



การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและการใช้เรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เพื่อหารอยแตก  
ในชั้นหินแข็ง: กรณีศึกษา ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา  
Resistivity and GPR Methods for Detecting Fracture Zone in Hard Rock:  
A Case Study in Thung Yai Sub-district, Hat Yai, Songkhla

สุธามาต วีระรัตน์ตระกูล  
Sutamas Veeraratragul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและการใช้เรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เพื่อหารอยแตก  
ในชั้นหินแข็ง: กรณีศึกษา ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา  
Resistivity and GPR Methods for Detecting Fracture Zone in Hard Rock:  
A Case Study in Thung Yai Sub-district, Hat Yai, Songkhla

สุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล  
Sutamas Veeraratragul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Science in Geophysics

Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและการใช้เรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เพื่อหารอยแตก  
 ในชั้นหินแข็ง: กรณีศึกษา ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ผู้เขียน นางสาวสุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล

สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแพง วัฒนเสน)

.....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สวัสดี ยอดขยัน)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแพง วัฒนเสน)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล อุดพั๋ย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

.....  
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ศักดิ์ ฟ้ารุ่งสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ  
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแพง วัฒนเสน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวสุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล)

นักศึกษา



ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการขออนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวสุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล)

นักศึกษา

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแหง วัฒนเสน ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษา การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์อย่างเสร็จสมบูรณ์ และ Asst. Prof. Dr.Helmut Duerrast สำหรับวิชาความรู้ทางธรณีวิทยา ลงพื้นที่ช่วยเก็บข้อมูลภาคสนาม คำแนะนำทางวิชาการ และบุคคลากรจากภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล อุดพั๋ย ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความกรุณาช่วยประสาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติ มั่นเข้มทอง ในการสอนความรู้เพิ่มเติมวิชาการด้านธรณีวิทยาโครงสร้างและธรณีฟิสิกส์

กราบขอบพระคุณ นายอุทัย หงส์ใจสี ตำแหน่งผู้ชำนาญการพิเศษ ส่วนวิศวกรรมธรณี กรมชลประทาน สำหรับวิชาความรู้ทางธรณีวิทยาและธรณีวิทยาโครงสร้าง คำแนะนำทางวิชาการ และลงพื้นที่ช่วยเก็บข้อมูลภาคสนาม

ขอขอบคุณ นายปิยะพงศ์ สังข์วงศ์ และทีมงานสาขาธรณีฟิสิกส์ สำหรับการลงพื้นที่ช่วยเก็บข้อมูลสำรวจทางธรณีฟิสิกส์และสอนวิธีการใช้โปรแกรมต่างๆ

ท้ายนี้ ประโยชน์อันใดที่ได้มาจากการศึกษางานวิจัย ขออุทิศให้แก่บิดา มารดา อาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยสนับสนุนและอยู่เบื้องหลังของความสำเร็จในครั้งนี้

สุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและการใช้เรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เพื่อหารอยแตกในชั้นหินแข็ง: กรณีศึกษา ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
ผู้เขียน	นางสาวสุธามาศ วีระรัตน์ตระกูล
สาขาวิชา	ธรณีฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2563

### บทคัดย่อ

การศึกษารอยแตกที่สัมพันธ์กับแหล่งน้ำบาดาลในชั้นหินแข็ง ณ พื้นที่บ้านทุ่งใหญ่ ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาในเจาะหาแหล่งน้ำใต้ดิน เนื่องจากลักษณะธรณีวิทยาของพื้นที่ปกคลุมด้วยชั้นตะกอนเศษหินเชิงเขาในยุคควอเทอนารีที่มีชั้นหินแกรนิตวางตัวอยู่ในระดับตื้นใกล้ผิวดิน การเจาะบ่อบาดาลทั้ง 3 บ่อ แต่ละบ่อห่างกันประมาณ 50 เมตรในทิศทาง W-E พบว่าเฉพาะบ่อตรงกลางที่เจาะไม่เจอน้ำ ซึ่งแสดงถึงชั้นหินอุ้มน้ำในพื้นที่มีความซับซ้อนทางธรณีวิทยา วัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาตำแหน่งและทิศทางของบริเวณที่มีรอยแตกในชั้นหินแกรนิตสัมพันธ์กับแหล่งน้ำบาดาล โดยใช้วิธีการสำรวจทางธรณีวิทยาร่วมกับวิธีทางธรณีฟิสิกส์ ได้แก่ วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท, วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ และวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทมี 2 ตำแหน่ง โดยวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ แต่ละตำแหน่งมี 6 แนววัดรอบจุดศูนย์กลางและทำมุมต่างกัน 30 องศา โดยมีระยะ AB/2 มากสุดเป็น 300 เมตร ทิศทางของรอยแยกพิจารณาจากทิศทางของแกนหลักของวงรีบนแผนภาพโพลาร์ไดอะแกรม พบว่ามี 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทาง NE-SW ในระดับตื้น ( $AB/2 < 80$  m) และ ทิศทาง NW-SE ในระดับลึก ( $AB/2 > 80$  m) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทางธรณีวิทยา ทิศทางของรอยแยกในระดับลึกมีความสอดคล้องกับผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ และผลการวัดด้วยเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน ณ ตำแหน่งบ่อตรงกลางที่เจาะไม่เจอน้ำมีความสอดคล้องกับชั้นดินข้างล่างที่เป็นชั้นกรวดทรายบางๆ และมีชั้นหินแกรนิตที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงรองรับอยู่ด้านล่าง ส่วนบ่อที่เจาะเจอน้ำทางด้านข้าง พบว่า ชั้นที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและคลื่นสะท้อนจากแผนภาพเรดาร์แกรมแสดงค่าแอมพลิจูดสูง ดังนั้นวิธีทางธรณีฟิสิกส์ ในงานวิจัยนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลที่ถูกกักเก็บอยู่ในรอยแตกภายใต้ผิวดินในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศที่มีชั้นหินแข็งวางตัวอยู่ในระดับตื้น

<b>Thesis Title</b>	Resistivity and GPR Methods for Detecting Fracture Zone in Hard Rock: A Case Study in Thung Yai Sub-district, Hat Yai, Songkhla
<b>Author</b>	Miss. Sutamas Veeraratragul
<b>Major Program</b>	Geophysics
<b>Academic year</b>	2020

### Abstract

A study of fracture zone in hard rock for groundwater in Ban Thung Ngai, Hat Yai district, Songkhla province where drilling well for groundwater is hard to get successful. This is because the study area lies on a flat hill area where the topsoil is sand from terrace deposits in the Quaternary Periods underlain by the granitic rock that has reached the surface. Three wells have been drilled for groundwater in this area with interval about 50 m arranging in W – E direction. Only the well that is in the middle found no groundwater. This means that the subsurface aquifer here is complicate. The aim of this study is to determine the fracture zone in granitic rock by using geological survey and geophysics methods. Two azimuthal resistivity sounding (ARS) positions have been carried out by VES Schlumberger along six different azimuths with a maximum AB/2 separation of 300 m. The fracture rock strike will be considered from the major axis of apparent resistivity variation with azimuths plotting on the polar diagram for each depth of investigation. The orientation of fracture strikes in NE-SW and NW-SE at the shallow depth ( $AB/2 < 80$  m) and the deeper depth ( $AB/2 > 80$  m) respectively, were found which coincide with the geological study. The subsurface fractured zone at the  $AB/2 > 80$  m depths corresponds to the location of well-found groundwater and correspond to the 2D-resistivity and GPR results performed perpendicular to the fractured strike. The well in the middle (no groundwater) coincides with subsurface comprise of sand and granitic rock at the shallow depth, while the beside wells found water are correspondent to the zone of subsurface low resistivity layers and high amplitude layers of GPR signal. Thus ARS, 2D-resistivity and GPR measurements have provided an important data of fracture direction in hard rock area that will be the key to recommend the drilling location for groundwater.

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	
1.2.1 ลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดสงขลา	3
1.2.2 ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา	4
1.2.3 ลักษณะภูมิอากาศ	7
1.2.4 สถิติปริมาณฝนของจังหวัดสงขลา	7
1.2.5 ธรณีวิทยาโครงสร้าง	
1.2.5.1 รอยแยกและรอยแตกเฉือน	9
1.2.5.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างของภาคใต้	13
1.2.6 ธรณีวิทยาของภาคใต้	17
1.2.7 อุทกธรณีวิทยา	19
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	20
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	20
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย	21
2 วิธีการวิจัย	
2.1 ระเบียบวิธีธรณีฟิสิกส์	
2.1.1 การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	22
2.1.2 กฎของโอห์ม	24
2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในหินแกรนิต	25
2.1.4 ศักย์ไฟฟ้าที่จุดกำเนิดบนผิวดิน	26
2.1.5 การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าตามระดับความลึก	27
2.1.6 หลักการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในชั้นวัสดุภายใต้ผิวดิน	29

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า	
	2.1.7	แบบจำลองทางเรขาคณิตด้วยเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้า	31
	2.1.8	เทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าร่วมกับการหมุนของระบบพิกัด คาร์ทีเซียน	33
	2.1.9	การวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์	35
	2.1.10	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท	37
	2.1.11	โพลาไดอะแกรม	41
	2.1.12	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	45
	2.1.13	การสร้างแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	46
	2.1.14	การสำรวจเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน	52
	2.1.15	การสะท้อนและการหักเห	55
	2.1.16	การจัดวางสายอากาศของเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก	56
	2.1.17	การประมวลผลและสร้างเรดาร์แกรม	60
2.2	วัสดุและอุปกรณ์		
	2.2.1	การสำรวจทางธรณีวิทยา	68
	2.2.2	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์	
	2.2.2.1	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท	69
	2.2.2.2	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	70
	2.2.2.3	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเรดาร์หยั่งลึก	71
2.3	วิธีดำเนินการ		
	2.3.1	การสำรวจทางธรณีวิทยา	72
	2.3.2	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท	74
	2.3.3	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	77
	2.3.4	การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเรดาร์หยั่งลึก	78

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 ผลและการวิเคราะห์	
3.1 ผลจากการสำรวจทางด้านธรณีวิทยาโดยรอบพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ศึกษา	81
3.2 ผลการศึกษาจากการสำรวจทางด้านธรณีวิทยาด้วยการวัดทิศทางของ ระนาบรอยแยก	
3.2.1 จุดสำรวจที่ 1 บริเวณควนมนัส	85
3.2.2 จุดสำรวจที่ 2 บริเวณอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	88
3.2.3 จุดสำรวจที่ 3 บริเวณจุดตั้งสถานควนสำหรับ	90
3.2.4 จุดสำรวจที่ 4 โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ หรือบริเวณพื้นที่ศึกษา	93
3.3 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า แบบอะซิมุต	98
3.4 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก	113
3.5 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า แบบ 2 มิติ	122
3.6 ผลการศึกษาอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่	125
4 บทวิจารณ์	126
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	130
บรรณานุกรม	132
ภาคผนวก	139
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	147
ประวัติผู้เขียน	157

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แสดงสถิติปริมาณฝนตก อ.เมือง จ.สงขลา ปี พ.ศ. 2559 – 2560	8
1.2	แสดงสถิติปริมาณฝนตก อ.เมือง จ.สงขลา ปี พ.ศ. 2561 – 2562	8
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและวัสดุทางธรรมชาติ	37
2.2	แสดงระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางชนิดต่างๆ	60
2.3	สรุปการตำแหน่งการสำรวจทางธรณีวิทยา	72
2.4	สรุปการวางแผนแนวสำรวจรวมกับการหมุนทุก 30 องศา	75
2.5	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ 0 องศา	76
2.6	สรุปตำแหน่งการวางแผนแนวสำรวจการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	78
2.7	สรุปตำแหน่งการวางแผนแนวสำรวจเรดาร์หยั่งลึก	79
2.8	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลด้วยเรดาร์หยั่งลึก	80
3.1	ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW)	100
3.2	ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE)	102
3.3	สรุปทิศทางของรอยแยก สัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง และความพรุนจากการวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏในตำแหน่งจุดสำรวจที่ 1	105
3.4	ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW)	107
3.5	ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE)	108



## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
3.6	สรุปทิศทางของรอยแยก สัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง และความพรุนจาก การวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏในตำแหน่งจุดสำรวจที่ 2	110
3.7	สรุปรายละเอียดบนเส้นสำรวจที่ 1	116
3.8	สรุปรายละเอียดบนเส้นสำรวจที่ 2	118
3.9	สรุปรายละเอียดบนเส้นสำรวจที่ 3	120

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า	
1.1	แผนที่แสดง (ก). ที่ตั้งและอาณาเขตของจังหวัดสงขลา และ (ข). ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอกวดใหญ่ จังหวัดสงขลา	4
1.2	แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่ศึกษาและจุดสำรวจ ณ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอกวดใหญ่ จังหวัดสงขลา	5
1.3	แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่ศึกษาและจุดสำรวจ ณ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอกวดใหญ่ จังหวัดสงขลา	6
1.4	(ก) รูปร่างของโครงสร้าง पुलโมสบนบนผิวระนาบรอยแยกที่ถูกกระทำจากแรงดึง และเฮคเกลแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ (ข) แรงดึงเกิดการเปลี่ยนทิศทางและหมุนทำให้ระนาบรอยแยกและโครงสร้าง पुलโมสเปลี่ยนทิศทางใหม่	9
1.5	(ก) รอยแยกไม่มีระบบ (ข) รอยแยกที่มีระบบ	10
1.6	(ก) โครงสร้างของรอยแตกที่ถูกแรงเฉือนมากทำให้เกิดการเลื่อนออกจากกัน ลักษณะแบบเฉือน (ข) การเลื่อนออกจากกันลักษณะแบบฉีก	11
1.7	แสดง (ก) รอยเลื่อนปกติ (ข) รอยเลื่อนย้อน (ค) รอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (ง) รอยเลื่อนแนวระดับเคลื่อนตัวไปทางซ้ายและทางขวา	12
1.8	แสดงรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมารุ่ยที่มีการวางตัวในแนวทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้	13
1.9	แผนที่ประเทศไทยที่เป็นส่วนหนึ่งของแผ่นทวีปยูเรเชีย ประกอบด้วยแผ่นอนุทวีปอินโดจีน, แผ่นอนุทวีปฉานไทย และแผ่นอนุทวีปจีนใต้	14
1.10	การเคลื่อนที่ชนกันระหว่างแผ่นทวีปออสเตรเลียและแผ่นทวีปยูเรเชีย ก่อให้เกิดรอยเลื่อนแม่น้ำแดงและรอยเลื่อนวังเจ้า	15
1.11	(ก) รอยเลื่อนเกิดการเลื่อนไปทางซ้ายด้วยแรงที่มากระทำในช่วง 50 - 23 ล้านปี (ข) รอยเลื่อนเกิดการเลื่อนไปทางขวาด้วยแรงที่มากระทำในช่วง 16 ล้านปี จนถึงปัจจุบัน	16
1.12	มาตราทางธรณีกาล	18
2.1	(ก) กรณีที่กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปยังวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ข) กรณีที่กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปยังวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	23

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
2.2	แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุทรงกระบอกที่เป็นเนื้อเดียวกัน	24
2.3	(ก) แนวการเคลื่อนที่ลักษณะรูปครึ่งทรงกลมบนแท่งอิเล็กโทรด (ข) แนวการเคลื่อนที่ลักษณะรูปครึ่งทรงกลมบนชุดแท่งอิเล็กโทรด	26
2.4	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยเข้าสู่ชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามาก	28
2.5	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากเข้าสู่ชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย	28
2.6	(ก) ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสประยุกต์ร่วมกับสนามไฟฟ้าใน (ข) ตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน และ (ค) ตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ระบบพิกัดในเส้นลูกศรดำคือต้นแบบ และระบบพิกัดในเส้นลูกศรสีม่วงคือระบบพิกัดใหม่	30
2.7	แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างในระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บนแกน 1, 2, 3 ใน (ก) Horizontal transverse isotropy (ข) และ (ค) Vertical transverse isotropy)	31
2.8	แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างในระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดเล็กบนแกน 1, 2, 3	32
2.9	การวางขั้วไฟฟ้าในรูปแบบของชลัมเบอร์เจอร์	36
2.10	วิธีการวางขั้วไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (AB) และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (MN) ร่วมกับการหมุนทุกๆ 30 องศา	38
2.11	แสดงการเคลื่อนที่ของแนวกระแสไฟฟ้าจากแกน $y'$ หมุนกลับไปยังแกน $y$ ในวัสดุที่มีการสูญเสียรูป	39
2.12	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่เท่ากันตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันบนโพลาไดอะแกรม	41
2.13	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่ 300 องศาในตัวกลางไม่เป็นเนื้อเดียวกันบนโพลาไดอะแกรม	42
2.14	(ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวกลางเปรียบเทียบกับ (ข) รูปแบบวงรีของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาไดอะแกรม	42

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.15 (ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวกลาง 2 ทิศทางเปรียบเทียบกับ (ข) รูปของวงรีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาคิโอะแกรม	43
2.16 (ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวกลางไม่ต่อเนื่องที่ 0 และ 30 องศาเปรียบเทียบกับ (ข) รูปของวงรีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาคิโอะแกรม	43
2.17 แสดงการวางขั้วไฟฟ้าเป็นไดโพล-ไดโพล	46
2.18 แสดง (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	48
2.19 แผนผังการประมวลผลการสร้างแบบจำลองโดยวิธีการแปลงข้อมูลแบบย้อนกลับ	51
2.20 แผนภาพกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดง (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	51
2.21 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสัมผัสบริเวณผิวหน้าระหว่างตัวกลางทั้งสองชนิดที่มีความแตกต่าง ทำให้เกิดหักเหและสะท้อนกลับของคลื่น	56
2.22 การสำรวจด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในรูปแบบ Common Offset และ Profile แสดงวัสดุที่แทรกตัวขึ้นมาในรูปแบบไฮเพอร์โบลา	57
2.23 การวิเคราะห์คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) แล้วทำให้เกิดรูปแบบไฮเพอร์โบลา	57
2.24 แสดงระยะทางของความลึกในตัวกลางที่เป็นตัวสะท้อน	58
2.25 กรณีศึกษารอยแตกของชั้นหิน (เส้นสีเหลือง) แสดงแนวเส้นที่มีความต่อเนื่องบนเรดาร์แกรม	59
2.26 แสดง (ก) ก่อนใช้ฟังก์ชัน (ข) หลังการใช้ฟังก์ชัน Dewow	61
2.27 เรดาร์แกรมแสดง (ก) ไม่ได้กรอง Wow ออก (ข) ใช้ฟังก์ชัน Dewow	61
2.28 แสดงการปรับแก้ไขเวลาเริ่มต้นด้วยการใช้ฟังก์ชัน Autocorrelation	62
2.29 แสดงการกำหนดเลือกใช้ช่วงความถี่และกำจัดส่วนเกินบนสเปกตรัมออก	62
2.30 แสดงฟังก์ชัน Background removal เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง	63
2.31 การใช้ฟังก์ชัน Gain เพื่อเพิ่มความชัดเจนของข้อมูล	63
2.32 แสดงก่อนและหลังการทำ Phase-shift migration	66

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.33 การสร้างเรดาร์แกรมระหว่างไม้ใช้และใช้วิธี Phase-shift migration	66
2.34 แสดงขั้นตอนการประมวลผลเพื่อสร้างเรดาร์แกรม	67
2.35 แสดงเครื่องมือเดินสำรวจทางธรณีวิทยา	68
2.36 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบบอซิมุท	69
2.37 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	70
2.38 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการเรดาร์หิ้งลึก	71
2.39 แสดงตำแหน่งสำรวจทางธรณีวิทยาและรอยแยก	73
2.40 วิธีการจัดบันทึกด้วยการอ่านค่าเข็มทิศบรรทัดพร้อมภาพประกอบทิศทางของแนวรอยแยก	73
2.41 แสดงตำแหน่งจุดสำรวจที่ 1 และ 2 พร้อมเส้นสำรวจทุก 30 องศา	75
2.42 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติบนเส้นสำรวจ	78
2.43 แสดงตำแหน่งเส้นสำรวจที่ 1, 2 และ 3	79
3.1 แผนที่ธรณีวิทยาแสดงตำแหน่งการสำรวจ บริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ศึกษา	82
3.2 แสดงชนิดของหินบริเวณจุดสำรวจที่ (1) เป็นหินดินดานมีสีเทาในบริเวณภูเขาควนคันทลาว (2) เป็นหินเพกมาไทต์ในบริเวณภูเขาควนคันทลาว (3) หินแกรนิตในช่วงยุคไทรแอสซิกบนภูเขาควนตันไทร บริเวณจุดตั้งศาลาควนสำหรับ และ (4) เป็นหินแกรนิตในพื้นที่ศึกษา	83
3.3 แสดงผลึกเฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ในหินไปโอไทต์-มีส์โคไวต์แกรนิต	84
3.4 แสดงจุดสำรวจที่ 1 ร่วมกับทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา	86
3.5 แสดงหินไปโอไทต์-มีส์โคไวต์แกรนิตที่มีทิศทางการวางตัวของรอยแยกและแร่ประกอบหิน	86
3.6 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทียงบนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ	87

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.7 ผลการศึกษาจากแผนภาพกุหลาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนว ระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	87
3.8 แสดงจุดสำรวจที่ 2 ร่วมกับทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา	88
3.9 บริเวณอุทยานวิทยาศาสตร์ พรอยแยกบนหินแกรนิต	89
3.10 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทียงบนตา ข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ	89
3.11 ผลการศึกษาจากแผนภาพกุหลาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนว ระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	90
3.12 แสดงจุดสำรวจที่ 3 และทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา	91
3.13 หินแกรนิตขนาดใหญ่บริเวณจุดตั้งสถานควนสำหรับ	91
3.14 รอยแยกบนหินแกรนิตที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตก เฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) และทิศทางการวางตัวของแนว ระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	92
3.15 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทียงบนตา ข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ	92
3.16 ผลการศึกษาจากแผนภาพกุหลาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนว ระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	93
3.17 แสดงจุดสำรวจที่ 4 และทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา	94
3.18 บริเวณพื้นที่ศึกษาพบหินแกรนิตโผล่	94

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.19 บริเวณพื้นที่ศึกษาพรอยแยกบนหินแกรนิตแบบเปลือกหุ้มหอม	95
3.20 แสดงลักษณะ (ก) รอยแยกแบบปิด (ข) รอยแยกแบบเปิดมีทิศทางวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) และวางตัวในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	95
3.21 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวร่นาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทียงบนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ	96
3.22 ผลการศึกษาจากแผนภาพกุหลาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนวร่นาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)	96
3.23 แสดงแร่ประกอบหินแกรนิต	97
3.24 การวิเคราะห์แผนภาพกุหลาบเปรียบเทียบทิศทางรอยแยกระหว่าง (ก) บริเวณจุดสกัดถนนสำหรับ (ข) พื้นที่ศึกษา	97
3.25 พื้นที่สำรวจจุดที่ 1 ระยะทาง AB/2 มากสุดเป็นระยะทาง 300 เมตร	98
3.26 วิธีการวางขั้วไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (AB) และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (MN) ร่วมกับการหมุนแนววัดทุก 30 องศา	99
3.27 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ VES โดยจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ สลัมเบอร์เจอร์บนเส้นสำรวจ (ก) 300 องศา (ข) 330 องศา	99
3.28 แสดงจุดสำรวจที่ 2 ระยะ AB/2 มากสุดในแต่ละแนววัดเท่ากับ 80 เมตร ประกอบด้วยตำแหน่งชุดเจาะบ่อน้ำบาดาล 3 บ่อ	106
3.29 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลาไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพกุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) บริเวณจุดสำรวจที่ 1	111
3.30 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลาไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพกุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) บริเวณจุดสำรวจที่ 1	111

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.31 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลลาไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) บริเวณจุดสำรวจที่ 2	112
3.32 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลลาไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) บริเวณจุดสำรวจที่ 2	112
3.33 แสดงเส้นทางสำรวจที่ 1 ถึง 3	113
3.34 การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในแนวสำรวจที่ 1	114
3.35 แสดงจุดเริ่มต้นสำรวจไปยังจุดสิ้นสุดในแนวสำรวจที่ 1	114
3.36 แสดงร่องน้ำที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกของบ่อเจาะสำรวจที่ 2	115
3.37 แสดงเสาไฟฟ้าต้นที่ 5 ผ่านบริเวณบ่อเจาะสำรวจที่ 2 ในแนวสำรวจที่ 1	115
3.38 แสดงจุดสิ้นสุดการสำรวจ เนื่องจากต้นมันสำปะหลังที่ขึ้นรก	116
3.39 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดงสัญญาณรบกวนจากภายนอก ด้วยความเร็ว เฉลี่ยที่ $V_m=0.3$ m/ns ก่อให้เกิดความเสียหายของข้อมูลในเส้นสำรวจที่ 1	117
3.40 แสดงทิศทางระยะห่างระหว่างแนวสำรวจที่ 1 ไปยังแนวสำรวจที่ 2	117
3.41 การเดินเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในแนวสำรวจที่ 2	118
3.42 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดง (ก) บริเวณสัญญาณรบกวนจากภายนอก (ข) การทำ migration ใช้ $V_m = 0.13$ m/ns และแปลความข้อมูล	119
3.43 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดง (ก) บริเวณสัญญาณบริเวณหินแกรนิตเนื้อ แน่น (ข) การทำ migration ใช้ $V_m = 0.13$ m/ns และแปลความข้อมูล	121
3.44 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิง 2 มิติบนแนวสำรวจ (สี่เหลี่ยมความยาว 400 เมตร)	122
3.45 ผลการศึกษาแสดงแบบจำลองภาคตัดขวางเชิง 2 มิติด้วย (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอ เรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	123
3.46 ผลการศึกษาแสดงแบบจำลองภาคตัดขวางใน 2 มิติ อ่างอิงการวางตัวของแนว ระนาบ, ระนาบเอียง และมุมเทในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) จาก แผนภาพกุหลาบร่วมกับการอ้างอิงการแปลความหมายของวัสดุจากข้อมูลการ วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวตั้ง (VES) บนเส้นสำรวจที่ 30 องศา	124



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 การออกแบบการสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติและเรดาร์ หยั่งลึกตัดขวางกับระยะนาบรอยแตก อ้างอิงจากแผนภาพกุหลาบร่วมกับโพลลา ไดอะแกรมในทิศทาง 300 องศาที่จุดสำรวจที่ 2	127
4.2 การออกแบบการสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติและเรดาร์ หยั่งลึกตัดขวางกับระยะนาบรอยแตก อ้างอิงจากแผนภาพกุหลาบร่วมกับโพลลา ไดอะแกรมในทิศทาง 330 องศาที่จุดสำรวจที่ 1	128
ผ1 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระยะนาบเอียงในทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) จากข้อมูลแนวระยะนาบรอยแยก (Strike) ของหินใน ทิศทาง NW-SE	140
ผ2 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระยะนาบเอียงในทิศทางตะวันออก เฉียงใต้ (SE) จากข้อมูลแนวระยะนาบรอยแยก (Strike) ของหินในทิศทาง NE- SW	141
ผ3 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระยะนาบที่มีมุมเอียงในทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) จากข้อมูลแนวระยะนาบรอยแยก (Strike) ของหินใน ทิศทาง NW-SE	142
ผ4 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระยะนาบที่มีมุมเอียงในทิศทาง ตะวันออกเฉียงใต้ (SE) จากข้อมูลแนวระยะนาบรอยแยก (Strike) ของหินใน ทิศทาง NE-SW	143
ผ5 การวิเคราะห์แบบจำลองจากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวตั้ง (VES) ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ (30 องศา) ที่ทำการวัดแบบอะซิมุทของ จุดวัดที่ 2	144
ผ6 แผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการใช้ โปรแกรม Res2DINV version 3.53 โดยเลือกวิธี FD method บริเวณ โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวิวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอก หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	145

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ผ7      แผนภาพแบบจำลองการจ่ายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Res2DINV version 3.53 โดยเลือกวิธี FE method บริเวณโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำดวน จังหวัดสงขลา	146

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

พื้นที่บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอดงหลวง จังหวัดสงขลา เป็นพื้นที่ห่างจากเทศบาลนครหาดใหญ่ประมาณ 7 กิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาล้อมรอบบริเวณพื้นที่ศึกษา มีความลาดของเนินเขาเอียงสวยงามอยู่ใกล้กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และอุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังนั้นจึงเป็นพื้นที่ได้รับความสนใจจากผู้ต้องการหาที่ดินสำหรับเป็นที่อยู่อาศัยและทำสวนเกษตร อย่างไรก็ตามในพื้นที่บ้านทุ่งงายและบริเวณใกล้เคียงยังคงมีปัญหาเรื่องน้ำบาดาลขาดแคลน เพื่อใช้สำหรับอุปโภคและบริโภคในฤดูแล้งเนื่องจากลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาพบว่ามีชั้นหินแข็งที่วางตัวอยู่ในระดับตื้น บริเวณเนินเขาที่แทรกสลับกับที่ราบลึกลงไปในดินพบเป็นหินแกรนิต และบางพื้นที่ยังพบหินแกรนิตลักษณะเป็นก้อนใหญ่แทรกอยู่ในชั้นดินระดับตื้น การเจาะบ่อน้ำบาดาลจึงยากที่จะระบุตำแหน่งเพื่อเจาะให้ได้น้ำตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ซึ่งตั้งอยู่ ณ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอดงหลวง จังหวัดสงขลา มีการทำเกษตรเป็นสวนผลไม้ สวนยางพารา และไร่สับปะรด ฯลฯ น้ำบาดาลจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการทำเกษตรและการบริโภค

พื้นที่โดยรอบของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่โดยทั่วไปเป็นพื้นที่ราบบนเนินเขา มีความลาดเอียงลงสู่ที่ต่ำที่อยู่ระหว่างเนินเขา โดยพบร่องน้ำทางด้านทิศเหนือของพื้นที่บริเวณทางน้ำพบหินโผล่เป็นหินแกรนิต บริเวณส่วนกลางทางด้านทิศตะวันตกเป็นเนินสูงและมีความลาดเอียงไปทางทิศตะวันออกและทิศใต้พบทางน้ำไหลลงไปสู่ที่ราบต่ำระหว่างเนินเขา จากข้อมูลการเจาะบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่พบว่าน้ำที่สูบน้ำมาใช้มีปริมาณค่อนข้างน้อยไม่เพียงพอต่อการทำเกษตร สำหรับในพื้นที่โครงการได้มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลพบว่าตำแหน่งที่เจาะบ่อน้ำบาดาลอยู่ห่างจากบ่อน้ำบาดาลที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกประมาณ 50 เมตร ผลการเจาะ ณ ตำแหน่งนี้พบว่าไม่มีน้ำ และเมื่อย้ายตำแหน่งเจาะให้ห่างจากตำแหน่งนี้ไปทางด้านทิศตะวันออกอีกประมาณ 50 เมตร ผลการเจาะพบว่ามีความลึกประมาณ 40 เมตร ได้ปริมาณน้ำเพียงพอที่จะใช้สำหรับอุปโภคและบริโภค จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา

ในพื้นที่น่าจะมีควมซับซ้อน และชั้นหินขวางน้ำท้องถื่นที่รองรับน้ำใต้ดินลอยมีขอบเขตจำกัด ทำให้การเจาะบ่อบาดาลในระยะทางที่ไม่ไกลกันนักระหว่างจุดเจาะมีทั้งได้น้ำและไม่ได้น้ำ จึงคาดว่าชั้นหินอุ้มน้ำในพื้นที่จะเป็นโซนของชั้นหินผุหรือชั้นหินที่มีรอยแตกที่แทรกตัวอยู่ในชั้นหินแข็ง (แกรนิต) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน เพื่อต้องการตรวจหาบริเวณที่มีรอยแตก ซึ่งที่คาดว่าจะเป็นบริเวณที่มีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่โดยใช้วิธีตรวจวัดทางธรณีฟิสิกส์สำหรับบริเวณที่มีรอยแตกในชั้นหินแข็งที่ตรวจพบจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะเจาะบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา เพื่อนำน้ำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมทางการเกษตร อุปโภคและบริโภคในลำดับต่อไป

การศึกษาในครั้งนี้จึงต้องการประยุกต์ใช้วิธีการสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์และธรณีวิทยามาใช้ในการวิจัย โดยวิธีธรณีฟิสิกส์ที่ใช้ ได้แก่ วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท (Azimuthal resistivity measurement), วิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (Ground penetrating radar) และวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ (2D Electrical resistivity measurement) ข้อมูลธรณีฟิสิกส์จะช่วยในการวิเคราะห์ทิศทางรอยแยกและระบุขอบเขตชั้นน้ำใต้ดิน และลักษณะโครงสร้างของชั้นดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่คาดว่ามึรอยแตกในชั้นหินแข็งของพื้นที่ศึกษา สำหรับการศึกษาด้านธรณีวิทยาผลจากการสำรวจโดยรอบบริเวณพื้นที่ศึกษาจะช่วยในการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการแปลความหมายข้อมูลจากวิธีธรณีฟิสิกส์ดังกล่าวข้างต้น เพื่อยืนยันข้อมูลลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา

## 1.2 การตรวจเอกสาร

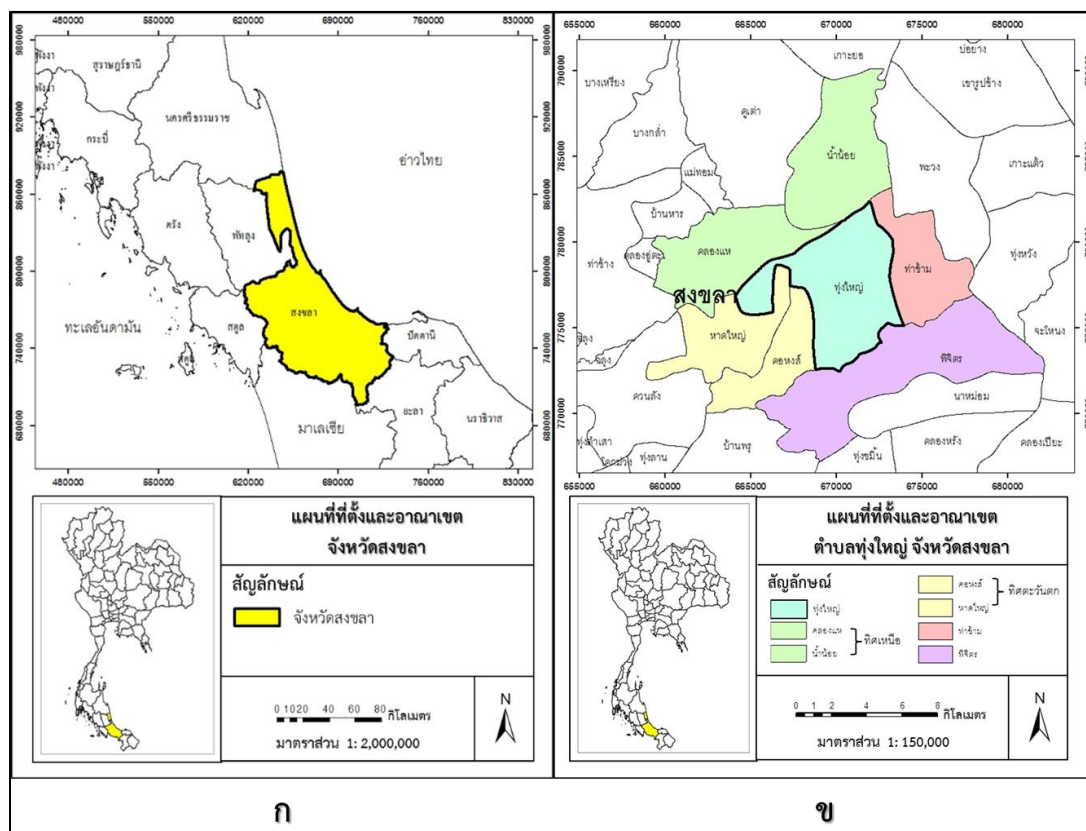
### 1.2.1 ลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดสงขลา

จังหวัดสงขลามีพื้นที่ 7,394 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 4,862,599 ไร่ มีขนาดพื้นที่เป็นอันดับ 27 ของประเทศ และใหญ่เป็นอันดับที่ 3 ของภาคใต้ ซึ่งตั้งอยู่บริเวณฝั่งตะวันออกของภาคใต้ตอนล่างที่มีขอบเขตระหว่างพิกัดประมาณ 704650 เหนือ ถึง 877700 เหนือ และระหว่างพิกัดประมาณ 617428 ตะวันออก ถึง 732730 ตะวันออก มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 4 เมตร และมีอาณาเขตที่ติดต่อกับจังหวัดใกล้เคียงตามภาพประกอบ 1.1ก ดังนี้

- ทิศเหนือ ติดต่อกับจังหวัดนครศรีธรรมราชและจังหวัดพัทลุง
- ทิศตะวันออก ติดต่อกับอ่าวไทย
- ทิศใต้ ติดต่อกับจังหวัดยะลา จังหวัดปัตตานี และประเทศมาเลเซีย
- ทิศตะวันตก ติดต่อกับจังหวัดพัทลุง และจังหวัดสตูล

ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา มีเนื้อที่ทั้งหมดประมาณ 39 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 24,193 ไร่ สภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ลาดเชิงเขา มีลักษณะเป็นดินปนทราย และบางพื้นที่อาจเป็นทรายเพียงอย่างเดียว บริเวณตำบลทุ่งใหญ่มีภูเขาที่สำคัญคือ ภูเขาคอหงส์ และลำคลองที่สำคัญคือ คลองน้ำน้อย ตำบลทุ่งใหญ่มีอาณาเขตติดต่อกับพื้นที่ใกล้เคียงตามภาพประกอบ 1.1ข ดังนี้

- ทิศเหนือติดต่อกับตำบลน้ำน้อย และตำบลคลองแห อำเภอหาดใหญ่
- ทิศตะวันออกติดต่อกับตำบลท่าข้าม อำเภอหาดใหญ่
- ทิศตะวันตกติดต่อกับตำบลคอหงส์ และตำบลหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่
- ทิศใต้ติดต่อกับตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม

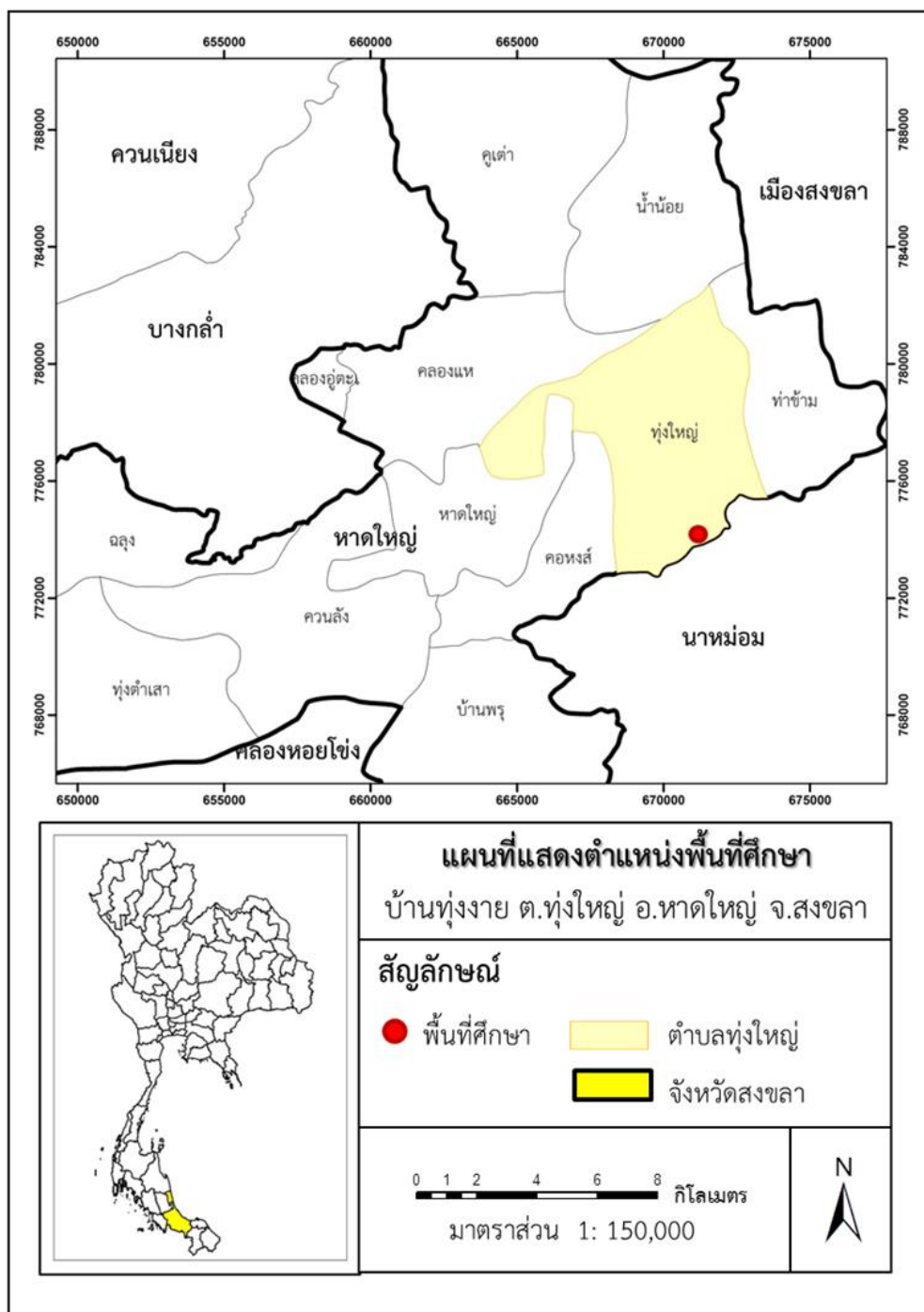


ภาพประกอบ 1.1 แผนที่แสดง (ก) ที่ตั้งและอาณาเขตของจังหวัดสงขลา และ (ข) ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

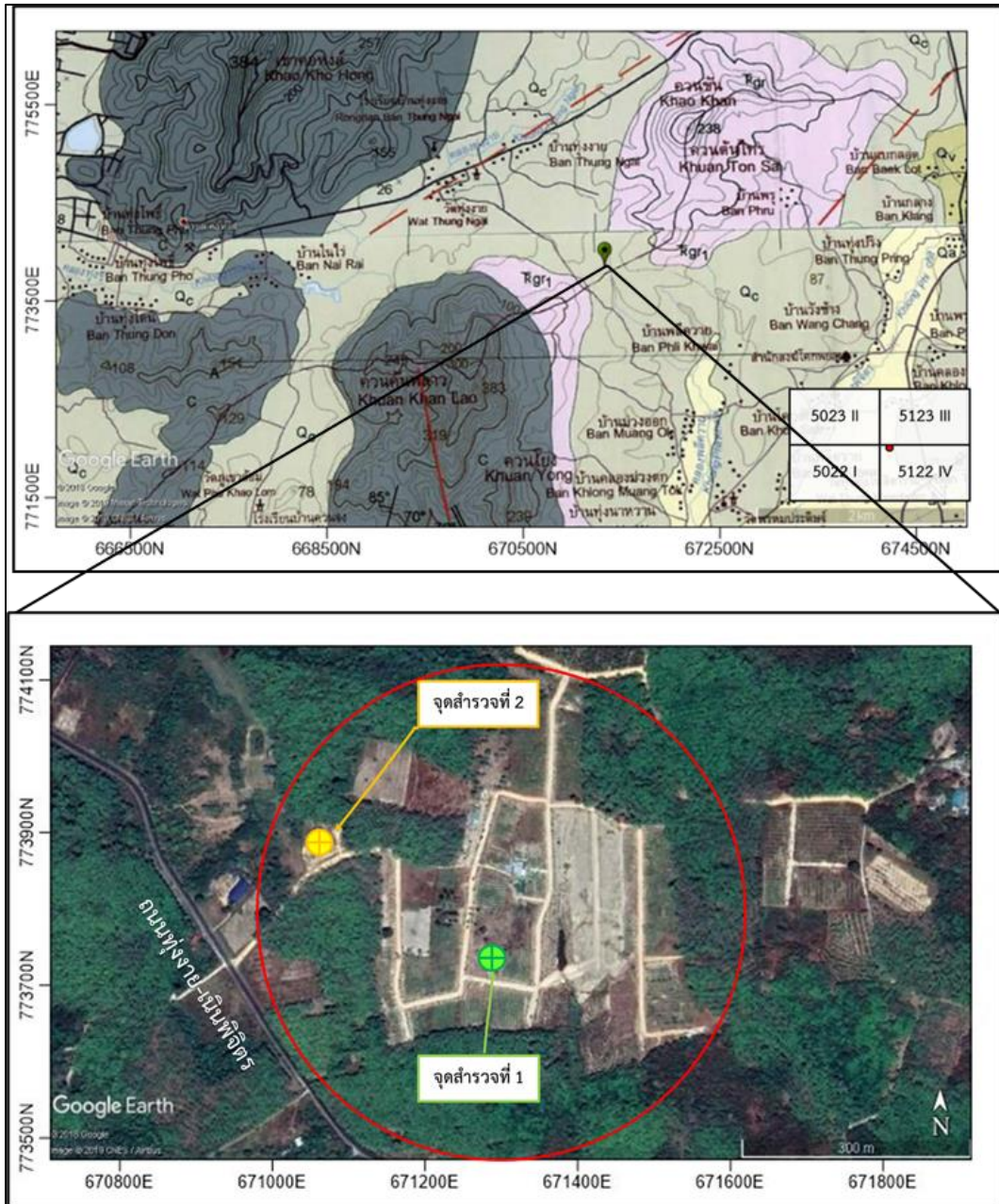
## 1.2.2 ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา

โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ตั้งอยู่ในพื้นที่ ณ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่ตำแหน่งพิกัดประมาณ 671056 ตะวันออก, 773867 เหนือตามภาพประกอบ 1.2 ลักษณะภูมิประเทศโดยรอบของพื้นที่ศึกษาถูกล้อมรอบด้วยภูเขาที่สำคัญประกอบด้วยภูเขาคอหงส์ ภูเขาควนตันไทร และภูเขาควนคันทลาว บริเวณพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นเนินเขาราบเรียบสลับเนินสูงและต่ำ ส่วนใหญ่ดินชั้นบนพบเป็นดินทรายสลับกรวดขนาดเล็ก บางพื้นที่พบหินโผล่หรือหินแกรนิตผุเป็นจำนวนมาก เช่น ตำแหน่งพิกัดประมาณ 671317 ตะวันออก, 773841 เหนือ เป็นต้น จุดสำรวจตำแหน่งที่ 1 อยู่ห่างจากถนนทุ่งงาย-เนินพิจิตรไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 350 เมตร ซึ่งครอบคลุมที่อยู่อาศัยและบริเวณที่มีหินโผล่ ถัดจากที่อยู่อาศัยออกไปทางตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 200 เมตร พบร่องน้ำไหลเป็นแนวยาวโดยวางตัวในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ และจุดสำรวจตำแหน่งที่ 2 อยู่ที่พิกัด 671084 ตะวันออก, 773885 เหนือ ห่างจาก

ถนนทุ่งgay-เนินพิจิตรไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 177 เมตรตามภาพประกอบ 1.3 ซึ่งเป็นจุดที่ผลการเจาะบ่อบาดาลได้ตามความต้องการ และห่างจากจุดนี้ไปทางด้านทิศตะวันตกประมาณ 50 เมตร เป็นตำแหน่งที่ผลการเจาะบ่อบาดาลไม่เจอน้ำ



ภาพประกอบ 1.2 แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ณ บ้านทุ่งgay ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา



ภาพประกอบ 1.3 แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่ศึกษาและจุดสำรวจ ณ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับชุด F2153 3 และ F5122 4 ระวาง 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย และแผนที่ Google Earth)



### 1.2.3 ลักษณะภูมิอากาศ

พื้นที่บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำดวน จังหวัดสงขลา ได้รับอิทธิพลของมรสุมเขตร้อนที่พัดประจำทุกปีตามฤดูกาลมี 2 ฤดู

1. ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เกิดจากลมทิศตะวันตกเฉียงใต้พัดเอามวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดีย ทำให้จังหวัดสงขลามีฝนตกชุกทั่วไปโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม
2. ฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเกิดจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือพัดเอามวลอากาศเย็นและแห้งที่มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณแตกต่างกันจากประเทศจีนมาสู่ประเทศไทย ทำให้จังหวัดสงขลามีอากาศเย็นลงและฝนชุกอย่างต่อเนื่อง เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ โดยเฉพาะเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดพามวลอากาศชื้นจากอ่าวไทยมาปะทะด้านตะวันออกของบริเวณพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลก่อให้เกิดฝนตกชุกหนาแน่น

หลังจากสิ้นสุดฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ช่วงระยะจะเกิดช่องว่างระหว่างฤดูมรสุมทำให้มีอากาศร้อนอบอ้าว โดยเฉพาะเดือนเมษายนจะมีสภาพอากาศร้อนที่สุด แต่ยังคงได้รับกระแสลมและไอน้ำจากบริเวณชายฝั่งทะเล ทำให้คลายความร้อนได้ในระดับหนึ่ง

### 1.2.4 สถิติปริมาณฝนของจังหวัดสงขลา

ข้อมูลจากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออกพบว่าจังหวัดสงขลา มีฝนตกเกือบตลอดปี เนื่องจากอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนธันวาคม จากข้อมูลสถิติปริมาณฝนตกตั้งแต่ ปี 2559 จนถึงปี 2562 พบว่าช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายนมีปริมาณน้ำฝนที่ลดลงตามลำดับ ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้อาศัยในบริเวณพื้นที่ศึกษาสำหรับการใช้น้ำบาดาลเพื่อทำเกษตรกรรมตามตารางที่ 1.1 และ 1.2

ตารางที่ 1.1 แสดงสถิติปริมาณฝนตก อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ปี พ.ศ. 2559 – 2560

รายการ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปริมาณฝนตก (มิลลิเมตร)	192.5	24.5	0.0	1.7	82.2	101.6	115.5	184.5	57.1	253.5	271.8	906.5
จำนวนวัน	11	7	0	1	14	14	10	11	11	21	23	22
ปริมาณฝนสูงสุด 1 วัน (มิลลิเมตร)	132.2	10.1	0.0	1.7	26.7	42.8	43.9	99.3	19.7	48.2	43.8	224.9
ฝนรวมทั้งปี 2559 = 2,191.4 มม. ปริมาณฝนตกมากที่สุดใน 1 วัน = 224.9 มม. จำนวนวันฝนตกทั้งปี = 145 วัน												

รายการ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปริมาณฝนตก (มิลลิเมตร)	682.2	22.7	99.2	164.2	130.2	121.3	49.9	167.6	185.8	205.0	1353.7	253.1
จำนวนวัน	22	8	6	11	14	13	15	14	23	30	25	22
ปริมาณฝนสูงสุด 1 วัน (มิลลิเมตร)	215.3	6.1	41.5	54.6	36.5	20.7	9.0	69.0	40.8	29.6	244.4	98.7
ฝนรวมทั้งปี 2560 = 3,434.9 มม. ปริมาณฝนตกมากที่สุดใน 1 วัน = 244.4 มม. จำนวนวันฝนตกทั้งปี = 203 วัน												

ตารางที่ 1.2 แสดงสถิติปริมาณฝนตก อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ปี พ.ศ. 2561 – 2562

รายการ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปริมาณฝนตก (มิลลิเมตร)	193.8	99.9	1.4	70.4	151.2	181.7	79.3	21.7	110.1	456.8	383.1	392.8
จำนวนวัน	18	3	1	7	13	13	13	4	19	25	20	22
ปริมาณฝนสูงสุด 1 วัน (มิลลิเมตร)	64.3	94.3	1.4	19.2	52.1	69.0	24.2	14.9	32.1	94.6	112.9	64.9
ฝนรวมทั้งปี 2561 = 2,142.2 มม. ปริมาณฝนตกมากที่สุดใน 1 วัน = 112.9 มม. จำนวนวันฝนตกทั้งปี = 158 วัน												

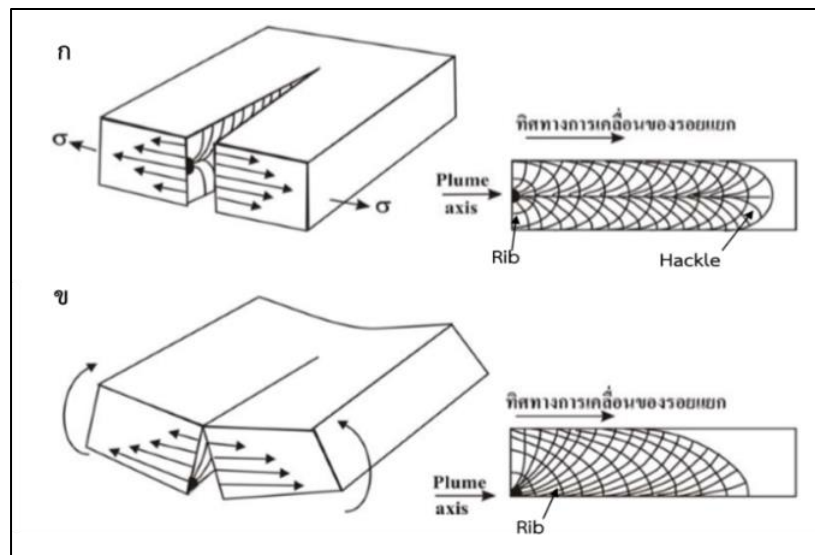
รายการ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปริมาณฝนตก (มิลลิเมตร)	171.2	14.0	26.1	21.1	157.6	83.2	168.3	52.4	103.2	210.3	256.1	107.9
จำนวนวัน	15	7	2	5	21	14	14	14	14	21	25	15
ปริมาณฝนสูงสุด 1 วัน (มิลลิเมตร)	155.6	9.5	23.3	14.2	24.8	25.0	69.1	16.8	34.6	53.7	42.2	33.1
ฝนรวมทั้งปี 2562 = 1,371.4 มม. ปริมาณฝนตกมากที่สุดใน 1 วัน = 155.6 มม. จำนวนวันฝนตกทั้งปี = 167 วัน												

(ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก: ออนไลน์)

## 1.2.5 ธรณีวิทยาโครงสร้าง

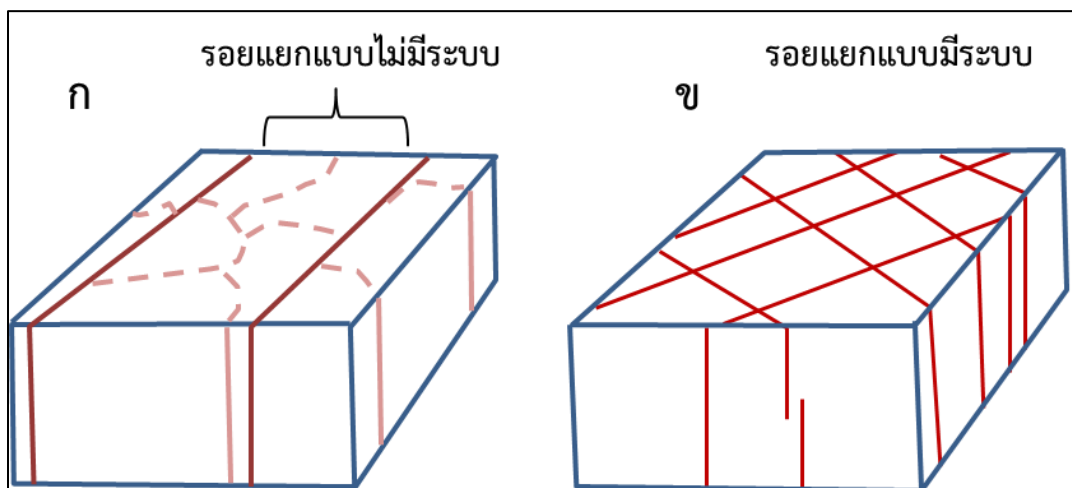
### 1.2.5.1 รอยแยกและรอยแตกเฉือน

เพียงตา, 2552 ได้กล่าวถึงรอยแยก (Joints) เป็นระนาบการแตกของหินที่มีแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่แบบแยกออกจากกันด้วยแรงดึง (Tension) ของความเค้น (Stress) ที่ไม่ได้เกิดจากแรงเฉือน (Shear) หรือที่เรียกว่ารอยแตกเป็นแบบเปิด (Open joints) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างหินในสภาวะเปราะจนเนื้อหินแตกออกจากกันโดยปราศจากการเคลื่อนที่ รอยแยกมักพบเป็นหมวดหมู่หรือที่เรียกว่า “โครงสร้างขนนก (Plumose structure)” ประกอบด้วยรอยแยกที่มีหลายทิศทาง โดยขนาดและความยาวของรอยแยกขึ้นอยู่กับความหนาและความแข็งแรงของหินพบได้ตั้งแต่หน่วยเซนติเมตรจนถึงหลักสิบลเมตรตามภาพประกอบ 1.4ก ถ้าหากความเค้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางผลที่เกิดขึ้นต่อระนาบรอยแยกจะมีการปรับทิศทางใหม่เช่นกัน โดยที่ส่วนแกนของการเอนหรือบิดที่อยู่ในระนาบของรอยแยกหรือที่เรียกว่า “ริบ (Rib)” จะมีแนวขนานกับทิศทางของรอยแยกเคลื่อนออกไป ส่วน “เฮคเกิล (Hackle)” ซึ่งเป็นผลของการเกิดการบิดในกระบวนการของการเกิดรอยแยกตามภาพประกอบ 1.4ข



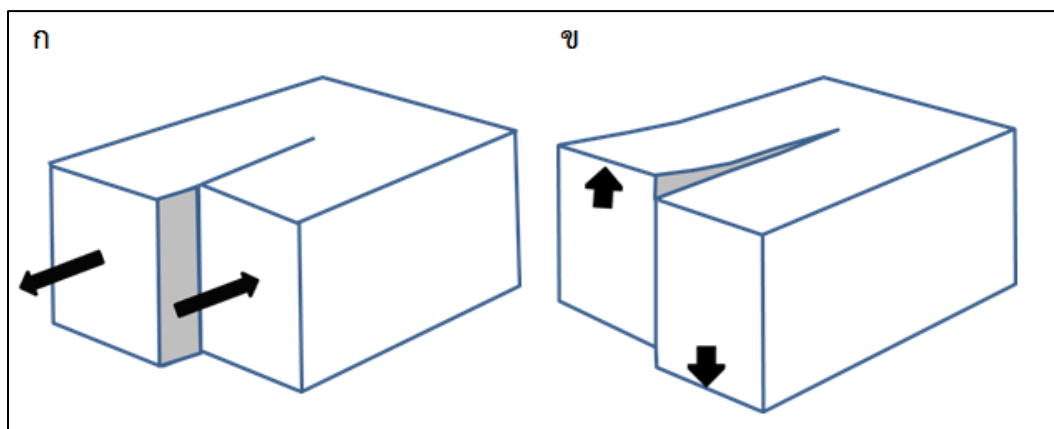
ภาพประกอบ 1.4 (ก) รูปร่างของโครงสร้างพุ่มขนนกที่ถูกระงับโดยแรงดึงและเฮคเกิลแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ (ข) แรงดึงเกิดการเปลี่ยนทิศทางและหมุนทำให้ระนาบรอยแยกและโครงสร้างพุ่มขนนกเปลี่ยนทิศทางใหม่ (ที่มา: เพียงตา, 2552)

