมีเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ควบคุมการเก็บข้อมูลแต่ละจุด

3.2.1.3 สายเคเบิล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่ออิเล็กโทรดแต่ละอันเข้ากับเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ในอุปกรณ์ชุดนี้มี 2 เส้น แต่ละเส้นมี 24 ช่องรับสัญญาณ ยาวเส้นละ 120 เมตร มีระยะห่างระหว่างข้อต่อ 5 เมตร

3.2.1.4 ที่หนีบสายไฟ ทำหน้าที่เชื่อมต่อแท่งอิเล็กโทรดแต่ละอันกับข้อต่อสายเคเบิลแต่ละตำแหน่ง มีทั้งหมด 48 อัน

3.2.1.5 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงลงสู่พื้นดินด้านล่าง

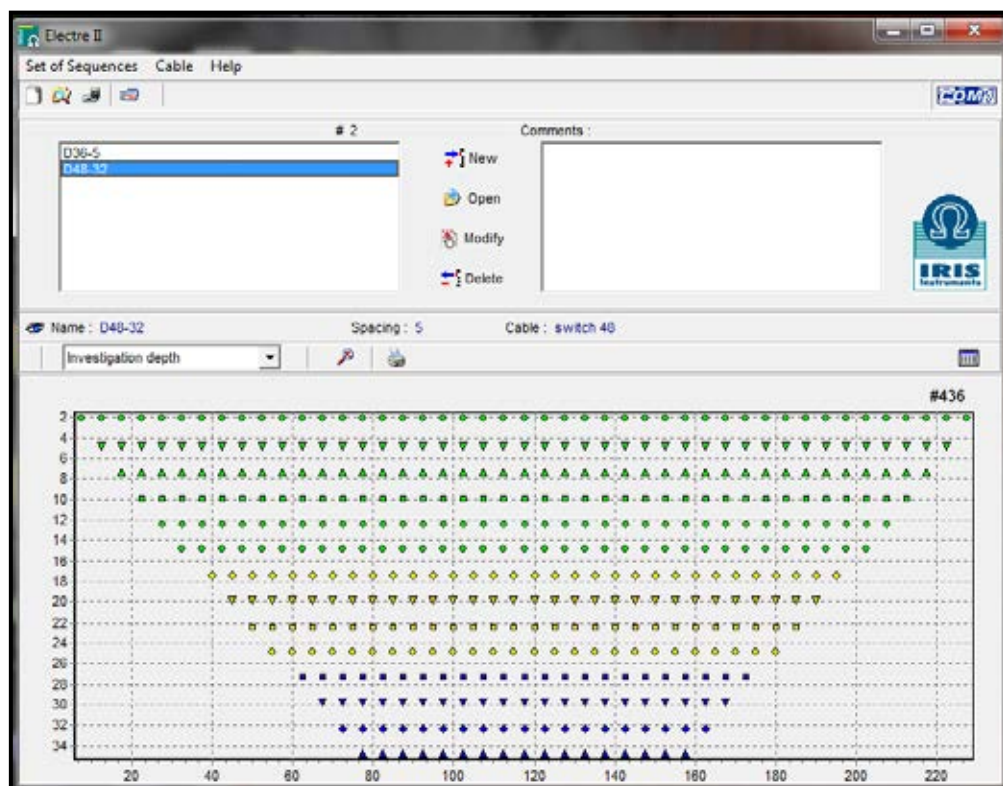
3.2.1.6 ค้อน ใช้ตอกอิเล็กโทรดแต่ละอันลงไปในดิน

3.2.1.7 ตลับเมตร ใช้ในการวางแผนสำรวจและวัดระยะเพื่อวางตำแหน่งของอิเล็กโทรดแต่ละตัว

3.2.1.8 GPS ระบุตำแหน่ง ใช้ระบุตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของแนวสำรวจ

3.2.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เริ่มจากวางแผนการสำรวจตามแนวเดิมที่สำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW ในงานวิจัยนี้ต้องการความลึกในการสำรวจประมาณ 30 เมตร ใช้โปรแกรม Electre II (รูปที่ 3.6) กำหนดรูปแบบการเก็บข้อมูล ในกรณีนี้เลือกใช้การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole) ใช้อิเล็กโทรด 48 อัน แต่ละอันวางห่างกัน 5 เมตร จากนั้นป้อนคำสั่งลงในเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

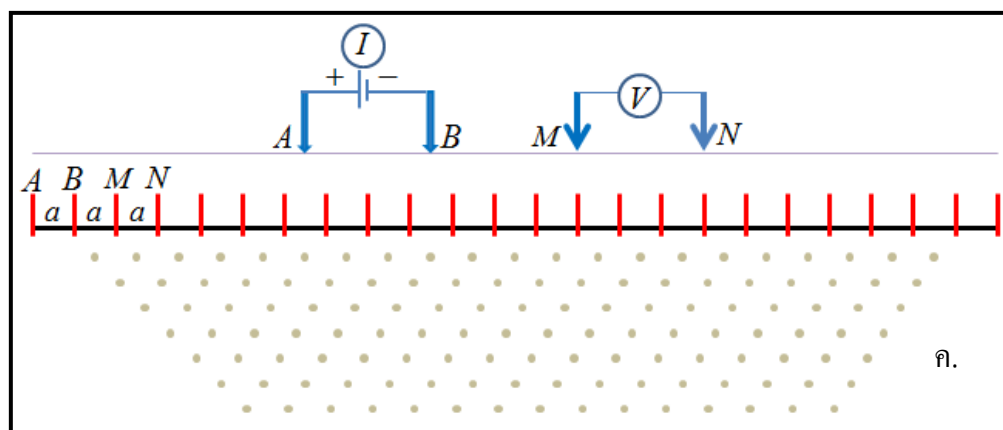


รูปที่ 3.6 แสดงรูปแบบการเก็บข้อมูลโดยโปรแกรม Electre II

กำหนดให้วางอิเล็กโทรดแต่ละอันห่างกัน 5 เมตร ใช้สายเคเบิลยาวเส้นละ 120 เมตร 2 เส้น ลากไปตามแนวสำรวจได้เลย เนื่องจากสายเคเบิลที่ใช้มีระยะห่างระหว่างข้อต่อแต่ละช่องเป็น 5 เมตร ทำให้การวางแนวสำรวจง่ายและรวดเร็ว วางเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าไว้ตรงกลางระหว่างสายเคเบิลทั้ง 2 เส้น ทำการเชื่อมต่อสายเคเบิลทั้งสองเส้นเข้ากับตัวเครื่องพร้อมทั้งเชื่อมต่อแบตเตอรี่ จากนั้นนำแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 48 อัน มาวางที่ตำแหน่งตรงรอยต่อแต่ละจุดของสายเคเบิลพร้อมทั้งตอกลงไปในดินประมาณ $\frac{2}{3}$ ของความยาว ใช้ที่หนีบสายไฟเชื่อมต่อแท่งอิเล็กโทรดทั้ง

48 อัน กับข้อต่อของเคเบิลทั้ง 2 เส้น (รูปที่ 3.7 ก.) เมื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์เรียบร้อยแล้วตรวจเช็คค่าความต้านทานระหว่างแท่งอิเล็กโทรดเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดก่อนการเก็บข้อมูล เช่น อาจจะลึมหินสายไฟในบางตำแหน่ง เป็นต้น

เมื่อตรวจเช็คเรียบร้อยแล้ว เริ่มการเก็บข้อมูลโดยการเลือกคำสั่งและรูปแบบการเก็บข้อมูลที่ได้กำหนดไว้จากโปรแกรม Electre II (รูปที่ 3.6) ปลดอยกระแสไฟฟ้าลงสู่พื้นดินพร้อมทั้งวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งเครื่องเก็บข้อมูลจะคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ผิวดิน โดยอัตโนมัติ ซึ่งรูปแบบและตำแหน่งที่วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ผิวดินแบบไดโพล-ไดโพล ได้แสดงดังรูปที่ 3.7 ค.

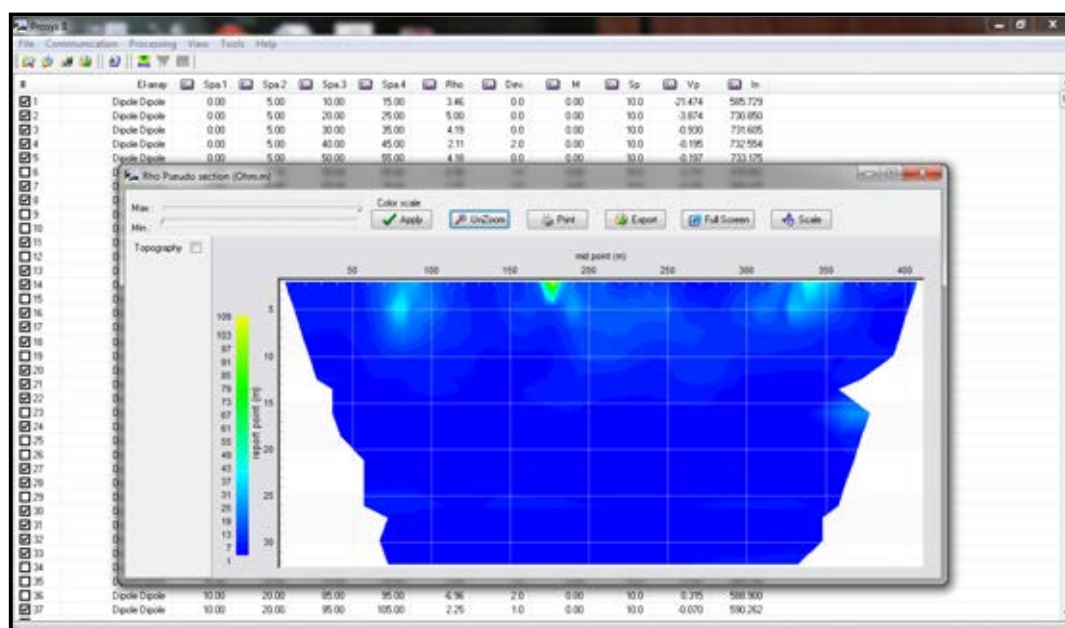


รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

- ก. การเชื่อมต่ออิเล็กโทรดกับสายเคเบิล ข. เริ่มเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า
ค. แสดงตำแหน่งที่วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ผิวดินแบบไดโพล-ไดโพล

3.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้า

เมื่อเก็บข้อมูลในภาคสนามเสร็จแล้ว ดึงข้อมูลออกจากเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อทำการประมวลผล เริ่มจากใช้โปรแกรม Prosys II ในการจัดเรียงข้อมูลและกรองข้อมูลที่ไม่ดีออกไป (รูปที่ 3.8) โดยพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในที่นี้กำหนดให้ค่าไม่เกิน 3% จากนั้นทำการบันทึกสิ่งที่เปลี่ยนแปลงในไฟล์ตั้งชื่อใหม่ พร้อมทั้งเปลี่ยนนามสกุลไฟล์จาก .bin เป็น .dat เพื่อจะนำไปวิเคราะห์ผลกับโปรแกรม RES2DINV



รูปที่ 3.8 แสดงการกรองข้อมูลด้วยโปรแกรม Prosys II

นำไฟล์ใหม่นามสกุล .dat เข้าสู่กระบวนการประมวลผลด้วยโปรแกรม RES2DINV เพื่อสร้างภาพจำลองลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดิน จากข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ในภาคสนาม ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยการสำรวจครั้งนี้จะได้ระยะทางทั้งสิ้น 235 เมตร

3.3 วิธีการสำรวจธรณีเรดาร์

ในการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีธรณีเรดาร์ ทำการเก็บข้อมูลโดยการลากอุปกรณ์สำรวจไปตามแนวสำรวจอ้างอิงเป็นระยะทาง 200 เมตร จากตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อคุณลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน เนื่องจากการสำรวจด้วยวิธีนี้ให้ข้อมูลเป็น 2 มิติ แสดงระยะทางและความลึก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญด้วยกัน คือ ชุดอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชุดอุปกรณ์ควบคุมการบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์แสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องมือสำรวจธรณีเรดาร์

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจธรณีเรดาร์

3.3.1.1 ชุดอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือสำรวจธรณีเรดาร์ยี่ห้อ GSSI (Model 200 MHz-Antenna and SIR-20) ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ส่งสัญญาณไปในตัวกลาง (Antenna) และอุปกรณ์รับสัญญาณที่สะท้อนกลับ (Receiver) โดยประกอบอยู่ในอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน (รูปที่ 3.9 ตัวสี่เหลี่ยม) เหตุที่เลือกใช้ Antenna ความถี่ 200 MHz เนื่องจาก

เหมาะกับงานด้านธรณีวิทยาและอุปกรณ์ชุดนี้ยังประกอบด้วยล้อวัดระยะทาง จึงง่ายต่อการสำรวจและระบุตำแหน่ง

3.3.1.1 เครื่อง SIR-20 คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องมือสำรวจธรณีเรดาร์ พร้อมทั้งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายพลังงานและการเก็บข้อมูล โดยเครื่อง SIR-20 จะเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 3.9)

3.3.1.2 คอมพิวเตอร์ ใช้เป็นอุปกรณ์แสดงผลที่ได้จากการสำรวจ ซึ่งขณะเก็บข้อมูลอุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วน คือ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชุดอุปกรณ์ควบคุมการบันทึกข้อมูลและคอมพิวเตอร์แสดงผล ต้องทำงานพร้อมกัน เพราะขณะทำการสำรวจหน้าจอจะแสดงผลของข้อมูลตามระยะทางแบบเรียลไทม์

3.3.1.4 สายเคเบิล ใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์สำรวจ มี 2 เส้น คือ เส้นแรกใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณกับล้อวัดระยะทางมีความยาวประมาณ 1 เมตร เส้นที่ 2 ใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณกับเครื่อง SIR-20 มีความยาวประมาณ 20 เมตร

