



โครงการวิจัยที่ ภ. 56-08 / ย. 2 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

# การพัฒนาเครื่องมือธรณีฟิสิกส์เพื่อสำรวจ แหล่งน้ำบาดาลแบบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 56-08  
การพัฒนาเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์  
เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและสถานศึกษา

โครงการย่อยที่ 2  
การพัฒนาเครื่องมือธรณีฟิสิกส์เพื่อสำรวจแหล่งน้ำบาดาล  
แบบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)  
การพัฒนาเครื่องมือธรณีฟิสิกส์เพื่อสำรวจแหล่งน้ำบาดาล  
แบบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

โดย

บุญชู สีสลาขจรจิต

ดีเซลล์ สวนบุรี	ทรงเกียรติ รอดแดง
สายชล เสถียรดี	บุญเตือน มงคลแกลง
สุพัฒน์ นवलโกฏ	นภาพร คล้ายเจียม
นภัสวรรณ อุทัยธีรนนท์	อรณัชชาย์ อุทัยธีรนนท์
แสวง เกิดประทุม	ศรีวิชัย สุธุข

บรรณาธิการ  
นฤมล รื่นไวย์  
บุญเรียม น้อยชุมแพ  
ศิริสุข ศรีสุข

วว., ปทุมธานี 2558  
สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย  
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นายจวุฒิ เสาवพฤษ์)  
ผู้ว่าการ

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์นนทวัฒน์ จุลเดชะ ภาควิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณา  
เป็นที่ปรึกษาในการจัดทำวงจรต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	37
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	44
4. สรุปผลการทดลอง	51
5. ข้อเสนอแนะ	52
6. เอกสารอ้างอิง	55
7. ภาคผนวก	57

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. การหาค่าความต้านทานปรากฏของชั้นดินในภาคโคลนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง (ความสูงของชั้นดิน $\approx 5$ เซนติเมตร)	44
ตารางที่ 2. การหาค่าความต้านทานปรากฏของชั้นดินในภาคโคลนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง ความสูงของชั้นดิน $\approx 10$ เซนติเมตร ขนาดถังภาคโคลน $\varnothing 60 \times 86$ เซนติเมตร	47

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. วัฏจักรของน้ำ	4
รูปที่ 2. การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นดิน	7
รูปที่ 3. ช่วงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน, ตะกอน, น้ำ และหิน	7
รูปที่ 4. เครื่องมือเตาซึ่ง (ก), ไม้เตาซึ่งรูปตัว Y (ข), ไม้เตาซึ่งรูปตัว L (ค-ง) และนักสำรวจเตาซึ่งในขณะปฏิบัติงาน	10
รูปที่ 5. ขี้เถ้า (ก) กองขี้เถ้าของตะกอนในภาคสนาม (ข) การเก็บรักษาโดยตากลมในที่ร่มให้ขี้เถ้าของตะกอนแห้ง	12
รูปที่ 6. ขนาดของตะกอน ตะกอนมีขนาดใหญ่ไปถึงเล็ก ได้แก่ กรวด, ทราย, ทรายแป้ง และดินเหนียว	13
รูปที่ 7. วงจรไฟฟ้าพื้นฐานเกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	19
รูปที่ 8. ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในเส้นลวด	21
รูปที่ 9. ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1 ขั้ว และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 ขั้ว	23
รูปที่ 10. ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 ขั้ว	24
รูปที่ 11. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ก) วงจรไฟฟ้าของเครื่องมือ, (ข) การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในภาคสนาม และ (ค) ภาพขยายขั้วไฟฟ้า	26
รูปที่ 12. การปักวางขั้วไฟฟ้า (ก) แบบเวนเนอร์ และ (ข) แบบซลัมเบอร์เจ	30
รูปที่ 13. วิธือนาไลติคัลโดยใช้คั้งต้นแบบของเวนเนอร์ 2 ชั้น	33
รูปที่ 14. การวัดค่าทางไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ	37
รูปที่ 15. ลักษณะการวัดที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้	38
รูปที่ 16. วงจรที่ใช้สำหรับการสร้างกระแสไฟฟ้ากำลังสูง	38
รูปที่ 17. วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้	39
รูปที่ 18. เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้	40
รูปที่ 19. การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้	40
รูปที่ 20. เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 21. แบบเตอรีขนาด 12 โวลต์ ที่ใช้เป็นตัวจ่ายกำลังงานให้เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูง แบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้	41
รูปที่ 22. การจัดวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ	43
รูปที่ 23. ค่าความต้านทานปรากฏเทียบกับระยะ $a$ ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก (20 x 38 x 22 เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร	45
รูปที่ 24. ค่าความต้านทานปรากฏสะสม (cumulative apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth; $Z$ ) ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก (20 x 38 x 22 เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร	45
รูปที่ 25. ค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะ $a$ ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก (20 x 38 x 22 เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร	46
รูปที่ 26. ค่าความต้านทานปรากฏเทียบกับระยะ $a$ ที่ได้จากถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร	47
รูปที่ 27. การกระจายของค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth; $Z$ ) ที่ได้จากถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร	48
รูปที่ 28. ค่าความต้านทานปรากฏสะสม (cumulative apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth; $Z$ ) ที่ได้จากถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร	48
รูปที่ 29. ค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะ $a$ ที่ได้จากถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร	49
รูปที่ 30. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ KYORITSU ที่ใช้ในการทดลอง	57
รูปที่ 31. ตัวอย่างการจัดวางขั้วไฟฟ้าบนถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร	57
รูปที่ 32. ตัวอย่างการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองบนถาดโคลนขนาด $\emptyset$ 60 x 86 เซนติเมตร	58



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 33. ตัวอย่างหมุดทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าในการทดลองบนภาคโคลน	58
รูปที่ 34. วางไม้บรรทัดหนาบังค้บระยะหมุดขั้วไฟฟ้า (หมุดทองแดง) ในการทดลองบนภาคโคลนขนาด $\varnothing 60 \times 86$ เซนติเมตร ที่มีชั้นดินด้านบนลึก 10 เซนติเมตร	59
รูปที่ 35. การเจาะรูบังค้บระยะหมุดทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าบนไม้บรรทัด	59

# DEVELOPMENT OF GEOPHYSICAL INSTRUMENT FOR GROUNDWATER INVESTIGATION BY RESISTIVITY MEASUREMENTS

Boonchu Leelakajohnjit, Desell Suanburi, Songkiat Roddeang,  
Saichon Satiendee, Boonturun Mongcontalang, Suphat Noulgod,  
Napaporn Klaijeam, Napatsawan Uthaiteranan, Onnatcha Uthaiteranan,  
Sawaeng Gerdpratoom and Sriwichai Susuk

## ABSTRACT

As a fertile land and prosperous stream country, Thailand has plenty of natural resources, however, many underground resources are still unexplored due to lack of exploring personal, expensive tools, and budget constraints. Geophysical instruments, therefore, have been invented to evaluate the physical characteristics of underground soil and rock bed. The most popular one in these geophysical instruments is resistivity based measurement type. The aim of this study was to develop reasonable price resistivity instrument for exploring underground water reservoir in order to make use of pure water in daily life and activities, also in agricultural and industrial sectors. Resistivity instrument innovated in this project was compatible with 12-volt battery, and designed to meet the best practice of geophysical instrumentation.

# การพัฒนาเครื่องมือธรณีฟิสิกส์เพื่อสำรวจแหล่งน้ำบาดาล

## แบบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

บุญชู ลีลาขจรจิต<sup>1</sup>, ดีเซลล์ สวนบุรี<sup>2</sup>, ทรงเกียรติ รอดแดง<sup>1</sup>, สายชล เสถียรดี<sup>1</sup>,  
บุญเตือน มงคลถาวร<sup>1</sup>, สุพัฒน์ นวลโกฏ<sup>1</sup>, นภาพร คล้ายเจียม<sup>1</sup>, นภัทรรณ อุทัยธีรนนท์<sup>1</sup>,  
อรณัชชาย์ อุทัยธีรนนท์<sup>1</sup>, แสงว เกิดประทุม<sup>1</sup> และศรีวิชัย สุ่มสุข<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีความอุดมสมบูรณ์ทางธรรมชาติมาก จนมีคำกล่าวว่า “มีทรัพย์ในดิน มีสินในน้ำ” เพราะบนผืนดินเราสามารถเพาะปลูกได้ในแทบทุกพื้นที่ของประเทศ. อย่างไรก็ตาม เรายังมีทรัพยากรใต้ดินอีกเป็นจำนวนมากไม่น้อย ที่รอการสำรวจเพื่อที่จะสามารถนำขึ้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์ อุปกรณ์เพื่อการสำรวจทรัพยากรที่อยู่ใต้ดินจะเรียกว่า เครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์ เพราะมักจะถูกประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการประเมินหรือจำลองลักษณะทางกายภาพของชั้นดินหรือชั้นหินของพื้นที่ที่จะทำการศึกษาอยู่เป็นสำคัญ เครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในการสำรวจทรัพยากรใต้ดินตามวิธีการทางวิทยาศาสตร์ ปัจจุบันเครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ การวัดค่าทางไฟฟ้า โดยกว่า 80% ของเครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์ที่ใช้กันอยู่จะเป็นอุปกรณ์ประเภท “เครื่องวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)” โครงการนี้ได้มุ่งที่จะศึกษาพัฒนาเครื่องมือธรณีฟิสิกส์แบบวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าขึ้นเพื่อใช้ในการสำรวจสภาพของชั้นดินต่างๆ ได้ผืนพิภพของพื้นที่สำรวจ เพื่อใช้ประเมินศักยภาพในการเป็นแหล่งทรัพยากรต่างๆ ซึ่งในการศึกษานี้จะเป็นการหาแหล่งทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตและใช้ในกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่แห้งแล้งหรือขาดแคลนน้ำจืด เครื่องวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์ เป็นแหล่งกำลังในการทำงาน เครื่องวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้านี้ได้ออกแบบโดยยึดแนวทางการเป็นเครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์ที่ดีเป็นหลักด้วย.

<sup>1</sup>ฝ่ายวิศวกรรม, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

<sup>2</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>3</sup>ฝ่ายบริการกลาง, (วว.)

# 1. บทนำ

## 1.1 ความเป็นมา

การพัฒนาเครื่องมือทางธรณีฟิสิกส์เพื่อหาศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลนี้ มีวัตถุประสงค์หลักอยู่หลายประการด้วยกัน คือ เพื่อศึกษาการประดิษฐ์เครื่องมือวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่สามารถสำรวจแหล่งน้ำบาดาลได้ระดับลึกกว่า 200 เมตร เพื่อพัฒนาเทคนิค และอุปกรณ์ประกอบของการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพการวัดค่า สำหรับงานที่มีระดับลึก มีความละเอียดของข้อมูล และมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่จะทำการศึกษาวิจัย และเพื่อการถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการ หรือสร้างเครื่องจำหน่ายในราคาเหมาะสม เพื่อให้หน่วยงานราชการ และเอกชนสามารถนำไปใช้งานได้ ตลอดจนการจัดทำเอกสารเผยแพร่, ประชาสัมพันธ์ และจัดอบรมให้กับผู้สนใจ.

ทรัพยากรน้ำมีความสำคัญในการดำรงชีพของมนุษย์ จากการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้เกิดปัญหาจากการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างไม่สมดุล การจัดการน้ำในประเทศไทยยังคงต้องการที่จะต้องพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ และเกิดสมดุลกับระบบในธรรมชาติ ปัญหาภัยแล้งของประเทศไทยพบว่า เกิดขึ้นเกือบทุกปี ความแห้งแล้งขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรง พบว่า เกิดขึ้นในบางพื้นที่เป็นประจำ การแก้ปัญหาภัยแล้งอย่างหนึ่ง คือ การพัฒนาทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อนำมาใช้อุปโภค บริโภค แล้วยังสามารถ นำมาใช้ในด้านการเกษตรหรืออุตสาหกรรม ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่สูงนั้น น่าจะมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศในองค์รวม.

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือธรณีฟิสิกส์เพื่อสำรวจแหล่งน้ำบาดาล ก่อนที่จะทำการเจาะเพื่อนำน้ำบาดาลมาใช้ วิธีที่สามารถใช้ได้ผลดี คือ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า เครื่องมือที่ใช้ส่วนใหญ่ซื้อจากต่างประเทศและมีราคาแพงบางครั้งมีปัญหาเกี่ยวกับสภาพพื้นที่ในประเทศไทยที่มีความชันสูง เช่น บริเวณภาคใต้ ทำให้เป็นข้อจำกัดในการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาล ดังนั้น แนวทางสำหรับการประดิษฐ์เครื่องมือสำรวจโดยนําระบบส่งกระแสไฟฟ้าแรงสูง (ถึง 700 โวลต์ กระแส 3 แอมแปร์) จากวงจรไฟฟ้าที่มีการปรับปรุงรุ่นใหม่ ระบบการวัดค่าที่เป็นดิจิทัลอย่างละเอียด มีระบบการเก็บข้อมูลและการประมวลผลในตัว จึงน่าจะเป็นประโยชน์กับการนำมาใช้ในการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาล.

แหล่งน้ำบาดาลในประเทศไทยถูกจัดแบ่งออกเป็นหลายประเภท มีทั้งเป็นชั้นน้ำบาดาลในหิน ร่วนและชั้นน้ำบาดาลในรอยแตกของหินแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของหินหรือลักษณะธรณีวิทยา

บริเวณนั้นๆ แต่ละประเภทและพื้นที่ก็มีศักยภาพและคุณภาพของน้ำบาดาลที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคและวิธีการในการวัดค่าเพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูง.

การทดลองศึกษาเทคนิควิธีการต่างๆ ด้านการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ ซึ่งเป็นการนำเอาเครื่องมือที่ได้ทำการพัฒนา รวมทั้งเทคนิควิธีการเก็บข้อมูล โปรแกรมในการประมวลผลและแปลความหมายข้อมูลที่ทันสมัย จึงสามารถทำให้การศึกษาเพื่อหาลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดินโดยเฉพาะบริเวณที่น่าจะเป็นแหล่งน้ำบาดาล มีความน่าเชื่อถือถูกต้องมากขึ้น การทดลองเทคนิคใหม่ๆ น่าจะเป็นเรื่องที่ควรให้ความสนใจในด้านวิชาการ ผลของการสำรวจที่แสดงถึงการตอบสนองต่อสัญญาณนอกจากจะเป็นข้อมูลทางด้านวิชาการแล้ว ยังสามารถนำวิธีการที่เราได้ศึกษาไว้ไปประยุกต์กับกรณีศึกษาของแหล่งน้ำบาดาลอื่นๆ ที่มีความจำเป็นหรือแก้ปัญหาภัยแล้งได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ ดังนั้น ในการศึกษาและวิจัยประดิษฐ์เครื่องมือธรณีฟิสิกส์ด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ และประยุกต์กับแหล่งน้ำบาดาล จึงน่าจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาประเทศชาติได้ในอนาคต.

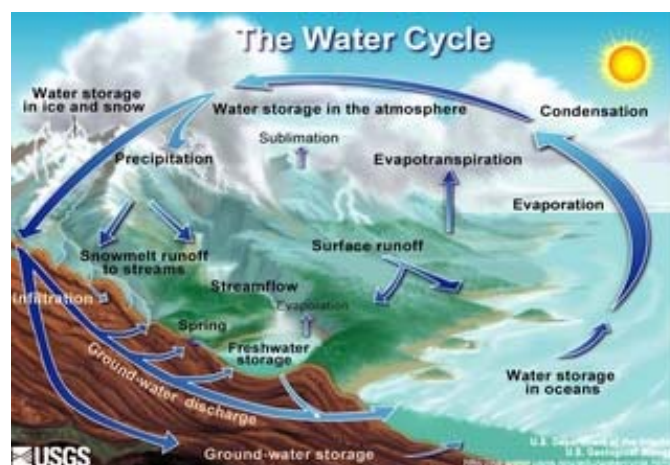
## 1.2 ทฤษฎี

การศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาวิทยาใต้ผิวดิน เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาแหล่งบ่อบาดาลด้วยเทคโนโลยีทางธรณีฟิสิกส์ โดยมีทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

อุทกธรณีวิทยาน้ำใต้ดิน.

วัฏจักรของน้ำ.

วัฏจักรของน้ำเป็นกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่เกิดหมุนเวียนต่อเนื่องกันอย่างเป็นระบบและสมดุล ตั้งแต่ น้ำฟ้า (ฝน) เติมน้ำในระบบน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน แล้วระเหยกลับสู่บรรยากาศ.



ที่มา: USGS

รูปที่ 1. วัฏจักรของน้ำ.

## แหล่งน้ำใต้ดิน

แหล่งน้ำใต้ดินขึ้นอยู่กับลักษณะทางอุทกธรณีและโครงสร้างทางธรณีวิทยาแบ่งได้เป็น (เพียร์-เจอร์ญี 2540).

