

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้วัสดุ อุปกรณ์ และระเบียบวิธีในการดำเนินการดังนี้

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาวิจัยได้จำแนกตามวิธีการศึกษามีดังนี้

2.1.1 การเก็บข้อมูลเรดาร์หยังความลึกศึกษาชั้นดิน

เครื่องเรดาร์หยังความลึกศึกษาชั้นดิน (ground penetrating radar, GPR) ยี่ห้อ RAMAC/GPR ประเทศสวีเดน ดังภาพประกอบ 3 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

(1) สายอากาศส่งสัญญาณ (transmitter) ขนาดความถี่กลาง 200 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านชั้นดินที่ต้องการสำรวจ

(2) สายอากาศรับสัญญาณ (receiver) ขนาดความถี่กลาง 200 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อรับสัญญาณที่สะท้อนจากชั้นดินที่สำรวจ

(3) หน่วยควบคุม (control unit) สำหรับควบคุมการรับ/ส่งสัญญาณของสายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ ผ่านทาง Trigger box และส่งสัญญาณข้อมูลที่ได้รับมาไปบันทึกที่เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา

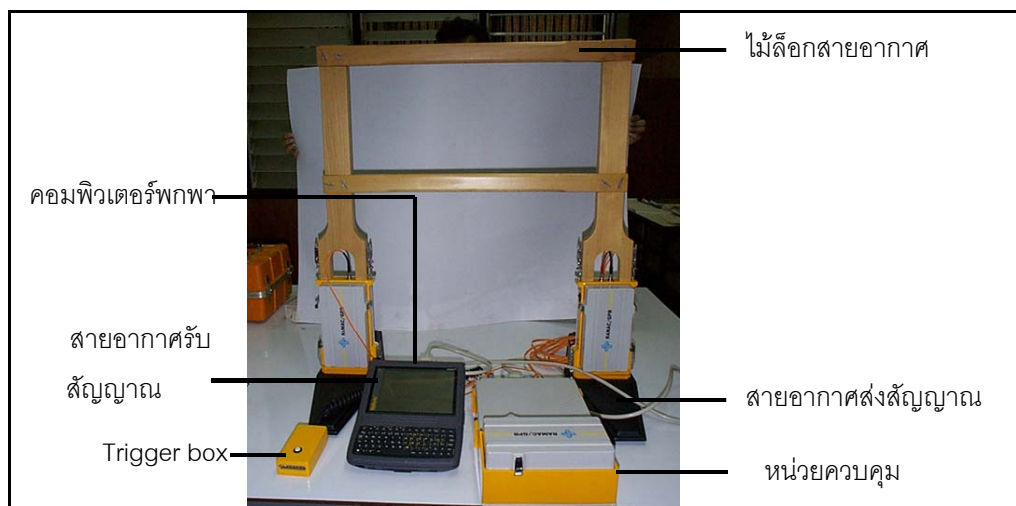
(4) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (notebook computer) สำหรับป้อนคำสั่งแก่เครื่อง RAMAC/GPR แสดงผลการรับ/ส่งสัญญาณ ประมวลผล และบันทึกข้อมูลที่ถูกส่งมาจากหน่วยควบคุม

(5) กล่อง Trigger box สำหรับกดเพื่อให้สายอากาศรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับในตำแหน่งที่ต้องการวัด

(6) เส้นใยนำแสง (optic fiber) สำหรับส่งคำสั่งจากหน่วยควบคุมมายังสายอากาศส่งสัญญาณและสายอากาศรับสัญญาณ

(7) ไม้จับยึดสายอากาศ (antenna handles) สำหรับกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ ซึ่งในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ เท่ากับ 0.60 เมตร

(8) แบตเตอรี่ชนิดแอลคาไล (นิกเกิล-แคดเมียม) ขนาด 7.2 โวลต์ (สามารถประจุไฟได้) จำนวน 3 ก้อน เพื่อเป็นแหล่งพลังงานแก่เครื่องมือ RAMAC/GPR



ภาพประกอบ 3 ส่วนประกอบเครื่องเรดาร์หึ่งความลึก RAMAC/GPR

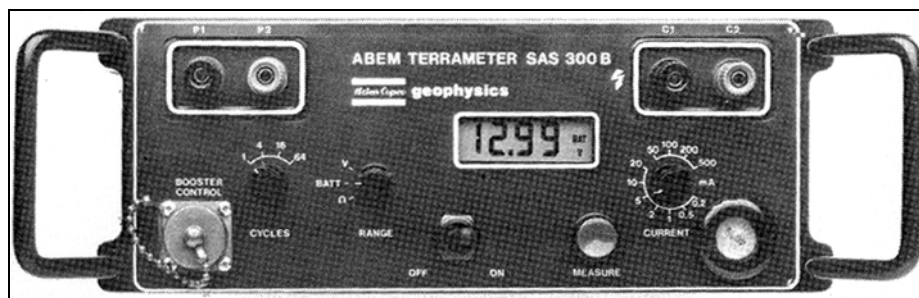
2.1.2 การเก็บข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน

(1) เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ยี่ห้อ ABEM TERRAMETER รุ่น SAS 300B ประเทศสวีเดน ดังภาพประกอบ 4 ซึ่งจะแสดงผลการวัดในเทอมของอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า

(2) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) จำนวน 4 ขั้ว โดยแบ่งเป็น ขั้วไฟฟ้ากระแส (current electrode) จำนวน 2 ขั้ว สำหรับนำไฟฟ้ากระแสกลับความถี่ต่ำเข้าสู่ชั้นดิน และขั้วไฟฟ้าศักย์ (potential electrode) จำนวน 2 ขั้ว สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองจุดใดๆ

(3) สายไฟ จำนวน 4 ม้วน โดยแต่ละม้วนยาวประมาณ 40 เมตร เพื่อเชื่อมระหว่างเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า SAS 300B กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ขั้ว

(4) เทปพันสายไฟ



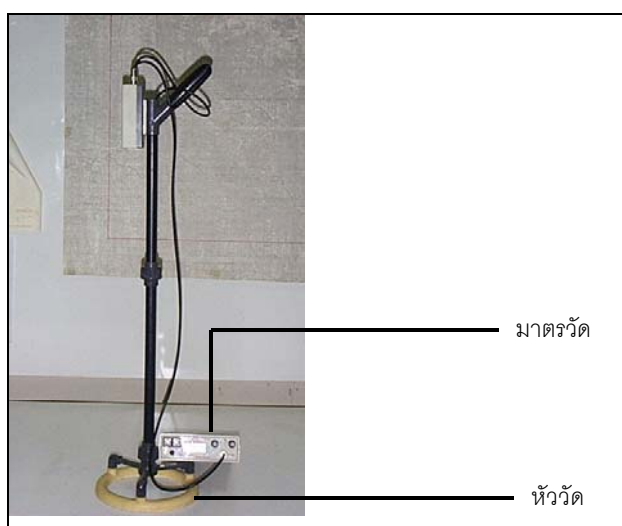
ภาพประกอบ 4 เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ABEM TERRAMETER SAS 300B

2.1.3 การเก็บข้อมูลสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก รุ่น MS2 ผลิตโดยบริษัท Bartington ประเทศอังกฤษ ดังภาพประกอบ 5 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

(1) มาตรฐานวัด (MS2 meter) แสดงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กที่ได้จากการวัดในหน่วย cgs. และหน่วย SI. มีขีดจำกัดการอ่านสูงสุดเท่ากับ $9,999 \times 10^{-6}$ cgs. หรือ $9,999 \times 10^{-5}$ SI.

(2) หัววัด (sensor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 เซนติเมตร ความหยั่งลึก (depth of penetration) ประมาณ 10 เซนติเมตร จากผิวดินชั้นบน สำหรับส่งและรับสัญญาณตรงตำแหน่งที่ต้องการวัด



ภาพประกอบ 5 เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ภาคสนาม)

2.1.4 การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก(ในห้องปฏิบัติการ)

(1) เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (spinning specimen magnetic susceptibility anisotropy meter) รุ่น KLY-3 Kappabridge ผลิตโดยบริษัท AGICO, INC ประเทศ สาธารณรัฐเชก ดังภาพประกอบ 6



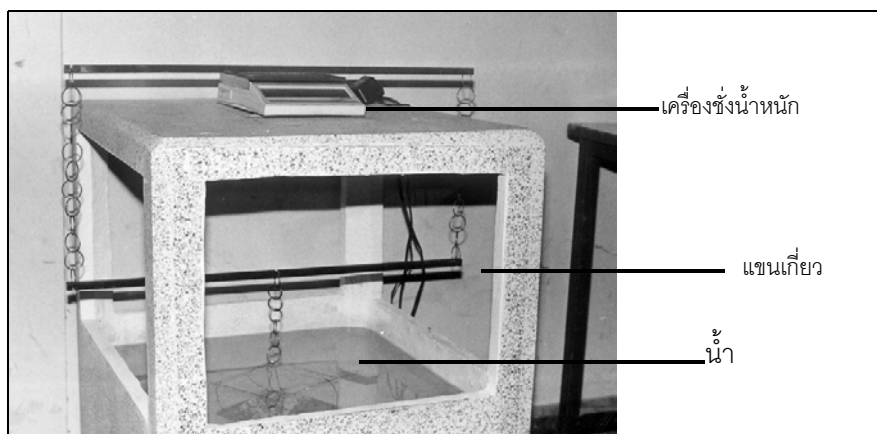
ภาพประกอบ 6 เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ห้องปฏิบัติการ)

(2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลขยี่ห้อ METTLER รุ่น BB3000 ผลิตโดยบริษัท METTLER TOLEDO AG ประเทศ Switzerland พิกัดน้ำหนักจำกัด 3,000 กรัม ความละเอียด 0.1 กรัม สำหรับชั่งมวลเศษวัสดุเตาเผาโบราณ และดัดแปลงให้สามารถชั่งมวลเศษวัสดุเตาเผาโบราณในน้ำได้ โดยมีแขนพิเศษสำหรับเกี่ยวห่วงตะแกรงที่ใส่ตัวอย่างเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่จมอยู่ในน้ำ ดังภาพประกอบ 7

(3) ภาชนะบรรจุน้ำ ที่ดัดแปลงเพื่อหามวลของเศษวัสดุเตาเผาโบราณซึ่งจมอยู่ในน้ำ ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข



ภาพประกอบ 8 การชั่งมวลของเศษวัสดุเตาเผาโบราณเมื่อจมน้ำ

2.1.5 การศึกษาสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรือง

(1) ชุดระบบวัดรังสีเอกซ์เรืองชนิดกระจายพลังงาน (energy dispersive x-ray fluorescent) (ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และคณะ, 2544) ดังภาพประกอบ 10

(2) เครื่องอัดไฮโดรลิกจากบริษัท HERZOG ดังภาพประกอบ 9 สำหรับอัดขึ้นรูป เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดมาตรฐาน



ภาพประกอบ 9 เครื่องอัดไฮดรอลิกของ บริษัท HERZOG



(ก)



(ข)