3.3.1.6 แบตเตอรี่ ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องบันทึกข้อมูล

3.3.1.7 คลับเมตร ใช้ในการปรับเทียบระยะสำรวจกับล้อวัดระยะทาง

3.2.1.8 GPS ระบุตำแหน่ง ใช้ระบุตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของแนวสำรวจ

3.3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีธรณีเรดาร์

การเก็บข้อมูลในภาคสนามเริ่มจาก การวางแผนสำรวจตามตำแหน่งอ้างอิงเดิมโดยการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของการสำรวจ พร้อมทั้งกำจัดสิ่งกีดขวาง เช่น ขอนไม้หรือกิ่งไม้ที่กีดขวางเส้นทางสำรวจ เป็นต้น เมื่อเตรียมเส้นทางเรียบร้อยแล้ว ทำการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์การสำรวจให้ครบถ้วน โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณกับล้อวัดระยะทาง จากนั้นเชื่อมต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณกับเครื่อง SIR-20 และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งแบตเตอรี่

จากนั้นเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์แล้วเปิดโปรแกรม SIR-20 ตั้งค่าการสำรวจ ได้แก่ การเลือกค่าความถี่ของ Antenna จำนวนการสแกนต่อวินาที เป็นต้น เมื่อตั้งค่าต่างๆเรียบร้อยแล้วทำการปรับเทียบล้อวัดระยะทางกับระยะสำรวจ เพื่อให้ระยะการสำรวจจริงมีค่าเท่ากับระยะที่แสดงในหน้าจอแสดงผล

เมื่อเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์และตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรม SIR-20 เรียบร้อยแล้ว เริ่มการเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SIR-20 ในการบันทึกค่า จากนั้นลาก Antenna ไปตามแนวสำรวจอ้างอิงจนได้ระยะทาง 200 เมตร (รูปที่ 3.10) สังเกตได้จากระยะทางที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 3.10 แสดงการสำรวจด้วยวิธีธรณีเรดาร์

3.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลธรณีเรดาร์

ทำการประมวลผลข้อมูลที่เก็บได้จากภาคสนามด้วยโปรแกรม RADAN 6.6 โดยการปรับตำแหน่งความลึก ทำการกรองสัญญาณคลื่นรบกวนออกจากข้อมูลจริง ปรับความคมชัดของข้อมูล วิเคราะห์ผลและแปลความหมายลักษณะ โครงสร้างที่ปรากฏเป็นข้อมูลทางธรณีวิทยา

3.4 วิธีการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ในการสำรวจเก็บข้อมูลวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในภาคสนาม ทำโดยการบันทึกข้อมูลไปตามแนวสำรวจที่ละตำแหน่ง กำหนดให้เก็บข้อมูลทุกๆระยะห่าง 1 เมตร ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญด้วยกัน คือ ชุดอุปกรณ์หัววัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก Proton magnetometer รุ่น G-856

(<http://www.geometrics.com>)

3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

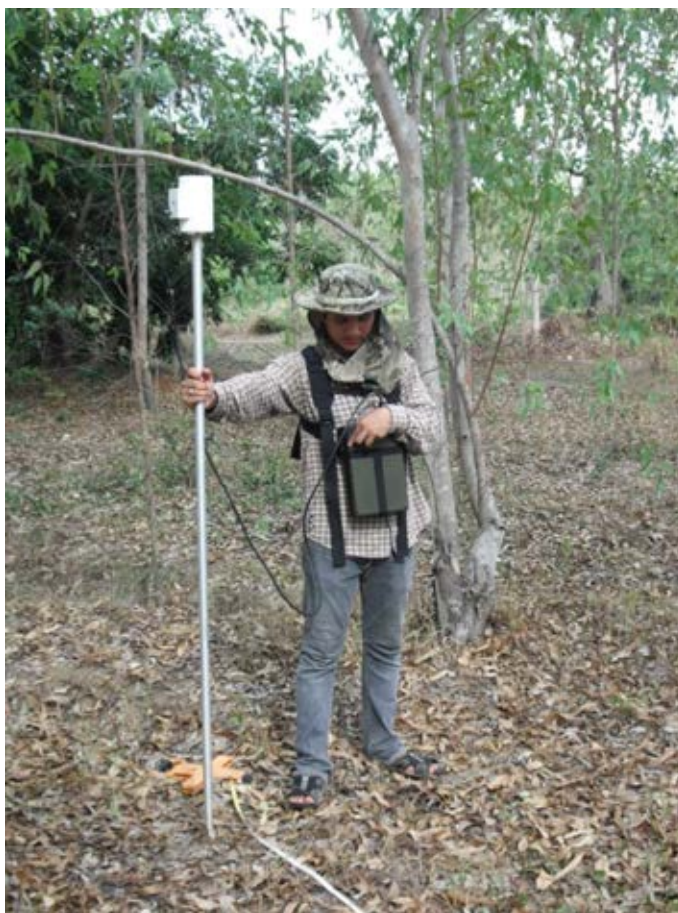
3.4.1.1 เครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กยี่ห้อ Geometrics (Model G-856 Magnetometer) ประกอบด้วยหัววัดและเครื่องบันทึกค่า สามารถบันทึกข้อมูลได้ทั้งแบบคดทีละค่าและแบบอัตโนมัติ อ่านค่าได้ละเอียดในระดับ 0.1 นาโนเทสลา และมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 นาโนเทสลา

3.4.1.2 ตลับเมตร ใช้ในการวางแนวสำรวจและวัดระยะทาง

3.4.1.3 GPS ระบุตำแหน่ง ใช้ระบุตำแหน่ง

3.4.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลความเข้มข้นแม่เหล็ก

เริ่มจากวางแผนการสำรวจตามตำแหน่งเดิมที่ใช้เป็นแนวอ้างอิง ใช้ตลับเมตรวางตามแนวสำรวจเป็นระยะทาง 200 เมตร จากนั้นเชื่อมต่อสายเคเบิลเข้ากับอุปกรณ์หัววัดและเครื่องบันทึกค่าเดินเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งตามแนวสำรวจเว้นระยะห่างตำแหน่งละ 1 เมตร (รูปที่ 3.12) บันทึกผลทั้งในเครื่องบันทึกค่าและในสมุดตารางเพื่อป้องกันความผิดพลาด



รูปที่ 3.12 แสดงการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก

3.4.3 การวิเคราะห์ผลและการนำเสนอข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการนำค่าที่บันทึกได้ในแต่ละตำแหน่งมาพล็อตใน โปรแกรม Excel ค่าที่เปลี่ยนแปลงตามแนวสำรวจ

บทที่ 4

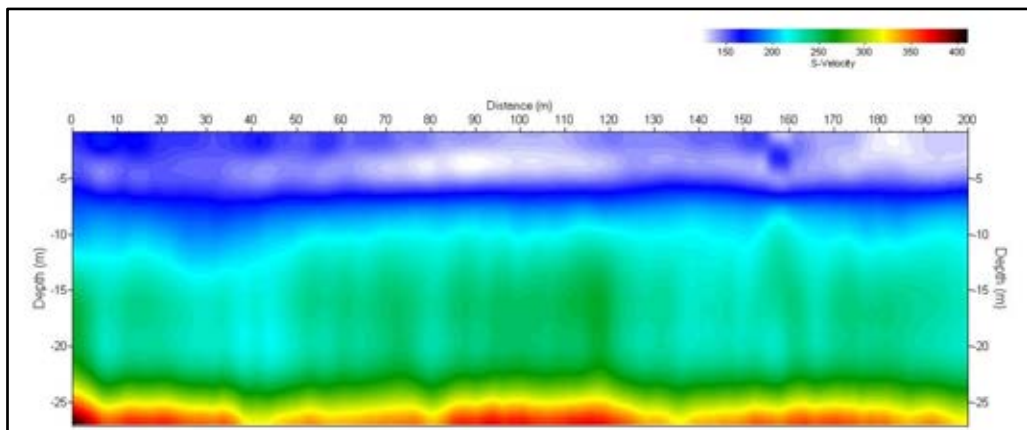
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลธรณีฟิสิกส์ 4 วิธี

หลังจากการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี บนแนวอ้างอิงเดียวกันแล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละวิธี เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ จำนวน 2 หลุม บนแนวสำรวจ จากนั้นนำผลการเปรียบเทียบทั้ง 4 วิธี มาพิจารณาเปรียบเทียบกันเพื่อเลือกวิธีธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้หาแหล่งสะสมตัวของทรายบก

4.1.1 ผลการสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

จากการประมวลผลข้อมูลแบบ MASW ทั้ง 100 จุดแล้วนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละจุดมาเรียงต่อกันเป็นระยะทางทั้งหมด 200 เมตร ในแนวราบ ความลึกที่แสดงในแนวตั้งและค่าความเร็วเฉือนที่แสดงในลักษณะของสีมาพิจารณาร่วมกัน เราสามารถแบ่งขอบเขตของตัวกลางได้เป็น 4 ช่วงด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผล MASW ทั้ง 100 จุด

ที่ความลึกตั้งแต่ 0-5 เมตร มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 120-170 m/s จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วกับข้อมูลรอบข้าง วัตถุในบริเวณนี้น่าจะเป็นชั้นเปลือกดิน

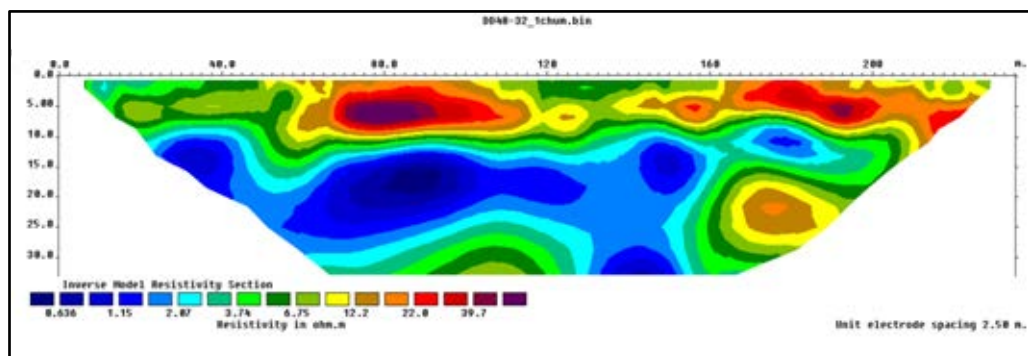
ที่ความลึกตั้งแต่ 5-11 เมตร มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 170-230 m/s จากการเปรียบเทียบค่าความเร็ว วัตถุในช่วงนี้น่าจะเป็นทราย โดยด้านบนมีรอยต่อกับชั้นเปลือกดินซึ่งมีเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างรอยต่ออย่างชัดเจน ส่วนเขตรอยต่อกับชั้นล่างมีแนวเส้นสีฟ้าเป็นแนวแบ่ง

ที่ความลึกตั้งแต่ 11-23 เมตร มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 230-280 m/s จากการเปรียบเทียบค่าความเร็ว วัตถุในช่วงนี้น่าจะเป็นทรายทั้งหมด เนื่องจากมีค่าความเร็วคลื่นในช่วงเดียวกันกับทรายในชั้นแรก

และที่ความลึกตั้งแต่ 23 เมตรลงไป มีค่าความเร็วในช่วง 300-420 m/s จากการเปรียบเทียบค่าความเร็ว วัตถุในช่วงนี้น่าจะเป็นทรายเช่นเดียวกัน เพราะค่าความเร็วยังอยู่ในช่วงของทราย แต่จะมีการอัดตัวที่หนาแน่นมากกว่าทรายชั้นบนจึงมีค่าความเร็วคลื่นมากกว่า

4.1.2 ผลการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

จากผลการวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยโปรแกรม RES2DINV โดยมีระยะการสำรวจ 235 เมตร ตามแนวราบและได้ความลึกของการสำรวจ 35 เมตร ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันได้เป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

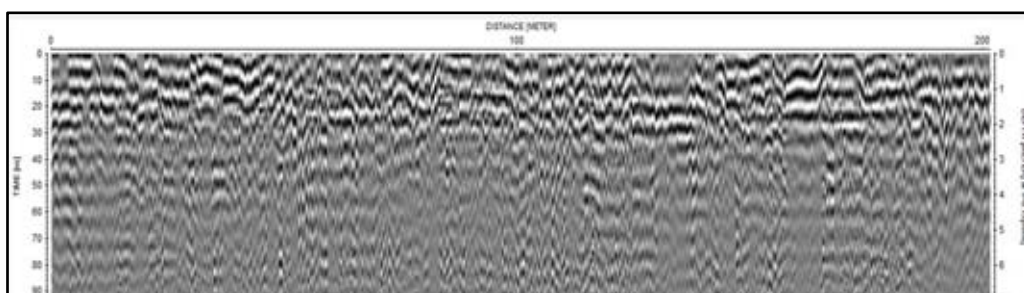
ที่ความลึกตั้งแต่ 0-4 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2-12 โอห์ม-เมตร เป็นชั้นของเปลือกดิน เหตุที่ชั้นเปลือกดินในบางตำแหน่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูงเนื่องจากบริเวณผิวดินด้านบนดินมีลักษณะแห้งและแข็ง

ที่ความลึกตั้งแต่ 4-11 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6-40 โอห์ม-เมตร น่าจะเป็นชั้นทรายชั้นแรก มีลักษณะการวางตัวเป็นแนวยาวเห็นเป็นชั้นแยกจากชั้นด้านล่างชัดเจน ในช่วงระยะ 60-115 และ 150-200 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจจะเป็นแนวของแม่น้ำเก่า