1. แหล่งน้ำใต้ดินในหินร่วน น้ำใต้ดินที่กักเก็บอยู่ในหินร่วนทั้งหมด โดยแตกต่างกันทั้งปริมาณ และคุณภาพ ขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอน, ลักษณะการเกิด และลักษณะโครงสร้าง ของพื้นที่ลุ่มแอ่ง การสะสมตะกอน เช่น แหล่งน้ำใต้ดินตะกอนน้ำพา (Alluvial Deposits) กรวดทรายของตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน มีความหนาไม่มาก เป็นทางน้ำขนาดเล็ก และมีความยาวสั้นๆ ความหนาเฉลี่ย 5-20 เมตร อยู่บริเวณสองข้างฝั่งแม่น้ำหรือทางน้ำเท่านั้น มีศักยภาพน้ำใต้ดินอยู่ในเกณฑ์ 2-5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง, คุณภาพน้ำจืด แหล่งน้ำใต้ดินกรวดทราย (Gravel Sand Deposits) ประกอบด้วย ทรายหยาบ, กรวด, ทรายละเอียดและดินเหนียว และตะกอนชุดนี้มักจะสะสมตัวไม่เป็นระเบียบ (poorly sorted) จึงไม่ค่อยมีช่องว่างให้น้ำกักเก็บได้มากนัก ปริมาณน้ำที่ได้เฉลี่ย 2-5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง.

2. แหล่งน้ำใต้ดินในหินแข็ง สะสมในรอยแตกของหินแข็งที่เป็นหินดานของพื้นที่ (bedrock) ถ้าเป็นหินแกรนิต กักเก็บน้ำใต้ดินต่ำ ปริมาณน้ำอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ย 1-5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง หรือถ้าเป็นหินปูน อาจได้น้ำมากกว่าถึง 10 - 15 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง เป็นต้น.

## การไหลของน้ำใต้ดิน

น้ำฝนเมื่อซึมลงไปอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำแล้ว มีการเคลื่อนที่ไหลไปตามช่องว่างที่มีอยู่ การเคลื่อนที่หรือการไหลของน้ำใต้ดินขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ความดันและความซึมได้ของน้ำของชั้นหินอุ้มน้ำนั้นๆ ความเร็วของการไหลขึ้นอยู่กับสภาพซึมผ่านได้ของน้ำและความลาดชันของระดับน้ำบาดาล ตาม Darcy's Law สมการ (1) และ (2) (ระมิงค์วงศ์ 2546).

$$Q = Av$$

----- (1)

$$v = ki$$

----- (2)

โดย  $Q$  = ปริมาณน้ำไหล (ลูกบาศก์เมตร/วัน)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน (ตารางเมตร)  
 $k$  = ค่าคงที่ (มิลลิเมตร/วัน)  
 $i$  = ความลาดชัน ( $h_1 - h_2$ )  
 $v$  = ความเร็วการไหลของน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตร/วัน)

### สภาพซึมผ่านได้ของน้ำ (permeability)

ขึ้นอยู่กับช่องว่างในเนื้อหินหรือเม็ดทรายหรือมีความพรุนแสดงความสามารถเก็บกักน้ำไว้ เป็นความสามารถของหินในการปล่อยให้น้ำไหลซึมผ่าน ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นหน่วยความเร็ว เช่น เซนติเมตร/วินาที.

### ระบบสมดุลของน้ำ

การวิเคราะห์ระบบสมดุลของน้ำในระบบของพื้นที่ลุ่มแอ่ง ต้องใช้ข้อมูล ดังนี้

1. ปริมาณน้ำฝน ( $Q_P$ )
2. ปริมาณน้ำท่า ( $Q_R$ )
3. ปริมาณการคายระเหย ( $Q_E$ )
4. ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน
5. ปริมาณการใช้น้ำบาดาล
6. ปริมาณการซึมลงสู่ชั้นน้ำหรือปริมาณการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาล ( $Q_{GWR}$ )

$$Q_P = Q_R + Q_E + Q_W + Q_{GWR} \dots\dots\dots (3)$$

### เทคโนโลยีทางธรณีฟิสิกส์ด้านค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่จะประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

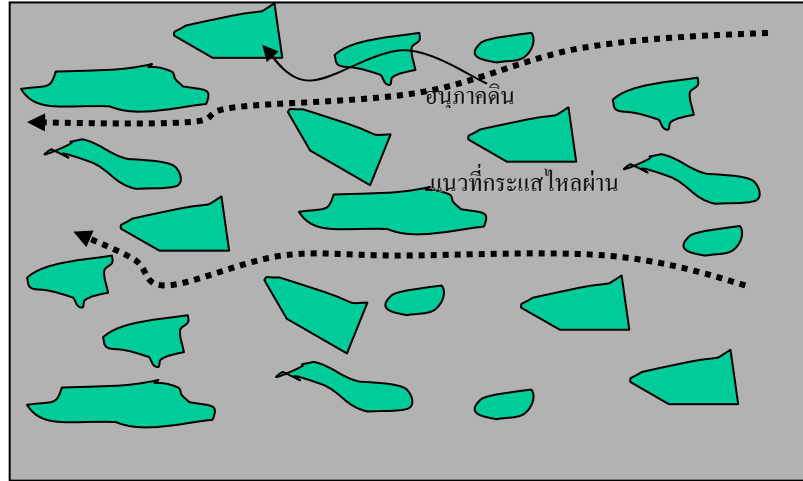
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ชั้นดิน ชั้นหิน และน้ำ การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นการวัดไอออนของเกลือที่อยู่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งอาจแทรกอยู่ในช่องว่างของดิน หรือตามรอยแตกของหิน ดังแสดงในรูปที่ 2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ความพรุน (Porosity) และสภาพการยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (Permeability) ตามกฎของอาร์คี (Archie's law) (Telford and *et al.* 1990) แสดงตามสมการ (9) ช่วงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ชั้นดิน/น้ำ/หิน ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.

$$\rho = a \phi^{-b} f^{-c} \rho_w \dots\dots\dots (9)$$

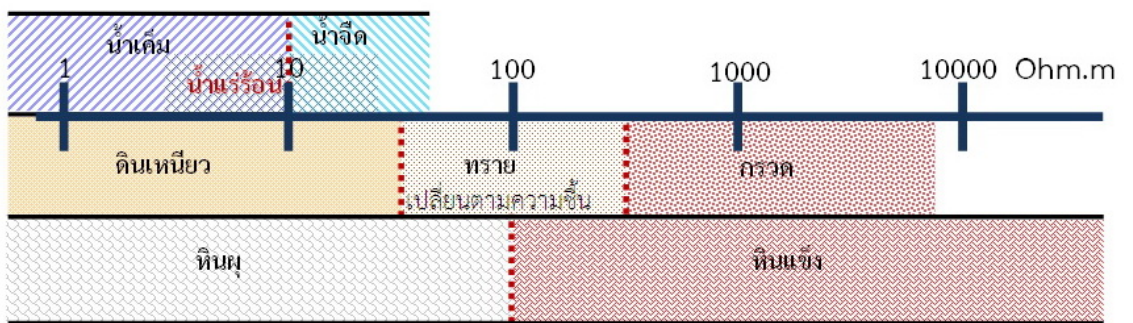
โดยที่  $\phi$  เป็นความพรุน (Porosity)  
 $f$  เป็นสัดส่วนของช่องว่างในหินที่น้ำแทรกอยู่

$\rho_w$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำ  
(ขึ้นอยู่กับปริมาณและความนำไฟฟ้าของสารละลายในน้ำ)

a, b และ c เป็นค่าคงที่



รูปที่ 2. การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นดิน.



ดัดแปลงจาก (Telford et al. 1990)

รูปที่ 3. ช่วงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน, ตะกอน, น้ำ และหิน.

### 1.3 การสำรวจน้ำบาดาล (Groundwater exploration)

พรหมมา (2555) ได้ทำการศึกษารวบรวมวิธีการสำรวจน้ำบาดาลแล้วทำการเรียบเรียงไว้ดังนี้

น้ำบาดาลซ่อนอยู่ในดิน เราอาศัยอยู่บนดินย่อมมองไม่เห็น ทำอย่างไรจึงจะค้นหาแหล่งน้ำบาดาลที่ซ่อนอยู่ การสำรวจไม่ใช่เจาะเรื่อยไป พบว่า น้ำบาดาลก็ใส่ท่อทำบ่อ แต่เป็นการใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ หรือสถิติที่มาใช้คาดคะเนก่อนลงมือเจาะลงไปใต้ดิน การสำรวจในปัจจุบันไม่ใช่วิธี



ทางไสยศาสตร์แล้ว เช่น ไม่ใช้สามง่ามเดินหา ไม่นั่งทางใน แต่ใช้ไฟฟ้าบ้าง คลื่นไหวสะเทือนบ้างส่งลงไปใต้ดิน โดยมีจุดประสงค์ชัดเจน ไฟฟ้าใช้ตรวจสอบน้ำ แต่คลื่นไหวสะเทือนบ้างส่งลงไปใต้ดิน โดยมีจุดประสงค์ตรวจสอบชั้นตะกอน หรือชั้นหินเหมือนกับใช้อัลตราซาวด์ ตรวจสอบทารกในท้องแม่ ก็ให้เห็นท้องภาพจำลองใต้ดิน, แต่อย่างไรก็ตาม คลื่นหรือไฟฟ้าที่ส่งลงไป ก็มีข้อจำกัด คือตรวจสอบลงไปได้ไม่ลึก เช่น ไม่เกิน 100 เมตร การสำรวจแหล่งน้ำบาดาลที่อยู่ลึก จึงใช้หลักการสังเกตการสูญเสียน้ำโคลน ควบคู่ไปกับการสังเกตตะกอนที่เก็บขึ้นมาได้, ดังนั้น ถึงแม้ว่าน้ำบาดาลจะซ่อนอยู่ใต้ดิน แต่มนุษย์ก็มีวิธีค้นหาจนพบ และนำมาใช้ประโยชน์จนได้.

### **ขั้นตอนการสำรวจน้ำบาดาล**

ภาษาอังกฤษของคำว่า การสำรวจมีทั้ง exploration, prospection, hunt search และ survey ล้วนแต่มีความหมายเดียวกัน คือ มุ่งหาตำแหน่งที่ตั้งของน้ำบาดาลว่ามีพิกัดอยู่ที่ใด และที่ความลึกเท่าใด ศัพท์ที่ได้รับความนิยม คือ groundwater exploration.

การสำรวจน้ำบาดาลมีทั้งวิธีทางไสยศาสตร์ และวิธีทางวิทยาศาสตร์ ในปัจจุบันนี้วิทยาศาสตร์ พัฒนาไปไกล และเป็นที่ยอมรับกันมากขึ้น วิธีทางไสยศาสตร์จึงลดความน่าเชื่อถือลงไป การสำรวจน้ำบาดาลโดยใช้วิธีทางวิทยาศาสตร์ มี 4 ขั้นตอนมี ดังนี้

1. การวางแผน (planning) คือ การวางแผนล่วงหน้าเกี่ยวกับกิจกรรมที่จะทำตั้งแต่เริ่มแรกจนสำเร็จ การกำหนดภาระงานของคน, งาน และเงิน.
2. การเก็บข้อมูล (data acquisition) คือ การวางอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ อย่างเป็นระบบในภาคสนาม เพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีที่กำหนดไว้ จากนั้น ตรวจวัดค่าที่ได้ และบันทึกผล.
3. การประมวลผลข้อมูล (data processing) คือ การนำข้อมูลมาวิเคราะห์ตามหลักการวิชาการ เช่น วาดแผนภูมิ, เพิ่มสัญญาณ และตัดคลื่นรบกวนสัญญาณ.
4. การแปลความหมายข้อมูล (data interpretation) คือ การแปลความหมายสิ่งที่ประมวลผลได้ เช่น คำนวณชั้นดิน, ตะกอน หรือหิน มีจำนวนกี่ชั้น แต่ละชั้นมีความหนาเท่าไร และมีสมบัติทางกายภาพที่วัดได้เท่าใด.

### **การสำรวจน้ำบาดาลด้วยวิธีทางไสยศาสตร์**

วิธีทางไสยศาสตร์ที่ใช้ในการสำรวจน้ำบาดาลล้วนแต่ขาดความน่าเชื่อถือ คนส่วนมากเข้าใจแล้วว่า วิธีทางไสยศาสตร์ขาดหลักการทางวิทยาศาสตร์ นั่นคือ อธิบายเหตุผลไม่ได้ว่า การสำรวจน้ำบาดาลโดยวิธีเหล่านี้ใช้หลักอะไรที่พิสูจน์ได้ด้วยประสาทสัมผัสทั้งห้า. แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีคนส่วน

น้อยทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศเชื่อว่า วิธีทางไสยศาสตร์ ยังได้ผลคืออยู่ แสดงว่าคนส่วนน้อยที่เชื่อนั้นไม่ได้เป็นนักวิทยาศาสตร์.

วิธีทางไสยศาสตร์ที่จะอธิบายต่อไปนี้ ไม่ถูกนำมาใช้สำรวจน้ำบาดาลแล้ว มี 2 ชนิด ดังนี้

1. ใช้คนวิเศษ คือ ผู้ที่มีพลังจิตในการมองเห็นได้ยืนได้ดิน คนเช่นนี้ไม่มีอยู่จริง การสำรวจน้ำบาดาลวิธีใช้การเข้าทรง, การนั่งทางใน หรือการเดาสุ่มอย่างอื่น ล้วนแล้วแต่ไม่มีหลักการทางวิทยาศาสตร์ เช่น เมื่อเข้าทรงแล้วก็เดินไปชี้จุดที่มีน้ำบาดาล.

2. ใช้เครื่องมือวิเศษ วิธีที่พบบ่อยครั้ง คือ เคาซิ่ง (dowsing) เป็นวิธีทางไสยศาสตร์ในการสำรวจน้ำบาดาลโดยใช้ไม้วิเศษ ไม้อาจมีรูปร่างคล้ายตัวอักษร L หรือไม้สามง่ามรูปตัวอักษร Y เรียกไม้นี้ว่า ไม้เคาซิ่ง dowsing rod บางครั้งใช้โลหะแทนไม้ เช่น ใช้เสาอากาศที่หัดเก็บได้หรือแท่งเหล็กขนาดเล็ก เป็นต้น ผู้ที่ทำการสำรวจเรียกว่า นักสำรวจเคาซิ่ง มีวิธีสำรวจ ดังนี้

ก. ไม้ตัววาย นักสำรวจเคาซิ่งจะถือไม้ที่มีรูปร่างคล้ายตัวอักษร Y โดยที่ฐานของ Y จะเรียกว่า ต้นส่วนยอดทั้งสองที่แตกแขนงของ Y จะเรียกว่า กิ่งไม้ทำมาจากการหักกิ่งไม้ในพื้นที่ศึกษารูดไปไม้ออกจนเหลือแต่กิ่งก้าน นักสำรวจเคาซิ่งใช้มือทั้งสองจับกิ่ง แล้วให้ต้นชี้ไปข้างหน้า จากนั้นจะเดินไปข้างหน้าช้าๆ อย่างมีสมาธิ การสำรวจจะหยุดเมื่อต้นชี้ต่ำลง, เอียงลง, กระตุก หรือสั่น แสดงว่าที่นั่นน้ำบาดาลอยู่ใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.

ข. ไม้ตัวแอล นักสำรวจเคาซิ่งจะถือไม้ หรือแท่งโลหะที่มีรูปร่างคล้ายตัวอักษร L จำนวน 1 หรือ 2 อัน นักสำรวจเคาซิ่งถือด้านสั้นของโลหะรูปตัว L ปล่อยให้ปลายด้านยาวของโลหะรูปตัว L ชี้ไปข้างหน้า แล้วเดินไปข้างหน้าช้าๆ อย่างมีสมาธิ เมื่อไม้วิเศษอันนี้แกว่ง หรือชี้ต่ำลง เอียงลง กระตุก หรือสั่น แสดงว่า ที่นั่นน้ำบาดาลอยู่ใต้ดิน ในกรณีใช้โลหะรูป L 2 อัน การค้นพบเกิดขึ้นเมื่อปลายด้านยาวของโลหะรูปตัว L ทั้ง 2 อัน ไขว้เข้าหากันจนเป็นจุดตัดกากบาท ดังแสดงในรูปที่ 4.



รูปที่ 4. เครื่องมือเดาซิ่ง (ก), ไม้เดาซิ่งรูปตัว Y (ข), ไม้เดาซิ่งรูปตัว L (ค-ง)  
และนักสำรวจเดาซิ่งในขณะปฏิบัติงาน.