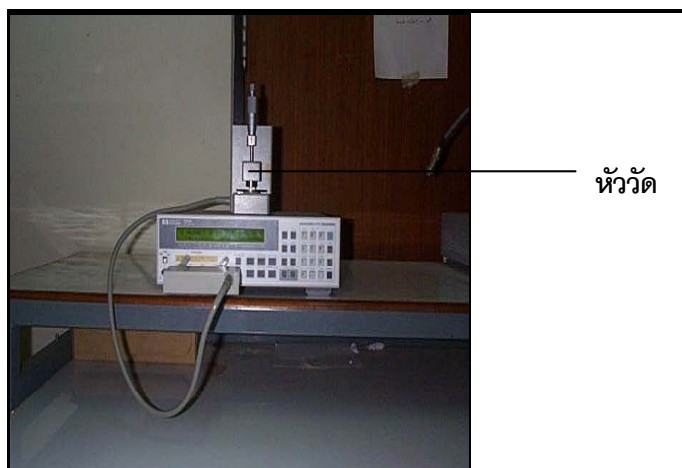
ภาพประกอบ 10 (ก) แหล่งกำเนิดรังสีพร้อมที่ใส่ตัวอย่าง

(ข) ชุดระบบหัววัดรังสีชนิด EDXRF

2.1.6 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

(1) เครื่องวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก HP 16451B ของบริษัท Hewlett Packard ดังภาพประกอบ 11

(2) เครื่องอัดไฮดรอลิก RIIC (Research & Industrial Instrument Company) ประเทศอังกฤษ ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 11 เครื่องวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก HP 16451B

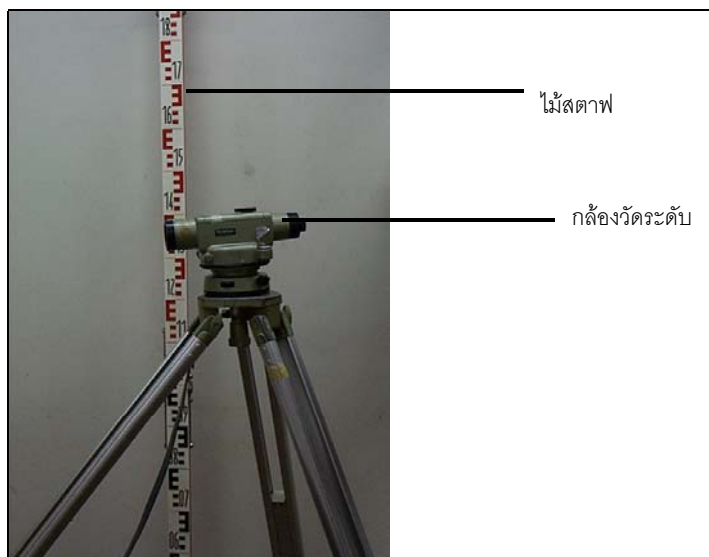


ภาพประกอบ 12 เครื่องอัดไฮดรอลิก RIIC

2.1.7 การวัดระดับความสูงของพื้นที่ศึกษา

(1) กล้องวัดระดับความสูง ยี่ห้อ PENTEX รุ่น AL-3 กำลังขยาย 22x สำหรับอ่านความสูงของจุดวัด ดังภาพประกอบ13

(2) ไม้สตาฟ ดังภาพประกอบ13 ขนาดความยาว 4 เมตร ความละเอียด 0.01 เมตร



ภาพประกอบ 13 กล้องวัดระดับและไม้สตาฟสำหรับทำรังวัดระดับ

2.1.8 อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ร่วมกัน

- (1) เทปวัดระยะ
- (2) เทปพันสายไฟ
- (3) หมุดไม้ไผ่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 เซนติเมตร ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร

จำนวน 72 หมุด สำหรับกำหนดแนววัด

- (4) แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก
- (5) ค้อน
- (6) เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

2.1.9 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการวิเคราะห์และแปลความข้อมูล ประกอบด้วย

(1) โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ระดับความสูงของพื้นที่ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

(2) โปรแกรม Winsurf version 7.0 สำหรับทำแผนที่คอนทัวร์และโพรไฟล์ของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

(3) โปรแกรม Grapher version 3.03 สำหรับเขียนกราฟข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแสดงผลการวิเคราะห์การเรียงรังสีเอกซ์

(4) โปรแกรม Gradix version 1.00 สำหรับการวิเคราะห์และแปลความข้อมูลเรดาร์หึ่งความลึก

(5) โปรแกรม Res2dinv และ Res3dinv สำหรับวิเคราะห์และแปลความข้อมูลค่าสภาพ
ด้านทานไฟฟ้า

(6) โปรแกรม Genie-2000 สำหรับวิเคราะห์ธาตุประกอบในตัวอย่างสารอ้างอิงมาตรฐาน
ฐานและตัวอย่างเศษวัสดุเตาเผาโบราณจากพื้นที่ศึกษา

(7) โปรแกรม Microsoft Access สำหรับจัดการข้อมูลค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าเพื่อทำ
แผนที่คอนทัวร์ค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า

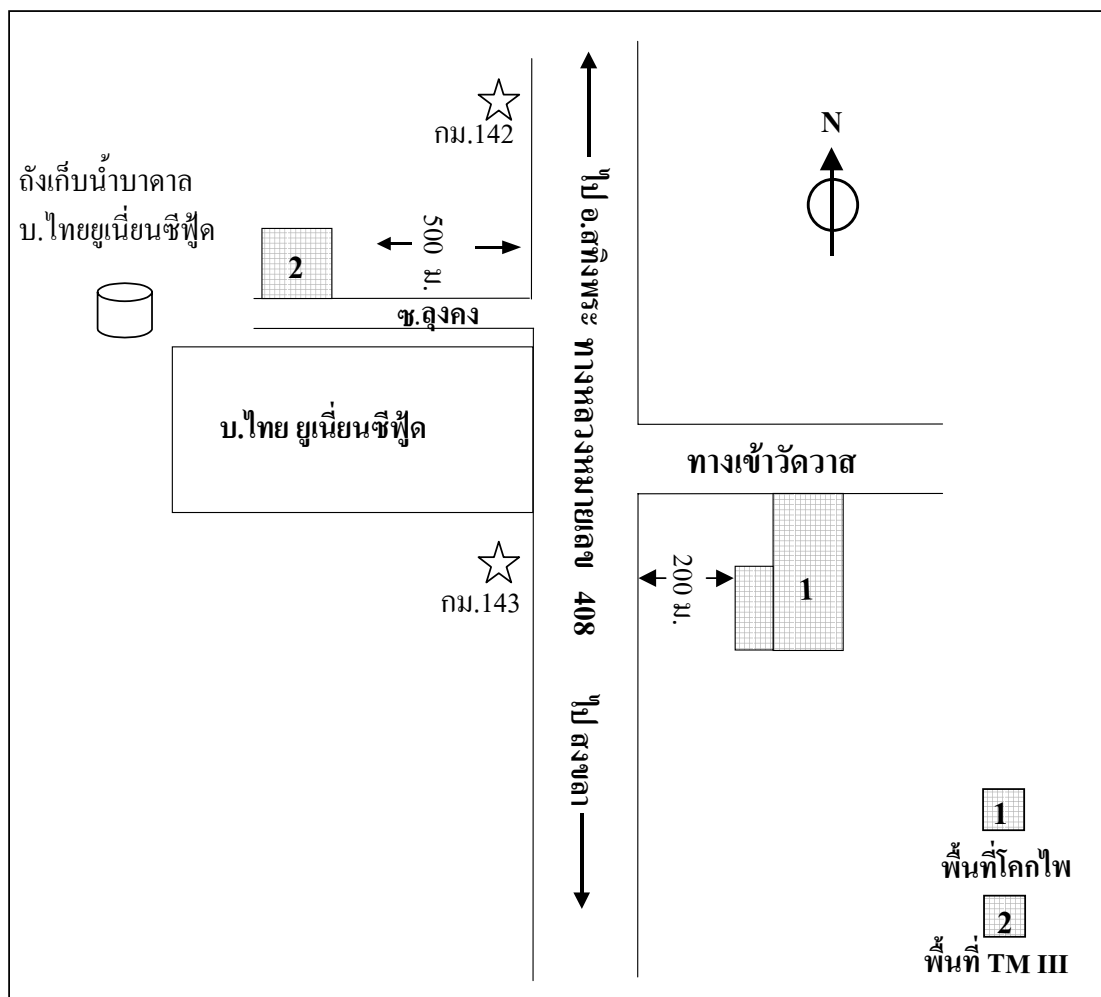
(8) โปรแกรม SPSS/PC สำหรับทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างค่า
เฉลี่ย

วิธีการในการดำเนินการศึกษาวิจัย

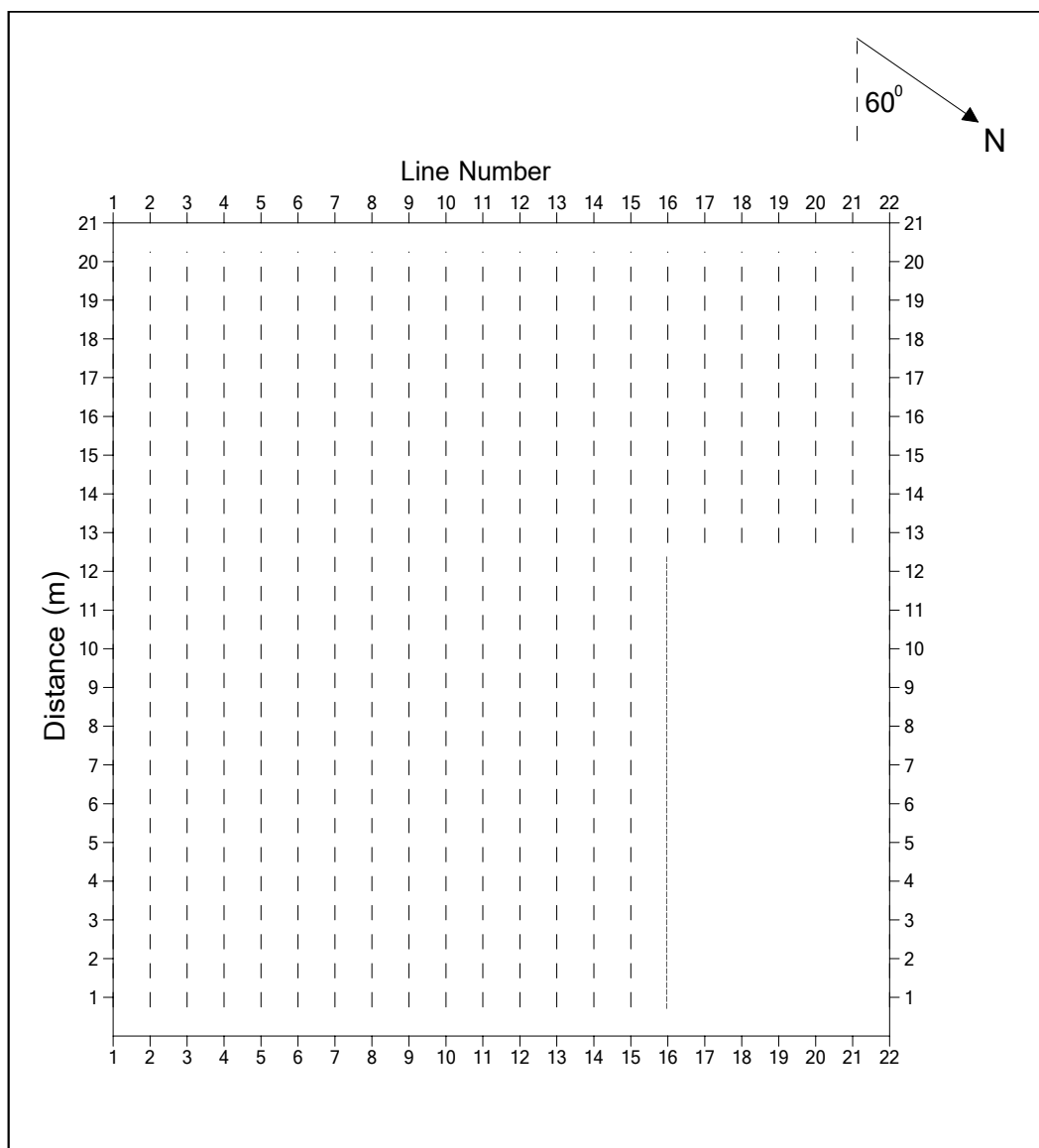
การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้คือ