ช่วงความลึกตั้งแต่ 11-25 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.6-2 โอห์ม-เมตรน่าจะเป็นชั้นดินเหนียวหรือชั้นทรายชั้นที่สอง จากการศึกษาข้อมูลแหล่งน้ำของพื้นที่สำรวจ พบว่า พื้นที่บริเวณนี้ชั้นน้ำใต้ดินมีสภาพเป็นน้ำเค็ม เนื่องจากมีความเข้มข้นของเกลือสูง ส่งผลให้ในชั้นนี้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ

4.1.3 ผลการสำรวจธรณีเรดาร์

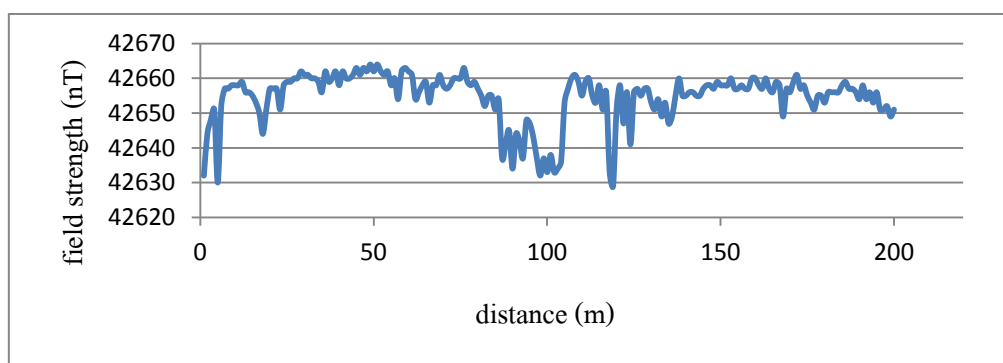
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีธรณีเรดาร์ พบว่า ลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นแสดงขนาดแอมพลิจูดของการสะท้อนที่ต่างกัน โดยด้านบนมีแอมพลิจูดขนาดใหญ่กว่าด้านล่าง ซึ่งมีแนวแบ่งชัดเจนที่ความลึกประมาณ 2 เมตร น่าจะเกิดจากแนวรอยต่อระหว่างดินที่แห้งกับดินที่อุ้มน้ำ เนื่องจากแนวรอยต่อค่อนข้างราบเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 วิธีนี้สำรวจได้ความลึกประมาณ 7 เมตร เหตุที่สำรวจได้ตื้นเนื่องจากดินในบริเวณพื้นที่ใหญ่เป็นดินเหนียว ส่งผลให้พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืน การสำรวจจึงทำได้ในระดับตื้น



รูปที่ 4.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลธรณีเรดาร์

4.1.4 ผลการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก พบว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปตามแนวสำรวจ โดยมีค่าความเข้มอยู่ในช่วง 42630-42664 นาโนเทสลา และในช่วงระยะทาง 80-110 เมตร มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำกว่าบริเวณอื่น อาจจะมาจากริเวณนี้มีปริมาณของดินเหนียวสูงกว่าบริเวณอื่น วิธีนี้ไม่สามารถบอกความลึกของข้อมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

4.1.5 ข้อมูลหลุมเจาะ

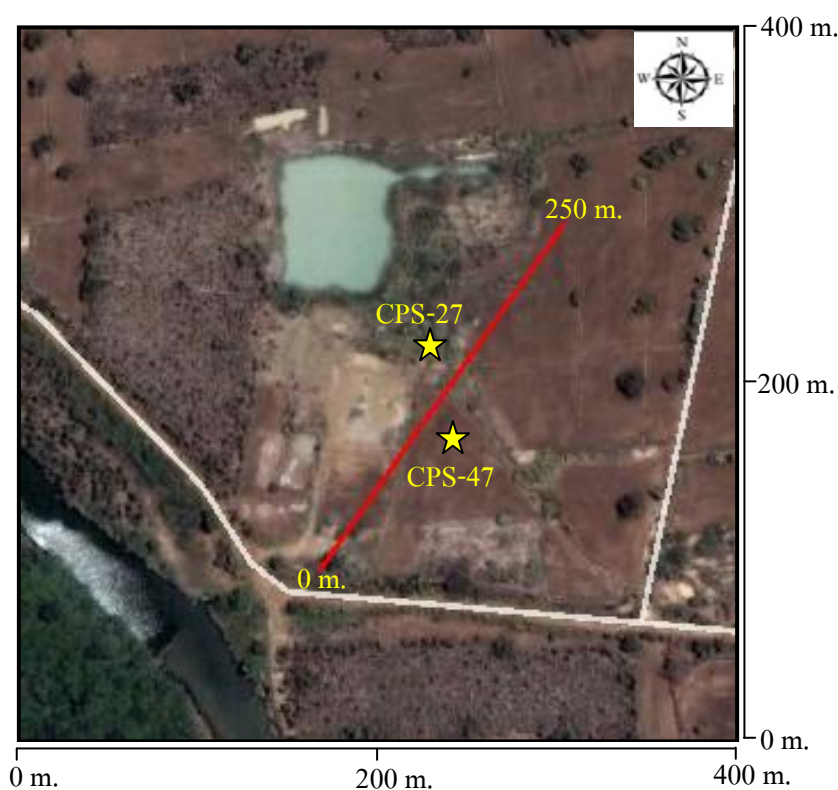
จากแนวอ้างอิงระยะทางประมาณ 250 เมตร ที่ทำการสำรวจวัดค่าด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี มีหลุมเจาะเก็บข้อมูลทรายจำนวน 2 หลุม ได้แก่ หลุมเจาะหมายเลข CPS-27 และ CPS-47 โดยทำการเจาะลึกหลุมละ 20 เมตร เก็บตัวอย่างทุกๆระยะ 0.5 เมตร (ข้อมูลหลุมเจาะจาก คุณวิเชียร, CPAC) ซึ่งตำแหน่งของหลุมเจาะและแนวสำรวจอ้างอิง ได้แสดงในรูปที่ 4.5 และจากข้อมูลของหลุมเจาะทั้งสองสามารถแบ่งชั้นดินและชั้นทรายได้ ดังนี้

หลุมเจาะหมายเลข CPS-27 สามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ ประกอบด้วย

ชั้นแรก ที่ระดับความลึก 0.00-4.00 เมตรแรก เป็นชั้นเปลือกดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว โดยที่ความลึกช่วง 0-1.5 เมตรแรก มีรากไม้และอินทรีย์วัตถุปนอยู่บ้าง (รูปที่ 4.6 ก.)

ชั้นที่สอง ที่ระดับความลึก 4.00-9.00 เมตร เป็นชั้นทรายหยาบทั้งชั้นมีกรวดปนอยู่ในบางช่วงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

ชั้นที่สาม ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 9.00-20.00 เมตร เป็นทรายปนดินเหนียวทราย ส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลและมีขนาดตั้งแต่ทรายละเอียดถึงหยาบเล็กน้อย มีปริมาณทรายประมาณ 60-80% และมีปริมาณดินเหนียวประมาณ 20-40% และในช่วงความลึก 15.50-16.00 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนทราย โดยทรายมีขนาดละเอียดมากมีปริมาณทรายสุทธิประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียวประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นที่ความลึกตั้งแต่ 16.00-20.00 เมตร เป็นทรายปนดินเหนียว โดยเม็ดทรายมีขนาดใหญ่และหยาบมาก มีกรวดปนอยู่ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณทรายสุทธิประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.5 แสดงแนวสำรวจอ้างอิงกับตำแหน่งหลุมเจาะ

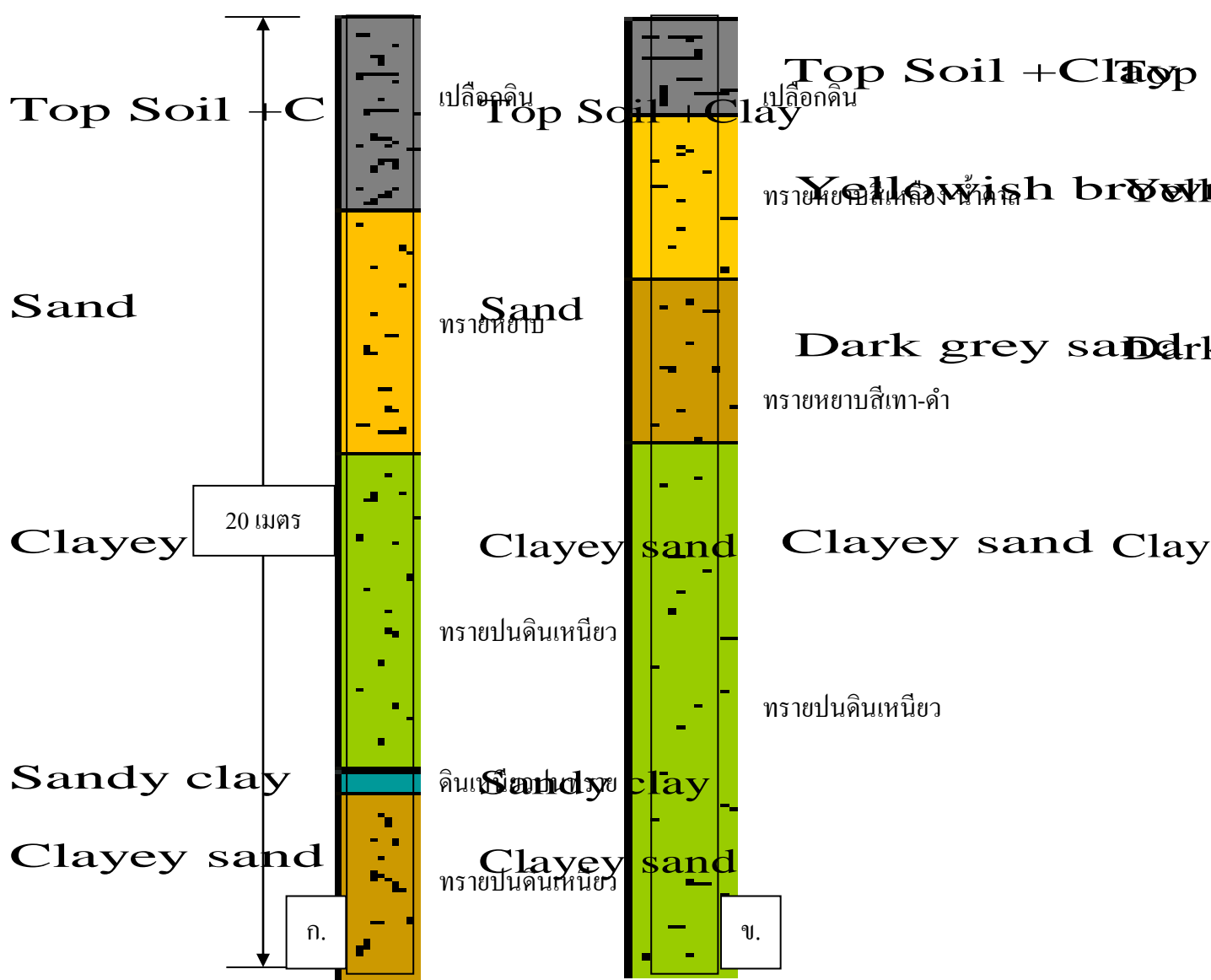
หลุมเจาะหมายเลข CPS-47 สามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ ประกอบด้วย

ชั้นแรก ที่ระดับความลึก 0.00-2.00 เมตรแรกเป็นชั้นเปลือกดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวและที่ความลึกช่วง 0.5 เมตรแรก มีรากไม้จำนวนมาก (รูปที่ 4.6 ข.)

ชั้นที่สอง ที่ระดับความลึก 2.00-8.50 เมตร เป็นชั้นทรายทั้งหมด โดยทรายมีขนาดละเอียดถึงหยาบมาก มีการคัดขนาดที่ดี เม็ดทรายมีลักษณะกลมรีถึงกลมมน มีกรวดปนอยู่บ้าง

ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ช่วงความลึก 2.00-5.00 เมตร ทรายสีน้ำตาลปนเหลือง ส่วนช่วงความลึก 5.00-8.50 เมตร ชั้นทรายมีสีน้ำตาลปนดำ

ชั้นที่สาม ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 8.50-20.00 เมตร เป็นชั้นทรายปนดินเหนียว ทรายมีสีน้ำตาลปนดำ เม็ดทรายมีขนาดละเอียดถึงหยาบ มีการคัดขนาดที่ดีเม็ดทรายมีลักษณะกลมรี ถึงกลมมน ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 12-20 เมตร ส่วนใหญ่เป็นทรายหยาบมากกว่าทรายละเอียด มีปริมาณดินเหนียวสุทธิประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4-6 แสดงข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะที่เอื้อซึ่งเปรียบเทียบกันเมื่อครั้งที่ทำ
 number of Hole number CPS-27 number of Hole CPS-47
 ก. หลุมเจาะหมายเลข CPS-27 ข. หลุมเจาะหมายเลข CPS-47

4.1.6 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลธรณีฟิสิกส์กับข้อมูลหลุมเจาะ

จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 แบบ กับข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะทั้ง 2 หลุม พบว่า