ชื่อพ้องของเดาซิ่ง ได้แก่ diving, doodlebugging, water finding หรือ water witching นอกจากนี้ วิธีเดาซิ่งยังใช้สำรวจหาแหล่งแร่, อัญมณี, หลุมฝังศพ, ท่อโลหะใต้ดิน, ปิโตรเลียม, อาวุธ, ยาเสพติด หรือคนกระทำความผิดกฎหมาย เดาซิ่ง กำเนิดขึ้นมาประมาณ พ.ศ 2061 ในประเทศเยอรมนี คนยุโรปใช้กันมาก และใช้กันมาอย่างต่อเนื่อง จนฝังลึกลงไป ในความคิดความเชื่อของคนจำนวนมาก เมื่อเปิดดูส่วนประกอบภายในของไม้เดาซิ่ง พบว่า ไม่มี หลักการทำงานแต่อย่างใดทุกอย่าง เกิดขึ้นจากความเชื่อส่วนบุคคล บางครั้งก็พบบ้านบาดาล ด้วย ความบังเอิญ แต่ส่วนมากไม่พบมีการทดสอบความน่าเชื่อถือโดยใช้สถิติวิเคราะห์มาเป็นจำนวนมาก ตั้งแต่วิทยาศาสตร์พัฒนาขึ้นมาไม่น้อยกว่า 400 ปี ทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ ต่างก็ พบว่า เดาซิ่งเป็นวิธีที่ไม่น่าเชื่อถือโดยสิ้นเชิง แม้ว่าความเชื่อนี้ลดน้อยลงแต่ไม่สูญหายไปจากสังคม นักอุทกธรณีวิทยา ในปัจจุบันไม่เชื่อ และไม่ใช้วิธีนี้แล้ว.

#### การสำรวจน้ำบาดาลด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์

##### สถิติและความเป็นไปได้

สถิติและความเป็นไปได้ เป็นหลักวิทยาศาสตร์ที่นิยมใช้ในแนวราบ หมายความว่า บริเวณใด ควรมึน้ำบาดาล การสำรวจน้ำบาดาลหรือการกำหนดจุดเจาะบ่อดองสำรวจพื้นที่โดยรอบให้ทั่ว เสียก่อน โดยสอบถามประชาชนในพื้นที่ และเดินการสำรวจเพื่อศึกษาดูว่าบริเวณใดมีบ่อน้ำแล้ว แต่ ละบ่อก็มีความลึกเท่าใด และอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการก่อสร้างบ่อเป็นระยะทางเท่าใด จากนั้น ใช้หลัก สถิติและความเป็นไปได้ที่ใช้ได้ผลดี ดังนี้

1. ถ้าในพื้นที่ใกล้เคียงกันยังไม่มีบ่อน้ำ ประชาชนแจ้งว่า เคยมีการเจาะมาก่อนในระดับความ ลึกที่ต้องการ แต่ไม่พบน้ำบาดาล มีความเป็นไปได้น้อยที่จะพบน้ำบาดาล.

2. ถ้าในพื้นที่ใกล้เคียงมีบ่อน้ำ แต่ตั้งอยู่ห่างไกลเกินกว่า 1 กิโลเมตร มีความเป็นไปได้น้อยที่จะพบน้ำบาดาล ต้องทดลองเจาะลงไปใต้ดิน.

3. ถ้าในพื้นที่ใกล้เคียงมีบ่อน้ำ และตั้งอยู่ห่างไกลไม่เกิน 100 เมตร มีความเป็นไปได้สูงที่จะพบน้ำบาดาล.

เกณฑ์ดังกล่าวข้างต้นอาจดูง่าย แต่ตั้งอยู่บนพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ กล่าวคือ นักอุทกธรณีวิทยา วิเคราะห์ความเป็นไปได้จากลักษณะทางการสะสมตะกอน หรือธรณีโครงสร้างของหิน ดังนี้

1. ตะกอนน้ำพา มีโอกาสต่อเนื่องในระยะใกล้ไม่เกิน 100 เมตร เนื่องจากตะกอนกรวดทรายที่ทับถมจากสันดอนทรายในอดีตมีโอกาสต่อเนื่องสูงในระยะทางนี้ แต่ถ้า 1 กิโลเมตร อาจไม่ต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม มีบ่อยครั้งที่ พบว่า การเจาะบ่อในตะกอนน้ำพาห่างออกไปจากบ่อ เดิมไม่ถึง 10 เมตร ก็ไม่พบน้ำ เนื่องจากใต้ดินมีสลับซับซ้อนของการสะสมตะกอน.

2. ชั้นหินทราย อาจยาวต่อเนื่องได้หลายกิโลเมตร กรณีที่ยาวต่อเนื่อง น้ำบาดาลพบได้ตลอดชั้นที่ความลึกแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการเอียงตัวของชั้นหิน ต้องพิจารณาเป็นไปตามกรณี.

3. ชั้นหินปูน มีรูปร่างการกระจายตัวไม่แน่นอน ส่วนใหญ่เกาะกลุ่ม สิ่งที่ช่างเจาะเสาะหา คือ โพรง โพรงเหล่านี้ทำนายได้ยากกว่ามีความต่อเนื่องไปในทิศทางใด ช่างเจาะส่วนใหญ่จึงเดาสุ่ม เมื่อเจาะพบแล้วจึงทดสอบว่า ชั้นน้ำให้น้ำได้มากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้รับการประกันว่า บ่อที่อยู่ถัดไป 20 เมตร ที่ความลึกเท่ากันจะพบกับน้ำบาดาลหรือไม่.

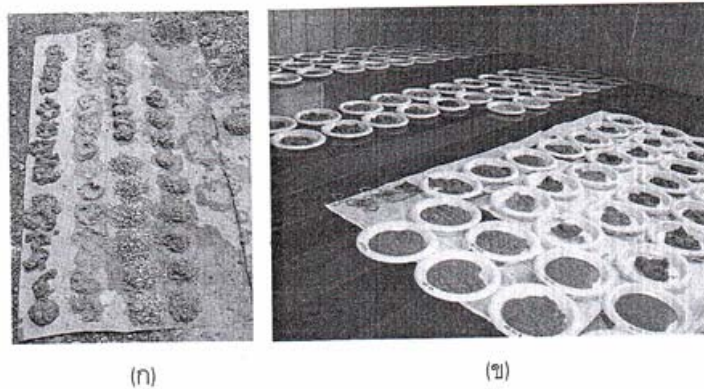
4. หินที่มีรอยแตก ถ้ารอยแตกมีทิศทางแน่นอนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โอกาสจะพบน้ำบาดาลในทิศทางดังกล่าวก็มีสูง แต่ถ้ารอยแตกมีทิศทางไม่แน่นอน จะเดายากกว่าพบน้ำบาดาลที่ใด.

### การเจาะสำรวจ

การเจาะ (drilling) เป็นหลักวิทยาศาสตร์ ที่นิยมใช้ในการสำรวจแนวตั้ง เพื่อศึกษาว่าที่ความลึกเท่าใด จะมีน้ำบาดาลกักขังอยู่ การเจาะสำรวจเป็นมาตรฐานอย่างหนึ่งในการศึกษาสภาพทางอุทกธรณีวิทยาใต้ผิวดิน. ในปัจจุบันนี้นิยมติดตั้งเครื่องเจาะไว้ตอนท้ายรถบรรทุก เจาะรูลงไปในดิน เรียกรูนี้ว่า หลุมเจาะ drilled hole, borehole การเจาะสำรวจเพื่อนำข้อมูลธรณีวิทยามาวิเคราะห์การลำดับชั้นหิน และธรณีวิทยาโครงสร้างเรียกว่า การศึกษาลักษณะพื้นที่ site characterization, site investigation นิยมดำเนินการสำรวจเพื่อแก้ไขปัญหามลพิษในน้ำบาดาล เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูง และข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ได้เฉพาะในหลุมเจาะเท่านั้น ทำให้ผู้ว่าจ้างและช่างเจาะต้องคิดให้รอบคอบก่อนเจาะสำรวจ, ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเจาะหวังผล เพื่อได้น้ำบาดาลในคราวเดียวกัน ไม่สำรวจเฉยๆ หรือเปลี่ยนหลุมเจาะไปเรื่อยๆ.

1. ความแข็งของตะกอนหรือหิน ช่างเจาะจะฝ้าสังเกตความแข็ง หรืออ่อนของหินจากความยากง่ายของการเจาะ การเจาะผ่านตะกอนแข็ง หรือหินแข็งทำได้ยาก ช่างเจาะเรียกตะกอนเหล่านี้ว่า ดาน (pan) ดานส่วนมากไม่มีน้ำบาดาล แต่น้ำบาดาลอยู่ในกรวดทรายหยาบที่ร่วนซึ่งเจาะผ่านง่าย.

2. ขี้เจาะ (cuttings) คือ เศษตะกอน หรือเศษหินที่เจาะขึ้นมาจากใต้ดิน ถ้าเป็นตะกอนจะร่วน เช่น ทราย ทำให้ตอกเก็บตัวอย่างขี้เจาะได้ง่าย เนื่องจากทรายจะร่วงลงน้ำโคลนไปเกือบหมด การตอกเก็บขี้เจาะใช้ได้ดีกับดินเหนียว สำหรับกรวดทรายต้องอาศัยเก็บขี้เจาะที่ไหลขึ้นมาที่น้ำโคลนที่ใช้ในการเจาะ อีกทั้งน้ำโคลนต้องข้นมากพอจึงจะนำกรวดทราย ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะสูง ขึ้นมาจากหลุมได้ ช่างเจาะจะวางขี้เจาะเป็นกองตามความลึกของหลุมเจาะอย่างเป็นระเบียบ โดยใช้หลักง่ายๆ จากจำนวนก้านเจาะ คือ เมื่อเพิ่มก้านเจาะซึ่งแปลว่า ความลึกของหลุมเจาะเพิ่มขึ้นช่างจะวางขี้เจาะกองใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 5.

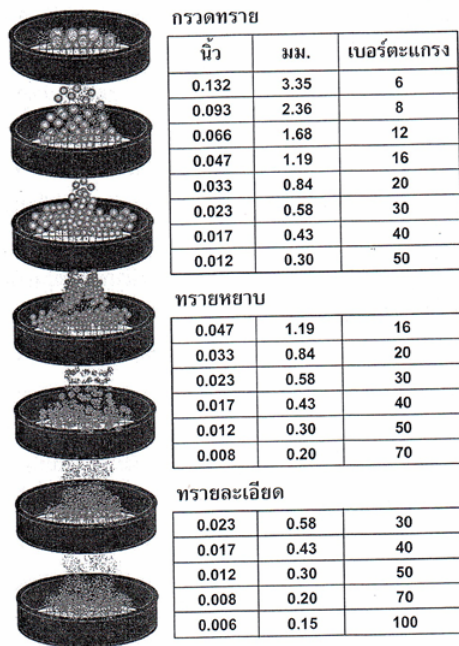


รูปที่ 5. ขี้เจาะ (ก) กองขี้เจาะของตะกอนในภาคสนาม (ข) การเก็บรักษาโดยตากลมในที่ร่มให้ขี้เจาะของตะกอนแห้ง.

การวิเคราะห์ขนาดขี้เจาะที่เป็นตะกอนทำได้ 2 วิธี ดังนี้

ก. ใช้เปรียบเทียบกับรูปวาดมาตรฐาน นำตะกอนมาวางเทียบกับรูปวาดสำเร็จของขนาดของตะกอนชนิดต่างๆ ใช้ได้ดีกับตะกอนขนาดเล็ก ได้แก่ ทราย และทรายแป้ง ช่างเจาะที่มีประสบการณ์สูงจะระบุขนาดตะกอนได้ดีด้วยตาเปล่า.

ข. ใช้การวิเคราะห์ ด้วยตะแกรงร่อน sieve analysis จากขั้นตอนมาตรฐานที่กำหนดโดย ASTM C136-06 (ออนไลน์: [www.Astm.org](http://www.Astm.org)) ให้นำตะกอนร่วนดีแล้วที่มีมวล 1 กิโลกรัม ใส่ลงในเครื่อง ซึ่งประกอบด้วยตะแกรงหลายขนาดวางซ้อนกันอยู่ โดยด้านบนที่ขนาดใหญ่แล้ว จึงเอ็กกลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้น เขย่าตะกอน ตะกอนขนาดเล็กจะตกลงสู่ชั้นล่าง ตามลำดับขนาดตะกอน การวิเคราะห์นี้ทำได้ยากในภาคสนาม เนื่องจากเครื่องมือต้องใช้ไฟฟ้า มีขนาดใหญ่และหนัก อีกทั้งขนย้ายลำบาก.



**รูปที่ 6. ขนาดของตะกอน ตะกอนมีขนาดใหญ่ไปถึงเล็ก ได้แก่ กรวด, ทราย, ทรายแป้ง และดินเหนียว.**

การตรวจวิเคราะห์ขนาดของตะกอนดำเนินการโดยใช้ตะแกรงร่อนที่มีขนาดของรูจากใหญ่ไปหาเล็กวางซ้อนกันในกรณีที่เป็นหินจากการเจาะกระแทกในหิน การพิจารณาชี้เจาะลำบากมากขึ้นเนื่องจากชี้เจาะของหินดูคล้ายคลึงกัน และอาจละเอียดจนเสียรูป ต้องวิเคราะห์ระดับความพรุนของหิน และใช้ประสบการณ์การเจาะของช่างช่วยวิเคราะห์ว่าใช่ ชั้นน้ำหรือไม่ ในกรณีที่เก็บหินออกมาเป็นแท่งเพื่อศึกษารายละเอียดของชั้นใต้ดินที่มีความลึกแน่นอน ช่างจะใช้การตัดเก็บหินเป็นแท่งๆ เรียกว่า แท่งหิน core เพื่อนำมาเรียงตามความลึก แล้ววิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง และการลำดับชั้นหินของชั้นน้ำ และชั้นทับน้ำ.

จากประสบการณ์ของผู้เขียน พบว่า ชี้เจาะของตะกอนที่เป็นชั้นน้ำ จะเป็นกรวดหรือทรายหยาบ มีการคัดขนาดดี ถ้าผิวเม็ดตะกอนมีสีเหลืองปนแดงของสนิมเคลือบอยู่ น้ำจะใสสะอาดดี เนื่องจากเป็นไปได้ว่า เหล็กฟอสเฟอรัสได้ตกผลึกออกไปจากน้ำ และเกาะที่ผิวเม็ดตะกอนมีสีเหลืองปนแดงของสนิมเคลือบอยู่ น้ำจะใสสะอาดดี เนื่องจากเป็นไปได้ว่า เหล็กฟอสเฟอรัสได้ตกผลึกออกไปจากน้ำ และเกาะที่ผิวเม็ดตะกอน แต่ถ้าผิวเม็ดตะกอนไม่มีสนิมเคลือบ ทรายดูสะอาด น้ำจะมีสนิมเหล็กมาก เนื่องจากเป็นไปได้ว่า เหล็กฟอสเฟอรัสละลายอยู่ในน้ำเป็นส่วนมาก.

3. การสูญเสียน้ำโคลน เมื่อการเจาะดำเนินไปจนถึงชั้นน้ำ ย่อมไม่มีใครมองเห็นใต้ดิน แต่ใช้วิธีสังเกตการไหลเวียนของน้ำโคลน กล่าวคือ ชั้นน้ำจะดูดเอาน้ำโคลนให้หายไปจากบ่อ ช่างเจาะจะรู้ได้ทันทีว่าถึงชั้นน้ำแล้ว ต้องแก้ไขปัญหาการสูญเสียน้ำโคลนด้วยการพอกดินที่ผนังบ่อ เช่น ใช้ดินเหนียวเบนทอไนต์, ใช้ปูนขาว, ใช้ดินเหนียวในท้องถิ่นผสมให้เป็นโคลน หรือใช้แกลบดำ เป็นต้น ยังคงปริศนาว่า เพราะเหตุใด ที่ชั้นน้ำที่อิ่มน้ำบาดาล จึงดึงดูดน้ำโคลนเข้าไปในชั้นน้ำ แทนที่จะปล่อยน้ำบาดาลออกมาจนล้นบ่อ ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรมีการวิจัยต่อไป.

### **การสำรวจธรณีฟิสิกส์**

การสำรวจธรณีฟิสิกส์ (geophysical exploration) คือ การใช้หลักฟิสิกส์ ในการสำรวจใต้ดินว่า บริเวณใดมีน้ำบาดาลกักขังอยู่ ใช้วิธีวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตะกอน หรือหินที่มีตามธรรมชาติ หรือส่งสัญญาณที่มนุษย์สร้างขึ้นลงไปได้ดินก็ได้ จากนั้น ตรวจวัดการตอบกลับอย่างเป็นระบบ แล้วนำข้อมูลมาแปลความหมายลักษณะของชั้นใต้ดิน.

การสำรวจธรณีฟิสิกส์มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี คือ ให้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้าง ทำให้รวดเร็ว คุ่มค่าใช้จ่าย จึงนิยมสำรวจก่อนเจาะหลุมลงไปได้ดิน จะช่วยลดจำนวนหลุมเจาะได้มาก.

ข้อเสีย คือ การแปลความหมายพื้นที่มีความไม่แน่นอน เนื่องจากต้นยืนยันการแปลผลด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ วิธียากเกินที่คนทั่วไปจะเข้าใจได้ง่ายๆ.