ดังนั้นแกนของริบจะส่งผลต่อการเปลี่ยนลักษณะแบบการหมุน (Rotation) ตามไปด้วย ในกรณีรอยแยกที่มีทิศทางการวางตัวอย่างไม่เป็นระบบจะเรียกว่า “รอยแยกไม่มีระบบ (Non-systematic joints)” ตามภาพประกอบ 1.5ก ถ้าหากแนวของรอยแยกมีทิศทางการวางตัวอย่างเป็นระบบด้วยระยะห่างที่เท่าๆ กันจะเรียกว่า “รอยแยกที่มีระบบ (Systematic joints)” ตามภาพประกอบ 1.5ข



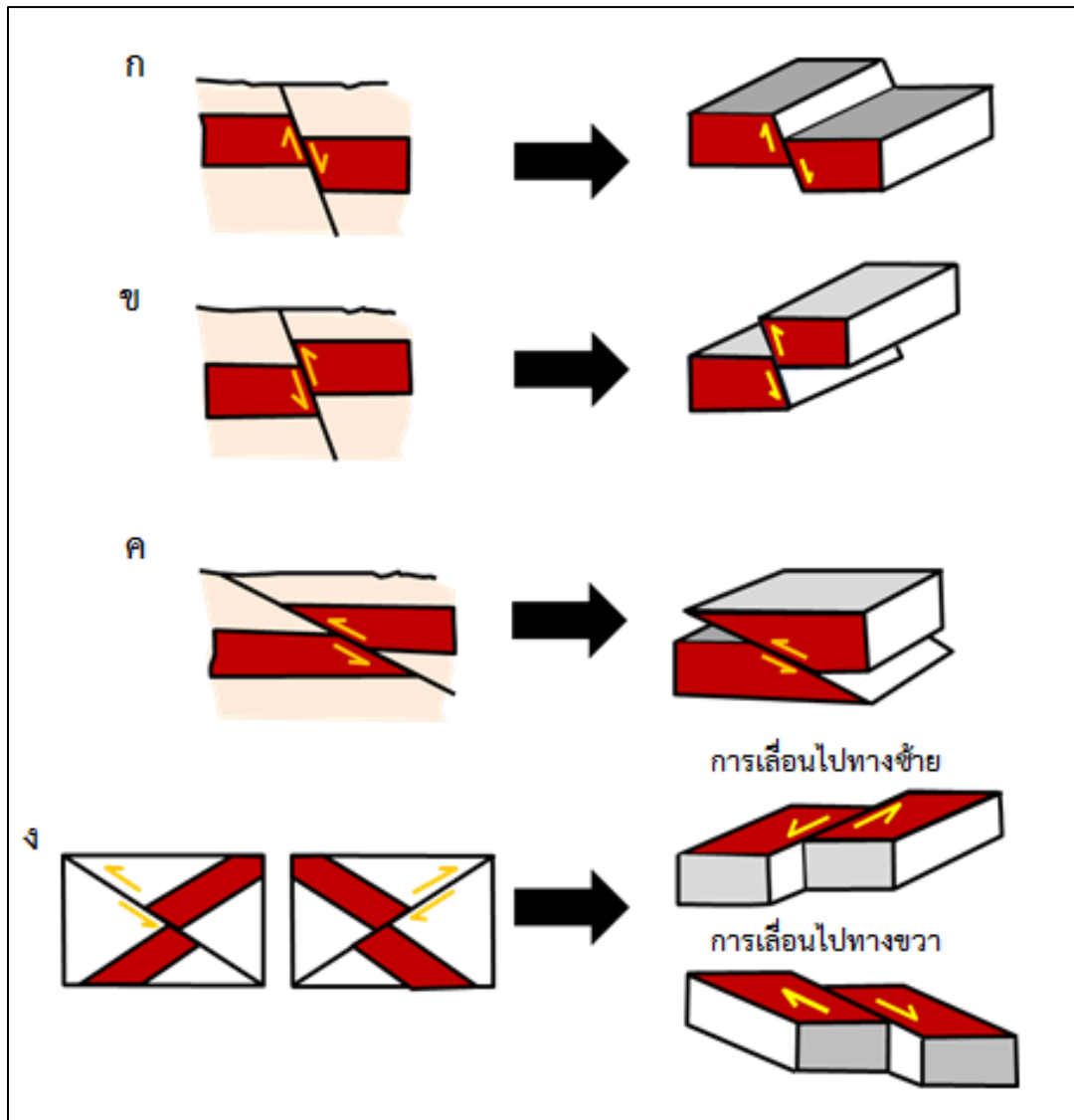
ภาพประกอบ 1.5 (ก) รอยแยกไม่มีระบบ (ข) รอยแยกที่มีระบบ

รอยแตก (Fractures) หรือรอยแตกเฉือน (Shear fractures) เกิดจากรอยเลื่อนขนาดเล็กที่มีการเลื่อนออกจากกันตามแนวขนานในระนาบรอยแตกโดยถูกแรงเฉือนของความเค้นมากกระทำ ส่งผลทำให้หินมีรูปแบบการแตกออกเป็นลักษณะแบบเฉือน (Sliding shear fractures) ตามภาพประกอบ 1.6ก หรือแบบฉีก (Tearing shear fractures) ที่ตามภาพประกอบ 1.6ข เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเฉือนหรือบิดในระนาบรอยแตก ทำให้มีลักษณะผิวรอยครูด (Slicken line) หรือรอยไถล (Slickenside) บางกรณีอาจไม่ปรากฏร่องรอยถูกครูด เนื่องจากอาจมีการเกิดรอยแตกซ้ำจากรอยเดิม ดังนั้นรอยแตกจึงใช้บ่งบอกถึงกลุ่มของรอยแยก (Joints) แบบรวมๆ ไม่สามารถระบุทิศทางและไม่พบการเลื่อน (Offset) ด้วยตาเปล่า



ภาพประกอบ 1.6 (ก) โครงสร้างของรอยแตกที่ถูกรวมแรงเฉือนมากทำให้เกิดการเลื่อนออกจากกัน ลักษณะแบบเฉือน (ข) การเลื่อนออกจากกันลักษณะแบบฉีก

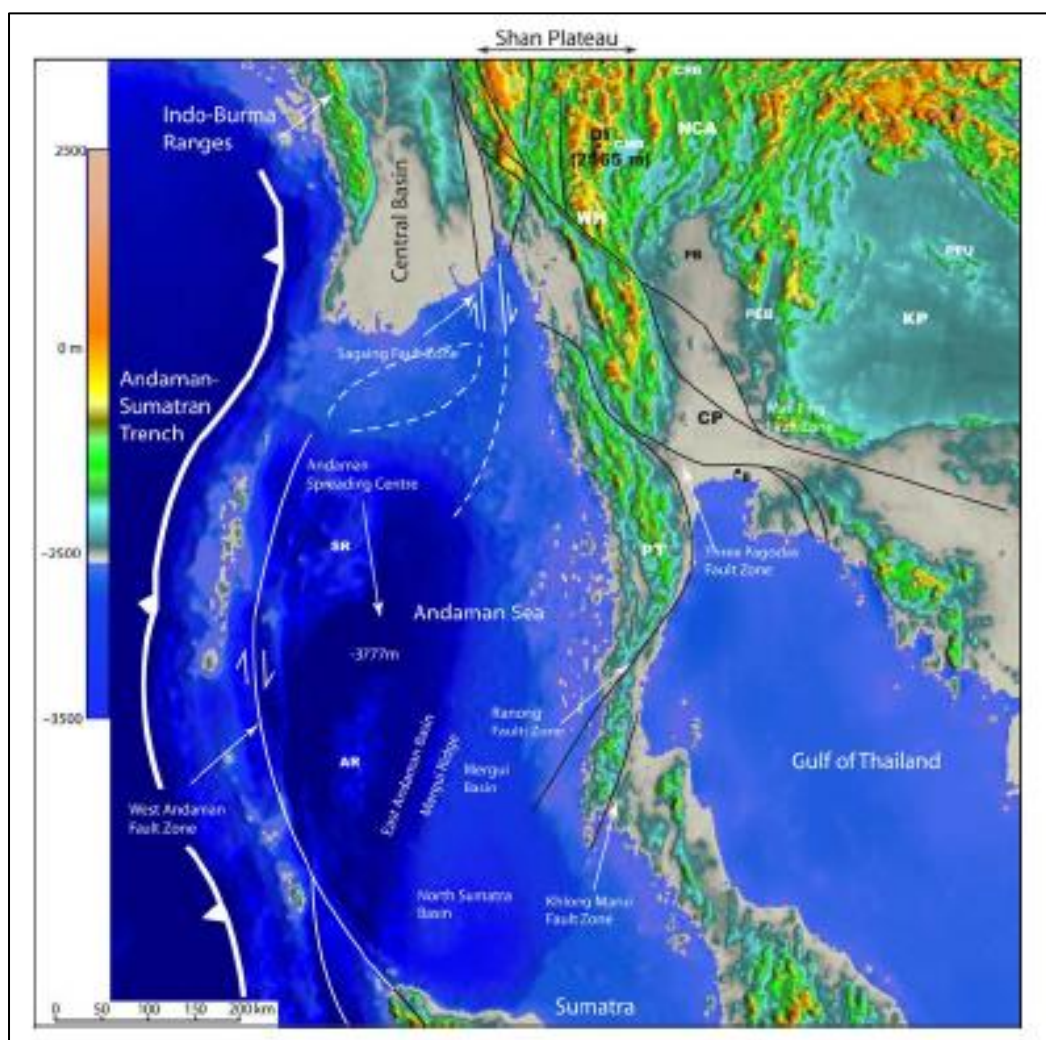
รอยเลื่อน (Faults) เป็นโครงสร้างการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในสภาพเปราะ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หินได้รับแรงจากภายนอกมาก (แรงเฉือน) ส่งผลทำให้รอยแตกของหินอยู่ในรูปแบบเฉือนหรือแบบฉีก สามารถบ่งชี้ขอบเขตการแตกหักของหินที่ปรากฏอยู่ในแนวการแตกและการเลื่อนขาดออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นหลักฐานที่แสดงถึงความไม่ต่อเนื่องของหินและสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า อิทธิพลของการเลื่อนตัวออกจากกันก่อให้เกิดกลไกการเลื่อนไถลหรือรอยครูดที่มีลักษณะรอยสัมผัสระหว่างหิน และการแตกหักบดอัดที่เกิดจากการแตกหัก (Fracturing and cataclasis mechanisms) เป็นก้อนขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ปะปนกันอยู่ในระนาบของรอยแตก รอยเลื่อนพบได้ทั้งขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่ อาจพบความยาวได้ถึง 1,000 กิโลเมตร โดยมีระยะการเลื่อน (Offset) ประมาณหลักร้อยกิโลเมตร โดยทั่วไปรอยเลื่อนสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ รอยเลื่อนปกติ (Normal Fault), รอยเลื่อนย้อน (Reverse fault), รอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault) และรอยเลื่อนแนวระดับ (Strike-slip fault) ตามภาพประกอบ 1.7 พบมากในโครงสร้างการแปรสัณฐาน (Tectonic structures) เช่น หินที่เกิดการโค้ง หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่มาจากผลของแรงกระทำ



ภาพประกอบ 1.7 แสดง (ก) รอยเลื่อนปกติ (ข) รอยเลื่อนย้อน (ค) รอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (ง) รอยเลื่อนแนวระดับเคลื่อนตัวไปทางซ้ายและทางขวา

### 1.2.5.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างของภาคใต้

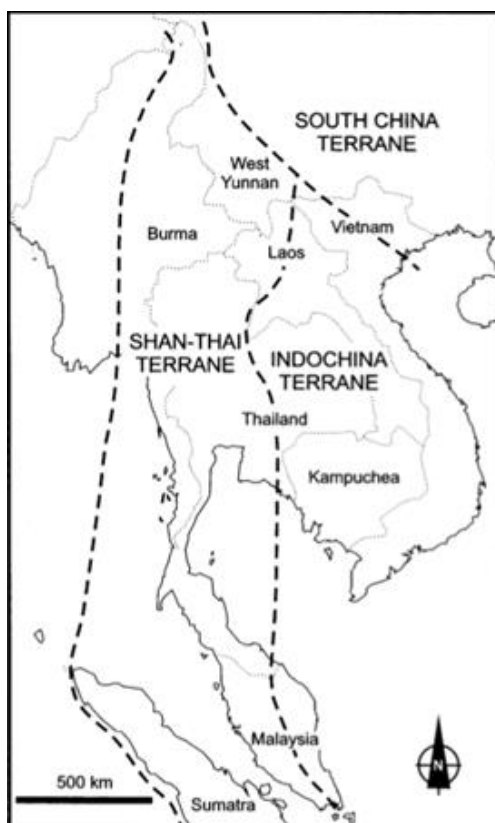
แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศไทยบริเวณภาคใต้พบว่าโครงสร้างรอยเลื่อนมีพลังขนาดใหญ่ประกอบด้วย 2 กลุ่ม ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาไปทางตอนเหนือด้วยระยะทางประมาณ 400 กิโลเมตร ได้แก่ รอยเลื่อนระนอง และรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย ซึ่งทั้ง 2 รอยเลื่อนมีพลังขนาดใหญ่นี้วางตัวในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) ตามภาพประกอบ 1.8 และยังมีรอยเลื่อนย่อยที่มีขนาดเล็กขนานไปกับทิศทางรอยเลื่อนหลักอีกมากมาย มีลักษณะเกิดเป็นรอยแตกกลุ่มเป็นส่วนๆ ในแนวเดียวกัน



ภาพประกอบ 1.8 แสดงรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยที่มีการวางตัวในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ (ที่มา: Morley et al., 2011)

เมื่อพิจารณาถึงแรงที่มากกระทำให้เกิดสภาพธรณีวิทยาโครงสร้างหลักของประเทศ ไทย โดยอ้างอิงถึงทฤษฎีของ Huchon, 1994 และ Polachan, 1991 นำไปประยุกต์ใช้การอธิบาย ที่มาของทิศทางรอยเลื่อน และสามารถอธิบายแรงที่มากกระทำจากทฤษฎีของห้องทดลองศัลยกรรมศาสตร์ (Rock mechanic lab) เพื่อจำลองการเกิดรอยแตกของหินเมื่อมีแรงมากกระทำ ซึ่งอธิบาย ได้ดังนี้

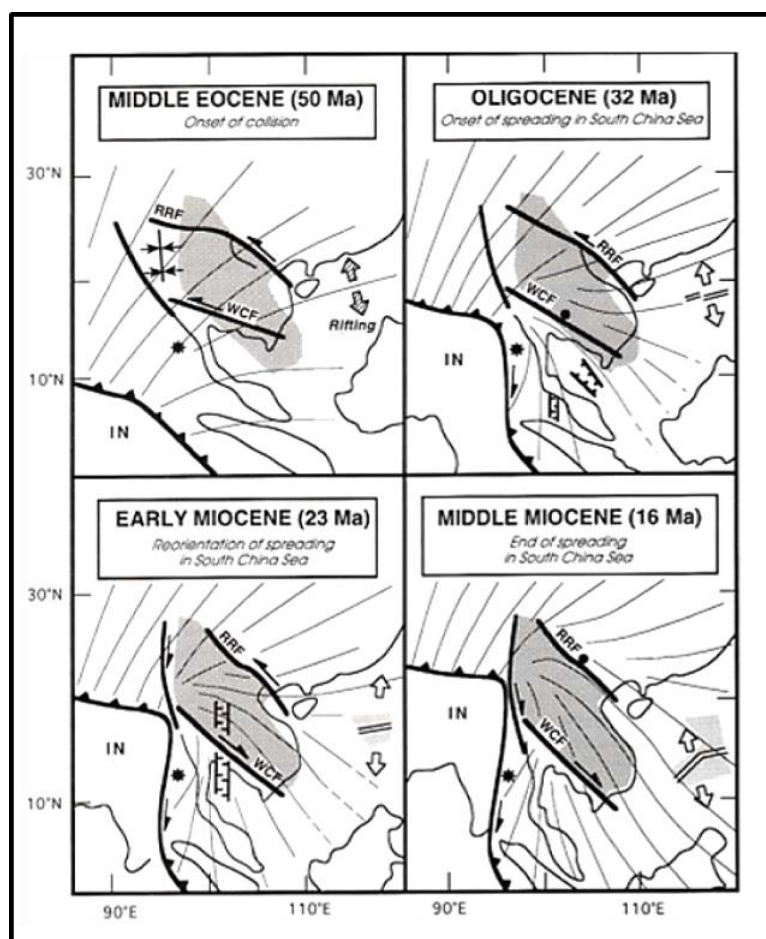
เมื่อ 50 ล้านปีก่อน ช่วงกลางสมัยอีโอซีน (Middle Eocene epoch) ในยุค เทอร์เทียรี (Tertiary period) เกิดการชนและผลัดออกจากกันระหว่างแผ่นเปลือกโลก 2 แผ่น คือ แผ่นทวีปออสเตรเลีย (Australia plate) ที่รองรับทวีปออสเตรเลียและประเทศอินเดียซึ่งเป็นส่วน หนึ่งของแผ่นอนุทวีปอินเดีย (Indian subcontinent) และแผ่นทวีปยูเรเชีย (Eurasian plate) ที่ รองรับทวีปเอเชียและทวีปยุโรปซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของประเทศไทยประกอบด้วยแผ่นอนุทวีปย่อยอีก 2 ส่วน คือ แผ่นอนุทวีปอินโดจีน (Indochina block, INC) อยู่ทางทิศตะวันออก และแผ่นอนุทวีป ฉานไทย (Shan-Thai block, STB) อยู่ทางทิศตะวันตก ตามภาพประกอบ 1.9



ภาพประกอบ 1.9 แผนที่ประเทศไทยที่เป็นส่วนหนึ่งของแผ่นทวีปยูเรเชีย ประกอบด้วยแผ่นอนุ ทวีปอินโดจีน, แผ่นอนุทวีปฉานไทย และแผ่นอนุทวีปจีนใต้ (ที่มา: Zhu, 2017)

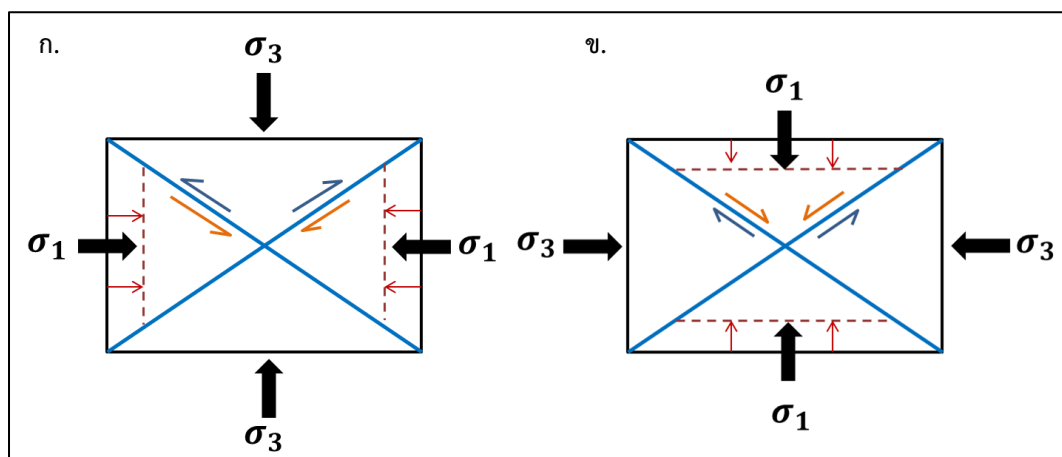


ผลจากการชนกันของแผ่นทวีปก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปยูเรเชียจากซีกโลกใต้ไปยังซีกโลกเหนือก่อนไปทางตะวันออกและหมุนตามเข็มนาฬิกาอย่างช้าๆ จากนั้นยังมีผลก่อให้เกิดการกระตุ้นของแผ่นอนุทวีปอินโดจีนและแผ่นอนุทวีปฉานไทยเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อของแผ่นอนุทวีปจีนใต้ (South China block, SCB) ตามภาพประกอบ 1.10 ซึ่งอยู่ทางทิศเหนือทำให้เกิดรอยเลื่อนแม่น้ำแดง (Red river fault) ที่วางตัวอยู่ในแนวทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) เกิดการเคลื่อนที่ไปทางซ้าย (Left-lateral strike slip fault) เนื่องจากแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_1$ ) ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก และแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_3$ ) มีแนวตั้งฉากกับแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_1$ ) ทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ จึงทำให้อรอยเลื่อนในประเทศไทยที่วางตัวอยู่ในแนวทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) เคลื่อนที่ไปทางซ้ายจนสิ้นสุดจนถึง 32 ล้านปี



ภาพประกอบ 1.10 การเคลื่อนที่ชนกันระหว่างแผ่นทวีปออสเตรเลียและแผ่นทวีปยูเรเชียก่อให้เกิดรอยเลื่อนแม่น้ำแดงและรอยเลื่อนวังเจ้า (ที่มา: Huchon et al., 1994)

ช่วงเริ่มต้นสมัยไมโอซีน (Early Miocene epoch) อายุ 23 ล้านปี จนถึงช่วงกลางสมัยไมโอซีน (Middle Miocene epoch) ที่มีอายุ 16 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน แผ่นอนุทวีปอินเดียยังคงมีการชนขึ้นไปด้านบนและผลักออกจนกระทั่งแผ่นทวีปยูเรเชียไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ ทำให้แรงกระทำเกิดการย้อนกลับลงมายังแผ่นทวีปที่เป็นส่วนของประเทศไทยไปยังทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางเหนือและหมุนตามทวนเข็มนาฬิกา ก่อให้เกิดแรงที่มากกระทำย้อนกลับบนรอยเลื่อนวังเจ้า (Wang Chao Fault, WCF) และรอยเลื่อนแม่น้ำแดงที่วางตัวอยู่ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) เกิดการเคลื่อนที่กลับทิศของรอยเลื่อนไปทางขวา (Right-lateral strike slip fault) เนื่องจากแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_1$ ) ทางด้านทิศเหนือและทิศใต้ และแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_3$ ) มีแนวตั้งฉากกับแรงที่มากกระทำ ( $\sigma_1$ ) ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ทำให้รอยเลื่อนในประเทศไทยที่มีการวางตัวอยู่ 2 ทิศทาง ได้แก่ รอยเลื่อนที่วางตัวอยู่ในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) เคลื่อนที่ไปทางซ้าย (Left-lateral strike slip fault) มาจนถึงปัจจุบันตามภาพประกอบ 1.11ก และทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) มีการเคลื่อนที่ไปทางขวา (Right-lateral strike slip fault) ตามตามภาพประกอบ 1.11ข รวมถึงรอยเลื่อนย่อย, รอยแตก (Fracture) หรือแนวแยก (Joint)



ภาพประกอบ 1.11 (ก) รอยเลื่อนเกิดการเลื่อนไปทางซ้ายด้วยแรงที่มากกระทำในช่วง 50 - 32 ล้านปี (ข) รอยเลื่อนเกิดการเลื่อนไปทางขวาด้วยแรงที่มากกระทำในช่วง 23 - 16 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน

### 1.2.6 ธรณีวิทยาของภาคใต้

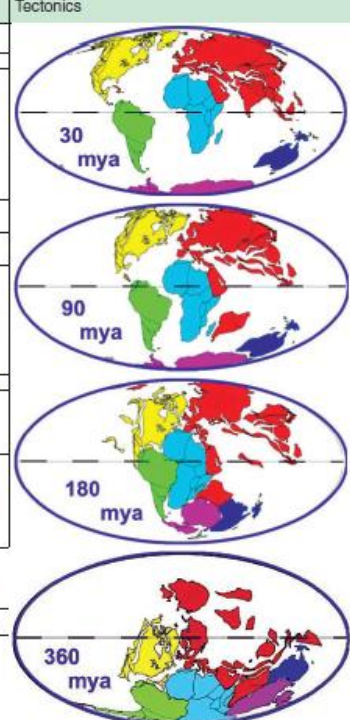
กรมทรัพยากรธรณี, 2550 ได้กล่าวว่าภาคใต้เป็นพื้นที่สะสมตัวของชั้นหินตั้งแต่มหายุคพรีแคมเบรียน (Precambrian era) ซึ่งประกอบด้วยหินไนต์และหินไมกาชีสต์ และจัดเป็นมหายุคเริ่มแรกสุดของโลก (4,550 ล้านปี) จนถึงตะกอนยุคควอเทอร์นารี (Quaternary period) ที่มีอายุ 1.6 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน ต่อมามหายุคพรีแคมเบรียนในช่วง 570 – 286 ล้านปีก่อนจัดเป็นมหายุคพาลีโอโซอิก (Paleozoic era) ที่เริ่มตั้งแต่ยุคแคมเบรียน (Cambrian period; C) จนถึงยุคเพอร์เมียน (Permian period; P) มีหมวดหินประกอบด้วยหินทราย, หินดินดาน, หินดินดานปนกรวด และหินปูนสลับกับหินทรายแป้ง

ถัดจากมหายุคพาลีโอโซอิกเป็นมหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic era) อยู่ในช่วงของ 245 – 144 ล้านปีก่อน เริ่มตั้งแต่ยุคไทรแอสซิก (Triassic period; TR) จนถึงยุคครีเทเชียส (Cretaceous period, K) ซึ่งหมวดหินยุคไทรแอสซิกพบบริเวณจังหวัดสงขลาและมีการกระจายตัวอย่างกว้างขวางที่ประกอบด้วยหินทรายสีน้ำตาลแดง, หินทรายเนื้อละเอียดสลับกับหินทรายแป้ง, หินกรวดมน, และหินดินดาน ต่อมาช่วงของ 66 ล้านปีก่อนจนถึงปัจจุบันเป็นมหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic era) ที่ประกอบด้วยหินยุคเทอร์เชียรี (Tertiary period; T) ตามภาพประกอบ 1.12 (e.g. Hogervorst *et. al.*, 2009) ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ตามแอ่งต่างๆ ตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรีลงไปจนถึงจังหวัดสงขลา ซึ่งประกอบด้วยหินกรวดมน, หินทรายสีแดงและเทา, หินโคลน, หินปูน, หินดินดานปนทราย, และชั้นถ่านหิน ส่วนยุคควอเทอร์นารี (Q) เป็นช่วงเวลาที่มีการผุพังของชั้นหินอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการทับถมตะกอนของชั้นทรายและกรวดจึงเป็นชั้นตะกอนร่วนที่ปกคลุมอยู่พื้นที่มากกว่าร้อยละ 40 ของภาคใต้ทั้งหมด ที่เกิดจากการกระทำของกระแสน้ำชายฝั่งทะเล หรือแม่น้ำ แบ่งออกเป็น

1. ตะกอนตะพักกลุ่มน้ำ (Terrace deposits, Qt) เกิดจากทางน้ำพัดพาตะกอนมาสะสมตัวเป็นตะพักยกระดับขึ้นมา เช่น ทราย, ทรายแป้ง, ดินลูกรัง และกรวด
2. ตะกอนชายหาด (Recent beach deposits, Qb) เกิดจากคลื่นชายฝั่งพัดพาตะกอนมาสะสมตัวตามแนวชายหาด เช่น ทรายหรือทรายแก้ว และกรวดปนทราย
3. ตะกอนดินโคลนป่าชายเลน (Tidal flat deposits, Qtf) เกิดจากการสะสมตัวจากอิทธิพลกระแสน้ำขึ้นและลงของน้ำทะเล ขณะน้ำทะเลขึ้นจะนำเอาตะกอนป่าชายเลน ไม่ว่าจะ เป็น

ตะกอนใต้น้ำ หรือตะกอนสันดอนทรายขึ้นมาไว้สะสมด้วยกัน เช่น โคลน, ทราย, ทรายแป้ง, ทรายเลน, และเศษไม้

4. ตะกอนน้ำพา (Alluvial deposits, Qa) เกิดจากทางน้ำพัดพาตะกอนมาสะสมตัวตามร่องน้ำ และแอ่งน้ำท่วมถึงในบริเวณที่ราบลุ่ม เช่น กรวด, ทราย, ทรายแป้ง, ดินเหนียว และโคลน
5. ตะกอนในที่ลุ่มแม่น้ำ (Lagoon deposits, Qlg) เป็นตะกอนที่อยู่บริเวณพื้นที่ลุ่มที่มาจาก ตะกอนตามหนอง, ทะเลสาบ หรือบึง สะสมตัวเป็นตะกอนทรายสลับดินเหนียว และกรวด
6. ตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนหินผุ (Colluvial and residual deposits, Qc) เกิดจาก ตะกอนที่เคลื่อนที่ตามไหล่เขามาสะสมตัวบริเวณเชิงเขา ลักษณะของตะกอนอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหินต้นกำเนิดที่จะให้ตะกอนเหล่านั้นในแต่ละบริเวณ อาจพบโครงสร้างของหินเดิมบ้าง เช่น กรวด, ทราย, ทรายแป้ง, ดินเหนียว และศิลาแลง

Eon	Era	Period	Epoch	Time	Life	Tectonics	
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Holocene	0.01	Homo sapiens		
			Pleistocene	1.6	Homo erectus		
		Neogene	Pliocene	5.3	hominins		
			Tertiary	Miocene	24		apes
				Oligocene	37		primates
		Paleogene	Eocene	58	major mammal diversification		
			Paleocene		66		end of dinosaurs
		Mesozoic	Cretaceous		144		early birds dinosaurs
			Jurassic		208		
	Triassic			245	early mammals amniotes		
	Paleozoic	Permian		286	tetrapods		
		Carboniferous		360	Acanthostega		
		Devonian		408	Eusthenopteron		
		Silurian		438			
		Ordovician		505			
		Cambrian		570			
	Pre-cambrian	Proterozoic		2500			
		Archean		3800			
Hadean			4550				

ภาพประกอบ 1.12 มาตราทางธรณีกาล (ที่มา: Hogervorst et. al., 2009)

### 1.2.7 อุทกธรณีวิทยา

แหล่งน้ำเป็นระบบนิเวศที่มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ พืชและสัตว์ ทั้งทางด้านระบบนิเวศและการอนุรักษ์ธรรมชาติ เศรษฐกิจ หรือการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การอุปโภคบริโภค การเพาะปลูก เลี้ยงสัตว์ ผลิตพืชอาหาร สัตว์ หรืออุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นโลกของเราจำเป็นต้องมีระบบการหมุนเวียนและเปลี่ยนแปลง ระหว่างโมเลกุลของน้ำจากผิวโลกสู่บรรยากาศตลอดเวลา ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, 2546 ได้กล่าวถึง วัฏจักรของน้ำที่ก่อกำเนิดแหล่งน้ำและน้ำใต้ดิน เริ่มต้นจากมหาสมุทร ทะเล แม่น้ำลำธาร รวมถึง การคายน้ำของพืช (Transpiration) ซึ่งได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์จนเกิดการระเหย (Evaporation) เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ จากนั้นไอน้ำจะจับและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จนก่อให้เกิดก้อนเมฆ เมื่อก้อนเมฆมีรูปร่างขนาดใหญ่และหนักมากขึ้น การเคลื่อนที่ของก้อนเมฆจะลอยต่ำใกล้ผิวโลกจนเกิดกระบวนการควบแน่น (Condensation process) และกลั่นตัว (Precipitation) กลายเป็นหยดน้ำตกลงมาสู่พื้นดิน เช่น น้ำฝน, หิมะ, ลูกเห็บ, หรือน้ำค้าง ฝนที่ตกลงสู่พื้นดินในบางส่วนอาจไหลตามหน้าผาดินลงสู่แม่น้ำ, ลำธาร หรือทะเล และบางส่วนอาจแทรกซึมลงสู่ชั้นรอยแตกของหินหรือดิน เพื่อกักเก็บเป็นน้ำใต้ดิน และน้ำบาดาล แต่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อน้ำใต้ดินจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลซึมลงดิน เช่น ช่วงเวลาที่มี ฝนตก (Time) ถ้าช่วงเวลาที่มีฝนตกสั้นจะมีผลต่อปริมาณการไหลของน้ำซึมผ่านลงดินค่อนข้างต่ำ และซึมลงได้น้อย แต่ถ้าฝนตกเป็นเวลานานและเบาๆ อัตราการไหลซึมจะมีมากกว่า ส่วนความลาดชันของพื้นที่ (Slope) ถ้าพื้นที่มีความลาดชันมากจะทำให้น้ำไหลไปบนผิวดินมากกว่าแทรกซึมลงสู่ ภายใต้ผิวดิน หากมีความพรุนของหินและดินมาก (Porosity) จะส่งผลต่อปริมาณของน้ำแทรกตัวอยู่ มาก ดังนั้นการอัตราการไหลและการกักเก็บน้ำจะทำได้ค่อนข้างรวดเร็ว นอกจากนี้ความสามารถใน การยอมให้น้ำไหลผ่านของวัตถุ (Permeability) ยังสัมพันธ์กับค่าความพรุนของชั้นหินและดินที่ ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างและความต่อเนื่องระหว่างช่องว่าง

ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, 2546 ยังได้กล่าวถึง หินแกรนิตจัดอยู่ในกลุ่มชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer properties) ประเภทหินแข็ง (Consolidated rocks) ที่มีคุณสมบัติช่วยกักเก็บน้ำบาดาล ที่ขึ้นอยู่กัช่องว่าง (Interstices) ในหิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ช่องว่างปฐมภูมิ (Original interstices) เป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กับกระบวนการเกิดหิน
2. ช่องว่างทุติยภูมิ (Secondary interstices) เป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการเกิดหิน หรือช่องว่างปฐมภูมิ เช่น รอยแตก (Fractures) หรือแนวแยก (Joints) เป็นต้น

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินและบริเวณที่คาดว่ามียอยแตกในชั้นหินแข็งจากข้อมูลธรณีฟิสิกส์ เพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการเจาะบ่อน้ำบาดาล

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาด้วยวิธีการสำรวจธรณีวิทยาและบริเวณที่คาดว่ามียอยแตกในชั้นหินแข็งจากข้อมูลธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีการสำรวจธรณีวิทยาการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท เพื่อระบุทิศทางรอยแยกของหิน
2. งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เพื่อบ่งชี้ตำแหน่งของรอยแยก
3. งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อกำหนดขอบเขตชั้นน้ำบาดาลและความต่อเนื่องของโครงสร้างชั้นใต้ดิน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

1. ทำให้ทราบโครงสร้างทางธรณีวิทยาในบริเวณพื้นที่ศึกษาเพื่อระบุขอบเขตของการขุดเจาะน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ด้านอุปโภคและบริโภคได้
2. โครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยาที่ซับซ้อนในพื้นที่ การประยุกต์ใช้วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ, การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท และเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินจะช่วยให้ข้อมูลบริเวณที่มีรอยแตกในชั้นหินแข็ง และสามารถระบุทิศทางการวางตัวของรอยแยกได้ เพื่อให้การเจาะน้ำบาดาลได้น้ำตามที่ต้องการ

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

#### 2.1 ระเบียบวิธีธรณีฟิสิกส์

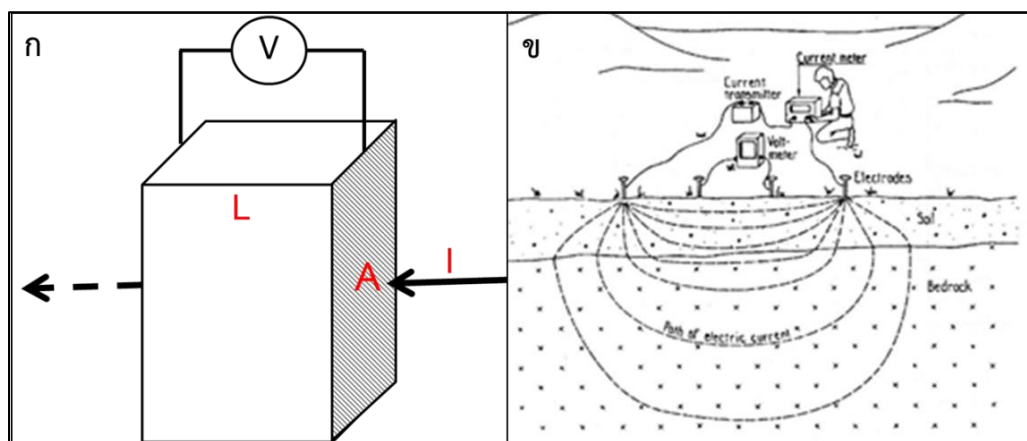
##### 2.1.1 การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity survey) เป็นการสำรวจทางโครงสร้างธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยใช้หลักการทางทฤษฎีไฟฟ้า (Electrical theory) จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ภายใต้เงื่อนไขวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Isotropic materials) ตามภาพประกอบ 2.1ก เมื่อนำหลักการดังกล่าวนี้มาใช้เชิงประยุกต์เพื่ออธิบายภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Anisotropic materials) เช่น ขอบเขตการวางตัวของชั้นหินที่ไม่ต่อเนื่อง, การจำแนกลักษณะคุณสมบัติที่มีค่าเฉพาะของวัสดุ (Physical property of materials) เพื่อบ่งชี้ชั้นหินและดิน เป็นต้น ดังนั้นลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่มีการวางตัวของชั้นหินที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Isotropic of rock) และที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Anisotropic of rock) จึงเป็นส่วนสำคัญต่อการบ่งชี้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า (Electric field,  $E$ ) ความหนาแน่นกระแส (Current density,  $J$ ) และความแตกต่างของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ )

หลักการตรวจวัดทั่วไปด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity measurement) เป็นพื้นฐานของการตรวจวัดในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-current) โดยใช้แท่งอิเล็กโทรด (Electrodes) จำนวนสองคู่ประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electrodes, AB) และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrodes, MN) บนพื้นผิวดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตามความเหมาะสม และระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อระดับความลึกเช่นกัน ดังนั้นการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทำได้โดยปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric current,  $I$ ) ลงสู่ภายใต้ชั้นผิวดิน เมื่อกระแสไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีค่าเฉพาะจะเกิดการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Difference of voltage,  $\Delta V$ ) ที่ผิวดินได้ เนื่องจากไอออนหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่รวมตัวกันจะเกิดการเคลื่อนที่ไปตาม



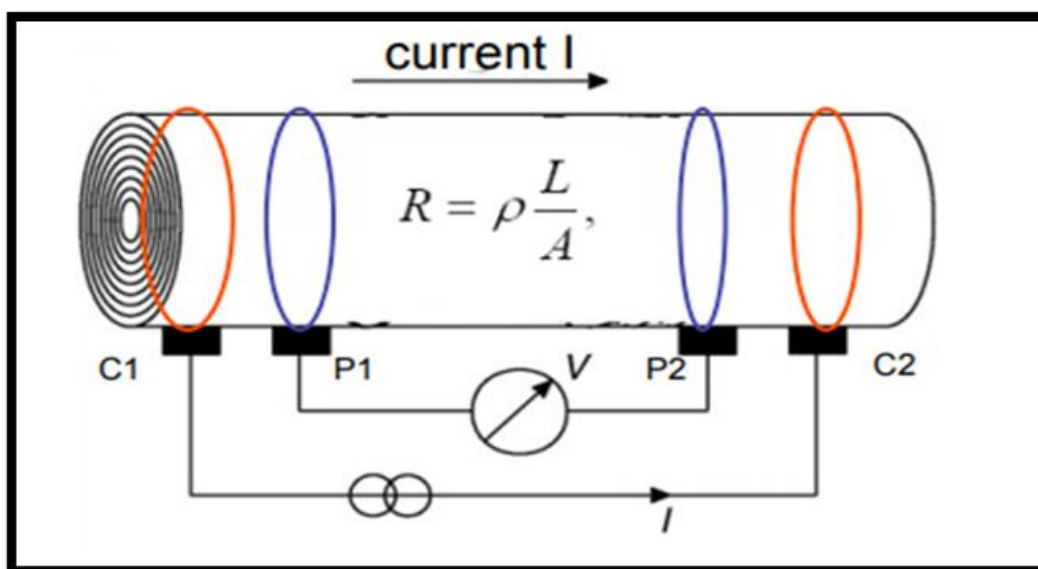
แร่ประกอบหิน ช่องว่างหรือรอยแตก ค่าที่วัดได้จากบริเวณพื้นที่สำรวจจะถูกบันทึกข้อมูลในรูปแบบค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) ที่ขึ้นอยู่กับตามลำดับของชั้นความลึก ดังนั้นค่าความต้านทานที่ได้รับจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) ที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบระยะห่างระหว่างการวางขั้วไฟฟ้า (Geometrical factor, K) ได้ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (Apparent resistivity,  $\rho_a$ ) ของวัสดุที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏดังกล่าวจะสามารถนำมาจำแนกขอบเขตความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องของชั้นหินและยังบ่งชี้ลักษณะคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ภายใต้ผิวดินตามภาพประกอบ 2.1x โดยอ้างอิงจากสภาพทางธรณีวิทยาในบริเวณพื้นที่สำรวจ ดังนั้นกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่าลักษณะทางโครงสร้างชั้นใต้ดินเป็นชั้นหินแข็งหรือหินแกรนิตที่มีลักษณะคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulation) ส่วนใหญ่โครงสร้างของหินแกรนิตในธรรมชาติมักพบรอยแยก (Joints) หรือรอยแตก (Fractures) ดังนั้นหินแกรนิตที่มีรอยแตกเป็นจำนวนมากจะแสดงถึงความพรุน (Porosity) ในหินที่มากตามด้วย ซึ่งวัสดุขนาดเล็กและน้ำจากธรรมชาติจะมีผลต่อความสามารถในการแทรกซึมลงสู่ชั้นใต้ดินตามรอยแตกได้ ทำให้การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้มีค่าลดลงตามลำดับ



ภาพประกอบ 2.1 (ก) กรณีที่กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปยังวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ข) กรณีที่กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปยังวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (ที่มา: Dahlin T., 2001)

### 2.1.2 กฎของโอห์ม

หลักการทางทฤษฎีไฟฟ้าสามารถอธิบายการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) จากการประยุกต์ใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) โดยปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric current,  $I$ ) เคลื่อนที่ผ่านตามวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential difference,  $\Delta V$ ) ที่เกิดขึ้น โดยค่าที่ถูkBันทึกจะแสดงอยู่ในรูปของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance,  $R$ ) ที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 1 (e.g. Muhammad, 2016) และตามภาพประกอบ 2.2



ภาพประกอบ 2.2 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุทรงกระบอกที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ที่มา: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/20-3-resistance-and-resistivity/>)

ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของวัตถุทรงกระบอกที่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้างกล่าวจะแปรผันตรงกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ต่อความยาว ( $L$ ) ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถจัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity,  $\sigma$ ) ได้ตามสมการที่ 2 (e.g. Herman, 2001) ดังต่อไปนี้

กฎของโอห์ม;  $\Delta V = IR$  ..... (1)

กฎของโอห์มประยุกต์ร่วมกับวัสดุ;

$$R = \rho L / A$$

$$\therefore \rho = 1/\sigma = RA/L \quad \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ  $R$  เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ )

$I$  เป็นกระแสไฟฟ้า (A)

$\Delta V$  เป็นค่าความต่างของศักย์ไฟฟ้า (V)

$L$  เป็นความยาวของทรงกระบอก (m)

$A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอก ( $m^2$ )

$\rho$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ( $\Omega \cdot m$ )

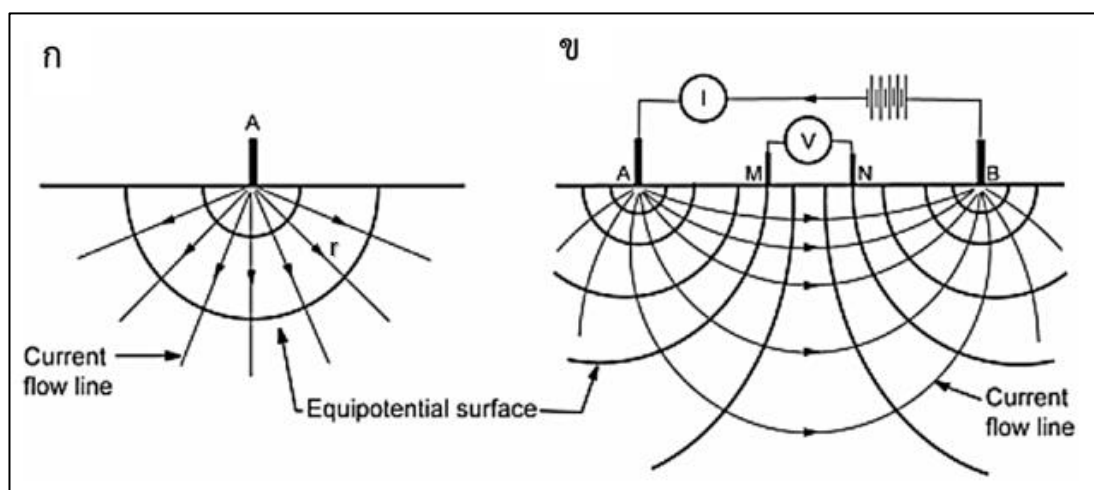
$\sigma$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

### 2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในหินแกรนิต

การกำเนิดของหินหรือวัฏจักรหินตามกระบวนการที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเป็นกลไกหลักสำคัญที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาและชนิดของหินที่มีความแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น หินที่ถูกกักต้อนและผุพังจากกระแสลมหรือน้ำ, การทับถมของตะกอนตามกาลเวลา หรือการแปรสภาพของหินภายใต้ความลึกที่เกิดจากอุณหภูมิและความดัน เป็นต้น ซึ่งกลไกเหล่านี้ทำให้เกิดลำดับโครงสร้างของชั้นหิน, ชนิด และเนื้อหินที่แตกต่างกันตามกาลเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ในเขตสภาพอากาศร้อนชื้นแถบเส้นศูนย์สูตร จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการผุพังของหินแกรนิตค่อนข้างรุนแรงและรวดเร็ว กรณีหินแกรนิตที่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูง ส่วนหินแกรนิตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะมีปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของรอยแตกหรือความกว้างของช่องว่างจากน้อยไปหามาก ส่งผลทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงตามลำดับ เนื่องจากรอยแตกเป็นช่องว่างที่ทำให้ของเหลว (Fluid), อากาศ (Air) หรือวัสดุขนาดเล็ก (Grains) สามารถแทรกตัวเข้ามาในเนื้อหินได้ ดังนั้นหินแกรนิตที่มีความถี่ของรอยแตกเป็นจำนวนมากจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดีกว่าหินแกรนิตที่มีรอยแตกจำนวนน้อย

### 2.1.4 ศักย์ไฟฟ้าที่จุดกำเนิดบนผิวดิน

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance,  $R$ ) เกิดขึ้นจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาของหินที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ภายใต้ผิวดิน ทำได้โดยปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric current,  $I$ ) ลงสู่ดิน และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential difference,  $\Delta V$ ) บนผิวดิน เมื่อนำหลักการดังกล่าวมาพิจารณาภายใต้เงื่อนไขข้อข้างกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งแห่งปักลงสู่บนผิวดิน พบว่ากระแสไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อน (Current flow line) ลงสู่ภายใต้ผิวดินและเกิดทิศทางการไหลกระจายออกเป็นลักษณะรูปครึ่งทรงกลมในทิศทางอย่างสม่ำเสมอ โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากับ  $r$  และมีพื้นผิวเท่ากับ  $2\pi r^2$  ซึ่งทุกจุดบนผิวจะมีศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันและตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า ผิวสมศักย์ (Equipotential surface) ตามสมการที่ 3 และภาพประกอบ 2.3ก และ 2.3ข ดังนี้



ภาพประกอบ 2.3 (ก) แนวการเคลื่อนที่ลักษณะรูปครึ่งทรงกลมบนแห่งอิเล็กโทรด (ข) แนวการเคลื่อนที่ลักษณะรูปครึ่งทรงกลมบนชุดแห่งอิเล็กโทรด (ที่มา Jamaluddin and Emi, 2018)

ดังนั้นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจึงสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแส (Current density,  $J_r$ ) ค่าสนามไฟฟ้า (Electric field,  $E_r$ ) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) ซึ่งมีค่าแปรผกผันกับค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity,  $\sigma$ ) จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าที่ระยะทางใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 5 ได้ดังนี้

สมการความหนาแน่นของกระแสบนผิวดิน  $J_r = I/2\pi r^2 \dots \dots \dots (3)$

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า  $E_r = \rho J_r = J/\sigma \dots \dots \dots (4)$

สมการค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V_r = \int_r^\infty E_r dr = \rho I/2\pi r \dots \dots \dots (5)$

เมื่อ  $J_r$  เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ )

$I$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้า (A)

$r$  เป็นระยะทางจากจุดศูนย์กลาง (m)

$E_r$  เป็นค่าสนามไฟฟ้า (V/m)

$V_r$  เป็นค่าศักย์ไฟฟ้า (V)

$\rho$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ( $\Omega \cdot m$ )

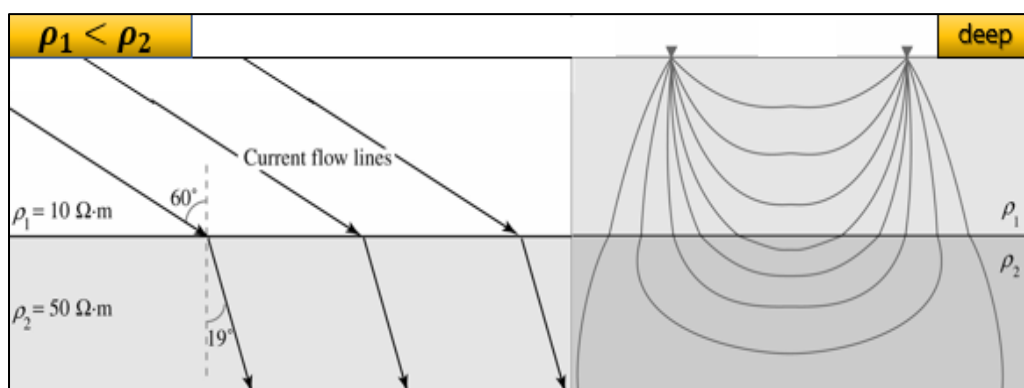
$\sigma$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

### 2.1.5 การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าตามระดับความลึก

การตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทำได้โดยปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric current,  $I$ ) ลงสู่ภายใต้ผิวดินตามลำดับ ก่อให้เกิดแนวการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (Current flow lines) มาสัมผัสบริเวณผิวย่อยต่อของชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกัน ดังนั้นแนวการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการหักเหออกจากเส้นปกติและมีเส้นสนามห่างออกจากกัน ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าชั้นรอยต่อที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่างกันเป็นไปตามสมการที่ 6

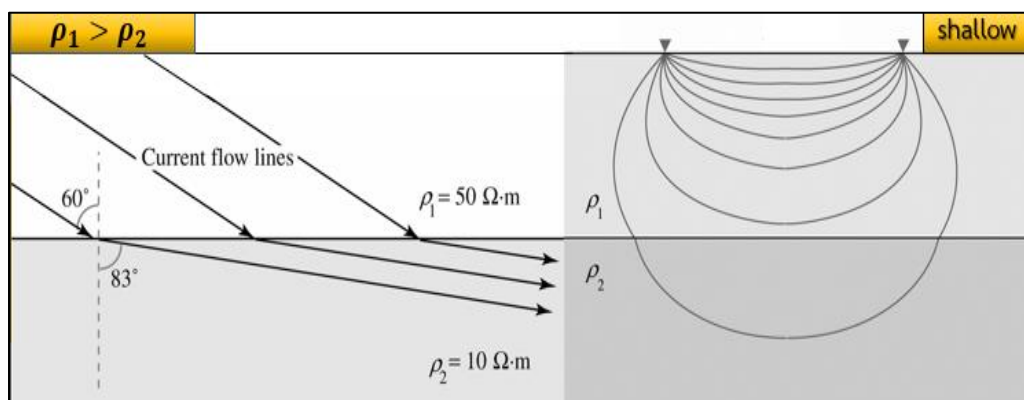
$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \dots \dots \dots (6)$$

กรณี  $\rho_1 < \rho_2$  ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าแสดงได้ตามภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยเข้าสู่ชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามาก (ที่มา: <https://www.scribd.com/presentation/296356816/12-Resistivity>)

กรณี  $\rho_1 > \rho_2$  ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากเข้าสู่ชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเกิดการหักเหออกจากเส้นปกติและมีเส้นสนามอยู่ชิดกันมาก ส่งผลให้แนวการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเบนเข้าใกล้ผิวรอยต่อของชั้นดินตามภาพประกอบ 2.5



ภาพประกอบ 2.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากเข้าสู่ชั้นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย (ที่มา: <https://www.scribd.com/presentation/296356816/12-Resistivity>)

### 2.1.6 หลักการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในชั้นวัสดุภายใต้ผิวดิน

ลักษณะโครงสร้างภายใต้ผิวดินในธรรมชาติพบว่ามีรอยต่อของชั้นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ทิศทางคือ แนวตั้ง (Transverse) และแนวขนานกับพื้นดิน (Longitudinal) ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) ที่อยู่ในรูปอัตราส่วนของค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity,  $\sigma$ ) จึงมีความสัมพันธ์ต่อค่าสนามไฟฟ้า (Electric field,  $E$ ) และค่าความหนาแน่นกระแส (Current density,  $J$ ) ที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าเป็นปริมาณสเกลาร์ตามสมการที่ 7 เมื่อนำค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสมากำหนดบนแกน  $x, y$  และ  $z$  ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ในรูปแบบปริมาณเวกเตอร์ตามสมการที่ 8 จากสมการดังกล่าวสามารถนำมาจัดการอยู่ในรูปของระบบเมทริกซ์ (Matrix system) ของค่าสภาพการนำไฟฟ้า และเป็นเมทริกซ์จัตุรัส (Square matrix) มิติ 3x3 แปลงเป็นเมทริกซ์สมมาตร (Symmetric matrix) ที่มีสมาชิก  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  ตามสมการที่ 9 (Greenhalgh *et. al.*, 2009) โดยค่าสภาพการนำไฟฟ้าสามารถแสดงในรูปแบบของเทนเซอร์ (Conductivity tensor,  $\sigma_{ij}$ ) ที่มีผลต่อตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Isotropic medium) และแตกต่างกัน (Anisotropic medium) ดังนี้

$$J = \sigma E^T \dots \dots \dots (7)$$

$$J_i = \sum_j^{x,y,z} \sigma_{ij} E_j \dots \dots \dots (8)$$

$$\sigma = \sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

โดยที่  $J$  เป็นค่าความหนาแน่นกระแส (A/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้า (S/m)

$\sigma_{ij}$  เป็นเทนเซอร์ของค่าสภาพการนำไฟฟ้าบนแกน  $x, y$  และ  $z$  (S/m)

$E$  เป็นค่าสนามไฟฟ้า (V/m)

$E_j$  เป็นปริมาณเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (V/m)

$T$  เป็นทรานส์โพสของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางเดียวกันกับเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันบนแกน  $o-xyz$  ตามภาพประกอบ 2.6ก และ 2.6ข สามารถนำมาอธิบายตามสมการที่ 10 แต่ในกรณีตัวกลางที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าจากตัวกลางหนึ่งเลื่อนออกไปยังตัวกลางใหม่ และมีความสอดคล้องกับเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสที่จุดใหม่ตามสมการที่ 11, 12 และ 13 (e.g. Yang and Qin, 2020) ตามภาพประกอบ 2.6ค ดังนี้

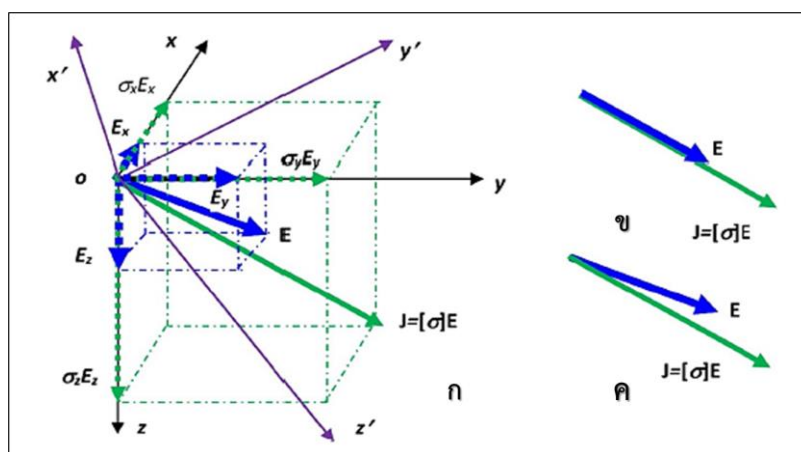
ตัวกลางที่เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน  $J_x = \sigma E_x, J_y = \sigma E_y, J_z = \sigma E_z \dots \dots \dots (10)$

ตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน  $J_x = \sigma_{xx}E_x + \sigma_{xy}E_y + \sigma_{xz}E_z \dots \dots \dots (11)$

$J_y = \sigma_{yx}E_x + \sigma_{yy}E_y + \sigma_{yz}E_z \dots \dots \dots (12)$

$J_z = \sigma_{zx}E_x + \sigma_{zy}E_y + \sigma_{zz}E_z \dots \dots \dots (13)$

โดยที่  $J$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสบนแกน  $x, y, z$   
 $\sigma$  เป็นปริมาณเวกเตอร์สภาพการนำไฟฟ้าบนแกน  $x, y, z$   
 $E$  เป็นปริมาณเวกเตอร์สนามไฟฟ้าบนแกน  $x, y, z$



ภาพประกอบ 2.6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสและเวกเตอร์สนามไฟฟ้าใน (ข) ตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน และ (ค) ตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ระบบพิกัดในเส้นลูกศรดำคือต้นแบบ (original coordinate system  $o-xyz$ ) และระบบพิกัดในเส้นลูกศรสีม่วงคือระบบพิกัดใหม่ (New coordinate system  $o-x'y'z'$ ) (ที่มา: Yang and Qin, 2020)

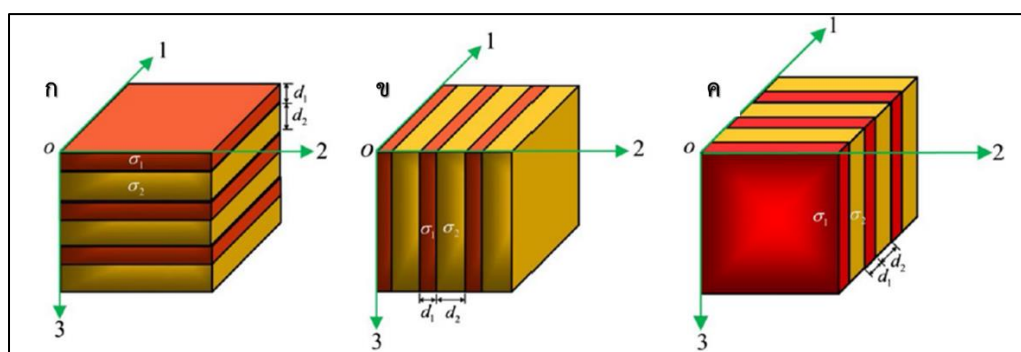


ดังนั้นเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) บนแกน  $o-xyz$  สามารถเปลี่ยนฐานของปริภูมิเวกเตอร์เป็นเมทริกซ์ของการแปลงเชิงเส้น (Matrix of linear transform) ที่อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ทแยง (Diagonal matrix) ประกอบด้วยสมาชิกทางแนวเฉียง (Diagonal element) ที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 ส่วนนอกแนวทแยง (Off-diagonal element) จะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 14 ดังต่อไปนี้