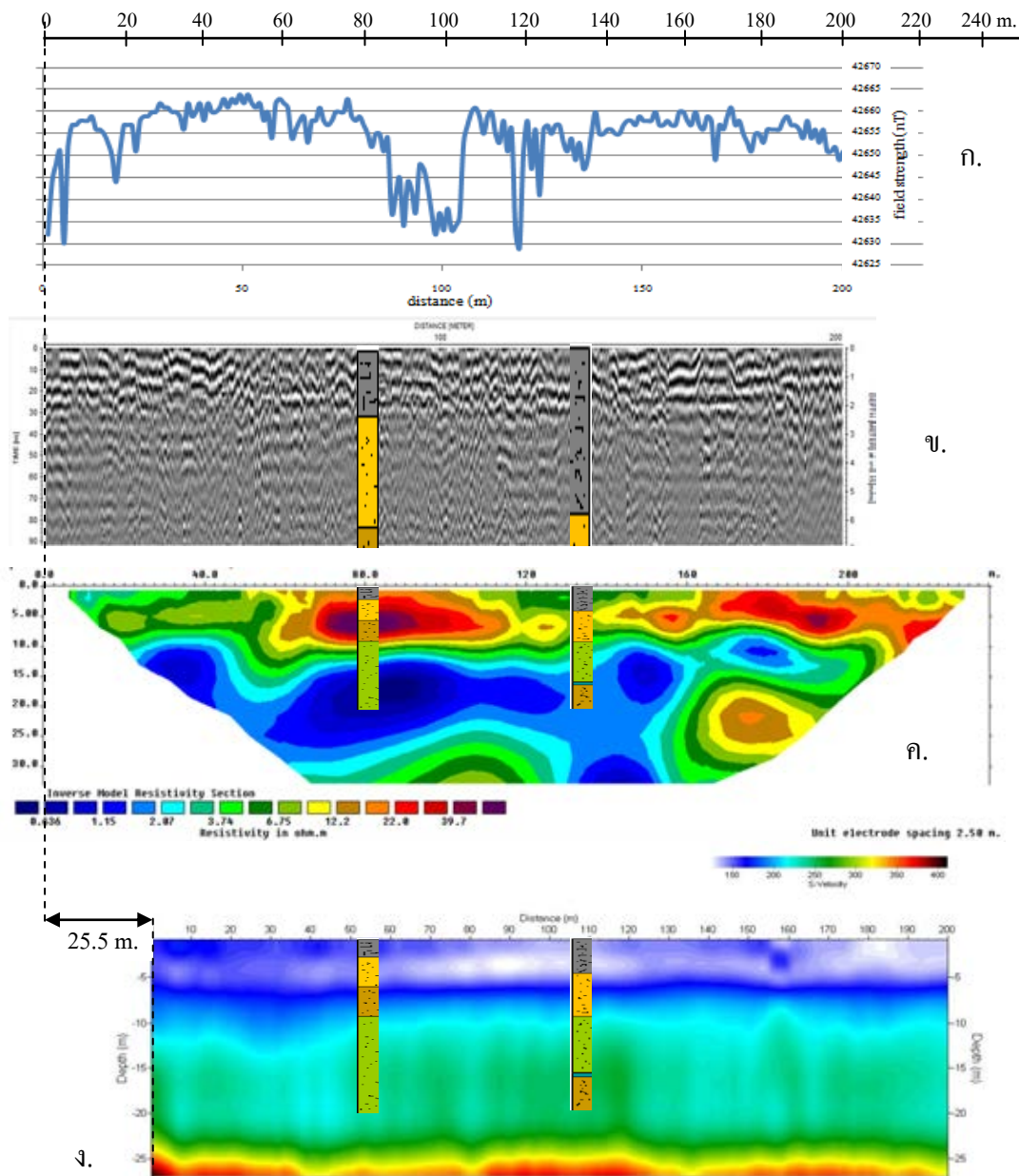
ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ แสดงค่าความเข้มแม่เหล็กต่ำที่ระยะกลางของแนวสำรวจ โดยค่าความเข้มที่ต่ำนี้อาจเกิดจากในบริเวณดังกล่าวมีกระเปาะของดินเหนียวใกล้กับพื้นผิวสำรวจ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปานกลางและมีค่าความเร็วคลื่นที่ต่ำ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าและคลื่นสั้นสะท้อน ตามลำดับ ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีแม่เหล็กไม่ได้แสดงข้อมูลความลึกของทราย แต่จะแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวการสำรวจและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มจึงสามารถบอกขอบเขตของพื้นที่ที่มีที่ลักษณะของตัวกลางที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ก.

ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีธรณีเรดาร์เทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ ในกรณีนี้ให้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงแต่สำรวจได้สั้น มีความลึกจากการสำรวจประมาณ 5-6 เมตร ในกรณีนี้ไม่สามารถบอกขอบเขตรอยต่อของชั้นดินกับชั้นทรายได้ ดังรูปที่ 4.7 ข. เห็นข้อมูลแค่ชั้นเปลือกดินและแสดงให้เห็นระดับน้ำใต้ดินมีความลึกประมาณ 2 เมตร แต่การสำรวจด้วยวิธีเรดาร์นี้สามารถเก็บข้อมูลและประมวลผลได้รวดเร็ว เห็นผลในทันที

ผลที่ได้จากการสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ ในกรณีนี้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในช่วงบริเวณใกล้ผิวดินการจะแยกรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นทรายเป็นข้อจำกัดยาก เนื่องจากบนผิวดินมีสภาพแข็งและแห้งมากส่งผลให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง แต่หากพิจารณาควบคู่กับข้อมูลหลุมเจาะทั้ง 2 หลุม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค. พบว่า

ในช่วงความลึก 4.5-11 เมตร จากผิวดินมีลักษณะของแถบสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงเป็นแนวยาวไปตามแนวสำรวจมีความหนาประมาณ 5-6 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลหลุมเจาะทรายชั้นแรก เมื่อพิจารณาต่อไปที่ความลึก 11 เมตร เป็นบริเวณที่แสดงขอบเขตรอยต่อของค่าสภาพต้านทานที่ไฟฟ้าที่ชัดเจนมาก จากข้อมูลสภาพต้านทานที่ระดับความลึก 11-20 เมตร พบว่า มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำมากโดยปกติพื้นที่ในบริเวณนี้ควรจะเป็นดินเหนียวทั้งหมด แต่เมื่อดูข้อมูลที่ได้จากหลุมเจาะทั้ง 2 หลุม พบว่า เป็นทรายละเอียดทั้งหมด ดังนั้น ข้อมูลที่ปรากฏจากผลของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำในบริเวณนี้ต้องแปลความหมายว่าเป็นชั้นทรายชั้นที่ 2 ด้วย เนื่องจากพื้นที่สำรวจดังกล่าวเป็นพื้นที่ดินเค็มมีปริมาณความเข้มข้นของเกลือสูง น้ำใต้ดินมีสภาพเป็นน้ำกร่อย

ซึ่งน้ำเกลือมีการนำไฟฟ้าที่ดีส่งผลให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ อย่างไรก็ตาม การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดงรายละเอียดของลักษณะทางธรณีวิทยาได้ดี ทั้งขอบเขตของรอยต่อ ความหนาและความลึกของชั้นต่างๆ



รูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบข้อมูลหลุมเจาะกับข้อมูลธรณีฟิสิกส์

- ก. ผลการสำรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก
- ข. ผลการสำรวจธรณีเรดาร์
- ค. ผลการสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า
- ง. ผลการสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW

และผลที่ได้จากการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW เทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ ในกรณีนี้ พบว่า ค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับความลึกและระยะทางตามแนวสำรวจ สามารถแบ่ง ขอบเขตของตัวกลางได้ 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.7.

ที่ความลึกตั้งแต่ 0-5 เมตร คลื่นเฉือนมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 120-170 m/s วัตถุในบริเวณนี้ เป็นชั้นเปลือกดิน

ที่ความลึกตั้งแต่ 5-11 เมตร คลื่นเฉือนมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 170-230 m/s วัตถุในช่วงนี้ เป็นทรายชั้นแรก

ที่ความลึกตั้งแต่ 11-20 เมตร คลื่นเฉือนมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 230-280 m/s วัตถุในช่วงนี้ เป็นทรายทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้จากวิธีนี้แสดงขอบเขตระหว่างรอยต่อแต่ละชั้นชัดเจนและแสดงภาพ ลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินได้ดีและมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากหลุมสำรวจมากที่สุด

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์แต่ละวิธี

ปัจจัย	วิธีธรณีฟิสิกส์			
	วัดด้วยคลื่น ไหวสะเทือน แบบ MASW	วัดค่าสภาพ ต้านทานไฟฟ้า	วัดค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก	วิธีธรณีเรดาร์
ความยากใน ภาคสนาม	ยุ่งยากมาก	ปานกลาง-ยาก	ง่าย	ปานกลาง
การวิเคราะห์ข้อมูล	ใช้เวลามาก	รวดเร็ว	รวดเร็ว	รวดเร็ว
ข้อมูลที่ได้ - ขอบเขตรอยต่อ - ความลึก	ดีมาก ดีที่สุด	ดีมาก ดีมาก	ไม่ดี ไม่ได้	ดีที่สุด ต่ำ
ความแม่นยำ	ดีมาก	ดี	คลุมเครือ	ดีมาก
ค่าใช้จ่าย	สูงมาก	ปานกลาง-สูง	ต่ำ	ปานกลาง-สูง

4.2 การสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าครอบคลุมทั้งพื้นที่

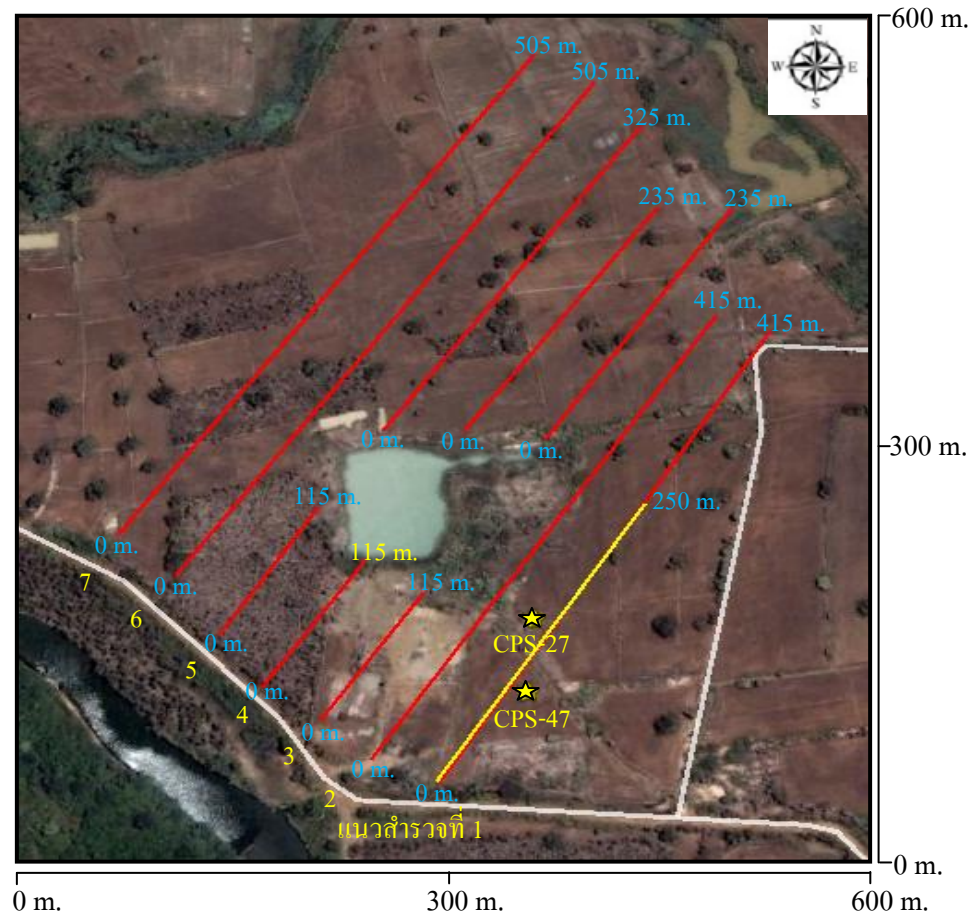
จากผลการเปรียบเทียบข้อมูลธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธีกับข้อมูลหลุมเจาะ พบว่า วิธีธรณีฟิสิกส์ที่ให้ผลการสำรวจใกล้เคียงกับข้อมูลหลุมเจาะมี 2 วิธี คือ วิธีการสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW และวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยในขั้นตอนนี้จะเลือกวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามาทำการสำรวจครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ เนื่องจากให้ผลของข้อมูลไม่แตกต่างกันมากนัก การเก็บข้อมูลภาคสนามทำได้รวดเร็ว ประหยัดและง่ายกว่าวิธีคลื่นไหวสะเทือน (ตารางที่ 4.1)

ทำการเก็บข้อมูลธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยการเก็บข้อมูลครั้งแรกใช้สายเคเบิล 2 เส้น ได้ระยะเป็น 235 เมตร จากนั้นทำการเก็บข้อมูลต่อแนวเดิม โดยการกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งของเคเบิลไปครั้งละ 90 เมตร จนได้ระยะตามต้องการ จากนั้นใช้เข็มทิศเล็งแนวและใช้ตลับเมตรวัดระยะห่างระหว่างแนวสำรวจ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแนวสำรวจแต่ละแนวห่างกัน 50 เมตร และวางตัวขนานกัน (รูปที่ 4.8) จากนั้นเริ่มสำรวจทั่วทั้งพื้นที่ โดยการตั้งค่าและวิธีการเก็บข้อมูลเหมือนกับในหัวข้อที่ 3.2 เมื่อทำการสำรวจครอบคลุมทั้งพื้นที่จะมีแนวสำรวจทั้งหมด 7 แนว แต่ละแนวมีความยาวไม่เท่ากันขึ้นกับขอบเขตของพื้นที่ โดยระยะทางและพิกัดของแต่ละแนวสำรวจ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงพิกัดและระยะทางของแนวสำรวจ

แนวสำรวจที่	พิกัด GPS		ระยะทาง (เมตร)
	จุดเริ่มต้น	จุดสุดท้าย	
1	263751E, 1702030N	264027E , 1702352N	415
2	263708E, 170205N	263916E, 1702395N	415
3 ช่วงที่ 1	263663E, 1702077 N	263734E, 1702167N	115
3 ช่วงที่ 2	263829E, 1702303N	263990E, 1702473N	235
4 ช่วงที่ 1	263626E, 1702107N	263702E, 1702190N	115
4 ช่วงที่ 2	263750E, 1702300N	263894E, 1702485N	235
5 ช่วงที่ 1	263589E, 1702145N	263654E, 1702240N	115
5 ช่วงที่ 2	263700E, 1702325N	263908E, 1702558N	325
6	263556E, 1702180N	263865E, 1702571N	505
7	263528E, 170222N	263667E, 1702411N	505