2.2 การดำเนินการศึกษาวิจัยในภาคสนาม

การดำเนินการศึกษาวิจัยในภาคสนามได้กระทำบนที่พื้นที่ศึกษา 2 พื้นที่ คือ พื้นที่โคกไฟ ตั้ง
อยู่ระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 142-143 ของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 408 ตรงข้ามทางเข้าบริษัท
ไทยยูเนียนซีฟู๊ด พิกัด 664586N และ 809088E และพื้นที่ TM III ตั้งอยู่ใน ซอยลุงคง ระหว่างหลัก
กิโลเมตรที่ 142-143 ของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 408 พิกัด 664963N และ 809004E ดังภาพ
ประกอบ 14 โดยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลสภาพด้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน การเก็บข้อมูลสภาพไร่ไว้
ได้ทางแม่เหล็ก การเก็บข้อมูลเรดาร์หึ่งความลึกศึกษาชั้นดิน

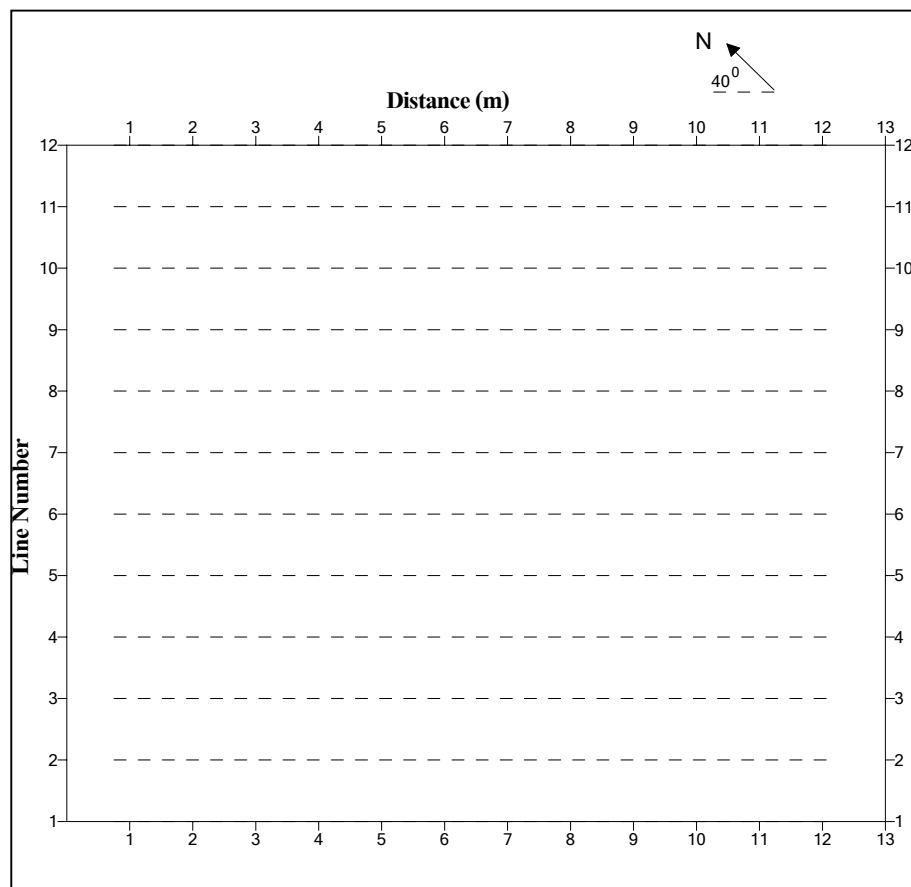


ภาพประกอบ 14 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ต.วัดขนุน อ.สิงหนคร จ.สงขลา



ภาพประกอบ 15 ผังการกำหนดแนววัดทางธรณีฟิสิกส์ในพื้นที่โคกไผ่

พื้นที่โคกไผ่ แสดงดังภาพประกอบ 15 ประกอบด้วยแนววัดจำนวน 22 แนววัด แต่ละแนววัด มีความยาว 21 เมตร ยกเว้นแนววัดที่ 17-22 ที่มีความยาว 9 เมตร ระยะห่างระหว่างแนววัด 1 เมตร ทิศของแนววัดทำมุมกับทิศเหนือประมาณ 60 องศาทางทิศตะวันออก



ภาพประกอบ 16 ผังการกำหนดแนววัดทางธรณีฟิสิกส์ในพื้นที่ TM III

พื้นที่ TM III แสดงดังภาพประกอบ 16 ประกอบด้วยแนววัดจำนวน 12 แนววัด แต่ละแนววัดมีความยาว 13 เมตร ยกเว้นแนววัดที่ 3 ที่มีความยาว 10 เมตรและแนววัดที่ 8 มีความยาว 12 เมตร ระยะห่างระหว่างแนววัด 1 เมตร ทิศของแนววัดทำมุมกับทิศเหนือประมาณ 40° ทางทิศตะวันตก

2.2.1 การเก็บข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน

(1) เลือกใช้การจัดขบวนขั้วไฟฟ้า (Electrode Spread) แบบไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole array) ดังภาพประกอบ 17 โดยขั้วไฟฟ้า C_1 และ P_2 จะอยู่นอกขั้วไฟฟ้า C_2 และ P_1 โดยขั้วไฟฟ้าแต่ละคู่จะมีระยะห่างกันคงที่ (a) และขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายในคือ C_2 และ P_1 จะอยู่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ na

(2) กำหนดให้ $a = 0.5$ เมตร และ n มีค่าเป็น $1, 2, 3, \dots, 6$

(3) เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสี่กับเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า SAS300B

ตาราง 1 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน
โดยวิธี Dipole-dipole จากแนววัด 1 พื้นที่โคกไผ่

ตำแหน่ง C_1 (เมตร)	n	$\Delta V/I$ (Ohm)	หมายเหตุ
0.00	1	8.77	
	2	2.33	
	3	0.819	
	4	0.379	
	5	0.146	
	6	0.089	

2.2.2 การเก็บข้อมูลค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

(1) ก่อนที่จะเริ่มทำการวัดค่าในแต่ละจุดนั้น ให้ยกหัววัดชี้ขึ้นไปในอากาศ เพื่อปรับเทียบค่าให้เป็นศูนย์

(2) วัดและบันทึกข้อมูลทุกระยะ 0.5 เมตร โดยในแต่ละจุดวัดนั้นให้ทำการวัดสามครั้ง ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแสดงดังตาราง 2

(3) ในการบันทึกข้อมูล ควรระมัดระวังไม่ให้หัววัดอยู่ใกล้สิ่งต่อไปนี้ บริเวณที่มีโลหะ แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและไม่ควรทำการวัดขณะที่มีการสั่นสะเทือนของผิวดิน รวมทั้งรักษาอุณหภูมิของหัววัดไม่ให้สูงเนื่องจากอยู่กลางแจ้งแดดนานเกินไป

ตาราง 2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กจากแนววัด 1 พื้นที่โคกไผ่

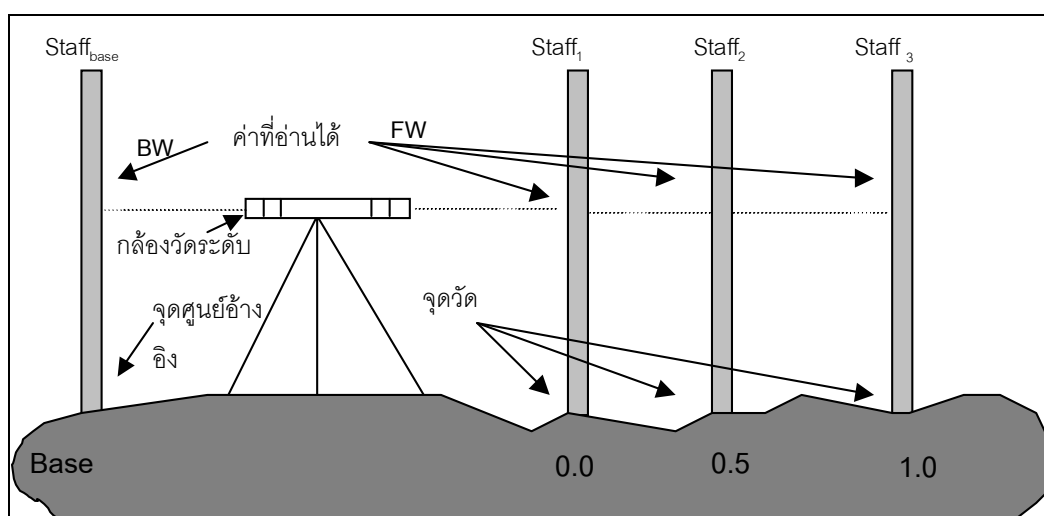
ระยะทาง (เมตร)	ครั้งที่ 1 (cgs.)	ครั้งที่ 2 (cgs.)	ครั้งที่ 3 (cgs.)	หมายเหตุ
0	15.4	16.1	15.5	
0.5	15.6	15.8	16.5	
1	8.4	9.7	9	
1.5	25.6	26	26.3	
2	9.3	9.4	9.6	

2.2.3 การเก็บข้อมูลเรดาร์หยังความลึกศึกษาชั้นดิน

- (1) เลือกลายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ ความถี่กลางเท่ากับ 200 MHz
- (2) กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการบันทึกข้อมูล ได้แก่ จำนวนตัวอย่าง (Samples) เท่ากับ 480 ตัวอย่าง ความถี่ในการซักรตัวอย่าง (Sampling Frequency) เท่ากับ 2653.20 MHz จำนวนครั้งของการส่งสัญญาณ(Stacks) เท่ากับ 16 ครั้ง
- (3) วางสายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ ให้ขนานและอยู่ห่างกัน 0.60 เมตร และสายอากาศทั้งสองต้องตั้งฉากกับแนววัดเสมอ แล้วบันทึกข้อมูลทุกระยะ 0.10 เมตร ตลอดแนววัด

2.2.4 การทำรังวัดความสูงของพื้นที่สำรวจ

- (1) จัดวางกล้องรังวัดระดับให้อยู่ในแนวระดับ ควรจัดให้ความสูงของขาตั้งกล้องเท่ากับระดับสายตาของผู้บันทึก
- (2) กำหนดจุดศูนย์อ้างอิง โดยพื้นที่โคกโพ ใช้จุดกลางถนนหลวงหมายเลข 408 ช่วงทางเข้าวัดवास และพื้นที่ TM III ใช้บริเวณฐานของถังเก็บน้ำบาดาลของบริษัทไทยยูเนียนซีฟู๊ด
- (3) ตั้งไม้สตาฟที่จุดศูนย์อ้างอิง อ่านค่าบนไม้สตาฟผ่านกล้องวัดระดับ บันทึกค่าที่อ่านได้เป็นค่าอ่านย้อนกลับ (backward reading, BW)
- (4) นำไม้สตาฟมาวางบนแนววัด เริ่มที่ระยะ 0.00 เมตร และทุกๆ 0.5 เมตร ตลอดแนววัด บันทึกค่าที่อ่านได้เป็นค่าอ่านด้านหน้า (forward reading, FW) ดังภาพประกอบ 18
- (5) ตัวอย่างตารางบันทึกข้อมูลแสดงดังตาราง 3



ภาพประกอบ 18 การทำรังวัดระดับความสูงของพื้นที่ศึกษา

ตาราง 3 ตัวอย่างตารางบันทึกข้อมูลการทำรังวัดระดับจากแนววัด 1 พื้นที่โคกไฟ

ตำแหน่ง (เมตร)	ค่าอ่านย้อนกลับ (เมตร)	ค่าอ่านไปข้างหน้า (เมตร)	หมายเหตุ
Base	1.078		
0		1.47	
0.5		1.472	
1		1.482	
1.5		1.482	
.	.	.	
.	.	.	
.	.	.	