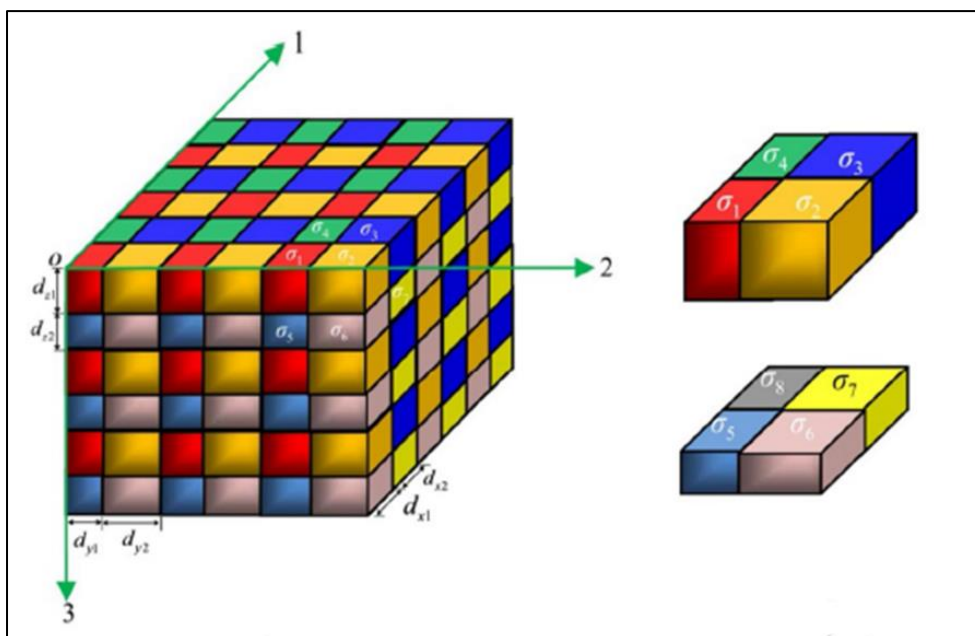
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (14)$$

### 2.1.7 แบบจำลองทางเรขาคณิตด้วยเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้า

ค่าที่ได้จากการตรวจวัดภายใต้ผิวดินสามารถนำมาสร้างแบบจำลองต่างๆ ทางเรขาคณิตที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าบนแกน  $o-xyz$  โดยให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดบนวัสดุเนื้อเดียวกันให้ขึ้นอยู่กับแกนใดแกนหนึ่ง และตั้งฉากกับวัสดุที่ความแตกต่างกัน ส่งผลทำให้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำสุด จึงสามารถนำมาสร้างแบบจำลองต่างๆ ในรูปแบบระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่แทรกสลับกันในรูปของหน่วยเซลล์หรือที่เรียกว่า “Electrical macroscopic anisotropy” ตามภาพประกอบ 2.7 แต่ถ้าค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันในหลายทิศทาง แสดงว่าระบบผลึกนั้น มีอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแตกต่างกันแทรกสลับกันหรือที่เรียกว่า “Electrical microscopic anisotropy” ตามภาพประกอบ 2.8 (e.g. Yang and Qin, 2020) ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2.7 แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างในระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บนแกน 1, 2, 3 ใน (ก) Horizontal transverse isotropy (ข) และ (ค) Vertical transverse isotropy (ที่มา: Yang and Qin, 2020)



ภาพประกอบ 2.8 แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างในระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดเล็กบนแกน 1, 2, 3 (ที่มา: Yang and Qin, 2020)

การศึกษาของงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากระบบผลึกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ในหน่วยเซลล์ที่มีวัสดุที่เป็นเนื้อเดียววางตัวตามแนวตั้งแทรกสลับในทิศทางตามยาว ( $\sigma''$ ) เมื่อพิจารณารูปแบบของระบบผลึกที่มีทิศทางเปลี่ยนแปลงบนแกนใดแกนหนึ่งของแกน 1, 2, 3 สามารถสร้างแบบจำลองได้จากเมทริกซ์ทแยง (Diagonal matrix) ให้เป็นแบบจำลองทางเรขาคณิตประกอบด้วย 3 แบบ ได้แก่ Horizontal transverse isotropy, HTI ที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแนวแกน 3 ตามภาพประกอบ 2.7ก, Vertical transverse isotropy, VTI ที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแนวแกน 2 ตามภาพประกอบ 2.7ข และ Vertical transverse isotropy ที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแนวแกน 1 ตามภาพประกอบ 2.7ค โดยที่  $\sigma_{11} = \sigma_{22} \neq \sigma_{33}$  จากสมการที่ 14 สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 15, 16 และ 17 ดังนี้

Horizontal transverse isotropy 
$$\sigma' = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (15)$$

Vertical transverse isotropy 
$$\sigma'' = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{33} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{11} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (16)$$

Vertical transverse isotropy

$$\sigma''' = \begin{pmatrix} \sigma_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{11} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (17)$$

### 2.1.8 เทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าร่วมกับการหมุนของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

วัสดุที่มีการสูญเสียรูปจากภาพประกอบ 2.6 (แกนเส้นสีม่วง) ส่งผลให้ทิศทางมีการเปลี่ยนแปลงจากแกน  $xyz$  (Original coordinate system,  $o-xyz$ ) ไปยังตามแกน  $x'y'z'$  (New coordinate system,  $o-x'y'z'$ ) ทำให้เวกเตอร์สภาพการนำไฟฟ้าบนแกน  $o-x'y'z'$  มีการเลื่อนร่วมกับการหมุนแบบออยเลอร์ (Euler angle) เกิดความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสระหว่างแกน  $xyz$  ไปยังแกน  $x'y'z'$  ตามสมการที่ 18 และ 19 และเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าที่จุดใหม่ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณเทนเซอร์อันดับสอง (Second rank tensor) บนแกน  $x'y'z'$  ที่มีความสมมาตรในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system)

สำหรับเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า เมื่อนำมาพิจารณาบนแกนหลัก (Fixed frame) หรือ  $o-xyz$  วัสดุที่มีการสูญเสียรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงระบบพิกัดโดยการเลื่อนออกตามระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) โดยให้แกนสมมุติ ณ เวลา  $t = t_0$  ใดๆ ประกอบด้วยการวัดระยะทางใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกันบนแกน  $o-xyz$  (Original coordinate system,  $o-xyz$ ) มีจุดกำเนิดคือ  $o$  ของระบบแกนหลัก ดังนั้นวัสดุที่มีการสูญเสียรูปจะใช้วิธีการเลื่อน (Moving frame) ซึ่งทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิสระพร้อมๆ กัน และร่วมกับวิธีการหมุน (Translating and co-rotating) จากแกน  $o-x'y'z'$  ไปยัง  $o-xyz$  เพื่อให้สอดคล้องกับแนวเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าภายใต้ผิวดิน ดังนั้นวิธีการเลื่อนร่วมกับการหมุนสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแนวเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าภายใต้ผิวดิน และจุดวัดค่าความต่างศักย์บนผิวดินได้

$$E' = RE \dots \dots \dots (18)$$

โดยที่

$$R = \begin{pmatrix} \alpha_{x'ix} & \alpha_{x'iy} & \alpha_{x'iz} \\ \alpha_{y'ix} & \alpha_{y'iy} & \alpha_{y'iz} \\ \alpha_{z'ix} & \alpha_{z'iy} & \alpha_{z'iz} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (19)$$

เมื่อ  $R$  เป็นการเลื่อนและหมุน ( $i = x', y', z'$  และ  $j = x, y, z$ )

$E$  เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแกน  $xyz$

$E'$  เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแกน  $x'y'z'$

$\alpha$  เป็นฟังก์ชันโคไซน์ระหว่าง  $i$  และ  $j$

แต่วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้ผิวดินนั้นจะใช้แท่งอิเล็กโทรดปักที่ผิวดิน จึงทำให้แนวการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปยังตำแหน่งใหม่ โดยใช้วิธีการหมุนกลับไปยังแกน  $y$  ที่มีความสอดคล้องกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal conductivity,  $L$ ) เช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างมุม ( $\alpha$ ) จากแกน  $y'$  ไปยังแกน  $y$  ในรูปของทรานส์โพสระบบเมทริกซ์ ( $R^T$ ) ของฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine of the angle) โดย  $\alpha_{ij}$  ( $i = x', y', z'$  และ  $j = x, y, z$ ) ได้ตามสมการที่ 20 และมีความสอดคล้องค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามแนวยาวที่มีทิศทางขนานกับระนาบรอยแยกของหิน (Strike direction) ดังนั้นเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าที่จุดใหม่สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าอันดับสอง ( $\bar{\sigma}$ ) ได้ในระบบพิกัด  $o-xyz$  ตามสมการที่ 21 ดังนี้

$$E = R^{-1}E' = R^T E' \dots \dots \dots (20)$$

$$\bar{\sigma} = R\sigma R^T \dots \dots \dots (21)$$

Greenhalgh *et al.*, 2009 ได้กล่าวถึงสมาชิกของเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับมุม ( $\alpha$ ) ที่มีการเลื่อนและหมุนระหว่างแกน  $o-x'y'z'$  กับ  $o-xyz$  ในฟังก์ชันโคไซน์ โดยที่  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_L$  และ  $\sigma_{33} = \sigma_T$  ดังต่อไปนี้

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_L \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \phi_0 + \sigma_L \sin^2 \phi_0 + \sigma_T \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \phi_0 \\ 0.5(-\sigma_L + \sigma_T) \sin^2 \alpha_0 \sin 2\phi_0 \\ 0.5(-\sigma_L + \sigma_T) \cos \phi_0 \sin 2\alpha_0 \\ (-\sigma_L + \sigma_T) \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \phi_0 + \sigma_L \\ 0.5(-\sigma_L + \sigma_T) \sin \phi_0 \sin 2\alpha_0 \\ \sigma_L \sin^2 \phi_0 + \sigma_T \cos^2 \alpha_0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (22)$$

กรณีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีผลทำให้เทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้ากลายเป็น  $\sigma_L = \sigma_T = \sigma$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_L \cos^2 \phi_0 + \sigma_T \sin^2 \alpha_0 \\ \sigma_L \\ \sigma_L \sin^2 \alpha_0 + \sigma_T \cos^2 \alpha_0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (23)$$

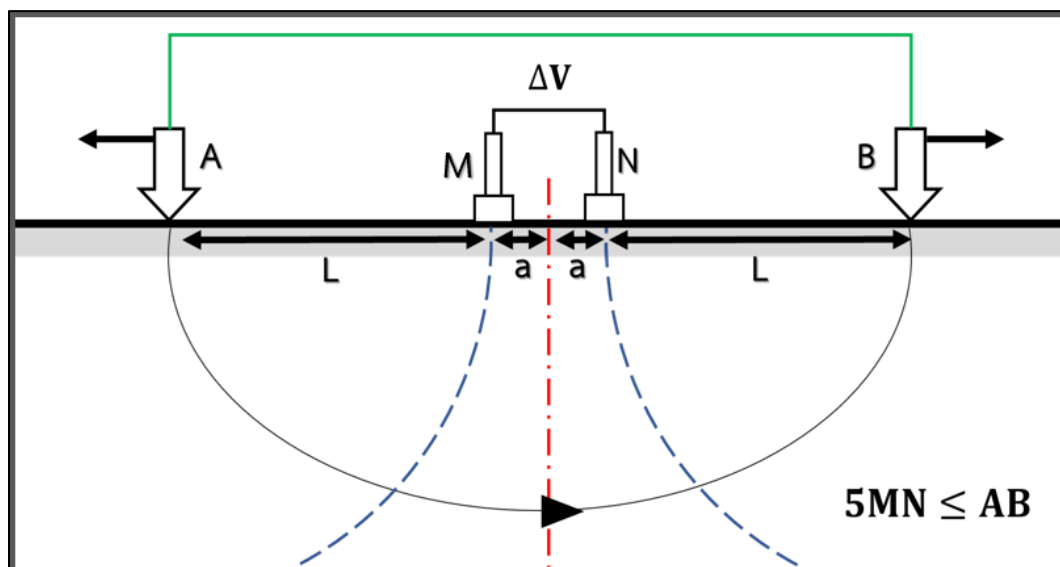
### 2.1.9 การวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทจะใช้วิธีการวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger array) เป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามความลึก โดยการปักแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electrodes, AB) ไว้ด้านนอก และวางแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrodes, MN) ไว้ด้านใน โดยระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านนอกและด้านในจะมีค่าประมาณ  $5MN \leq AB$  ตามภาพประกอบ 2.9 ทำได้โดยปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electric current, I) ลงสู่ภายใต้ผิวดิน และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential difference,  $\Delta V$ ) บนผิวดินที่มีความสอดคล้องกับสมการที่ 5 นำมาเขียนความสัมพันธ์ใหม่เพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามสมการที่ 24, 25 และ 26 (e.g. Jamaluddin and Umar, 2018; Attwa and Ali, 2018) ดังต่อไปนี้

$$\Delta V = V_M - V_N \dots \dots \dots (24)$$

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad , \quad V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \dots \dots \dots (25)$$

$$\therefore \Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \dots \dots \dots (26)$$



ภาพประกอบ 2.9 การวางขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์

ค่าที่วัดได้จากตรวจวัดของบริเวณพื้นจะถูกบันทึกข้อมูลในรูปแบบค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance,  $R$ ) ที่ขึ้นอยู่กับตามลำดับของชั้นความลึก ดังนั้นค่าความต้านทานที่ได้รับจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) ตามสมการที่ 27 ที่ขึ้นอยู่กับค่าการออกแบบระยะห่างระหว่างการวางขั้วไฟฟ้า (Geometrical factor,  $K$ ) ได้ ตามสมการที่ 28 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (Apparent resistivity,  $\rho_a$ ) ตามสมการที่ 29 (e.g. Constable *et. al.*, 1984) ของวัสดุที่มีความแตกต่างกันตามตารางที่ 2.1

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \dots \dots \dots (27)$$

$$K = \left[ \left( \frac{1}{L_A - a_M} - \frac{1}{L_M + a_B} \right) - \left( \frac{1}{L_A + a_N} - \frac{1}{L_N - a_B} \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[ \frac{4a}{L^2 - a^2} \right]^{-1} \dots \dots \dots (28)$$

$$\rho_a = \frac{\pi(L^2 - a^2)}{2a} \left( \frac{\Delta V_{MN}}{I} \right) \dots \dots \dots (29)$$

เมื่อ  $\rho_a$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ ( $\Omega \cdot m$ )

$a$  เป็นระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของขั้วศักย์ไฟฟ้า MN (m)

$L$  เป็นระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า AB และขั้วศักย์ไฟฟ้า MN (m)

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและวัสดุทางธรรมชาติ

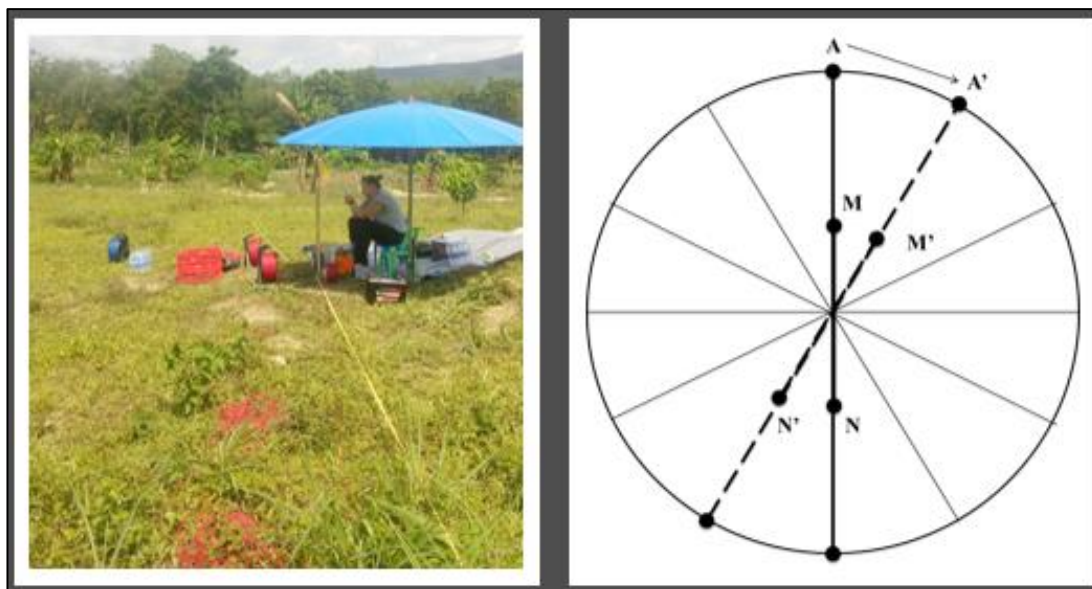
Materials	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )
<i>Igneous and metamorphic rocks</i>	
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basalt	$10^3 - 10^6$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$
<i>Sedimentary rocks</i>	
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$
<i>Soils and water</i>	
Clay	1-100
Alluvium	10-800
Groundwater (fresh)	10-100
Saltwater	<1

(ที่มา: Attwa, M. and Ali, H., 2018)

### 2.1.10 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท (Azimuthal resistivity) จะใช้หลักการการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามาอธิบายการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้วัสดุของ Tilted transversely isotropic ที่มีการสูญเสียรูปด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบยังลิคในแนวตั้ง (Vertical electrical sounding, VES) ที่มีรูปแบบ 1 มิติ (Dahlin T., 2001) ในโครงสร้างของหินแกรนิตที่มีรอยแตก และออกแบบการวางขั้วไฟฟ้าโดยหมุนทุกๆ 30 องศา เริ่มวัดตั้งแต่ 0 - 360 องศาตามลำดับ หรือเรียกวิธีนี้ว่าการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูทในรูปแบบ Apparent resistivity ตามภาพประกอบ 2.10 เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแตก (Strike direction) การออกแบบวิธีการวางขั้วไฟฟ้าจะใช้รูปแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger array) โดยปักแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electrodes, AB) ไว้ด้านนอก

และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrodes, MN) ไว้ด้านในลงบนผิวดิน และแนวการวางขั้วไฟฟ้าจะอยู่บนระนาบเดียวกันหรือเป็นเส้นตรงและเคลื่อนออกตามลำดับ



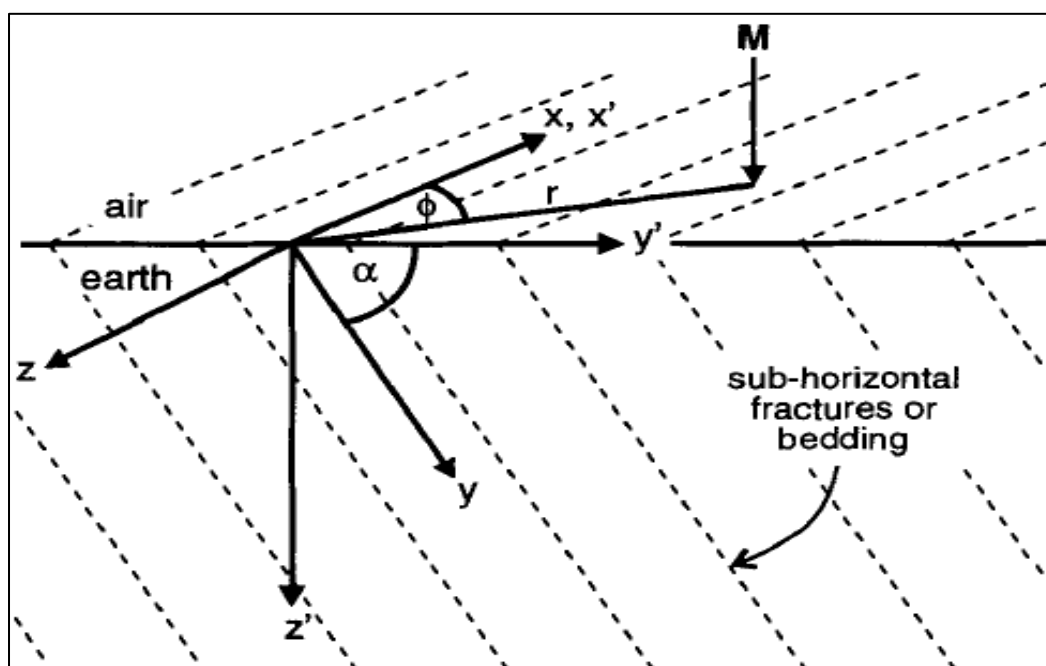
ภาพประกอบ 2.10 วิธีการวางขั้วไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (AB) และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (MN) ร่วมกับการหมุนทุกๆ 30 องศา

กรณีการศึกษาของงานวิจัยนี้มีการพิจารณาวัสดุที่มีความแตกต่างเกิดแรงถูกกระทำก่อให้เกิดการสูญเสียรูปจากแกน  $o-xyz$  เลื่อนไปยัง  $o-x'y'z'$  และเกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแกน  $y'$  ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นดินและอากาศที่มีความสอดคล้องค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal resistivity,  $\rho_L$ ) แต่วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้านั้นจะใช้แท่งอิเล็กโทรดปักที่ผิวดิน จึงทำให้แนวการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนทิศทางผ่านไปยังแกน  $y$  ซึ่งสัมพันธ์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาวที่มีค่าสูงสุดเนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าขนานกับทิศทางของระนาบรอยแยก (Strike direction) ของหิน แต่ไม่ใช่ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวตั้ง (Transverse resistivity,  $\rho_T$ ) จึงเรียกว่า Paradox of anisotropy ดังนั้นมุมที่เกิดการหมุนกลับจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha_{yy}$  ที่อยู่แบบฟังก์ชันโคไซน์มาใช้อธิบายในสมการศักย์ไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ

ผลจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าจึงทำให้แกน M ที่เป็นจุดตรวจวัดจริงเกิดการเลื่อนไปยังแนวแกน  $x$  ที่ทำมุม  $\phi$  ไปยังจุดตรวจวัดสมมุติ เพื่อให้สอดคล้องกับวัสดุที่มีการ



สูญเสีรูป ดังนั้นค่าจากการตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดตามทิศทางขนานกับแนวรอยแยก (Parallel of fracture) ที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal resistivity,  $\rho_L$ ) และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่น้อยสุดตามทิศตั้งฉากกับแนวรอยแยก (Transverse resistivity,  $\rho_T$ ) ตามภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.11 แสดงการเคลื่อนที่ของแนวกระแสไฟฟ้าจากแกน  $y'$  หมุนกลับไปยังแกน  $y$  ในวัสดุที่มีการสูญเสีรูป (ที่มา: Watson and Barker, 1999)

จุดการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนแกน M ที่อยู่ระหว่าง  $x'$  และ  $y'$  ทำให้มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal resistivity,  $\rho_L$ ) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามทิศตั้งฉากกับแนวรอยแยก (Transverse resistivity,  $\rho_T$ ) สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานไฟฟ้า (Mean resistivity) ได้ตามสมการที่ 30 หรือ  $\rho_m = \rho_{x_{app}}$  จากภาพประกอบ 2.11 จึงอนุมานได้ว่าเป็นการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในระบบผลึกอนุภาคขนาดใหญ่ (Electrical macroscopic anisotropy) ซึ่งทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาวแสดงถึงวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่  $\rho_L = \rho_{y_{app}}$  ตามสมการที่ 30 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง (Coefficient of anisotropy,  $\lambda$ ) สามารถนำมาหาอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานไฟฟ้ากับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวยาวตามสมการที่ 31 ซึ่งทำให้ทราบถึงโครงสร้างภายในวัสดุมีความแตกต่างของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกันมากหรือน้อย

Watson and Barker, 1999 ได้อธิบายเกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) ที่เกิดขึ้นนำมาเขียนความสัมพันธ์ใหม่จากสมการที่ 31 เป็นสมการที่ 32 ซึ่งสามารถอธิบายในสมการศักย์ไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันโคไซน์ ( $\alpha_{yy}$ ) ตามสมการที่ 33 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้รับจากการตรวจวัดสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 34

$$\rho_{x_{app}} = \rho_m = \sqrt{\rho_L \rho_T} \quad \text{และ} \quad \rho_{y_{app}} = \rho_L \dots \dots \dots (30)$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_L} = \frac{\rho_{x_{app}}}{\rho_{y_{app}}} = \lambda \dots \dots \dots (31)$$

$$V = \frac{I \rho_m}{2\pi r \lambda} = \frac{I \rho_L}{2\pi r} \dots \dots \dots (32)$$

$$V(r, \alpha) = \frac{I \rho_m}{2\pi r \sqrt{(1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \phi)}} \dots \dots \dots (33)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_m}{\sqrt{(1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \phi)}} \dots \dots \dots (34)$$

เมื่อ  $I$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้า (A)

$V$  เป็นศักย์ไฟฟ้า (V)

$r$  เป็นระยะทางจากตำแหน่งขั้วกระแสไฟฟ้าถึงตำแหน่งวัดศักย์ไฟฟ้า (m)

$\rho_m$  เป็นค่าเฉลี่ยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_L$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามยาวของวัสดุ ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_T$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏตามทิศตั้งฉากกับแนวรอยแยก ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_a$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ ( $\Omega \cdot m$ )

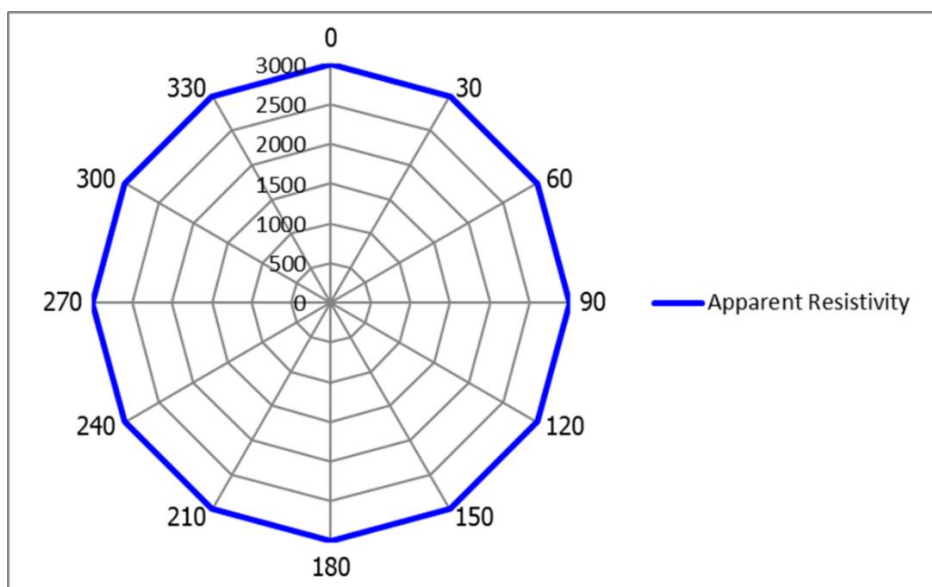
$\lambda$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง

$\rho_{x_{app}}$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนแกน x ( $\Omega \cdot m$ )

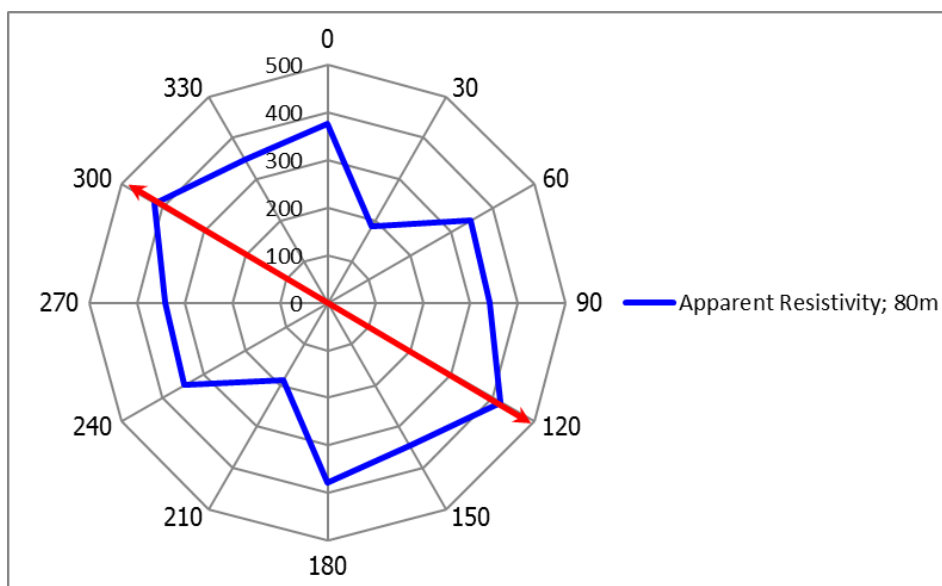
$\rho_{y_{app}}$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนแกน y ( $\Omega \cdot m$ )

### 2.1.11 โพลลาไดอะแกรม

การสร้างโพลลาไดอะแกรม (Polar diagram) ในวิธี Apparent resistivity เป็นการนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ ( $\rho_a$ ) ที่ได้จากการวัดที่ระยะ  $AB/2$  ต่างๆ ของแต่ละทิศทางแนววัดมาพล็อตลงบนโพลลาไดอะแกรม โดยเริ่มวัดตั้งแต่ 0 – 360 องศาเปลี่ยนทิศทางของแนววัดทุกๆ 30 องศาบนรอบจุดศูนย์กลางเดียวกัน หากกระนาบรอยแยกของหิน (Strike direction) ภายใต้อพื้นที่ที่ทำการวัดมีทิศทางขนานกับแกน  $x'$  ค่าสูงสุดของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนแผนภาพโพลลาไดอะแกรมจะสัมพันธ์กับแกนหลักของวงรี (Major axis) ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางรอยแยกของหิน กรณีวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Isotropic medium) ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่เท่ากันตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศา ทำให้รูปแบบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลลาไดอะแกรมมีลักษณะเป็นรูปวงกลมตามภาพประกอบ 2.12 หากตัวกลางที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกัน (Anisotropic medium) จะส่งผลให้โพลลาไดอะแกรมมีลักษณะเป็นวงรีที่มีค่าสูงสุดขนานไปตามกระนาบรอยแยก และค่าลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าได้ผ่านรอยแยกของหินตามภาพประกอบ 2.13 ดังนี้

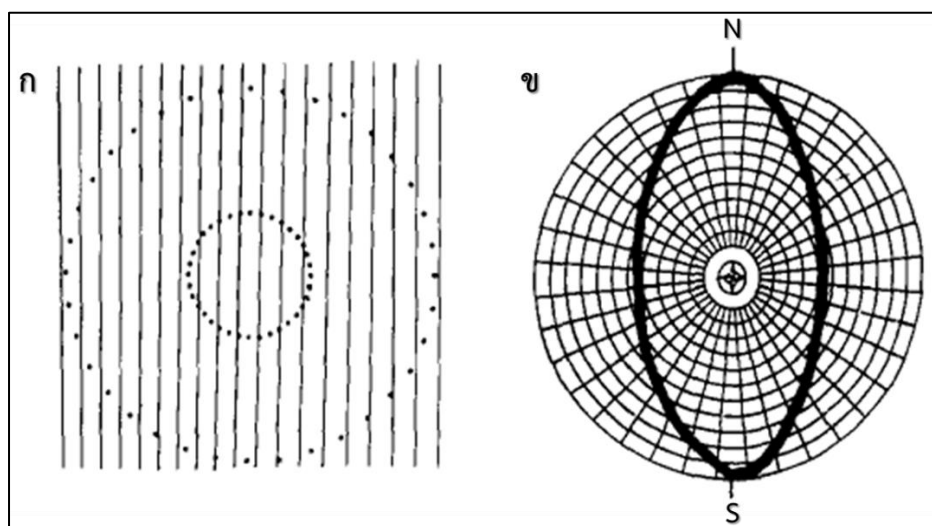


ภาพประกอบ 2.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่เท่ากันตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันบนโพลลาไดอะแกรม

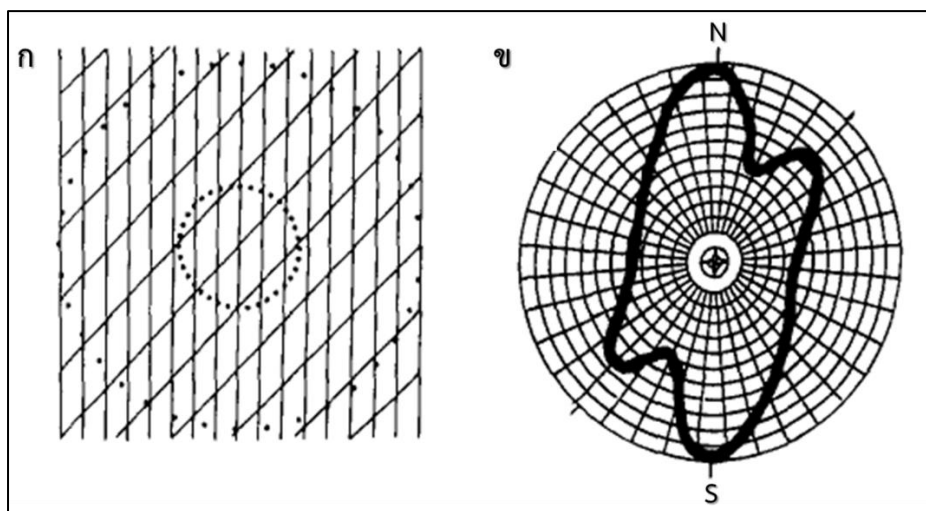


ภาพประกอบ 2.13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่ 300 อนุศา ในตัวกลางไม่เป็นเนื้อเดียวกันบนโพลาไดอะแกรม

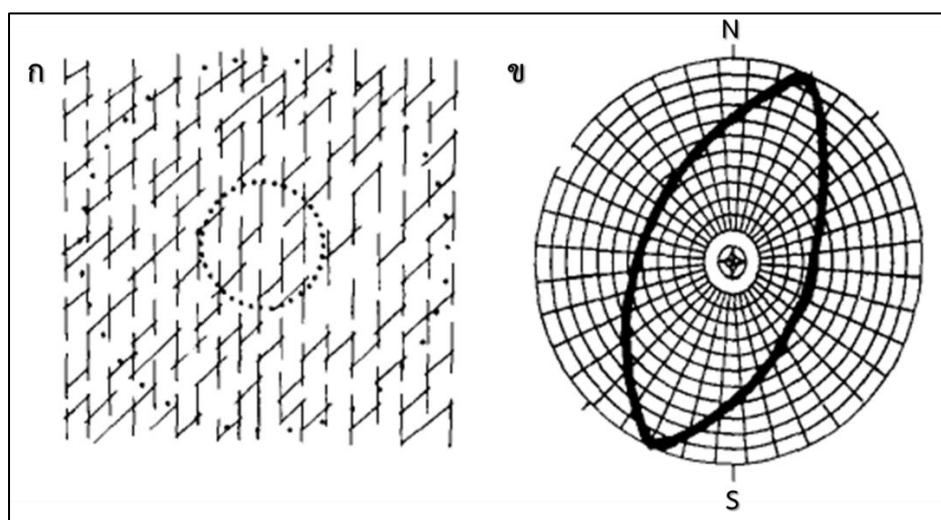
เมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุดบนโพลาไดอะแกรมมาเปรียบเทียบกับลักษณะรอยแยกของหินบนผิวดิน พบว่ามีทิศทางการวางตัวได้หลายแบบ ยกตัวอย่างตามภาพประกอบ 2.14, 2.15 และ 2.16 ดังนี้



ภาพประกอบ 2.14 (ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวกลางเปรียบเทียบกับ (ข) รูปแบบวงรีของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาไดอะแกรม (ที่มา: Taylor and Fleming., 1988.)



ภาพประกอบ 2.15 (ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวอย่าง 2 ทิศทางเปรียบเทียบกับ (ข) รูปของวงรีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาไดอะแกรม (ที่มา: Taylor and Fleming., 1988.)



ภาพประกอบ 2.16 (ก) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแยกในตัวอย่างไม่ต่อเนื่องที่ 0 และ 30 องศาเปรียบเทียบกับ (ข) รูปของวงรีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนโพลาไดอะแกรม (ที่มา: Taylor and Fleming., 1988.)

ข้อมูลจากโพลาไดอะแกรมที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่สูงสุดตามแกนหลัก (Major axis) และมีค่าน้อยสุดตามแกนโท (Minor axis) ของวงรี ซึ่งสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 31 เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าความพรุน (Porosity,  $\phi$ ) ของวัสดุได้ ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามทิศตั้งฉากกับแนวรอยแยก ( $\rho_y$ ) เป็นผลรวมของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ของของไหลที่อยู่ในรอยแตก ( $\rho_0$ ) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในวัสดุ ( $\rho_l$ ) จะมีความสัมพันธ์กับความพรุน ( $\phi$ ) ของหินที่เกิดจากรอยแตกปฐมภูมิของหิน แสดงดังสมการ

$$\rho_y = \rho_0 \phi + (1 - \phi) \rho_l \dots \dots \dots (35)$$

สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวขนานกับรอยแตกในวัสดุ ( $\rho_x$ ) แสดงดังสมการ

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{\phi}{\rho_0} + \frac{(1 - \phi)}{\rho_l} \dots \dots \dots (36)$$

ค่าความพรุน ( $\phi$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของรอยแตกในหินกับปริมาตรทั้งหมดของหินมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวแกน y และกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวแกน x สามารถหาได้จากสมการที่ 35 และ 36 (Taylor and Fleming, 1988) โดยที่  $\rho_0$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่กักเก็บอยู่ในช่องว่างรอยแตกที่สามารถตรวจวัดได้

$$\phi = \frac{\rho_0 \rho_x (\lambda^2 - 1)}{\rho_0^2 + \lambda^2 \rho_x - 2 \rho_0 \rho_x} \dots \dots \dots (37)$$

กรณีน้ำบาดาลแทรกอยู่ในรอยแตกของหิน ดังนั้น  $\rho_0$  คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำบาดาล ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสุดบนแกนหลัก ( $\rho_0 \ll \rho_x$ ) ดังนั้นค่าความพรุนในกรณีนี้เป็นดังสมการที่ 38

$$\phi = \frac{\rho_0 (\lambda^2 - 1)}{\rho_y} \dots \dots \dots (38)$$

เมื่อ  $\rho_0, \rho_x$  และ  $\lambda$  สามารถหาได้จากวงรีของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนแผนภาพโพลาร์ไดอะแกรม และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องที่มีค่ามากจะแสดงถึงภายในเนื้อหินที่มีความแตกต่างกันมาก พิจารณาได้จากหินแกรนิตที่มีความถี่ของรอยแตกหรือความกว้างของช่องว่าง ถ้ามีจำนวนมากจะส่งผลต่อค่าความพรุนของหินสูงด้วยเช่นกัน

### 2.1.12 การวัดค่าความสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

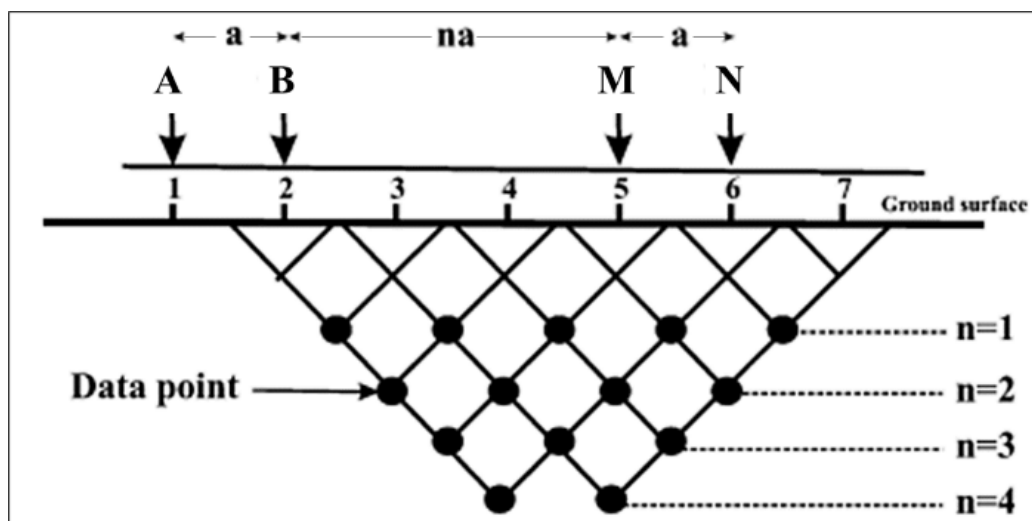
การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ (2D electrical resistivity measurement) เป็นการตรวจวัดทั้งแบบแนวราบและแนวตั้ง โดยใช้ระบบวางขั้วไฟฟ้าแบบหลายขั้ว (Multi-Electrode) ที่มีวิธีออกแบบการวางขั้วไฟฟ้าเป็นไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole array) ตามภาพประกอบ 2.17 เป็นการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวราบ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินในทิศทางแนวตั้งได้ดี การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเกิดจากปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่ภายใต้ผิวดินด้วยการปักแท่งเหล็กหรืออิเล็กโทรดประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electrodes, AB) มีระยะห่าง A และ B เท่ากัน และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrodes, MN) มีระยะห่าง M และ N เท่ากัน แต่ขั้วกระแสไฟฟ้าจะถูกวางแยกออกจากขั้วศักย์ไฟฟ้า และมีจุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแต่ละคู่เท่ากับ  $(n + 1)a$  การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายทำให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) ในแนวราบและแนวตั้ง และการขยายระยะขั้วไฟฟ้ามีผลต่อระยะความลึก ดังนั้นค่าที่ได้รับจากการตรวจวัดสามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity,  $\rho$ ) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Geometrical factor, K) ได้ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (Apparent resistivity,  $\rho_a$ ) ของวัสดุที่มีความแตกต่างกันซึ่งสอดคล้องตามสมการที่ 39 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏดังกล่าวสามารถนำมาจำแนกขอบเขตความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องของชั้นหินและยังบ่งชี้ลักษณะคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ภายใต้ผิวดินตามลำดับ โดยอ้างอิงจากสภาพทางธรณีวิทยาในบริเวณพื้นที่สำรวจ

$$\rho_a = \pi n a (n + 1)(n + 2) \cdot \frac{\Delta v}{I} \dots \dots \dots (39)$$

เมื่อ  $\rho_a$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ ( $\Omega \cdot m$ )

$a$  เป็นระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า AB และขั้วศักย์ไฟฟ้า MN (m)

$n$  เป็น spacing factor



ภาพประกอบ 2.17 แสดงการวางขั้วไฟฟ้าแบบโตโพล-โตโพล (ที่มา: Adepelumi *et. al.*, 2006)

### 2.1.13 การสร้างแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

การสร้างแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในรูปแบบ 2 มิติ เป็นการประมวลผลของข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงข้อมูลเป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามแนวนอน ( $\rho_L$ ) และในแนวตั้ง ( $\rho_T$ ) สามารถจัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามสมการที่ 40 และ 41 ในสมการทางคณิตศาสตร์รูปแบบผกผัน (Inversion) บนพื้นฐานวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares method) สำหรับการสร้างแบบจำลองย้อนกลับ (Forward modeling) มีการแปลงข้อมูลจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $1/\rho$ ) เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Isotropic model)

$$S_L = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} ; S_L = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (40)$$

$$T = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i ; T = R \dots \dots \dots (41)$$

- เมื่อ  $R$  เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ )  
 $h_i$  เป็นความหนาของชั้นดิน (m)  
 $S_L$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามแนวนอน (S/m)



$T$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้าในแนวตั้ง (S/m)

$\rho_i$  เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot m$ )

Peksen and Yas, 1992 ได้นำทฤษฎีของ Dey and Morrison, 1979 มาใช้แก้สมการปัวซอง (Poisson's equation) ในแบบจำลอง 2 มิติที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนและตาข่ายกริดมีการกระจายตัวกันอย่างเป็นระเบียบด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference method: FD method) ประกอบด้วยเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าที่ถูกแยกออกในทิศทาง  $x$  และ  $z$  หรือ  $\sigma_n(x, z)$  และมีการกระจายเซลล์ถูกแบ่งออกเป็น 5 เซลล์ย่อยตามภาพประกอบที่ 2.18g มีวิธีหาแหล่งจุดกำเนิดตรงกลาง (s) ได้ตามสมการที่ 42 แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ กรณิพื้นที่มีลักษณะความสูงชันเข้ามาเกี่ยวข้องและนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะส่งผลให้เกิดแถบสีของข้อมูลในแบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อน เพราะการประมวลผลสร้างแบบจำลองที่ประกอบด้วยความสูงชันของพื้นที่ต้องใช้ตาข่ายกริดที่มีความละเอียดทั้งแนวตั้งและแนวนอน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนจึงเหมาะสมบริเวณพื้นที่ทางราบ แต่วิธีที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลองที่มีความชันในพื้นที่ควรใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element method: FE method) ประกอบด้วยเทนเซอร์สภาพการนำไฟฟ้าที่ถูกแยกออกในทิศทาง  $x$  และ  $z$  หรือ  $\sigma_n(x, z)$  และมีการกระจายเซลล์ ถูกแบ่งออกเป็น 7 เซลล์ย่อยตามภาพประกอบที่ 2.18x ลักษณะของตาข่ายกริดมีการกระจายตัวเป็นสามเหลี่ยม มีวิธีหาแหล่งจุดกำเนิดตรงกลาง (s) ได้ตามสมการที่ 43 แต่การประมวลผลจะค่อนข้างซับซ้อนกว่าวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ การตั้งค่าความละเอียดของตาข่ายกริดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

$$Cv = s \quad \dots \dots \dots (42)$$

เมื่อ  $C$  เป็นปริมาณความจุไฟฟ้าที่กระจายตัว 5 เซลล์ย่อยในเมทริกซ์สมมาตร

$v$  เป็นเวกเตอร์ของศักย์ไฟฟ้า

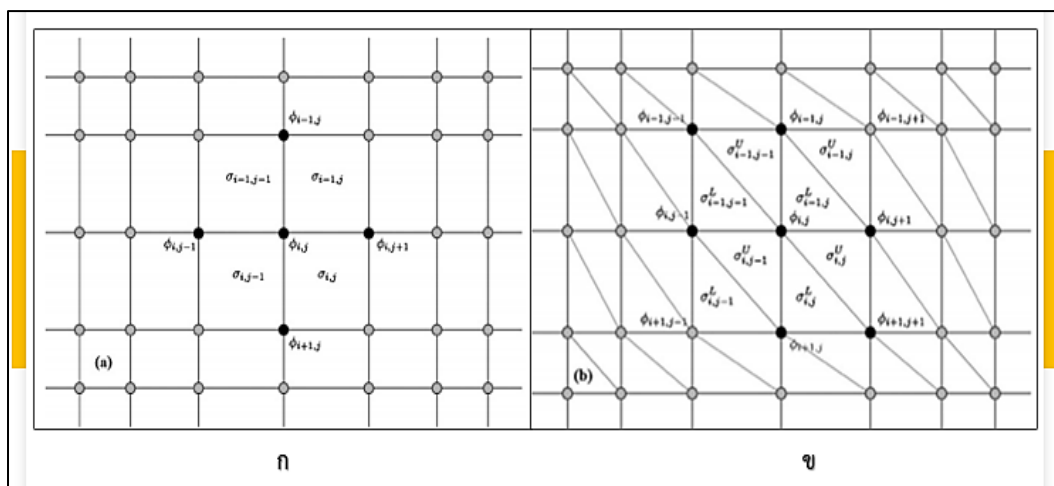
$s$  เป็นเวกเตอร์ของแหล่งจุดกำเนิด

$$Kv = s \quad \dots \dots \dots (43)$$

เมื่อ  $K$  เป็นปริมาณความจุไฟฟ้าที่กระจายตัว 7 เซลล์ย่อยในเมทริกซ์สมมาตร

$v$  เป็นเวกเตอร์ของศักย์ไฟฟ้า

$s$  เป็นเวกเตอร์ของแหล่งจุดกำเนิด



ภาพประกอบ 2.18 แสดง (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอลเมนต์

(ที่มา: Vachirastienchai *et. al.*, 2010)

การสร้างแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในรูปแบบ 2 มิติ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบผกผันบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม RES2DINV V.3.53 การใส่ข้อมูลลงบนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองประกอบด้วยข้อมูลเวกเตอร์ (d) ที่ได้รับจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ ( $\rho_a$ ) โดย N เป็นจำนวนการวัด (Number of data) หรือ  $d \in R^N$  และมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการวางขั้วในแต่ละรูปแบบ (Position of electrodes) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง (Model vector, m) โดยให้ M เป็นจำนวนพารามิเตอร์ (Number of model parameter) โดยที่  $m \in R^M$  ตามสมการที่ 44 Günther, 2004 ได้อธิบายเกี่ยวกับการเริ่มต้นสร้างแบบจำลองต้องใส่ชุดข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ เพื่อสร้างข้อมูลจำลอง (Predicted data) ของเวกเตอร์สภาพการนำไฟฟ้า (Forward response of m,  $\sigma_0$ ) ในแบบจำลองตามสมการที่ 45 โดยที่  $f(m) \in R^N$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 44 และ 46

$$d = G(m) \quad \dots \dots \dots (44)$$

$$m = \sigma_0 = \frac{1}{\sqrt[n]{\rho_a^1 \rho_a^2 \rho_a^3 \dots \rho_a^n}} \quad \dots \dots \dots (45)$$

$$d = f(m) = G(m) \quad \dots \dots \dots (46)$$

สำหรับชุดเวกเตอร์ข้อมูล ( $d_i$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลจำลอง  $f(m)$  เพื่อสร้างแบบจำลองเสมือนแผนที่โดยใช้ความสัมพันธ์จำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ( $m$ ) โดยที่  $m \in \mathbb{R}^M$  ร่วมกับพารามิเตอร์บนแผนที่ในระบบเมทริกซ์ (Parameter mapping matrix,  $P$ ) โดยที่  $P \in \mathbb{R}^{P \times M}$  ทำให้เกิดอัตราส่วนของความผิดพลาดในชุดข้อมูล (Data error,  $\epsilon_i$ ) ประกอบด้วยชุดข้อมูลน้ำหนักในระบบเมทริกซ์ (Data weighting matrix,  $D$ ) กรณีค่าความผิดพลาดน้อยจนเกือบเข้าใกล้ 0 ส่งผลทำให้ชุดข้อมูลมีน้ำหนักที่ดีหรือน่าเชื่อถือ แต่ถ้าค่าความผิดพลาดสูงจะส่งผลให้ชุดข้อมูลเกิดน้ำหนักที่ไม่ดีและมีผลกับความน่าเชื่อถือของข้อมูลลดลง ดังนั้นชุดข้อมูลที่ให้น้ำหนักไม่ดีต้องนำไปปรับแก้ไขปัญหาโดยใช้สมการ  $L_p$ -norm เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Root mean squared error, RMSE) ในการปรับขนาดพารามิเตอร์ใหม่ด้วยรูปแบบฟังก์ชันแบบจำลอง (Model functional,  $\Phi_d(m)$ ) บนแผนที่ตามสมการที่ 47 ดังนี้

$$\Phi_d(m) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right|^P = \|D(d - f(m))\|_P^P ; D = \text{diag} \left( \frac{1}{\epsilon_i} \right) \dots \dots \dots (47)$$

กรณีชุดข้อมูลที่ให้น้ำหนักไม่ดีต้องนำชุดข้อมูลน้ำหนัก ( $D$ ) กลับมาแก้ไขปัญหาในเวกเตอร์แบบจำลองใหม่ โดยการทำวนซ้ำอีกครั้งหรือวนซ้ำหลายรอบ (Model vector of the  $k^{\text{th}}$  iteration step,  $m^k$ ) ด้วยการคำนวณจาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian matrix) ตามสมการที่ 48 เพื่อสร้างเวกเตอร์ของชุดข้อมูลในแบบจำลองใหม่ (Model update vector,  $\Delta m$ ) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่กำหนดทางเรขาคณิต (Configuration (or geometry) factor,  $k$ ) ร่วมกับความคลาดเคลื่อนของเวกเตอร์ข้อมูล (Data discrepancy vector,  $\Delta d$ ) ด้วยวิธีแยกย่อยค่าเอกพจน์ (Singular value decomposition method, SVD) นำมาแก้ไขปัญหาเวกเตอร์ของชุดข้อมูลในแบบจำลองใหม่ โดยการทำวนซ้ำแต่ละครั้งด้วยอนุพันธ์ย่อยบางส่วนที่มีขนาดของเมทริกซ์ โดย  $d \in \mathbb{R}^N$  และ  $m \in \mathbb{R}^M$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ความไวในระบบเมทริกซ์ (Sensitivity matrix) โดยที่  $S \in \mathbb{R}^{N \times M}$  ด้วยวิธีการลดกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares solution) ตามสมการที่ 49 ดังนี้

$$J_{ij}(m^k) = \frac{\partial f_i(m^k)}{\partial m_j} \dots \dots \dots (48)$$

$$DS\Delta m^k = D\Delta d^k \dots \dots \dots (49)$$

การเปรียบเทียบชุดข้อมูลน้ำหนักของ  $D^T D = C_d^{-1}$  เป็นข้อมูลแบบผกผันของความแปรปรวนรวมในระบบเมทริกซ์ (Data covariance matrix,  $C_d$ ) ตามสมการที่ 50 ที่มีความสัมพันธ์กับการคำนวณจาโคเบียนเมทริกซ์ตามสมการที่ 51 และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $C^T C$  เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีข้อจำกัดในระบบเมทริกซ์ (Model constraint matrix,  $C$ ) โดยที่  $C \in \mathbb{R}^{P \times M}$  เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันลากรองจ์ด้วยวิธีหาค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ขึ้นอยู่กับค่าชุดข้อมูลน้ำหนักและฟังก์ชันของแบบจำลองหรือที่เรียกว่าพารามิเตอร์ลากรองจ์ (Lagrangian parameter,  $\lambda_i$ ) ร่วมกับเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของแบบจำลองในระบบเมทริกซ์ (Model eigenvector matrix,  $V$ ) โดยที่  $V \in \mathbb{R}^{M \times M}$  และลักษณะเฉพาะของข้อมูลในระบบเมทริกซ์ (Data eigenvector matrix,  $U$ ) โดยที่  $U \in \mathbb{R}^{N \times N}$  ส่งผลต่อขนาดของเซลล์ในตาข่ายกริดเกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อความละเอียดและผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้นตามสมการที่ 52 ดังนั้นการสร้างเวกเตอร์แบบจำลองใหม่แบบการทำวนซ้ำในแต่ละครั้ง (Model vector of the  $k^{\text{th}}$  iteration step,  $\mathbf{m}^k$ ) สามารถเขียนหาความสัมพันธ์ใหม่ได้ตามสมการที่ 53 และนำชุดข้อมูลถูกนำกลับมาสร้างใหม่ในรูปแบบข้อมูลจำลอง (Predicted data) ของเวกเตอร์สภาพการนำไฟฟ้า (Forward response of  $\mathbf{m}$ ,  $\sigma_0$ ) อีกครั้งตามสมการที่ 46 ดังนี้

$$((DS)^T DS)\Delta \mathbf{m}^k = (DS)^T D \Delta d^k \quad \dots \dots \dots (50)$$

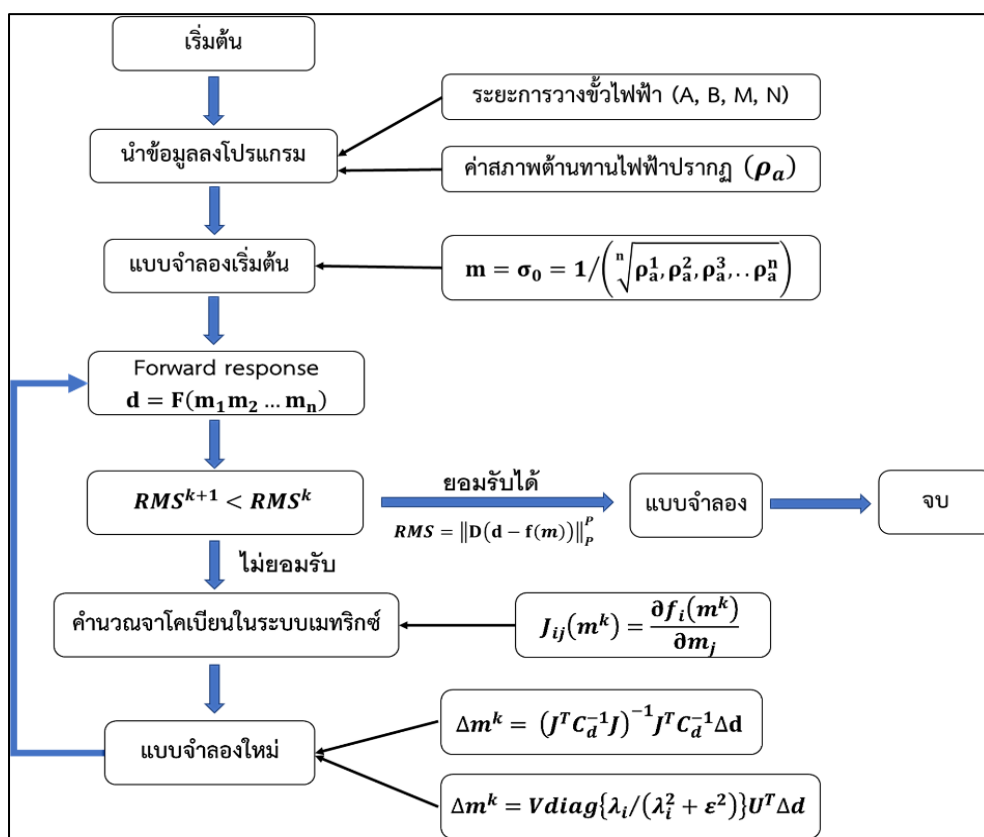
$$\Delta \mathbf{m}^k = (J^T C_d^{-1} J)^{-1} J^T C_d^{-1} \Delta d \quad \dots \dots \dots (51)$$

$$\Delta \mathbf{m}^k = V \text{diag} \left\{ \frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \varepsilon^2} \right\} U^T \Delta d \quad \dots \dots \dots (52)$$

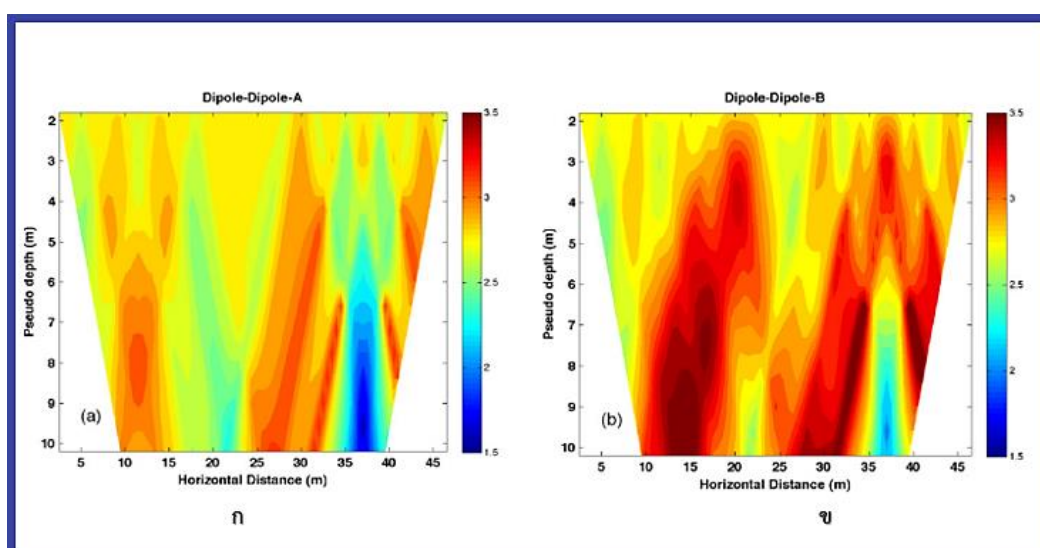
$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \Delta \mathbf{m}^k \quad \dots \dots \dots (53)$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดสามารถเขียนโครงสร้างเป็นแผนผังการประมวลผล การสร้างแบบจำลองย้อนกลับที่มีการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Isotropic model) ตามภาพประกอบ 2.19 ดังนั้นการเลือกวิธีการกระจายตัวของเซลล์ย่อยระหว่างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และไฟไนต์เอเลเมนต์จึงมีความสำคัญอย่างมาก ก่อนการนำข้อมูลมาทำวิธีการลดกำลังสองน้อยที่สุด