### **การจำแนกชนิดของการสำรวจธรณีฟิสิกส์มี ดังนี้**

#### **1. เกณฑ์สถานที่สำรวจ**

ก. การสำรวจบนพื้นดิน (surface geophysics) คือ วิธีการสำรวจที่ทำบนพื้นดิน โดยวางเครื่องมือบนพื้นดิน นิยมใช้วิธีการสำรวจน้ำบาดาลมากที่สุด.

ข. การหยั่งหลุมเจาะ (well logging) คือ วิธีการสำรวจที่ทำในหลุมเจาะ โดยหย่อนเครื่องมือบางส่วน หรือทั้งหมดลงไปได้ดิน แต่ผู้สำรวจอยู่บนดิน.

ค. การสำรวจจากอากาศ (airborne geophysics) คือ วิธีสำรวจที่ใช้เครื่องบินติดตั้ง เครื่องมือไม่นิยมใช้วิธีการนี้สำรวจน้ำบาดาลบนบก.

ง. การสำรวจจากเรือ (marine geophysics) คือ วิธีสำรวจที่ใช้เรือติดตั้งเครื่องมือ ไม่ใช้สำรวจน้ำบาดาลบนบก แต่นิยมใช้สำรวจปิโตรเลียมในทะเล.

## 2. เกณฑ์สมบัติทางฟิสิกส์

ก. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity exploration) ใช้วิธีปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน แล้วตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า นำค่ามาคำนวณความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด มีรายละเอียดอธิบายไว้ในบทนี้.

ข. การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนหักเห (seismic refraction exploration) ใช้วิธีส่งคลื่นไหวสะเทือนลงไปใต้ดิน รอให้คลื่นหักเหกลับมายังเครื่องรับ แล้วแปลความหมายสัญญาณเป็นลักษณะของชั้นใต้ดิน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากเป็นอันดับที่ 2.

ค. การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนสะท้อน (seismic reflection exploration) ใช้วิธีส่งคลื่นไหวสะเทือนลงไปใต้ดิน รอให้คลื่นหักเหกลับมายังเครื่องรับ แล้วแปลความหมายสัญญาณเป็นลักษณะของชั้นใต้ดิน นิยมใช้ในการสำรวจปิโตรเลียมมากกว่าการสำรวจน้ำบาดาล.

ง. การสำรวจศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติ (natural electrical potential exploration) เป็นการตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากพื้นผิวเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างแร่ และสารละลาย นิยมใช้ในการสำรวจพลังงานความร้อนใต้พิภพหรือวิศวกรรม เช่น ตำแหน่งของแหล่งน้ำร้อน และการตรวจสอบการรั่วซึมในเขื่อน หรืออ่างเก็บน้ำ มีข้อดี คือ ความประหยัด, รวดเร็ว และเครื่องมือไม่ซับซ้อน มีข้อเสีย คือ แปลความหมายยาก และสำรวจได้ลึกไม่เกิน 30 เมตร.

จ. การสำรวจการเหนี่ยวนำโพลาริเซชัน (induced polarization exploration) ใช้เครื่องมือคล้ายกับวิธีการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ โดยส่งกระแสไฟฟ้าตรงลงใต้ดิน 2 ขั้ว ตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 ขั้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้า จะลดต่ำลงทีละน้อย เป็นทั้งการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า และตรวจวัดค่านี้ มีข้อดี คือ รวดเร็ว, ไม่แพง แต่ใช้สำรวจน้ำบาดาลไม่ได้.

ฉ. การสำรวจแม่เหล็ก (magnetic exploration) ใช้ตรวจวัดความเป็นแม่เหล็กของตะกอน หรือหินจากค่าสนามแม่เหล็ก นิยมใช้ในการสำรวจแหล่งแร่โลหะ แต่ไม่นิยมใช้ในการสำรวจน้ำบาดาลโดยตรง เนื่องจากชั้นน้ำส่วนมากไม่มีสมบัติแม่เหล็ก จึงนิยมใช้ศึกษาทางอ้อม เช่น ตำแหน่งของรอยเลื่อน และรอยแตก, โพรง, ถังหรือท่อโลหะเก็บมวลสาร รูปทรงของแหล่งฝังกลบขยะ มีข้อดี คือ ท่อง่าย, รวดเร็ว และไม่แพง มีข้อเสีย คือ แปลความหมายยาก.

ช. การสำรวจแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic exploration) ใช้วิธีส่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปในดิน แล้วตรวจวัดการตอบสนองกลับ ใช้สำรวจวัตถุที่นำไฟฟ้าได้ดี จึงนิยมใช้สำรวจแหล่งแร่โลหะมากกว่าน้ำบาดาล หรือตรวจสอบท่อหรือสายเคเบิลที่ฝังอยู่ใต้ดินกับระเบิดโลหะ, น้ำพุร้อน, หลุมฝังกลบขยะ และพลูม มีข้อดี คือ ท่อง่าย, รวดเร็ว, ไม่แพง มีข้อเสีย คือ แปลความหมายยาก.



**ข. การสำรวจความโน้มถ่วง** (gravity exploration) ใช้วิธีการวัดค่าความโน้มถ่วง ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นของตะกอน หรือหินใต้ดินที่แตกต่างจากบริเวณข้างเคียง นิยมใช้สำรวจโครงสร้างของหิน เช่น โดมเกลือ และชั้นหินโค้งรูปปะทุน, โพรง และร่องน้ำโบราณ มีข้อดี คือ ไม่แพง มีข้อเสีย คือ ผลที่ได้ไม่ชัดเจน และต้องแปลผลร่วมกับวิธีอื่นๆ.

**ฉ. การหยั่งหลุมเจาะ** (well logging) บางครั้งเรียกว่า **การหยั่งธรณีฟิสิกส์** (geophysical logging) เป็นวิธีการสำรวจที่ทำให้หลุมเจาะด้วยการหย่อนเครื่องมือลงไปตรวจวัดในหลุมเจาะ หัวตรวจวัดของเครื่องมือที่เรียกว่า โพรบ (probe) หรือซอนด์ (sonde) มีทั้งชนิด

1. ส่งสัญญาณจากในหลุมแล้วตรวจวัดในหลุม

2. ส่งสัญญาณจากในหลุมแล้วตรวจวัดบนพื้นดิน

3. ส่งสัญญาณจากพื้นดินแล้วตรวจวัดในหลุม

4. ส่งสัญญาณจากในหลุมแล้วตรวจวัดในหลุมข้างเคียง ซึ่งผลที่ได้จากวิธีที่ 4 นี้เรียกว่า ภาพสำรวจข้ามหลุม (cross-hole tomography) การทำงานเริ่มจากการหย่อนเครื่องมือลงไปภายในหลุม แล้วดึงขึ้นมา มีการปล่อยสัญญาณออกไปหรือตรวจวัดค่าธรรมชาติที่มีอยู่ในชั้นตะกอนหรือหินก็ได้ จากนั้น นำข้อมูลที่ได้มาประมวลผล และแปลความหมายว่า ชั้นใด ควรเป็นตะกอนหรือหินชนิดใด มีแนวโน้มเป็นชั้นน้ำหรือไม่ มีรอยแตกหรือไม่ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ตามความลึก เรียกว่า ผลบันทึกการหยั่ง (log).

การหยั่งหลุมเจาะมีหลายวิธี ดังนี้

- **การหยั่งไฟฟ้า** (electrical log) เป็นการนำหลักการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นตะกอนหรือหินตามความลึก สมบัติที่นิยม คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าจำเพาะ โดยส่งไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในใต้ดิน แล้วตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า จากนั้น คำนวณความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเรียกว่า การหยั่งความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity log) คล้ายกับวิธีการสำรวจบนพื้นดิน แต่มีการปรับปรุงแก้ไขลักษณะการวางเครื่องมือ โดยมีหลักการว่า ชั้นน้ำจะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำ เนื่องจากมีน้ำบาดาล ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ขังอยู่ และชั้นที่บ้น้ำมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง.

- **การหยั่งความเร็วเสียง** (sonic log) เป็นการนำหลักการว่า หินแต่ละชนิดมีความเร็วคลื่นเสียงแตกต่างกัน เมื่อส่งสัญญาณคลื่นเป็นช่วงความถี่ของเสียงเข้าไปในใต้ดิน แล้วตรวจวัดการสะท้อนกลับ คล้ายกับการสำรวจบนพื้นดิน แล้วคำนวณความเร็วคลื่น เช่น คลื่นพี, คลื่นเอส, อัตราส่วนระหว่างคลื่นพีกับคลื่นเอส และคลื่นสโตนเลย์ โดยมีหลักการว่า ชั้นน้ำมีความเร็วสูงกว่า และมีค่าแตกต่างจากชั้นที่บ้น้ำ ชั้นน้ำที่มีรอยแตกจะมีความเร็วคลื่นลดลง ถ้าส่งคลื่นความถี่สูงกว่าเสียงจะเรียกว่า การหยั่งอะคูสติก (acoustic log) หรือบางคนที่ใช้คำกว้างๆ ว่า คลื่นไหวสะเทือนจะ

เรียกว่า การหยั่งคลื่นไหวสะเทือน (seismic log) บางคนที่ต้องการระบุว่าใช้ความเร็วคลื่นพีจะเรียกว่า การหยั่งความเร็วคลื่นพี (P-wave velocity log) บางคนใช้ทั้งสัญญาณคลื่นเรียกว่า การหยั่งอะคูสติกเต็มสัญญาณ (full-waveform acoustic log) เป็นต้น (Promma 1995; 2001).

- **การหยั่งแกมมา** (gamma log) เป็นการนำหลักการตรวจวัดระดับการแผ่รังสีแกมมาตามธรรมชาติ ที่ออกมาจากวัสดุธรณีใต้ดิน พบมากในดินเหนียว มีหลักการว่า ชั้นที่บ่งน้ำที่มีดินเหนียวมาก จะมีค่าระดับการแผ่รังสีแกมมาสูงกว่าชั้นกรวดทรายที่ขังน้ำบาดาล. นอกจากนี้ยังใช้วิธีการปล่อยรังสีแกมมาออกไปจากเครื่องมือ และตรวจวัดค่าที่สะท้อนกลับมาก็ได้.

- **การหยั่งนิวตรอน** (neutron log) เป็นการนำหลักการปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกไปจากเครื่อง และกระตุ้นให้ชั้นหินเกิดรังสีแกมมา แล้วตรวจวัดค่าที่ตอบสนองกลับมาจากวัสดุธรณีใต้ดิน มีหลักการว่า ชั้นที่บ่งน้ำที่มีดินเหนียวมากจะมีค่าระดับการแผ่รังสีแกมมาสูงกว่าชั้นกรวดทรายที่ขังน้ำบาดาล.

จากประสบการณ์ของผู้เขียน พบว่า ในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้การหยั่งหลุมเจาะในการสำรวจ น้ำบาดาลเพราะเพิ่มค่าใช้จ่าย อีกทั้งต้องทำการสำรวจก่อนใส่ท่อ น้ำ จึงจะได้ผลดี ทำให้เสียเวลา และเสี่ยงเกิดตะกอนพังทลายลงไปบ่อจนใส่ท่อน้ำไม่ได้ระยะที่ต้องการ ช่างจึงนิยมใส่ท่อน้ำทันทีที่เจาะได้ระยะที่ต้องการโดยไม่หยั่งหลุมเจาะ, ดังนั้น การหยั่งหลุมเจาะถูกใช้ในการสำรวจน้ำบาดาลที่ต้องการความแน่นอน เช่น การวิจัยหรือการแก้ปัญหามลพิษใต้ดิน หรือหลุมเจาะในชั้นหินที่ผนังบ่อไม่พังทลาย.

หัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายเฉพาะวิธีการสำรวจความต้านทานไฟฟ้า และการสำรวจที่เคลื่อนไหวสะเทือนหักเห เนื่องจากเป็นวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่ได้รับการนิยมมากที่สุดในการสำรวจน้ำบาดาล โดยเขียนรายละเอียดไว้มากพอ ที่จะทำงานได้จริง ส่วนวิธีการสำรวจอื่นๆ ผู้อ่านจะได้เรียนในระดับที่สูงขึ้น.

#### 1.4 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

**การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ** (Electrical- resistivity exploration, resistivity survey) เป็นวิธีหนึ่งทางธรณีฟิสิกส์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการสำรวจน้ำบาดาล การสำรวจทำบนพื้นดิน และทำได้ง่ายใช้เพียงแบตเตอรี่ 1 เครื่อง ปล่อยกระแสไฟฟ้าไปกับสายไฟฟ้า ซึ่งจะมีปลายหนีบติดกับขั้วเหล็ก 2 อัน ที่ปักลงบนดิน ใช้เครื่องตรวจวัดระดับกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงดินก็จะลงลึกไปในใต้ดิน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับดินไปทั่วพื้นที่ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าอีกคู่หนึ่งปักลงดินไปวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า นำค่ากระแสไฟฟ้า และความต่าง

ศักย์ไฟฟ้ามาคำนวณความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ณ จุดที่สำรวจ เมื่อสำรวจอย่างเป็นระบบ ก็จะได้ภาพแสดงความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของพื้นที่ศึกษา.

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะอาศัยหลักการ ดังนี้

1. ใต้ผิวดินลงไปมักพบชั้นทึบน้ำและชั้นแห้งก่อน พอลึกลงไปจึงพบชั้นน้ำ ซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าชั้นทึบน้ำ หรือชั้นแห้ง เนื่องจากน้ำบาดาลนำไฟฟ้าได้ดี.

2. ชั้นดิน ชั้นตะกอน หรือชั้นหินใดๆ ต้องมีความแตกต่างของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมากพอที่จะจำแนกความแตกต่างของแต่ละชั้นออกจากกัน.

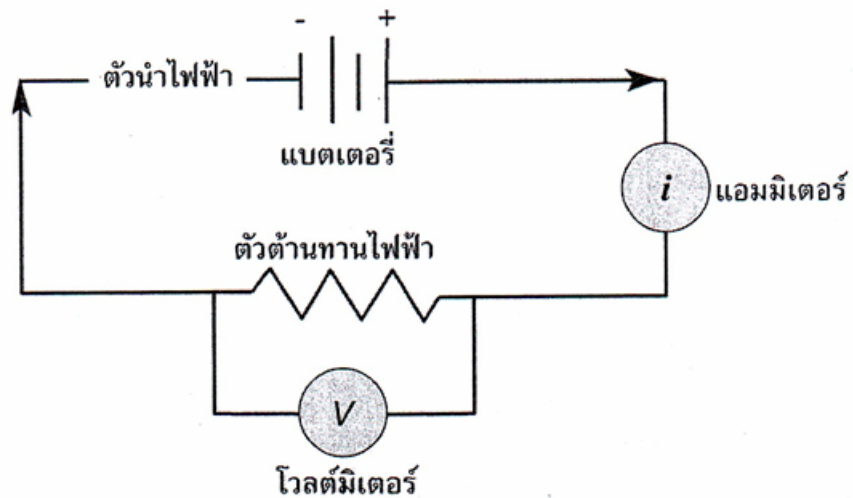
3. ใช้วิธีส่งกระแสไฟฟ้าจากผิวดินลงไปใต้ดินโดยผ่านหมุดเหล็ก แล้ววัดว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหมุดเหล็กอื่น จำนวน 2 อัน ไม่ใช่การวัดกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีอยู่ตามธรรมชาติ.

4. วัตถุใต้ดินที่ความลึกต่างๆ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแตกต่างกัน จะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แตกต่างกันด้วย ซึ่งเราใช้ข้อมูลนี้แปลความหมายส่วนประกอบและโครงสร้างของชั้นน้ำใต้ดิน.

แม้ว่าการสำรวจทำได้ง่าย แต่ผู้เริ่มศึกษาระดับปริญญาตรีอาจสับสนไปกับสูตรคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องได้ ผู้เขียนจึงอธิบายหัวข้อนี้ให้เข้าใจง่าย โดยเน้นไปที่ขั้นตอนการปฏิบัติในภาคสนาม แล้วนำมาสู่สูตรคณิตศาสตร์ที่ต้องใช้ในการแปลความหมายผลการสำรวจ เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจขั้นตอนการทำงานทั้งหมด และมีพื้นฐานที่จะศึกษาในระดับที่สูงขึ้น.

#### 1.4.1 กฎของโอห์ม

วงจรไฟฟ้าพื้นฐานช่วยสร้างความเข้าใจเรื่องความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะได้ง่ายขึ้น วงจรประกอบด้วยตัวต้านทาน 1 ชิ้น ต่อกับสายลวดทองแดงที่นำไฟฟ้าได้ดีไปยังแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วบวกของแบตเตอรี่ ผ่านลวดไปยังตัวต้านทาน แล้วไหลย้อนกลับไปยังขั้วลบของแบตเตอรี่ เมื่อนำเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า หรือเรียกว่า แอมมิเตอร์ (ammeter) มาวัดขดลวดต้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออก พร้อมกับใช้เครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือเรียกว่า โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) วัดที่หัวและท้ายของตัวต้านทานไฟฟ้า จะได้ค่า 2 ชนิด คือ กระแสไฟฟ้า (current) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (potential difference) ระหว่างหัว และท้ายของตัวต้านทาน หมายความว่า ศักย์ไฟฟ้า (potential) ณ จุดที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ตัวต้านทานมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ไหลออกจากตัวต้านทาน เนื่องจากมีความต้านทานเกิดขึ้นในตัวต้านทานนี้ ดังแสดงในรูปที่ 7.