2.3 การดำเนินการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ

การดำเนินการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ การวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ การวัดและวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ การวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ การวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเศษภาชนะโบราณ การวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์หึ่งความลึกศึกษาชั้นดิน การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพด้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

2.3.1 การวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของเศษวัสดุเตาเผา

การวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กได้กระทำบนเศษวัสดุเตาเผาโบราณ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาว่าค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของเศษวัสดุเตาเผาโบราณและดินภายในพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกันหรือไม่เพียงใด และมีความเหมาะสมหรือไม่ที่จะนำการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กที่ผิวดิน กำหนดตำแหน่งฐานเตาเผาโบราณที่ถูกฝังอยู่

การหาปริมาตรของเศษวัสดุเตาเผาโบราณมีขั้นตอนดังนี้

- (1) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ต้องการวัดมาทำความสะอาด
- (2) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ทำความสะอาดแล้วไปแช่น้ำ เพื่อให้เศษวัสดุเตาเผาโบราณอิมตัว โดยแช่ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเศษวัสดุเตาเผาโบราณแต่ละก้อนไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_a) เพื่อหาน้ำหนักของเศษวัสดุเตาเผาโบราณอิมตัว และบันทึกผล
- (3) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ผ่านขั้นตอนจากข้อ (1.2) แล้ว ไปชั่งน้ำหนักในน้ำเพื่อหาน้ำหนักของเศษวัสดุเตาเผาโบราณในน้ำ (W_w) และบันทึกผล
- (4) คำนวณหาปริมาตรของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ(V) จากสมการ (1)

$$V = \frac{[W_a - W_w]}{D} \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ (cm^3)

W_a = น้ำหนักเศษวัสดุเตาเผาโบราณอิมตัวซึ่งในอากาศ (g)

W_w = น้ำหนักเศษวัสดุเตาเผาโบราณอิมตัวซึ่งในน้ำ (g)

D = ค่าความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm^3)

- (5) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ถูกทิ้งไว้ให้แห้งจนสนิท แต่ละก้อนบรรจุลงในกระปุก ปิดฝาให้สนิท และบันทึกหมายเลขกระปุก

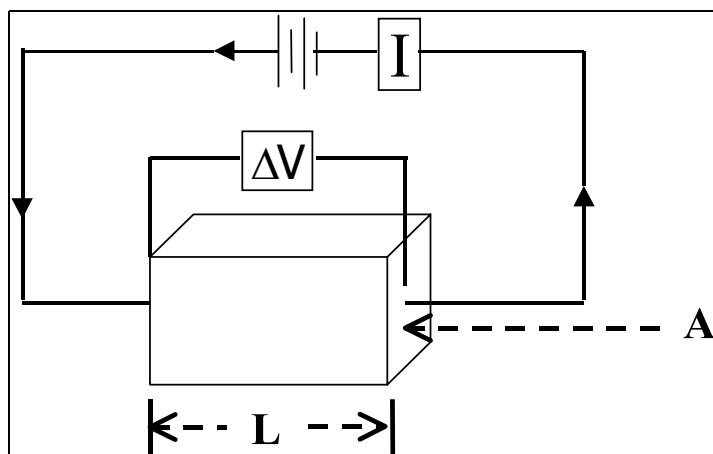
การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของเศษวัสดุเตาเผาโบราณมีขั้นตอนดังนี้

- (1) นำตัวอย่างกระปุกเปล่าที่จะใช้บรรจุเศษวัสดุเตาเผาโบราณ มาวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก เพื่อปรับเทียบเครื่องวัด
- (2) นำกระปุกที่บรรจุเศษวัสดุเตาเผาโบราณแล้ว มาทำการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ค่าที่วัดได้บันทึกเป็น χ_a
- (3) เนื่องจากค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กที่วัดได้จะเป็นค่าในปริมาตร 10 cm^3 ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเทียบค่าตามสมการ (2) เพื่อให้ได้ค่าตามปริมาตรที่แท้จริงของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ (χ)

$$\chi = \frac{V}{10} \times \chi_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

2.3.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่พบบริเวณพื้นที่ศึกษานั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าทางสถิติอื่นๆ แล้วนำพิจารณาว่าสามารถจำแนกฐานของเตาเผาโบราณออกจากดินที่ปกคลุมในแต่ละพื้นที่ได้หรือไม่เพียงใด การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุใดๆ สามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าแก่วัสดุแล้วจึงวัดความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองของวัสดุ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ
(ที่มา : Robinson, 1988)

ในกรณีของวัสดุที่มีรูปทรงลูกบาศก์ที่มีความยาว L และมีพื้นที่หน้าตัด A ต่อเป็นวงจรไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 19 โดยมีกระแสไฟฟ้า (I) ไหลในวงจร สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุสามารถกำหนดได้จากสมการ (3) ดังนี้

$$\rho = \frac{A}{L} \times \frac{\Delta V}{I} \quad \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ $\Delta V =$ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมวัตถุ (โวลต์)

$\rho =$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของวัตถุ มีหน่วยเป็น
โอห์ม-เมตร

การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเศษวัสดุเตาเผาโบราณในห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนดังนี้

(1) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณในบริเวณพื้นที่ศึกษามาทำความสะอาด และตกแต่งให้เป็นรูปทรงลูกบาศก์

(2) จัดอุปกรณ์การวัดตามภาพประกอบ 19

(3) ในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า SAS 300B เป็นตัวป้อนกระแสไฟฟ้า(I)และวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม(ΔV) และผลออกมาในรูปแบบของอัตราส่วน $\frac{\Delta V}{I}$

(4) คำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุจากสมการ (3)

2.3.3 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 100 MHz มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเศษวัสดุเตาเผาโบราณในแต่ละพื้นที่

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก สามารถทำได้โดยการนำสารไดอิเล็กตริกวางระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่นที่ขนานกันและมีจำนวนประจุเท่ากัน แต่ต่างชนิดกัน ดังภาพประกอบ 20 โดยความหนาแน่นของประจุที่ผิวของแผ่นบนเป็น $+\sigma_{\text{free}}$ และแผ่นล่างเป็น $-\sigma_{\text{free}}$ ซึ่งประจุเหล่านี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ที่โพลาริซีสสารไดอิเล็กตริก ก่อให้เกิดประจุเนื่องจากโพลาริเซชันบนแต่ละผิวของสารไดอิเล็กตริก และประจุเนื่องจากโพลาริเซชันเหล่านี้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับประจุบนแผ่นตัวนำ รวมทั้งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในสารไดอิเล็กตริก (\vec{E}_b) ขึ้น

ถ้าให้ P เป็นขนาดของโพลาริเซชันในสารไดอิเล็กตริก ความหนาแน่นของประจุที่ผิวด้านบนของสารไดอิเล็กตริกจะมีค่าเท่ากับ $\sigma_{\text{pol}} = -P$ ขณะที่ผิวด้านล่างเป็น $\sigma_{\text{pol}} = +P$ ดังนั้นประจุที่ปรากฏที่ผิวด้านบนมีความหนาแน่นเป็น $\sigma = \sigma_{\text{free}} + \sigma_{\text{pol}}$ หรือ $\sigma = \sigma_{\text{free}} - P$ ขณะที่ผิวด้านล่างจะได้ผลในทางตรงกันข้าม ซึ่งประจุที่ผิวเหล่านี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างแผ่นตัวนำ (\vec{E}) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ สมการข้างต้นอาจเขียนใหม่ได้เป็น

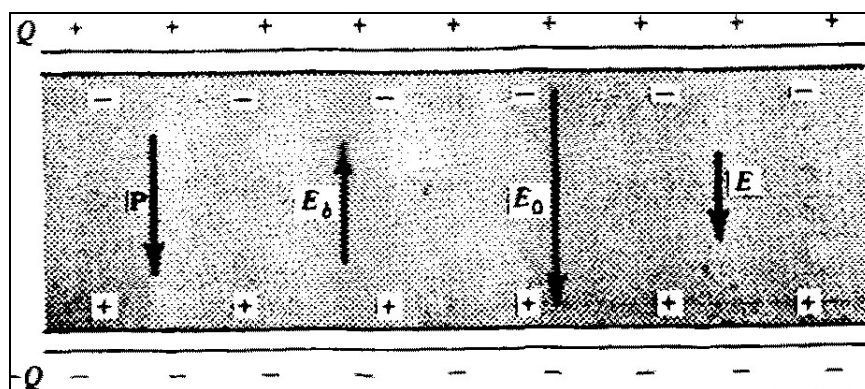
$$\mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_{\text{free}} - \mathbf{P}) \quad \text{หรือ} \quad \sigma_{\text{free}} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \text{-----} \quad (4)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้า (\vec{E}) และการไหลไรเซชัน (\vec{P}) เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นหากเขียนเป็นสมการของเวกเตอร์ที่เรียกว่า การขจัดทางไฟฟ้า (electric displacement, \vec{D}) จะได้ว่า

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\vec{D} = \text{C/m}^2 \quad \text{และ} \quad \sigma_{\text{free}} = \vec{D}$$



ภาพประกอบ 20 การเกิดโพลาริเซชันในสารไดอิเล็กตริก

(ที่มา : Wangsness, 1986)

การโพลาริเซชัน (\vec{P}) สำหรับวัสดุใดๆ เป็นโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร และเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad \text{-----} \quad (6)$$

เมื่อ χ_e = electric susceptibility

ดังนั้นสมการ (5) อาจเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \epsilon_0 \bar{E} + \epsilon_0 \chi_e \bar{E} \\ \bar{D} &= (1 + \chi_e) \epsilon_0 \bar{E} \quad \dots\dots\dots (7) \\ \bar{D} &= \epsilon \bar{E}\end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } \epsilon = \frac{\bar{D}}{\bar{E}} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{โดยที่ } \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi_e \quad \dots\dots\dots (9)$$

ϵ_r ในสมการ (9) เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

เนื่องจากประจุที่ผิวของสารไดอิเล็กตริกทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้น (\bar{E}_b) ดังนั้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนาน (\bar{E}) จึงมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ สนามไฟฟ้าก่อนที่จะนำสารไดอิเล็กตริกมาวาง (\bar{E}_0) ดังสมการ (10) โดยที่ $\bar{E} = \bar{E}_0 - \bar{E}_b$