เพื่อสร้างแผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แสดงขอบเขตความไม่ต่อเนื่องตามภาพประกอบ 2.20



ภาพประกอบ 2.19 แผนผังการประมวลผลการสร้างแบบจำลองโดยวิธีการแก้ปัญหาค่าผกผันแบบย้อนกลับ



ภาพประกอบ 2.20 แผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดง (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ที่มา: Vachirastienchai et. al., 2010)

### 2.1.14 การสำรวจเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน

การสำรวจด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก (Ground penetrating radar: GPR) เป็นการสำรวจโครงสร้างภายใต้ผิวดินในระดับตื้นโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves: EM) เพื่อศึกษาหาตำแหน่งรอยแตกของชั้นหินแกรนิตในบริเวณพื้นที่บ่อน้ำบาดาลที่เจาะไม่พบน้ำของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวิวัฒน์โดยใช้รูปแบบ Common offset เครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) จะสร้างพัลส์สั้น (Short pulse) ที่มีระยะเวลา 1-20 ns ช่วงความถี่สูง 10-2500 MHz (Frequency,  $f$ ) แต่กรณีศึกษาจะใช้ความถี่ช่วง 30 MHz เครื่องส่งสัญญาณจะอาศัยพลังงานการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF) ด้วยความเร็วผ่านภายใต้ผิวดินที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric property) เนื่องจากวัสดุภายใต้ผิวดินมีคุณสมบัติสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity,  $\sigma$ ) แปรผันตรงกับความชื้นที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติสภาพการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ต่อวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric permittivity,  $\epsilon$ ) ส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดกระจายตัวและแพร่กระจายแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวดินระหว่างชนิดของวัสดุที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งก่อให้เกิดดัชนีหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) และพลังงานของคลื่นบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับขึ้นสู่ผิวดินไปยังเครื่องรับสัญญาณ (Receiver) เพื่อนำมาประมวลผลและการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่าเรดาร์แกรม (Radargram)

การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง สามารถอธิบายได้โดย สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) (e.g. Armando *et. al.*, 2005) ดังนี้

$$\nabla^2 E + i\omega\mu\sigma E + \epsilon\mu\omega^2 E = 0 \quad \dots \dots \dots (54)$$

เมื่อ  $E$  เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (V/m)

$\omega$  เป็นความถี่เชิงมุม (rad/s)

$\epsilon$  เป็นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (F/m)

$\sigma$  เป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้า (S/m)

$i$  เป็น  $(\sqrt{-1})$

กรณีตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันบนคลื่นที่เป็นระนาบ (Plane wave) เคลื่อนที่ตามแนวแกน  $z$  ส่งผลทำให้  $\mu, \sigma, \epsilon$  เป็นค่าคงที่ ผลเฉลยของสมการที่ 56 ขึ้นอยู่กับเวลาในฟังก์ชัน

phase factor ของ  $e^{-i\omega t}$  โดยที่  $k = \sqrt{(\omega^2 \epsilon \mu + i\omega \mu \sigma)}$  สามารถเขียนตามสมการที่ 55 (e.g. Giroux t et. al., 2010) ได้ดังนี้

$$E = E_0 e^{-i(kz + \omega t)} \dots \dots \dots (55)$$

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัสดุภายใต้ผิวดินที่มีคุณสมบัติสภาพการนำไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนจริง (Real parts) และส่วนจินตภาพ (Imaginary parts) จากสมการที่ 56 Giroux t et. al., 2010 ได้นำเลขคลื่น (Wave number, k) มาหาความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ส่วนซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อยๆ คือ ส่วนจริงที่อยู่ในรูปของ phase factor ( $\beta$ ) ที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของคลื่น ( $v = \omega/k$ ) ตามสมการที่ 56 และส่วนจินตภาพในรูปของการลดทอน ( $\alpha$ ) ของคลื่น (Attenuation) ตามสมการที่ 57 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น  $k = \beta - i\alpha$  โดยที่

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\epsilon \mu}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right] \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (56)$$

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\epsilon \mu}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (57)$$

เมื่อ  $\mu$  เป็นค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก

$\mu_0$  เป็นค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ

$\mu_r$  เป็นค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์

โดยที่  $\mu = \mu_0 \mu_r$  (Wb/A – m) และ  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศจะมีค่าเดียวกันกับค่าความเร็วเฟสของแสง ( $c = 0.3$  m/ns) ดังนั้นในตัวกลางใดๆ ค่าความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$v_m = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\left\{ \frac{\epsilon_r \mu_r}{2} [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1] \right\}^{1/2}} \dots \dots \dots (58)$$

เมื่อ  $v_m$  เป็นความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง m (m/ns)

$\epsilon_r$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของวัสดุ

$\tan\delta$  เป็นค่า loss tangent

กรณีตัวกลางที่มีสภาพการนำไฟฟ้าต่ำที่ทำให้คลื่นเคลื่อนที่ผ่านใช้ความถี่มากจน  $\tan\delta$  มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ( $\tan^2\delta \ll 1$ ) ทำให้ความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่อยู่ด้านบนของผิวรอยต่อ สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 59 (e.g. Reppert et. al., 2000) สำหรับวัสดุภายใต้ผิวดินตามธรรมชาติ ทำให้ค่าสภาพขาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Magnetic permeability,  $\mu_r = 1 + K$ ) มีค่าเข้าใกล้ 1 เนื่องจากสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility, K) มีค่าต่ำกว่า 1 มากๆ สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 60 ดังนี้

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \dots \dots \dots (59)$$

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots \dots \dots (60)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วของแสงเท่ากับ  $3 \times 10^8$  (m/s)

การสำรวจด้วยเรดาร์ยังลึกด้วยวิธีการวัดค่าการสะท้อนกลับของคลื่น ทำให้สนามไฟฟ้าของคลื่นเกิดการเหนี่ยวนำของกระแสในตัวกลางและสูญเสียพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบพลังงานความร้อนที่สัมพันธ์กับวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเฉพาะตัวสามารถอธิบายได้ตามสมการการสูญเสียสัมผัส (Loss Tangent,  $\tan\delta$ ) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของสภาพการนำไฟฟ้าต่อระยะทางการเคลื่อนที่ เมื่อปรับใช้ความถี่ที่สูงขึ้น ( $\omega = 2\pi f$ ) จะส่งผลต่อการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงตามสมการที่ 61 (e.g. Giroux t et. al., 2010) ดังนี้

$$\tan\delta = \frac{1}{Q} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \dots \dots \dots (61)$$

หากมีความถี่ของคลื่นมีค่าสูงมาก โดยที่  $\sigma^2/\omega^2\epsilon^2 \ll 1$  คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในตัวกลางจะเกิดการสูญเสียพลังงาน ทำให้เกิดการลดทอนที่มีผลต่อการลดลงของ



แอมพลิจูดตามระยะทางในเมอมของ Skin depth ( $z_{skin}$ ) ซึ่งเป็นระยะทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางและทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลงเหลือ  $1/e$  ของแอมพลิจูดเริ่มต้นหรือ 37 เปอร์เซ็นต์ โดยค่า Skin depth ( $\delta$ ) เป็นไปตามสมการ

$$\delta = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu}} \dots \dots \dots (62)$$

เมื่อ  $\delta$  เป็นค่า Skin depth (m)

กรณีวัสดุบนโลกไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ( $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ) และมีความสัมพันธ์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ) สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ใหม่ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = 0.0053 \left( \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \right) \dots \dots \dots (63)$$

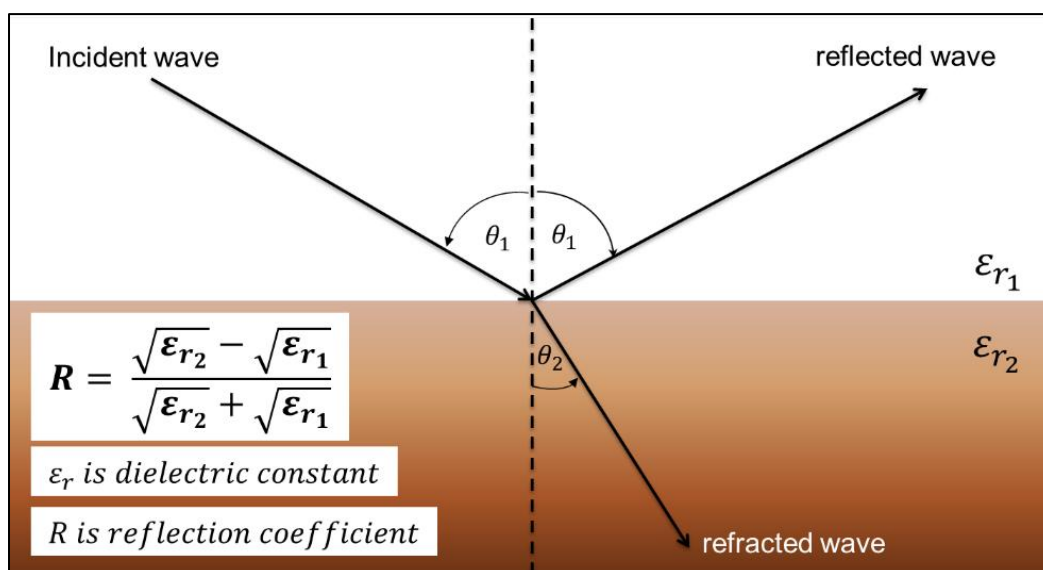
### 2.1.15 การสะท้อนและการหักเห

เครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) จำเป็นต้องอาศัยพลังงานกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ( $v$ ) ผ่านภายใต้ผิวดินที่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวกลาง เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน ( $\epsilon_{r1}$ ) และ ( $\epsilon_{r2}$ ) ทำให้เกิดการหักเหของคลื่นตามกฎของสเนลล์ในสมการที่ 64 ตามภาพประกอบ 2.21

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2 \dots \dots \dots (64)$$

ความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงถึงปริมาณพลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับได้แสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $R$ )

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \dots \dots \dots (65)$$



ภาพประกอบ 2.21 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสัมผัสบริเวณผิวหน้าระหว่างตัวกลางทั้งสองชนิดที่มีความแตกต่าง ทำให้เกิดหักเหและสะท้อนกลับของคลื่น

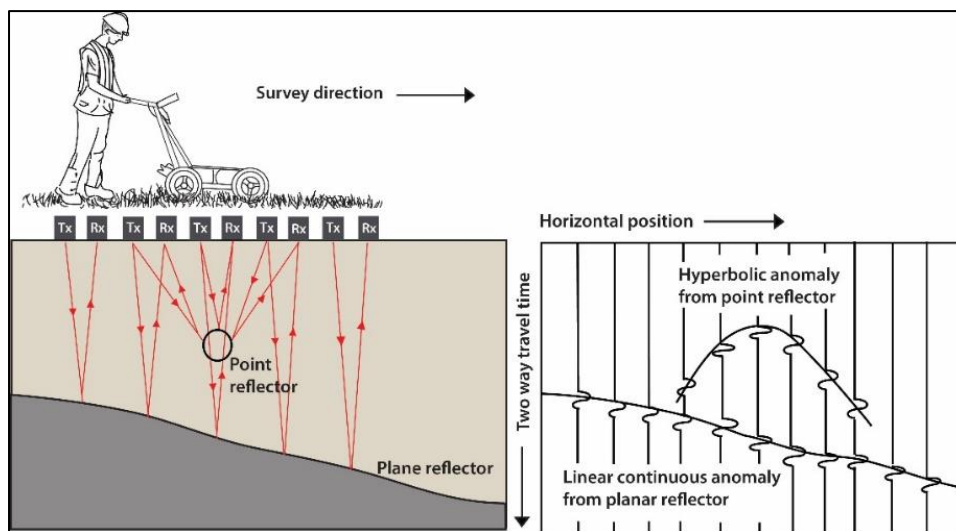
### 2.1.16 การจัดวางสายอากาศของเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก

การสำรวจด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในงานวิจัยนี้มีการจัดวางเสาอากาศ (Antenna) ในรูปแบบ Common offset และวัดค่าแบบ Profile เครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกจะถูกแยกสายอากาศส่งสัญญาณและสายอากาศรับสัญญาณในระยะห่าง 6.2 เมตร โดยตัวรับและตัวส่งทั้งสองจะถูกเคลื่อนที่ไปพร้อมกันตามระยะทางที่ออกแบบไว้ตามภาพประกอบ 2.22 การวัดค่าการสะท้อนกลับของคลื่นในวัสดุภายใต้เสาอากาศ ดังนั้นการประมาณค่าความลึกของวัสดุสามารถวิเคราะห์ได้จากฟังก์ชันความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง  $m$  (Velocity analysis function,  $v_m$ ) ในรูปแบบการสะท้อนคลื่นบนวัตถุที่มีรูปแบบเป็นโค้ง (Hyperbola) ตามสมการที่ 66 ซึ่งสอดคล้องกับภาพประกอบ 2.23

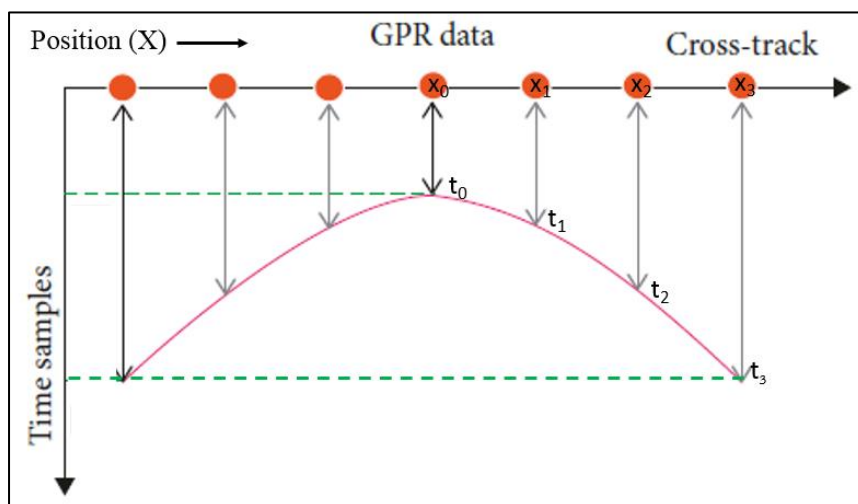
$$v_m = \frac{\sqrt{x_2^2 - x_1^2}}{\sqrt{t_2^2 - t_1^2}} \dots \dots \dots (66)$$

เมื่อ  $x_1, x_2$  เป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศ (m)

$t_1, t_2$  เป็นเวลาที่คลื่นใช้เวลาเดินทางสะท้อนผิวรอยต่อและเดินทางกลับ (ns)



ภาพประกอบ 2.22 การสำรวจด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในรูปแบบ Common Offset และ Profile แสดงวัสดุที่แทรกตัวขึ้นมาในรูปแบบไฮเพอร์โบลา (ที่มา: <http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>)



ภาพประกอบ 2.23 การวิเคราะห์คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) แล้วทำให้เกิดรูปแบบไฮเพอร์โบลา (ที่มา: modified from Park et al., 2019)

การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ทำให้ทราบค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ (Two way travel time, twt) บนแอมพลิจูดของสัญญาณ สามารถนำสมการที่ 66 มาประมาณค่าความลึกของตัวกลางที่เป็นตัวสะท้อน ( $d$ ) ตามสมการที่ 67 และภาพประกอบ 2.24 สำหรับความแตกต่างของวัสดุที่มีผลต่อมุมเฟสและแอมพลิจูดของคลื่นจะปรากฏที่ริมขอบและความคมบนเรดาร์แกรม เช่น วัสดุขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่แทรกตัวขึ้นมาจะแสดงเป็นรูปไฮเพอร์โบลา

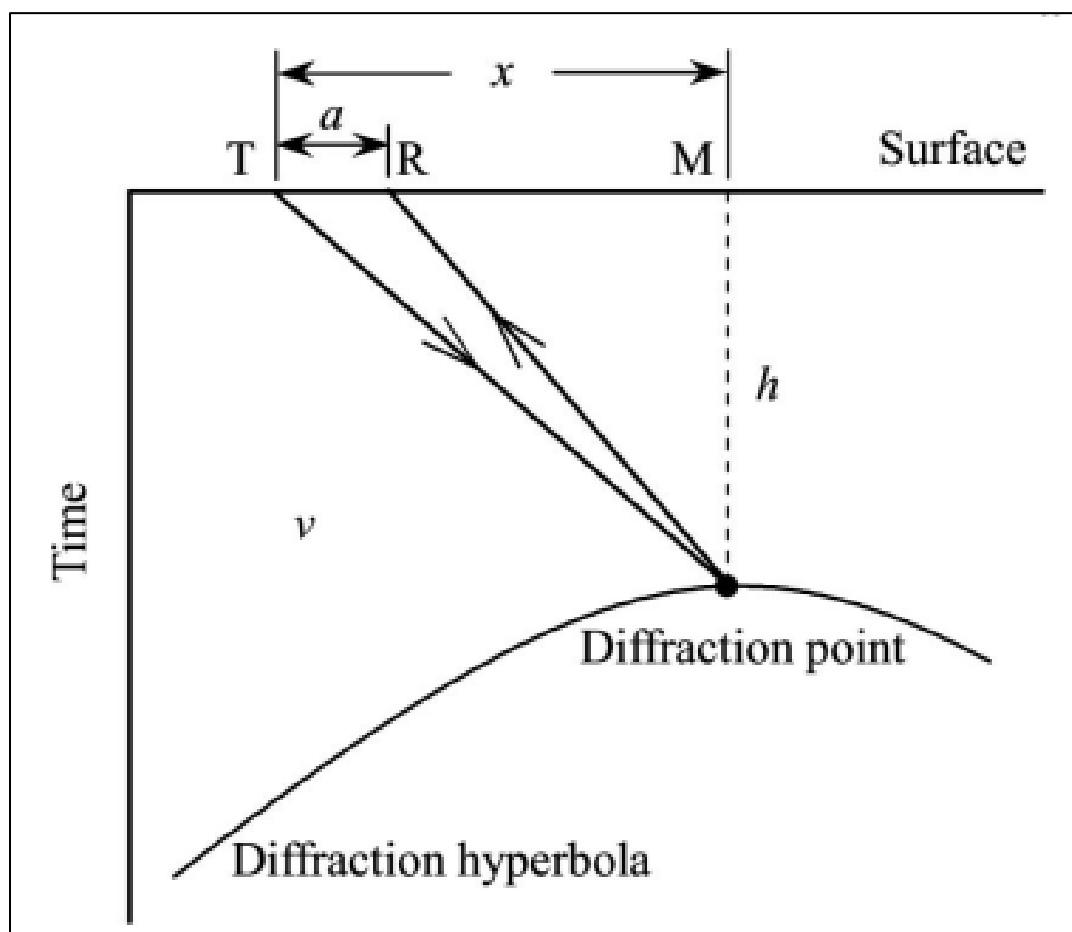
(Hyperbola anomaly) หรือรอยแตกของชั้นหินจะแสดงเป็นแนวเส้นที่มีความต่อเนื่อง (Line continuous anomaly) เป็นต้นตามภาพประกอบ 2.22 และ 2.25

$$d = \sqrt{\frac{(v_m t_{wt})^2 - a^2}{4}} = \frac{\sqrt{(v_m t_{wt})^2 - a^2}}{2} \dots \dots \dots (67)$$

เมื่อ  $d$  เป็นความลึก (m)

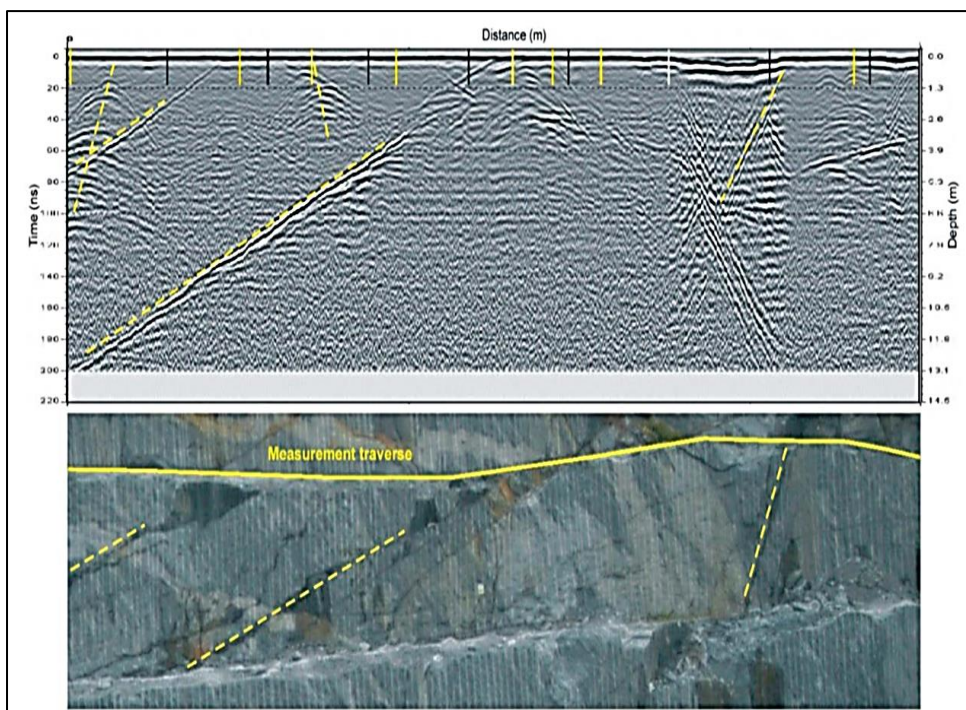
$t_{wt}$  เป็นเวลาคลื่นเดินทางไป-กลับ (m/ns)

$a$  เป็นระยะห่างของสายอากาศ (m)



ภาพประกอบ 2.24 แสดงระยะทางของความลึกในตัวอย่างที่เป็นตัวสะท้อน

(ที่มา: Shen et al., 2019)



ภาพประกอบ 2.25 กรณีสึขารอยแตกของชั้นหิน (เส้นสีเหลือง) แสดงแนวเส้นที่มีความต่อเนื่องบนเรดาร์แกรม (ที่มา: Luodes, 2015)

ดังนั้นการทราบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุจากการหาสมการความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง  $m$  จากสมการที่ 66 ไปแทนค่าสมการที่ 67 จะสามารถหาค่าความลึกถึงตำแหน่งที่เกิดการสะท้อนของคลื่นได้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในวัสดุชนิดต่างๆ แสดงดังตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางชนิดต่างๆ

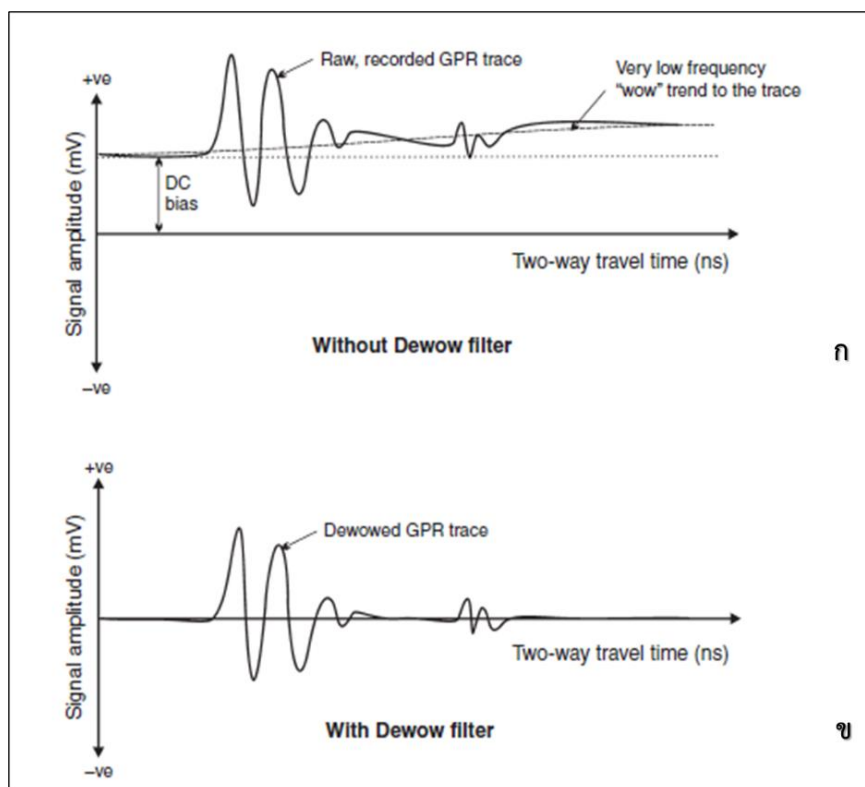
Material	$\epsilon_r$ ; Davis and Annan (1989)	$\epsilon_r$ ; Daniels et al. (1995)	Velocity (m/ns)
Air	1	1	0.3
Distilled water	80		0.03
Fresh water	80	81	0.03
Sea water	80		0.03
Fresh water ice	3-4	4	0.15-0.17
Sea water ice		4-8	0.11-0.15
Snow		8-12	0.09-0.11
Permafrost		4-8	0.11-0.16
Sand, dry	3-5	4-6	0.12-0.17
Sand, wet	20-30	10-30	0.05-0.09
Sandstone, dry		2-3	0.17-0.21
Sandstone, wet		5-10	0.09-0.13
Limestones	4-8		0.11-0.15
Limestone, dry		7	0.11
Limestone, wet		8	0.11
Shales	5-15		0.08-0.13
Shale, wet		6-9	0.10-0.12
Silts	3-30		0.05-0.13
Clays	5-40		0.05-0.13
Clay, dry		2-6	0.12-0.21
Clay, wet		15-40	0.05-0.08
Soil, sandy dry		4-6	0.12-0.15
Soil, sandy wet		15-30	0.05-0.08
Soil, loamy dry		4-6	0.05-0.08
Soil, loamy wet		15-30	0.07-0.09
Soil clayey dry		4-6	0.12-0.15
Soil, clayey wet		10-15	0.08-0.09
Coal, dry		3.5	0.16
Coal, wet		8	0.11
Granites	4-6		0.12-0.15
Granite, dry		5	0.13
Granite, wet		7	0.11
Salt, dry	5-6	4-7	0.11-0.15

(ที่มา: Baker *et. al.*, 2007)

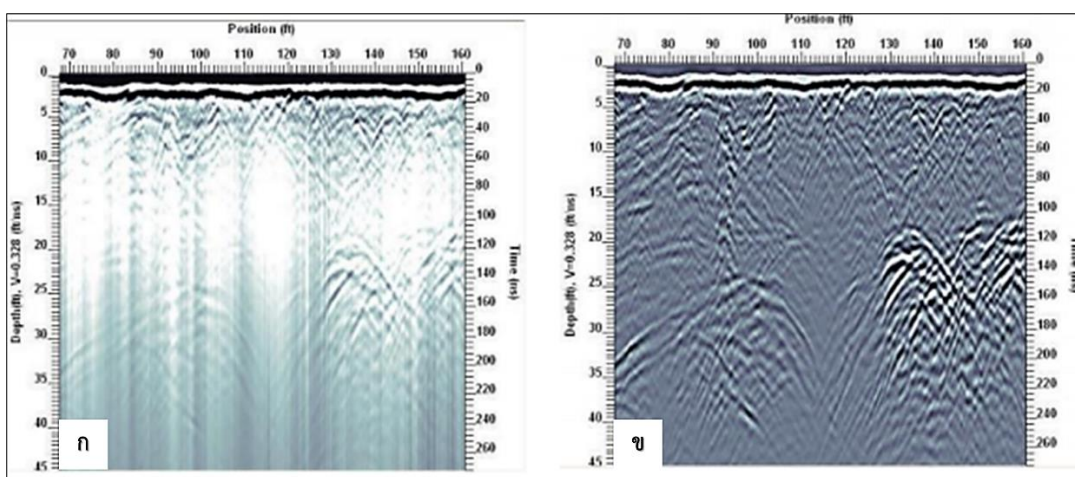
### 2.1.17 การประมวลผลและสร้างเรดาร์แกรม

ชุดข้อมูลที่ได้รับจากการบันทึกของเครื่องมือไปสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ประมวลผลในการสร้างเรดาร์แกรมด้วยโปรแกรม REFLEXW v.8.0.2 เริ่มต้นจากฟังก์ชันการกรองของ 1D-filter (Dewow) เพื่อลบความถี่ต่ำที่ไม่ต้องการ และเก็บสัญญาณความถี่สูงไว้ เพื่อให้ได้ความอุ่มตัวของสัญญาณ ฟังก์ชันนี้ยังช่วยกำจัด DC เพื่อลบระดับ DC ออกจาก traces ทั้งหมดใน

แถวตามภาพประกอบ 2.26 และ 2.27 หลังจากนั้นจะใช้ฟังก์ชัน Autocorrelation เป็นการปรับแก้ไขเวลาเริ่มต้นที่มีการกระโดดของข้อมูลให้ตรงกับตำแหน่งพื้นผิวตามภาพประกอบ 2.28

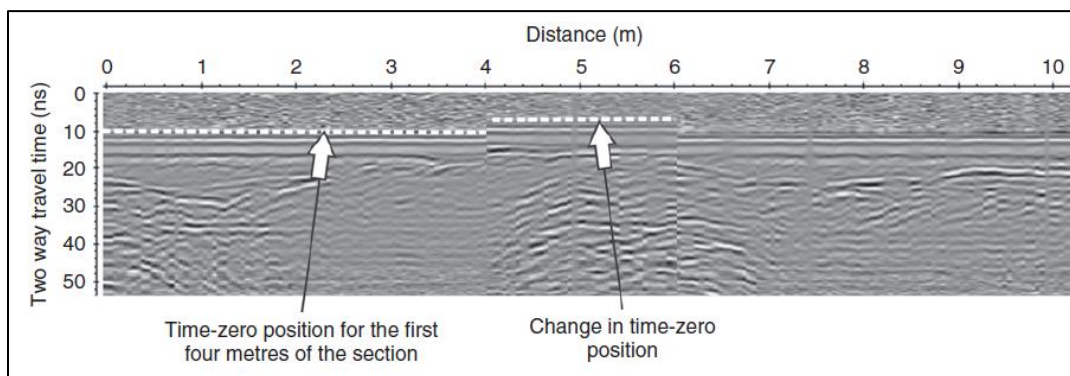


ภาพประกอบ 2.26 แสดง (ก) ก่อนใช้ฟังก์ชัน (ข) หลังการใช้ฟังก์ชัน Dewow (ที่มา: Cassidy, 2009)



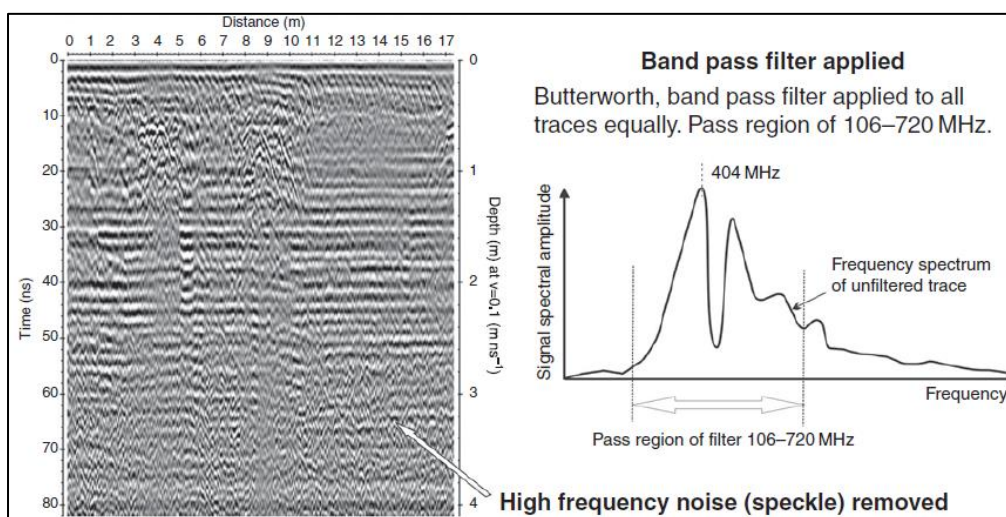
ภาพประกอบ 2.27 เรดาร์แกรมแสดง (ก) ไม่ได้กรอง Wow ออก (ข) ใช้ฟังก์ชัน Dewow (ที่มา: Cassidy, 2009)





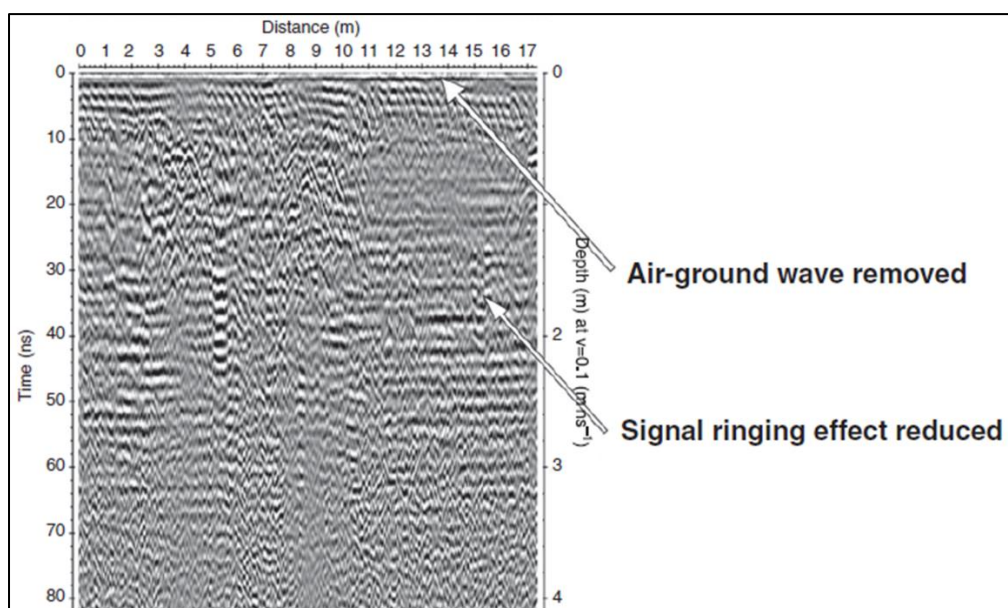
ภาพประกอบ 2.28 แสดงการปรับแก้ไขเวลาเริ่มต้นด้วยการใช้ฟังก์ชัน Autocorrelation (ที่มา: Cassidy, 2009)

การกรองคลื่นสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของข้อมูลให้ดียิ่งขึ้นด้วยฟังก์ชัน Bandpass filtering ซึ่งเป็นการกรองสัญญาณเลือกช่วงความถี่ที่กำหนดในรูปแบบ Butterworth ให้เหลือช่วงสัญญาณหลักตรงกลาง หรือกรองสัญญาณรบกวนที่เป็นส่วนเกินบนสเปกตรัมออกไปตามภาพประกอบ 2.29 หลังจากนั้นใช้ฟังก์ชัน Background removal เป็นการนำค่าเฉลี่ยของในส่วนของ traces ทั้งหมดและลบออกแต่ละ traces เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการตีความข้อมูลตามภาพประกอบ 2.30



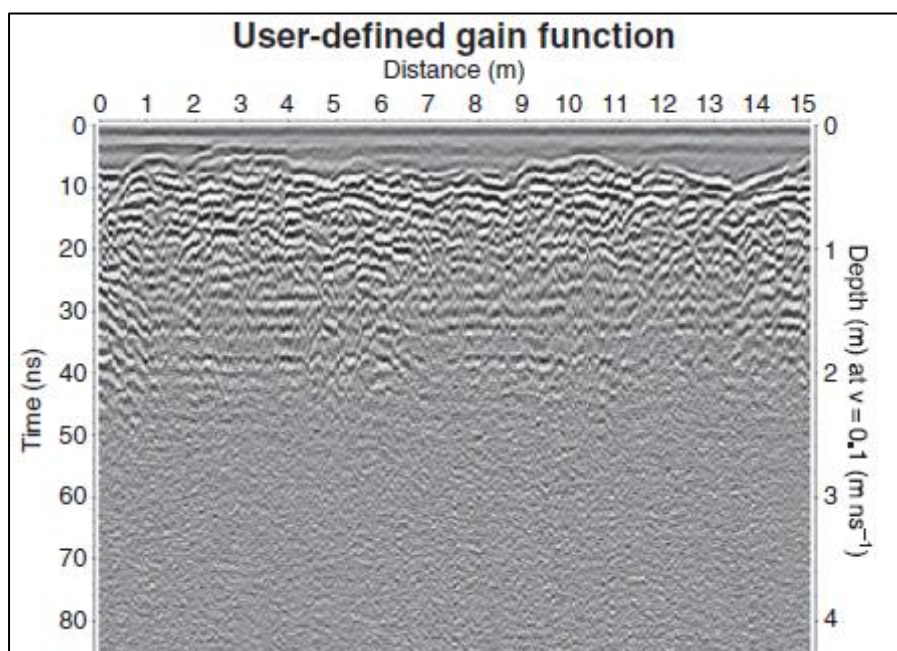
ภาพประกอบ 2.29 แสดงการกำหนดเลือกใช้ช่วงความถี่และกำจัดส่วนเกินบนสเปกตรัมออก (ที่มา: Cassidy, 2009)





ภาพประกอบ 2.30 แสดงฟังก์ชัน Background removal เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง  
(ที่มา: Cassidy, 2009)

เนื่องจากความแรงของสัญญาณเรดาร์อาจลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชัน Gain เพื่อเพิ่มสัญญาณที่อ่อนลงให้แรงขึ้นส่งผลให้ข้อมูลมีความชัดเจนและตีความหมายข้อมูลง่ายขึ้นตามภาพประกอบ 2.31



ภาพประกอบ 2.31 การใช้ฟังก์ชัน Gain เพื่อเพิ่มความชัดเจนของข้อมูล (ที่มา: Cassidy, 2009)

การทำ migration เป็นการประยุกต์การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการปรับเปลี่ยนแนว traces ด้วยการทำ  $f_k$  migration (Stolt) บนข้อมูล และเลือกกำหนดตามความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางได้ตามความเหมาะสมของงานวิจัยนี้คือ 0.06 ถึง 0.15 Olofsson T. และ Stepinski T., 2009 ได้กล่าวเทคนิคการทำ Phase-shift migration เป็นเทคนิคการแก้ไขด้วยการเลื่อนเฟสหรือ Traces ที่มีการเบนออกส่งผลให้ความถี่ของเวลาเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งแกน  $x$  ด้วยวิธีการแก้ไข wavenumber migration ที่ตำแหน่งถูกระบุด้วยพิกัด  $x, z$  และเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $s(x, z, t)$  ที่แผ่กระจายไปยังตัวกลางตามสมการคลื่นที่ 68

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v_m^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] s(x, z, t) = 0 \quad \dots \dots \dots (68)$$

เมื่อ  $t$  เป็นเวลา (s)

$v_m$  เป็นความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง (m/s)

สมการคลื่นที่ 68 นำมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับฟูรีเยร์ทรานสฟอร์ม (Fourier transform) ได้ตามสมการที่ 69 โดยแกน  $x$  เป็นทิศทางตามแนวยาว ( $k_x$ ) และแกน  $z$  เป็นทิศทางตามความลึก ( $k_z$ ) ของเวกเตอร์เลขคลื่น (Wavenumber vector) กรณีเวกเตอร์เลขคลื่นไม่เป็นศูนย์ ( $S(k_x, k_z, \omega) \neq 0$ ) สามารถเขียนสมการที่ 70 ใหม่ ดังนี้

$$\left[ k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{v_m^2} \right] S(k_x, k_z, \omega) = 0 \quad \dots \dots \dots (69)$$

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{v_m^2} \quad \dots \dots \dots (70)$$

เมื่อ  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุม (rad/s)

เมื่อพิจารณาการใช้ฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มแบบ 2 มิติกระจายความสัมพันธ์ตามสมการที่ 68 ที่มีผลต่อสมการของโดเมนความถี่เลขคลื่น (Frequency-wavenumber domain) ตามสมการที่ 71 ดังนี้

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_x^2 \right] S(k_x, z, \omega) = 0 \quad \dots \dots \dots (71)$$

ดังนั้นคลื่นที่แผ่กระจายไปสู่เครื่องรับสัญญาณบนทิศทางแกน  $z$  ในสมการที่ 72 และการวัดฟูเรียร์ทรานสฟอร์มแบบ 2 มิติแสดงที่  $z = 0$  สามารถเขียนได้ใหม่  $S(k_x, z, \omega)$  ตามสมการที่ 73

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} S(k_x, z, \omega) = \pm jk_z S(k_x, z, \omega) \dots \dots \dots (72)$$

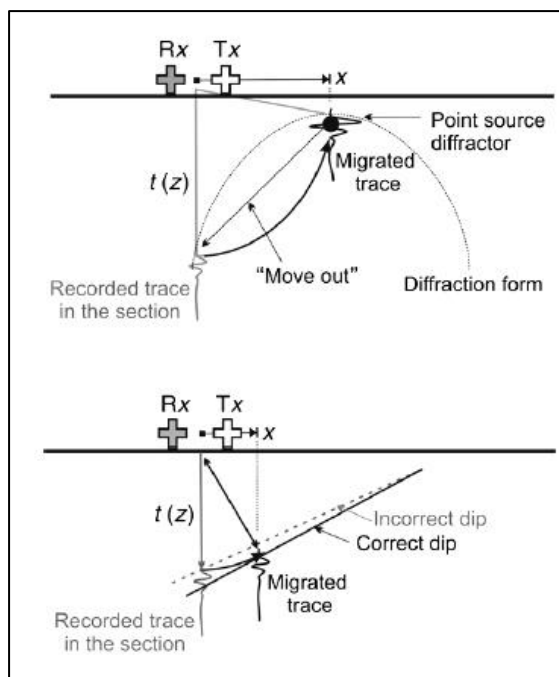
$$S(k_x, z, \omega) = S(k_x, z = 0, \omega) e^{\pm jk_z z} \dots \dots \dots (73)$$

หลังจากนั้นใช้วิธีการแมทซิงเป็นการใช้คะแนนความโน้มเอียง (Propensity score matching: PSM) มาคำนวณที่  $t = 0$  และคาดการณ์ทิศทางบนแนวแกน  $z$  ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยตัวแปรเฟส (Phase factor) เป็น  $\exp(jk_z z)$  ชุดข้อมูลดิบจากการใช้แบบ 2 มิติในโดเมนความถี่เลขคลื่นเป็นผลคูณของการเลื่อนเฟสของตัวแปร  $K$  ตามยาวบนแนวความลึกหรือแกน  $z$  สามารถเขียนสมการที่ 74 ดังนี้

$$K = e^{jk_z \Delta z} \dots \dots \dots (74)$$

ในสมการข้างต้นพารามิเตอร์ความลึกที่เพิ่มขึ้น (Parameter of depth,  $\Delta z$ ) เป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (Time sampling interval,  $\Delta t$ ) ของการอินพุตข้อมูล โดยที่  $\Delta z = \Delta m \cdot \Delta t$  หลังจากการแก้ไขเรียบร้อยแล้ว ตัวแปรสามารถปรับใหม่ในส่วนของข้อมูลเลขคลื่นตามยาวบนแกน  $x$  หรือ ( $k_x$ ) ดังนั้นรูปแบบสุดท้ายของตัวแปรการเลื่อนเฟส (Phase-shift factor) โดยที่  $k_z = k_x$  เป็นการปรับตำแหน่ง Trace ที่มีความแตกต่างระหว่างความถี่ของเวลาให้อยู่ตำแหน่งที่เหมาะสมตามสมการที่ 75 และภาพประกอบ 2.32

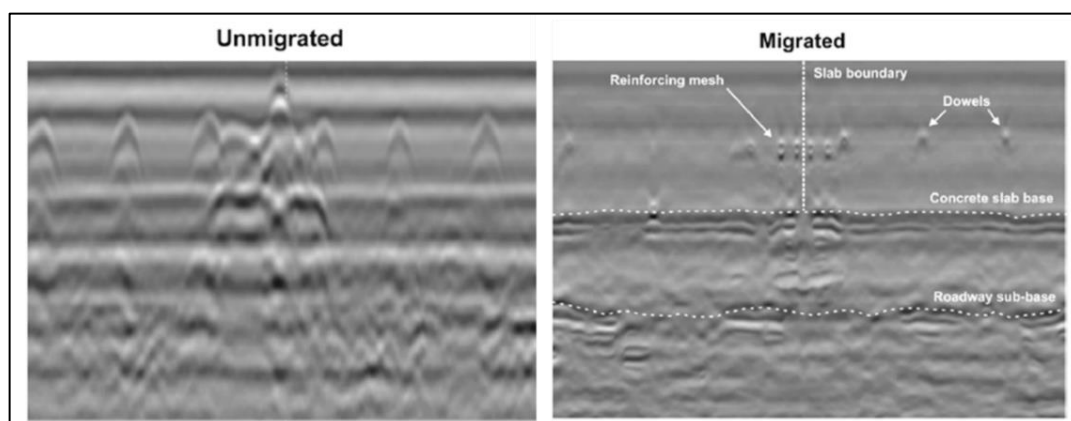
$$K = \exp \left( j\omega \cdot \Delta t \sqrt{1 - \left( \frac{v_m \cdot k_x}{\omega} \right)^2} \right) \dots \dots \dots (75)$$



ภาพประกอบ 2.32 แสดงก่อนและหลังการทำ Phase-shift migration (ที่มา: Cassidy, 2009)

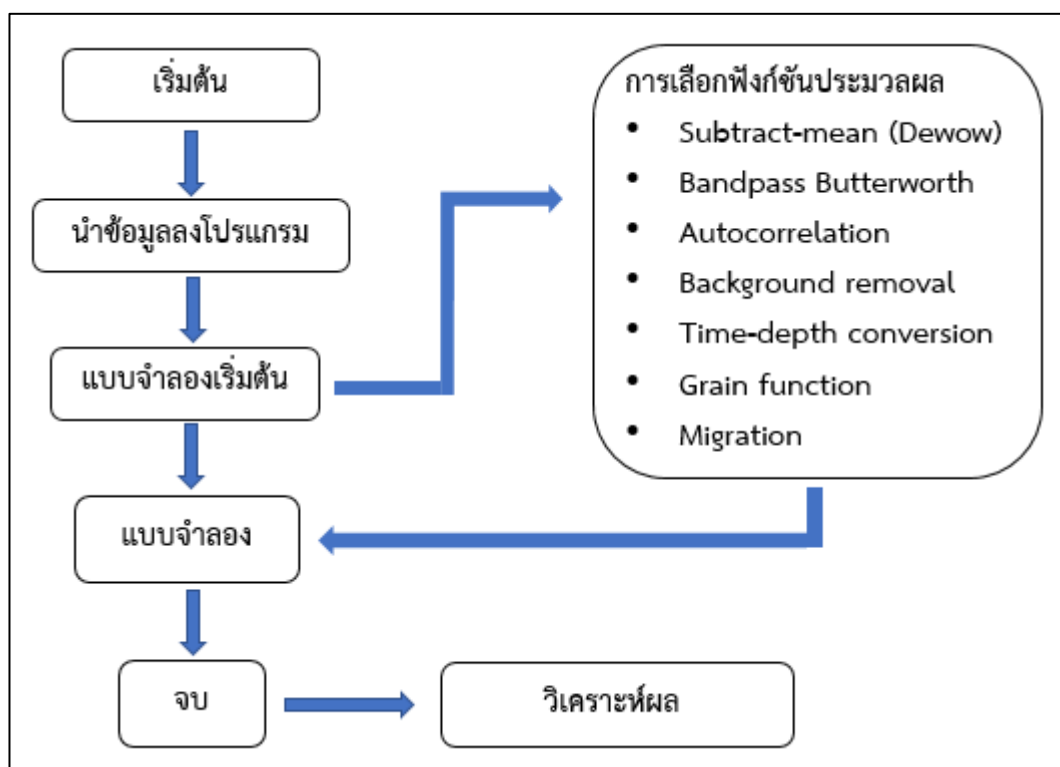
การตั้งค่า ( $\Delta t = 0$ ) และการใช้แบบ 2 มิติในการอินเวิร์สการแปลงฟูเรียร์ (Inverse fourier transform: IFT) เทียบกับ  $k_x$  และ  $k_z$  สามารถสร้างโฟกัสภาพในโดเมน  $f(x, z)$  แสดงสมการที่ 76 (e.g. Cassidy., 2009; Huston et al., 2014; Olofsson et al., 2009; Özdemir et al., 2014; Gu et al., 2004) ซึ่งนำมาปรับใหม่เสมือนพิกัดภาพ  $f(x, y)$  ตามภาพประกอบ 2.33

$$f(x, z) = IFT \{S(k_x k_z)\} \dots \dots \dots (76)$$



ภาพประกอบ 2.33 การสร้างเรดาร์แกรมระหว่างไม่ใช้และใช้วิธี Phase-shift migration (ที่มา: Cassidy, 2009)

ดังนั้นขั้นตอนการประมวลผลในการสร้างเรดาร์แกรมตามภาพประกอบ 2.34 หัวข้อ Data acquisition ทางซ้ายเป็นการการประมวลผลในการสร้างเรดาร์แกรมขั้นพื้นฐาน กรณีที่ต้องการให้ข้อมูลมีประสิทธิภาพที่ดีและมีความแม่นยำในการตีความมากขึ้น สามารถเลือกใช้ฟังก์ชันในหัวข้อ Post collection ได้ตามความหมายสมของข้อมูล

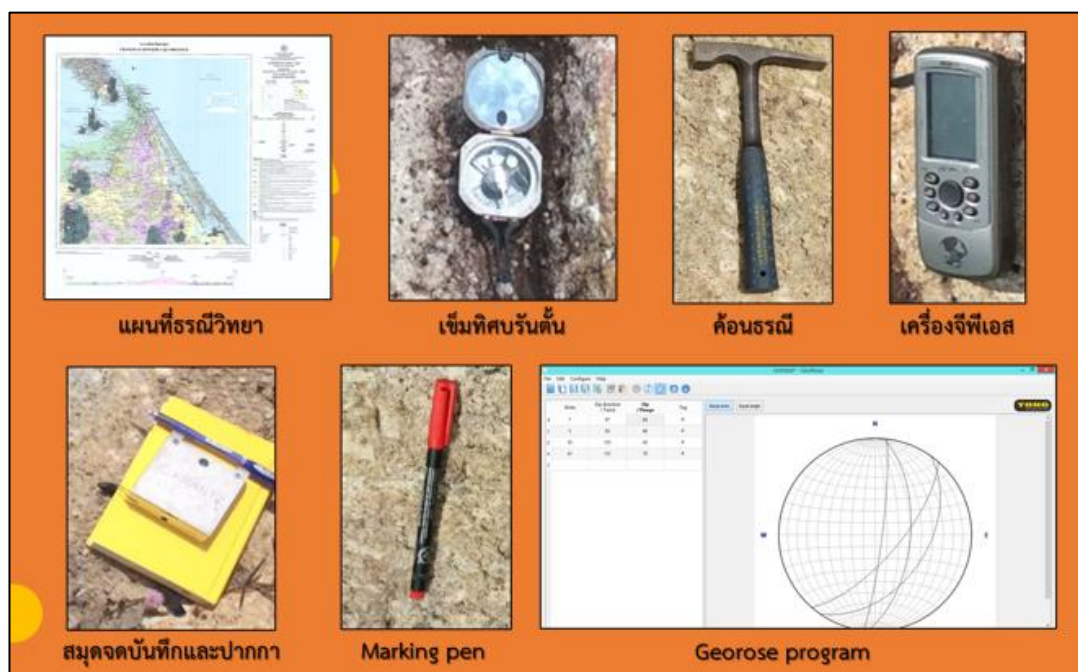


ภาพประกอบ 2.34 ขั้นตอนประมวลผลเพื่อสร้างเรดาร์แกรม

## 2.2 วัสดุและอุปกรณ์

### 2.2.1 การสำรวจทางธรณีวิทยา

1. แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทยขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับชุด F2153 3 และ F5122 4 ระวัง 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย
2. เข็มทิศบรรทัด
3. ค้อนธรณี
4. เครื่องมือจีพีเอส (GPS)
5. สมุดจดบันทึกพร้อมปากกา และ Making pen
6. โปรแกรม Georose (Free software)



ภาพประกอบ 2.35 แสดงเครื่องมือเดินสำรวจทางธรณีวิทยา

## 2.2.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์

### 2.2.2.1. การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท

1. ABEM TERRAMETER รุ่น SAS 1000
2. แบตเตอรี่พร้อมสายเชื่อม
3. แท่งเหล็กจำนวน 10 แท่ง
4. ตลับเมตรจำนวน 6 ม้วน
5. เครื่องมือจีพีเอส (GPS)
6. เข็มทิศบรินตัน
7. แท่งไม้ 36 อัน
8. ค้อน 2 อัน
9. สายไฟจำนวน 4 ม้วน
10. เครื่องมือสื่อสารระยะไกล



ภาพประกอบ 2.36 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท



### 2.2.2.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

1. ABEM TERRAMETER รุ่น SAS 1000 พร้อมสายเชื่อมต่อ
2. ELECTRODE SELECTOR 464 TERRAMETER SYSTEM
3. แบตเตอรี่พร้อมสายเชื่อมต่อ
4. แท่งเหล็กจำนวน 40 แท่ง
5. ตลับเมตรจำนวน 2 ม้วน
6. เครื่องมือจีพีเอส (GPS)
7. เข็มทิศโบราณตั้ง
8. สายเคเบิลจำนวน 40 เส้น
9. ค้อน 3 อัน
10. สายเคเบิลระบบหลายขั้วจำนวน 4 เส้น



ภาพประกอบ 2.37 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ



### 2.2.2.3 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเรดาร์หยั่งลึก

1. หน้าจอแสดงผล (MALA XV Monitor)
2. หน่วยควบคุม
3. Rough Terrain Antenna ความถี่ 30 MHz
4. เครื่องมือจีพีเอส (GPS)
5. เข็มทิศบรรทัด
6. ตลับเมตรจำนวน 2 ม้วน
7. แท่งไม้ 24 อัน
8. สเปรย์ 1 กระป๋อง
9. ค้อน 2 อัน



ภาพประกอบ 2.38 แสดงอุปกรณ์การสำรวจด้วยวิธีการเรดาร์หยั่งลึก

## 2.3 วิธีดำเนินการ

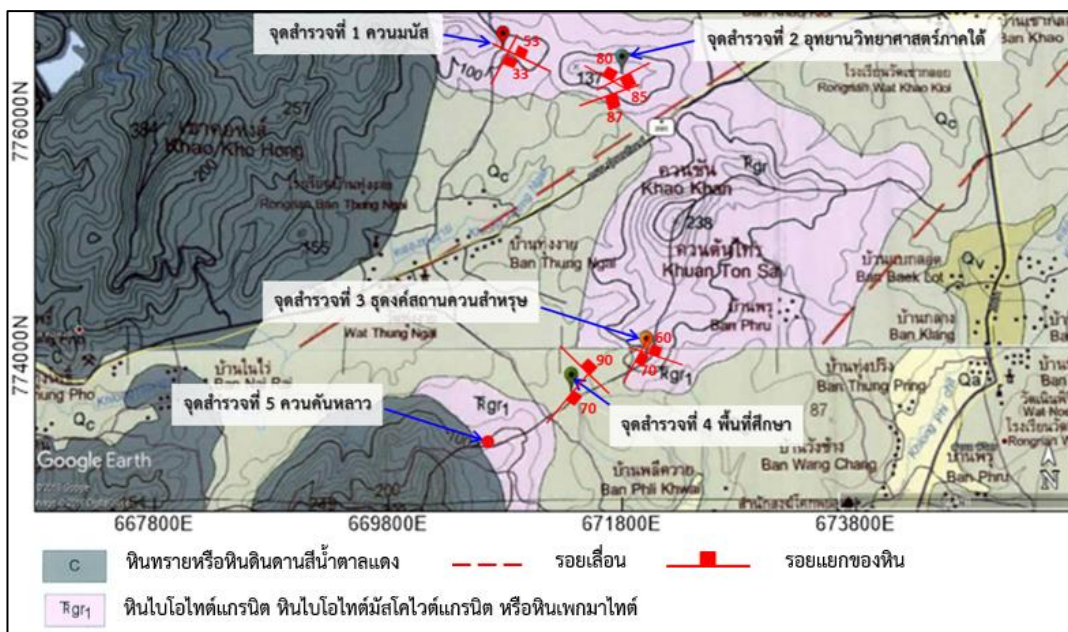
### 2.3.1 การสำรวจทางธรณีวิทยา

การเก็บข้อมูลสำรวจของงานวิจัยครอบคลุมภูเขาล้อมรอบพื้นที่โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวิวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดสงขลา มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

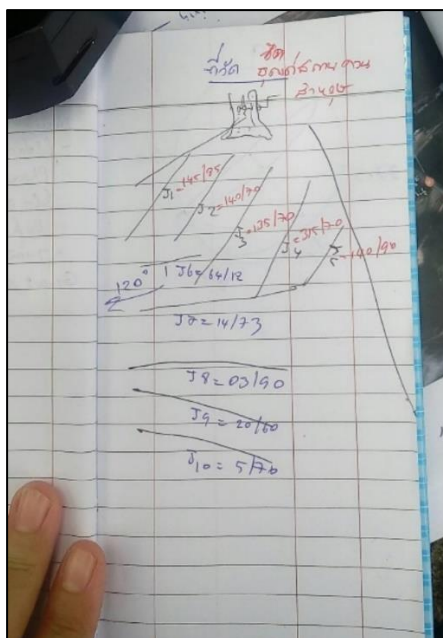
1. รวบรวมและศึกษาข้อมูลพื้นฐาน เช่น แผนที่ธรณีวิทยา ชนิดของหิน รอยเลื่อน วิธีการใช้เข็มทิศบรรทัด และการอ่านค่าเพื่อจดบันทึก เป็นต้น
2. ลงพื้นที่สำรวจบริเวณภูเขาควนคั่นหลาว, จุดตั้งสถานควนสำหรับ, ควนมนัส, อุทยานวิทยาศาสตร์ภาคใต้, และพื้นที่โดยรอบของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวิวัฒน์ตามตารางที่ 2.3 และภาพประกอบ 2.39 ด้วยเข็มทิศบรรทัดในการวัดค่าแนวระนาบรอยแยก (Strike direction) ของหิน และมุมเท (Dip angle) มาจดบันทึกค่าแบบระบบอะซิมุมตามภาพประกอบ 2.40 พร้อมทั้งระบุชนิดของหิน และถ่ายภาพพร้อมกับการวางมาตราส่วนด้วยปากกา หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)
3. ชูดข้อมูลที่ได้จากการสำรวจนำมากรอกลงบนโปรแกรม Georose (Free software) เพื่อมาสร้างตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ (Stereonet) และแผนภาพกุหลาบ (Rose diagram)
4. นำตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศและแผนภาพกุหลาบมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดทิศทางการวางตัวของรอยแยกเปรียบเทียบกับภาพถ่ายรอยแยกของหินในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2.3 สรุปการตำแหน่งการสำรวจทางธรณีวิทยา