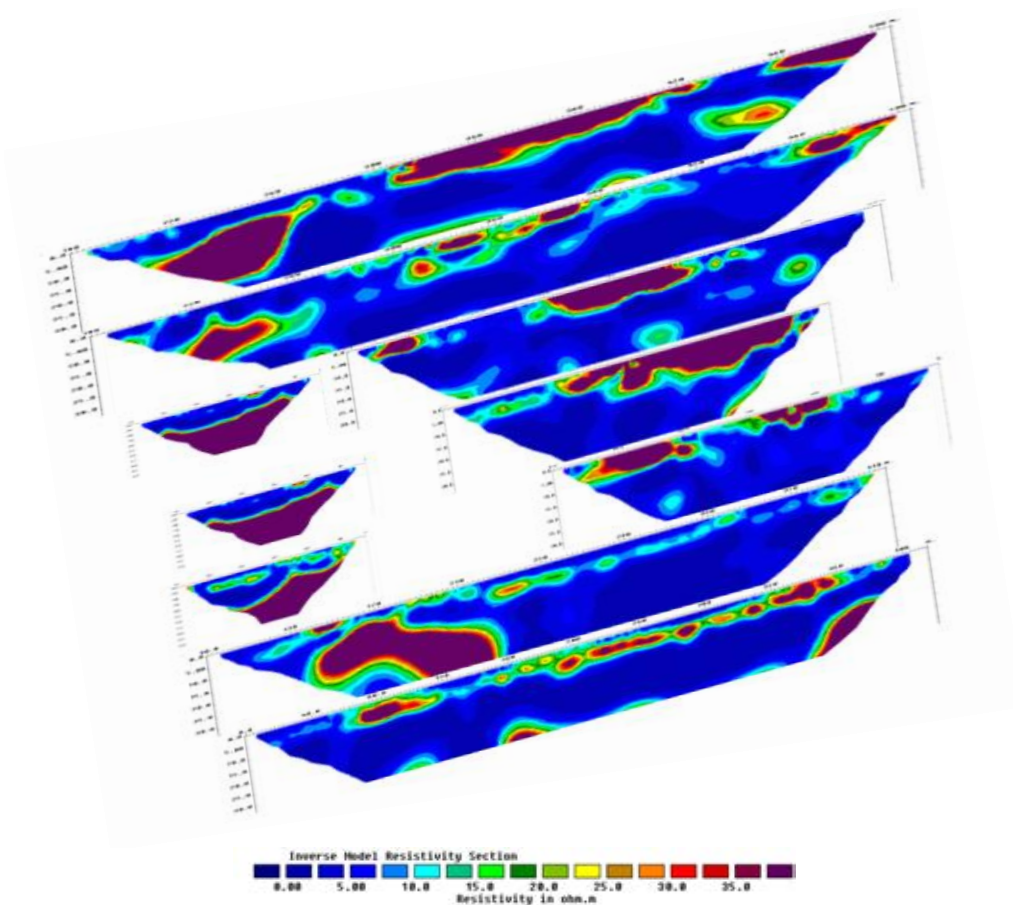
จากพิกัดที่กำหนดในตารางที่ 4.2 เมื่อนำมาวางในพื้นที่สำรวจจะได้ตำแหน่งและระยะทางของแต่ละแนวสำรวจ แสดงดังรูปที่ 4.8 พร้อมทั้งยังได้แสดงแนวสำรวจอ้างอิงที่ทำการสำรวจธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี และหลุมเจาะที่ใช้ในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.8 แสดงแนวการสำรวจครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่

4.3 ผลการเก็บข้อมูลทั้งพื้นที่ด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

เมื่อเก็บข้อมูลธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าครบทั้ง 7 แนว นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล จากนั้นทำการปรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของแต่ละแนวให้อยู่ในช่วงเดียวกัน นำข้อมูลที่ปรับค่าแต่ละแนวสำรวจมาวางเรียงกันตามแนวและระยะของการสำรวจ ดังรูปที่ 4.9 เพื่อพิจารณาลักษณะการการสะสมตัวของทราย คู่นารอยต่อระหว่างตัวกลางแต่ละชั้น ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะประโยชน์อย่างมากในการออกแบบและพัฒนาการทำบ่อทราย และสามารถนำไปคำนวณปริมาณสำรองทรายได้ เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นข้อมูลต่อเนื่อง 2 มิติ แสดงระยะตามแนวนอนและแนวลึกชัดเจน



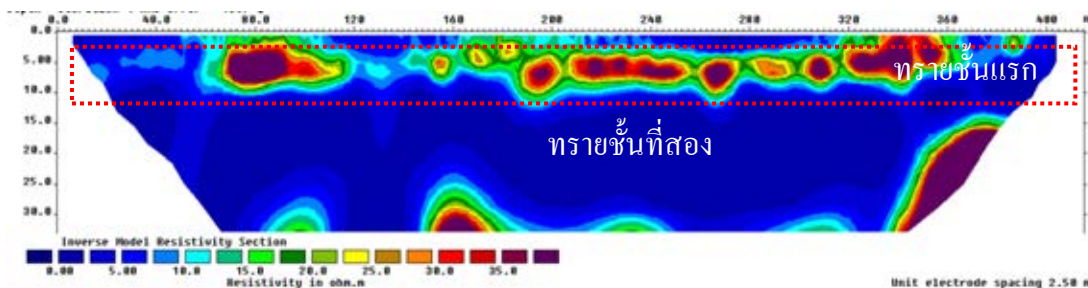
รูปที่ 4.9 แสดงผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทั่วพื้นที่

4.4 การคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทราย

จากผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด 7 แนว และแต่ละแนวห่างกันเป็นระยะ 50 เมตร ในการสำรวจครั้งนี้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 80 ไร่ สามารถคำนวณหาปริมาณสำรองของแหล่งทรายได้จากสมการ

$$V = \left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n} \right) L \times S.G. \dots\dots\dots (4.1)$$

- โดยที่ V คือ ปริมาตร
- A₁ คือ พื้นที่หน้าตัดของแนวสำรวจที่ 1
- A_n คือ พื้นที่หน้าตัดของแนวสำรวจที่ n
- L คือ ระยะห่างระหว่างแนวสำรวจ



รูปที่ 4.10 แสดงแนวการสะสมตัวของทราย

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งพื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาในทุกแนวการสำรวจ โดยแต่ละแนววางห่างกัน 50 เมตร พบว่า เราสามารถแบ่งข้อมูลในแต่ละแนวได้เป็น 3 ช่วงด้วยกัน (รูปที่ 4.10) ประกอบด้วย

- ช่วงแรก ที่ความลึกประมาณ 3-4.5 เมตร เป็นชั้นของเปลือกดิน
- ช่วงที่สอง ที่ความลึกประมาณ 4.5-11 เมตร เป็นชั้นทรายชั้นแรก มีลักษณะการวางตัวเป็นแนวยาวเห็นเป็นชั้นแยกจากชั้นอื่นชัดเจน

ช่วงที่สาม ที่ความลึกประมาณ 11-30 เมตร เป็นชั้นทรายชั้นที่สอง ในชั้นนี้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากทรายในชั้นนี้เป็นทรายปนดินเหนียวและระดับน้ำใต้ดินในบริเวณนี้มีปริมาณความเข้มข้นของเกลือสูง ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีต่ำมาก

เมื่อทำการคำนวณปริมาณสำรองของทรายทั่วทั้งพื้นที่จากแนวสำรวจทั้ง 7 แนว เราสามารถคำนวณได้ โดยพิจารณาระยะทางและความหนาของการสะสมตัวในแต่ละแนวสำรวจ อีกทั้งยังคำนวณปริมาณเปลือกดินได้ด้วย จากสมการเดียวกัน (สมการที่ 4.1) เมื่อได้ปริมาตรของเปลือกดินและทรายแต่ละชั้นแล้วต้องนำมาคูณกับค่าความถ่วงจำเพาะ (S.G.) เพื่อคิดเป็นจำนวนตัน ซึ่งการคำนวณปริมาณเปลือกดิน ทรายชั้นที่ 1 และทรายชั้นที่ 2 แสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณเปลือกดิน

แนวสำรวจ	พื้นที่ (m ²)	ปริมาตร (m ³)	จำนวนตัน
1	1,867.5		S.G.=2.5
2	2,075	78,850	197,125
3	1,800	77,500	193,750
4	1,620	68,400	171,000
5	1,980	72,000	180,000
6	2,525	90,100	225,250
7	2,525	101,000	252,500
ปริมาณเปลือกดิน			1,219,625

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 1

แนวสำรวจ	พื้นที่ 1 (m ²)	พื้นที่ 2 (m ²)	ปริมาตร (m ³)	จำนวนตัน
1	420	2,025.0		S.G.=2.65
2	900	1,822.5	103,350.0	273,878
3	500	900.0	82,450.0	218,493
4	400	1,175.0	59,500.0	157,675
5	480	1,125.0	63,600.0	168,540
6	220	1,350.0	63,500.0	168,275
7	300	1,200.0	61,400.0	162,710
ปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 1				1,149,570

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 2

แนวสำรวจ	พื้นที่ (m ²)	ปริมาตร (m ³)	จำนวนตัน
1	6,120		S.G.=2.65
2	3,400	190,400	504,560
3	2,890	125,800	333,370
4	2,550	108,800	288,320
5	3,740	125,800	333,370
6	6,630	207,400	549,610
7	6,800	268,600	711,790
ปริมาณสำรองทรายชั้นที่ 2			2,721,020

ผลจากการคำนวณปริมาณสำรอง จากผลของข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากวิธีธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5) พบว่า ในพื้นที่สำรวจทั้งหมด 80 ไร่ มีปริมาณเปลือกดินที่ 1,219,625 ตัน ปริมาณทรายชั้นแรก 1,149,570 ตัน และมีปริมาณทรายชั้นที่สอง 2,721,020 ตัน ตามลำดับ และเมื่อเทียบข้อมูลกับหลุมเจาะ พบว่า ทรายชั้นแรกส่วนใหญ่เป็นทรายหยาบมีกรวดปนบ้างเล็กน้อย ส่วนทรายชั้นที่สองเป็นทรายปนดินเหนียว โดยทรายมีขนาดละเอียดถึงหยาบ

บทที่ 5

การออกแบบและการพัฒนาบ่อทราย

5.1 การวางแผนงานและการออกแบบบ่อทราย

จากข้อมูลแหล่งสะสมตัวของทรายที่ศึกษาด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า พบว่า สภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งทรายมีการสะสมตัวเป็นชั้นๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นด้วยกัน คือ ชั้นแรกเป็นชั้นเปลือกดินมีความหนาประมาณ 4-5 เมตร ถัดไปเป็นชั้นทรายชั้นแรกมีความหนาประมาณ 4-6 เมตร และสุดท้ายเป็นชั้นทรายเป็นดินเหนียวมีความหนาประมาณ 20 เมตร โดยพื้นที่สำรวจทั้งหมดมีอาณาบริเวณประมาณ 80 ไร่ จากการคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งทราย ได้ว่า มีปริมาณเปลือกดิน 1,219,625 ตัน มีทรายชั้นแรก 1,149,570 ตัน และทรายเป็นดินเหนียว 2,721,020 ตัน ตามลำดับ ซึ่งการออกแบบบ่อทรายและการวางแผนงานจะเน้นใน 2 ด้าน คือ การวางแผนด้านเศรษฐศาสตร์และด้านเทคนิคการผลิต โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้กำไรมากที่สุดและมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การวางแผนด้านเศรษฐศาสตร์จะเกี่ยวกับการลงทุนเป็นหลัก โดยการกำหนดขอบเขตสุดท้ายของบ่อทราย ทำให้เราสามารถคำนวณความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ได้จากข้อมูลปริมาณเปลือกดินที่ต้องขุดออก ปริมาณทรายสำรองและสามารถกำหนดอายุการดำเนินงานได้ ส่วนการวางแผนงานด้านเทคนิค จะเกี่ยวกับการออกแบบระบบการทำงาน ได้แก่ การเลือกใช้เครื่องจักรกลให้เหมาะสม การเลือกวิธีและระบบการขุดตักทราย การออกแบบระบบการขนส่ง เป็นต้น โดยการออกแบบบ่อทรายและการวางแผนงานเริ่มจาก

5.1.1 การวางแผนดำเนินงาน

การวางแผนการดำเนินงานสามารถแบ่งได้ 3 ระยะดังนี้

5.1.1.1 แผนงานระยะยาว เป็นการกำหนดการดำเนินงานตลอดอายุของโครงการ ตั้งแต่ก่อนเปิดบ่อ ระหว่างดำเนินงานจนกระทั่งการใช้ประโยชน์และฟื้นฟูพื้นที่หลังปิดโครงการ เริ่มจากการระบุขอบเขตสุดท้ายของบ่อทราย กำหนดตำแหน่งและการใช้พื้นที่ที่เหมาะสม ได้แก่ พื้นที่อาคารสำนักงาน พื้นที่กองทรายและเปลือกดิน บ่อพักตะกอน ระบบการระบายน้ำ วิธีการขุดตักทราย กระบวนการผลิต เส้นทางการขนส่ง ฯลฯ

5.1.1.2 แผนงานระยะกลาง เป็นแผนการดำเนินงานในแต่ละช่วงเวลา อาจจะถูกกำหนดเป็นแผนดำเนินงานในแต่ละปี จะเกี่ยวกับการดำเนินในแต่ละขั้นตอน เช่น การกำหนดปริมาณและช่วงเวลาที่จะเปิดเปลือกดิน เป้าหมายและปริมาณการดูทรายชั้นแรกและทรายชั้นที่สอง เพื่อให้มีกำไรมากที่สุด