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \epsilon_0 (\bar{E}_0 - \bar{E}) \\ \bar{E}_0 &= \bar{E} + \frac{\bar{P}}{\epsilon_0} \\ \bar{E}_0 &= (1 + \chi_e) \bar{E} \quad \dots\dots\dots (10) \\ \bar{E}_0 &= \epsilon_r \bar{E} \\ \bar{E} &= \frac{\bar{E}_0}{\epsilon_r}\end{aligned}$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนดังนี้คือ

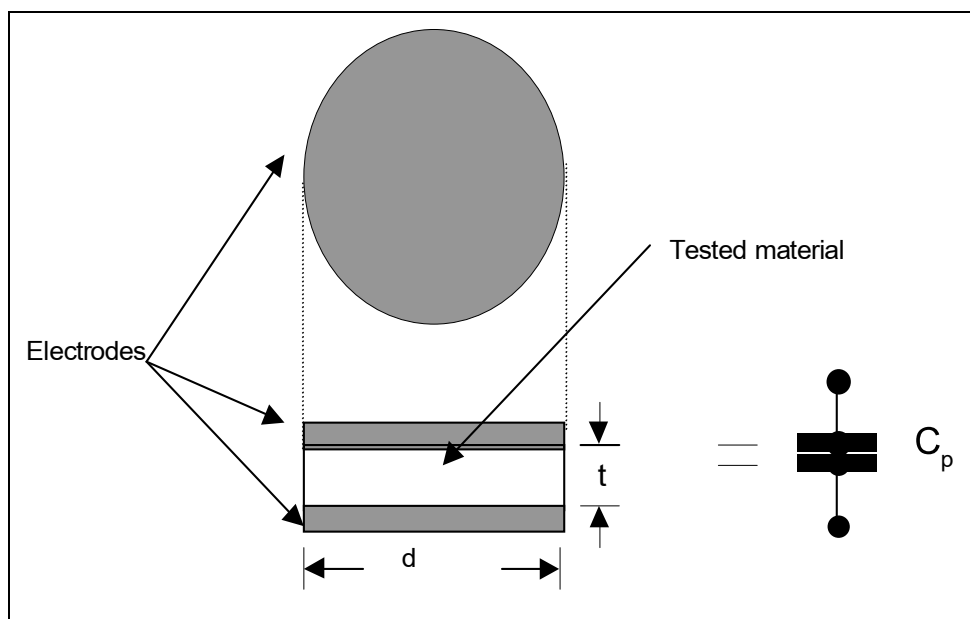
- (1) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ต้องการวัดค่าไดอิเล็กตริกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น W_a
- (2) หลังจากนั้นจึงนำเศษวัสดุเตาเผาโบราณมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักใหม่
- (3) ทำซ้ำข้อ (2) จนกว่าน้ำหนักที่ได้ จะไม่เปลี่ยนแปลง จึงบันทึกน้ำหนักเป็น W_b
- (4) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากสมการ (11)

$$\% \text{ความชื้น} = \frac{(W_a - W_b)}{W_a} \times 100 \text{ ----- (11)}$$

(5) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามข้อ (4) มาบดให้ละเอียด และนำมาอัดเป็นแผ่นมวลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก RIIC (Research & Industrial Instrument Company) ใช้ขนาดของแรงอัด 5 ตัน จากนั้นจึงนำไปขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อเกลี่ยให้ได้ขนาดความหนาเท่ากันตลอดทั้งตัวอย่าง

(6) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ (5) มาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักเป็น W_b แล้วหยดน้ำเพิ่มน้ำหนักของตัวอย่างบันทึกน้ำหนักเป็น W_a เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับข้อ (4)

(7) นำตัวอย่างที่ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับข้อ (4) ไปวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องวัดค่าไดอิเล็กตริก HP 16451B ของบริษัท Hewlett Packard ซึ่งมีหลักการในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แบบจำลองการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(ที่มา : AGILENT 16451B dielectric test fixture operation and service manual)

(8) คำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตามสมการ (12)

$$\epsilon_r = \frac{t \times C_p}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \epsilon_0} \dots\dots\dots (12)$$

เมื่อ ϵ_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

C_p = ค่าความจุ (F)

t = ค่าความหนาของวัสดุ (m)

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโตรด (m)

ϵ_0 = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi}$ F/m)

2.3.4 การวัดและวิเคราะห์หาสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของเศษวัสดุเตาเผาโบราณ

การวัดและวิเคราะห์หาสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ธาตุประกอบในเศษวัสดุเตาเผาจากบริเวณพื้นที่ศึกษา

การเกิดรังสีเอกซ์เรืองสามารถทำได้โดยการ ยิงรังสีปฐมภูมิ (primary radiation) เข้าไปยังอะตอม เพื่อให้อิเล็กตรอนในวงโคจร (shell) ชั้นใน (ชั้น K หรือชั้น L) เกิดไอออไนเซชัน (ionization) หลุดออกจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นภายในวงโคจรชั้นใน อิเล็กตรอนจากวงโคจรถัดขึ้นไปที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ก็จะตกเข้ามาแทนที่ที่ว่างภายในวงโคจรชั้นในที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า ซึ่งต้องมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการ (13) ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์เรือง (fluorescent x-ray) และเนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองที่ปลดปล่อยออกมานั้น จะมีค่าเฉพาะแตกต่างกันไปตามชนิดของธาตุ จึงอาจเรียกรังสีเอกซ์เรืองได้อีกชื่อหนึ่งว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ทำให้การวิเคราะห์คุณภาพและปริมาณของธาตุแบบเรืองรังสีเอกซ์ สามารถทำได้โดยการวัดพลังงานและความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองนั่นเอง

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hf \quad \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ E = พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา

h = ค่าคงที่ของพลังค์ (6.624×10^{-34} Js)

f = ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

λ = ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

c = ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบวิเคราะห์แบบเรืองรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (primary radiation source) ตัวอย่าง (sample) และส่วนของระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ (x-ray detection and analysing system) แบบหลายช่อง (multi-channel analyzer) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ครั้งนี้ จะเป็นระบบที่จัดให้ส่วนของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ตัวอย่าง และส่วนของหัววัดรังสีอยู่ในแนวเดียวกัน (coaxial) หรือที่เรียกว่า coaxial geometry ซึ่งการจัดระบบในลักษณะนี้ สามารถจัดได้เฉพาะกรณีที่ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิเป็นชนิดไอโซโทปรังสี ซึ่งจะใช้ได้กับระบบวิเคราะห์แบบ non-dispersion ดังภาพประกอบ 22

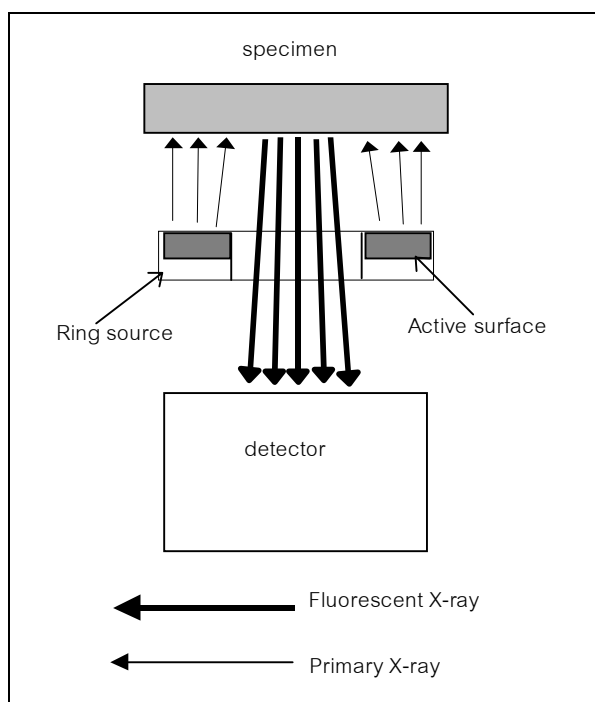
การวิเคราะห์หาชนิดของธาตุประกอบในตัวอย่าง สามารถทำได้จากการหาค่าพลังงานจากยอดพลังงานของสเปกตรัม และนำค่าพลังงานที่ได้เทียบกับ x-ray emission energies chart หรือเทียบจาก <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/> เพื่อระบุว่าเป็นของรังสีเอกซ์เส้นใด และจากธาตุอะไรนั่นเอง

การตรวจวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

- (1) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด
- (2) การวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรือง

(1) การเตรียมตัวอย่างสำหรับหาสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรือง

(1.1) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่ต้องการหาสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองมาบด จากนั้นนำ มาผสมกับตัวผสม (Boric Acid หรือ WAX C) เพื่อผสมให้เนื้อวัสดุยึดเกาะกันมากขึ้น



ภาพประกอบ 22 การจัดระบบวิเคราะห์แบบ coaxial geometry

(ดัดแปลงจาก : นเรศร์ จันทร์ขาว , 2525 : 33)

(1.2) นำเศษวัสดุเตาเผาโบราณที่บดละเอียดและผสมกับตัวผสมแล้วใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาดมาตรฐาน เพื่อนำมาอัดเป็นแผ่นมวลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.0 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก HERZOG ใช้ขนาดของแรงอัด 250-300 กิโลนิวตัน ซึ่งจะทำให้ได้ตัวอย่างขนาดมาตรฐานที่สามารถใช้ตรวจวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองด้วยเครื่องวิเคราะห์ EDXRF (the energy dispersive x-rays fluorescence analysis) ที่ใช้ Americium-241 ความแรง 50 mCi เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ส่วนหัววัดรังสีเอกซ์เรืองใช้หัววัดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) ชนิด Si(Li) หน่วยระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ใช้เป็นการติดตั้งในคอมพิวเตอร์ เป็นแบบ 2048 ช่อง

(2) การตรวจวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรือง

(2.1) นำตัวอย่างขนาดมาตรฐานใส่ในช่องใส่ตัวอย่างแล้วนำมาวางไว้ในระบบหัววัด

(2.2) เปิดแหล่งกำเนิดของระบบ EDXRF โดยตั้งพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าศักย์สูง เท่ากับ 0.5 กิโลโวลต์ ให้แก่หัววัด ปรับ coarse gain เท่ากับ 50 ปรับ fine gain เท่ากับ 50 ตั้งเวลาในการวัด เท่ากับ 3000 วินาที

(2.3) เปิดโปรแกรม GENIE-200 เพื่อบันทึกสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของตัวอย่าง

2.3.5 การวัดและวิเคราะห์หาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเศษภาชนะโบราณ

การตรวจวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสารประกอบที่มีอยู่ในเศษภาชนะโบราณจากบริเวณพื้นที่ศึกษา

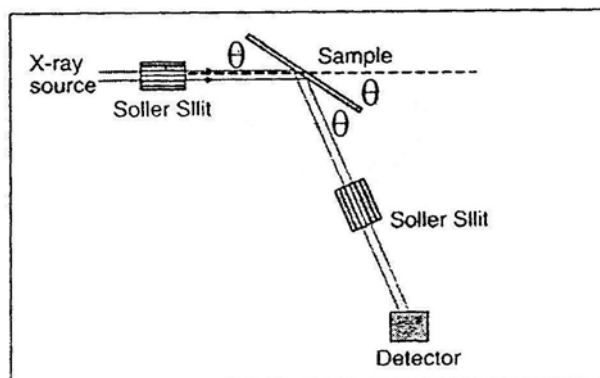
การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนผลึกของตัวอย่าง (ภาพประกอบ 23) แล้วคลื่นสะท้อนเกิดการเสริมสร้างหรือหักล้างกัน ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการ (14)