จุดสำรวจ	พิกัดตะวันออก	พิกัดเหนือ	ตำแหน่ง
1	670677	776482	ควนมนัส
2	671453	776388	อุทยานวิทยาศาสตร์ภาคใต้
3	671903	773978	จุดตั้งสถานควนสำหรับ
4	671269	773688	บ้านสวนธนวิวัฒน์
5	670174	773220	ภูเขาควนคั่นหลาว



ภาพประกอบ 2.39 แสดงตำแหน่งสำรวจทางธรณีวิทยาและรอยแยก (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับชุด F2153 3 และ F5122 4 ระวัง 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย)



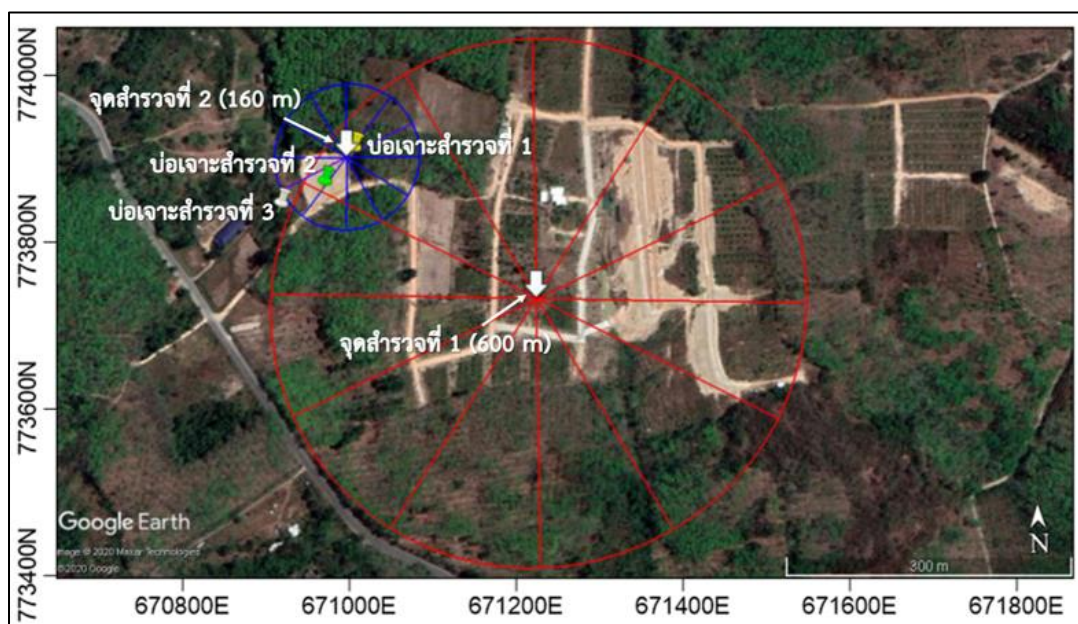
ภาพประกอบ 2.40 วิธีการจดบันทึกด้วยการอ่านค่าเข็มทิศบรรทัดพร้อมภาพประกอบทิศทางของแนวรอยแยก

### 2.3.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท

การเก็บข้อมูลสำรวจของงานวิจัยครอบคลุมบริเวณโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดสงขลา มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ลงพื้นที่สำรวจและรวบรวมข้อมูล เพื่อวางแผนกำหนดระยะทางและออกแบบวิธีการสำรวจ
2. กำหนดทิศทางทุก 30 องศา (0-360) ด้วยเข็มทิศ พร้อมทั้งปักไม้ร่วมกับใช้ GPS เพื่อนำไปลงบนโปรแกรม Google Earth ตามภาพประกอบ 2.41
3. นำแท่งเหล็กจำนวน 2 แท่งตอกลงพื้นดินระหว่างกึ่งกลางวางเครื่องมือ และคล้องสายตลับเมตรข้างละ 1 อัน วางลงราบกับพื้นและเดินไปตามระยะทาง โดยจุดสำรวจที่ 1 มีระยะ AB/2 มากสุด 300 เมตร จุดสำรวจ 2 มีระยะ AB/2 มากสุด 80 เมตร ตามตารางที่ 2.4
4. การสำรวจเลือกออกแบบวิธีการวางขั้วไฟฟ้าในรูปแบบขั้วลัมเบอร์เจอร์ด้วยการปักแท่งเหล็กหรืออิเล็กโทรดพันกับสายไฟจำนวน 2 ม้วน ขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (Electrodes, AB) ไม้ด้านนอกจำนวน 1 คู่ และปักแท่งอิเล็กโทรดพันกับสายไฟจำนวน 2 ม้วน เป็นขั้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrodes, MN) ไม้ด้านในจำนวน 1 คู่ ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าประมาณ  $5MN \leq AB$  การดำเนินการวัดจะทำการขยายขั้วกระแสไฟฟ้าและขั้วศักย์ไฟฟ้าออกไปเรื่อยๆ จนครบระยะทาง AB/2 ที่กำหนดเอาไว้
5. สายไฟฟ้าจำนวน 4 ม้วนจะมีตัวเชื่อมต่อไปยังเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ABEM TERRAMETER รุ่น SAS 1000) เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ตำแหน่งการปักขั้วไฟฟ้า AB และ MN ต่างๆ ตามที่กำหนดไว้จนเสร็จเรียบร้อยของแต่ละทิศทางของแนววัด จากนั้นจึงทำการวัดในแนววัดถัดไปทุกๆ 30 องศา และทำการสลับขั้วไฟฟ้าตามตารางที่ 2.5 จัดบันทึกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละแนววัด และนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของแต่ละตำแหน่งวัดของแต่ละแนว
6. นำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้แต่ละองศาแนววัดมาพล็อตลงบนแผนภาพโพลาริโดแกรมในโปรแกรม Excel ของ Microsoft 365 ทิศทางระนาบของรอยแยก (Strike direction) พิจารณาจากแกนหลักของวงรีของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุด ( $\rho_{max}$ )

7. นำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสูงสุด ( $\rho_{max}$ ) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ตั้งฉากกับระนาบรอยแยกและมีค่าน้อยสุด ( $\rho_{min}$ ) ที่ได้แต่ละองศา มาหาค่าในสมการสัมประสิทธิ์ของความไม่ต่อเนื่อง ( $\lambda$ ) และความพรุนของหิน ( $\phi$ )
8. นำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏมาสร้างกราฟต้นแบบ log-log scale และกราฟแท่งบนโปรแกรม Winsev 6.4 (Shareware) เพื่อหาชั้นความหนาและความลึกของชั้นดิน



ภาพประกอบ 2.41 แสดงตำแหน่งจุดสำรวจที่ 1 และ 2 พร้อมเส้นสำรวจทุก 30 องศา (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)

ตารางที่ 2.4 สรุปการวางเส้นแนวสำรวจร่วมกับการหมุนทุก 30 องศา

แนวสำรวจ	องศา	พิกัดตะวันออก	พิกัดเหนือ	ขั้วไฟฟ้า (AB, MN)
1	0	671282	774010	ตรง
	180	671282	773445	สลับ
2	30	671436	773963	ตรง
	210	671126	773490	สลับ
3	60	671538	773021	ตรง
	240	671022	773610	สลับ
4	90	671565	773730	ตรง
	270	670997	773730	สลับ

แนวสำรวจ	องศา	พิกัดตะวันออก	พิกัดเหนือ	ชั้นไฟฟ้า (AB, MN)
5	120	671533	773598	ตรง
	300	671030	773860	สลับ
6	150	671423	773484	ตรง
	330	671143	773975	สลับ

ตารางที่ 2.5 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ 0 องศา

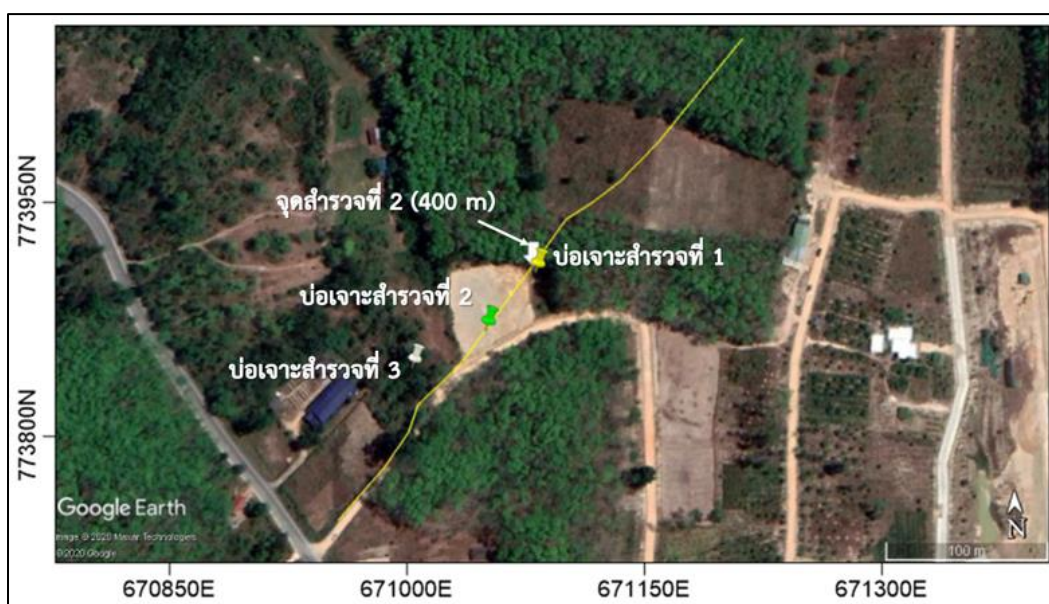
AB/2	MN	K	R (ตรง)	R (สลับ)	$\rho_a$ (ตรง)
1.5	0.5	6.3	534.1700	534.4100	3365.2710
2	0.5	11.8	278.2400	278.2700	3283.2320
3	0.5	27.5	114.3300	114.3600	3144.0750
4	0.5	49.5	60.7110	60.6470	3005.1945
4	1	23.6	135.4700	135.4500	3197.0920
6	1	55.0	65.6870	65.6610	3612.7850
8	1	99.0	34.2440	34.1660	3390.1560
10	1	155.5	22.8530	22.7580	3553.6415
10	2	75.4	54.8790	54.7570	4137.8766
15	2	173.6	24.0320	23.9540	4171.9552
20	2	311.0	11.6030	11.9210	3608.5330
20	5	117.8	31.3460	31.6690	3692.5588
25	5	188.5	18.7840	18.7310	3540.7840
30	5	274.9	11.3130	12.8210	3109.9437
40	5	494.8	5.0297	6.3103	2488.6956
50	5	777.5	3.0896	2.9116	2402.1640
50	10	377.0	6.0362	5.2201	2275.6474
60	10	549.8	3.6633	3.4139	2014.0823
80	10	989.6	1.5070	1.6454	1491.3272
100	10	1555.1	1.2960	0.3929	2015.4096
100	20	754.0	1.8428	1.1093	1389.4712



AB/2	MN	K	R (ตรง)	R (สลับ)	$\rho_a$ (ตรง)
120	20	1099.6	1.2199	1.2929	1341.4020
140	20	1508.0	1.0298	0.9718	1552.9384
160	20	1979.2	0.7610	0.7684	1506.1712

### 2.3.3 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

1. ลงพื้นที่สำรวจจุดที่ 2 บริเวณบ่อน้ำบาดาลและทำการรวบรวมข้อมูลและวางแผนให้ครอบคลุมตำแหน่งบ่อเจาะน้ำบาดาลที่ 1 และ 2
2. ใช้ตลับเมตรวางเส้นแนวสำรวจจากทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ – ทิศตะวันออกเฉียงเหนือตามตารางที่ 2.6
3. เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ABEM TERRAMETER รุ่น SAS 1000 เชื่อมต่อไปยังเครื่อง ELECTRODE SELECTOR 464 TERRAMETER SYSTEM เป็นสวิทช์ควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อไปยังสายเคเบิลแบบระบบหลายขั้วจำนวน 4 เส้น สายเคเบิลแต่ละเส้นมีจุดเชื่อมต่อกับขั้วอิเล็กโทรด 21 จุด แต่ละจุดห่างกัน 5 เมตร 10 ขั้ว รวมระยะทางทั้งหมด 400 เมตร โดยเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ตรงกึ่งกลางที่ระยะทาง 200 เมตรตามภาพประกอบ 2.42
4. วางสายเคเบิลจำนวนข้างละ 2 เส้น พร้อมกับปักแท่งอิเล็กโทรดพร้อมสายคิป์โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 10 เมตร
5. ทำการวัดแบบอัตโนมัติโดยเลือกรูปแบบการวัดโดยใช้กระบวนขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล มีข้อมูลทั้งหมด 414 ข้อมูลภายใต้แนววัดความยาว 400 เมตร
6. ข้อมูลการวัดจะถูกบันทึกผลเป็นไฟล์ข้อมูลและนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม RES2DINV version 3.53 โดยการทำ Inversion ของข้อมูลออกมาเป็นแผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามภาพประกอบ 2.19 เพื่อทำการวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูล เพื่อหาตำแหน่งของรอยแตกและลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดิน



ภาพประกอบ 2.42 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติบนเส้นสำรวจ (สีเหลือง) (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)

ตารางที่ 2.6 สรุปการวางเส้นแนวสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

แนวสำรวจ	ตำแหน่ง	พิกัดตะวันออก	พิกัดเหนือ
1	เริ่มต้น	670960	773739
	สิ้นสุด	671217	774028

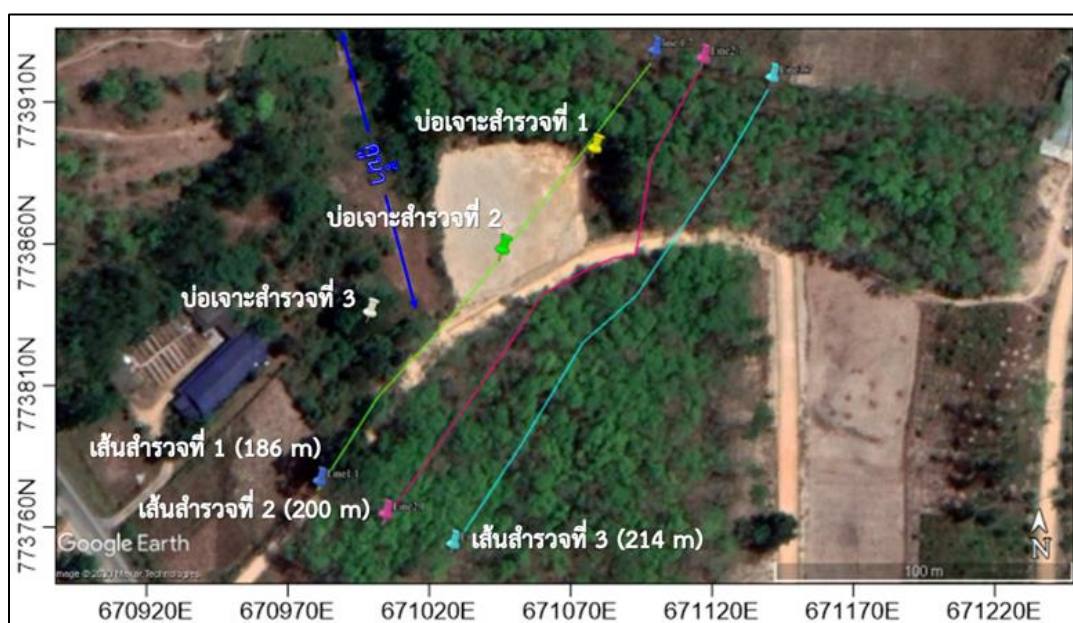
### 2.3.4 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเรดาร์หยั่งลึก

1. ลงพื้นที่สำรวจและรวบรวมข้อมูล เพื่อวางแผนกำหนดระยะทางและออกแบบวิธีการสำรวจ
2. การสำรวจจุดที่ 2 บริเวณบ่อน้ำบาดาลได้ออกแบบแนวเส้นสำรวจทั้งหมด 3 แนว โดยแนวเส้นสำรวจที่ 1 มีระยะทางทั้งหมด 186 เมตร แนวสำรวจที่ 2 ห่างออกจากแนวสำรวจที่ 1 ทางด้านขนานด้วยระยะทาง 23 เมตร และมีระยะทางทั้งหมด 200 เมตร แนวสำรวจที่ 3 ห่างออกจากแนวสำรวจที่ 2 ทางด้านขนานด้วยระยะทาง 23 เมตร และมีระยะทางทั้งหมด 214 เมตรตามภาพประกอบ 2.43 และตารางที่ 2.7
3. การสำรวจมีการตั้งค่าในเครื่องมือตามตารางที่ 2.8 และจัดวางเสาอากาศในรูปแบบ Common offset โดยเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณมีระยะห่าง 6.2 เมตร โดย



ตัวรับและตัวส่งทั้งสองจะถูกเคลื่อนที่ไปพร้อมกันตามระยะทางที่ออกแบบไว้ใน ข้อ 2 และ เครื่องมือทำการบันทึกผล

- ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจนำมาประมวลผลบนโปรแกรม REFLEXW v.8.1 ตาม ภาพประกอบ 2.34 เมื่อได้เรดาร์แกรมนำมาวิเคราะห์หาความเร็วเฟส ( $V_m$ ), ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของวัสดุ ( $\epsilon_r$ ) และ Skin depth ( $\delta$ )



ภาพประกอบ 2.43 แสดงตำแหน่งเส้นสำรวจที่ 1, 2 และ 3 (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)

ตารางที่ 2.7 สรุปตำแหน่งการวางเส้นแนวสำรวจเรดาร์หยั่งลึก

แนวสำรวจ	ตำแหน่ง	พิกัดตะวันออก	พิกัดเหนือ
1	เริ่มต้น	670986	773766
	สิ้นสุด	671104	773918
2	เริ่มต้น	671009	773756
	สิ้นสุด	671121	773917
3	เริ่มต้น	671033	773745
	สิ้นสุด	671145	773910

ตารางที่ 2.8 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลวิธีเรดาร์หยั่งลึก

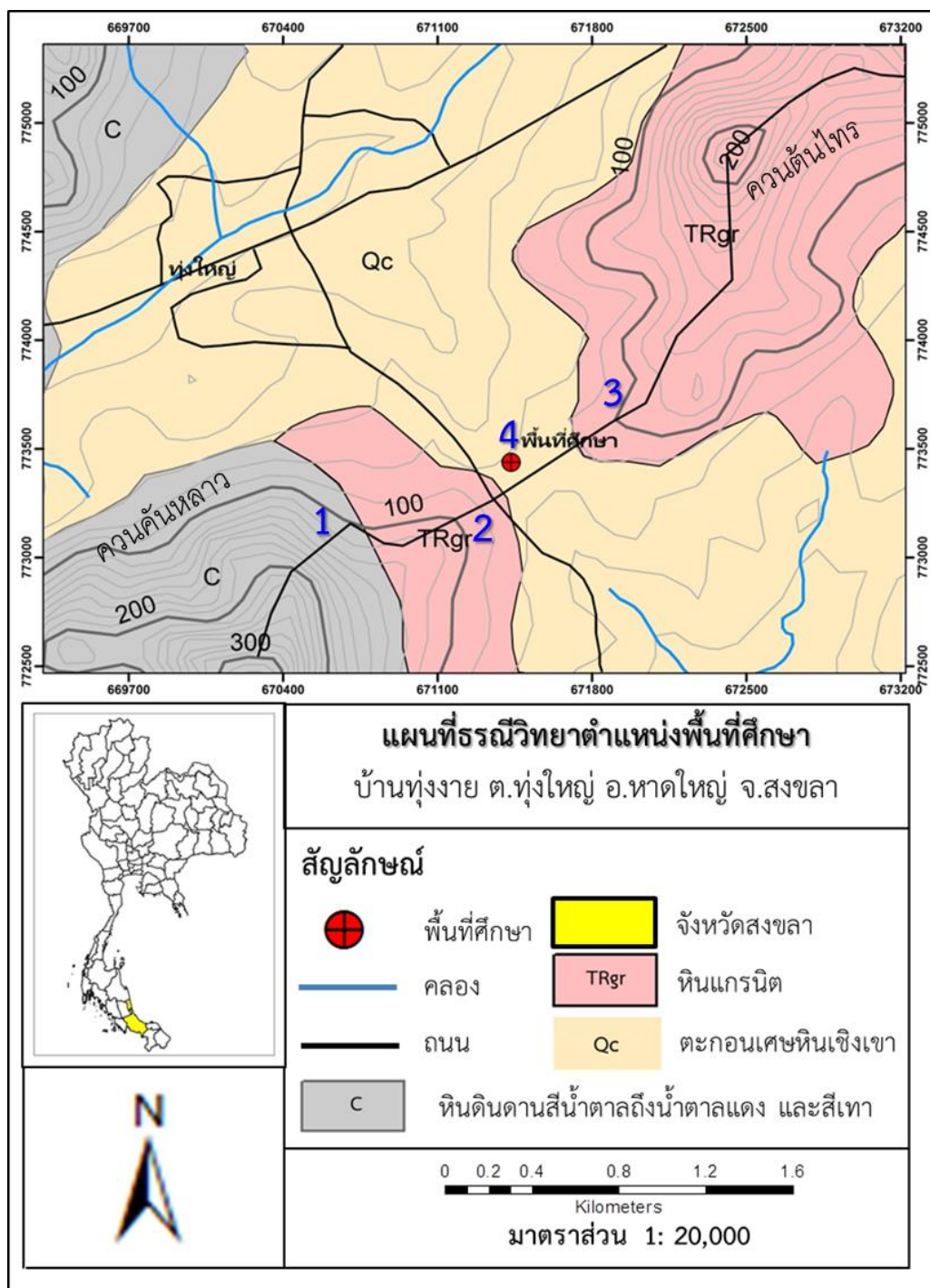
รายละเอียด	ค่าที่เลือก
Antenna	30 MHz
Sampling frequency	440.39 MHz
Stack	16
Time window	1094.5 ns (57.19 m., 512 smp)
Position interval	0.050 m.

## บทที่ 3

### ผลและวิเคราะห์

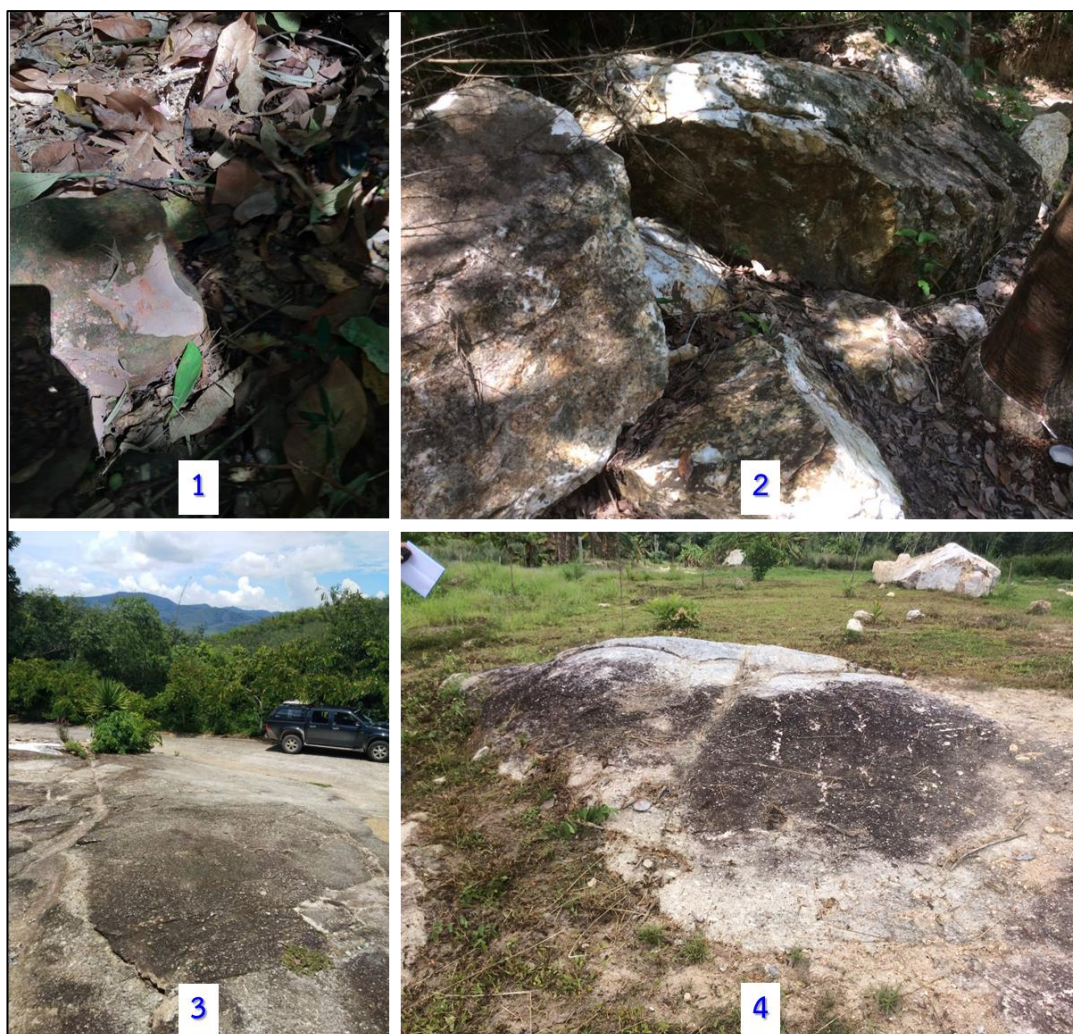
#### 3.1 ผลจากการสำรวจทางด้านธรณีวิทยาโดยรอบพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ศึกษา

การสำรวจทางด้านธรณีวิทยาพบว่าลักษณะทางธรณีสัมพันธ์ (Morphology) ของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งนาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดสงขลา มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่ประกอบด้วยตะกอนร่วนยุคควอเทอร์นารี (Quaternary, Q) เป็นแอ่งตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนหินผุ (Qc) ที่มีลักษณะเป็นแอ่งถูกขนาบข้างด้วยภูเขาควนต้นไทร และภูเขาควนคันทลาวตามภาพประกอบ 3.1 ลักษณะธรณีวิทยาของภูเขาควนคันทลาวพบว่ามีหินดินดาน (Shale) แทรกสลับด้วยหินเพกมาไทต์ (Pegmatite) ตามภาพประกอบ 3.2(1) และ 3.2(2) วางตัวอยู่ล่างสุดทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษาหรือที่เรียกว่า “หินเดิม (Country rock)” ถูกแทรกดันด้วยหินแกรนิตที่ปรากฏทางด้านทิศตะวันออกบนภูเขาควนต้นไทร เมื่อหินแกรนิตถูกแทรกดันและโผล่ขึ้นมาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เนื่องจากอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนไปทำให้เกิดแนวแยก (Joint), รอยแตก (Fracture) และรอยเลื่อน (Fault) จากนั้นถูกแทรกดันขึ้นมาด้วยหินแกรนิตในช่วงยุคไทรแอสซิก (TRgr) ที่ปรากฏทางด้านทิศตะวันออกของภูเขาควนต้นไทรตามภาพประกอบ 3.2(3) รวมทั้งการแตกหักผุพังเป็นเปลือกหิวหอมตามสภาพของอุณหภูมิและความดันที่มีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลึกแร่ประกอบหิน (Alteration mineral) ในขณะเดียวกันกับกระบวนการผุพัง (Erosional processing) เกิดขึ้นทั้งในหินเดิมและหินแกรนิตที่ถูกแทรกดันจึงเกิดการสะสมลงในแอ่ง เนื่องจากสภาพอากาศร้อนชื้น แลบนเส้นศูนย์สูตรทางภาคใต้มีอิทธิพลต่ออัตราการผุพังของหินแกรนิตที่ค่อนข้างรุนแรงและรวดเร็ว ทำให้เกิดตะกอนสะสมตัวเป็นชั้นหนาจนถึงหนามาก ส่วนใหญ่ตะกอนที่ถูกสะสมจะเป็นกลุ่มดินทรายและทรายแป้ง เช่น Silty sand (SM), Silty gravel (GM), Silt (ML) และมีตะกอนกลุ่ม Clayey sand (SC) เกิดจากกระบวนการผุพังของหินดินดานที่มาปะปน



ภาพประกอบ 3.1 แผนที่ธรณีวิทยาแสดงตำแหน่งการสำรวจ บริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ศึกษา





ภาพประกอบ 3.2 แสดงชนิดของหินบริเวณจุดสำรวจที่ (1) เป็นหินดินดานมีสีเทาในบริเวณภูเขาควนคันทลาว (2) เป็นหินเพกมาไทต์ในบริเวณภูเขาควนคันทลาว (3) หินแกรนิตในช่วงยุคไทรแอสซิกบนภูเขาควนตันไทร บริเวณจุดตั้งศาลาควนสำหุรุษ และ (4) เป็นหินแกรนิตในพื้นที่ศึกษา

บริเวณพื้นที่ศึกษายังพบหินแกรนิตต้นแทรกตัวขึ้นมาและกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนบริเวณพื้นผิวดินตามภาพประกอบ 3.2(4) หินแกรนิตจัดอยู่ในหมวดหินอัคนี (Igneous rocks) หรือเรียกว่า “หินอัคนีแทรกซอน (Intrusive igneous rocks)” ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวของหินหนืด (Magma and lava) ภายใต้ผิวโลก และใช้เวลาเย็นตัวอย่างช้าๆ จนกระทั่งแข็งตัว มีเนื้อผลึกของแร่ขนาดหยาบและส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแสดงหน้าผลึกเกาะประสานตัวกันแน่นสนิท (Interlocking texture) ส่วนใหญ่หินแกรนิตที่พบในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นหินไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิต (Biotite-muscovite granite; TRgr<sub>1</sub>) ที่มีเนื้อละเอียดถึงเนื้อหยาบ และมีเนื้อดอก อีกทั้งยัง

มีผลึกเฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ตามภาพประกอบ 3.3 บางส่วนของหินแกรนิตยังพบสายแร่ควอตซ์ขนาดใหญ่แทรกสลับ นอกจากนี้บริเวณพื้นที่ศึกษายังพบกรวดขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ที่เกิดจากเศษหินพัฒนามาจากบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงและมาสะสมตัวอยู่ในพื้นที่ ตะกอนเหล่านี้มาจากการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะธรณีสัณฐานของตะกอนที่สะสมตัวเกิดจากกระบวนการทางน้ำบนแผ่นดินกับตะกอนที่สะสมตัวจากน้ำทะเล ส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนร่วนหรือตะกอนกึ่งแข็งตัวที่ผุพังจากหินต้นกำเนิดที่เกิดการพัดพาจากภูเขาที่อยู่รอบๆ โดยมีตัวกลางที่แตกต่างกัน เช่น ทางน้ำ คลื่น กระแสน้ำขึ้นและลง เป็นต้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนบนหินแข็ง และพบกระจายตัวตามแนวลุ่มน้ำและที่ราบตามทั่วไป โดยพื้นที่ทำการศึกษาระดับจะจัดอยู่ในหน่วยของตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนหินผุ (Colluvial and residual deposits, Qc) โดยอ้างอิงจากแผนที่ธรณีวิทยาของจังหวัดสงขลา



ภาพประกอบ 3.3 แสดงผลึกเฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ในหินไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิต

ดังนั้นลำดับชั้นหินของบริเวณพื้นที่ศึกษาจะประกอบด้วยหน่วยหิน 3 ชุดหลักๆ ซึ่งเรียงจากอายุอ่อนไปยังอายุแก่ตามลำดับ ได้แก่

1. หินอายุควอเทอร์นารี (Qc) ประกอบด้วยตะกอนเศษหินเชิงเขา เช่น กรวด, ทราย และดินลูกรัง

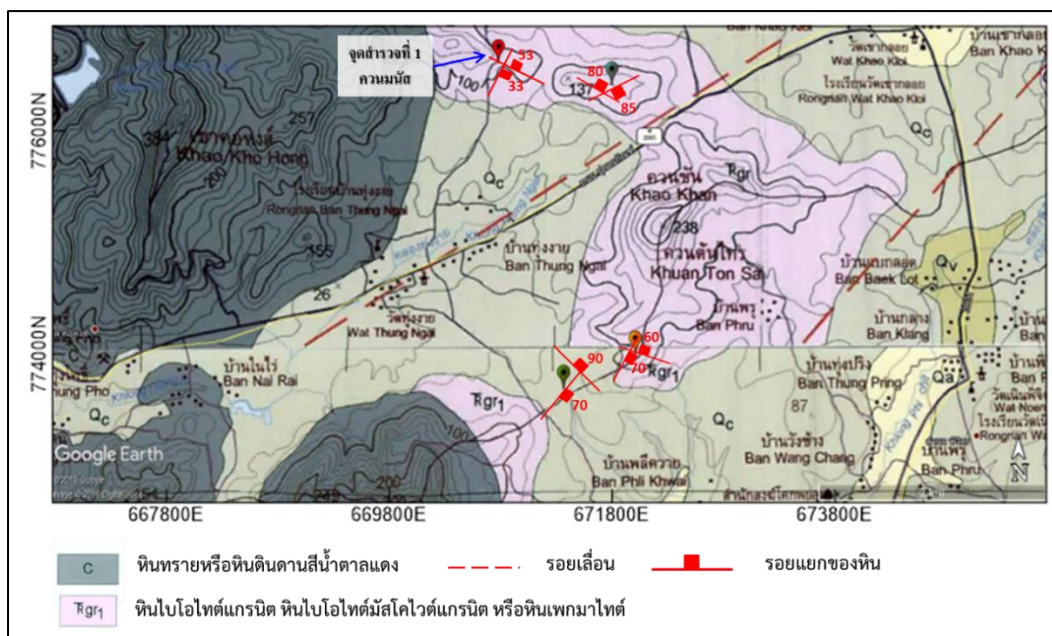
2. หินอายุไทรแอสซิก (TR) ประกอบด้วยหินแกรนิตที่มีหินไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิต (TRgr<sub>1</sub>) และหินเพกมาไทต์ที่มีเนื้อละเอียดถึงเนื้อหยาบ แร่ดอกเป็นแร่เฟลด์สปาร์รูปผลึกชัดเจน
3. หินอายุคาร์บอนิเฟอรัส (C) ประกอบด้วยหินทรายและหินดินดานที่มีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลแดง และสีเทา

### 3.2 ผลการศึกษาจากการสำรวจทางด้านธรณีวิทยาด้วยการวัดทิศทางของระนาบรอยแยก

#### 3.2.1 จุดสำรวจที่ 1 บริเวณควมมนัส

จุดสำรวจที่ 1 ตามภาพประกอบ 3.4 ตำแหน่งระบบพิกัดที่ 670677 ตะวันออก, 776482 เหนือ พบหินแกรนิตโผล่ (Outcrops) หรือหินไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิต (Biotite muscovite granite) ส่วนใหญ่รอยแยกของพื้นที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ภาพประกอบ 3.5 เปรียบเทียบกับ 3.6ก และ 3.7ก และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ 50 – 70 องศา (แสดงดังภาคผนวก 1 และ 3) บางส่วนมีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) ตามภาพประกอบ 3.5 เปรียบเทียบกับ 3.6ข และ 3.7ข และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงใต้ (Dip direction: SE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ 30 – 60 องศา (แสดงดังภาคผนวก 2 และ 4) ซึ่งสอดคล้องร่วมกับการวิเคราะห์บนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ (Stereonet) และแผนภาพกุหลาบ (Rose diagram) ที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลด้วยเข็มทิศรันตัน (Brunton) ซึ่งแผนภาพกุหลาบแสดงถึงความถี่ที่ประกอบด้วยทิศทางของโครงสร้างการวางตัวของแนวระนาบทั้ง 2 ทิศทาง ลักษณะของรอยแยกจากตามภาพประกอบ 3.5 พบว่าเป็นแบบเปิด (Open joints) ที่มีแร่ประกอบหินคือ แร่ควอตซ์ (Quartz), แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar), แร่ไบโอไทต์ (Biotite), แร่ไมก้า (Mica), แร่ดอกเฟลด์สปาร์ (Feldspar phenocryst) และไพรอกซีน (Pyroxene) รวมถึงพบสายแร่ควอตซ์ (Quartz vein lets)



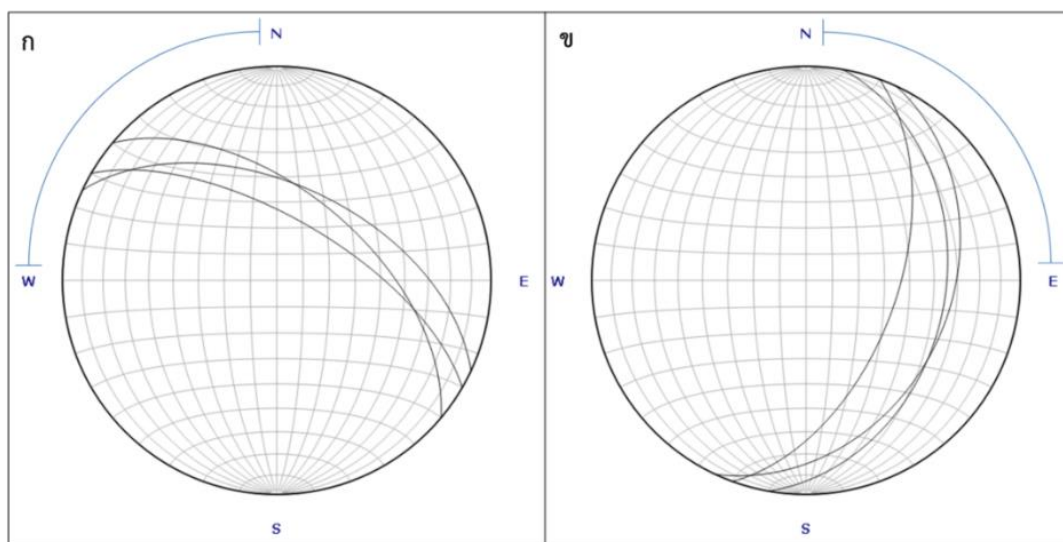


ภาพประกอบ 3.4 แสดงจุดสำรวจที่ 1 ร่วมกับทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับ ชุด F2153 3 และ F5122 4 ราว 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย และแผนที่ Google Earth)

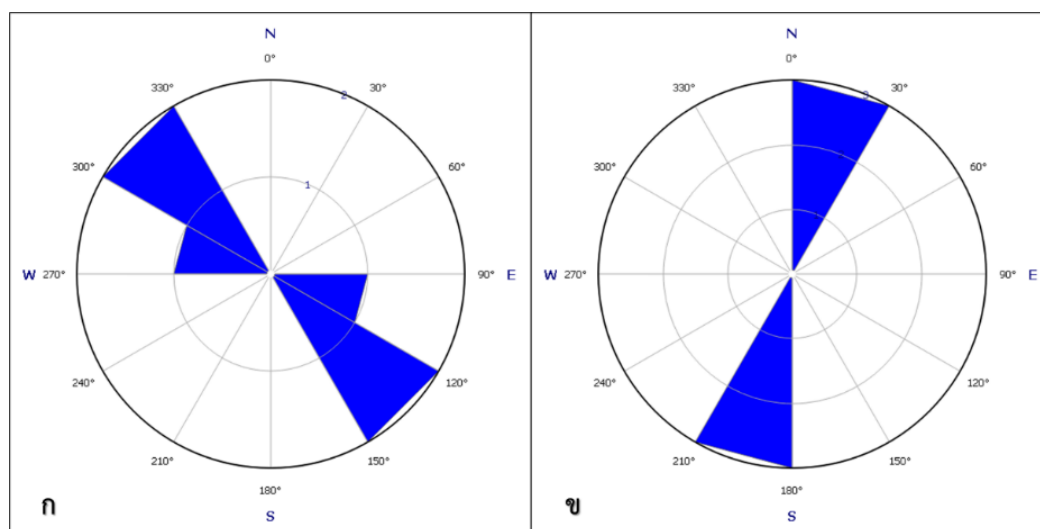


ภาพประกอบ 3.5 แสดงหินไบโอไทต์-มัสโคไวต์แกรนิตที่มีทิศทางการวางตัวของรอยแยกและแร่ประกอบหิน





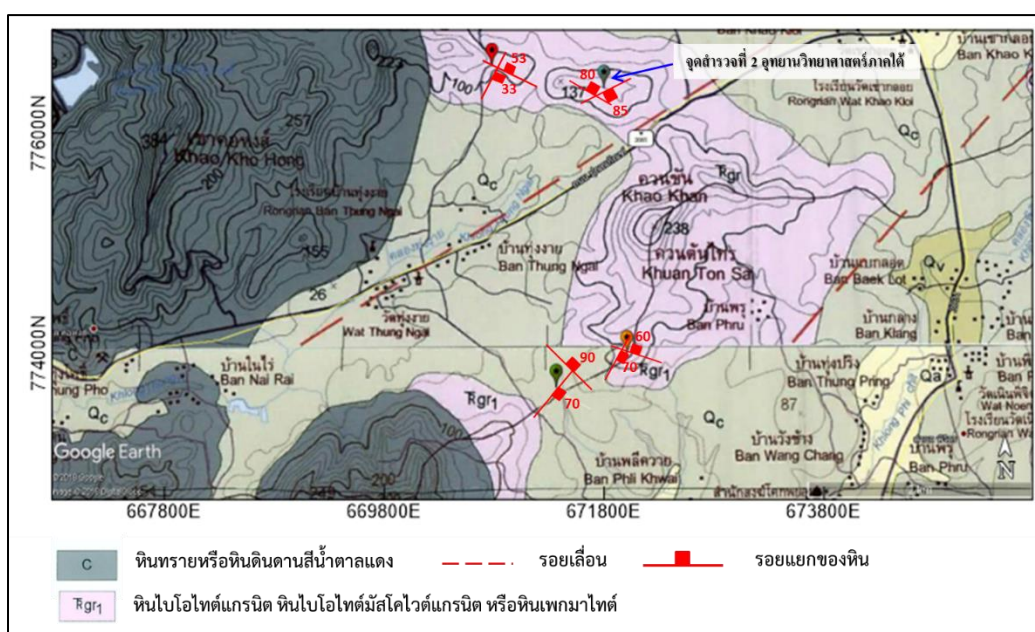
**ภาพประกอบ 3.6** ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทเอียงบนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ



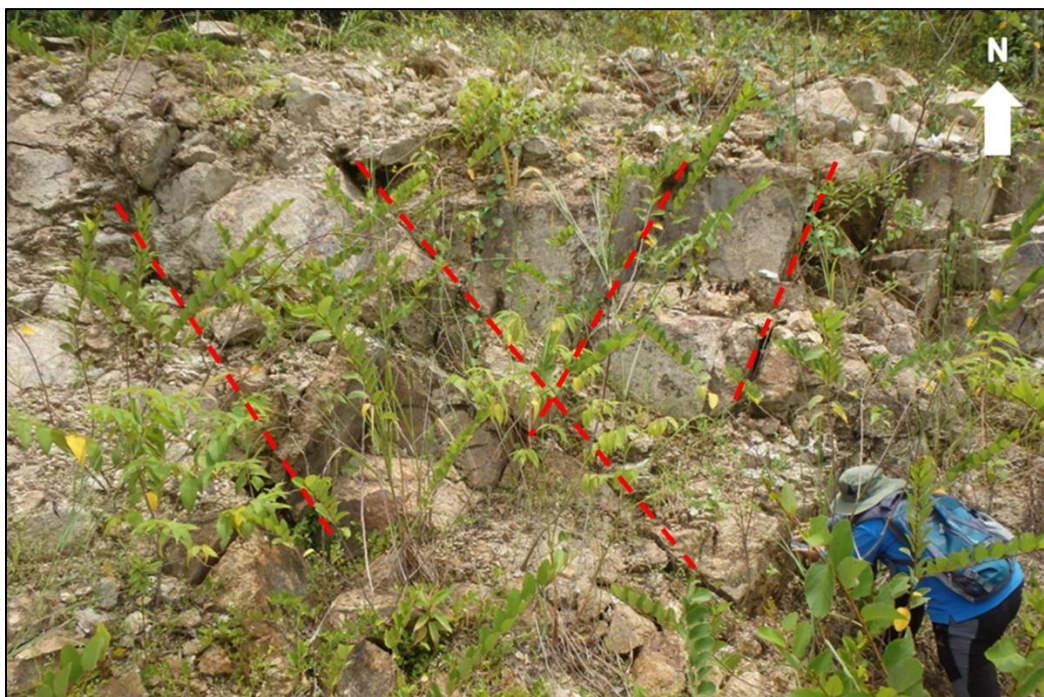
**ภาพประกอบ 3.7** ผลการศึกษาจากแผนภาพภูทาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)

### 3.2.2 จุดสำรวจที่ 2 บริเวณอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

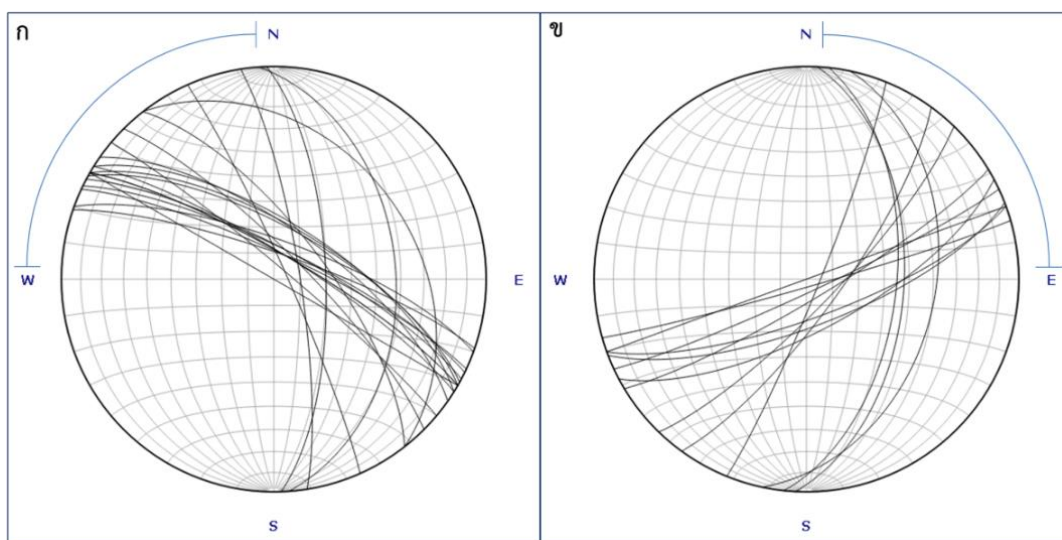
จุดสำรวจที่ 2 ตามภาพประกอบ 3.8 ตำแหน่งระบบพิกัดประมาณ 670682 ตะวันออก, 776529N เหนือ พบหินแกรนิตมีลักษณะค่อนข้างผุถึงผุกรวม (Weathering granite) ร่วมกับรอยแยกเป็นจำนวนมากจากภาพประกอบ 3.9 ที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ตามภาพประกอบ 3.9 เปรียบเทียบกับ 3.10ก และ 3.11ก และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่มีมุมเทประมาณ 30 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 1 และ 3) บางส่วนมีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) ตามภาพประกอบ 3.9 เปรียบเทียบกับ 3.10ข และ 3.11ข และระนาบเอียงไปทางตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้ (Dip direction: E และ SE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ 50 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 2 และ 4) ซึ่งสอดคล้องร่วมกับการวิเคราะห์บนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศและแผนภาพกุหลาบที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลเข็มทิศบนดิน



**ภาพประกอบ 3.8** แสดงจุดสำรวจที่ 2 ร่วมกับทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับชุด F2153 3 และ F5122 4 ระวัง 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย และแผนที่ Google Earth)

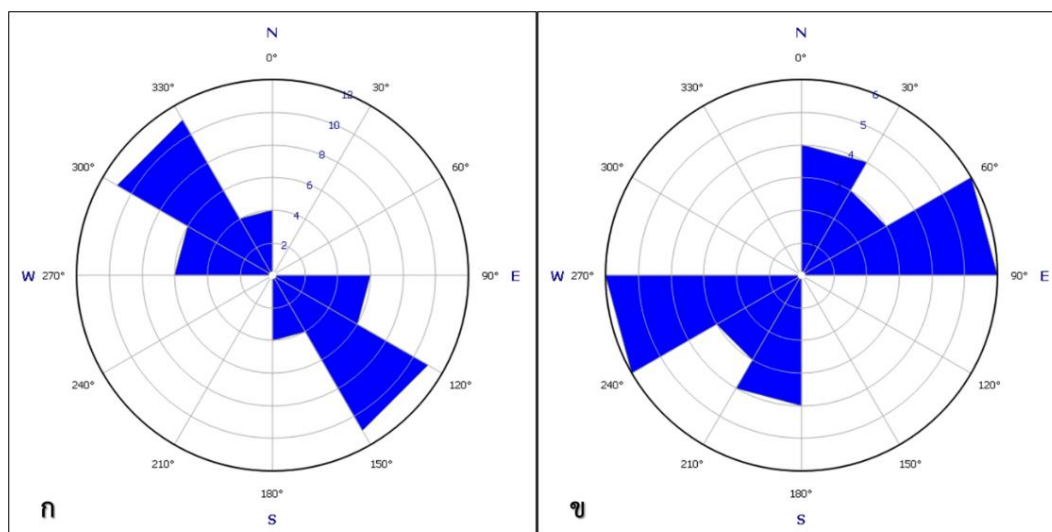


ภาพประกอบ 3.9 บริเวณอุทยานวิทยาศาสตร์ พบรอยแยกบนหินแกรนิต



ภาพประกอบ 3.10 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน  
 (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทาง  
 ตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทเอียงบนตา  
 ช่วยแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ

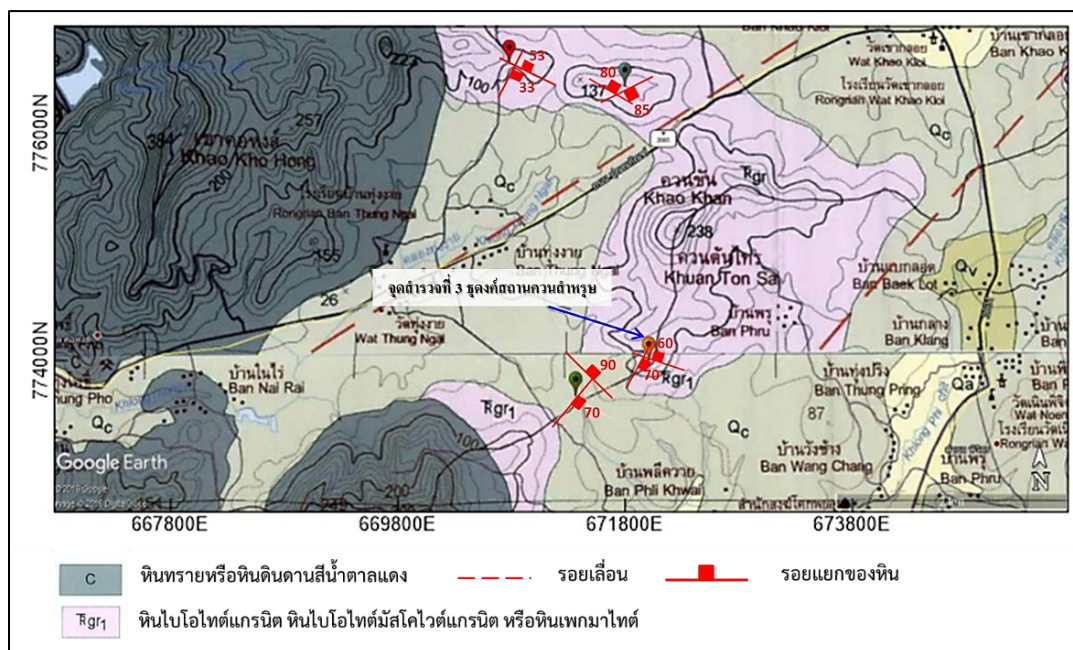




**ภาพประกอบ 3.11** ผลการศึกษาจากแผนภาพกุหลาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)

### 3.2.3 จุดสำรวจที่ 3 บริเวณจุดตั้งสถานควนสำหรับ

จุดสำรวจที่ 3 ตามภาพประกอบ 3.12 ตำแหน่งระบบพิกัดประมาณ 671903 ตะวันออก, 773978 เหนือ พบหินแกรนิตขนาดใหญ่ตามภาพประกอบ 3.13 ลักษณะของรอยแยกเป็นแบบเปิดที่มีทิศทางวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE) ตามภาพประกอบ 3.14 เปรียบเทียบกับ 3.15ก และ 3.16ก และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่มีมุมเทประมาณ 10 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 1 และ 3) บางส่วนมีทิศทางวางตัวของแนวระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) ตามภาพประกอบ 3.14 เปรียบเทียบกับ 3.15ข และ 3.16ข และระนาบเอียงไปทางตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้ (Dip direction: SE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ 50 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 2 และ 4) ซึ่งสอดคล้องร่วมกับการวิเคราะห์บนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศและแผนภาพกุหลาบที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลเข็มนาฬิกาบนพื้น แร่ประกอบหินที่พบอย่างเด่นชัดคือ แร่เฟลด์สปาร์



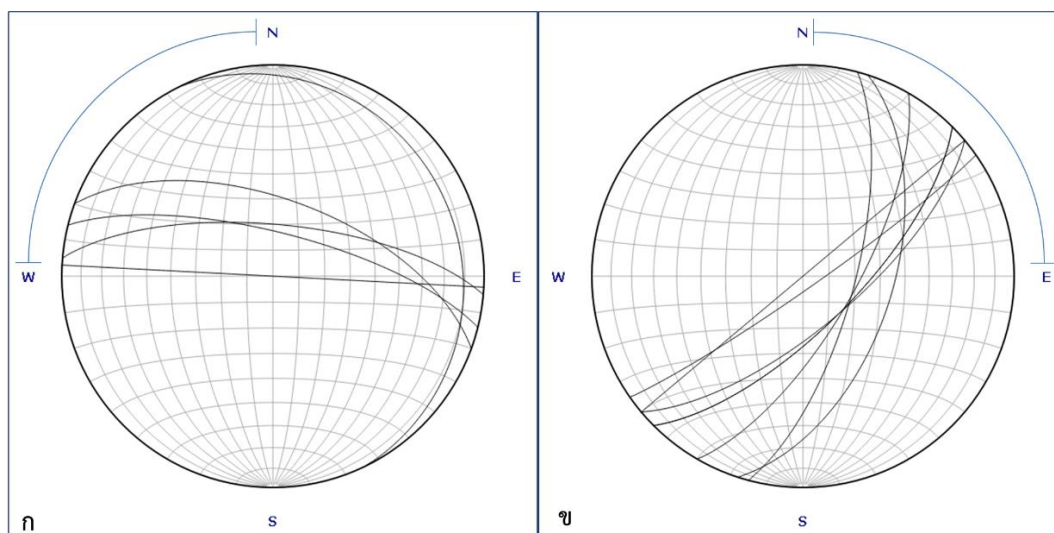
ภาพประกอบ 3.12 แสดงจุดสำรวจที่ 3 และทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับ ชุด F2153 3 และ F5122 4 ราว 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย และแผนที่ Google Earth)



ภาพประกอบ 3.13 หินแกรนิตขนาดใหญ่บริเวณจุดตั้งสถานควนสำหรับ

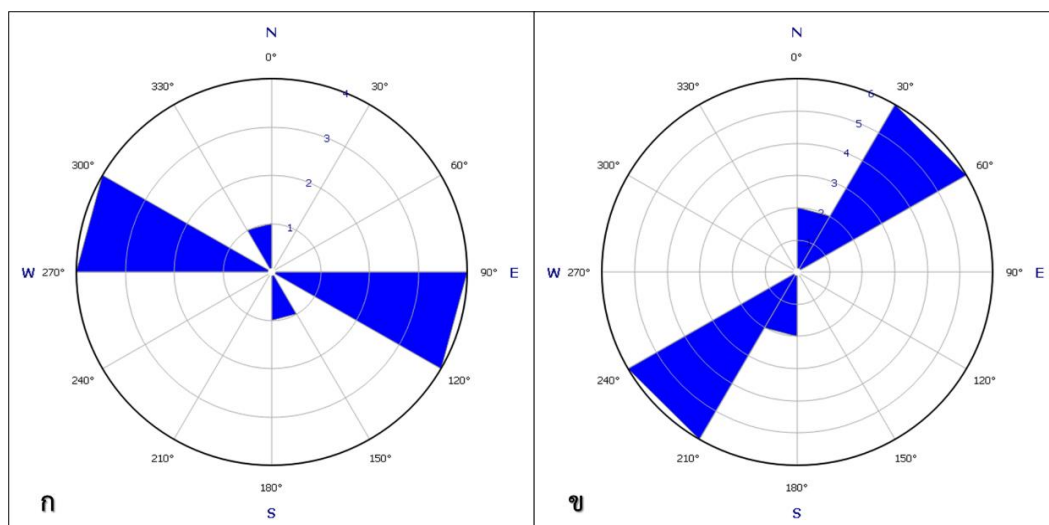


ภาพประกอบ 3.14 รอยแยกบนหินแกรนิตที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) และทิศทางการวางตัวของแนวระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)



ภาพประกอบ 3.15 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทเอียงบนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ



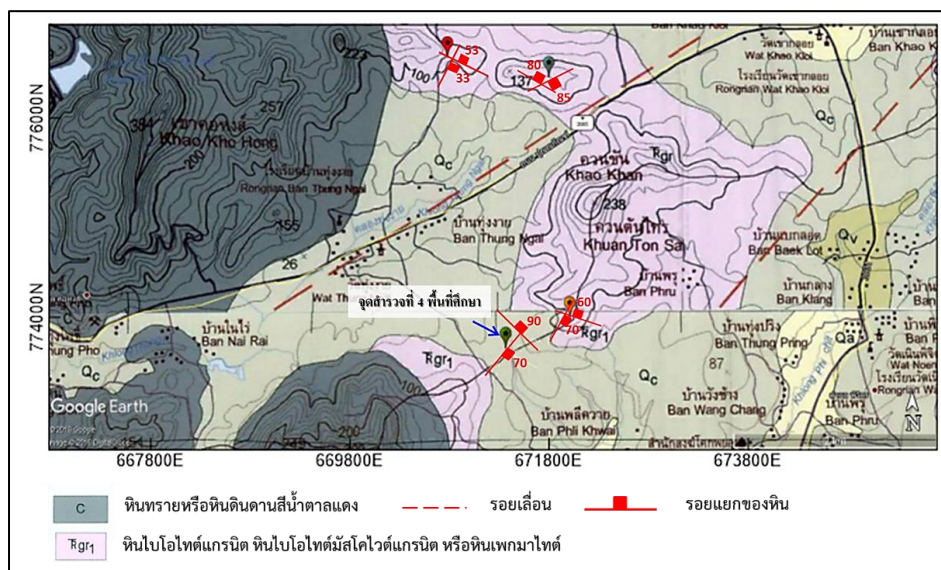


**ภาพประกอบ 3.16** ผลการศึกษาจากแผนภาพลูกกลมแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)

### 3.2.4 จุดสำรวจที่ 4 โครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์หรือบริเวณพื้นที่ศึกษา

จุดสำรวจที่ 4 ตามภาพประกอบ 3.17 ตำแหน่งระบบพิกัดประมาณ 671269 ตะวันออก, 773688 เหนือ พบการกระจายตัวของหินแกรนิตโผล่หรือหินไบโอไทต์-มัสโคไวท์แกรนิต มีลักษณะค่อนข้างผุ ตามภาพประกอบ 3.18 บางบริเวณพบหินแกรนิตโผล่มีลักษณะรอยแยกแบบเปลือกหัวหอม (Exfoliation joint) ตามภาพประกอบ 3.19 เป็นแผ่นโค้งขนานไปตามสภาพของหิน เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักกดทับที่เกิดจากฝุ่นร่อนออกไป และที่ตำแหน่งระบบพิกัดประมาณ 671363 ตะวันออก, 773722 เหนือ บริเวณห้วยของพื้นที่ศึกษาพบหินแกรนิตชนิดเดียวกันที่มีรอยแยกของหินมีลักษณะแบบปิด (Close Joints) ตามภาพประกอบ 3.20ก และแบบเปิดตามภาพประกอบ 3.20ข มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE) ตามภาพประกอบ 3.20ข เปรียบเทียบกับ 3.21ก และ 3.22ก และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ 35 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 1 และ 3) บางส่วนมีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) ตามภาพประกอบ 3.20ข เปรียบเทียบกับ 3.21ข และ 3.22ข และระนาบเอียงไปทางตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้ (Dip direction: E และ SE) ที่มีมุมเทเอียงประมาณ