รูปที่ 7. วงจรไฟฟ้าพื้นฐานเกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ.

การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรข้างต้น เปรียบเสมือนกับการปล่อยน้ำให้ไหลจากก๊อกน้ำผ่านสายยางยาวๆ ในช่วงรดน้ำต้นไม้ เมื่อขดสายยางวนกลับมาที่ก๊อกน้ำ พบว่า น้ำไหลออกจากก๊อกน้ำ ไหลด้วยความเร็วสูงกว่า น้ำที่ไหลออกจากปลายสายยาง เนื่องจากการเกิดความต้านทานกระแสน้ำภายในสายยางในระหว่างที่ไหลผ่านในท่อสาย เช่น ผงงด้านในหรือการคดเคี้ยวของสายยาง การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ก็เหมือนกับการวัดความแตกต่างของความเร็วของน้ำที่ไหลต่างกันในตัวเอง.

ในทำนองเดียวกัน เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงดิน กระแสไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในดินออกไปทุกทิศทางจากจุดที่ปล่อยไฟ เมื่อเราจะวัดศักย์ภาพไฟฟ้า ณ จุด 2 จุดที่แตกต่างกัน จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เอาแนวคิดนี้มาใช้สำรวจน้ำบาดาลต่อไป.

การไหลของกระแสไฟฟ้า เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนให้ประจุไฟฟ้า (charge) เคลื่อนที่ เรียกแรงนี้ว่า แรงอิเล็กโทรโมทิฟ (electromotive force, emf) ซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) การเคลื่อนที่ของประจุผ่านลวดเรียกว่า กระแสไฟฟ้า (current) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$I = \frac{q}{t}$$

- โดยที่ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 Q = ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)  
 T = เวลา (วินาที)

เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกลางใดๆ ที่อยู่ใต้ดิน โดยที่ตัวกลางนี้มีพื้นที่หน้าตัด  $A$  จะได้ว่า

$$I = \frac{i}{A} \quad 5.2$$

โดยที่  $I$  = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) (แอมแปร์/ $L^2$ )  
 $Q$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $T$  = พื้นที่หน้าตัด ( $L^2$ )

หมายความว่า เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากัน ถ้าพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะลดลง แต่ถ้าพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เพราะประจุต้องมาอัดแน่นให้พื้นที่เล็กลง เพื่อให้ประจุเคลื่อนที่ไปในจำนวนเท่าเดิม

จอร์จ โอห์ม (Georg S. Ohm 1787-1854) ชาวเยอรมันค้นพบว่า กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า แต่แปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า

$$I \propto \frac{V}{R} \quad 5.3$$

เมื่อเปลี่ยนเครื่องหมายแปรผันเป็นเครื่องหมายเท่ากับตามกฎคณิตศาสตร์ต้องใส่ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นโอห์ม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

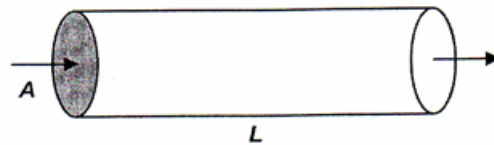
$$I = k \frac{V}{R} = (1) \frac{V}{R} = \frac{V}{R} \quad 5.4$$

โดยที่  $I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $V$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)  
 $R$  = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม) ซึ่งตั้งชื่อหน่วยตามผู้ค้นพบกฎของโอห์ม บางครั้ง แทนหน่วยด้วยสัญลักษณ์อักษรกรีก  $\Omega$

ต่อมา ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของโอห์ม (Ohm's Law) จากกฎของโอห์มข้างต้น จึงนิยามได้ว่า ความต้านทานไฟฟ้าขนาด 1 โอห์ม จะยอมให้กระแสไฟฟ้าขนาด 1 แอมแปร์ ไหลผ่านตัวกลางได้ เมื่อได้รับแรงอิเล็กโทรโมติฟขนาด 1 โวลต์.

#### 1.4.2 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

เมื่อพิจารณาลวดทองแดงในสายไฟฟ้า ซึ่งมีรูปร่างทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าแปรผันตรงกับความยาว  $L$  แต่แปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  หมายความว่า ยิ่งความยาวมากขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อกระแสไฟฟ้าเดินทางไกลขึ้นย่อมเกิดความต้านทานมากขึ้น แต่ยิ่งพื้นที่หน้าตัดกว้างมากขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง เพราะกระแสไฟฟ้าไหลได้สะดวกมากขึ้น ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ว่า



รูปที่ 8. ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในเส้นลวด.

เมื่อเปลี่ยนเครื่องหมายแปรผันเป็นเครื่องหมายเท่ากับ ตามกฎคณิตศาสตร์ใส่ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้น ในที่นี้กำหนดให้เป็น  $\rho$  อ่านว่า โร่ว และเรียกชื่อว่า ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad 5.6$$

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad 5.7$$

- โดยที่  $\rho$  = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (โอห์ม•L)  
 $R$  = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัด ( $L^2$ )  
 $L$  = ความยาว (L)

หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์ได้มาจากหน่วยของตัวแปรอื่นๆ ในสมการ เพื่อให้สมการเป็นจริง ดังนั้น ถ้ากำหนดให้  $L = m$  แล้วแทนค่าลงในสมการ จะได้ว่าหน่วยเอสไอของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะก็คือ ohm . m หมายถึง โอห์มคูณกับเมตร ไม่นิยมเขียนว่า ohm x m และควรระวังการเขียน ohm-m ซึ่งอาจจะสื่อความหมายผิดว่า หมายถึง โอห์มลบด้วยเมตร.

แนวคิดเรื่องส่วนกลับถูกนำมาใช้ตั้งศัพท์เกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือ ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้า (resistance) คือ การนำไฟฟ้า (conductance) ในขณะที่ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity) คือ การนำไฟฟ้าจำเพาะ (conductivity) ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 5.8$$

โดยที่  $\rho$  = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (โอห์ม • เมตร)  
 $\sigma$  = การนำไฟฟ้าจำเพาะ (โมห์ต่อเมตร)

ผู้อ่านมักสับสนเรื่องหน่วยของการนำไฟฟ้าจำเพาะ ให้แทนค่าหน่วยของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลงในสมการข้างต้น จากนั้น แยกเป็น 2 พจน์ ฝรั่งใช้วิธีการกลับการเรียงตัวอักษรจาก ohm เป็น mho อ่านว่า โมห์ เมื่อต้องลดรูปผลหาร 1 / ohm เพื่อล้อเรื่องส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ เมื่อคุณกลับมาก็จะได้หน่วยโมห์ต่อเมตร

$$\sigma = \frac{1}{ohm \cdot m} = \left( \frac{1}{ohm} \right) \left( \frac{1}{m} \right) = (mho) \left( \frac{1}{m} \right) = \frac{mho}{m} \quad 5.9$$

ต่อมาระบบเอสไอกำหนดให้ใช้ **ไซเมนส์** (siemens) แทนโมห์ การนำไฟฟ้าจึงมีหน่วยเป็น ไซเมนส์ต่อเมตร (S/m) หรือถ้ามีค่าน้อยลง จะเป็นมิลลิไซเมนส์ต่อเซนติเมตร หรือไมโครไซเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งนิยมใช้ในการสำรวจคุณภาพน้ำบาดาลเช่นกัน.

สสารบริสุทธิ์จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่ ที่ผ่านมามีการวิจัยตรวจวัดคุณสมบัตินี้ไว้แล้ว แต่ในการสำรวจภาคสนาม, ชั้นดิน, ชั้นตะกอน หรือชั้นหินชนิดหนึ่งๆ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเปลี่ยนแปลงไปจากค่ามาตรฐาน ดังนี้

1. **มีน้ำปะปนอยู่** น้ำที่แทรกอยู่ในชั้นดิน, ชั้นตะกอน หรือชั้นหิน จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีค่าต่ำลง เพราะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น.

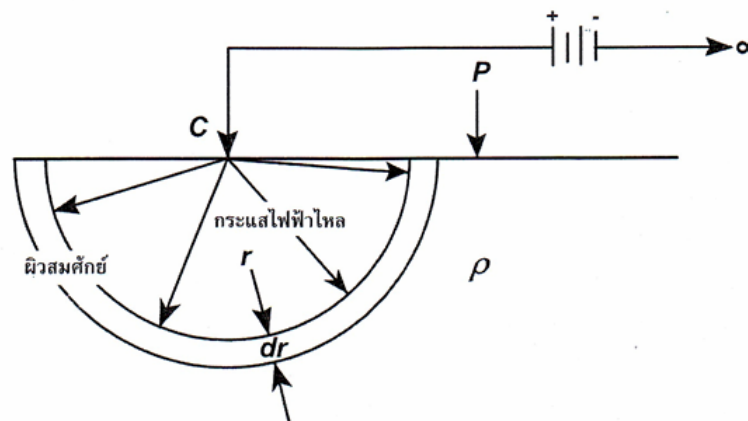
2. **กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสสารหลายชนิด** เมื่อการสำรวจปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปได้ดินแล้ว ย้อนกลับมาที่ขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัด กระแสไฟฟ้าจะผ่านตัวนำ และฉนวนหลายชนิด ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดไปจากค่าสสารบริสุทธิ์ชนิดเดียวซึ่งวัดในห้องปฏิบัติการ การเทียบเคียงค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับสสารบริสุทธิ์ที่มีผู้วัดจากแร่หรือหินแต่ละชนิดไว้จึงไม่มีประโยชน์ จำเป็นต้องใช้สูตรคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อจำแนกความแตกต่างระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน, ตะกอน หรือหินที่อยู่ใต้ดิน สิ่งนี้ย้ำหลักการที่ว่า การสำรวจธรณีฟิสิกส์ อาศัยหลักการความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพของสสาร.

### 1.4.3 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (apparent resistivity) คือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม เกิดขึ้นจากค่ารวมที่ผ่านชั้นตะกอนหรือหินหลายชั้น ค่าที่วัดได้จึงเป็นสมบัตินรวมของทุกชั้นที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน.

คำบรรยายต่อไปนี้เป็นการศึกษาพิสูจน์ โดยเรียบเรียงมาจาก Van Nostrand and Cook (1966) สูตรเหล่านี้ใช้ในการสำรวจน้ำบาดาลโดยใช้วิธีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในหัวข้อต่อไป.

เมื่อปักแท่งเหล็กลงดินที่มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ  $\rho$  จำนวน 1 แท่ง แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าที่จุด C จากแบตเตอรี่ลงดิน จากนั้น วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแท่งเหล็กอีกอันหนึ่งที่จุด P จะพบว่า กระแสไฟฟ้าแผ่ออกไปในทิศทางใต้ดินคล้ายกับพื้นผิวของทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 9 ที่พื้นผิวนี้นี้จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันทุกประการ เรียกว่า ผิวสมศักย์ (equipotential surface).



ที่มา: Burger 1992

รูปที่ 9. ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1 ขั้ว และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 ขั้ว.

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวนี้นี้ให้เป็นเปลือกบางๆ หรือ  $dr$  มีระยะสั้นมาก และใช้สมการที่ 1.7 และ 1.9 จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า  $\Delta V$  หรือ  $dV$  ระหว่างระยะทาง  $dr$  นี้ดังนี้



$$dV = iR = I \left( \rho \frac{L}{A} \right) = I \left( \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \right) \quad 5.10$$

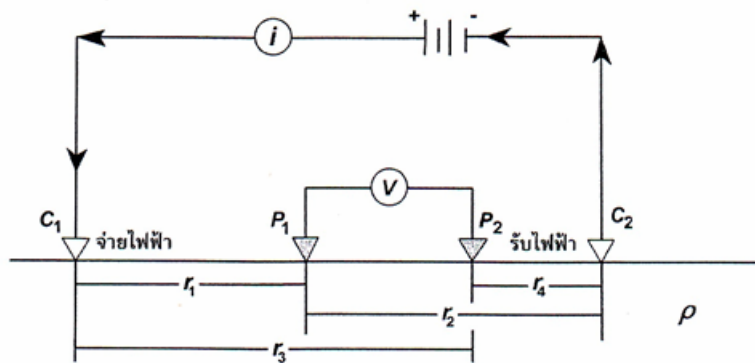
เมื่อปักแท่งเหล็กลงดินจำนวน 2 อัน แต่กำหนดให้ระยะห่าง ระหว่างขั้วแท่งเหล็กทั้งสองมีค่าเท่ากับ  $r$  ความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V$  ที่ จุด  $P$  ต้องเทียบกับอีกจุดหนึ่งที่อยู่ไกลในระยะทางอนันต์ เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าต้องวัดระหว่างจุดสองจุด วัดจุดเดียวจะไม่รู้ค่าความต่าง ซึ่งกำหนด ศักย์ไฟฟ้าที่ระยะทางอนันต์ให้มีค่าเท่ากับ 0 เพราะอยู่ไกลเกินกว่าจะได้รับกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลง ไปในดิน ดังแสดงในรูปที่ 10.

ดังนั้น  $V$  ที่จุด  $P$  คำนวณได้โดยวิธีอินทิเกรต  $dV$  จากระยะทาง  $f$  ถึงระยะทางอนันต์ จะได้ ว่า

$$V = \int_r^\infty dV = \int_r^\infty i\rho \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{i\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{i\rho}{2\pi r} \quad 5.11$$

เมื่อปักขั้วแท่งเหล็ก  $P_1$  และ  $P_2$  ลงดิน เพื่อใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแท่ง แมงเหล็กทั้งสองนี้ จะได้ศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วมีค่าเท่ากับ ดังแสดงในรูปที่ 10.

$$V_{P1} = \frac{i\rho}{2\pi r_1} - \frac{i\rho}{2\pi r_2} \quad 5.12$$



ที่มา: Burger 1992

รูปที่ 10. ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 ขั้ว.

และ 
$$V_{P2} = \frac{i\rho}{2\pi r_3} - \frac{i\rho}{2\pi r_4} \quad 5.13$$

ดังนั้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างทั้งสองขั้วมีค่าเท่ากับ

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \frac{iP}{2\pi r_1} - \frac{iP}{2\pi r_2} - \frac{iP}{2\pi r_3} + \frac{iP}{2\pi r_4} \quad 5.14$$

$$\Delta V = \frac{i\rho}{2\pi r_1} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad 5.15$$

ย้ายข้างของสมการเพื่อให้ได้  $\rho$  ไว้ทางด้านซ้ายของสมการ

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left( \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right) \quad 5.16$$

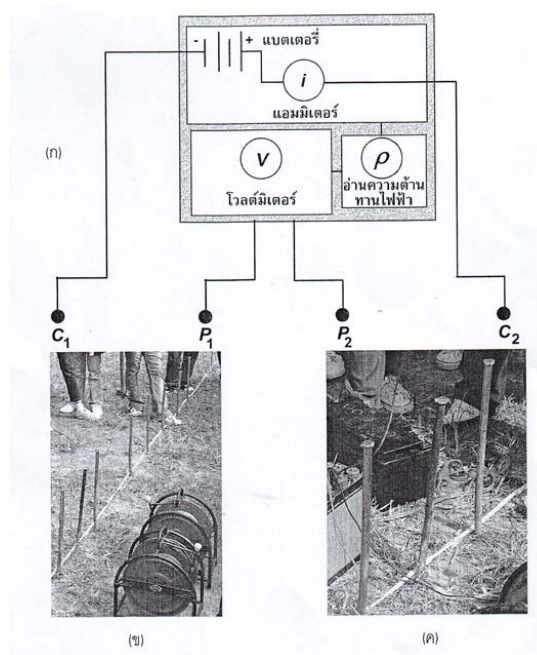
สมการที่ 5.16 เกิดจากการสมมติให้ใต้ดินมีสมบัติโฮโมจีเนียส และไอโซทรอปิก แต่ในธรรมชาติดินตะกอน หรือหินมีหลากหลายเนื้อผสมปนเปกันอยู่ และย่อมมีสมบัติเฮเทอโรจีเนียส จึงนิยามศัพท์ใหม่ขึ้นว่า ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ apparent resistivity หรือ  $\rho_a$  เพื่อบ่งชี้ว่า ข้อมูลจากการสำรวจน้ำบาดาล โดยใช้วิธีนี้จะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏของดิน, ตะกอน หรือหินหลากชนิด ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ไม่ใช่ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงของสสารบริสุทธิ์ สมการที่ 5.16 จึงเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนตัวแปรด้านซ้ายของสมการ

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left( \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right) \quad 5.17$$

#### 1.4.4 อุปกรณ์การสำรวจ

อุปกรณ์การสำรวจมีการจัดวางอย่างเป็นระบบ ดังแสดงในรูปที่ 10 ประกอบด้วย

1. **ขั้วไฟฟ้า (electrode)** ขั้วไฟฟ้าทำขึ้นจากแท่งเหล็กมีจำนวนอย่างน้อย 4 แท่ง ทำจากท่อเหล็กตัน มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1–1.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 50 เซนติเมตร มีรูปทรงคล้ายตะปูขนาดใหญ่ ที่ปลายด้านหนึ่งมีหัวนูนโค้ง เพื่อใช้ค้อนเหล็กตีลงไปในดิน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแหลม โดยที่ 2 ขั้วแรกที่จะใช้กระแสไฟฟ้าลงไปได้ดิน ที่เหลืออีก 2 ขั้ว จะใช้ตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าไหลกลับมา จากประสบการณ์ของผู้เขียน พบว่าต้องเตรียมขั้วไฟฟ้าไว้อย่างน้อยประมาณ 10 แท่ง เพื่อความสะดวกในการปักลงดินล่วงหน้า ถ้าใช้เพียง 4 แท่ง จะต้องหมั่นถอนขั้วไฟฟ้าทุกครั้ง หลังตรวจวัดสำเร็จ ทำให้ช้า ถ้าปักไว้ล่วงหน้า ผู้ปฏิบัติงานภาคสนามเพียงแค่นำที่หนีบขั้วไฟฟ้า ทำให้สะดวกและประหยัดเวลาทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 11.