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (14)$$

เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างระนาบ มีหน่วยเป็น อังสตรอม ($1 \text{ อังสตรอม} = 10^{-10} \text{ เมตร}$)

θ = มุมระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก

λ = ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น อังสตรอม



ภาพประกอบ 23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบตัวอย่าง

(ที่มา : ปานทิพย์ อัมพรรัตน์ และสมชาย พงษ์เกษม, 2545)

ระบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ X-ray source, sample holder, detector โดยมี Goniometer ทำหน้าที่เป็นแกนหมุนระบบให้รังสีเอกซ์ตกกระทบตัวอย่างแล้วเลี้ยวเบนเข้าหาหัววัด ทำให้มุมที่ได้จะเป็นมุม 2θ โดยที่การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะได้ข้อมูลออกมาในรูปสเปกตรัมระหว่าง มุม(2θ) กับความเข้มสัมพัทธ์ของรังสี ที่มีลักษณะเฉพาะตามชนิดของผลึก ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐานที่เก็บรวบรวมไว้แล้ว จะทำให้สามารถจำแนกชนิดของสารประกอบนั้นได้

การวิเคราะห์หาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) นำเศษโบราณวัตถุที่ต้องการวัดมาบดให้ละเอียด หลังจากนั้นจึงนำมาอัดให้เข้ากับน้ำ เพื่อให้ได้สารตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.0 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 0.3 เซนติเมตร

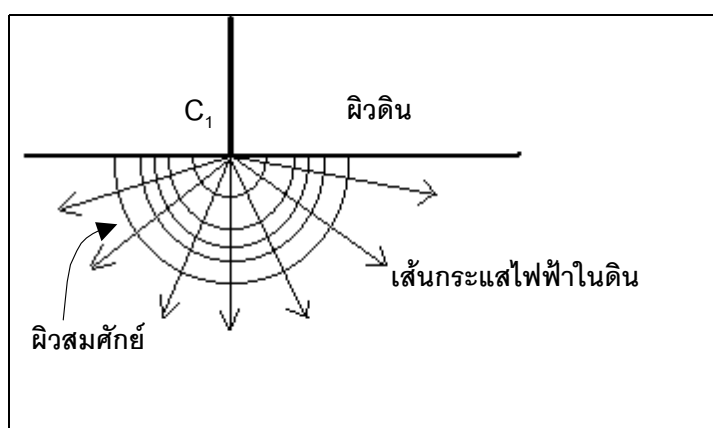
(2) นำสารตัวอย่างเข้าเครื่อง X-Ray Diffractometer Type PW3710 ของบริษัท Philips โดยใช้อาโนดของหลอดทำมาจาก ทองแดง (Cu) ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 40 kV กระแสในหลอดรังสีเอกซ์ เท่ากับ 30 mA ความยาวของคลื่นรังสีเอกซ์ที่ใช้ เท่ากับ 1.54056 \AA มุมแบรกก์ ที่ทำการบันทึกสเปกตรัม (2θ) อยู่ในช่วง 2.1° ถึง 84.9° เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบที่มีอยู่ภายในโบราณวัตถุ

2.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของชั้นดินในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 พื้นที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจหาและกำหนดตำแหน่งของฐานเตาเผาโบราณชุมชนบ้านปะโอ

ทฤษฎี

เมื่อมีขั้วไฟฟ้ากระแส C_1 อันหนึ่งปักอยู่บนผิวของชั้นดินที่มีลักษณะเอกพันธ์ (homogeneous) ที่จุด C_1 ตามภาพประกอบ 24 โดยชั้นดินดังกล่าวมีความหนาเป็นอนันต์และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ ρ กระแสไฟฟ้าจากจุด C_1 จะแพร่ออกทุกทิศทางในรัศมี r เนื่องจากจุด C_1 ปักอยู่ระหว่างรอยต่อของชั้นดินและอากาศ และในอากาศจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าเป็น ศูนย์ ดังนั้นการแพร่ของกระแสไฟฟ้ารอบจุด C_1 จึงมีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $2\pi r^2$



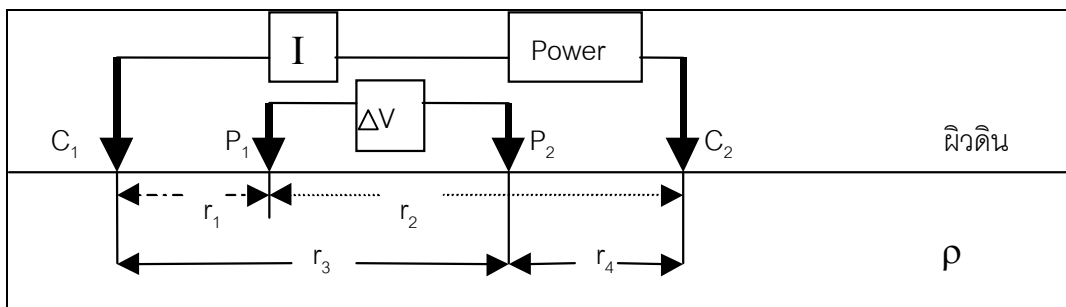
ภาพประกอบ 24 การแพร่ของกระแสไฟฟ้ากรณีขั้วไฟฟ้ากระแส 1 ขั้ว

(ที่มา:ดัดแปลงจาก Telford et al., 1990)

จากสมการของลาปลาซและกฎของโอห์ม จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้า V ที่ระยะ r ใดๆ จากจุด C_1 จะขึ้นอยู่กับ สภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน และกระแสไฟฟ้าที่ออกจากจุด C_1 เป็นดังสมการ (15)

$$V = \frac{I \cdot \rho}{2\pi r} \dots\dots\dots (15)$$

ดังนั้นหากมีขั้วไฟฟ้ากระแส 2 ขั้วปักบนผิวดินตามภาพประกอบ 25 ศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆ จะเป็นผลรวมของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากขั้วไฟฟ้ากระแสทั้งสอง



ภาพประกอบ 25 ขั้วไฟฟ้ากระแส 2 ขั้วและขั้วไฟฟ้าศักย์ 2 ขั้วบนผิวดินที่มีความเอกพันธ์ (ที่มา:ดัดแปลงจาก Telford et al., 1990)

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P₁ เนื่องจากขั้วไฟฟ้ากระแส C₁ และ C₂ ตามสมการ (16)

$$V_{\rho 1} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots (16)$$

และศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P₂ เนื่องจากขั้วไฟฟ้ากระแส C₁ และ C₂ ตามสมการ (17)

$$V_{\rho 2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \dots\dots\dots (17)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างจุด P₁ และ P₂ จึงมีค่าตามสมการ (18)

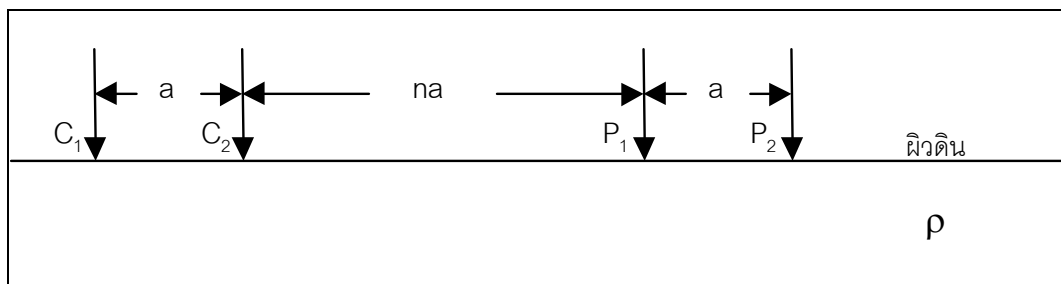
$$\Delta V = V_{\rho 1} - V_{\rho 2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \dots\dots\dots (18)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (apparent resistivity) ของชั้นดิน สามารถคำนวณได้จากสมการ (19)

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)} \right] \dots\dots\dots (19)$$

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้จัดวางขบวนขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล(Dipole-dipole Array) ตาม ภาพประกอบ 26 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (ρ_a) จะมีค่าเป็นดังสมการ (20)

$$\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)a \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (20)$$



ภาพประกอบ 26 การจัดขบวนขั้วแบบไดโพล-ไดโพล(Dipole-dipole Array) (ที่มา:ดัดแปลงจาก Telford et al., 1990)

การนำไฟฟ้าของชั้นดินและหินนั้น อาศัยสารละลายที่อยู่ในโพรง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เหล่านี้โดยอาศัยกฎของอาร์ชี (Archie's Law) ซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของชั้นดินหรือหิน ดังนี้

$$\rho = a\phi^{-m} s^{-n} \rho_w \dots\dots\dots (21)$$

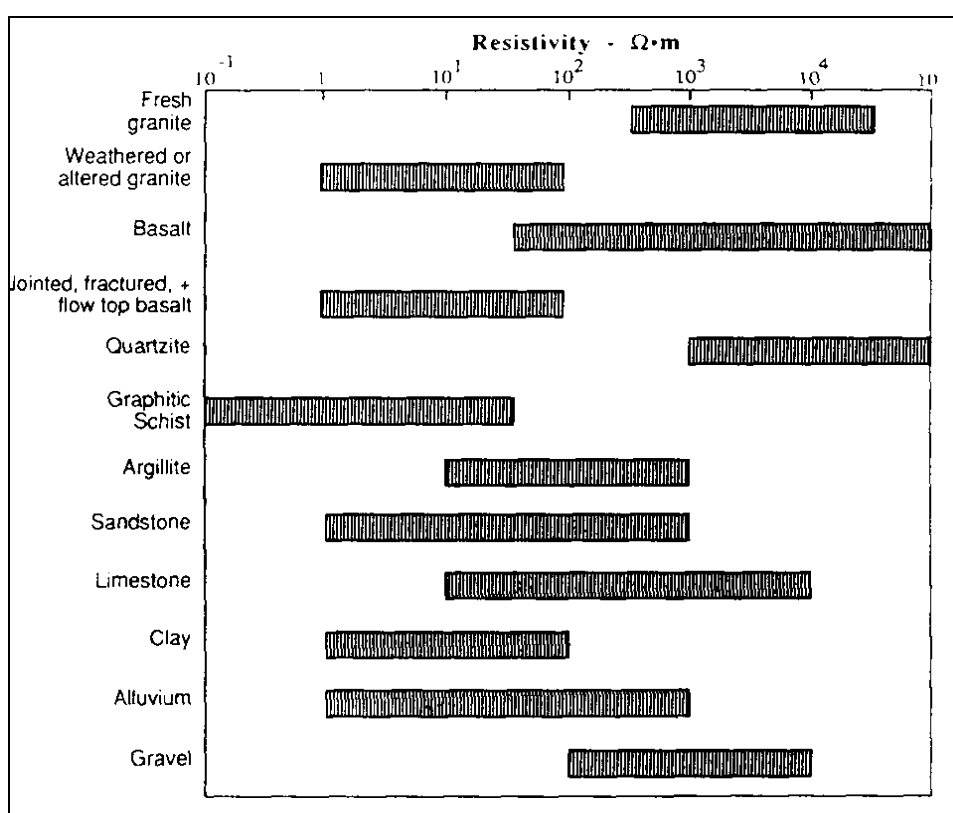
- เมื่อ ρ = สภาพต้านทานไฟฟ้าของหิน
- ϕ = ค่าความพรุน(Porosity)คือ เศษส่วนของปริมาตรรูพรุนต่อปริมาตรหินทั้งก้อน
- ρ_w = สภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏของสารละลายที่แทรกอยู่ในโพรง
- a, m, n = ค่าคงที่ได้จากการทดลอง โดย $n \approx 2, 0.5 \leq a \leq 2.5, 1.3 \leq m \leq 2.5$