5.1.1.3 แผนงานระยะสั้น เป็นแผนการทำเหมืองที่ลงรายละเอียดในลำดับขั้นการปฏิบัติงานในแต่ละด้านเช่น วิธีการเปิดเปลือกดินและดูทราย การใช้เครื่องจักรกลในแต่ละหน้างาน เป็นต้น ซึ่งวิธีการและขั้นตอนต่างๆในแผนงานระยะนี้สามารถแก้ไขปรับปรุงได้ตามความเหมาะสม

5.1.2 การออกแบบพื้นที่ดำเนินงานและการพัฒนาบ่อทราย

ในส่วนนี้จะจัดสรรพื้นที่โดยการกำหนดตำแหน่งต่างๆเพื่อการดำเนินงานที่เหมาะสม ซึ่งปกติการวางแผนงานและการพัฒนาบ่อทรายต้องทำควบคู่พร้อมกัน เนื่องจากทั้งสองส่วนนี้มีความเกี่ยวพันกันโดยตรง หากเราออกแบบวางระบบการทำงานต่างๆที่ดี กระบวนการพัฒนาบ่อทรายก็จะทำได้ง่ายและสามารถทำไปพร้อมกับขั้นตอนการผลิตได้เลย ดังนั้น การจัดสรรพื้นที่ การเลือกใช้และติดตั้งอุปกรณ์ การทำถนน ระบบสาธารณูปโภค และระบบการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมจะส่งผลให้การดำเนินงานมีค่าใช้จ่ายน้อยลงและดำเนินงานได้รวดเร็ว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดำเนินงานและการพัฒนาบ่อ ได้แก่

5.1.2.1 สภาพธรณีวิทยาแหล่งทรายและภูมิประเทศ จากพื้นที่สำรวจการสะสมตัวทรายและดินเหนียวมีการแบ่งชั้นที่ชัดเจน พื้นที่โดยรอบเป็นลักษณะน้ำท่วมถึงปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียว และมีแหล่งน้ำธรรมชาติสามารถระบายน้ำจากกระบวนการผลิตได้

5.1.2.2 การจัดเตรียมพื้นที่กองเปลือกดิน พร้อมทั้งพื้นที่ทิ้งมูลดินและซากอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการล้างทราย ในที่นี้การกองเปลือกดินจะกองเป็นแนวคันดินตลอดแนวขอบของพื้นที่ดำเนินงาน เพื่อใช้เป็นแนวแบ่งขอบเขตพื้นที่บ่อทรายกับพื้นที่รอบข้างอย่างชัดเจนและเป็นการใช้ประโยชน์พื้นที่ให้มากที่สุด นอกจากนั้นเป็นการเพิ่มระยะห่างระหว่างขอบบ่อสุดท้ายกับพื้นที่ข้างเคียงมากยิ่งขึ้น ช่วยลดปัญหาจากขอบบ่อพังทลายหรือการยุบตัวของดิน

5.1.2.3 การกำหนดแนวถนนในพื้นที่บ่อทราย ให้กำหนดแนวถนนรอบๆขอบบ่อสุดท้ายและให้มีแนวถนนวิ่งผ่านกลางพื้นที่ด้วย เพื่อเป็นการลดระยะทางการขนถ่ายเปลือกดิน กำหนดให้ถนนมีความกว้างประมาณ 10 เมตร ให้รถขนดินวิ่งได้สะดวก

5.1.2.4 การเลือกสถานที่ตั้งอาคารสำนักงาน พื้นที่กองทรายและเปลือกดิน บ่อพักตะกอน ระบบการระบายน้ำ ควรจัดแผนผังการทำงานให้มีความต่อเนื่องใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด กำหนดให้ระยะทางการขนส่งและเครื่องจักรต่างๆมีการเคลื่อนที่น้อยที่สุด ต้องพิจารณาจากระยะขอบบ่อสุดท้ายและแนวถนนเป็นสำคัญ โดยสถานที่ก่อสร้างอาคารต่างๆต้องไม่อยู่ภายในบริเวณที่ทำการคัดทรายหรือแนวการเดินหน้าบ่อและต้องอยู่ใกล้กับแนวถนนเพื่อความสะดวกในการขนส่งที่สำคัญพื้นที่ดังกล่าวต้องตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีปริมาณความหนาแน่นของทรายต่ำกว่าบริเวณอื่น

5.1.2.5 บ่อพักตะกอนและน้ำขุ่น ในที่นี้จะขุดบ่อพักตะกอนและน้ำขุ่นไว้ใกล้กับเครื่องล้างทรายและที่ทิ้งมูลดิน เพื่อความง่ายในการจัดการ ในกระบวนการผลิตและล้างทรายจะมีน้ำขุ่นปนมูลดินและเศษซากอินทรีย์เกิดขึ้น จึงต้องมีการเก็บไว้ในบ่อพักตะกอนก่อนระบายออกสู่แหล่งน้ำภายนอก เมื่อสารแขวนลอยมีการตกตะกอนก็ระบายน้ำไปสู่บ่อทรายเก่าที่อยู่ในพื้นที่ จากนั้นเมื่อน้ำเริ่มใสก็สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือใช้เป็นแหล่งน้ำหมุนเวียนในกระบวนการผลิตทราย และเมื่อปริมาณตะกอนในบ่อพักมีมากขึ้นสามารถใช้รถตักขุดลอกตะกอนไปกองทิ้งได้

5.1.2.6 การเปิดหน้าดินและการตัดทราย ในกระบวนการนี้จะเกี่ยวกับแผนงานด้านเทคนิคการผลิตเป็นสำคัญ ซึ่งจะเกี่ยวกับเครื่องจักรที่ใช้ในการเปิดเปลือกดินและขุดตัดทราย ในกรณีนี้จะใช้รถแบ็คโฮในการเปิดเปลือกดินเริ่มจากการเปิดหน้าดินและขนไปกองไว้ตามแนวที่กำหนด ทำการเปิดหน้าดินให้เป็นบริเวณกว้างจนถึงชั้นทรายชั้นแรก หากชั้นทรายที่เจออยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินใช้วิธีคัดทรายโดยการฉีดน้ำแรงดันสูงใส่ชั้นทรายให้พังลงมากักบ่อ จากนั้นใช้เครื่องคัดทราย คัดทรายปนน้ำไปตามท่อและส่งต่อไปยังเครื่องล้างทรายต่อไป

5.1.2.7 การเริ่มดำเนินการขุดตัด ในการเดินหน้าบ่อต้องพิจารณาต้นทุนและผลตอบแทนที่ได้รับในแต่ละช่วงดำเนินงาน จากการออกแบบอัตราส่วนระหว่างเปลือกดินและทรายที่เหมาะสม โดยกำหนดให้เริ่มแรกทำการเปิดเปลือกดินเป็นบริเวณกว้างพอประมาณ จากนั้นทำการคัดทรายและเปิดหน้าดินเพิ่มไปเรื่อยๆพร้อมกันตามแผนการผลิตที่วางไว้ ในตอนแรกจะคัดทรายในชั้นแรกก่อน หลังจากนั้นเมื่อเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้างมากพอจะทำการคัดทรายในชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง ตามลำดับ ในการคัดทรายชั้นที่สองต้องให้บ่อมีขนาดกว้าง เนื่องจากการคัดทรายมีความลึกมาก เพื่อป้องกันการพังทลายของขอบบ่อหรือดินยุบต้องกำหนดให้ความลาดชันของบ่อไม่มากเกินไป เกี่ยวกับทิศทางและการเดินหน้าบ่อ ในที่นี้กำหนดให้บ่อทรายเริ่มเปิดจากบริเวณใกล้กับจุดล้างทรายไปข้างหน้า ปริมาณการเปิดเปลือกดินต่อทราย จากลักษณะการสะสมตัว

มีชั้นเปลือกดินหนาประมาณ 4-5 เมตร เมื่อขุดตักเปลือกดินออกไปแล้วจะถึงชั้นทรายและสามารถ
 คูดทรายได้เลย ซึ่งทรายมีสองชั้นและมีปริมาณมากจึงเป็นพื้นที่แหล่งทรายศักยภาพสูง

5.1.2.8 แผนงานด้านความปลอดภัย ในการดำเนินงานคูดทรายสิ่งที่สำคัญด้าน
 ความปลอดภัยคือการรักษาความลาดชันของบ่อไม่ให้มากเกินไป เนื่องจากปัญหาหลักของการทำ
 บ่อทราย คือ การพังทลายของขอบบ่อและการยุบตัวของพื้นที่รอบข้าง

จากผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าทั่วทั้งพื้นที่ สามารถออกแบบ
 ระบบการดำเนินงานและจัดสรรพื้นที่ได้ดังนี้

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ในทุกๆแนวสำรวจทรายจะมีปริมาณความหนาแน่น
 สูงในบริเวณหัวและท้ายแนวจะเกิดจากบริเวณดังกล่าวตรงกับร่องน้ำเก่า ส่วนบริเวณกลางแนว
 สำรวจมีความหนาแน่นของชั้นทรายคงที่ น่าจะเป็นพื้นที่ส่วนที่น้ำท่วมถึงการกระจายตัวของทราย
 จึงค่อนข้างเรียบ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นและลักษณะการสะสมตัวของทรายในแต่ละแนว
 สามารถกำหนดตำแหน่งต่างๆได้ดังรูปที่ 5.1

จุด A เป็นตำแหน่งสำนักงาน เนื่องจากอยู่ติดกับพื้นที่บุคคลอื่น ใกล้กับถนนเส้น
 หลัก และในบริเวณดังกล่าวเป็นขอบของพื้นที่สำรวจ

จุด B เป็นตำแหน่งเครื่องล้างและคัดขนาดทราย เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สามารถ
 รับทรายได้สะดวกจากบ่อทั้ง Zone 1 และ Zone 2 และใกล้กับตำแหน่งกองเปลือกดิน

จุด C เป็นตำแหน่งกองเปลือกดิน เนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นขอบของพื้นที่
 สามารถวางเปลือกดินเป็นแนวกันขอบบ่อได้

จุด D เป็นตำแหน่งกองทราย เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับสำนักงานและ
 เส้นทางหลักง่ายต่อการขนส่งทราย

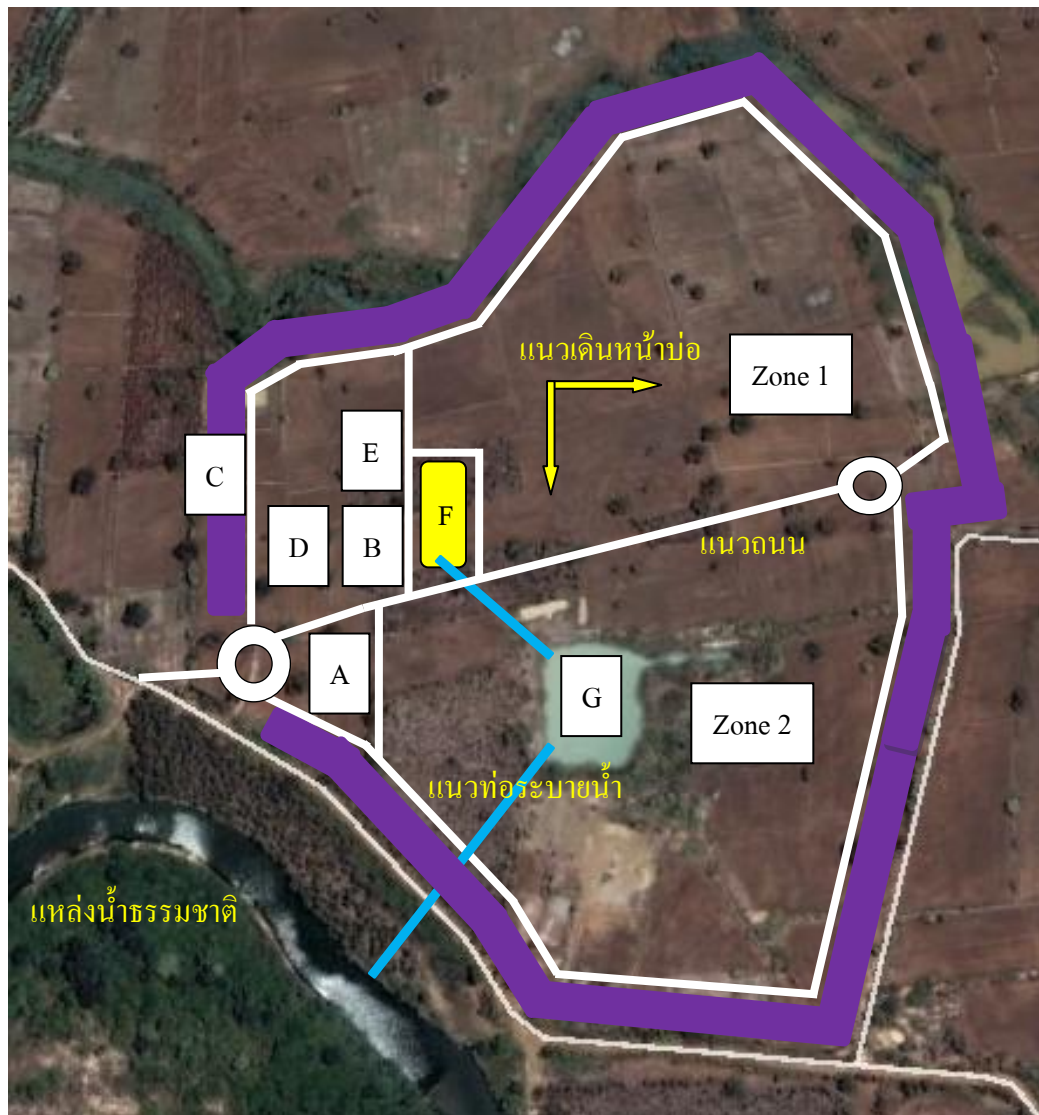
จุด E เป็นตำแหน่งกองตะกอน กรวด เศษดินและซากอินทรีย์ ที่เกิดจาก
 กระบวนการผลิตทราย