ที่มา: Burger 1992

รูปที่ 11. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ก) วงจรไฟฟ้าของเครื่องมือ, (ข) การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในภาคสนาม และ (ค) ภาพขยายขั้วไฟฟ้า.

2. **สายไฟฟ้า (connecting wire) หรือเคเบิล (cable)** เป็นสายป้องกันน้ำ มีฉนวนหุ้มหนา มักมีสีดำ ลวดโลหะภายในต้องนำไฟฟ้าได้ดี ทนทานและเบา มักขดไว้รอบวงล้อที่หมุนได้ และมีความยาวไม่เกิน 100 เมตร สายไฟที่ยาวเกินไป จะเกิดความต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งไม่ดีต่อการ

สำรวจปลายด้านหนึ่งเสียบเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า หรือเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ปลายสายมักเป็นขั้วแบบหมุนหรือแบบกล้วย ปลายอีกด้านหนึ่งมีที่หนีบ สำหรับไว้หนีบติดกับขั้วไฟฟ้า.

**3. แบตเตอรี่** นิยมใช้แบตเตอรี่ เพราะพกพาได้ง่าย ซึ่งปล่อยกระแสไฟฟ้าตรงลงดิน และใช้กับการทำงานของเครื่องวัด ต้องหมั่นประจุไฟฟ้าล่วงหน้าก่อนการสำรวจ นิยมใช้ขนาด 12 โวลต์ ถ้างานมีการสำรวจจำนวนมาก ต้องเตรียมแบตเตอรี่สำรองไว้ด้วย เครื่องบางรุ่นใส่แบตเตอรี่ไว้ในเครื่องวัด บางรุ่นแยกส่วน ถ้าการสำรวจนาน ต่อเนื่อง หรือต้องการสำรวจถี่มาก อาจต้องใช้เครื่องปั่นไฟ ช่วยผลิตไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ แต่ผู้เขียนขอจำกัดการอธิบายไว้เพียงไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจง่าย.

**4. เครื่องวัด** ภายในประกอบด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า เครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า และแหล่งพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ภายในเครื่องวัด หรือต่อพ่วงกับแบตเตอรี่ภายนอกเครื่องวัดก็ได้ การออกแบบเครื่องวัดขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตบางเครื่องแยกชิ้นส่วน มีเตอร์ต่างๆ ออกจากกัน เพื่อว่าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเสียก็ยังใช้เครื่องที่เหลือได้ แต่ส่วนมากจะรวมกันไว้ในเครื่องเดียว เพราะเคลื่อนย้ายง่ายกว่า.

#### 1.4.5 ขั้นตอนการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

1. ปักขั้วไฟฟ้าลงในดินให้ลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ตรวจสอบว่าพื้นผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้ากับดินแน่นกระชับดี ถ้าดินแห้งเกินไปให้รดน้ำสะอาดลงในดินที่อยู่รอบขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งดินชุ่มไปด้วยน้ำ แต่อย่าให้น้ำท่วม และอย่าให้น้ำไหลเชื่อมถึงกันระหว่างขั้วไฟฟ้า เพราะไฟฟ้าจะลัดวงจรไฟฟ้าไม่ลงไปในดิน นอกจากนี้ ควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีการฝังเหล็ก หรือสายไฟฟ้าไว้ใต้ดิน เนื่องจากส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป พยายามเลือกพื้นที่แบนราบ ไม่ตะปุ่มตะป่ำ.

2. ต่อสายไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ทั้ง 4 อันกับเครื่องวัด ดูวิธีการวางขั้วไฟฟ้าในหัวข้อถัดไป เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าลงไปในดิน ขั้วไฟฟ้านั้นจะเรียกชื่อใหม่ว่า ขั้วกระแส current electrode เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าลงไปในดิน ในทำนองเดียวกัน แท่งเหล็กเดียวกัน แต่ถูกใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเรียกว่า ขั้วความต่างศักย์ potential electrode นิยมวางขั้วกระแสไว้ด้านนอก แต่วางขั้วความต่างศักย์ไว้ด้านใน.

3. เปิดเครื่องปล่อยไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงผ่านขั้วกระแสลงไปในดิน จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับดิน และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าวัดความต่างศักย์ ทั้ง 2 อัน.

4. อ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏเครื่องวัด บันทึกค่าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อย้ายตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า การอ่านค่าทำได้ทันที แต่การย้ายขั้วไฟฟ้า และสายไฟฟ้าต้องใช้เวลาาน ดังนั้น จึงควรมีขั้วไฟฟ้าหลายอัน และปัดลงดินล่วงหน้า.

5. วาดจุดข้อมูลของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ปรากฏลงบนแผนภูมิทันทีที่อ่านค่าได้ ถ้าค่าของข้อมูลขัดกับสามัญสำนึกให้สำรวจซ้ำในทันที อย่าวรवादเมื่อกลับมาที่ทำงาน เนื่องจากถ้าผิดพลาดจะต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายไปสำรวจซ้ำอีก แผนภูมินี้ คือ แผนภูมิระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ปรากฏในแกนตั้ง และระยะห่างของขั้วไฟฟ้าในแกนนอน เพื่อใช้แปลความหมายว่ามีชั้นดิน, ชั้นตะกอน หรือชั้นหินจำนวนกี่ชั้น แต่ละชั้นมีความหมายด้านทานไฟฟ้าจำเพาะเท่าใด และชั้นใดที่อาจเก็บกักน้ำบาดาลอยู่ที่ความลึกเท่าไร.

6. สำรวจต่อเนื่องจนกว่า เครื่องวัดจะวัดค่าไม่ได้ สายไฟฟ้ายาวไม่พอ หรือหมดเนื้อที่สำรวจ ที่จะวางเครื่องมือได้ เช่น ลงธารน้ำ เนื่องจากการย้ายตำแหน่งเครื่องวัด และอุปกรณ์ทั้งหมด จะใช้เวลา และแรงงานมากกว่า.

#### 1.4.6 การปักวางขั้วไฟฟ้า

การปักวางขั้วไฟฟ้า (electrode configuration, spread, pattern, arrangement) คือ การตอกขั้วไฟฟ้าลงไปในดินในรูปแบบต่างๆ กัน การวางขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน ทำให้การสำรวจลงลึกไม่เท่ากัน สูตรในการคำนวณความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะก็แตกต่างกัน วิธีการวางขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้มากที่สุดในการสำรวจน้ำบาดาลมี 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบเวนเนอร์ และแบบชลัมเบอร์เจ ดังแสดงในรูปที่ 12 วิธีอื่นๆ มีผู้ทดลองใช้งานแล้ว แต่ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร หรือเข้าใจยากจนเกินไป จึงนิยมใช้เพียง 2 วิธีนี้ มีดังนี้

1. แบบเวนเนอร์ (Wenner configuration) ตั้งชื่อตามแฟรงค์ เวนเนอร์ (Frank Wenner 1874–1915) ชาวอเมริกัน มีวิธีนี้จึงแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา การปักวางขั้วไฟฟ้าใช้วิธีการวางระยะห่างของขั้วทั้ง 4 อัน เท่ากัน ขั้ว 2 อัน ด้านนอกใช้ปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงลงดิน และขั้ว 2 อันด้าน ในใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า สมมุติให้ระยะห่างที่เท่ากันนี้เป็นตัวแปร  $a$  จะได้  $a$  จำนวน 3 ช่วง ที่เท่ากัน ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของการสำรวจตั้งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ทั้ง 2 อัน ด้านใน

แทนค่า  $r_1 = a$ ,  $r_2 = 2a$ ,  $r_3 = 2a$  และ  $r_4 = a$  ลงในสมการที่ 5.17 จะได้ว่า ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ณ จุดกึ่งกลางของการสำรวจมีค่าเท่ากับ

$$\rho_a = \frac{2\pi a \Delta V}{i} \quad 5.18$$

การสำรวจแบบเวเนอริในแนวตั้ง และแนวราบมีวิธี ดังนี้

**ก. การสำรวจแนวตั้ง (sounding)** ต้องเพิ่มขนาดของ a เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลลึกลงไปใต้ดินมากขึ้น โดยคงตำแหน่งจุดกึ่งกลางไว้ที่เดิม.

**ข. การสำรวจแนวราบ (profiling)** คงขนาดของ a ไว้ แต่ต้องย้ายตำแหน่งขั้วไฟฟ้า ทั้ง 4 อัน ไปยังตำแหน่งใหม่ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางจึงเปลี่ยนไป แต่กระแสไฟฟ้าลงไปที่เดิม.

การปักขั้วไฟฟ้าแบบเวเนอริมีข้อดี และข้อเสีย ดังนี้

**ข้อดี** คือ ทำงาน มีระยะห่าง a ไม่ไกลเกินไปสำหรับความสามารถของเครื่องวัดที่จะตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า และสูตรคำนวณใช้งานง่าย.

**ข้อเสีย** คือ ใช้เวลาทำงานในภาคสนาม เนื่องจากต้องย้ายขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 4 อัน ต่อการสำรวจ 1 ค่า และอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านข้างของดิน, ตะกอน หรือหินที่อยู่ใต้ดิน การเปลี่ยนแปลงทางด้านข้างนี้อาจถูกแปลความหมายผิด เป็นการเปลี่ยนแปลงแนวตั้งก็ได้.

**2. แบบชลัมเบอร์ เจ (Schlumberger configuration)** ตั้งชื่อตามคอนราด ชลัมเบอร์เจ (Conrad Schlumberger 1874-1954) ชาวฝรั่งเศส ไม่ได้อ่านว่า ชลัมเบอร์เจอร์ ในปัจจุบันนี้ยังคงมีชื่อนี้เป็นชื่อบริษัทสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ วิธีนี้จึงแพร่หลายในประเทศแถบยุโรป การจัดวางขั้วไฟฟ้าคล้ายคลึงกับแบบเวเนอริ แต่ระยะห่าง MN ระหว่างขั้วความต่างศักย์ P มีค่าน้อยกว่าระยะห่าง L ระหว่างขั้วกระแส C กับจุดกึ่งกลาง การปักขั้วไฟฟ้ารูปแบบนี้ต้องคงความสัมพันธ์  $2L > 5 MN$  ไว้เสมอ.

การปักขั้วไฟฟ้า แบบชลัมเบอร์เจ ทำให้ขยับตำแหน่งขั้วความต่างศักย์น้อยครั้งกว่าขั้วกระแส หมายความว่า ขั้วความต่างศักย์จะตั้งอยู่ใกล้จุดกึ่งกลาง และไม่ต้องขยับบ่อย ทำให้ผู้สำรวจ ตั้งเครื่องวัด และแหล่งพลังงานที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางนี้ได้ แล้วให้ผู้สำรวจรายอื่น ขยับตำแหน่งขั้วไฟฟ้าปล่อยกระแสไฟฟ้าด้านนอกให้ไกลออกไปได้.

การสำรวจแบบชลัมเบอร์เจในแนวตั้งและแนวราบมีวิธี ดังนี้

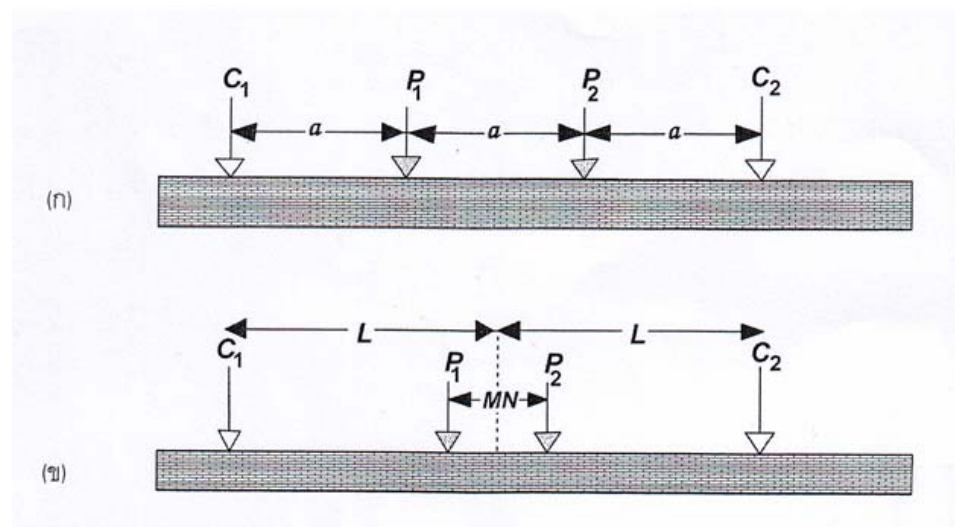
**ก. การสำรวจในแนวตั้ง (sounding)** ต้องเพิ่มขนาดของ L เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลลึกลงไปใต้ดินมากขึ้น โดยคงตำแหน่งจุดกึ่งกลางไว้ที่เดิม วิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพดี เนื่องจากย้ายขั้วไฟฟ้าปล่อยกระแสไฟฟ้าเพียง 2 อัน ได้ง่ายกว่าย้ายทั้งหมด การเพิ่มขนาดของ L นิยมเพิ่มทีละ 10 เท่า เนื่องจากนำไปวาดในแผนภูมิลอการิทึมง่าย จุดข้อมูลสวย และมีระยะห่างเหมาะสมกับการใช้คำนวณสูตร.

ข. การสำรวจแนวราบ (profiling) ต้องย้ายตำแหน่งขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 อัน ไปยังตำแหน่งใหม่ ตำแหน่งจุดกึ่งกลาง จึงเปลี่ยนไป แต่กระแสไฟฟ้าลงไปถึงเท่าเดิม.

การปักขั้วไฟฟ้าแบบชลัมเบอร์เจ มีข้อดี ข้อเสีย ดังนี้

**ข้อดี** คือ สะดวกต่อผู้วัดค่า เพราะไม่ต้องเคลื่อนย้ายบ่อย.

**ข้อเสีย** คือ ถ้าปากต่อผู้ย้ายขั้วไฟฟ้าที่ต้องเดินออกไปไกล ถ้าขั้วไฟฟ้าอยู่ไกลมากเกินไป กระแสไฟฟ้าอาจอ่อน จนกระทั่งเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ได้ และต้องปรับค่าข้อมูลก่อนการแปลผล เช่น การทำโค้งข้อมูลให้เรียบก่อนทาบลงบนแผนภูมิต้นแบบ.



รูปที่ 12. การปักขั้วไฟฟ้า (ก) แบบเวนเนอร์ และ (ข) แบบชลัมเบอร์เจ.

#### 1.4.7 การแปลความหมายผลการสำรวจ

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะมีค่าลดลงเมื่อ

1. ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น น้ำใต้ดินเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่นำไฟฟ้าได้ดี เพราะน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีที่จะละลายเอาไอออนของธาตุต่างๆ ออกจากแร่.

2. ความเค็มเพิ่มขึ้น น้ำใต้ดินจะนำไฟฟ้าได้มากขึ้นเมื่อมีไอออนมากขึ้น น้ำเค็มมีไอออนอยู่มาก จึงต้านทานไฟฟ้าได้น้อย.

3. ปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ดินเหนียวมีค่าแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงขึ้นกว่าตะกอนทราย จึงช่วยนำไฟฟ้ามากขึ้น.

4. **ตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น** ตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ช่องว่างที่กักเก็บน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น ด้วย เช่น ทรายมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะน้อยกว่าทรายแป้งและดินเหนียว แม้ว่าดินเหนียวจะมีค่าแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับช่องว่างที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะน้อยลง เช่น ทรายที่มีการคัดขนาดเท่ากันดี จะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะน้อยกว่าทรายที่มีการคัดขนาดไม่ดี เช่น ทรายผสมทรายแป้ง และดินเหนียว.