นั่นคือ ถ้าชั้นดินหรือหินแข็งมากและไม่มี ความพรุน ชั้นดินหรือหินนั้นจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่ถ้าชั้นดินหรือหินนั้นเกิดการผุมีโพรงและสารละลายบรรจุอยู่ในโพรงมาก จะทำให้ชั้นดินหรือหินนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางต่างๆ ทางธรณีวิทยาแสดงดังตาราง 4

เนื่องจากฐานเตาเผาประกอบขึ้นมาจากดินเหนียวผสมที่เผาไฟจนแกร่ง จึงทำให้ฐานเตาเผา มีลักษณะที่แน่นและแข็งกว่าดินที่ปิดฝัง ซึ่งน่าจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฐานเตาเผา มีค่าแตกต่างไปจากดินที่ปิดฝัง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการทำแผนที่สภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อกำหนดตำแหน่งฐานของเตาเผาโบราณชุมชนปะโอ

ตาราง 4 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ

(ที่มา : Ward, 1990)



2.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 พื้นที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกบริเวณที่มีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กแตกต่างกันที่ชั้นดินระดับต้น

ทฤษฎี

ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเป็นสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของวัตถุที่สะท้อนถึงความสามารถของวัตถุในการถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก ซึ่งการถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กของวัตถุใด ๆ นั้น จะแปรผันตรงกับค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (22)

$$\bar{I} = k\bar{H} \quad \dots\dots\dots (22)$$

เมื่อ \bar{I} คือ ความเข้มของการทำให้เป็นแม่เหล็ก (A/m)

k คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

\bar{H} คือ สนามแม่เหล็กภายนอก (A/m)

ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวกลางทางธรณีวิทยา แสดงในตาราง 6 โดยพบว่าหินอัคนีประเภทต่างๆจะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กสูงที่สุด เนื่องจากหินอัคนีเหล่านี้มีปริมาณของแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ผสมอยู่มาก ส่วนหินแปรจะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กที่สูงกว่าหินตะกอน ในส่วนของแร่เหล่านี้จะพบว่าแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) มีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กสูงที่สุด แต่ก็ยังมีแร่เหล็กบางชนิดที่มีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กต่ำ เช่น แร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ส่วนควออตซ์ (SiO_2) หินเกลือ (NaCl) และ แคลไซต์ (CaCO_3) จะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กต่ำที่สุด และยังพบว่าค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กยังมีการซ้อนทับกันในตัวกลางทางธรณีวิทยาต่างชนิดกัน จึงไม่อาจบอกชนิดของตัวกลางที่แสดงค่าผิดปกติได้จากข้อมูลค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเพียงลำพัง

นอกจากนี้ความแปรปรวนของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก อาจจะมีสาเหตุมาจากกิจกรรมต่างๆดังต่อไปนี้ เช่น กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับความร้อนบริเวณผิวดิน กิจกรรมทางการเกษตรบริเวณผิวดิน กิจกรรมการทำเหมืองแร่ การถูกพัดพาของตะกอนภายหลังน้ำท่วม (Wattanasen, 2001) และเนื่องจากฐานเตาเผาโบราณชุมชนปะโอเป็นวัตถุที่มีความเกี่ยวข้องกับความร้อนที่อุณหภูมิสูง

ซึ่งอาจส่งผลให้สารประกอบภายในมีการจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นสารประกอบที่มีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กสูงต่างไปจากดินที่ปิดฝักโดยรอบ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะกำหนดตำแหน่งฐานของเตาเผาโบราณชุมชนปะโอจากการทำแผนที่ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กในพื้นที่ศึกษาทั้งสองพื้นที่

ตาราง 5 ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหินและแร่ (ดัดแปลงจาก : Telford et al., 1978)

Type	Susceptibility (X10 ⁻³ SI)	Type	Susceptibility (X10 ⁻³ SI)
Sedimentary		Minerals	
Sandstones	0-20	Quartz	-0.01
Shales	0.01-15	Rock Salt	-0.01
Matamorphic		Calcite	-0.001- (-0.01)
Schist	0.3-3	Pyrite	0.05-5
Slate	0-35	ilmenite	300-3500
Igneous		Clays	0.2
Granite	0-50	Hematite	0.5-35
Basalts	0.2-175	Magnetite	1200-19200

2.3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์หึ่งความลึก

การใช้เรดาร์หึ่งความลึกศึกษาชั้นดินในบริเวณพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 พื้นที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจหาและกำหนดตำแหน่งของเตาเผาโบราณชุมชนบ้านปะโอ

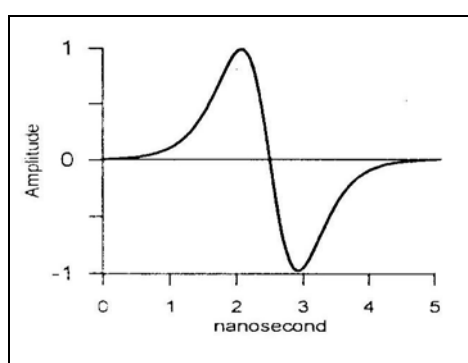
ทฤษฎี

ทฤษฎีของเรดาร์หึ่งความลึกจะมีความคล้ายคลึงกับทฤษฎีของคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน เพียงแต่เรดาร์หึ่งความลึกจะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแทนคลื่นยืดหยุ่นผ่านเข้าไปในตัวกลาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกจากสายอากาศส่งสัญญาณนั้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นดลที่มีพลังงานและความถี่สูง (โดยทั่วไปตั้งแต่ 10MHz-1GHz) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (คลื่นเรดาร์) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางและไปตกกระทบกับรอยต่อของตัวกลางที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและทาง

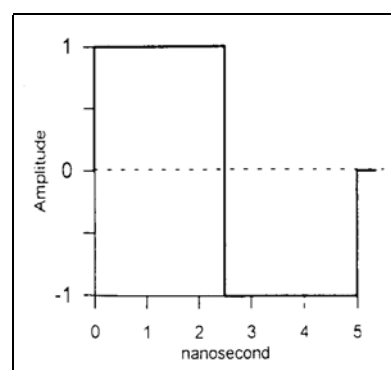
แม่เหล็กที่แตกต่างกัน เช่น ระหว่างชั้นดินกับฐานของเตาเผาที่แทรกอยู่ในชั้นดิน พลังงานของคลื่นเรดาร์จะสะท้อนกลับไปยังสายอากาศรับสัญญาณ ซึ่งพลังงานที่สะท้อนกลับจากรอยต่อของตัวกลางจะขึ้นอยู่กับ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่าน ความลึก ตำแหน่ง และรูปทรงของตัวกลางที่เกิดการสะท้อน

ในทางปฏิบัติการส่งคลื่นของเรดาร์หยังความลึกจากสายอากาศส่งสัญญาณไม่ได้ส่งออกไปในรูปของคลื่นเดี่ยว หากแต่จะส่งออกไปเป็นชุดคลื่นที่ต่อเนื่องกัน โดยมีคาบห่างกันประมาณ 2-50 μs และส่วนกลับของคาบระหว่างคลื่นที่ต่อเนื่องกัน 2 ชุด คือ repetition frequency (ν_r) ซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 20-500 kHz คาบของ single pulse ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1-100 ns คลื่นที่ส่งต่อเนื่องกันไปนั้นประกอบด้วยหลายความถี่ และความถี่ที่มีพลังงานสูงสุดจะเรียกว่า ความถี่กลาง (centre frequency)

โดยทั่วไปคลื่นของเรดาร์หยังความลึก มีลักษณะดังภาพประกอบ 27ก. แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ จึงได้แสดงคลื่นใหม่ดังภาพประกอบ 27ข. ที่เรียกว่า “square”GPR pulse ในภาพประกอบ 26ข. สัญญาณจะเพิ่มจากศูนย์ไปสู่ค่าหนึ่งในทิศทางหนึ่งทันทีทันใดและจะคงที่จนกระทั่งเมื่อถึงที่เวลาประมาณ 2.5 ns สัญญาณจะเปลี่ยนกลับไปสู่อีกค่าหนึ่งที่เท่ากันแต่ในทิศทางที่ตรงข้ามอย่างทันทีทันใดเช่นกันและคงที่ต่อไปอีกประมาณ 2.5 ns หลังจากนั้นสัญญาณจึงกลับสู่ศูนย์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 27 (ก) ลักษณะของคลื่นในเรดาร์หยังความลึก (ข) “square”GPR pluse
(ที่มา: Parasnis, 1997)

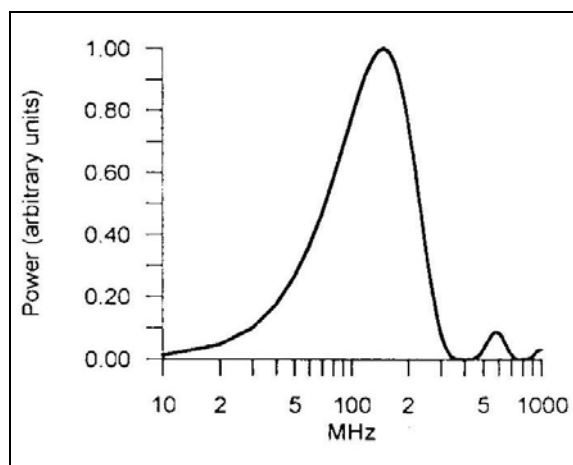
เมื่อกำหนดให้ $F(f)$ คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ความถี่ f ในคลื่นดล ดังนั้นกำลังของสัญญาณที่ความถี่ f ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (23) ต่อไปนี้

$$|F(f)|^2 = \frac{[1 - \cos(\pi f \tau)]^2}{2\pi^2 f^2} \quad \dots\dots\dots (23)$$

เมื่อ $|F(f)|^2$ คือ กำลังของสัญญาณที่ความถี่ f ใดๆ

τ คือ คาบคลื่นดล

f คือ ความถี่ของสัญญาณ



ภาพประกอบ 28 กำลังของสเปกตรัมคลื่นดลที่มีคาบ 5 ns

(ที่มา: Parasnis, 1997)

กรณีของสเปกตรัมคลื่นดลที่มีคาบ 5 ns แสดงดังภาพประกอบ 28 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าความถี่ที่มีกำลังมากที่สุดปรากฏอยู่ที่ความถี่ประมาณ 150 MHz ซึ่งจะเรียกว่าความถี่กลาง

เวลาที่ใช้ในการเดินทางไป-กลับของคลื่นดลระหว่างสายอากาศกับผิวนอกรอบ เรียกว่า two way time และช่วงเวลาที่ใช้ในการเดินทางไป-กลับของคลื่นดลเรียกว่า time window (τ_w) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความลึกสูงสุด หรือเท่ากับ $\frac{v \cdot \tau_w}{2}$ เมื่อ v คือความเร็วเฉลี่ยของคลื่นดล โดยช่วงเวลาที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับเรียกว่า เวลาในการชักตัวอย่าง (sampling interval, τ_s) ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ของการชักตัวอย่าง (sampling frequency) โดยเวลาในการชักตัว