จุด F เป็นตำแหน่งบ่อพักตะกอน เนื่องจากใกล้กับเครื่องล้างทรายและที่ทิ้งมูล
 ดินทำให้สะดวกในดำเนินงาน

จุด G เป็นตำแหน่งบ่อทรายเก่า ใช้เป็นบ่อระบายและหมุนเวียนน้ำก่อนปล่อยลง
 สู່แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทั้งบ่อพักตะกอนและบ่อทรายเก่าจะเชื่อมต่อกันด้วยแนวท่อระบายน้ำ

พื้นที่ Zone 1 และ Zone 2 คือ พื้นที่บ่อทรายที่ถูกแบ่งออกโดยแนวถนนที่วางพาด
 ผ่าน ในการดำเนินงานคูดทรายจะเริ่มเปิดหน้าดินและคูดทรายที่ละ Zone เนื่องจากสามารถควบคุม
 ทิศทางและขนาดบ่อได้ง่ายที่สำคัญมีแนวถนนอยู่ใกล้ๆจึงง่ายต่อการขนส่งเปลือกดินและอุปกรณ์

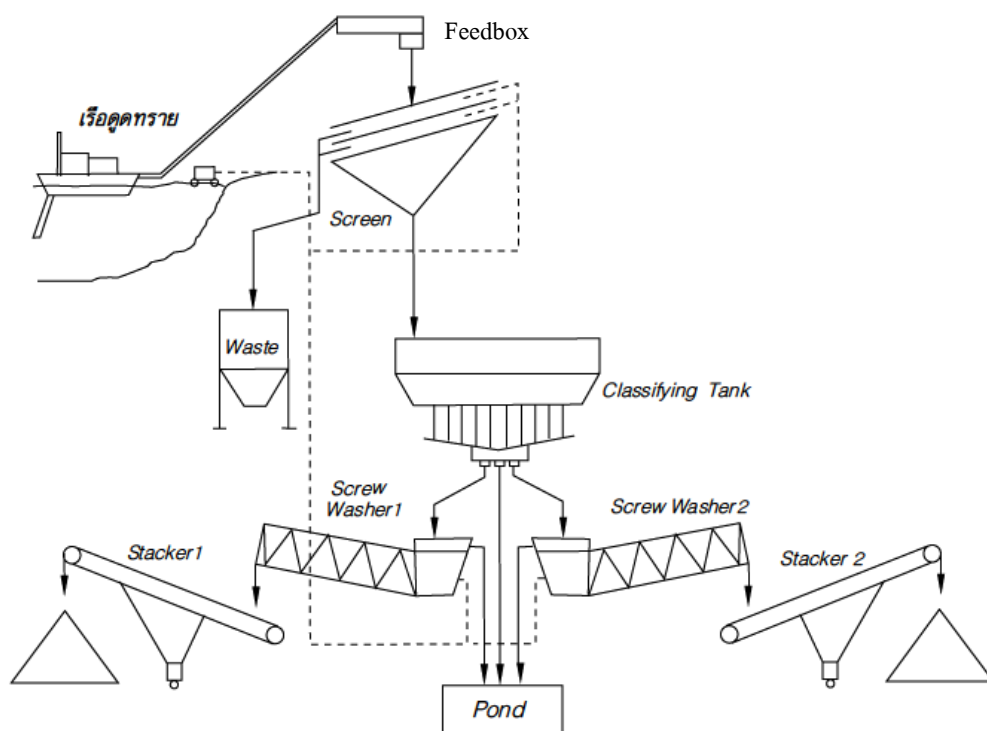
ต่างๆ โดยการขุดตัดจะเริ่มจาก Zone 1 ก่อนเมื่อครอบคลุมพื้นที่ Zone 1 ทั้งหมดแล้ว ขุดเปิดหน้าดินข้ามไปยังพื้นที่ Zone 2 โดยขุดถนนออกไปด้วยเพราะว่าต้องการให้บ่อมีขนาดกว้างพอที่จะดูดทรายที่ความลึกมากๆแล้วไม่เกิดการพังทลาย



รูปที่ 5.1 แสดงการจัดสรรพื้นที่ในกระบวนการทำบ่อทราย

5.2 ขั้นตอนการผลิตทราย

ในกระบวนการผลิตทราย เครื่องล้างและคัดขนาดทรายมีส่วนสำคัญอย่างมากในการทำให้ได้ทรายที่มีคุณภาพสูง ซึ่งหมายถึง จะได้ทรายที่สะอาดไม่มีสิ่งเจือปน เช่น เศษดิน โคลนและซากอินทรีย์ ทรายมีขนาดคละตรงตามมาตรฐานสามารถนำไปใช้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานแต่ละประเภทที่สำคัญเป็นการเพิ่มมูลค่าของทรายด้วย ในส่วนนี้จะขออธิบายรายละเอียดในส่วนเครื่องล้างและคัดขนาดทราย ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เครื่องจักรที่ได้ในการผลิตทรายอาจแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการผลิตทรายบก

ที่มา www.cpacacademy.com

เริ่มจากเรือดูดทราย เมื่อทำการดูดทรายผ่านท่อขึ้นมาแล้ว ทรายจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ที่เรียกว่า Feedbox ซึ่งอยู่บนจุดสูงสุดของเครื่องจักรทำหน้าที่ในการรับทรายจากเรือดูด จากนั้นทรายจะผ่านตะแกรงคัดขนาด (Screen) ทำหน้าที่ในการคัดเศษรากไม้ กรวดและทรายที่มีขนาดใหญ่

เกินไปถึงก่อนเข้ากระบวนการถัดไป ส่วนทรายที่ตะแกรงคัดขนาดไปได้จะถูกส่งต่อไปยัง classifying tank ซึ่งในกระบวนการนี้จะคัดแยกขนาดละเอียดของทรายโดยอาศัยหลักการพัดพาของทรายที่ปนไปกับน้ำ ทรายที่มีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนก่อนทำให้ทรายหยาบกองในบริเวณส่วนต้นของอุปกรณ์ชิ้นนี้และทรายละเอียดจะกองในส่วนปลาย เรียงตามลำดับขนาด และในขั้นตอนนี้ทรายจะถูกทำความสะอาดโดยการคัดฝุ่นและสารแขวนลอยทิ้งไป เนื่องจากฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กจะถูกพัดพาไปพร้อมกับน้ำล้นจาก classifying tank ไปสะสมรวมกันในบ่อพักตะกอน จากนั้นทรายที่ถูกคัดขนาดผ่าน classifying tank จะถูกทำความสะอาดอีกครั้งด้วย Screw washer พร้อมทั้งดึงน้ำออก สุดท้ายทรายจะถูกลำเลียงโดยสายพานลำเลียง(Belt stacker) เพื่อนำไปกองในพื้นที่กองทรายที่จัดไว้ตามขนาด

5.3 มาตรการและแผนปฏิบัติ ด้านสิ่งแวดล้อมในการขุด ตัก และดูดทรายบก

จากการผลิตทรายบก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ได้แก่ การพังทลายของหน้าดิน ปัญหาน้ำขุ่น ปัญหาระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น ในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่ต้องมีมาตรการและแผนปฏิบัติตั้งแต่ระยะเตรียมการ ระยะดำเนินงานและระยะสิ้นสุดการดำเนินงาน เพื่อให้การดำเนินงานกับการแก้ปัญหา มีความต่อเนื่องพร้อมกัน (กองประสานการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555)

5.3.1 ระยะเตรียมการ ผู้ประกอบการต้องทำความเข้าใจด้านกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องตลอดจนศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและแนวทางในการป้องกันแก้ไขผลกระทบจากการขุด ตัก และดูดทรายบก จากนั้นกำหนดพื้นที่การทำงาน โดยจัดพื้นที่ให้เหมาะสมตามสัดส่วน ได้แก่ สถานที่ตั้งสำนักงาน สถานที่กองทราย สถานที่กองเปลือกดิน บ่อพักน้ำขุ่น ขอบบ่อสุดท้าย เป็นต้น มาตรการเริ่มต้นที่ควรปฏิบัติในระยะนี้ คือ

- 5.3.1.1 ป้องกันการพังของขอบบ่อโดยการปลูกต้นไม้และพืชคลุมดินรอบขอบบ่อ
- 5.3.1.2 จัดระบบการระบายน้ำและถนนให้เหมาะสมกับพื้นที่
- 5.3.1.3 ปลูกต้นไม้โดยรอบเพื่อลดผลกระทบด้านทัศนียภาพ

5.3.2 ระยะดำเนินงาน เมื่อเริ่มดำเนินการการขุด ตัก และดูดทราย กิจกรรมทุกอย่างจะดำเนินไปพร้อมกัน เริ่มตั้งแต่บ่อทรายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและความลึก ส่งผลกระทบต่อระบบน้ำทั้งในบ่อทรายและระดับน้ำใต้ดิน การล้างทราย การแยกกองทรายและกองเปลือกดิน การปรับปรุงและแก้ไขแผนงานการดำเนินงาน การควบคุมตะกอนและน้ำขุ่นขึ้นจากกระบวนการ

ผลิต การติดตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ตลอดจนการควบคุมความเสียหายจากการ
 คมนาคมขนส่งมาตรการที่ควรปฏิบัติในระยะนี้ คือ

5.3.2.1 ป้องกันการพังทลายของขอบบ่อหรือการยุบตัวของพื้นดิน ไม่ควรอุดทราย
 ลึกมากเกินไป ขอบบ่อสุดท้ายต้องห่างจากที่ดินรอบข้างไม่น้อยกว่า 40 เมตร และความชันของขอบ
 บ่อต้องไม่เกิน 1:2

5.3.2.2 จากการดำเนินงานจะมีน้ำขุ่นเกิดขึ้น ทั้งจากการดูดและการล้างทราย การ
 ระบายน้ำต้องเป็นระบบปิดมีการไหลเวียนของน้ำภายในบ่อและมีบ่อพักตะกอน ก่อนการปล่อยน้ำ
 ออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

5.3.2.3 เมื่อบ่อทรายมีความลึกจนถึงระดับน้ำใต้ดิน ในบ่อจะมีน้ำอยู่ตลอด ทำให้
 ส่งผลกระทบต่อประมาณน้ำใต้ดิน ในช่วงฤดูแล้งควรหลีกเลี่ยงการอุดทราย

5.3.3 ระยะสิ้นสุดการดำเนินงาน หลังจากการหยุดกิจกรรมการขุด ตัก และอุดทราย พื้นที่
 ส่วนใหญ่จะกลายเป็นแอ่งน้ำบริเวณกว้าง การปรับปรุงพื้นที่ให้เหมาะสมต้องพิจารณาถึงรูปแบบ
 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เหมาะสมของแหล่งทรายนั้นๆอัน ได้แก่

5.3.3.1 ใช้เป็นสถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น ปลาน้ำจืด

5.3.3.2 ใช้เป็นแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร ในพื้นที่ที่ห่างไกลจากระบบชลประทาน
 สามารถนำน้ำในบ่อทรายไปทำการเกษตรได้

5.3.3.3 อาจจะใช้เป็นสถานที่กักเก็บน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วม

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัยด้วยวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี

จากการนำวิธีธรณีฟิสิกส์มาหาแหล่งสะสมตัวของทรายเพื่อการออกแบบและการพัฒนา โดยใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ 4 วิธี อันได้แก่ วิธีสำรวจวัดด้วยคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW สำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สำรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและการสำรวจธรณีเรดาร์ พบว่า วิธีธรณีฟิสิกส์ทั้ง 4 วิธี แสดงข้อมูลและให้รายละเอียดของแหล่งทรายที่แตกต่างกัน ดังนี้

ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีแม่เหล็ก คือ การแสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งตามแนวราบ ไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลกับหลุมเจาะได้ ซึ่งวิธีนี้ยังให้ข้อมูลที่กว้างเกินไป ไม่สามารถบอกความลึกของการสะสมตัวและจำนวนชั้นได้ ทำให้ยากต่อการระบุรูปร่างลักษณะของการสะสมตัว จึงไม่เหมาะกับการนำมาหาแหล่งสะสมตัวของทราย

ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ สามารถแสดงค่าความลึกของวัตถุที่ต่างชนิดกันได้ ให้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงทั้งในแนวราบและแนวตั้ง แสดงขอบเขตระหว่างรอยต่อชัดเจน แต่เนื่องจากวิธีนี้สำรวจได้ในระดับตื้น จึงไม่เหมาะกับการนำมาหาแหล่งสะสมตัวของทราย

ผลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยให้รายละเอียดของสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ผิวดิน สามารถแปลความหมายเพื่อแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาได้ดี ทั้งขอบเขตของรอยต่อ ความหนาและความลึกของชั้นต่างๆ แต่ต้องใช้ข้อมูลหลุมเจาะในการเปรียบเทียบกับ เนื่องจากในกรณีนี้ทรายชั้นล่างเป็นทรายละเอียดปนดินเหนียวและอยู่ในบริเวณที่น้ำมีความเข้มข้นของเกลือสูง ทำให้การวิเคราะห์ผลอาจผิดพลาดได้ เพราะคิดว่าชั้นนั้นเป็นดินเหนียวทั้งหมด แต่จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธีนี้กับหลุมเจาะ พบว่า ข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน สามารถแบ่งชั้นทรายกับสิ่งรอบข้างได้ การสำรวจวิธีนี้ให้ความลึกได้ประมาณ 40 เมตร ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้หาแหล่งสะสมตัวของทรายได้

และผลที่ได้จากการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือนแบบ MASW แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับความลึกและระยะทางตามแนวสำรวจ โดยแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาได้ผิวดินได้ดีที่สุด เนื่องจากแสดงรอยต่อของทุกชั้นอย่างชัดเจนและข้อมูลมีความใกล้เคียงกับข้อมูลหลุมเจาะมากที่สุด ไม่มีปัญหาที่เกิดจากน้ำเกลือ จึงเป็นวิธีที่ให้ผลชัดเจนที่สุดในการหาแหล่งสะสมตัวของทราย