50 – 90 องศา (แสดงดังภาคผนวก 2 และ 4) ซึ่งสอดคล้องร่วมกับการวิเคราะห์บนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศและแผนภาพกุหลาบที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลเข็มทิศบรรทัด ซึ่งมีแร่ประกอบหินคือแร่ควอตซ์ (Quartz), แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar), แร่ไบโอไทต์ (Biotite), แร่ไมก้า (Mica), แร่ดอกเฟลด์สปาร์ (Feldspar Phenocryst) และไพรอกซีน (Pyroxene) ตามภาพประกอบ 3.23



ภาพประกอบ 3.17 แสดงจุดสำรวจที่ 4 และทิศทางการวางตัวของรอยแยกบนแผนที่ธรณีวิทยา (คัดลอกจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย ขนาดมาตรา ส่วน 1:50,000 ลำดับชุด F2153 3 และ F5122 4 ระวัง 5123 III และ 5122 I กรมทรัพยากรธรณีประเทศไทย และแผนที่ Google Earth)

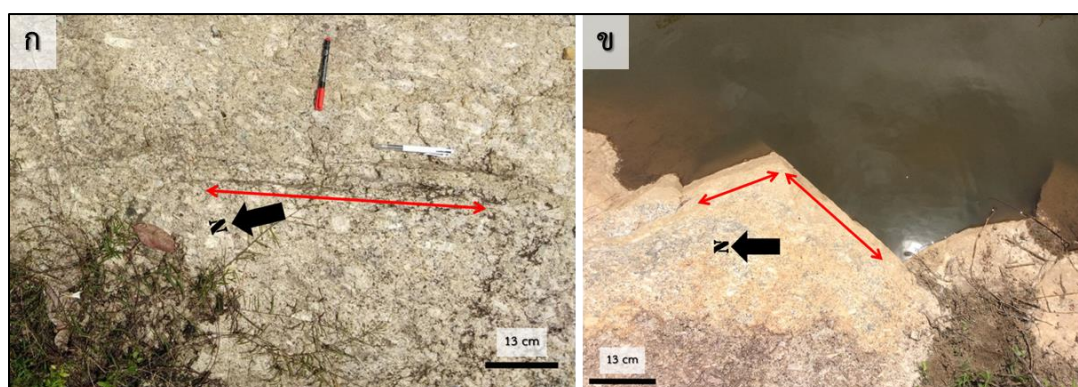


ภาพประกอบ 3.18 บริเวณพื้นที่ศึกษาพบหินแกรนิตโผล่

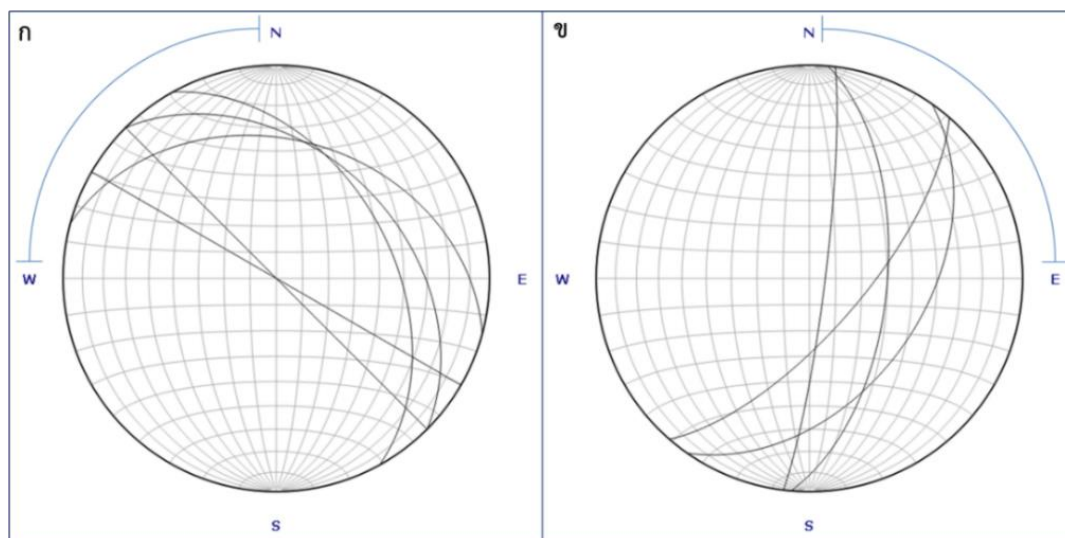




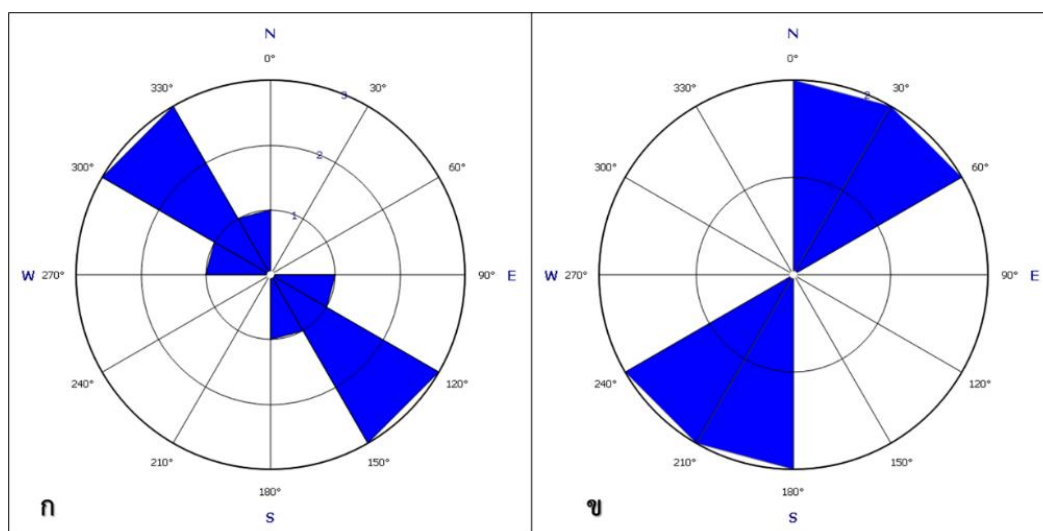
ภาพประกอบ 3.19 บริเวณพื้นที่ศึกษาพบรอยแยกบนหินแกรนิตแบบเปลือกหัวหอม



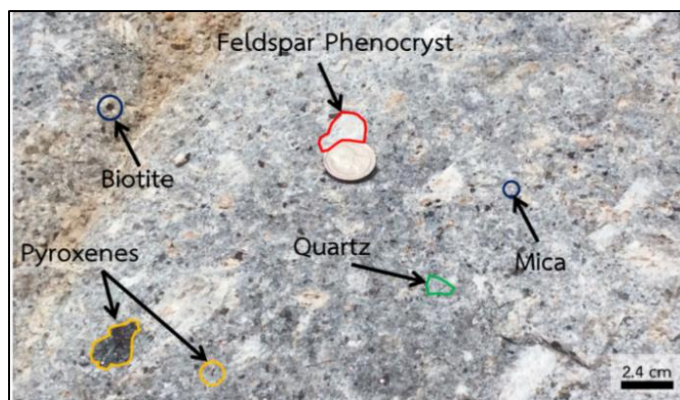
ภาพประกอบ 3.20 แสดงลักษณะ (ก) รอยแยกแบบปิด (ข) รอยแยกแบบเปิดมีทิศทางวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) และวางตัวในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)



ภาพประกอบ 3.21 ผลการศึกษาจากแสดงทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และมุมเทเอียงบนตาข่ายแบบจำลองเชิงเส้นรอบทิศ

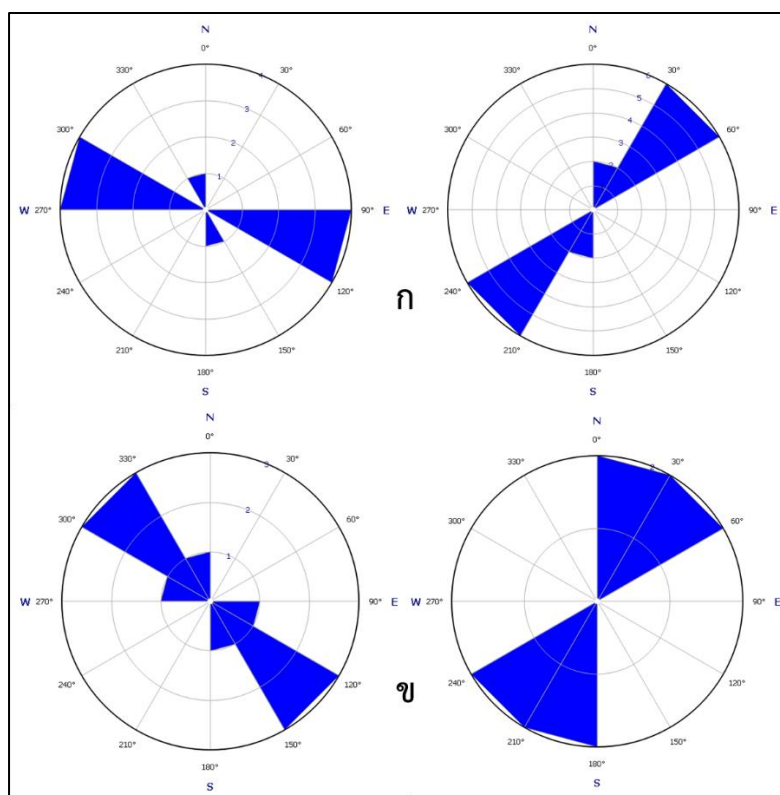


ภาพประกอบ 3.22 ผลการศึกษาจากแผนภาพภูทาบแสดงชุดข้อมูลที่มีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกใน (ก) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ข) ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)



ภาพประกอบ 3.23 แสดงแร่ประกอบหินแกรนิต

การวิเคราะห์แผนภาพกุหลาบด้วยชุดข้อมูลของบริเวณโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์หรือพื้นที่ศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องกับบริเวณจุดสำรวจที่ 3 บริเวณจุดประสงค์สถานควนสำหรับตามภาพประกอบ 3.24ก เปรียบเทียบกับ 3.24ข เนื่องจากโครงสร้างภายใต้ผิวดินของบริเวณพื้นที่ศึกษามีความต่อเนื่องกับชุดหินหรือหินเดิมที่บริเวณจุดประสงค์สถานควนสำหรับ จึงทำให้รอยแยกมีลักษณะทิศทางที่คล้ายกัน



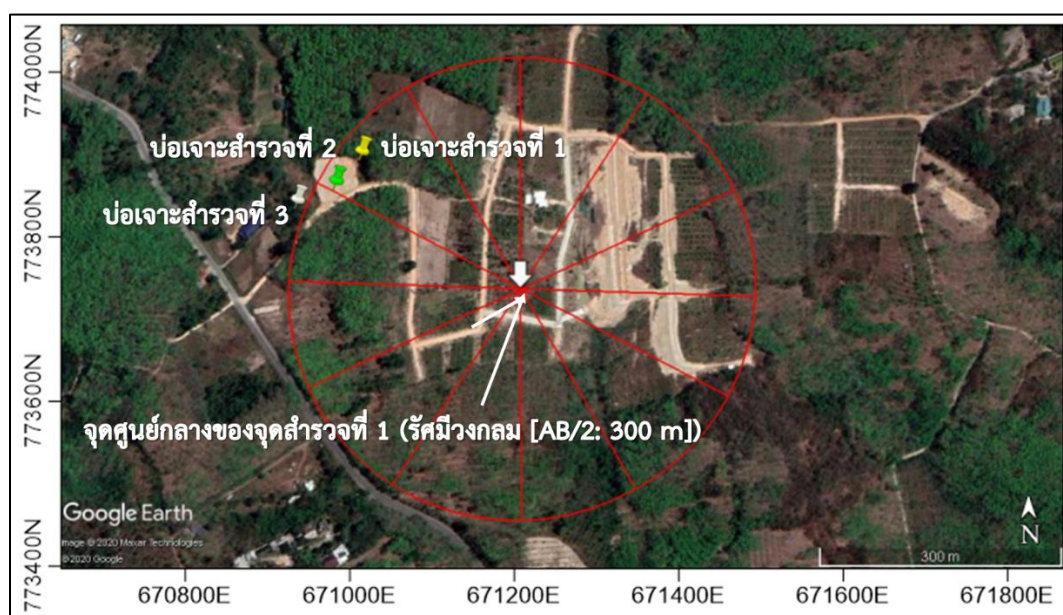
ภาพประกอบ 3.24 การวิเคราะห์แผนภาพกุหลาบเปรียบเทียบทิศทางของรอยแยกระหว่าง

(ก) บริเวณจุดประสงค์สถานควนสำหรับ (ข) พื้นที่ศึกษา

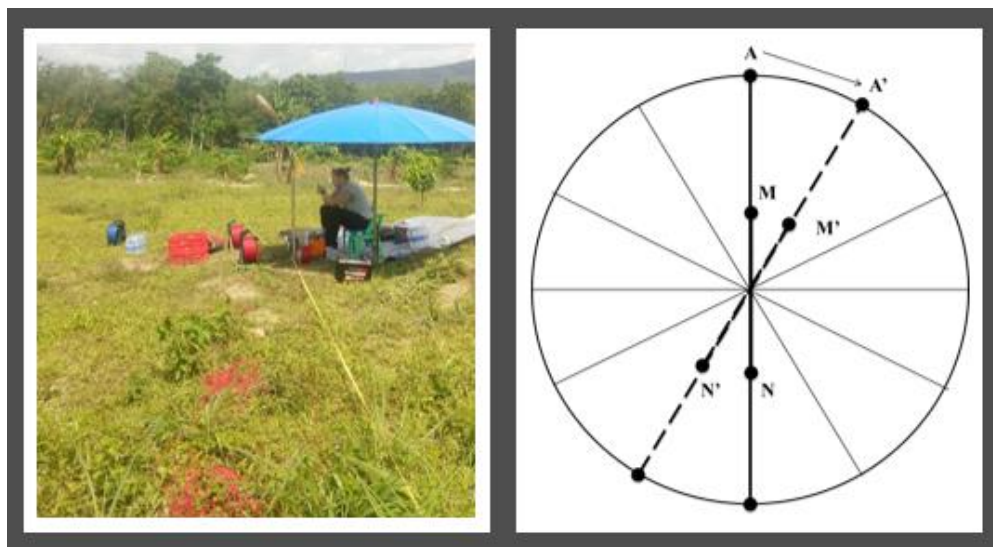


### 3.3 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท

กรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่ของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งนาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอนาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เนื่องจากปัญหาของโครงสร้างธรณีวิทยาที่มีความซับซ้อนในพื้นที่ ทำให้การขุดเจาะบ่อน้ำตำแหน่งตรงกลางไม่พบน้ำบาดาล จึงได้ออกแบบสำรวจด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุท (Azimuthal resistivity) ครอบคลุมโดยรอบพื้นที่ โดยจุดสำรวจที่ 1 ตามพิกัด UTM ที่ 671282 ตะวันออก, 773728 เหนือ มีระยะทางทั้งหมด 600 เมตร และครอบคลุมไปยังบ่อน้ำตำแหน่งที่ 2 (หมุดสีเขียว) เครื่องมือสำรวจวางที่ตำแหน่งตรงกึ่งกลาง (ลูกศรสีขาว) ตามภาพประกอบ 3.25 ทำการวัดโดยวัดขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger array) โดยมีระยะทาง  $AB/2$  มากสุดเป็นระยะทาง 300 เมตร (วงกลมสีแดง) ร่วมกับการหมุนแนววัดทุก 30 องศาตามลำดับจนครบ 360 องศาตามภาพประกอบ 3.26 และ 3.27 ในการวัดแต่ละแนวใช้เทคนิคความสมมาตรในการสลัขั้วไฟฟ้าตามตารางที่ 2.4 ดังนั้นค่าต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่ได้รับจึงมีความใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 3.25 พื้นที่สำรวจจุดที่ 1 ระยะทาง  $AB/2$  มากสุดเป็นระยะทาง 300 เมตร (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)



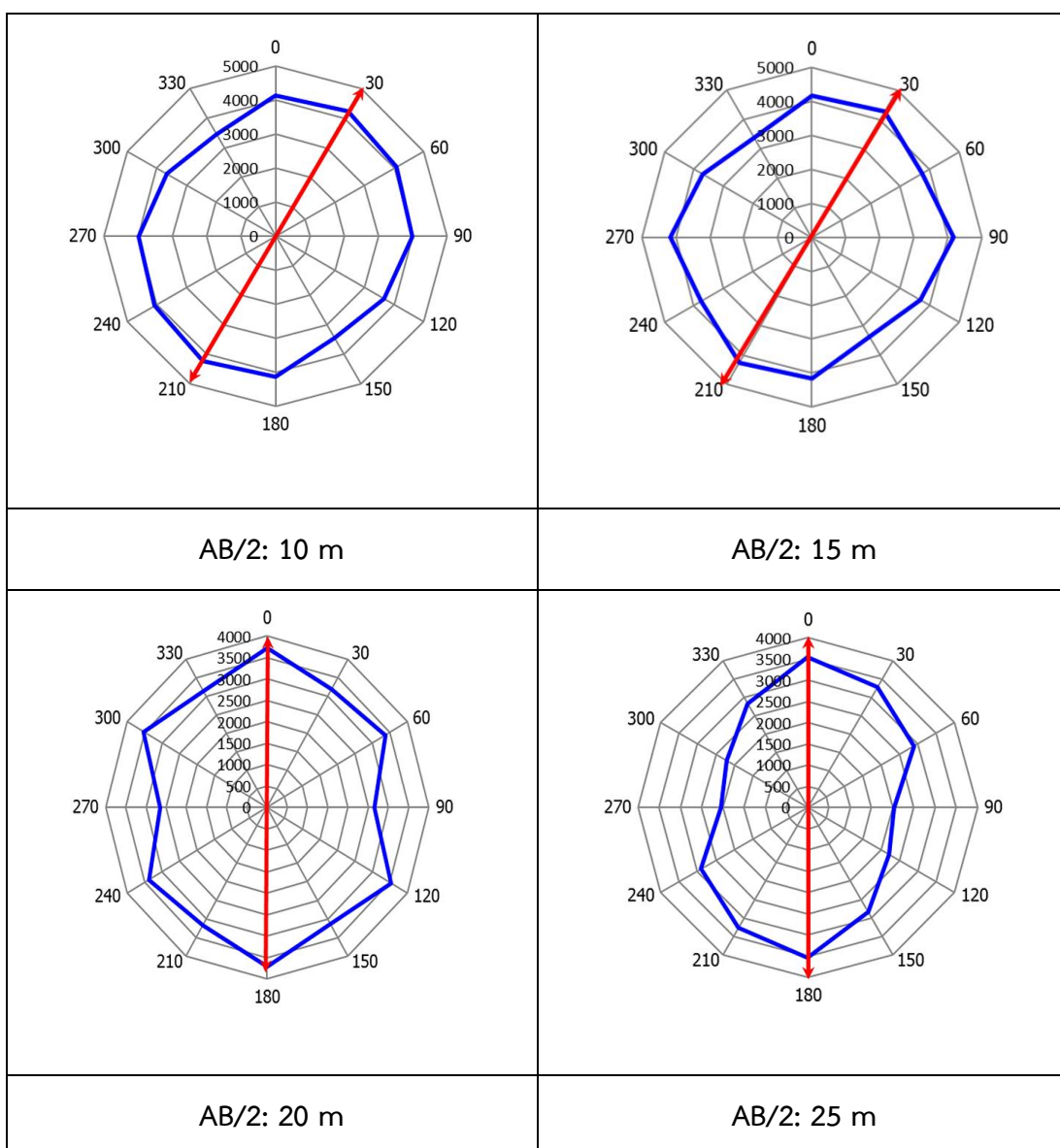
ภาพประกอบ 3.26 วิธีการวางขั้วไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแท่งอิเล็กโทรดปล่อยกระแสไฟฟ้า (AB) และแท่งอิเล็กโทรดวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (MN) ร่วมกับการหมุนแนววัด ทุก 30 องศา

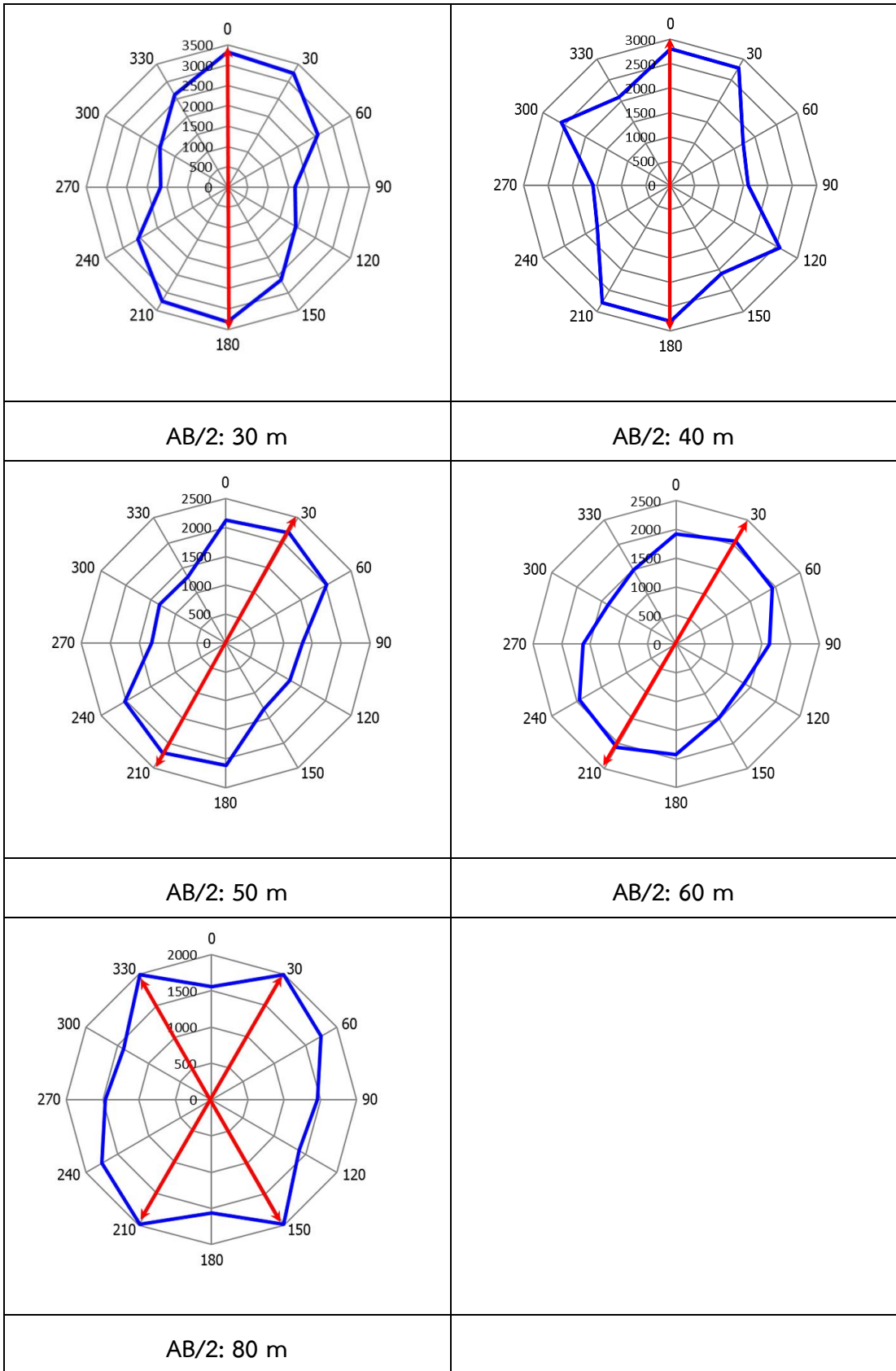


ภาพประกอบ 3.27 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ VES โดยจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Schlumberger บนเส้นสำรวจ (ก) 300 องศา (ข) 330 องศา

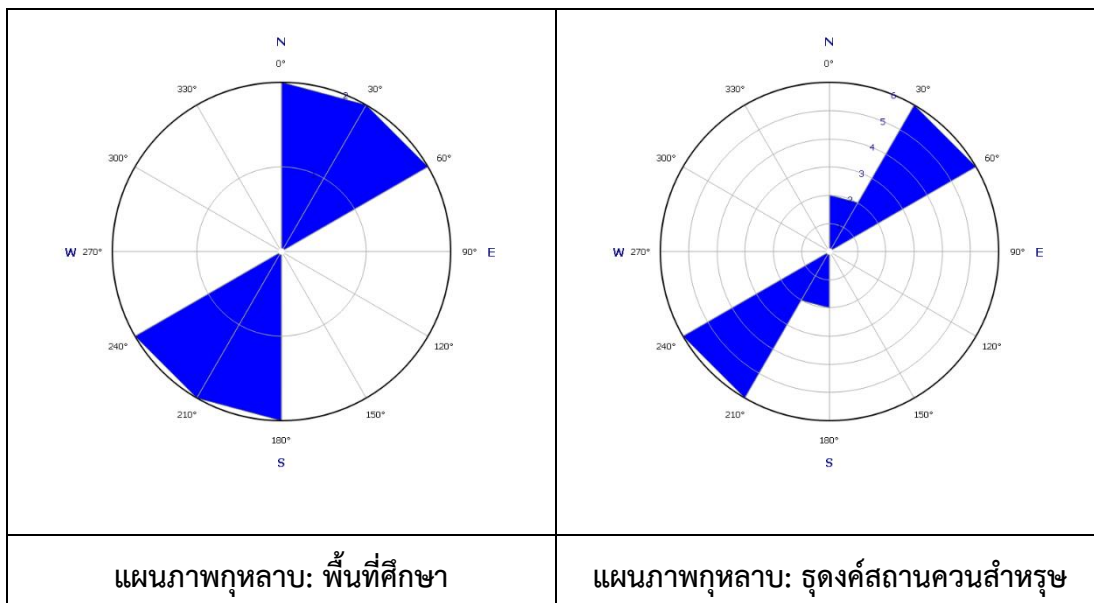
ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างรอยแยกของหินภายใต้ผิวดินในชั้นระดับตื้นมีทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยก (Strike) ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) ตามตารางที่ 3.1 และที่ระดับลึกมีทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกในทิศทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ตามตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.1** ผลการศึกษาจากโพลไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกภายใต้ผิวดินในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW)

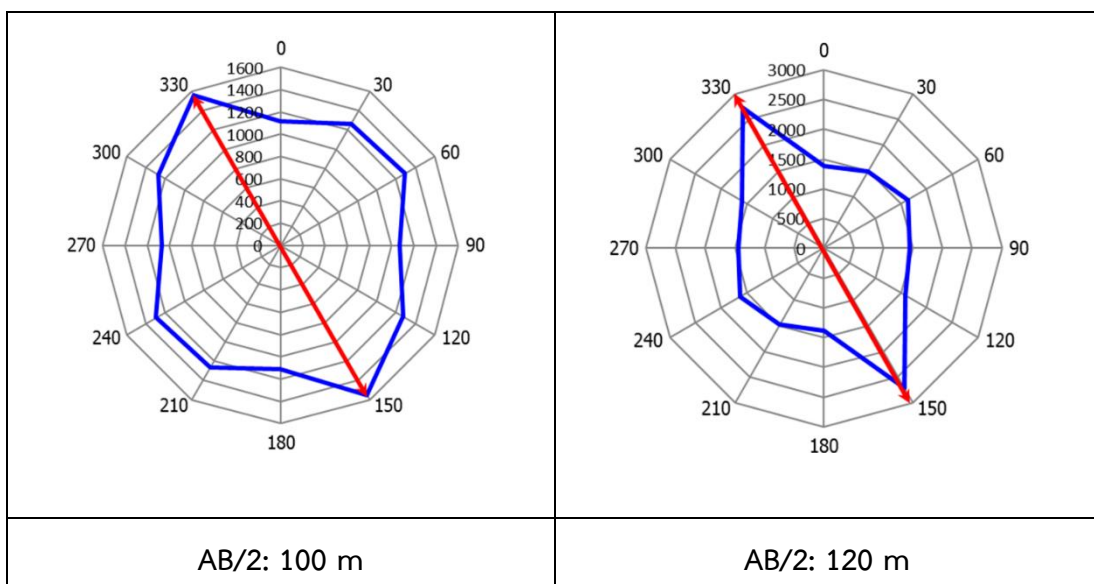




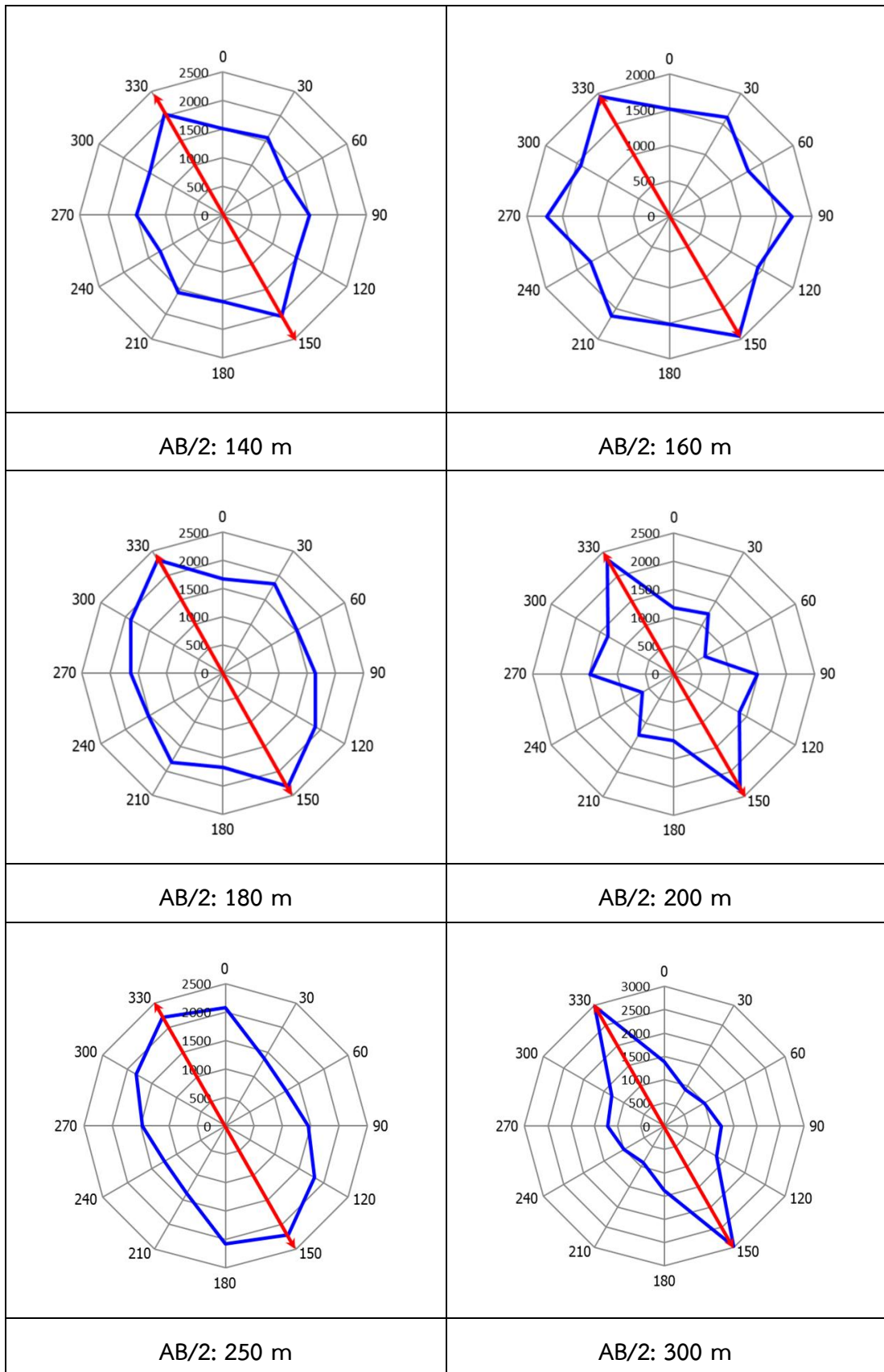


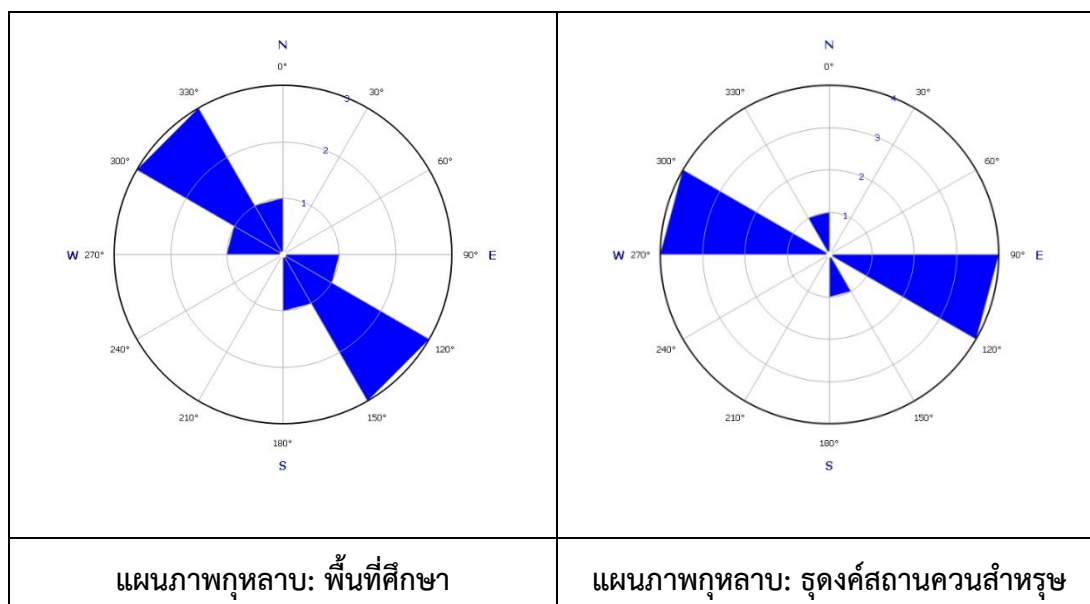


ตารางที่ 3.2 ผลการศึกษาจากโพลไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกภายใต้ผิวดินในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE)









การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง ( $\lambda$ ) และค่าความพรุนที่ระดับความลึกต่างๆ ( $AB/2$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31 และ 38 ยกตัวอย่างเช่น จากผลการสำรวจของจุดสำรวจที่ 1 ที่ระยะทาง  $AB/2 = 300$  เมตร เมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่มีค่าสูงสุด ( $\rho_{x_{app}} = 2971 \Omega.m$ ) และค่าน้อยสุด ( $\rho_{y_{app}} = 997 \Omega.m$ ) ในโพล่าไดอะแกรมมาแทนในสมการได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\rho_{x_{app}}}{\rho_{y_{app}}} = \frac{2971}{997} \approx 2.98$$

$$\phi = \frac{42(2.98^2 - 1)}{997} \approx 0.33$$

สรุปผลการสำรวจ ณ จุดนี้แสดงดังตารางที่ 3.3

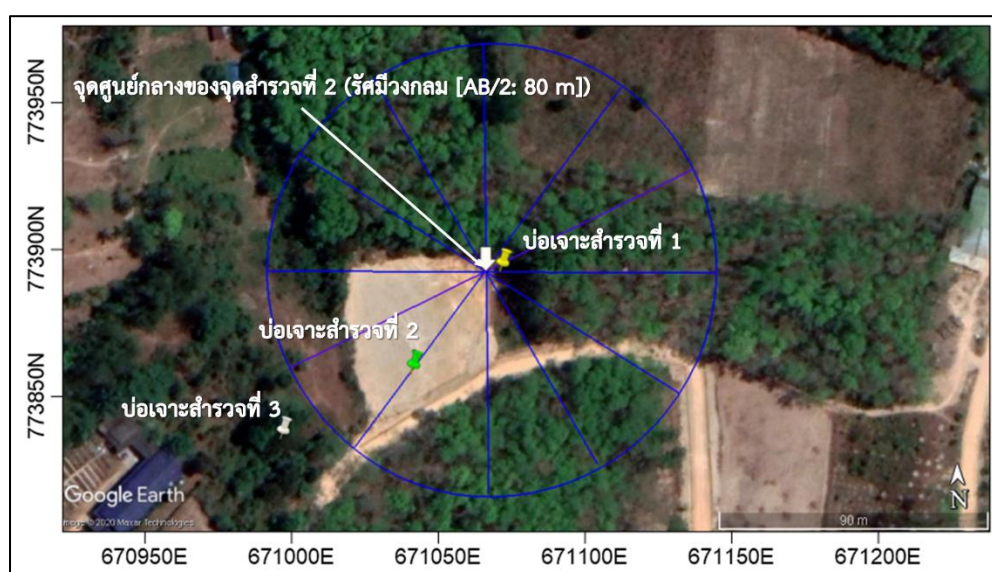
ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะของรอยแยก สัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง และความพรุนจากการวิเคราะห์  
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏในตำแหน่งจุดสำรวจที่ 1

AB/2 (m)	Major Strike (องศา)	ทิศทาง	สัมประสิทธิ์ความ ไม่ต่อเนื่อง ( $\lambda$ )	ความพรุน ( $\phi$ )
10	30	NE-SW	1.15	0.004
15	30	NE-SW	1.16	0.004
20	0	N-S	1.40	0.015
25	0	N-S	1.73	0.041
30	0	N-S	2.00	0.077
40	0	N-S	1.77	0.057
50	30	NE-SW	1.71	0.061
60	30	NE-SW	1.52	0.034
80	30 และ 330	NE-SW และ NW-SE	1.42 และ 1.14	0.030 และ 0.006
100	330	NW-SE	1.20	0.015
120	330	NW-SE	1.66	0.045
140	330	NW-SE	1.62	0.054
160	330	NW-SE	1.53	0.044
180	330	NW-SE	1.52	0.037
200	330	NW-SE	3.69	0.357
250	330	NW-SE	1.78	0.073
300	330	NW-SE	2.98	0.332

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องที่มีค่ามากที่สุดที่ระยะทาง AB/2 ประมาณ 200 เมตร ซึ่งคาดว่าน่าจะอยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 80 – 100 เมตร แสดงถึงภายในเนื้อหินมีความแตกต่างของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแต่ละทิศทางมีค่าแตกต่างกันมาก แสดงว่าภายในเนื้อหินมีรอยแตกหรือมีช่องว่างมากส่งผลให้ค่าความพรุนของหินค่อนข้างสูง ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องมีค่าน้อยมากที่ระยะทาง AB/2 ประมาณ 10 เมตร แสดงถึงภายในเนื้อหินแกรนิตที่อยู่ใกล้ผิวดินที่ระดับความลึกประมาณ 4 – 5 เมตร มีความแตกต่างของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแต่ละทิศทาง

ค่อนข้างน้อย แสดงว่าภายในเนื้อหินมารอยแตกหรือมีช่องว่างค่อนข้างน้อยส่งผลให้พบค่าความพรุนของหินค่อนข้างต่ำ ซึ่งคาดว่าเป็หินแกรนิตที่มีจำนวนรอยแตกล็กน้อยมาก

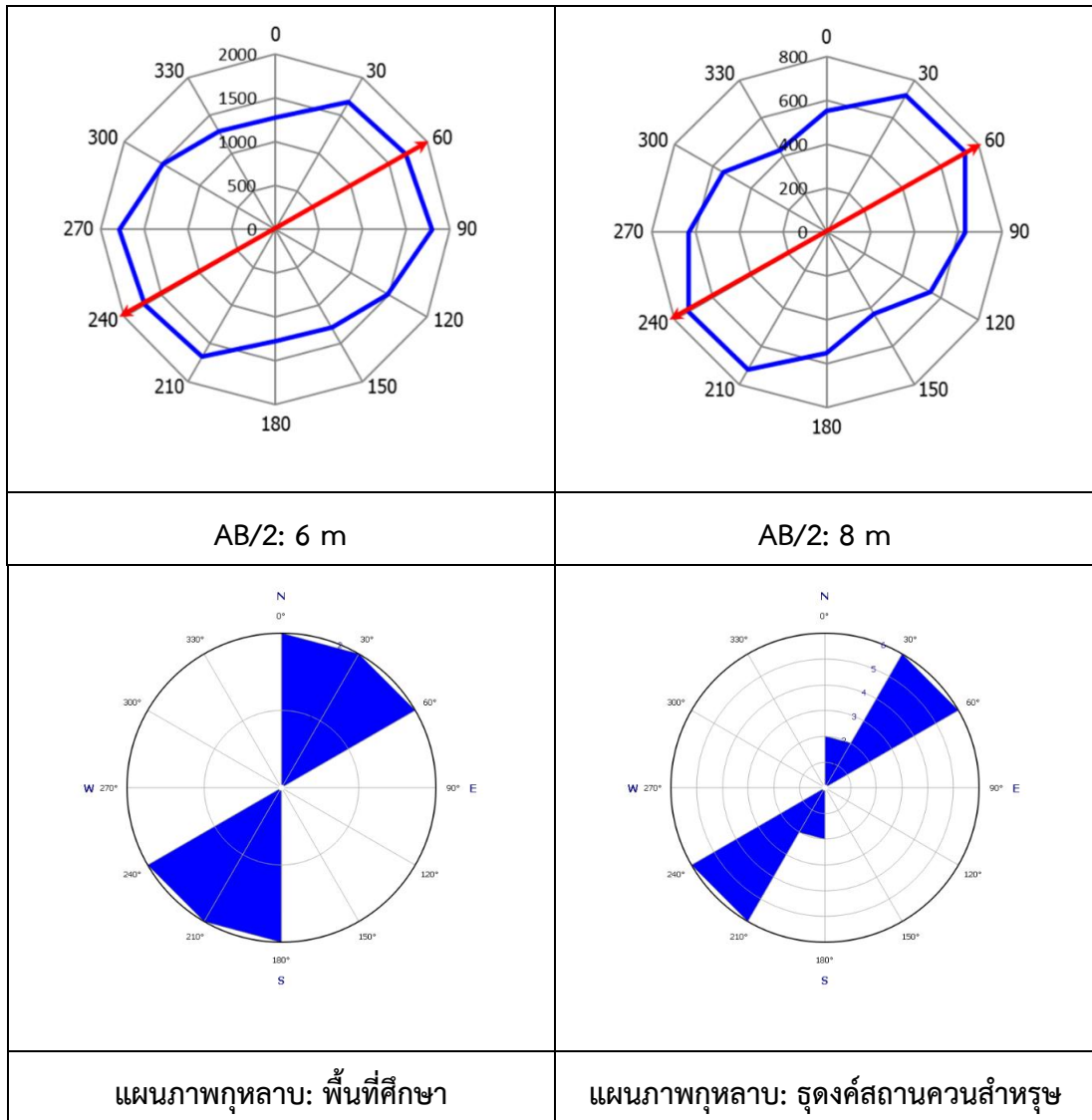
บริเวณของพื้นที่ศึกษาในจุดสำรวจที่ 2 ตามพิกัด UTM ที่ 671078 ตะวันออก, 773886 เหนือ มีการออกแบบพื้นที่ครอบคลุมบ่อน้ำจำนวน 2 บ่อ เนื่องจากบ่อที่ 3 ไม่สามารถเดินผ่านเข้าไปทางต้นไม้ใหญ่ที่ขึ้นรกได้รวมถึงทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือติดโรมันสำปะหลังที่ขึ้นสูงด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจุดสำรวจที่ 2 จึงสามารถทำการวัดได้ที่ระยะ AB/2 มากสุดเท่ากับ 80 เมตร ตามภาพประกอบ 3.28



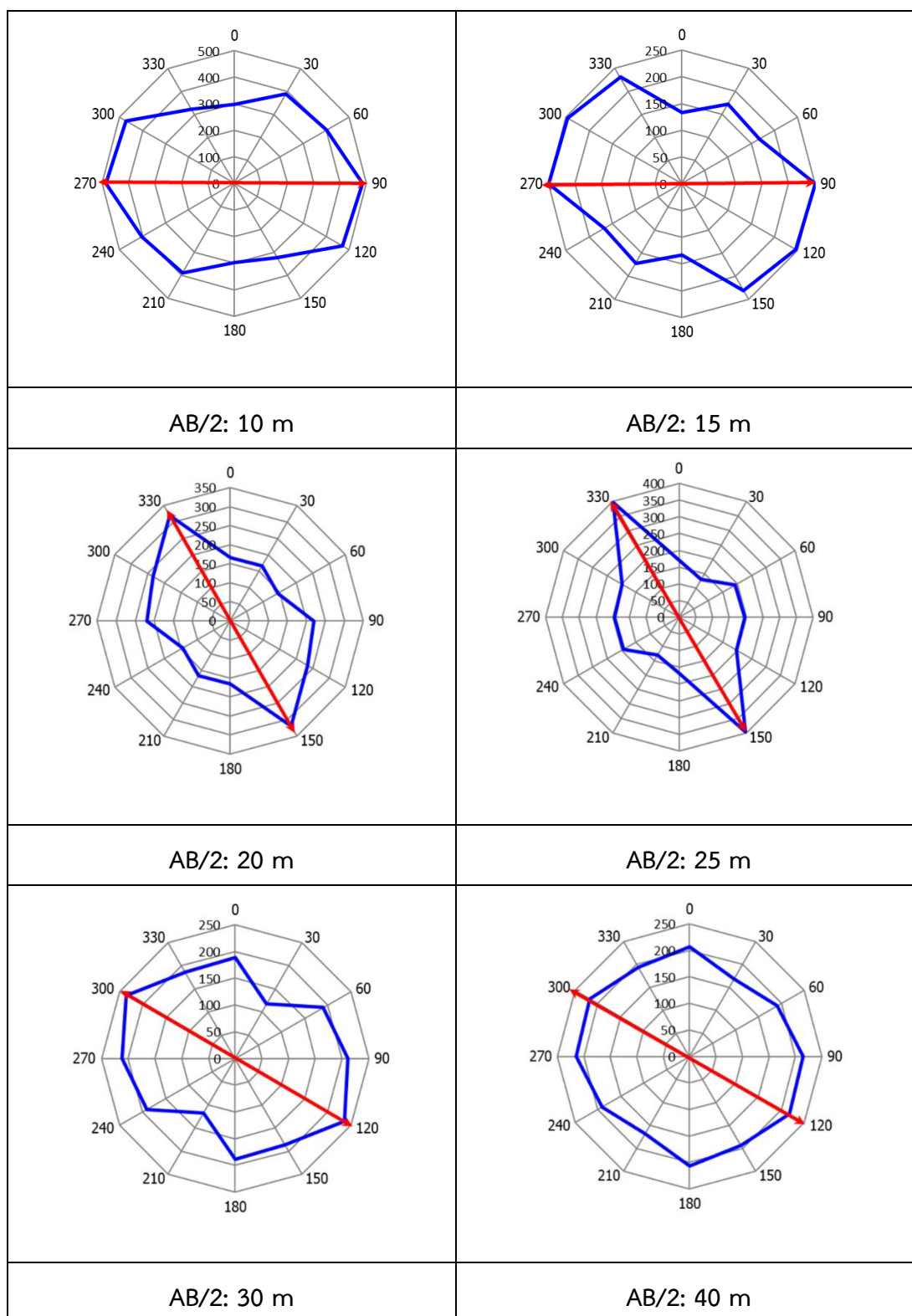
ภาพประกอบ 3.28 แสดงจุดสำรวจที่ 2 ระยะ AB/2 มากสุดในแต่ละแนววัดเท่ากับ 80 เมตร ประกอบด้วยตำแหน่งจุดเจาะบ่อน้ำบาดาล 3 บ่อ (แผนที่ Google Earth)

ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างรอยแยกของหินภายใต้ผิวดินในชั้นระดับตื้นมีทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยก (Strike) ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) ตามตารางที่ 3.4 และที่ระดับลึกมีทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ตามตารางที่ 3.5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทางธรณีวิทยา และผลการสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทในจุดสำรวจที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.6

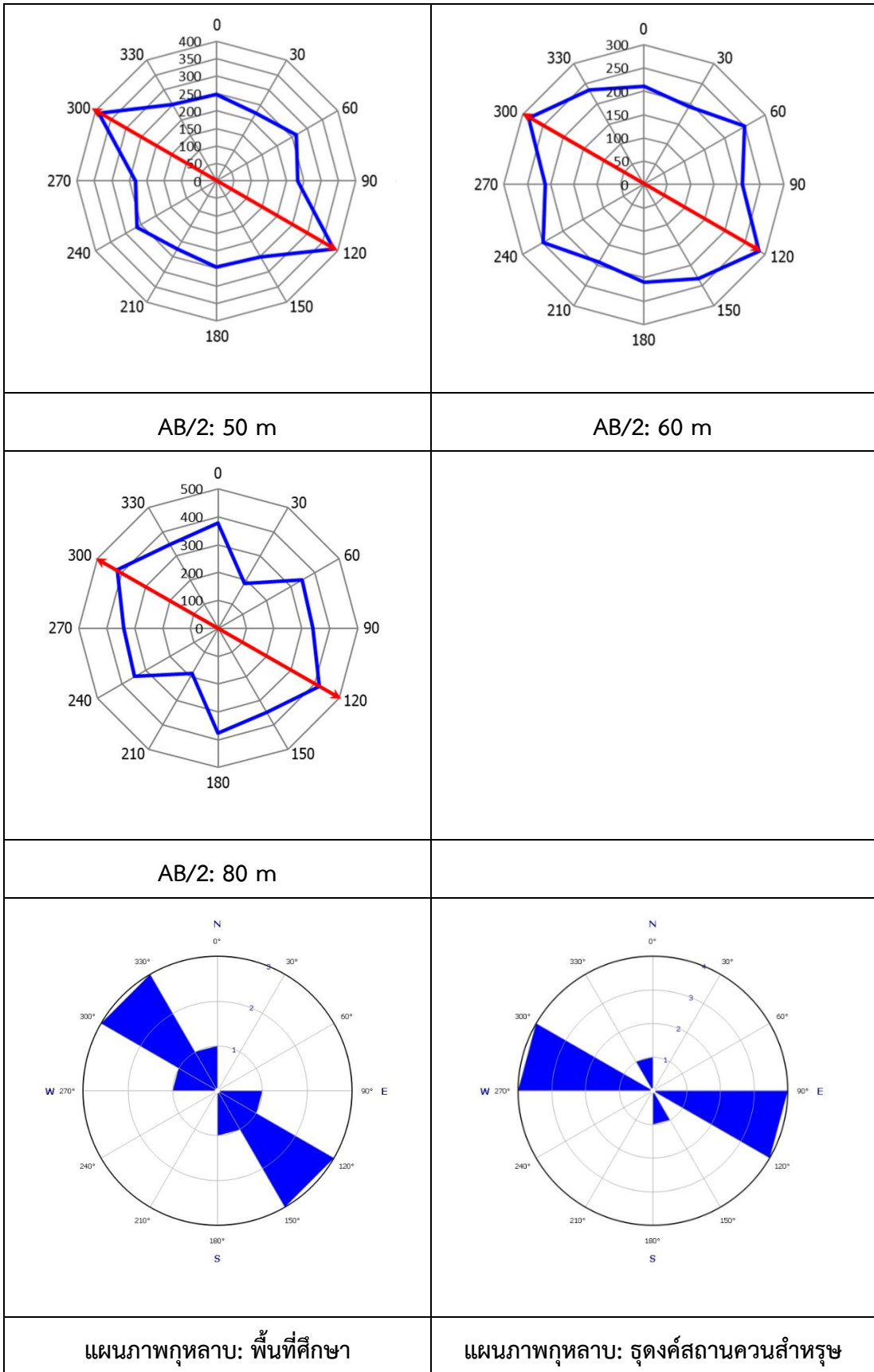
ตารางที่ 3.4 ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกภายใต้ผิวดินในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW)



ตารางที่ 3.5 ผลการศึกษาจากโพล่าไดอะแกรมแสดงทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกภายใต้ผิว  
ดินในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE)







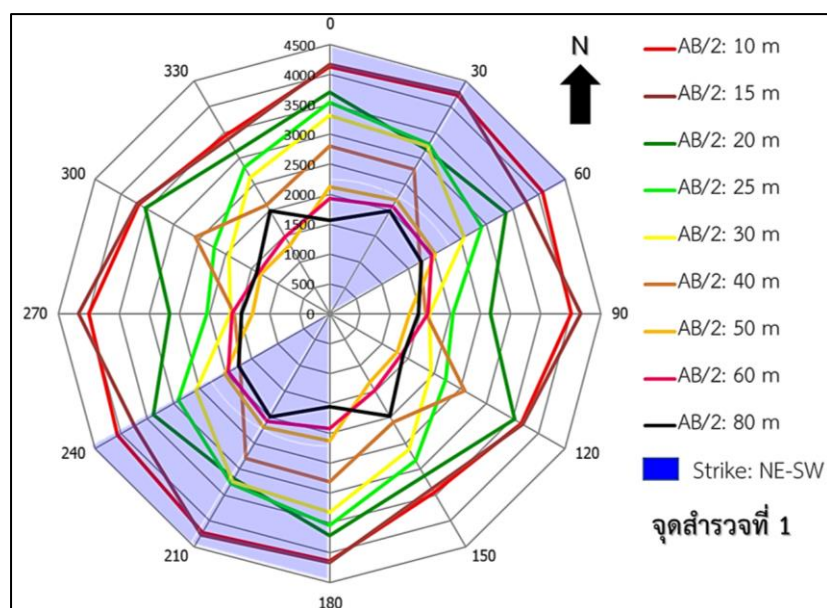
ตารางที่ 3.6 สรุปทิศทางของรอยแยก สัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่อง และความพรุนจากการวิเคราะห์  
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏในตำแหน่งจุดสำรวจที่ 2

AB/2 (m)	Major Strike (องศา)	ทิศทาง	สัมประสิทธิ์ความ ไม่ต่อเนื่อง ( $\lambda$ )	ความพรุน ( $\phi$ )
6	60	NE-SW	1.33	0.025
8	60	NE-SW	1.69	0.180
10	90	E-W	1.63	0.231
15	90	E-W	1.87	0.793
20	330	NW-SE	1.92	0.781
25	330	NW-SE	2.06	0.713
30	300	NW-SE	1.84	0.847
40	300	NW-SE	1.28	0.161
50	300	NW-SE	1.73	0.376
60	300	NW-SE	1.48	0.260
80	300	NW-SE	2.24	0.906

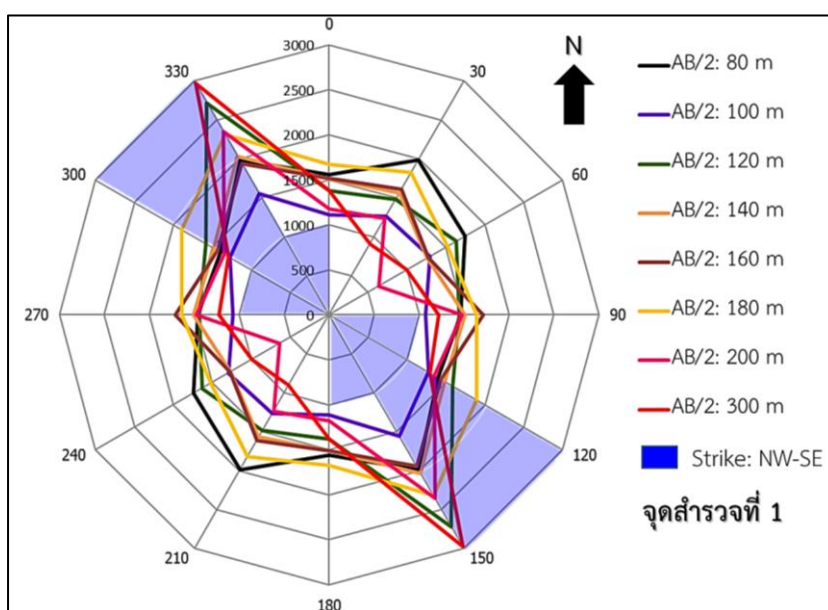
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องที่มีค่ามากจะแสดงถึงภายในเนื้อหินมีความแตกต่างกันของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแต่ละทิศทางมากบ่งชี้ว่ารอยแตกหรือช่องว่างภายในเนื้อหินมาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความพรุนของหินที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในช่วงของความลึกที่มีค่าความพรุนสูง แสดงว่าเป็นช่วงที่มีรอยแตกในเนื้อหินค่อนข้างมากจึงมีศักยภาพในกักเก็บน้ำได้ดี ทำให้การตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏมีค่าน้อย ซึ่งมีความสอดคล้องกับภายใต้บ่อเจาะสำรวจที่ 1 บนข้อมูลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวตั้ง (VES) ที่ 30 องศา

ผลการศึกษาจุดสำรวจที่ 1 พบว่าทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกในระดับตื้นในทิศทาง NE-SW ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางของรอยแยกในแผนภาพกุหลาบตามภาพประกอบ 3.29 และทิศทางการวางตัวของแนวรอยแยกในระดับลึกที่มีทิศทาง NW-SE มีความสอดคล้องกับทิศทางรอยแยกในแผนภาพกุหลาบตามภาพประกอบ 3.30 และพบว่ามีค่าความสอดคล้องกับทิศทางรอยแยกในระดับตื้นระยะ AB/2 น้อยกว่า 80 เมตรของจุดสำรวจที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากจุดสำรวจแรกเป็นพื้นที่ราบสูงซึ่งอยู่ที่ระดับสูงกว่าและน่าจะเป็นสาเหตุที่พบว่าทิศทางของรอยแยกที่จุดวัดที่ 1 ในระดับลึกมีความสอดคล้องกับทิศทางของรอยแยกในระดับตื้นของจุดวัดที่ 2 ดังภาพประกอบ 3.29 – 3.32