อย่างที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $\frac{1}{2f_{max}}$ (ความถี่ของการซັกดตัวอย่างจึงมีค่ามากกว่า $2f_{max}$) เมื่อ f_{max} คือ ความถี่สูงสุดของคลื่นดล

พารามิเตอร์ของตัวกลางซึ่งกำหนดการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ค่าชี้คุณภาพ (quality indicator, Q) ของตัวกลางนั้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ตามสมการ (24) ดังนี้

$$Q = \frac{\omega \epsilon}{\sigma} \dots\dots\dots (24)$$

เมื่อ σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า (S/m) = $\frac{1}{\rho}$

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (ohm.m)

ϵ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (dielectric permittivity)

ส่วนกลับของ Q จะเรียกว่า loss tangent ซึ่งถ้า $Q \gg 1$ คลื่นจะแพร่ในตัวกลางในระยะไกล โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน แต่ถ้า $Q \ll 1$ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการลดทอนในระยะทางใกล้ๆ และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปถึงรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance, Z) ต่างกัน คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ ขณะที่บางส่วนจะหักเหผ่านเข้าไป ดังภาพประกอบ 29 โดย สัมประสิทธิ์การสะท้อน (R) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T) ในทุกตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่าน ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ ดังสมการ (25)

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots (25)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

เมื่อ $Z = \frac{\omega \mu}{k}$

$$k = (\omega^2 \epsilon \mu + i \omega \mu \rho)^{1/2}, i = \sqrt{-1}$$

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นสารไดอิเล็กตริกที่สมบูรณ์ ($\sigma=0$) สามารถเขียนค่าอิมพีแดนซ์ได้ว่า

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ส่วนในสุญญากาศ ($\mu = \mu_0, \epsilon = \epsilon_0$) มีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \text{ โอห์ม}$$

เมื่อ μ = สภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็กของวัตถุ (H/m)

μ_0 = สภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

Z_1 = ค่าอิมพีแดนซ์ ในตัวกลางที่ 1

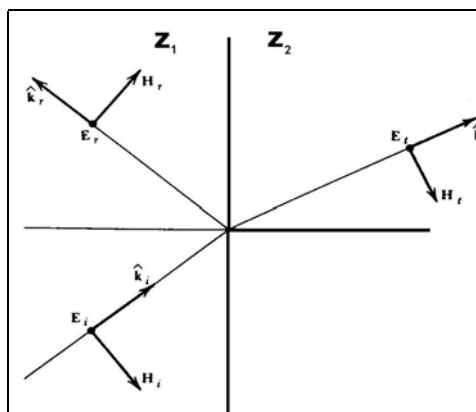
Z_2 = ค่าอิมพีแดนซ์ ในตัวกลางที่ 2

ค่า k จึงเป็นจำนวนจำนวนเชิงซ้อน โดยส่วนประกอบจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อนนี้ คือ การลดทอน (α) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ มีค่าเท่ากับ

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\epsilon\mu}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

การลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์การที่แอมพลิจูดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงเป็น $\frac{1}{e}$ เท่าของแอมพลิจูดเดิมเมื่อเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของความลึกผิว (Skin Depth = δ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ f, μ, σ ดังสมการ (28)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots\dots\dots (28)$$



ภาพประกอบ 29 การตกกระทบ การสะท้อน การส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตรงผิวรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน(ที่มา : Wangness, 1986)

ในกรณีที่ตัวกลางที่ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก นั่นคือ $\mu_2 = \mu_1 = \mu_0$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถเขียนใหม่ตามสมการ (29) ดังนี้

$$R = \frac{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} - (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}}{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} + (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}} \dots\dots\dots (29)$$

หากตัวกลางทั้งสองไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ($\sigma=0$) และกำหนดให้ $\epsilon_1 = \epsilon_{1r}\epsilon_0$ และ $\epsilon_2 = \epsilon_{2r}\epsilon_0$ เมื่อ ϵ_{1r} และ ϵ_{2r} คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ในตัวกลางที่ 1 และ 2 สามารถเขียนแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนใหม่ได้จากสมการ (30) ดังนี้

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}} \dots\dots\dots (30)$$

ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ ที่ไม่มีสภาพเป็นตัวนำและไม่มีสภาพทางแม่เหล็ก เป็นดังสมการ (31) ดังนี้

โดยที่
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (31)$$

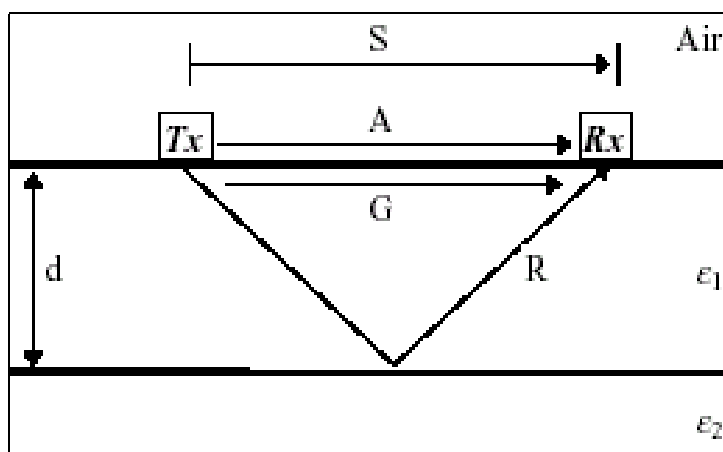
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 0.3 m/ns

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ความลึกของผิวสะท้อน (d) จากภาพประกอบ 30 สามารถประเมินได้เมื่อทราบเวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ (t) ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ/ส่งสัญญาณ (S) และความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง (v) ดังสมการ (32)

$$d = \frac{(v^2 t^2 - S^2)^{1/2}}{2} \dots\dots\dots (32)$$



ภาพประกอบ 30 แบบจำลองการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ตรงรอยต่อของตัวกลาง
(ที่มา : Gruber and Ludwig, 1994)

ตาราง 6 แสดงพารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการแผ่ของคลื่นเรดาร์ในตัวกลางทางธรณีวิทยาต่างๆซึ่งจะพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่ในอากาศได้เร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด (สมการ 31) และไม่มีการลดทอนของคลื่นเนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ (สมการ 27) แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแผ่ได้ช้าที่สุดในน้ำทะเลเนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดและมีการลดทอนของคลื่นมากที่สุด เนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกลางทางธรณีวิทยาอื่นๆ

ตาราง 6 ค่าคงที่ได้ิเลกตริก สภาพนำไฟฟ้า ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดทอน
ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในตัวกลางทางธรณีวิทยาประเภทต่างๆ

(ที่มา: Davis and Annan, 1989)

Material	ϵ'	σ [mS/m]	V [m/ns]	α [dB/m]
Air	1	0	0.30	0
Dest. Water	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Fresh Water	80	0.5	0.033	0.1
Sea Water	80	3×10^4	0.01	1000
Dry sand	3-5	0.01	0.15	0.01
Saturated sand	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Limestone	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Shales	5-15	1-100	0.09	1-100
Silts	5-30	1-100	0.07	1-100
Clays	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granite	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ice	3-4	0.01	0.16	0.01

ในกรณีที่วัตถุมีความหนาเท่ากับ d สามารถจำแนกการสะท้อนจากขอบบนและขอบล่าง
ของวัตถุได้ เมื่อเวลาที่สัญญาณสะท้อนที่มาจากขอบบนและขอบล่างของวัตถุห่างกันอย่างน้อย
เท่ากับคาบของสัญญาณ (τ) สามารถหาความหนาของวัตถุได้จากสมการ (33) หรือ (34) ดังนี้

$$d = \frac{v \cdot \tau}{2} \quad \dots\dots\dots (33)$$

หรือ

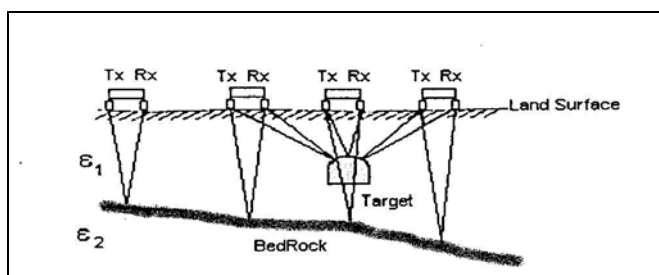
$$d = \frac{v}{2 \cdot f} \quad ; f = \frac{1}{\tau} \quad \dots\dots\dots (34)$$

เนื่องจากพลังงานสะท้อนที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับสัญญาณนั้นไม่ได้สะท้อนมาจากจุด
สะท้อนเพียงจุดเดียว หากการสะท้อนจะมาจากจุดสะท้อนหลายจุดที่มีพื้นที่รูปวงกลม ถ้า a เป็น รัศมี

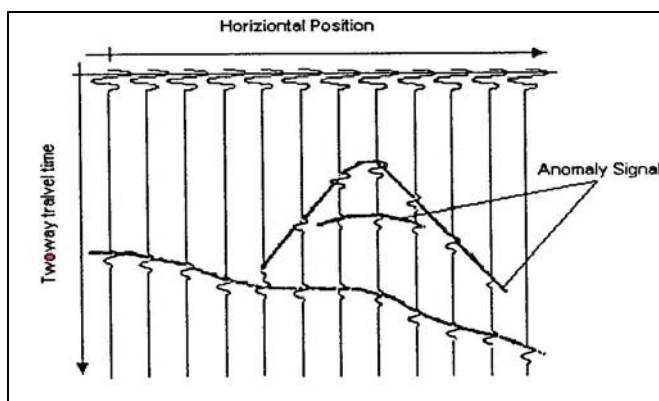
รอบจุดตกกระทบ t เป็น เวลาที่คลื่นเดินทางไป-กลับ f เป็น ความถี่ของคลื่นเรดาร์หึ่งความลึก v เป็นความเร็วของคลื่นเรดาร์หึ่งความลึก สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (35)

$$a = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t}{f}} \quad \dots\dots\dots (35)$$

เส้นสัญญาณสะท้อนที่จุดวัดต่างๆ (ภาพประกอบ 31 ก) จะถูกนำมาเรียงต่อกันต่อเนื่องกันตามจุดวัด (ภาพประกอบ 31 ข) ซึ่งจะเรียกว่า เรดาร์แกรม โดยแกน x คือ จุดวัดต่างๆในแนววัด แกน y คือ เวลาที่คลื่นเดินทางไป-กลับ ในกรณีที่ชั้นดินวางตัวขนานกับแนววัด สัญญาณสะท้อนที่ปรากฏบนเรดาร์แกรมก็จะต่อเนื่องกันตลอดแนววัด แต่หากว่ามีวัตถุขนาดเล็กฝังอยู่ในชั้นดิน สัญญาณสะท้อนบริเวณวัตถุจะปรากฏรูปร่างเป็นไฮเพอร์โบลา ดังแสดงในภาพประกอบ 30(ก) และ 30(ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 31 (ก) ตำแหน่งของจุดวัดเรดาร์หึ่งความลึก

(ข) ภาพตัดขวางของสัญญาณสะท้อนตลอดแนววัด

(ดัดแปลงจาก : <http://www.malags.se/ramac/radar.shtml>, 1999)