ผลการศึกษาค้นคว้า พบว่า การสำรวจด้วยวิธีวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าและการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบ MASW สามารถนำมาใช้หาแหล่งสะสมตัวของทรายได้ เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลหลุมเจาะมากและสามารถแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาในรูปแบบ 2 มิติ จากข้อมูลชั้นดินชั้นทรายต่างๆ ทั้งความลึก ความหนาและลักษณะการวางตัวจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการคำนวณปริมาณสำรอง การออกแบบและการพัฒนาบ่อทรายในอนาคต นอกจากนี้ ยังสามารถลดปริมาณหลุมเจาะและลดรายจ่ายจากการทำบ่อทรายได้

6.2 สรุปผลการสำรวจทั่วพื้นที่ด้วยวิธีวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า

จากการเก็บข้อมูลธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าครอบคลุมทั่วพื้นที่ มีทั้งหมด 7 แนว และแต่ละแนวห่างกันเป็นระยะ 50 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 80 ไร่ พบว่า ผลการสำรวจที่ได้ในแต่ละแนวประกอบด้วยค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันและเมื่อนำค่าสภาพด้านทานไฟฟ้ามาสร้างเป็นแบบจำลอง เราสามารถแบ่งการสะสมตัวออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรก เป็นชั้นของเปลือกดินมีความหนาประมาณ 3.5-4.5 เมตร ช่วงที่สองเป็นชั้นทรายชั้นแรกมีความหนาประมาณ 5-6 เมตร และช่วงที่สามเป็นชั้นทรายชั้นที่สองมีความหนาประมาณ 20 เมตร แต่ในทรายชั้นที่สองมีค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าต่ำมาก เนื่องจากทรายในชั้นนี้เป็นทรายปนดินเหนียวและระดับน้ำใต้ดินในบริเวณนี้มีปริมาณความเข้มข้นของเกลือสูง หากไม่มีข้อมูลจากหลุมเจาะมาเปรียบเทียบการแปลความหมายอาจจะผิดพลาดได้ เนื่องจากผู้แปลความหมายคิดว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นดินเหนียวทั้งหมด และเมื่อนำผลของข้อมูลจากแนวสำรวจทั้ง 7 แนว มาเรียงต่อกันจะเห็นสภาพธรณีวิทยาได้ชัดเจน (รูปที่ 4.9) และปริมาณสำรองของแหล่งทรายที่ได้คือ มีปริมาณเปลือกดิน 1,219,625 ตัน ปริมาณทรายชั้นแรก 1,149,570 ตัน และปริมาณทรายชั้นที่สอง 2,721,020 ตัน ตามลำดับ โดยทรายชั้นแรกส่วนใหญ่เป็นทรายหยาบมีกรวดปนบ้างเล็กน้อยและทรายชั้นที่สองเป็นทรายปนดินเหนียว

6.3 สรุปผลการออกแบบและการพัฒนาบ่อทราย

จากการวางแผนงานโดยพิจารณาใน 2 ด้าน คือ การวางแผนด้านเศรษฐศาสตร์และด้านเทคนิคการผลิต พบว่า การจัดสรรพื้นที่และขั้นตอนการทำงานให้เหมาะสมเป็นเรื่องสำคัญมากและในการออกแบบระบบการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนต้องทำควบคู่ไปกับการพัฒนาบ่อด้วย เพื่อประโยชน์ในการจัดการ ซึ่งการวางแผนดำเนินงานต้องเริ่มตั้งแต่ระยะเตรียมการ ระยะดำเนินงาน

และระยะสิ้นสุดการดำเนินงาน เพื่อการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

6.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

6.4.1 วิธีรรณิฟสิทส์ที่เหมะสมที่สุด

จากการศึกษาในครั้งนี้ วิธีที่เหมะสมที่สุดในกรหาแหล่งสะสมตัวของทราย จากวิธีรรณิฟสิทส์ทั้ง 2 แบบที่เหมะสม เมื่อพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 6.1 แสดงวิธีรรณิฟสิทส์ทั้ง 2 แบบที่เหมะสมและปัจจัยต่างๆ

ปัจจัย	วิธีรรณิฟสิทส์	
	คลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW	วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า
จำนวนคน	4-7 คน	4-5 คน
เวลาที่ใช้สำรวจ	200 เมตร/วัน	1 กิโลเมตร/วัน
ราคาค่าบริการ	300 บาท/เมตร	100 บาท/เมตร

พบว่า วิธีรรณิฟสิทส์แบบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เป็นวิธีที่เหมะสมที่สุดในกรหาแหล่งสะสมตัวของทราย เนื่องจากทำได้รวดเร็วกว่าและที่สำคัญมีราคาต่ำกว่าการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบ MASW มาก

6.4.2 การลดค่าใช้จ่ายจากหลุมเจาะ

หากต้องการลดค่าใช้จ่ายจากการเจาะหลุมสำรวจทรายที่มากเกินไป ขอแนะนำให้ทำการสำรวจทั่วทั้งพื้นที่ด้วยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าก่อน จากนั้นกำหนดตำแหน่งที่จะเจาะเก็บตัวอย่าง วิธีนี้จะช่วยลดจำนวนหลุมเจาะและข้อมูลที่ได้จากสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเป็นประโยชน์ในการคำนวณปริมาณสำรอง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กองประสานการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. การศึกษาเพื่อวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมและการฟื้นฟูแหล่งทราย[Online]. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555. แหล่งที่มา:
<http://www.onep.go.th/nrem/index.php/nrem-operation/issue-approach-plan/sand-mining-and-environmental-management>[2012, August 3]

คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 13. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

วัลลาภ นุตะมาน. แรงจูงใจของเกษตรกรในการปลูกยูคาลิปตัสในพื้นที่ดินเค็ม : กรณีศึกษาอำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา. วิทยาสตรมหาบัณฑิต(การจัดการทรัพยากร) สาขา การจัดการทรัพยากร ภาควิชา โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.

ศูนย์วิชาการคอนกรีตซีแพค. คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต[Online]. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, 2010. แหล่งที่มา:
http://www.cpac.co.th/cpacnew/Download/academic_02/e-test_u2.pdf [2012, May 28]

สมชัย ชัยเสน. การสำรวจทางธรณีเทคนิคของแหล่งทรายศักยภาพที่ใช้เป็นมวลรวม ในจังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545.

เพ็ญดา สาดรัถย์. ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2550.

ภาษาอังกฤษ

Beres, M., and Haeni, F. P. Application of ground-penetrating radar in hydrogeologic studies. Ground Water 29 (1991): 375-386

- Beresnev, I. A., Hruby, C. E., and Davis, C. A. The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting. Journal of Applied Geophysics. 49(2002): 245-254
- Bisdorf, R. J. Electrical techniques for engineering applications. Association of Engineering Geologists Bulletin 22 (1985): 421-433
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., and Jones, C. H. Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface. New York: W. W. Norton, 2006.
- Chambers, J. E., et al. Determining Reserves of Aggregates by Non-invasive Electrical Tomography (DRAGNET): MIST Project[Online]. Nottingham: British Geological Survey Commissioned Report, 2008. Available from:
http://www.sustainableaggregates.com/library/docs/mist/10048_ma_6_1_008.pdf[2012, June 12]
- Davis, J. L., and Annan A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical prospecting 37(1989): 531-551
- Ellefsen, K. J., Lucius, J. E., and Fitterman, D. V. Geophysics in exploration for sand and gravel. in K. S. Johnson(ed.), Forum on the Geology of Industrial Minerals, 34th, 1998: Oklahoma Geological Survey Circular 102. 147-149. Oklahoma: The University of Oklahoma, 1999.
- Fisher, T. G., Jol, H. M., and Smith, D. G. Ground penetrating radar used to assess aggregate in catastrophic flood deposits, N.E. Alberta, Canada. Canadian Geotechnical Journal 32 (1995): 817-879
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., and Annan, A. P. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. Vadose zone journal. 2(November 2003): 476-491
- Iswandy, A., Serma, A. and Setan, H. Ground penetrating radar (gpr) for subsurface mapping: preliminary result. Geoinformation Science Journal, 9, 2(December 2009): 45-62

- Jol, H. M. Ground penetrating radar theory and applications. Netherlands: Elsevier, 2009.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. An introduction to Geophysical Exploration. 3rd ed. London: Blackwell Science, 2002.
- Knight, R. Ground penetrating radar for environmental applications. The annual review of Earth and planetary sciences. 29(05-2001): 229-255.
- Loke, M. H. , Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys[Online]. Geometrics, 2000. Available from: http://moho.ess.ucla.edu/~pdavis/ESS135_2013/LITERATURE/%20LokeDCREsistivity.pdf [2012, May 25]
- Lowrie, W. Fundamentals of geophysics. . New York: Cambridge University Press, 2007.
- Lucius, J.E., Langer, W.H., and Ellefsen, K.J., An introduction to using surface geophysics to characterize sand and gravel deposits(Online). Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1310, 2007. Available from: <http://pubs.usgs.gov/circ/c1310/>[2012, January 12]
- McCuaig, S. J. and Ricketts, M. J. Ground-penetrating radar: a tool for delineating aggregate-resource deposits. Current research new foundland department of mines and energy geological survey . 04-1(2004): 107-115
- Milsom, J. Field geophysics : The geological field guide series. 3rd ed. London: John Wiley & Sons, 2003.
- Mumpy, A. J., Jol, H. M., Kean, W. F., and Isbell, J. L. Architecture and sedimentology of an active braid bar in the Wisconsin River based on 3-D ground penetrating radar. The geological society of America Special Paper 432 (2007): 111-131
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. Multi-channel analysis of surface waves (MASW). Geophysics. 64 (1999): 800-808
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. and Ivanov, J. Multichannel analysis of surface waves (MASW): active and passive methods. The Leading Edge (TLE). 26(2007): 60-64

- Reynolds, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. London: John Wiley & Sons, 1997.
- Roy, K. K. Potential theory in applied geophysics. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Saad, R., Nawawi, M. N.M., Mohamad, E. T. Groundwater Detection in Alluvium Using 2-D Electrical Resistivity Tomography. European Journal of Government and Economics (EJGE). 17(2012): 369-376
- Takahashi, K., Preetz, H., and Igel, J. Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar -Soil characterisation and its verification by a field test. Journal of Applied Geophysics 73(2011): 368-377
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. Applied geophysics. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1990.
- U.S. Army Corps of Engineers. Geophysical exploration for engineering and environmental investigations. [Online]. Washington DC: Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, 1995. Available from:
http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-1-1802_sec/EM_1110-1-1802.pdf[2012, Mach 9]
- Veeken, P. C.H. Handbook of geophysical exploration Seismic exploration: Seismic stratigraphy, basin analysis and Reservoir characterisation. Vol. 37. Netherlands: Elsevier, 2007.

ภาคผนวก

ตารางแสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะทาง

ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)
0	42632	25	42659	50	42664
1	42644	26	42660	51	42662
2	42648	27	42660	52	42661
3	42651	28	42662	53	42662
4	42630	29	42661	54	42658
5	42652	30	42661	55	42660
6	42657	31	42660	56	42654
7	42657	32	42660	57	42662
8	42658	33	42659	58	42663
9	42658	34	42656	59	42662
10	42658	35	42662	60	42661
11	42659	36	42659	61	42654
12	42656	37	42660	62	42656
13	42656	38	42662	63	42658
14	42655	39	42658	64	42659
15	42653	40	42662	65	42653
16	42650	41	42660	66	42658
17	42644	42	42660	67	42658
18	42651	43	42661	68	42661
19	42657	44	42663	69	42658
20	42657	45	42661	70	42657
21	42657	46	42663	71	42658
22	42651	47	42662	72	42660
23	42658	48	42664	73	42660
24	42659	49	42662	74	42660

ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)
75	42663	100	42638	125	42657
76	42659	101	42633	126	42655
77	42658	102	42634	127	42657
78	42659	103	42636	128	42657
79	42657	104	42653	129	42653
80	42655	105	42657	130	42651
81	42652	106	42660	131	42654
82	42655	107	42661	132	42649
83	42655	108	42659	133	42653
84	42651	109	42655	134	42647
85	42654	110	42659	135	42649
86	42637	111	42660	136	42655
87	42641	112	42655	137	42660
88	42645	113	42653	138	42655
89	42634	114	42658	139	42655
90	42644	115	42651	140	42656
91	42642	116	42656	141	42656
92	42637	117	42633	142	42655
93	42648	118	42629	143	42655
94	42647	119	42651	144	42657
95	42643	120	42658	145	42658
96	42637	121	42647	146	42658
97	426332	122	42656	147	42657
98	42637	123	42641	148	42659
99	42633	124	42656	149	42658

ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)	ระยะทาง (m)	ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็ก (nT)
150	42658	167	42649	184	42658
151	42658	168	42657	185	42659
152	42660	169	42656	186	42657
153	42657	170	42659	187	42657
154	42657	171	42661	188	42656
155	42658	172	42657	189	42654
156	42657	173	42658	190	42658
157	42657	174	42655	191	42654
158	42660	175	42653	192	42656
159	42660	176	42651	193	42653
160	42658	177	42655	194	42656
161	42657	178	42655	195	42651
162	42660	179	42653	196	42651
163	42657	180	42656	197	42652
164	42656	181	42656	198	42649
165	42659	182	42656	199	42651
166	42658	183	42656	200	42652

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายณรงค์ศักดิ์ ราชูการ

วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด: 18 กุมภาพันธ์ 2530 จังหวัดกระบี่

วุฒิการศึกษา: จบระดับปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2553

ชื่อผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่: Sand deposits exploration by geophysical
methods of design and development.