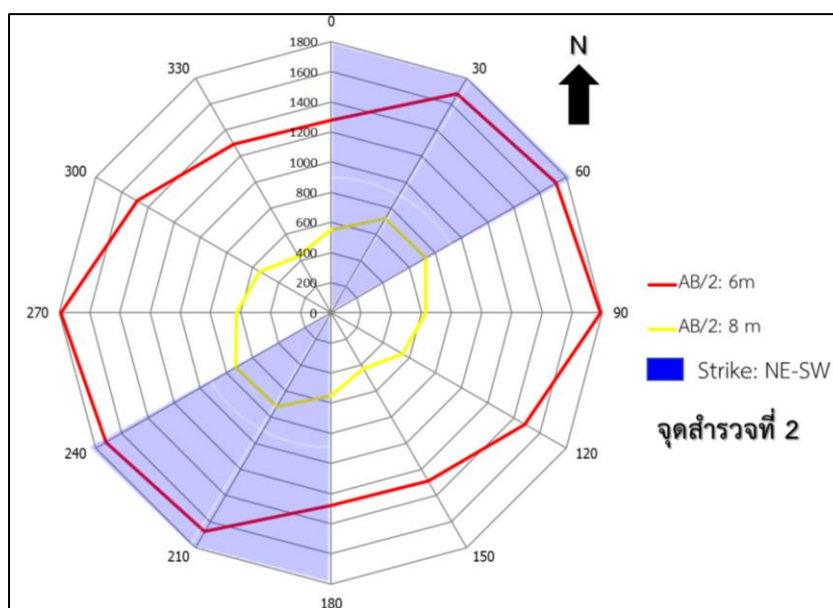




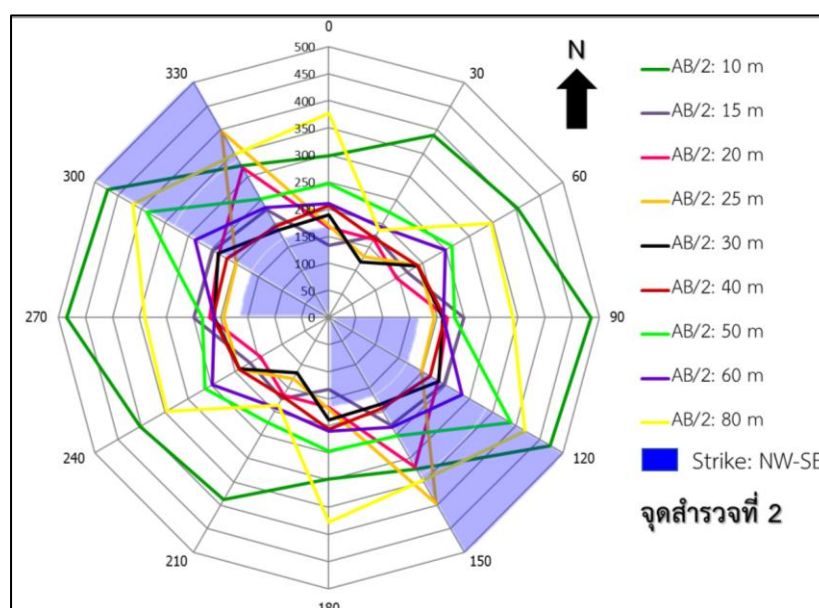
ภาพประกอบ 3.29 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพล่าไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ  
 กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้  
 (NE-SW) บริเวณจุดสำรวจที่ 1



ภาพประกอบ 3.30 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพล่าไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ  
 กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันออกเฉียงใต้  
 (NW-SE) บริเวณจุดสำรวจที่ 1



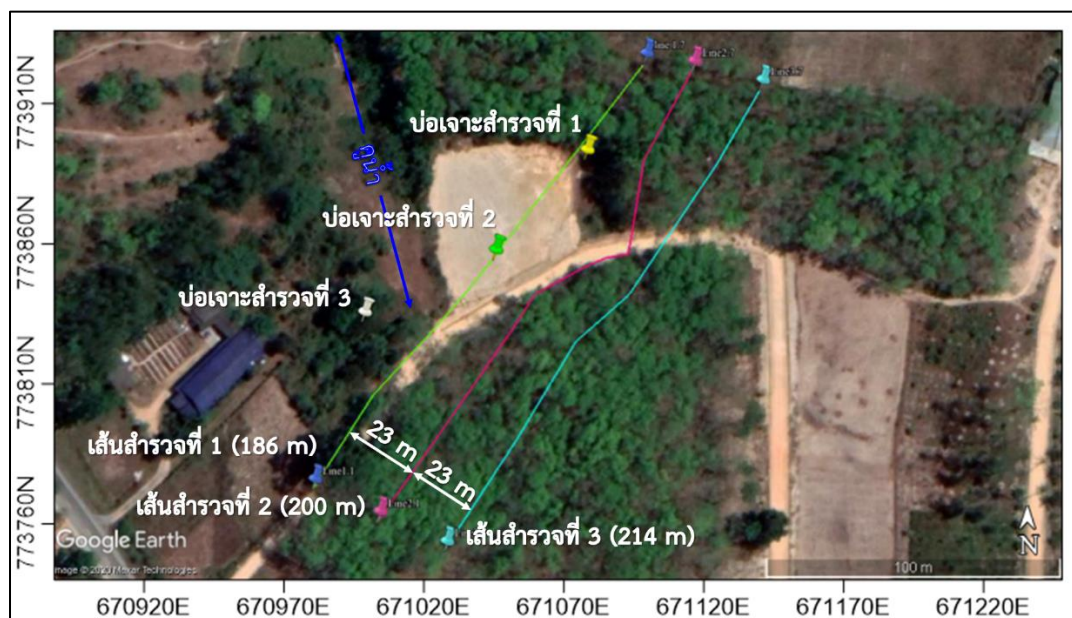
ภาพประกอบ 3.31 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพล่าไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ  
 กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศทางตะวันตกเฉียงใต้  
 (NE-SW) บริเวณจุดสำรวจที่ 2



ภาพประกอบ 3.32 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพล่าไดอะแกรมร่วมกับแผนภาพ  
 กุหลาบที่มีรอยแยกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ทิศทางตะวันออกเฉียงใต้  
 (NW-SE) บริเวณจุดสำรวจที่ 2

### 3.4 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก

กรณีศึกษาของงานวิจัยได้ออกแบบสำรวจด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves: EM) ความถี่สูง เพื่อศึกษาหาตำแหน่งรอยแตกของชั้นหินแกรนิตในบริเวณพื้นที่บ่อน้ำบาดาลที่เจาะไม่พบน้ำของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ด้วยวิธีวัดแบบ Common offset ใช้ความถี่กลาง 30 MHz ทำการสำรวจจำนวน 3 แนว เพื่อให้ครอบคลุมบ่อเจาะสำรวจมากที่สุดโดยแนววัดแต่ละแนววางตัวขนานกันในทิศทาง  $N30^{\circ}E$  และแต่ละแนววัดห่างกัน 23 เมตร ตามภาพประกอบ 3.33 แนวสำรวจที่ 1 เริ่มจากเสาไฟฟ้าต้นที่ 3 จากถนนใหญ่ตามพิกัด UTM ที่ 670986 ตะวันออก, 773767 เหนือ เดินไปยังทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ตามภาพประกอบ 3.34 และ 3.35 ผ่านคูน้ำไปยังตำแหน่งบ่อเจาะสำรวจที่ 2 ตามภาพประกอบ 3.36 และ 3.37 เข้าสู่สวนยางพาราด้วยระยะทางทั้งหมด 186 เมตรตามพิกัด UTM ที่ 671104 ตะวันออก, 773920 เหนือ แต่ไม่สามารถเดินต่อไปได้ เนื่องจากติดต้นมันสำปะหลังที่ขึ้นรกตามภาพประกอบ 3.38 และสรุปรายละเอียดบนเส้นทางการเดินสำรวจที่ 1 ได้ตามตารางที่ 3.7 เพื่อนำไปใช้อ้างอิงในขั้นตอนการแปลความหมายและวิเคราะห์ผลข้อมูล



ภาพประกอบ 3.33 แสดงเส้นทางสำรวจที่ 1 ถึง 3 (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)





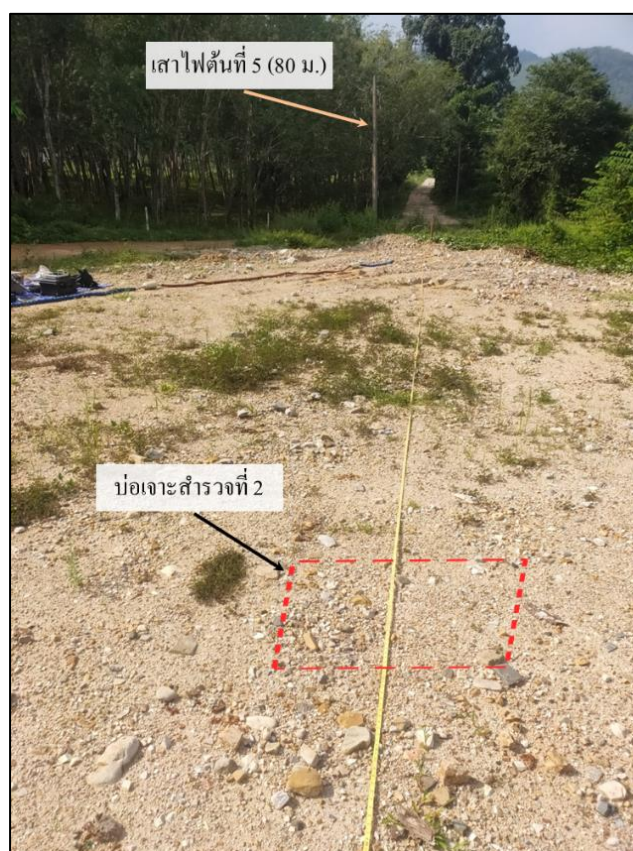
ภาพประกอบ 3.34 การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในแนวสำรวจที่ 1



ภาพประกอบ 3.35 แสดงจุดเริ่มต้นสำรวจไปยังจุดสิ้นสุดในแนวสำรวจที่ 1



ภาพประกอบ 3.36 แสดงร่องน้ำที่อยู่ทางด้านทิศตะวันตกของบ่อเจาะสำรวจที่ 2



ภาพประกอบ 3.37 แสดงเสาไฟฟ้าต้นที่ 5 ผ่านบริเวณบ่อเจาะสำรวจที่ 2 ในแนวสำรวจที่ 1





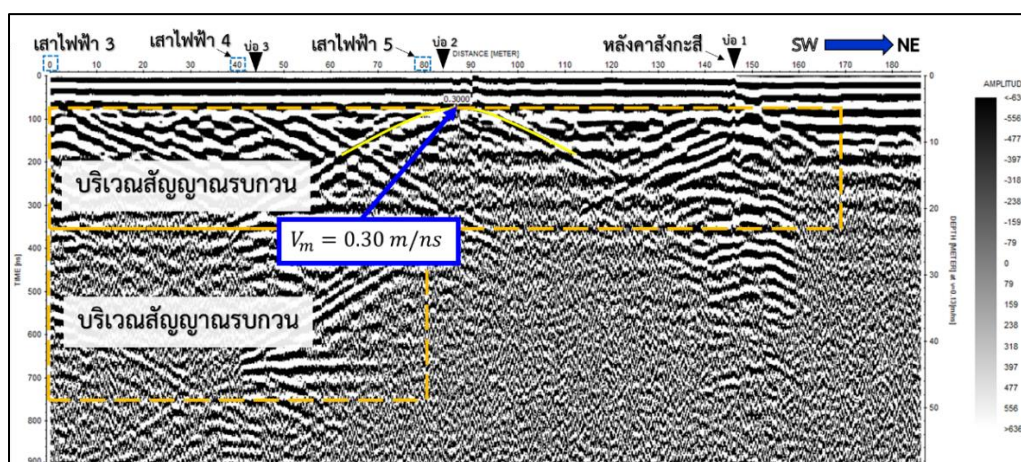
ภาพประกอบ 3.38 แสดงจุดสิ้นสุดการสำรวจ เนื่องจากต้นมันสำปะหลังที่ขึ้นรก

ตารางที่ 3.7 สรุปรายละเอียดบนเส้นสำรวจที่ 1

ระยะทาง (m)	รายละเอียด
จุดเริ่มต้น	บริเวณเสาไฟฟ้าต้นที่ 3 นับจากทางเข้าถนนใหญ่
0 - 80	เริ่มเดินตั้งแต่เสาไฟฟ้าต้นที่ 3 จนถึง 5 มีลักษณะเป็นดินลูกรังเนื้อแน่น
80 - 90	ผ่านโพรงหญ้า และพบร่องน้ำขนาดเล็ก
90 - 100	ผ่านบ่อเจาะสำรวจที่ 2 เส้นทางขรุขระมากมีทรายปนก้อนกรวด
100 - 140	เส้นทางขรุขระเล็กน้อยมีทรายปนก้อนกรวดขนาดเล็ก
140 - 146	ผ่านบ่อเจาะสำรวจที่ 1 บริเวณหลังคาสังกะสี
150	เข้าสู่ป่ายางพารา ลักษณะเป็นทรายค่อนข้างชื้น
186	สิ้นสุดทางสำรวจ เพราะติดต้นมันสำปะหลังที่ขึ้นรกเดินต่อไปไม่ได้

ผลจากแผนภาพเรดาร์แกรมที่มีระยะทางทั้งหมด 186 เมตร และความลึกประมาณ 58 เมตร พบว่ามีคลื่นสะท้อนจากรอบๆ แนววัดเข้ามารบกวน (Noise) ที่ความลึกประมาณ 6 - 26 เมตร ซึ่งมีสาเหตุมาจากสัญญาณรบกวนจากคลื่นสะท้อนจากเสาไฟฟ้าบนถนนทางเข้าประมาณ 3 ตำแหน่งรวมถึงหลังคาสังกะสี คลื่นรบกวนดังกล่าวยืนยันด้วยค่าความเร็วคลื่นที่คาดคะเนได้จากสัญญาณคลื่นสะท้อนที่มีค่าเท่ากับ 0.3 m/ns ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในอากาศมายัง

ตัวรับสัญญาณคลื่น เนื่องจากในแนววัดนี้มีคลื่นรบกวนค่อนข้างมาก ทำให้ยากในการแปลความหมายข้อมูล เพื่อระบุตำแหน่งของรอยแตกภายใต้ผิวดินตามภาพประกอบ 3.39



ภาพประกอบ 3.39 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดงสัญญาณรบกวนจากภายนอก ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่  $V_m = 0.3 \text{ m/ns}$  ก่อให้เกิดความเสียหายของข้อมูลในเส้นสำรวจที่ 1

แนวสำรวจที่ 2 เริ่มจากสวนยางพาราฝั่งขวาบริเวณถนนทางเข้าไปยังบ้านสวน ซึ่งห่างออกจากเส้นสำรวจที่ 1 ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) มีระยะประมาณ 23 เมตรตามภาพประกอบ 3.40 ตามพิกัด UTM ที่ 671010 ตะวันออก, 773756 เหนือ เดินไปยังทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ผ่านสวนยางพาราฝั่งซ้ายที่มีระยะทางทั้งหมด 200 เมตรตามพิกัด UTM ที่ 671121 ตะวันออก, 773917 เหนือตามภาพประกอบ 3.41 แต่ไม่ครอบคลุมตำแหน่งบ่อเจาะสำรวจที่ 1 และ 2 ตามภาพประกอบ 3.33 ดังนั้นระยะทางการเก็บข้อมูลสามารถสรุปรายละเอียดได้ตามตารางที่ 3.8 เพื่อใช้อ้างอิงข้อมูลวัสดุภายใต้ผิวดิน



ภาพประกอบ 3.40 แสดงทิศทางระยะห่างระหว่างแนวสำรวจที่ 1 ไปยังแนวสำรวจที่ 2



ภาพประกอบ 3.41 การเดินเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือเรดาร์หยั่งลึกในแนวสำรวจที่ 2

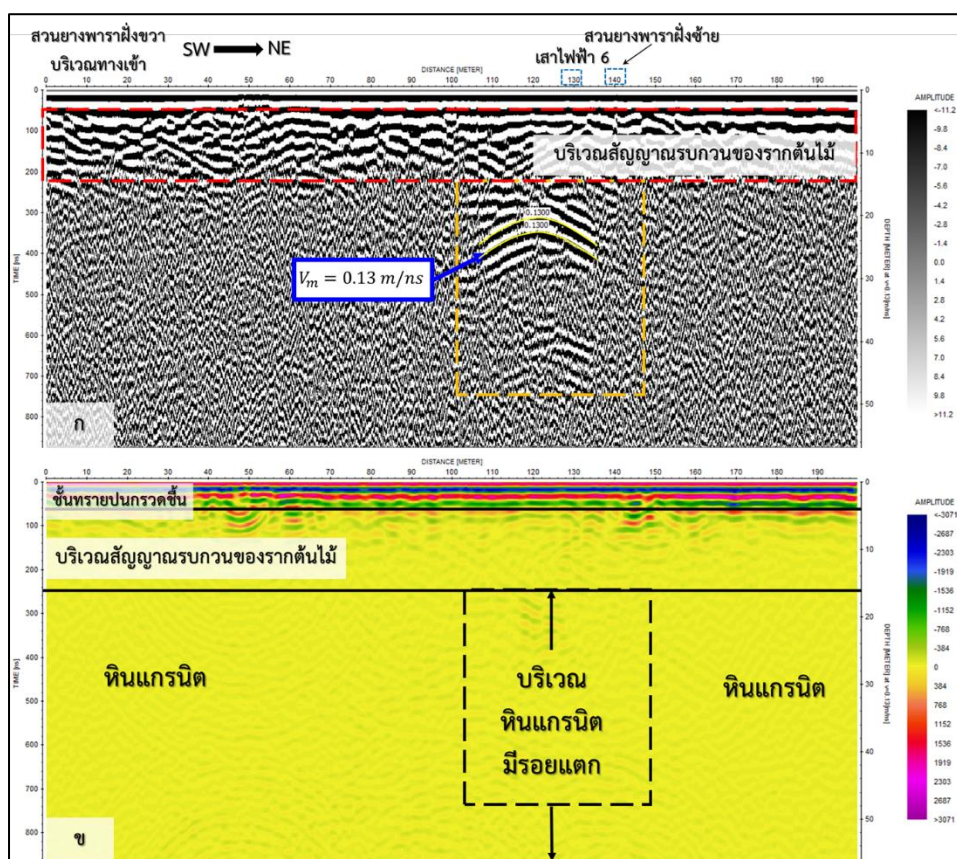
ตารางที่ 3.8 สรุปรายละเอียดบนแนวสำรวจที่ 2

ระยะทาง (m)	รายละเอียด
จุดเริ่มต้น	ห่างจากเส้นสำรวจที่ 1 มารยะทาง 23 เมตร ไปทางสวนยางพาราทางฝั่งขวา
0 - 106	สวนยางพาราทางฝั่งซ้ายมีลักษณะทรายปนกรวดชั้นเล็กน้อย
47 - 67	พบทางน้ำไหลผ่านค่อนข้างถี่
106	พบร่องน้ำขนาดเล็กไหลตลอดเวลา
107 - 140	บริเวณถนนดินลูกรังแห้งและเนื้อแน่น
130	เดินผ่านเสาไฟถึงต้นที่ 6
140	เข้าสู่ป่ายางพาราทางฝั่งซ้าย ลักษณะเป็นทรายปนกรวดค่อนข้างชื้น
200	สิ้นสุดทางสำรวจ เพราะติดต้นไม้สำหรับที่ขึ้นรถเดินต่อไปไม่ได้

ผลจากแผนภาพเรดาร์แกรมที่มีระยะทางทั้งหมด 200 เมตรและความลึก 57 เมตร พบว่าเกิดสัญญาณรบกวนจากเสาไฟฟ้าที่ 6 ที่ระยะทาง 130 เมตร และรากต้นไม้ ทำให้ไม่สามารถแยกข้อมูลระหว่างสัญญาณรบกวนหรือหินแกรนิตได้ (เส้นประสีเหลือง) ตามภาพประกอบ 3.42ก พลังงานของคลื่นที่แทรกลงสู่รากต้นไม้ที่ล้อมรอบด้วยทรายเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้พลังงานไม่ถูก



ลดทอนลงอย่างรวดเร็วที่ความลึกประมาณ 4 – 14 เมตร (เส้นประสีแดง) แต่ทางตรงกันข้ามทรายที่มีความชื้นหรือน้ำสูงจะส่งผลทำให้เพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของทรายที่มีผลต่อสัญญาณของ GPR ลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณาจากแผนภาพเรดาร์แกรมจะเห็นว่าคลื่นสะท้อนจากตัวกลางภายใต้แนววัดมีค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันที่ระดับต้น บริเวณที่มีค่าแอมพลิจูดสูง (แถบสีน้ำเงิน-ชมพูม่วง) คาดว่าเป็นบริเวณทรายปนกรวดที่มีความชื้นจากรายละเอียดลักษณะบนผิวดิน ซึ่งปรากฏอยู่ที่ระยะทางประมาณ 0 – 200 เมตร และที่ระดับความลึกประมาณ 0 – 4 เมตร แต่ที่ความลึกประมาณ 4 – 14 เมตร (เส้นประสีดำ) ไม่สามารถแปลผลได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนของรากต้นไม้ ช่วงความลึกตั้งแต่ 14 เมตรลงไปกลับพบแอมพลิจูดต่ำ (แถบสีเหลือง) ซึ่งคาดว่าป็นโซนของหินแกรนิตตามภาพประกอบ 3.42 และที่ระยะประมาณ 115 – 130 เมตร ที่ระดับลึกประมาณ 15 – 30 เมตร และที่ความลึกประมาณ 37 – 45 เมตร พบว่าแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนค่อนข้างสูง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นบริเวณที่เป็นรอยแตกในชั้นหินแกรนิตและมีน้ำกักเก็บอยู่



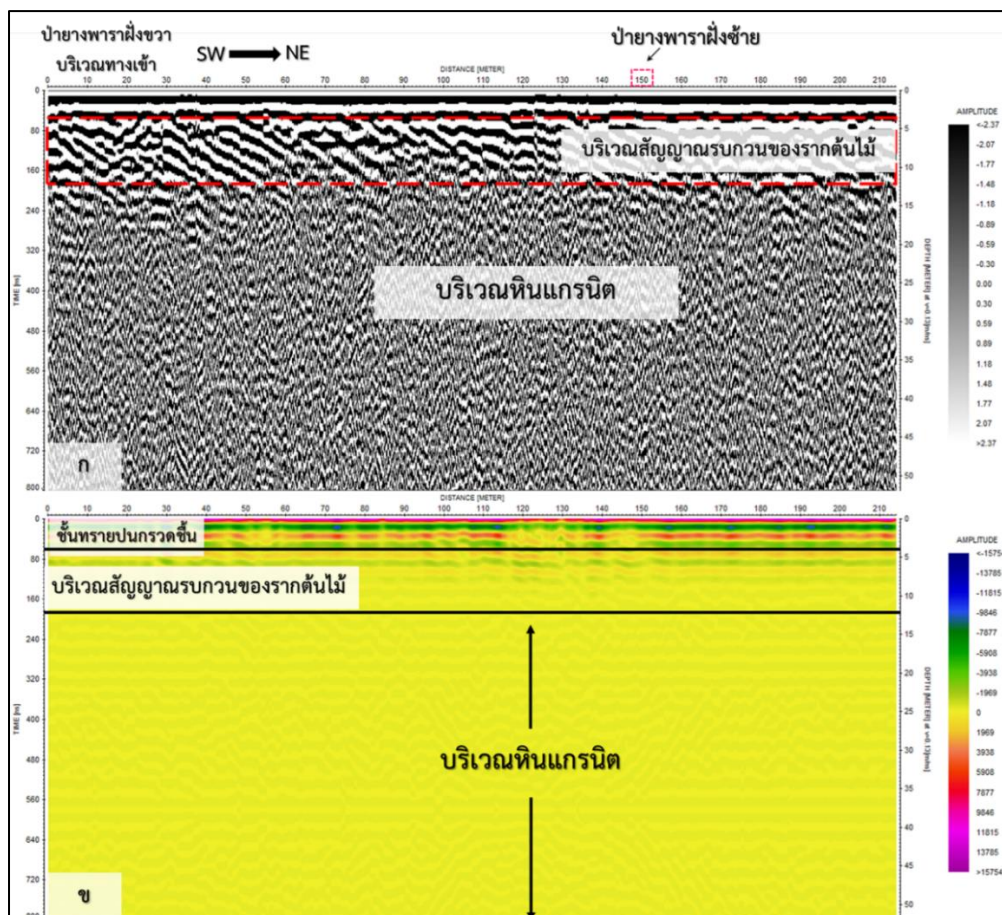
ภาพประกอบ 3.42 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดง (ก) บริเวณสัญญาณรบกวนจากภายนอก (ข) การทำ migration ใช้  $V_m = 0.13 \text{ m/ns}$  และแปลความข้อมูล

เส้นสำรวจที่ 3 เริ่มจากสวนยางพาราฝั่งขวาทางถนนเข้าไปยังบ้านสวน ซึ่งห่างออก จากเส้นสำรวจที่ 2 ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) มีระยะประมาณ 23 เมตร ไปสู่สวนยางพารา ฝั่งซ้ายที่มีระยะทางทั้งหมด 220 เมตรและความลึก 52 เมตร แต่ไม่ครอบคลุมตำแหน่งบ่อเจาะ สำรวจที่ 1 และ 2 ตามภาพประกอบ 3.43 ดังนั้นระยะทางการเก็บข้อมูลสามารถสรุปรายละเอียด ได้ตามตารางที่ 3.9

**ตารางที่ 3.9** สรุปรายละเอียดบนแนวสำรวจที่ 3

ระยะทาง (m)	รายละเอียด
จุดเริ่มต้น	ห่างจากเส้นสำรวจที่ 2 มาระยะทาง 26 เมตร ไปทางสวนยางพาราทางฝั่งขวา
0 - 138	สวนยางพาราทางฝั่งซ้ายมีลักษณะทรายปนกรวดชั้นเล็กน้อยถึงชั้นมาก
138 - 150	บริเวณถนนดินลูกรังแห้งและเนื้อแน่น
150 - 214	เข้าสู่ป่ายางพาราทางฝั่งซ้าย ลักษณะเป็นทรายปนกรวดค่อนข้างชั้น
214	สิ้นสุดทางสำรวจ เพราะติดต้นมันสำปะหลังที่ขึ้นรกเดินต่อไปไม่ได้

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพเรดาร์แกรมจะเห็นว่าคลื่นสะท้อนจากตัวกลางภายใต้ แนววัดมีค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันที่ระดับชั้น บริเวณที่มีค่าแอมพลิจูดสูง (แถบสีน้ำเงิน-ชมพูม่วง) คาดว่าเป็นชั้นทรายปนกรวดชั้นจากรายละเอียดลักษณะบนผิวดิน ซึ่งปรากฏอยู่ที่ระยะทางประมาณ 0 – 160 เมตร ในระดับความลึกประมาณ 0 – 3 เมตร แต่ที่ความลึกประมาณ 4 – 12 เมตร ไม่สามารถแปลผลได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนของรากต้นไม้ และในระดับลึกกลับพบแอมพลิจูดต่ำ (แถบสีเหลือง) ซึ่งคาดว่าเป็นโซนของหินแกรนิตเนื้อแน่นตามภาพประกอบ 3.43ก เปรียบเทียบกับ 3.43ข



ภาพประกอบ 3.43 ผลการศึกษาจากเรดาร์แกรมแสดง (ก) บริเวณสัญญาณบริเวณหินแกรนิตเหนือ  
แน่น (ข) การทำ migration ใช้  $V_m = 0.13$  m/ns และแปลความข้อมูล

จากผลการวัด VES ในพื้นที่ทำให้ได้แบบจำลองค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน  
4 ชั้น (แสดงดังภาคผนวก 5) โดยชั้นที่อยู่ล่างสุดคือ ชั้นหินแกรนิต ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ )  
ประมาณ 4,500  $\Omega \cdot m$  จากแบบจำลองพบว่าชั้นหินแกรนิตอยู่ตื้นมาก เมื่อทำการสำรวจด้วยวิธี  
GPR สามารถคำนวณค่าความลึกผิว (Skin depth) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ลงไปได้ผิวดินได้จาก  
สมการที่ 63

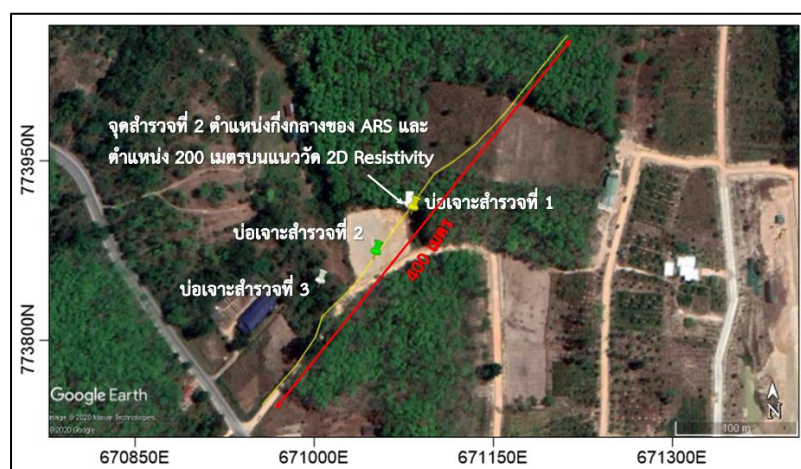
$$\text{Skin depth } (\delta) = 0.0053 \left( \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \right)$$

โดยที่ค่า  $\epsilon_r$  ของหินแกรนิตมีค่าประมาณ 5.33 ซึ่งคำนวณได้จากค่าความเร็วคลื่น  
0.13 m/ns จากแผนภาพไฮเพอร์โบล่าในแผนภาพประกอบ 3.42 และค่า  $\sigma = 1/\rho$  ดังนั้น  $\delta =$   
 $0.053 \times 2.31 \times 4500 = 55$  เมตร

ค่าความลึกผิวประมาณ 55 เมตร หมายความว่า การลดทอนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแอมพลิจูดของคลื่นที่ระดับความลึกจากผิวดิน 55 เมตร จะมีค่าลดลงเหลือแค่ 37% ของค่าแอมพลิจูดเริ่มต้นที่ผิวดิน ดังนั้นผลการสำรวจด้วยคลื่น GPR ในพื้นที่นี้ที่แสดงในแผนภาพเรดาร์แกรมถึงระดับความลึกประมาณ 50 เมตร ยังคงให้ความเชื่อมั่นว่าสัญญาณที่แสดงเป็นสัญญาณคลื่นที่สะท้อนมาจากโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินอย่างแท้จริง

### 3.5 ผลจากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

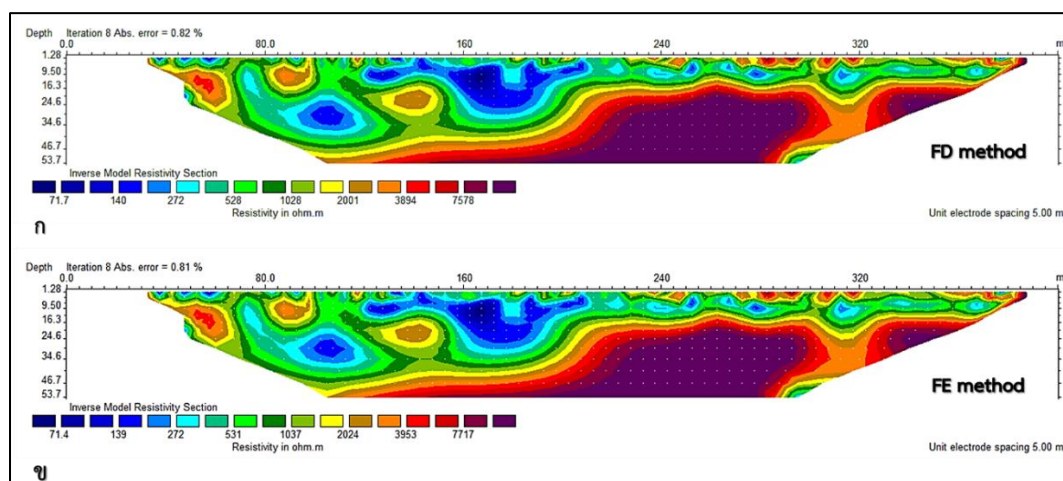
กรณีศึกษาของงานวิจัยได้ออกแบบสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ เป็นการตรวจวัดทั้งแบบแนวราบและแนวตั้ง มีวิธีการวางขั้วไฟฟ้าแบบระบบหลายขั้ว (Multi-Electrode) และออกแบบการเดินของกระแสไฟฟ้าเป็นไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole array) เป็นการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวราบ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินในทิศทางแนวตั้งได้ดีที่มีระยะทางทั้งหมด 400 เมตร จุดเริ่มต้นของการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเริ่มจากก่อนถึงเสาไฟฟ้าต้นที่ 2 ตามพิกัด UTM ที่ 670954 ตะวันออก, 773732 เหนือ เรื่อยไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือจนถึงพิกัด UTM ที่ 671216 ตะวันออก, 774029 เหนือ ผ่านบ่อเจาะสำรวจที่ 1 และ 2 ตามภาพประกอบ 3.44 การพิจารณาการออกแบบแนวสำรวจในทิศทาง 30 องศา เพื่อต้องการตรวจสอบแนวรอยแตกที่ตรวจพบโดยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทที่พบแนวรอยแยกในทิศทาง 300 องศา



ภาพประกอบ 3.44 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิง 2 มิติบนแนวสำรวจ (สี่เหลี่ยมความยาว 400 เมตร) (คัดลอกจากแผนที่ Google Earth)



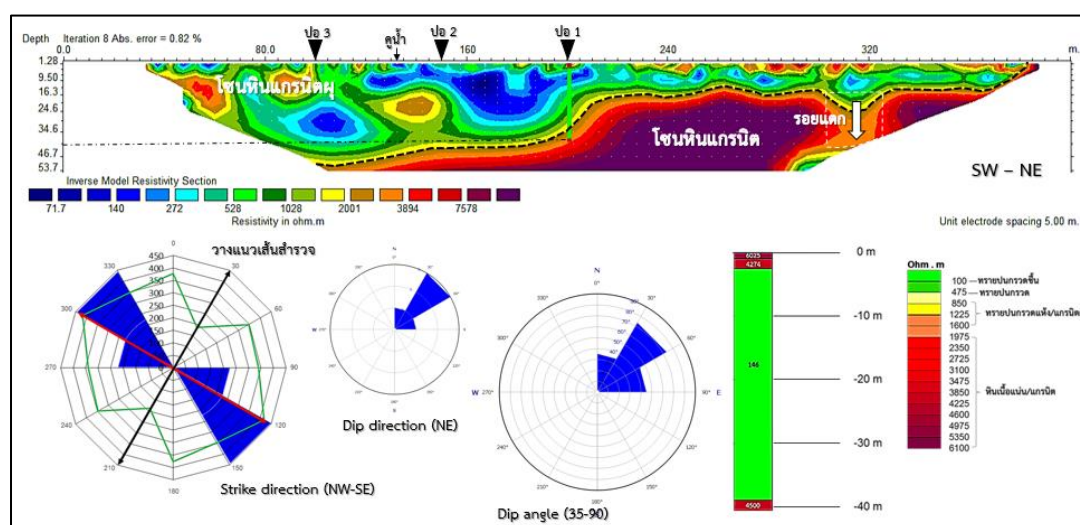
การสร้างแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเลือกใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference method: FD method) เพราะพื้นที่สำรวจมีความต่างระดับไม่มาก และเลือกกำหนดขนาดของตาข่ายกริดเป็น 2 node ที่มีความละเอียดสุด เพื่อให้ข้อมูลมีความแม่นยำขึ้น กรณีสร้างแบบจำลองเชิง 2 มิติเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element method: FE method) พบว่าแบบจำลองเชิง 2 มิติให้ผลลัพธ์ของข้อมูลไม่แตกต่างกันตามภาพประกอบ 3.45



ภาพประกอบ 3.45 ผลการศึกษาแสดงแผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย (ก) วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (ข) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการศึกษาจากแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าพบว่าลักษณะของฐานราก (Bedrock) ที่มีศักยภาพช่วยกั้นน้ำไหลลงสู่ด้านล่างเป็นชั้นหินแข็งเนื้อแน่นหรือหินแกรนิตที่มีความลึกประมาณ 21 - 53.7 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 1,600  $\Omega \cdot m$  ขึ้นไป บริเวณเหนือเส้นประสีดำคาดว่าเป็นโซนหินแกรนิตผุและทรายปนกรวดชั้นที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันในช่วงประมาณ 70 - 1,400  $\Omega \cdot m$  ข้อมูลจากแผนภาพทุกหลาที่มีการระบุทิศทางการวางตัวของระนาบรอยแตกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้ผิวดินได้ทำการตรวจสอบระนาบรอยแตกด้วยวิธีการวัดค่าความสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ โดยวางแนววัดในทิศทางตั้งฉากกับระนาบรอยแตก (NW : 300 องศาที่ตั้งฉากกับ NE: 30 องศา) พบว่าที่ระยะทางประมาณ 315 - 325 เมตร มีรอยแตกขนาดใหญ่ทำมุมเทเอียง 90 องศา ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณที่มีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ในรอยแตกของหิน (ลูกศรสีขาว) ตามแนวสำรวจที่ระยะทาง 130 เมตร พบว่ามีคูน้ำบริเวณด้านข้างของลานกว้างมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในชั้นระดับตื้นมาช่วยเติมน้ำไปยังบริเวณแหล่งกักเก็บน้ำภายใต้ผิวดินได้

เมื่อพิจารณาบริเวณภายใต้บ่อเจาะสำรวจที่ 3 ที่ระยะทางประมาณ 100 เมตร พบว่าที่ความลึกประมาณ 24.6 – 34.6 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ซึ่งคาดว่า เป็นบริเวณกักเก็บน้ำบาดาลภายใต้ผิวดิน และบริเวณภายใต้บ่อเจาะสำรวจที่ 2 ที่ระยะทาง 150 เมตร พบว่าเป็นหินแกรนิตที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันในช่วงประมาณ 1,028 - 2,001  $\Omega \cdot m$  ซึ่งคาดว่าไม่พบน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นหินแกรนิตที่มีลักษณะเป็นเนินสูงขึ้นมาที่วางตัวเหมือน เขื่อนกั้นน้ำ เพื่อรองรับน้ำหรือกั้นไม่ให้น้ำไหลซึมออกไปยังทางฝั่งทิศตะวันตกเฉียงใต้ ตั้งแต่ ระยะทางจากบ่อเจาะสำรวจที่ 2 ไปยังบ่อเจาะสำรวจที่ 1 พบว่ามีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้าง ต่ำที่มีลักษณะคล้ายแอ่ง ซึ่งคาดว่า เป็นระดับน้ำใต้ดินลอย (Perched water table) ในชั้นหินเนื้อ แน่นที่น้ำไม่สามารถไหลซึมผ่านได้ (Aquitard) แต่เมื่อพิจารณาภายใต้บ่อเจาะสำรวจที่ 1 จากข้อมูล การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวดิ่ง (VES) พบว่าในที่ความลึกประมาณ 24.6 – 40 เมตร มี ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ ซึ่งคาดว่าที่ระดับลึกอาจมีน้ำบาดาล กักเก็บอยู่ภายในรอยแตกของหินตามภาพประกอบที่ 3.46



**ภาพประกอบ 3.46** ผลการศึกษาแสดงแผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า อ่างอิงการวางตัวของแนวระนาบ, ระนาบเอียง และมุมเทในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) จากแผนภาพกู่หลายร่วมกับการอ้างอิงการแปลความหมายของวัสดุจากข้อมูลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวดิ่ง (VES) บนเส้นสำรวจที่ 30 องศา

### 3.6 ผลการศึกษาอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่

สิ่งที่เป็นปัจจัยหลักสำคัญของบริเวณพื้นที่ศึกษาสำหรับการหาน้ำใต้ดินในชั้นหินแข็ง คือ ช่องว่าง (Porous), รอยแตก (Fractures) หรือแนวแยก (Joints) ดังนั้นการสำรวจหาน้ำใต้ดินจึงจำเป็นต้องหาช่องว่างที่มีรอยแตกหรือแนวแยกของหินแข็งในชั้นใต้ดินเป็นอย่างมาก ซึ่งบริเวณพื้นที่ศึกษาพบหินแกรนิตเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มชั้นหินอุ้มน้ำประเภทหินแข็ง (Consolidated aquifers) ที่มีคุณสมบัติช่วยกักเก็บน้ำบาดาลที่ขึ้นอยู่กับช่องว่างทุติยภูมิ (Secondary interstices) ที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการเกิดหินเดิมที่มีช่องว่างปฐมภูมิ (Original interstices) ส่วนใหญ่ตะกอนของบริเวณพื้นที่ศึกษาเกิดจากกระบวนการผุพังจากหินแกรนิตก่อให้เกิดชั้นตะกอนที่มีลักษณะเป็นกรวดและทราย ในกรณีหินแกรนิตที่อยู่ภายใต้ชั้นตะกอนถูกดันแทรกขึ้นมาพบรอยแตกเป็นจำนวนมากจะยิ่งเพิ่มชั้นน้ำให้กับแอ่งตะกอน ลักษณะของรอยแตกในชั้นหินแกรนิตจะประกอบด้วยสองทิศทางหลักตัดไขว้กัน ซึ่งทำให้ชั้นน้ำมีความสามารถที่จะไหลไปหากันได้ ดังนั้นจำนวนรอยแตกของหินแกรนิตยิ่งมากจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการอุ้มน้ำยิ่งดีเท่านั้น

จากแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระยะทาง 120 – 210 เมตร ที่มีลักษณะเป็นแอ่งหรือเหมือนเขื่อนกั้นน้ำซึ่งคาดว่าเป็นชั้นหินเนื้อแน่นที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (Aquitard) หรือหินแกรนิตที่รองรับระดับน้ำใต้ดินลอย (Perched water table) เกิดจากการไหลผ่านลงตามรอยแตก แต่ระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ยังขึ้นอยู่กับความลาดชันที่ไม่แน่นอนจากสภาพภูมิประเทศ เช่น บริเวณที่สูงจะมีระดับน้ำบาดาลสูง แต่บริเวณที่ต่ำจะมีระดับน้ำบาดาลที่ต่ำไปด้วย ซึ่งระดับของน้ำบาดาลที่มีความสูงต่ำไม่มากเท่ากับความสูงต่ำของลักษณะภูมิประเทศก่อให้เกิดระดับน้ำใต้ดินลอยแสดงภายใต้ระดับเดียวกัน ดังนั้นการเจาะบ่อบาดาลที่ 1 และ 3 ในพื้นที่ศึกษาและได้นำน้ำมาใช้ น้ำในบริเวณดังกล่าวน่าจะได้รับน้ำ (Groundwater Recharge) จากน้ำฝนที่ตกลงมาและไหลซึมผ่านรอยแตกด้านบนลงไปกักเก็บยังแหล่งกักเก็บข้างล่าง



## บทที่ 4

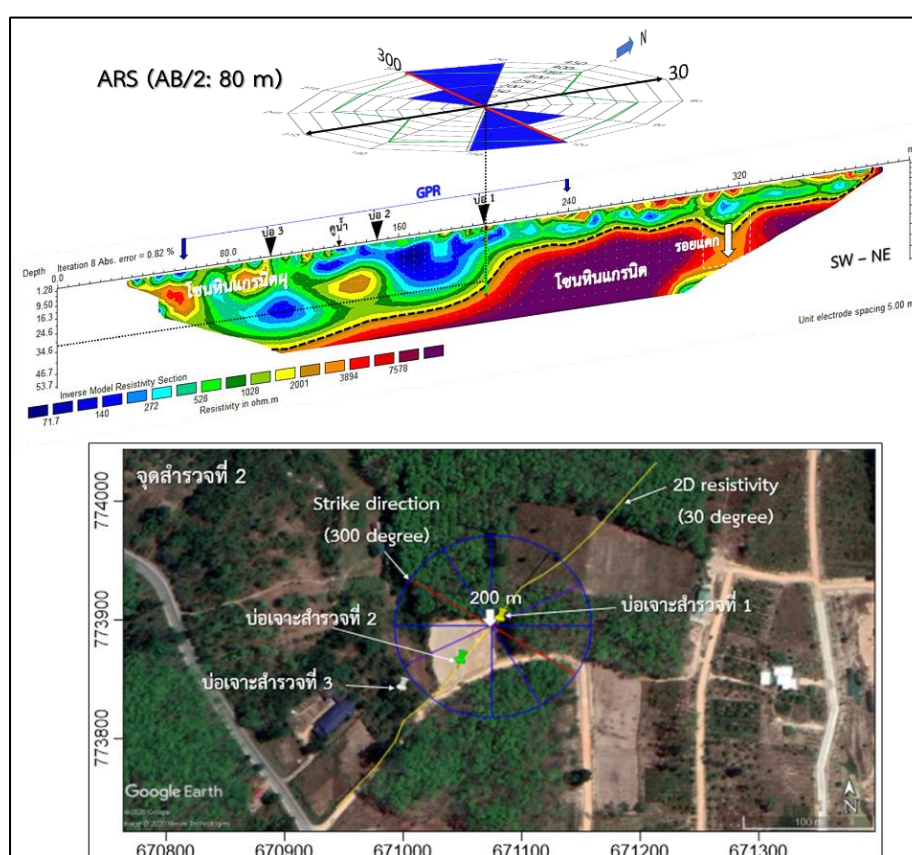
### บทวิจารณ์

การศึกษาพื้นที่โดยรอบของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำดวน จังหวัดสงขลาที่มีโครงสร้างธรณีวิทยาความซับซ้อนของรอยแตกในหินแกรนิตส่งผลให้ระบุตำแหน่งการเจาะหาน้ำบาดาลทำได้ยาก ถ้าทำการเจาะน้ำบาดาลโดยไม่มีการตรวจสอบโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดิน กรณีที่ไม่พบน้ำบาดาลจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง ทั้งเวลาและไม่ได้ประโยชน์ ดังนั้นการสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์จึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการตรวจสอบโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดิน การออกแบบสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมูท (Azimuthal resistivity measurement) ในรูปแบบ Apparent resistivity หมุนรอบ 360 องศา เป็นการประยุกต์จากวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวตั้ง (VES) ที่มีจุดเด่นในการเก็บความละเอียดของรอยแตกขนาดเล็กเพื่อช่วยกำหนดทิศทางแนวระนาบรอยแตกของหิน (Strike direction)

ผลการศึกษาจากข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏบนโพลาไดอะแกรมพบว่าแนวระนาบรอยแตกมีทิศทางการวางตัวในแนวทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) และบางส่วนของแนวระนาบรอยแตกมีทิศทางการวางตัวจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE) ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาร่วมกับธรณีวิทยาโครงสร้างของประเทศไทยจากทิศทางแรงหลักที่มากระทำต่อแผ่นเปลือกโลกในทิศเหนือ - ใต้ ทำให้เกิดพฤติกรรมการวิบัติของเปลือกโลกที่ถูกแตกแรงออกไป 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ที่สอดคล้องไปกับทิศทางแรงหลัก และบางส่วนอาจมีทิศทางเหนือ - ทิศใต้ (N-S) หรือทิศทางตะวันออก - ทิศตะวันตก (E-W) เนื่องจากมีธรณีแปรสัณฐานอื่นมาเป็นปัจจัย ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ขนานกับรอยแตกจะมีค่าสูงสุดและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่มีต่ำสุดในทิศทางตั้งฉากกับแนวระนาบรอยแตก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ต่อเนื่องที่มีค่ามากจะแสดงถึงโครงสร้างภายในเนื้อหินแกรนิตที่มีความแตกต่างกันมากเช่นกัน เนื่องจากความถี่หรือขนาดช่องว่างของรอยแตกที่มีมากจะส่งผลต่อค่าความพรุนของหินมีค่าสูงจึงทำให้มีศักยภาพกักเก็บน้ำได้ดี ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้รับมีค่าน้อยลงสามารถพิจารณาภายใต้บ่อเจาะสำรวจที่ 1 บนข้อมูลการวัดค่า

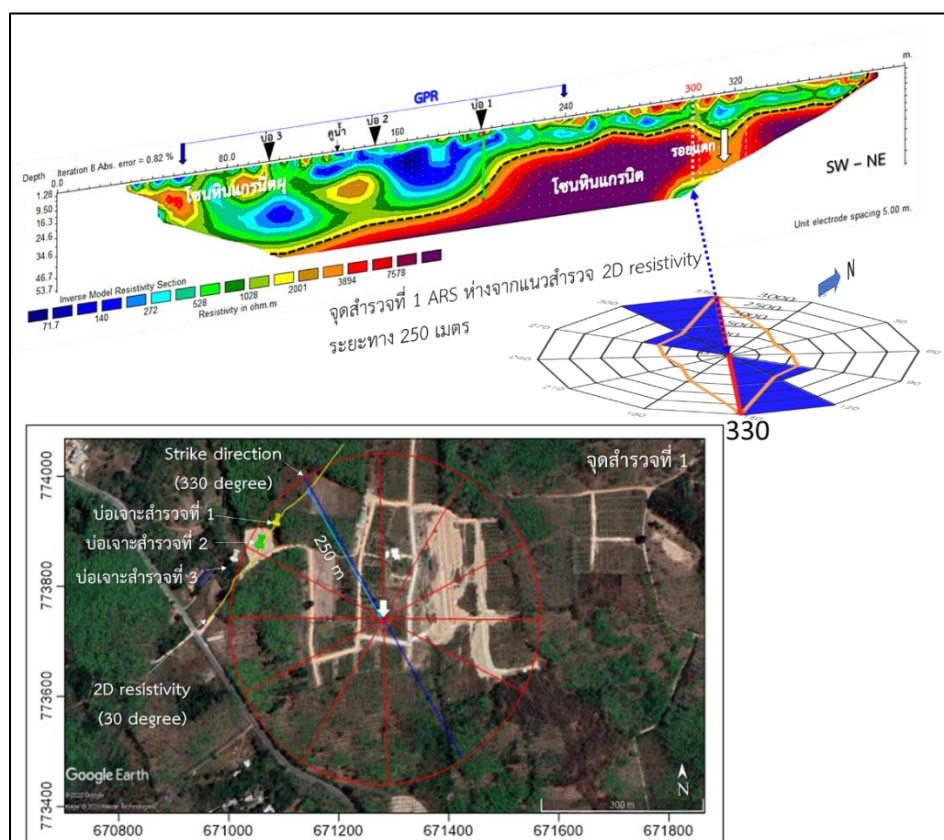
สภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวตั้ง (VES) ที่ 30 องศา แต่แผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากลับพบว่าที่ระยะทาง 200 เมตร ความลึกประมาณ 32 เมตร มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูง

ข้อมูลที่ได้รับจากวิธีข้างต้นสามารถนำมาออกแบบการสำรวจเรดาร์หยั่งลึก (Ground penetrating radar) และการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในการวางแผนสำรวจที่มีทิศทางตัดขวางกับแนวระนาบของหินในทิศทาง 30 องศา โดยอ้างอิงจากข้อมูลการสำรวจทางธรณีวิทยาในแผนภาพกุหลาบร่วมกับโพลาไดอะแกรมที่มีแนวระนาบรอยแยก (Strike) วางตัวในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ – ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ที่ 300 องศา จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่าแนวรอยแยก (Strike) มีความสอดคล้องกับขอบของแอ่งที่คาดว่าเป็นบริเวณที่กักเก็บน้ำใต้ดิน โดยขอบแอ่งมีมุมเทเอียงประมาณ 90 องศา โดยมีพื้นที่ของแอ่งอยู่ทิศทาง SW ตามภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 การออกแบบการสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติและเรดาร์หยั่งลึกตัดขวางกับระนาบรอยแตก อ้างอิงจากแผนภาพกุหลาบร่วมกับโพลาไดอะแกรมในทิศทาง 300 องศาที่จุดสำรวจที่ 2

และเมื่อพิจารณาแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับทิศทางของ  
 ระบายรอยแยกที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทของจุดสำรวจที่ 1 พบว่าบริเวณ  
 ที่ตรวจพบรอยแตกขนาดใหญ่บนแผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ระยะทาง  
 ประมาณ 315 – 325 เมตร มีความสอดคล้องกับทิศทางแนวระบายรอยแยกที่ชี้ไปในทิศทาง  
 ประมาณ 330 องศา บริเวณตำแหน่งดังกล่าวจึงคาดว่าเป็นบริเวณที่มีรอยแตกและมีน้ำกักเก็บอยู่  
 ตามภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 การออกแบบการสำรวจการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติและเรดาร์หยัง  
 ลีกดัดขวางกับระบายรอยแตก อ้างอิงจากแผนภาพกุหลาบร่วมกับโพลา  
 ไดอะแกรมในทิศทาง 330 องศาที่จุดสำรวจที่ 1

กรณีลักษณะภูเขาที่มีความสูงชันมากจึงทำให้ไม่สามารถเดินสำรวจเพื่อวัดหาทิศทาง  
 ระบายรอยแตกของหินได้ วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทจึงเป็นวิธีหนึ่ง  
 ที่ช่วยศึกษาหาทิศทางรอยแตกของหินภายใต้ผิวดิน และยังสามารถนำไปใช้ออกแบบศึกษาการวางตัว  
 ของชั้นตะกอน หรือการหารอยแตกในหลุมฝังกลบมูลฝอยเพื่อออกแบบป้องกันการรั่วซึมของน้ำ  
 ชะมูลฝอยลงสู่ระบบน้ำใต้ดินได้อีกด้วย

เมื่อนำวิธีของงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาอื่นๆ ที่ไม่ได้สำรวจทางด้านธรณีวิทยาพบว่า การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติร่วมกับข้อมูลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวตั้ง (VES) หรือการสำรวจเรดาร์หยั่งลึกยังคงต้องทำการสุ่มทิศทางการสำรวจหารอยแตกของหิน ซึ่งในแต่ละชนิดของเครื่องมือมีข้อเด่นและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป อย่างเช่น การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้ามีจุดเด่นที่แตกต่างกัน เช่น การวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์มีการตอบสนองสภาพธรณีวิทยาในแนวตั้งได้ดี แต่ไม่เหมาะการตอบสนองทางแนวราบ การวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์-ซัลมเบอร์เจอร์มีการตอบสนองสภาพธรณีวิทยาทั้งแนวตั้งและแนวราบได้ดี แต่ประสิทธิภาพที่ได้รับจากข้อมูลตีปานกลาง ส่วนการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพลการตอบสนองสภาพธรณีวิทยาในแนวราบได้ดี และมีสัญญาณรบกวนน้อย เป็นต้น ข้อมูลที่ได้มาจากการประมวลผลคือ แผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีมาตราส่วนค่อนข้างกว้างหรือหยาบไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากรอยแตกขนาดเล็กที่มีน้ำแทรกอยู่ได้ แต่สามารถใช้แผนภาพการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามองภาพรวมของโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินได้ การสำรวจเรดาร์หยั่งลึกมีศักยภาพหารอยแตกได้ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้ดี แต่ข้อด้อยของเครื่องมือนี้มีความไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาแทรกได้ง่าย รวมถึงปัญหาพื้นผิวของเส้นทาง ถ้าเครื่องมือผ่านเส้นทางที่ต่างระดับหรือขรุขระมากอาจส่งผลให้ข้อมูลจากเรดาร์แกรมมีประสิทธิภาพลดลง

ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือและออกแบบแนวเส้นสำรวจจึงมีความสำคัญอย่างมาก ถ้าเลือกแนวเส้นสำรวจที่ไม่สอดคล้องกับทิศทางของรอยแตกตามสภาพความเป็นจริงทางธรรมชาติ อาจทำให้ผลการศึกษาไม่สามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ได้ ซึ่งเป็นการเสียเวลา ค่าใช้จ่าย และอาจต้องทำการสุ่มการสำรวจเพิ่มเติมมากขึ้น

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

พื้นที่ศึกษาของโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอกาญจนบุรี จังหวัดสงขลา มีลักษณะทางธรณีวิทยาประกอบด้วยตะกอนร่วนยุคควอเทอร์นารีที่เป็นแอ่งตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนหินผุ ทำให้บริเวณพื้นที่ศึกษาพบกรวดขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ (Gravel, cobbles, boulders) ที่เกิดจากเศษหินพัดพามาจากบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงและมาสะสมตัวอยู่ในพื้นที่ ผลการศึกษาทางธรณีวิทยาภายในบริเวณพื้นที่ศึกษาพบว่าเป็นหินไปโอไทต์-มัสโคไซด์แกรนิตที่มีรอยแยกในทิศทางการวางตัวของแนวระนาบจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE) และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่มีมุมเทประมาณ 35 - 90 องศา บางส่วนมีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) และระนาบเอียงไปทางตะวันออกเฉียงใต้ (Dip direction: NW) ที่มีมุมเทเอียง (Dip angle: E และ SE) ประมาณ 50 - 90 องศา ผลการศึกษาทางธรณีวิทยามีความสอดคล้องกับผลการศึกษาด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ในการตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบบอซิมุทจากโพลาไดอะแกรมพบว่าทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Strike: NE-SW) ในที่ระดับตื้น และมีทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Strike: NW-SE) ในที่ระดับลึก

จากข้อมูลทิศทางการวางตัวของแนวระนาบรอยแยกภายใต้ผิวดินที่ระดับลึกในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ - ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ได้ทำการตรวจสอบแนวระนาบรอยแยกด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินและวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ โดยวางแนววัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวระนาบรอยแยก ผลจากแผนภาพเรดาร์แกรมบนแนวสำรวจที่ 1 พบว่าเกิดสัญญาณจากภายนอกเข้ามาบรบกวนที่ความลึกประมาณ 6 - 26 เมตร มีสาเหตุมาจากสัญญาณรบกวนจากเสาไฟฟ้าและหลังคาสังกะสีเข้ามาแทรกในแผนภาพเรดาร์แกรมทำให้การแปลความหมายข้อมูล สำหรับบริเวณที่มีรอยแตกตรวจพบในแผนภาพเรดาร์แกรมของแนววัดที่ 2 ที่ระยะประมาณ 115 -130 เมตร ที่ความลึกประมาณ 15 - 30 เมตร และ 37 - 45 เมตร ผลการศึกษาของการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ ในตำแหน่งบ่อเจาะสำรวจที่ 2 วางตัวอยู่บนโซนชั้นหินเนื้อแน่นอยู่ด้านล่างที่

มีลักษณะเหมือนเชื่อมกันน้ำ เพื่อกันน้ำไม่ให้ไหลซึมจากทางฝั่งทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปยังฝั่งทิศตะวันตกเฉียงใต้ จึงทำให้เจาะไม่พบน้ำภายใต้จุดนี้และจากภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ายังพบรอยแตกขนาดใหญ่ที่ระยะทางประมาณ 315 - 325 เมตร ที่คาดว่าจะเป็นบริเวณที่มีน้ำบาดาลถูกกักเก็บอยู่ในรอยแตกของหินและเป็นจุดที่แนะนำให้มีการเจาะทดสอบเพื่อนำน้ำบาดาลมาใช้ต่อไป

ดังนั้นการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์จึงเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการตรวจสอบโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดิน เพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการเจาะบ่อบาดาล กรณีไม่มีผลสำรวจทางด้านธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบอะซิมุทจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาหารอยแตกในชั้นหินแข็ง เพื่อลดเวลาการสุ่มสำรวจด้วยเครื่องมือต่างๆ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังช่วยเพิ่มโอกาสการเจอแหล่งน้ำใหม่



## บรรณานุกรม

- Adepelumi, A. A., Yi, M. J., Kim, J. H., Ako, B. D. and Son, J.S, 2006. **Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern Nigeria.** Hydrogeology Journal, Vol. 14, No.7, pp. 1284-1306.
- Armando R. Sena, A.R., Stoffa, P.L. and Sen, M.k., 2005. **Migration of Ground Penetrating Radar data in heterogeneous and dispersive media.** New Strategies for European Remote Sensing, pp. 711-719.
- Attwa, M. and Ali, H., 2018. **Resistivity characterization of aquifer in coastal semiarid areas: an approach for hydrogeological evaluation.** Springer International Publishing Cham, pp. 213–233.
- Baker, G.S., Jordan, T.E. and Pardy, J., 2007. **An introduction to ground penetrating radar (GPR).** Special Paper of the Geological Society of America, Vol. 432, pp. 1-18.
- Cassidy, N. J., 2009. **Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis.** Oxford, United Kingdom, pp. 141-176.
- Cintra, D., Manhães, P., Fernandes, F.M. and Roehl, D., 2020. **Evaluation of the GPR (1.2 GHz) technique in the characterization of masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Vol.13, pp. 274-297.

- Constable, S. C., McElhinny, M. W. and McFadden, P. L., 1984. **Deep Schlumberger sounding and the crustal resistivity structure of central Australia.** Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 79, pp. 893-910.
- Dahlin, T., 2001. **The development of DC resistivity imaging techniques.** Computers & Geosciences, Vol. 27, pp. 1019-1029.
- Diasa, R., Hoefel, S., Costa, Carrer, J. and De Lacerda, L., 2010. **Two-dimensional simulation of the Wenner method with the boundary element method - influence of the layering discretization.** Computational Methods in Engineering, Vol.29, pp. 2255-2266.
- Fraser, J., 2015. **Design and simulation of a coded sequence ground penetrating radar.** Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia.
- Giroux, B. and Chouteau, M., 2010. **Quantitative analysis of water-content estimation errors using ground-penetrating radar data and a low-loss approximation.** Geophysics, VOL. 75, pp. WA241-WA249.
- Greenhalgh, S.A., Marescot, L., Zhou, B., Greenhalgh, M. and Wiese, T., 2009. **Electric potential and Fréchet derivatives for a uniform anisotropic medium with a tilted axis of symmetry.** Pure and Applied Geophysics, Vol. 166, pp. 673–699.
- Gu, K., Wang, G. and Li, J., 2004. **Migration based SAR imaging for ground penetrating radar systems.** IEE Proceedings-radar, Sonar and Navigation, Vol. 151, No. 5, pp. 317-325.

Guéguen, Y. and Palciauskas, V., 1994. **Introduction to the physics of rocks.** Princeton University Press, New Jersey.

Günther, T., 2004. **Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements.** Leibniz Institute for Applied Geophysics, Germany.

Habberjam, G.M., 1975. **Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements.** Geophysical Prospecting, Vol. 23, 211-247.

Herman, R., 2001. **An introduction to electrical resistivity in geophysics.** American Journal of Physics, Vol. 69, pp. 943-952.

Hogervorst, T., Bouma, H.W. and Vos, J., 2009. **Evolution of the hip and pelvis.** Acta Orthopaedica, Vol. 80, pp. 1-39.

Huchon, P., Pichon, X.L. and Rangin, C., 1994. **Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia.** Geological Society of America, Vol. 22, pp. 27-30.

Huston, D. and Busuioc, D., 2014. **Radar technology: radio frequency, interferometric, millimeter wave and terahertz sensors for assessing and monitoring civil infrastructures.** Sensor Technologies for Civil Infrastructures, pp. 201-237.

Hyll, K., 2016. **Image-based quantitative infrared analysis and microparticle characterisation for pulp and paper applications.** Department of Production Engineering, Sweden.

- Jamaluddin, J. and Emi, P.U., 2018. **Identification of subsurface layer with Wenner-Schlumberger arrays configuration geoelectrical method.** Earth Environmental Science. pp. 1–6.
- Loke, M.H., 2001. **Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging.** Malaysia: Geotomo Software.
- Loke, M.H., Acworth, L. and Dahlin, T., 2003. **A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys.** Exploration Geophysics, Vol 34, pp. 182-187.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. **Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method.** Geophysical Prospecting, Vol. 44, pp. 131-152.
- Luodes, H., 2015. **Ground penetrating radar and assessment of natural stone.** Estonian Journal of Earth Sciences, Vol. 57, Issue 3, pp. 150-155.
- Morley, C.K., Charusiri, P. and Watkinson, I.M., 2011. **Structural geology of Thailand during the Cenozoic.** In: Ridd, M.J., Barber, M.F., Crow, A.J. (Eds.), The Geology of Thailand. The Geological Society, London, pp. 273–334.
- Muhammad, J., 2016. **Quantitative Models to Study the Soil Porosity as Function of Soil Resistivity.** Journal of Modern Hydrology, Vol. 6, pp. 253-262.
- Nakao, K. and Kawano, T. (2019) **History of Kitakyushu along with the great divergence in anthropocene: An implication for possible periodization.** Bulletin du Centre Franco-Japonais d'Histoire des Sciences, Vol. 13, Issue 1, pp. 37-49.

- Olofsson, T. and Stepinski, T., 2009. **Phase shift migration for imaging layered materials and objects immersed in water.** IEEE International Ultrasonics Symposium, Proceedings, pp. 673-676.
- Özdemir, C., Demirci, Ş., YilLit, E. and Yilmaz, B., 2014. **A Review on migration methods in B-Scan ground penetrating radar imaging.** Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, pp. 1-16.
- Park, J.J., Chung, Y. and Hong, G., 2019. **A method for cavity scale estimation based on ground-penetrating radar (GPR) explorations: an experimental study.** Advances in Civil Engineering, Vol. 2019, pp. 1-13.
- Peksen, E. and Yas, T., 2018. **Resistivity inversion of transversely isotropic media.** Turkish Journal of Earth Sciences, Vol. 27, pp. 152–166.
- Polachan, S., Pradidtan, S., Tongtaow, C., Janmaha, S., Intarawijitr, K. and Sangsuwan, C. 1991. **Development of Cenozoic basins in Thailand.** Marine and Petroleum Geology. Vol. 8, pp. 84–97.
- Reppert, P.M., Morgan, F.D., Toksoz M.N., 2000. **Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients.** Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, Issue 2-4, pp. 189-197.
- Ritzi R.W. and Andolsek, R.H., 1992. **Relation between anisotropic transmissivity and azimuthal resistivity surveys in shallow, fractured, carbonate flow systems.** Groundwater, Vol. 30, pp. 774–780.

Szymczyk, M. and Szymczyk, P., 2013. **Preprocessing of GPR data**. Image Processing & Communication, Vol. 18, pp.83-90.

Taylor, R.W. and Fleming, A.H. 1988. **Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys**. Groundwater, Vol. 26, 464-474.

Telford, W.M., L.P. Geldart., R.E. Sheriff, D.A. Keys. 1990. Applied geophysics: New York, NY, Cambridge University Press.

Vachirastienchai, C., Boonchaisuk, S. and Siripunvaraporn, W., 2010. **A hybrid finite difference–finite element method to incorporate topography for 2D direct current (DC) resistivity modeling**. Physics of The Earth and Planetary Interiors, Vol. 183, Issue 3, pp. 426-434.

Watson, K.A. and Barker, R.D., 1999. **Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings**. Geophysics, Vol. 64, pp. 739–745.

Yang, C., and Qin, L., 2020. **Graphical representation and explanation of the conductivity tensor of anisotropic media**. Surveys in Geophysics, Vol. 41, pp. 249–281.

Zhu, H., 2017. **Floristic characteristics and affinities in Lao PDR, with a reference to the biogeography of the Indochina peninsula**. Public Library of Science, Vol.12, pp. 1-13.

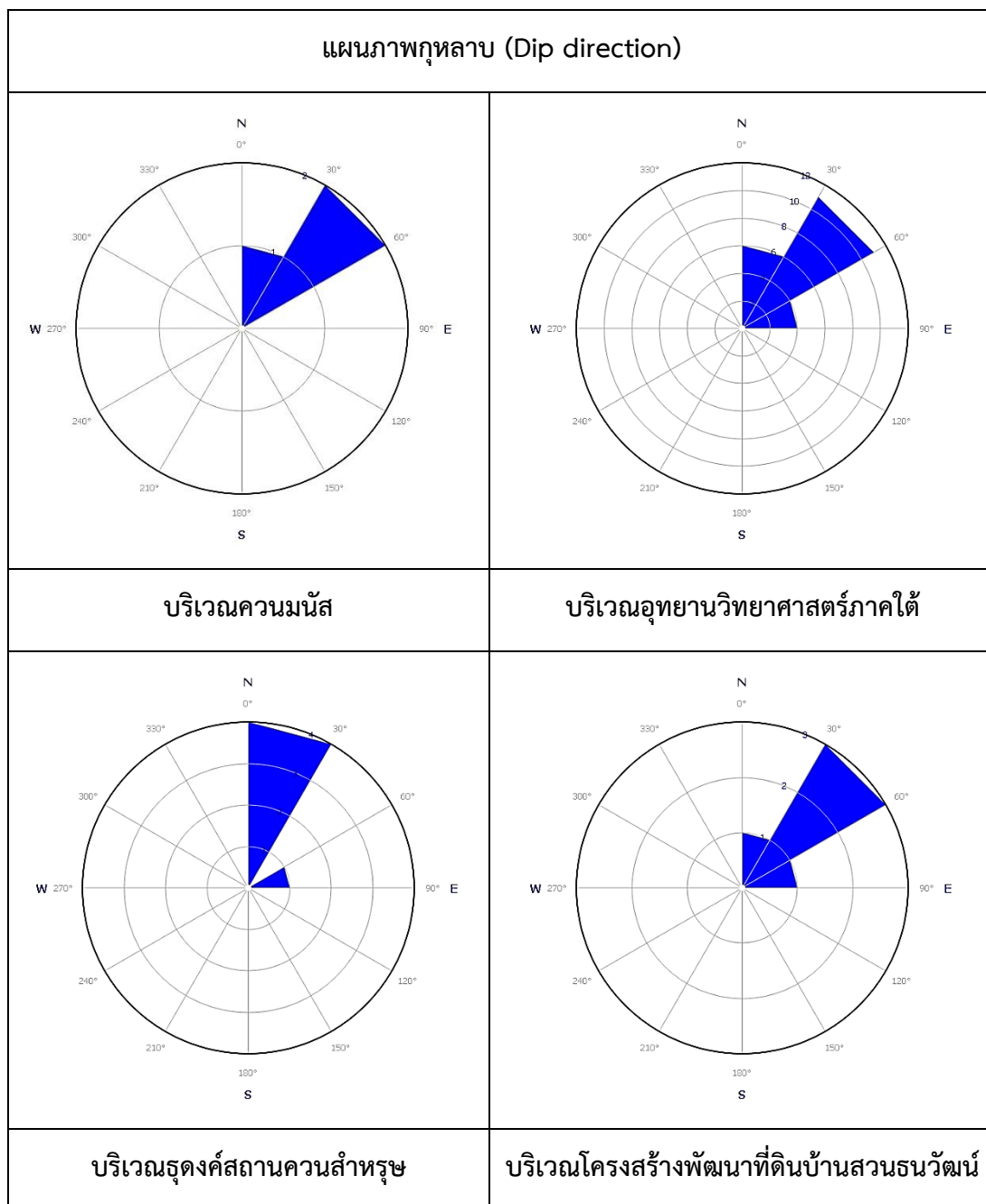
เพียงตา สาทรักษ์, 2552. **ธรณีวิทยาโครงสร้าง**. ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศูนย์อุตุวิทยามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.songkhla.tmd.go.th/site/skl?id=2019> (7 มิถุนายน 2563).

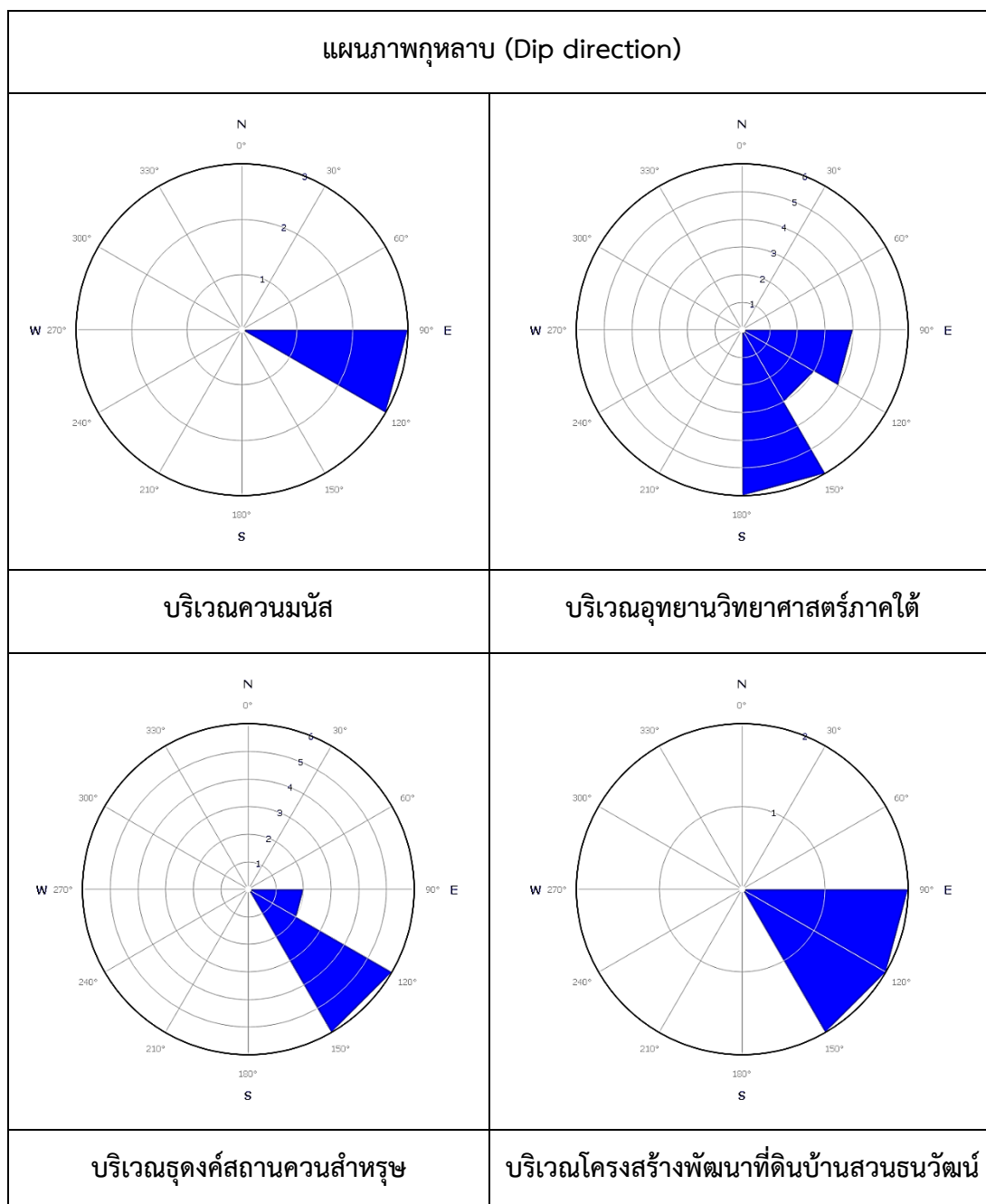


ภาคผนวก

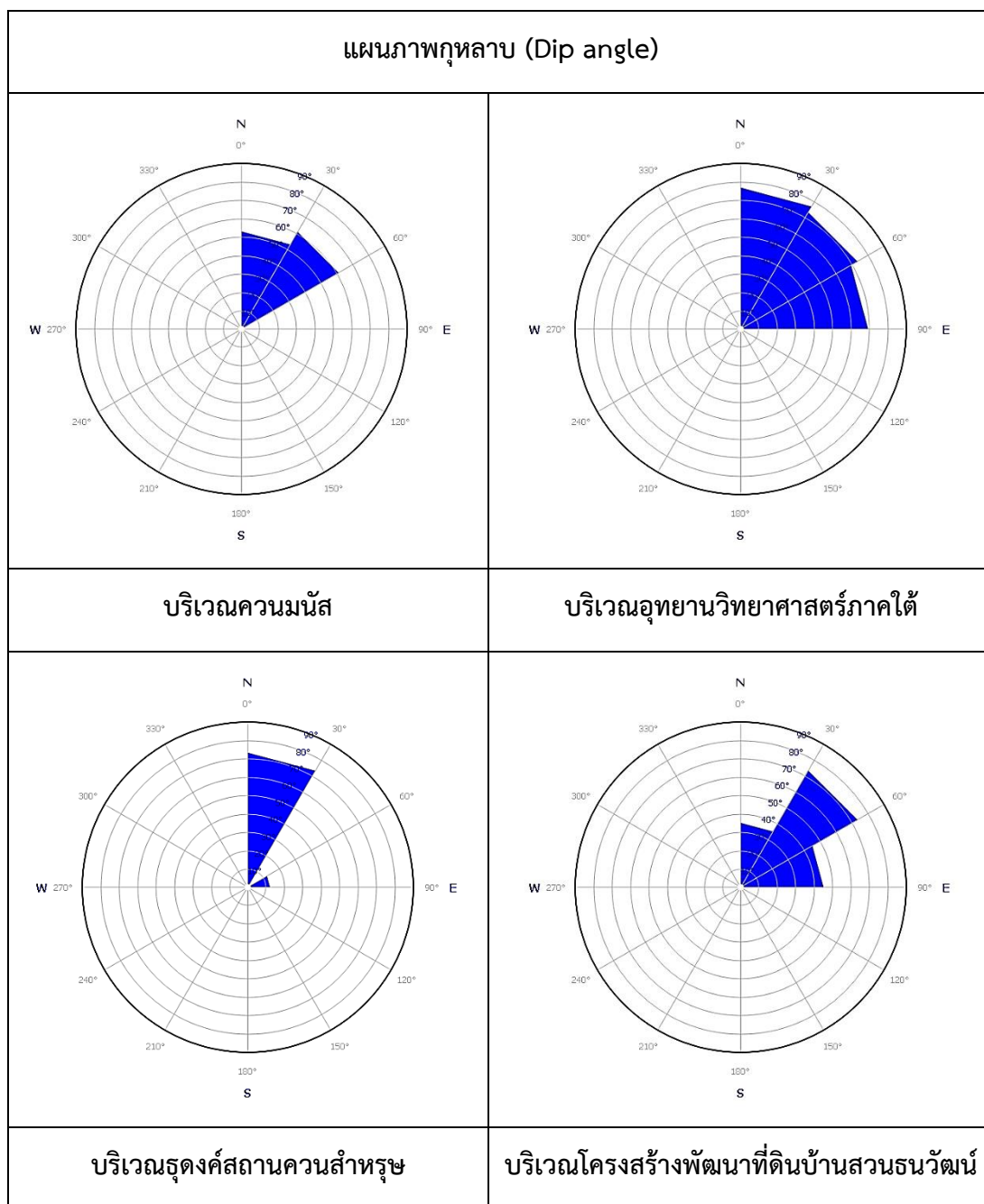
## ภาคผนวก



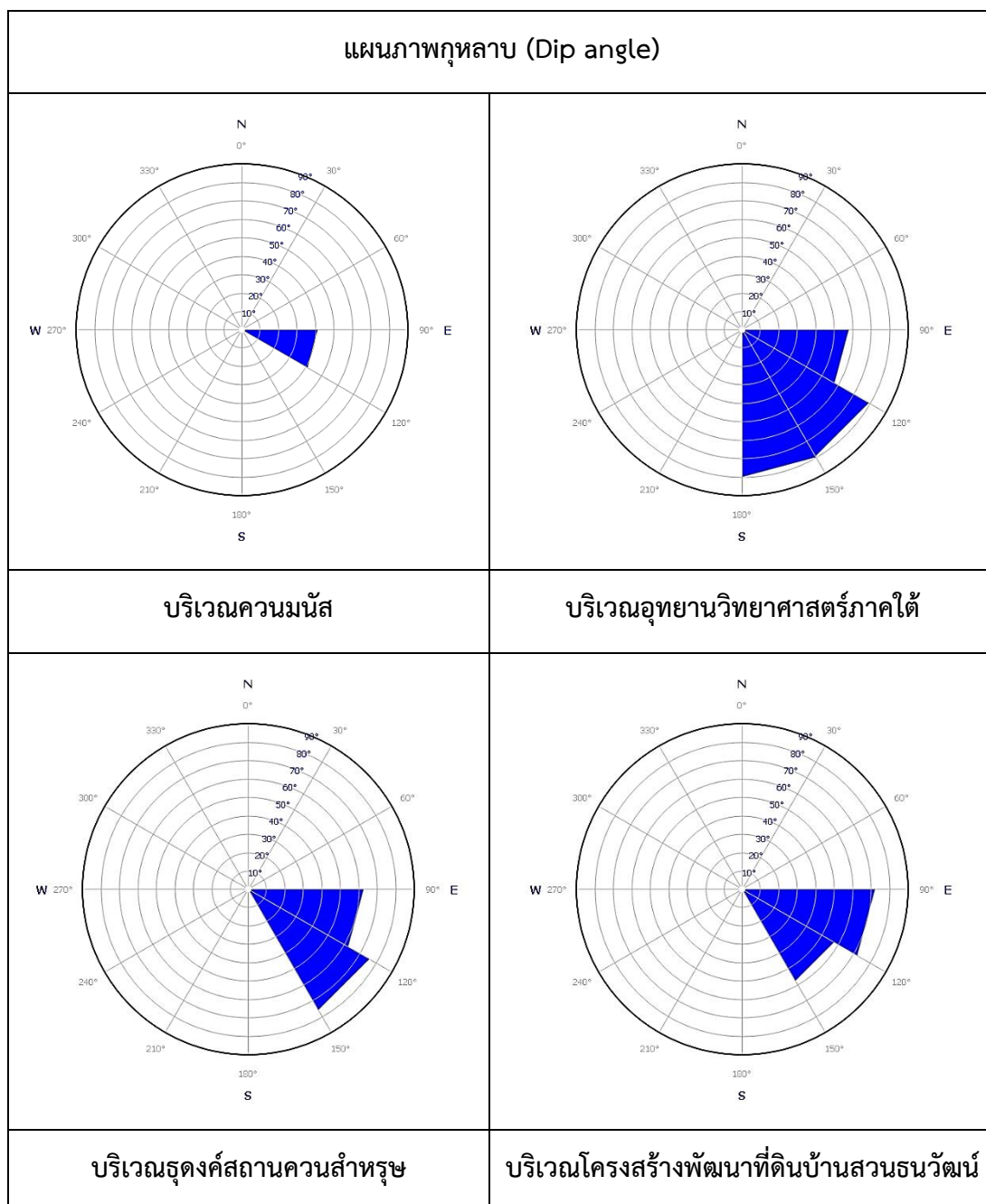
ภาพประกอบ ผ1 แสดงผลการศึกษาศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระนาบเอียงในทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) จากข้อมูลแนวระนาบรอยแยก (Strike) ของหินใน ทิศทาง NW-SE



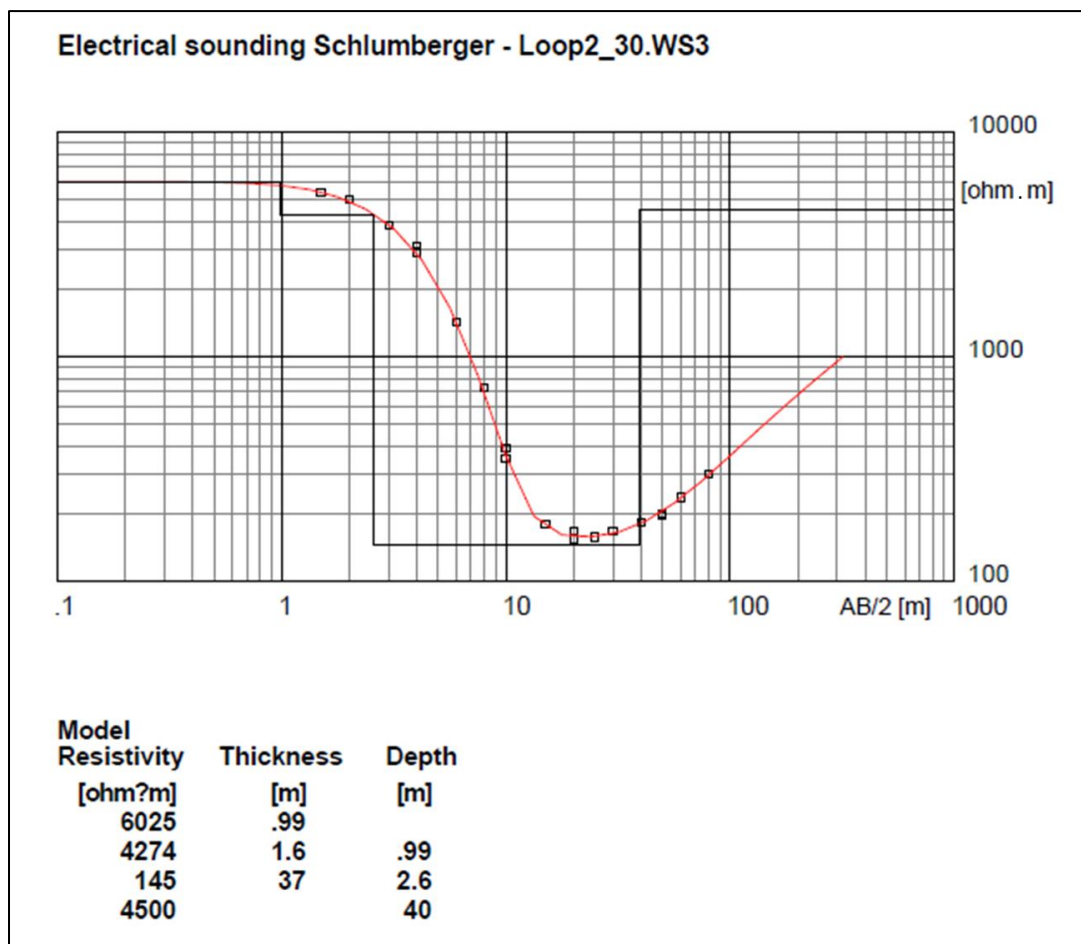
ภาพประกอบ ผ2 แสดงผลการศึกษาศักยภาพการวางตัวของแนวระนาบเอียงในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ (SE) จากข้อมูลแนวระนาบรอยแยก (Strike) ของหินในทิศทาง NE-SW



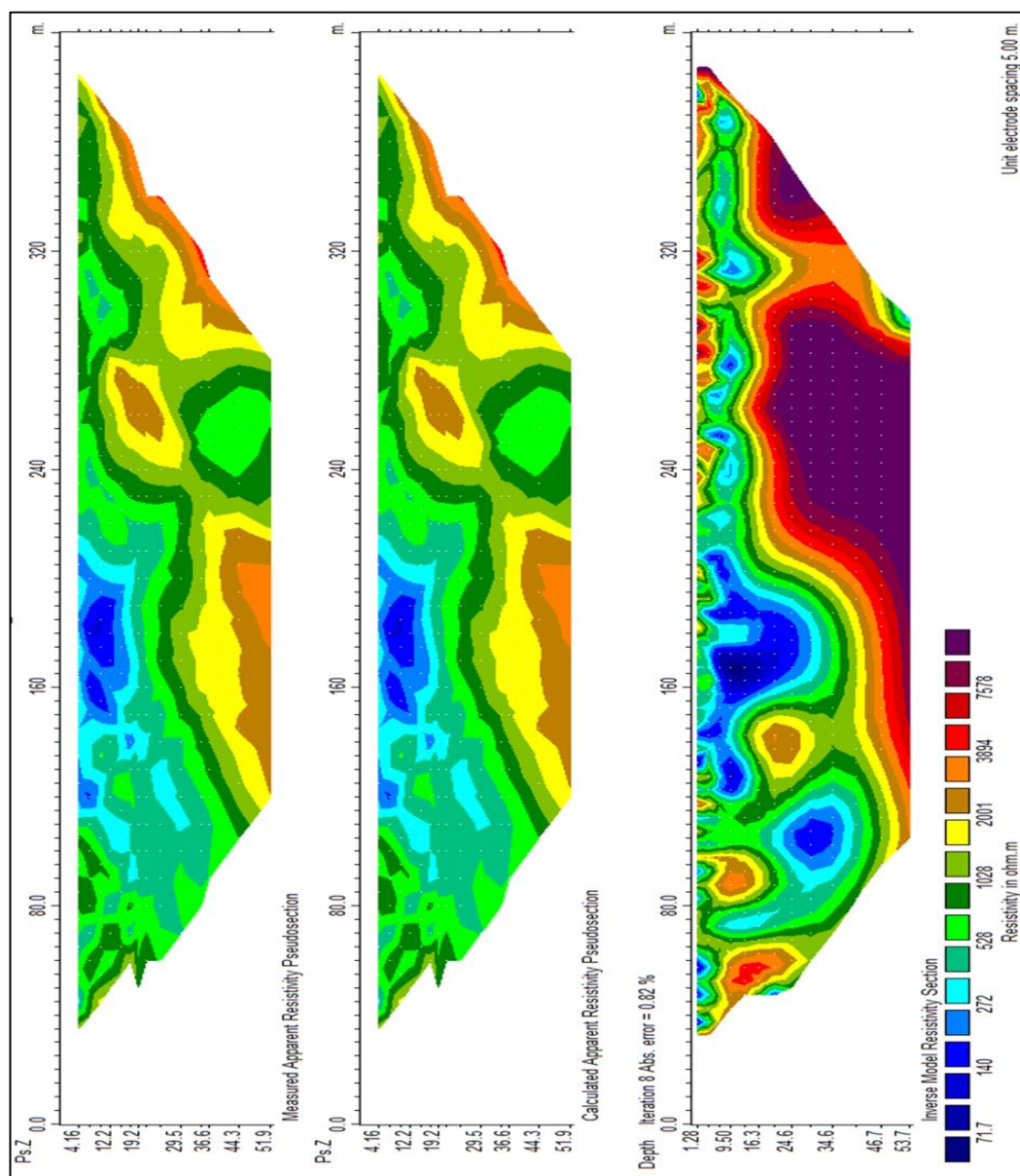
ภาพประกอบ ผ3 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระนาบที่มีมุมเทเอียงในทิศทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) จากข้อมูลแนวระนาบรอยแยก (Strike) ของหินใน ทิศทาง NW-SE



ภาพประกอบ ผ4 แสดงผลการศึกษาทิศทางการวางตัวของแนวระนาบที่มีมุมเทเอียงในทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ (SE) จากข้อมูลแนวระนาบรอยแยก (Strike) ของหินในทิศทาง NE-SW

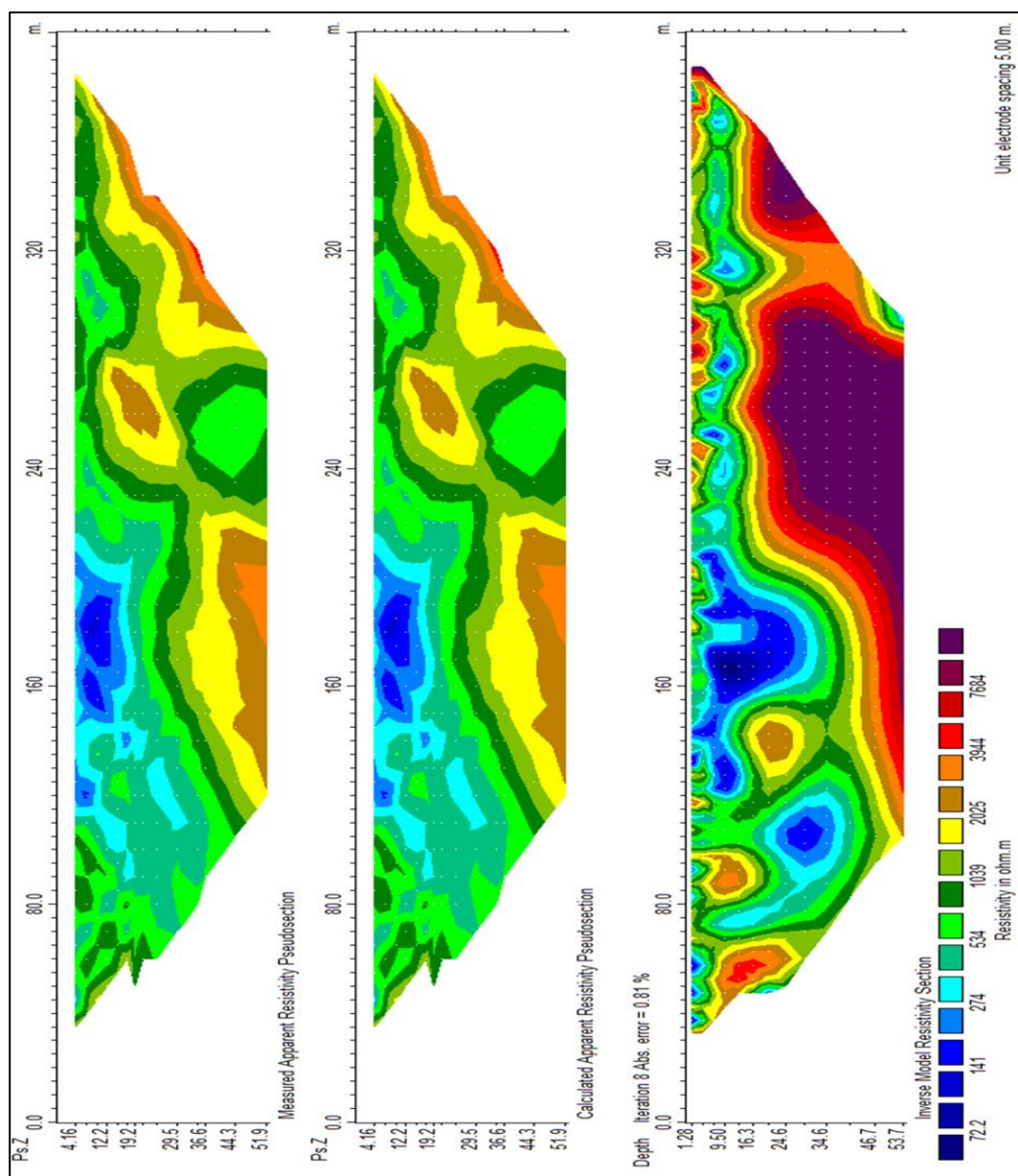


ภาพประกอบ ผ5 การวิเคราะห์แบบจำลองจากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าหินในแนวตั้ง (VES) ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ (30 องศา) ที่ทำการวัดแบบอะซิมุทของจุดวัดที่ 2



ภาพประกอบ ผ6 แผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Res2DINV version 3.53 โดยเลือกวิธี FD method บริเวณโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอลำดวน จังหวัดสงขลา





ภาพประกอบ ผ7 แผนภาพแบบจำลองการกระจายตัวค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Res2DINV version 3.53 โดยเลือกวิธี FE method บริเวณโครงการพัฒนาที่ดินบ้านสวนธนวัฒน์ บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอกหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ผลงานเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



## The 8<sup>th</sup> International Conference on Applied Geophysics



# PROCEEDINGS

**8-10 November 2018**  
**BP Samila Beach Hotel & Resort,**  
**Songkhla, Thailand**

## Azimuthal Resistivity Measurement for Detecting Fracture Zone in Hard Rock: A Case Study in Thung Yai Sub-district, Hat Yai, Songkhla

Sutamas Veerarattragul<sup>1,\*</sup>, Kamhaeng Wattanasen<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Department of Physics, Prince of Songkla University, THAILAND.*  
(Email [sutamas.ve@gmail.com](mailto:sutamas.ve@gmail.com), [kamhaeng.w@psu.ac.th](mailto:kamhaeng.w@psu.ac.th))

**ABSTRACT** A study of fracture zone in hard rock for groundwater in Ban Thung Ngai, Hat Yai district, Songkhla province where drilling well for groundwater is hard to get successful. This is because the granitic rock has reached the surface. The way to get groundwater, drilling well have to drill at the extract position of fracture in granite rock. The study area lies on a flat hill area where the topsoil is sand from terrace deposits in the Quaternary Periods. There are three wells have been drilled for groundwater in this area, the distance between each well is about 50 m arranging in W – E direction. A depth to groundwater is about 48 m, while only the well that is in the middle has no groundwater. This means that the subsurface aquifer here is complicate. The aim of this study is to determine the fracture zone in granitic rock by using azimuthal resistivity measurement. The anisotropy of resistivity in the ground suggests the direction of fracture rock will be considered from the apparent resistivity variation with azimuth that was conducted by VES Schlumberger along six different azimuths with a maximum AB/2 separation of 300 m. The center of measurement was set at in the central part of the area whereas the groundwater well located about 200 m to the NW. The plotting apparent resistivity data on the polar diagram for each depth of investigation obtained the polygons of anisotropy that found the major axis of apparent resistivity data oriented in NE-SW and NW-SE at the shallow depth (AB/2 < 80 m) and the deeper depth (AB/2 > 80 m) respectively. The strike direction of subsurface fractured zone at the AB/2 > 80 m depths corresponds to the location of well-found groundwater. The strike directions obtained by ARS measurement here coincide with strike directions from the geological study of outcrop in the vicinity area. Thus azimuthal resistivity measurement has provided an important data of fracture direction in granitic rock area that will be the key to recommend the drilling location for groundwater.

**Keywords:** azimuthal resistivity, groundwater, VES Schlumberger

### 1. INTRODUCTION

Ban Thung-Ngai is located in ThungYai Sub-district, HatYai district, Songkhla province. It is approximately 8 km from HatYai town to the east. The area is a beautiful landscape which consists of basin, hill slope, foothill and mountainous. With its location of Ban Thung-Ngai is not far from HatYai town and around 4 km to Prince of Songkla University (PSU), and specially the PSU expanded campus is setting about 2 km away from Thung Ngai village, so this area is now the main target for living zone. Increasing of population in this area increase demand of water for consumption. Only shallow well of water is not enough because it will be lack of water in the dry season. Groundwater might be the source of water that can be solved the problem. However, drilling well for groundwater here is hard to get successful due to the subsurface geological structure found the hard rock (granite rock) has laid at the shallow depth close to the surface. Successful drilling well has found groundwater trapped in the fractured rocks. Foreexample in the study area (Fig.1), here are three wells arranging in W – E direction have been drilled with a distance between each well of about 50 m. Groundwater was found at a depth of about 48 m, only the well that is in the middle has no groundwater. This means that the subsurface aquifer here is complicate. Therefore the way to get groundwater, drilling well have to drill at the extract



FA2-2



Fig. 1 The location of study area, wells and the center position of ARS (modified after Google Earth, 2018)

position of fracture in granite rock. The aim of this study is to determine the fracture zone in granitic rock by using azimuthal resistivity surveys (ARS). The anisotropy of resistivity in the ground suggests the direction of fracture rock will be considered from the apparent resistivity variation with azimuth that is conducted by VES Schlumberger. The results of ARS measurements and the field geological study will be proven by the logging data from wells in the area and in the vicinity area for understanding subsurface geological structure and to determine the fracture direction that can be the important data used to recommend the drilling well location for high potential groundwater in the area.

## 2. GEOLOGY

Morphology of Ban Thung Ngai, Hat Yai district, Songkhla province characteristics is a sedimentary basin surrounded by mountains Fig. 2. On the west side of the study area, shale interleaving with the sandstone at a bottom was found, while the country rock was intruded with granite appeared in the eastern area. The fractures (secondary porosity) in original stone are caused by the action force. Therefore, when the granite intrude to the country rocks, the temperature and pressure is changing, then causing joints, fracture, fault and exfoliated weathered and maybe change of alteration mineral. Meanwhile, erosional processing occurs in both the original stone and granite intruded thus rock fragments are accumulated in the basin. In southern of Thailand, granite rock is under the hot and humid environment causing the rate of weathering is quite intense and there was a lot of sediment accumulation with a thick layer to very thick. Most of the sediment accumulated as sand and silt such silty sand (SM), silty gravel (GM), silt (ML), and the sediment clayey sand (SC), derived from shale mixed in it. And to find a small to large (Gravel, Cobbles, Boulders) of gravel which derived from debris in the study area, and blow from nearby areas accumulated that consists of gravel resulting from sandstone shale and granite with large quartz vein is interleaved. The geology of study area consists of sets of stones from younger to older age include; The Quaternary rock (Qt) consists of Terrace deposits: gravel, sand, silt, and laterite. The Triassic rock consists of biotite granite, Tourmaline granite, granodiorite, biotite-muscovite granite, muscovite-tourmaline granite, and biotite-tourmaline granite and Carboniferous rock consists of shale is brown to reddish purple and gray that found bivalves interleaving quartz texture of sandstone, siltstone, and chert.



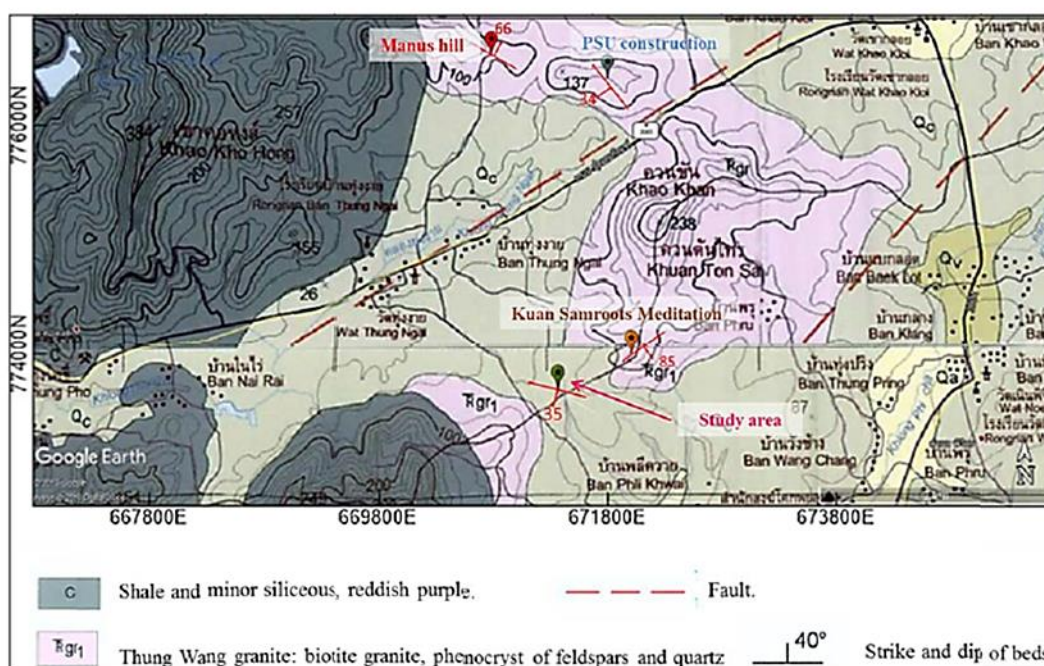


Fig. 2 The location of study area, topography and major structures (faults and fractures) are shown in the geological map (modified after the department of mineral resources, 2018)

Field geological surveys around the study area, 1) at Manus hill (UTM: 670677E, 776482N) found the outcrops of granite or biotite-muscovite granite. Most of the major fractures on stereonet indicated in the NW-SE direction and the minor fractures indicated in the NE-SW direction. Characteristics of fractures are open joints and inserted in quartz veinlets the fractures. Mineralization in granite composed of quartz, feldspars, biotite, and mica. 2) at Kuan Samroots Meditation (UTM: 671903E, 773978N) found granite outcrops. Most of the major fractures on stereonet indicated in the NE-SW direction. Characteristics of fractures are open joints. Mineralization in granite composed of quartz, feldspars, biotite, and mica. The feldspar is quite clearly seen. 3) at Prince of Songkla University expanded campus (UTM: 670682E, 776529N) also found granite outcrops. Most of the major fractures on stereonet showed in the NW-SE direction and the minor fractures indicated in the NE-SW direction. 4) at the study area (UTM: 671269E, 773688N) found granite or biotite-muscovite granite outcrops. The weathered granite can be observed. Characteristics of fractures are weathered exfoliated and open joints. Most of the major fractures on stereonet indicated in the NW-SE direction. Mineralization in granite composed of a quartz, feldspars, biotite, mica, feldspar phenocryst (Fig. 3).



FA2-4

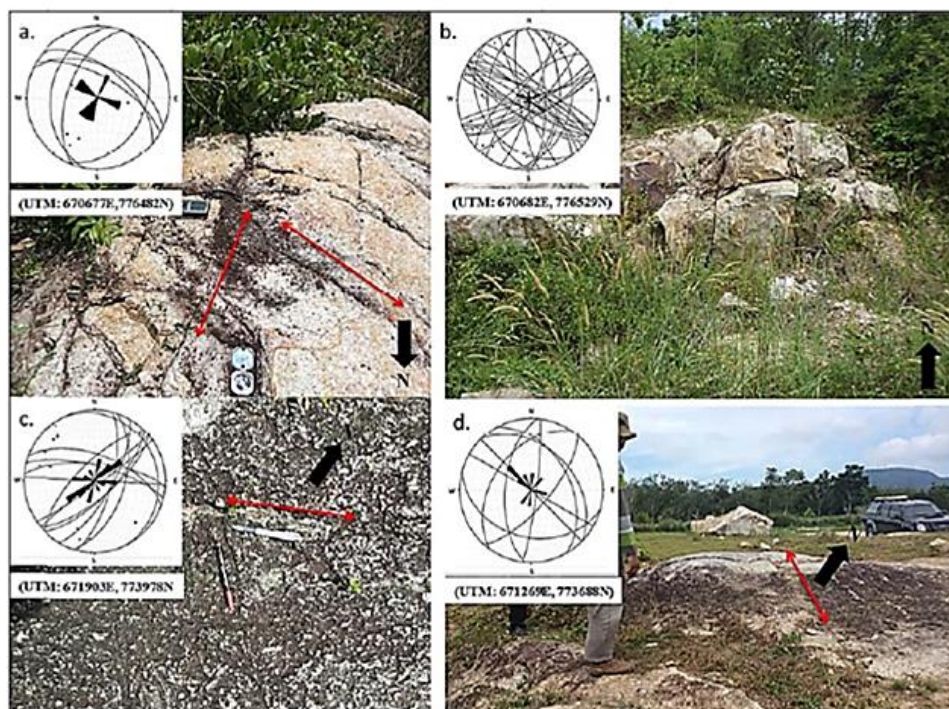


Fig. 3 Field geological study for fracture or joint of the outcrop in the vicinity area at Manus hill, fracture is indicated in NW-SE and NE-SW directions (a), at the construction site of PSU expanded campus, the fracture is indicated in NW-SE and NE-SW directions (b), at Kuan Samroots Meditation fracture indirection indicates prominent in NE-SW direction (c), and at the study area, fracture is indicated in NW-SE direction (d).

### 3. HYDROLOGY

Sedimentary of the study area is mainly found decay from granite. Sedimentary layers have a layer of gravel or sand. If a sediment layer is underlain a layer of impermeable clay then the area is high potential of groundwater and the area will has low potential groundwater in vice versa. In the case under the layers of sediment is intrusive granite rock, more water will be accumulated in the cracks or fractures of rocks. Characteristics of cracks in rocks mainly consist of the two main cross-cutting. The water layer is able to flow in through fractures and it is absorbed in the void space as much as possible. Especially in the granite cracks will mostly have a tilt angle of the intersection of a high angle to the vertical joint, the groundwater layer here can find at a deeper depth with the good water quality.

### 4. METHODOLOGY

A homogeneous rockmass may be cut by a series of subparallel vertical fractures. When the fractures possess resistivity contrasts with the host rock and occur in a set having a preferred orientation, they can result in resistivity anisotropy. These anisotropic properties can be exploited by surface azimuthal geophysical measurements over a sufficient volume of the rock in order to map sub-vertical fracture orientations (Busby, 2000). The apparent resistivities in different directions are plotted as radii, they generate anisotropy figures, which is an ellipse representing the apparent resistivity transverse and longitudinal to the direction of fracturing. In a medium with vertical fracture along the longitudinal reference axis, the diagrams with Schlumberger azimuthal vertical sounding results presents the major axis of the resistivity ellipse aligned with the fracturing, which is a demonstration of the anisotropy



paradox. A distinct ellipsoidal shape of the polar plot is interpreted to indicate the presence of anisotropy as a result of the presence of aligned vertical or near vertical fractures. The minor axis of the ellipsoid coincides with the strike of the fractures. The coefficient of anisotropy ( $\lambda$ ) (designated here as the degree of fracturing) is calculated from each anisotropy ellipse (fitted through each polygon) using the relationship as shown in equation (1). The secondary porosity or fracture porosities associated with tectonic fracturing of rocks were estimated using the expression derived by (Odoh B. I. et al., 2012 ) equation (2) and (3);

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{a_{\max}}}{\rho_{a_{\min}}}} \dots\dots\dots(1)$$

$$N = \sqrt{[(1 + \lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha]} \dots\dots\dots(2)$$

$$\phi_f = \frac{3.41 \times 10^4 (N - 1)(N^2 - 1)}{N^2 C (\rho_{a_{\max}} - \rho_{a_{\min}})} \dots\dots\dots(3)$$

where;  $\phi_f$  is the fracture porosity; N is the vertical anisotropy related to the coefficient of anisotropy ( $\lambda$ ) and dip of the bedding plane ( $\alpha$ );  $\rho_{a_r} \equiv \rho_{a_{\max}}$  is the transverse resistivity which is perpendicular to the strike direction of the rock while  $\rho_{a_l} \equiv \rho_{a_{\min}}$  is the longitudinal resistivity which is along the strike direction of the rock and C = specific conductance of ground water in microsiemens per centimeter ( $\mu S / cm$ ).

An azimuthal Resistivity Surveys (ARS) were carried out in the study area with ABEM SAS-1000 Terrameter using Schlumberger electrode configuration expanded about a center point. The current electrode separation (AB/2) having a maximum of 300 m and potential electrode spacing (MN/2) were rotated about a center point at each location and measurement were made in 30° increments (i.e., 0°, 30°, 60°, 90°) which are N-S, NE-SW, E-W and SE-NW directions. Interpretation of Schlumber VES data, the depth to the fractured bedrock can be determined. The apparent resistivity measured along different azimuths for a given AB/2 separation at each location were plotted along their corresponding azimuths. Lines of the resistivity of the same value along different azimuths were joined together, thus resulting in a polygon. A set of such polygons obtained corresponding to different AB/2 separations is known as a polar diagram or anisotropy polygon (Figure 4). For an isotropic homogeneous formation, this polygon will assume a circular shape. Any deviation from a circle to an ellipse is indicative of the anisotropic nature of the rock formation (Van-Dyck et al., 2015; Busby, 2000).

FA2-6

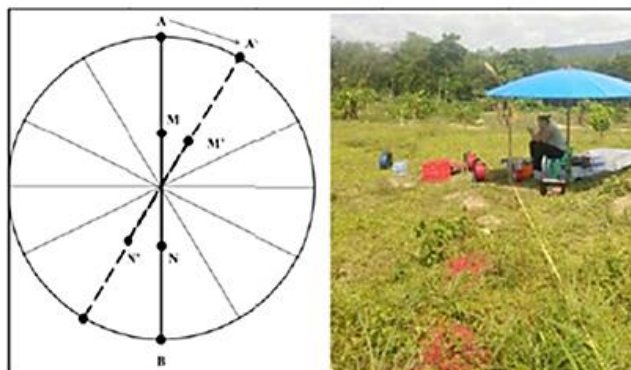


Fig. 4 The orientation of azimuthal profiles with Schlumberger configuration, A and B are current electrodes, while M and N are potential electrodes.

## 5. RESULTS AND DISCUSSION

The results of apparent resistivity obtained at different azimuths and depths. Measured apparent resistivities were found to vary with the orientation of the arrays at each depth. The observed changes in apparent resistivity ( $\rho_a$ ) with azimuth were interpreted as an indicator of fracture anisotropy and the presence of aligned vertical or sub-vertical fractures causes a fractured rock mass to exhibit azimuthal anisotropic behavior. The quantitative and qualitative interpretation of the six VES sets conducted at different directions revealed the area to be underlain by three to four geoelectric layers: topsoil, weathered bedrock, fractured bedrock and fresh bedrock with the depth to fresh granite rock at about 75 - 80 m. Some VES curves an interpreted models and the geoelectric layers are shown in Fig. 5. To minimize the possible effect of overburden, the ARS data were analyzed by plotting the apparent resistivity against azimuths at depths ranging from  $AB/2$  50-300 m on the azimuthal polar diagram (Fig. 6). The survey identified NW-SE ( $330^\circ$ ), NE-SW ( $30^\circ$ ), N-S ( $0^\circ$ ) and NE-SW ( $60^\circ$ ) trends as the electrical anisotropy direction in the study area. The estimated values of coefficient of anisotropy and fracture porosity are generally found to increase in magnitude with the depth of investigation indicating the fractures opening with increasing depth. The coefficient of anisotropy varies between 1-2.98, while the fracture porosity varies between 0.003-183.255 (Table 1).

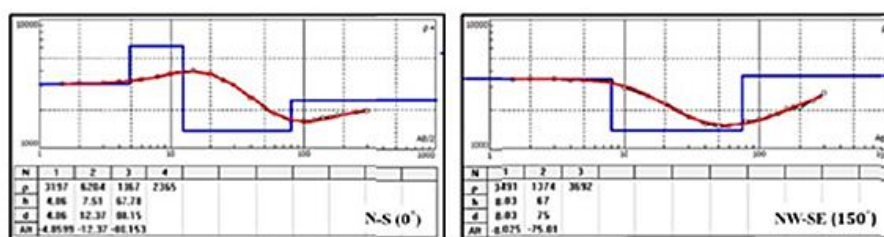


Fig. 5 Examples of some smoothed VES curves of data measured in the N-S and NW-SE ( $330^\circ$ ) directions and the results of interpretation interpreted with Ipi2win program.

Data from Table1, the calculated porosity found very high (183.255) at the depth of  $AB/2$  separation equal to 80 m, from which an investigation depth of about 32 m could be expected and would be less where conductive clay at relatively shallow depth is presented. In this fracture direction, the subsurface at this depth should be more space that groundwater is stored. I considering the polar diagram at this  $AB/2$ , another the strike direction of fracture should be in the NW-SE and this direction will point to the location of well-found water at depths about 48 m. This different in a depth to groundwater at drilling well and the investigation depth found high porosity may be come from the different in elevations of center point and well. However at the deeper depths (from  $AB/2 > 80$  m), the strike direction of fracture correspond to the location of well-found water.



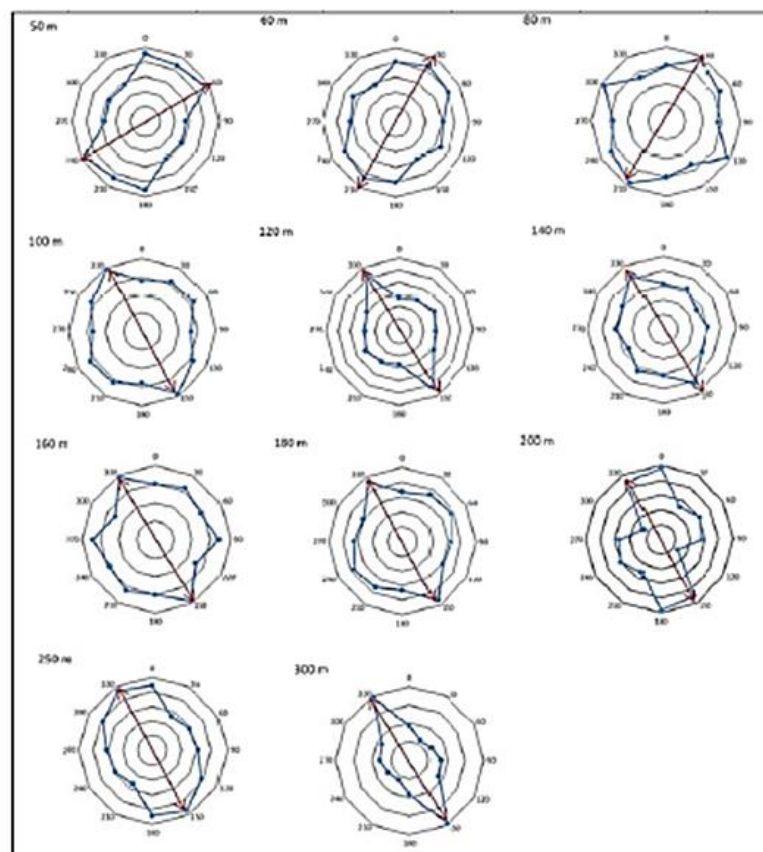


Fig. 6 Polar plots of the apparent resistivity against azimuth at depths and the orientation of fracture strike is shown as major axis.

Table 1: Characteristics strike orientation obtained from analysis of Azimuthal resistivity data

AB/2 (m)	Strike Direction	Coefficient of Anisotropy	porosity
50	60° NE-SW	1.66	0.083
60	30° NE-SW	1.28	0.386
80	0° NE-SW	1.00	183.255
100	0° NW-SE	1.20	0.003
120	0° NW-SE	1.66	0.074
140	0° NW-SE	1.62	0.083
160	0° NW-SE	1.36	0.033
180	0° NW-SE	1.23	0.006
200	0° NW-SE	1.47	0.049
250	0° NW-SE	1.61	0.074
300	0° NW-SE	2.98	0.175

FA2-8

## 6. CONCLUSIONS

The azimuthal resistivity survey has been used to determine and characterize the anisotropic properties of fractures in granitic rock area, Ban Thung-Ngai, HatYai district, Thailand. The plotting apparent resistivity data on the polar diagram for each depth of investigation obtained the polygons of anisotropy that found the two prominent major axis of apparent resistivity data oriented in NE-SW and NW-SE at the shallow depth ( $AB/2 < 80$  m) and at the deeper depth ( $AB/2 > 80$  m) respectively. The strike direction of subsurface fractured zone at the  $AB/2 > 80$  m depths corresponds to the location of well-found groundwater. The strike directions obtained by ARS measurement here coincide with strike directions from the geological study of outcrop in the vicinity area. Thus azimuthal resistivity measurement has provided an important data of fracture direction in granitic rock area that will be the key to recommend the drilling location for groundwater.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Department of Physics, Prince of Songkla University, HatYai Campus, for providing geophysics tools and infrastructure necessary for this research. Asst. Prof. Dr. Helmut Duerrast, Uthai Hongjaisee, Dony Adriansyah Nazaruddin, Fadhel Muhammad Irza, Jasmin Gebhard, Piyapong Sandhawang, Husaifee Satorpa and Musammee Benmusor are grateful thanked for their helping and suggestions during field work.

## REFERENCES

- Busby, J.P. (2000). The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. *Geophysical Prospecting*, 48, 677-695.
- Huchon, P., Le Pichon X., and Rangin, C. (1994). Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia, USA. *Geology*, 22, 27.
- Odoh, I.B., and Onwuemesi, A.G. (2009). Estimation of anisotropic properties of fractures in Presco campus of Ebonyi State University Abakaliki, Nigeria using Azimuthal resistivity survey method. *Journal of Geology and Mining Research*, 1(8), 172-179.
- Oladunjoye, M.A., Akanji, A.O., and Akingbesote, O.T. (2013). Groundwater Exploration in Alakuta-Awotan area of Ibadan, Southwestern Nigeria. *J Geol Geosci*, 2.
- Van-Dycke, S.A., Emmanuel, G., and Bismark F.O. (2015). Azimuthal Resistivity Sounding with the Symmetric Schlumberger and the Alpha Wenner Arrays to study subsurface electrical anisotropy variation with depth. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5.