5. **ความพรุนเพิ่มขึ้น** ในชั้นน้ำที่เป็นกรวด จะมีช่องว่างขนาดใหญ่ หรือมีความพรุนสูง ซึ่งจะต้านทานไฟฟ้าได้ต่ำกว่าหินแข็งเนื้อแน่น.

6. **รอยแตกมากขึ้น** ชั้นน้ำที่มีรอยแตกมากจะมีขนาดช่องว่างให้น้ำขังอยู่มาก จะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า หรือต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าหินแข็งเนื้อแน่น.

7. **การผุพังสูงขึ้น** หินที่ผุพังกลายเป็นดินที่จะมีช่องว่างมากขึ้น ซึ่งจะขังน้ำได้มากขึ้นตามไปด้วย ความต้านทานไฟฟ้าจึงลดลง.

สรุปง่ายๆ ว่า ชั้นน้ำมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำที่สุด แต่ชั้นไม่มีน้ำมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุด การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ จะเกิดขึ้นทันทีที่เข้าสู่ระดับน้ำใต้ดิน ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะลดลงต่ำลง อย่างทันทีทันใด โดยมีค่าน้อยลงมาก เนื่องจากชั้นน้ำไม่มีแรงดันนี้ จะนำไฟฟ้าได้ดีมาก หรือต้านทานไฟฟ้าได้น้อยมากนั่นเอง ในกรณีของชั้นน้ำมีแรงดัน ซึ่งน้ำขังอยู่จริง แต่ในชั้นน้ำ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจนเห็นชัดเจน เมื่อเข้าสู่ชั้นน้ำ ไม่ใช่แรงดันน้ำ.

**วิธีอานาไลติกัลโดยใช้โค้งต้นแบบ** (analytical method using type curve) เป็นวิธีใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ในการแปลความหมายโดยสร้างเป็นแผนภูมิสำเร็จรูป เพื่อสะดวกในการคำนวณค่าบรรยายต่อไปนี้จะกล่าวถึง กรณีศึกษาที่พบมาก คือ 2 ชั้น รอยต่อแนวราบเดี่ยว (single horizontal interface) มีแนวคิดในการแปลความหมายข้อมูลว่า ชั้นที่ต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันมีจำนวนมีกี่ชั้น และแต่ละชั้นมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเท่าใด นั่นคือ ต้องการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นที่ 1 ( $\rho_1$ ) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นที่ 2 ( $\rho_2$ ) และความลึกถึงรอยต่อแนวราบ (Z).

ขั้นตอนการแปลความหมาย มีดังนี้

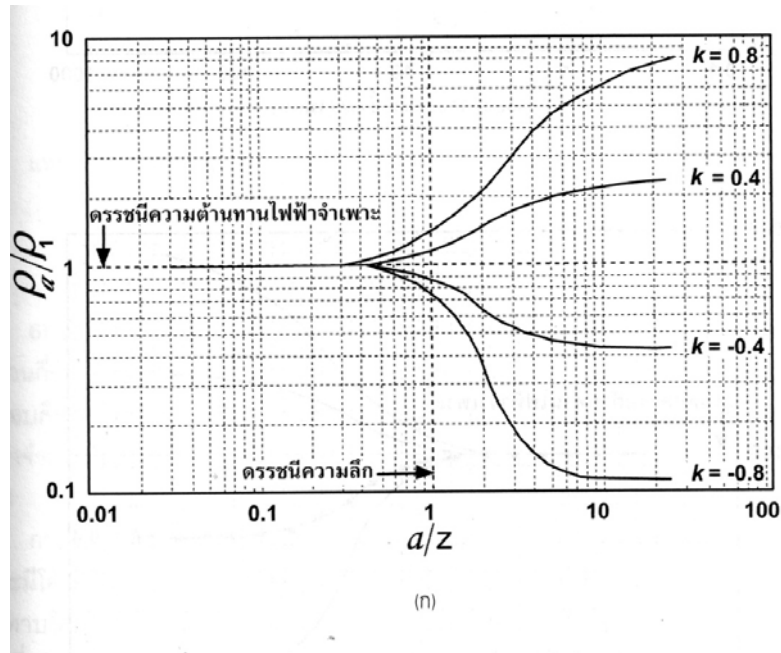
1. **เตรียมแผนภูมิเส้นโค้ง** 2 ชนิด ดังนี้

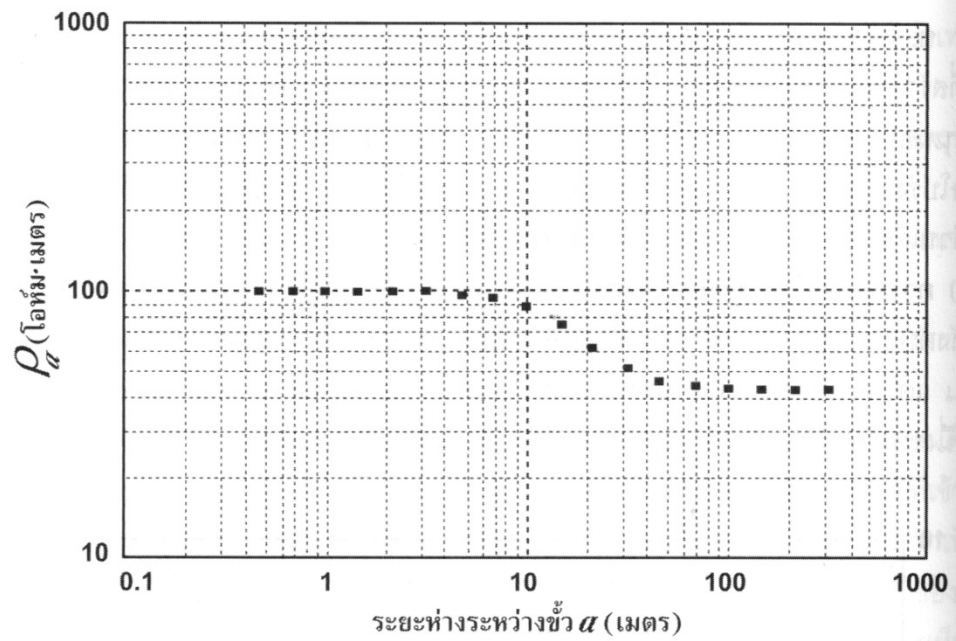
ก. **โค้งต้นแบบ** (master curve, type curve) คือ แผนภูมิเชิงเส้นของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่สร้างขึ้นมาจากทฤษฎี แกนตั้ง คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสัมพันธ์ ( $\rho_2/\rho_1$ )



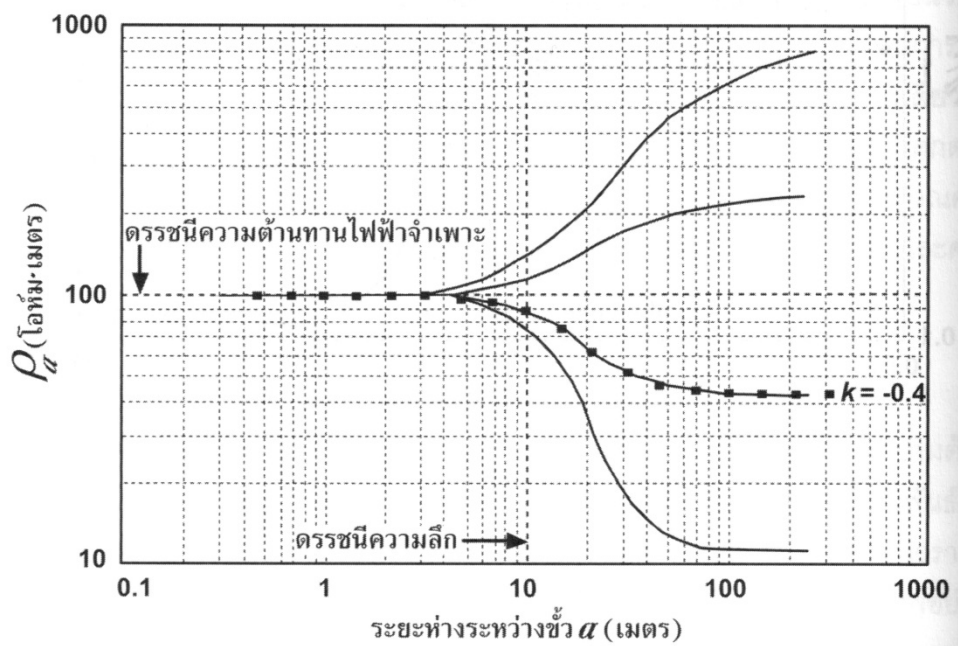
แกนนอน คือ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และความลึกถึงรอยต่อแนวราบ ( $a/Z$ ) เส้นโค้งแต่ละเส้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์  $k$  กำกับไว้ ดังแสดงในรูปที่ 13 แผนภูมิแผ่นนี้มักถูกพิมพ์อย่างถาวร ทนทาน และใช้งานได้หลายครั้ง ผู้อ่านสามารถค้นหาเพิ่มเติมสำหรับโค้งเส้นแบบ แบนเวเนอร์ ได้ จาก Mooney and Wetzel (1956) และแบบชลัมเบอร์เจ จาก Compagnic Generale de Geophysique (1963) คำอธิบายตัวอย่างต่อไปนี้อธิบายไว้เฉพาะวิธีเวเนอร์ ผู้อ่านจะได้ศึกษาวิธีชลัมเบอร์เจในระดับที่สูงขึ้น.

ข. โค้งเส้นข้อมูล (field curve, data curve) คือ แผนภูมิจุดของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ปรากฏที่สร้างขึ้นมาจากการสำรวจในภาคสนาม แกนตั้ง คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ( $\rho_2$ ) แกนนอน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ( $a$ ) แผนภูมิแผ่นนี้จะเป็นแผนภูมิที่วาดลงบนกระดาษโปร่งแสง เช่น กระดาษใช้สำหรับเขียนแบบ ดังแสดงในรูปที่ 13 โค้งข้อมูลและโค้งต้นแบบต้องมีมาตราส่วนเดียวกัน และสร้างบนแกนลอการิทึมทั้งคู่.





(ข)



(ค)

ที่มา: Burger 1992

รูปที่ 13. วิธีอนาลิตคัลโดยใช้โค้งต้นแบบของเวนเนอร์ 2 ชั้น.

2. การทาบโค้งข้อมูลบนโค้งต้นแบบ (curve matching) เมื่อวางโค้งข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 13 ทาบลงบนโค้งต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 13 แล้วเลื่อนให้แกนนอนทั้งสองหรือแกนตั้งทั้งสองของแผนภูมิทั้งคู่ขนานกัน แต่ไม่จำเป็นต้องซ้อนกันพอดี จนกว่าจะ พบว่า จุดข้อมูลต่างๆ มีการซ้อนทับลงบนเส้นใดเส้นหนึ่งของโค้งต้นแบบ แล้วหยุดไว้ที่ตำแหน่งนี้ จะได้ดังแสดงในรูปที่ 13 อ่านค่าได้  $k = -0.4$ .

3. อ่านค่าบนแกนตั้ง ให้อ่านค่าบนแกนตั้งของโค้งต้นแบบ เช่น  $\rho_a/\rho_1 = 1$  เรียกค่านี้ว่า **ดรรชนีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ** (resistivity index) จากนั้น ให้อ่านค่าบนแกนตั้งของโค้งข้อมูล เช่น  $\rho_a = 100$  เมื่อนำค่า  $\rho_a = 100$  แทนค่าลงใน  $\rho_a/\rho_1 = 1$  จะได้ว่า  $\rho_1 = 100$  ซึ่งเป็นคำตอบที่ 1 ในจำนวน 3 คำตอบที่ต้องการค้นหา.

4. อ่านค่าบนแกนนอน ให้อ่านค่าบนแกนนอนของโค้งต้นแบบ เช่น  $a/Z = 1$  เรียกค่านี้ว่า **ดรรชนีความลึก** (depth index) จากนั้น ให้อ่านค่าบนแกนนอนของโค้งข้อมูล เช่น  $a = 10$  เมื่อนำค่า  $a = 10$  แทนค่าลงใน  $a/Z = 1$  จะได้ว่า  $Z = 10$  ซึ่งเป็นคำตอบที่ 2 ที่ต้องการค้นหา.

5. นำค่าสัมประสิทธิ์มาใช้คำนวณ ค่านี้กำกับไว้ข้างโค้งต้นแบบ นำมาใช้คำนวณ  $\rho_2$  ในสูตรข้างล่างนี้ เช่น  $k = -0.4$  ในกรณีที่ข้อมูลระหว่างเส้นโค้งต้นแบบสองเส้น ต้องหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์  $k$ .

$$\text{คำนวณ } \rho_2 = \left( \frac{1+k}{1-k} \right) \rho_1 \quad 5.19$$

แทนค่า  $k = -0.4$  และ  $\rho_1 = 100$  (จากข้อ 3)

$$\rho_2 = \left( \frac{1-0.4}{1+0.4} \right) 100 = 42.9 \quad 5.20$$

6. แปลความหมายโดยรวม จากคำถามที่ว่าชั้นที่มีความต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันมีจำนวนกี่ชั้น คำตอบ คือ 2 ชั้น จากคำถามที่ว่าแต่ละชั้นมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเท่าใด คำตอบ คือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นที่ 1 ( $\rho_1$ ) มีค่า 100 โอห์ม•เมตร ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นที่ 2 ( $\rho_2$ ) มีค่า 42.9 โอห์ม•เมตร และความลึกถึงเส้นแบ่งแนวราบ ( $Z$ ) มีค่า 10 เมตร.

การเทียบเส้นโค้งกรณีชั้นหิน 2 ชั้น ทำได้ง่ายเพราะมีเส้นโค้งต้นแบบเพียงอันเดียว แต่ถ้าเกิน 3 ชั้น จะมีโค้งต้นแบบจำนวนมาก ผู้อ่านจะได้เรียนในระดับที่สูงขึ้น ต่อมา มีการพัฒนาคอมพิวเตอร์การทาบโค้งข้อมูลกับโค้งต้นแบบ จึงลดน้อยลง ผู้สำรวจจะใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์

ให้ทำงานตามที่อธิบายไว้ข้างต้นแทนมนุษย์ แต่ยังมีมาตรฐานแผนภูมิเพื่อหาข้อขัดแย้งข้อมูลกับโครงสร้างแบบ  
ในขณะที่สำรวจในภาคสนาม เพื่อให้ได้ผลเบื้องต้นว่า ชั้นที่ต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกัน มีจำนวนกี่  
ชั้น และแต่ละชั้นมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเท่าใด ก่อนนำผลเบื้องต้นนี้มาเปรียบเทียบกับ  
ผลลัพธ์จากคอมพิวเตอร์ เป็นการป้องกันความผิดพลาด.

ข้อจำกัดของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ มีดังนี้

1. การแปลความหมายบ่งบอกได้เพียงแต่ว่า มีน้ำหรือไม่มีน้ำ แต่ไม่สามารถบอกชนิดของ  
ตะกอนได้อย่างชัดเจน ภาพที่แสดงจากการแปลความหมาย คือ ภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า  
จำเพาะ ทำให้ต้องขุดเจาะหลุมเพื่อพิสูจน์ความจริง.

2. การสำรวจได้ผลดีไม่เกิน 2 ชั้น คือ ชั้นที่ไม่มีน้ำ และชั้นมีน้ำ แม้ว่าจะมีวิธีการแปล  
ความหมายข้อมูลจากการสำรวจเกินกว่า 2 ชั้น แต่มักพบว่า ไม่ค่อยแม่นยำ ยิ่งชั้นน้ำอยู่ลึกยิ่งไม่  
แม่นยำ เพราะกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงจะไปผ่านตะกอนหรือหิน รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินที่มีเนื้อ  
หลายชนิด ทำให้สัญญาณที่ตรวจวัด เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลกลับมาที่ขั้ววัดพื้นดินได้ง่าย การแปล  
ความหมายจึงผิดพลาด อีกทั้งการให้กระแสไฟฟ้าก็ต้องวางสายไฟฟ้า เป็นระยะทางไกลมากขึ้น  
จึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะกระแสไฟฟ้าอ่อนลง สายไฟฟ้ายาวไม่ถึงพื้นดินไม่เรียบ และ  
ปักวางขั้วไฟฟ้าได้ยาก.

## 1.5 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือสำรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีใช้ในประเทศไทยตามหน่วยงานราชการ เช่น  
กรมทรัพยากรธรณี, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ส่วนใหญ่ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ของ ABEM ประเทศ  
สวีเดน มีการใช้มากในช่วงประมาณ กว่า 10 ปี และ Iris Instrument ประเทศฝรั่งเศส หรือ  
ผลิตภัณฑ์ของ AGI advanced geosciences, INC ประเทศอเมริกา เป็นต้น ถึงแม้ว่าเครื่องมือเหล่านี้  
จะมีการสร้างรุ่นใหม่ ๆ ออกมา แต่ที่ใช้ในบ้านเราส่วนใหญ่ยังคงเป็นรุ่นเก่าอยู่ เนื่องจากต้องใช้  
งบประมาณสูงในการซื้อรุ่นใหม่.

วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการหาแหล่งน้ำบาดาลอย่างได้ผล โดยการ  
ใช้ระบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบหยั่งลึก (depth sounding) (Kollert 1969). ใช้เทคนิคการวางขั้วไฟฟ้า  
แบบหยั่งลึกหาโพรงใต้ดินที่เป็นแหล่งน้ำบาดาลอย่างได้ผลดีในหินดานที่เป็นหินปูน เมื่อมีการนำ  
เทคนิคสมัยใหม่ ด้วยการสำรวจวิธีการสร้างภาพค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิง 2 มิติประยุกต์ใช้ในการ

สำรวจ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและครอบคลุมพื้นที่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนเพื่อนำเอาทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

สวนบุรี (2549) ได้เริ่มศึกษาระบบน้ำใต้ดิน ด้วยเทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิง 2D-3D บริเวณต้นน้ำของน้ำตกวังก้านเหลือง สามารถแสดงขอบเขตของน้ำใต้ดินในเขตหินปูนได้ชัดเจน และยังได้นำเทคนิคที่คล้ายกัน แต่พัฒนาวิธีการวัดค่าให้ได้ลึกมากขึ้นโดยทำการศึกษาแหล่งทรัพยากรน้ำบาดาล.

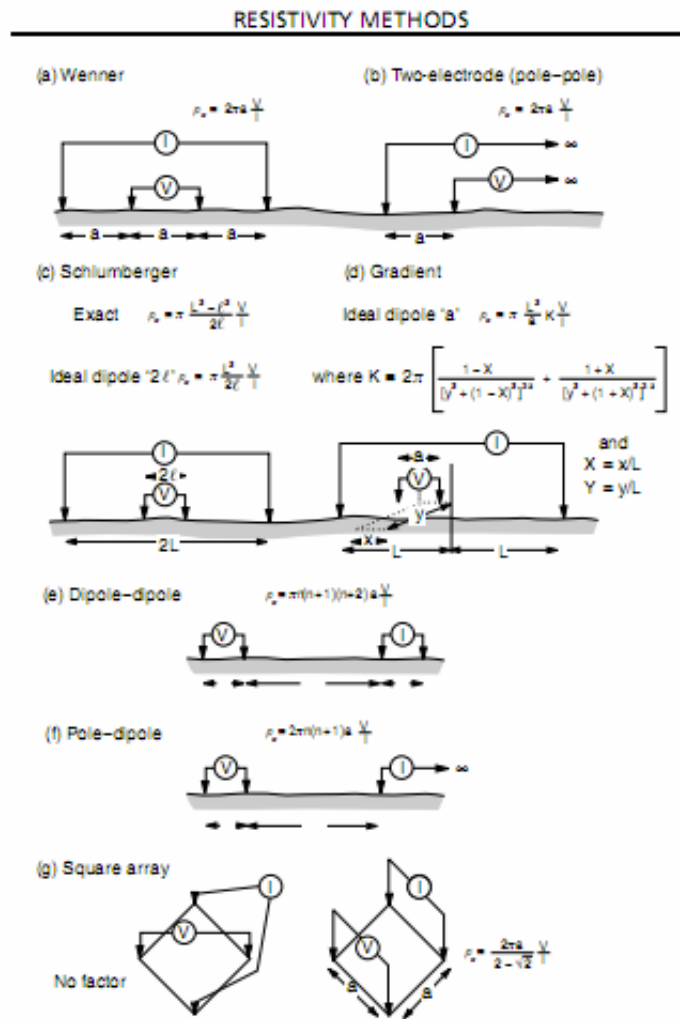
หาชั้นน้ำบาดาลสามารถกำหนดเขตศักยภาพของน้ำบาดาล บริเวณพื้นที่ภาคตะวันออกอย่างได้ผลมาแล้ว เช่น ทำการศึกษาแหล่งทรัพยากรน้ำใต้ดิน บริเวณวิทยาเขตศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สามารถกำหนดเขตศักยภาพน้ำใต้ดินที่ให้น้ำมากหรือให้น้ำจากรอยแตกของหินแกรนิตได้ (สวนบุรี 2549) และบริเวณเป็นเขตของหินแกรนิตมีศักยภาพน้ำใต้ดินต่ำ เช่น บริเวณสวนสัตว์เปิดเขาเขียว อำเภอศรีราชา ศึกษาบบน้ำบาดาล กำหนดจุดเจาะน้ำใต้ดินได้ผลดี (สวนบุรี และคณะ 2550) เมื่อปรับปรุงวิธีการให้ข้อมูลที่ลึกและละเอียดมากขึ้น เพื่อการศึกษาหาแหล่งน้ำใต้ดินของหินปูน จนพัฒนาวิธีการ เรียกว่า resistivity scanning (Suanburi and Wathanaku 2009) ที่สามารถศึกษาลักษณะน้ำใต้ดินได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะชั้นน้ำใต้ดินที่อยู่ใกล้ชายทะเลหรือบนเกาะ เพื่อการจัดการใช้น้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ และหลีกเลี่ยงการรุกล้ำจากน้ำเค็มเข้าผสมน้ำจืด (Suanburi 2010).

ดังนั้น ในการพัฒนาเครื่องมือสำรวจ, ระบบและวิธีการสำรวจหาน้ำบาดาล อย่างได้ผลมาแล้ว น่าจะใช้ในการศึกษาหาศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลได้.

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

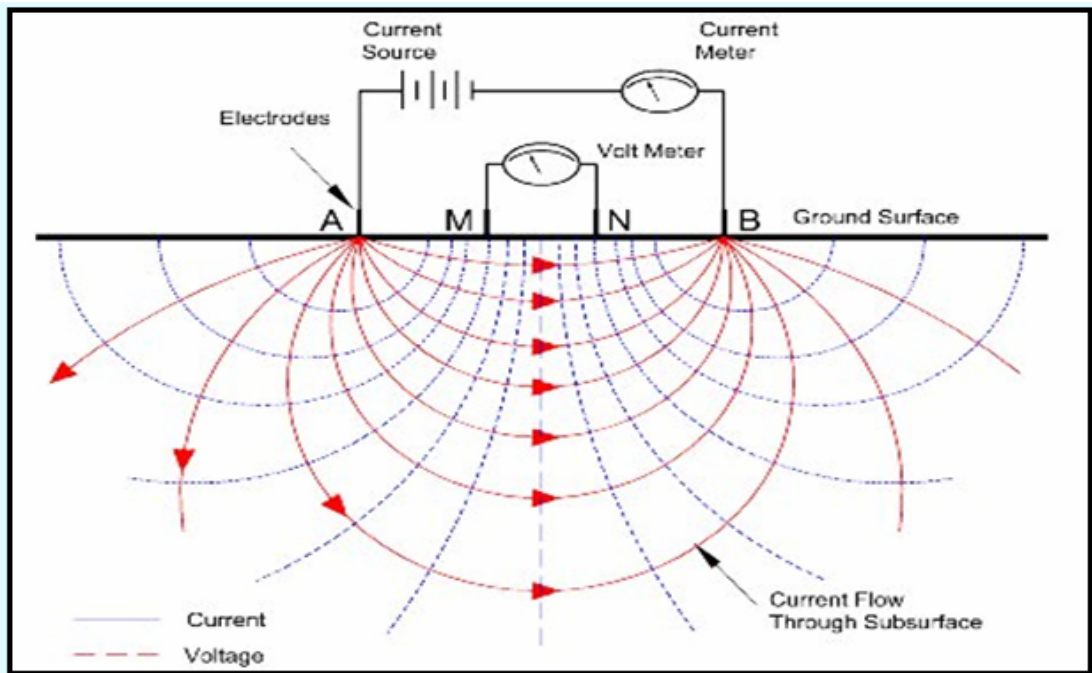
### 2.1 การออกแบบอุปกรณ์ในการวัดค่าสภาพความต้านไฟฟ้าของดิน

การวัดค่าทางไฟฟ้ามีได้หลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 14 แต่ลักษณะที่นำมาใช้เป็นตัวแบบในการศึกษานี้จะเป็น ดังแสดงในรูปที่ 15.



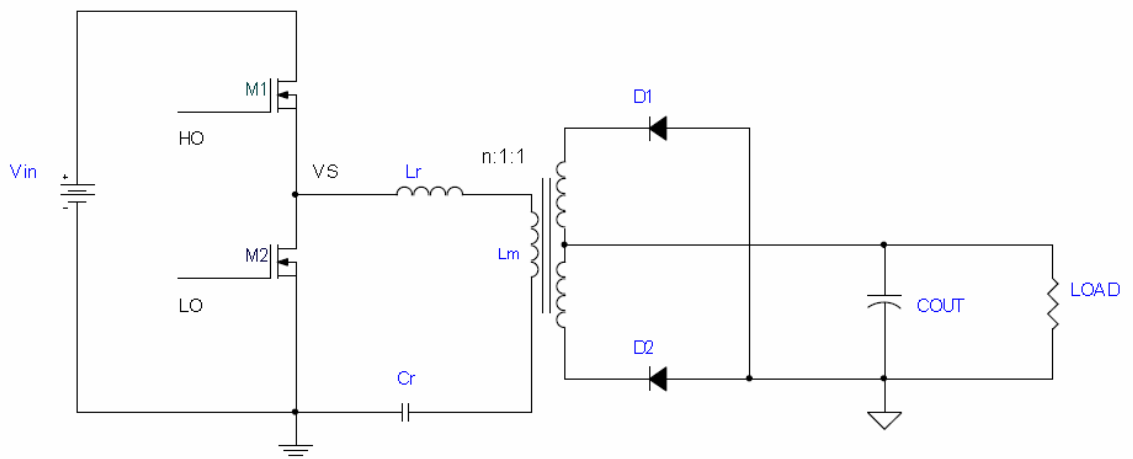
**Figure 6.1** Some common electrode arrays and their geometric factors. (a) Wenner; (b) Two-electrode; (c) Schlumberger; (d) Gradient; (e) Dipole-dipole; (f) Pole-dipole; (g) Square array; (left) Diagonal; (right) Broadside. There is no geometrical factor for the diagonal square array, as no voltage difference is observed over homogeneous ground.

รูปที่ 14. การวัดค่าทางไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ.



รูปที่ 15. ลักษณะการวัดที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้.

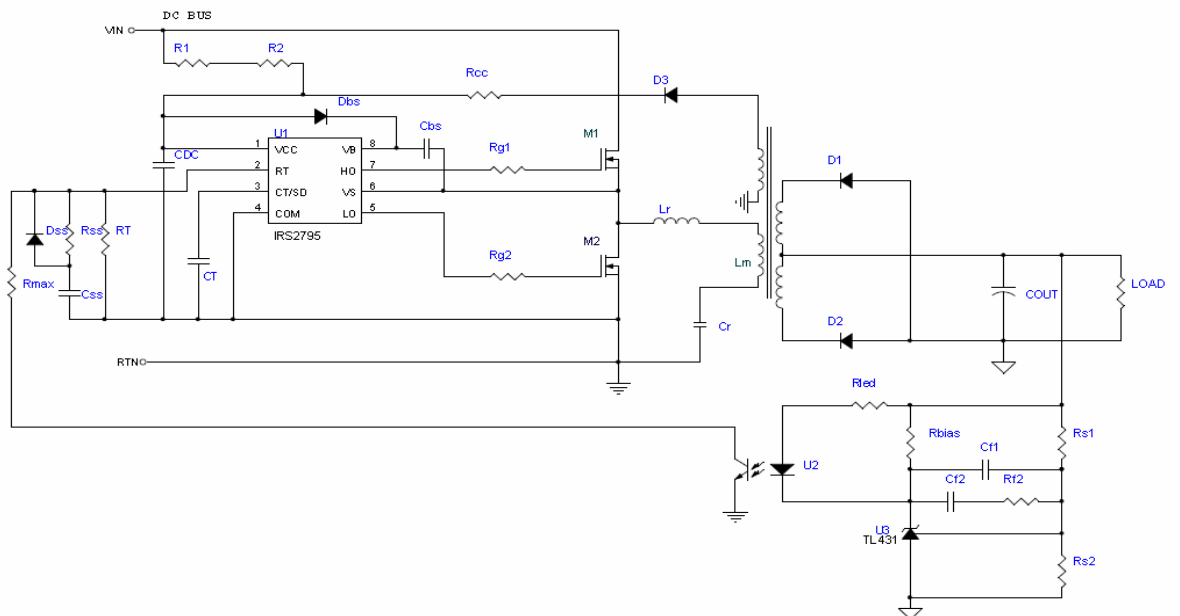
เครื่องมือที่ได้ออกแบบมีส่วนของวงจรสำคัญ ดังนี้



รูปที่ 16. วงจรที่ใช้สำหรับการสร้างกระแสไฟฟ้ากำลังสูง.

วงจรนี้ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ขนาด 300 วัตต์ (100 โวลต์, 3 แอมแปร์) เพื่อใช้สร้างกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่าง Electrode เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าที่พื้นดิน วงจรที่ใช้เป็นวงจร Resonant Half – Bridge Converter ดังแสดงในรูปที่ 16.

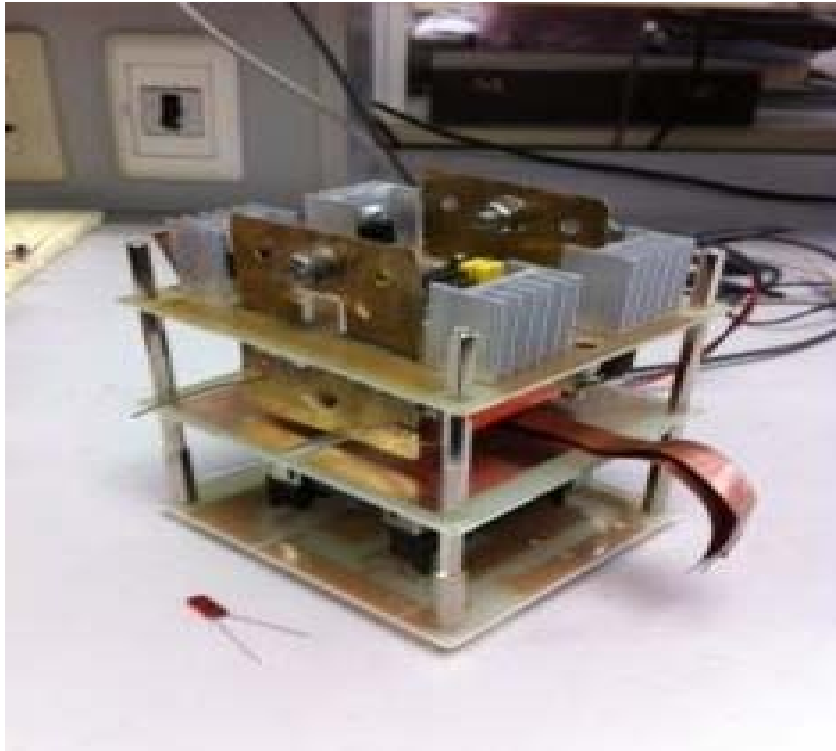
เมื่อนำมาประกอบกับส่วนควบคุมวงจรจะได้เป็นวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 17.



รูปที่ 17. วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้.

เมื่อประกอบแผงวงจรเป็นเครื่องออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 18





รูปที่ 18. เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้.

## 2.2 การทดสอบเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้

ได้ใช้หลอดไฟฟ้าเป็นโหลดแทนพื้นดินในการทดสอบการทำงานของเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 19.



รูปที่ 19. การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้.



รูปที่ 20. เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด.



รูปที่ 21. แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ที่ใช้เป็นตัวจ่ายกำลังงานให้เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้.

## 2.3 การทดสอบอุปกรณ์ในการวัดค่าสภาพความต้านไฟฟ้าของดินในห้องปฏิบัติการ

### 2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้.
2. มิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า ใช้ Digital multimeter ของ KYORITSU model 1009.
3. มิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ใช้ Digital multimeter ของ KYORITSU model 1009.
4. ภาตโคลนขนาด 20 x 38 x 22 เซนติเมตร ใส่ดินสูง 5 เซนติเมตร.
5. ภาตโคลนขนาด  $\varnothing$  60 x 86 เซนติเมตร ใส่ดินสูง 10 เซนติเมตร.
6. หมุดทองแดง ยาวประมาณ 5 เซนติเมตร.
7. ไม้บรรทัดพลาสติกหนา 2.5 เซนติเมตร เจาะรูบังคับระยะ (a).
8. แบตเตอรี่ 12 โวลต์.
9. สายไฟพร้อมคลิป หรือคอนเนกเตอร์.

### 2.3.2 วิธีการทดลอง

1. นำมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าติดตั้ง (แบบอนุกรม) เข้ากับเครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ แล้วต่อเข้ากับหมุดทองแดงคู่นอก (คู่ AB หรือ คู่  $C_1C_2$  ดังแสดงในรูปที่ 22) จากนั้น ติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับเครื่องฯ.
2. นำมิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเข้ากับหมุดทองแดงคู่ใน (คู่ MN หรือ คู่  $P_1P_2$  ดังแสดงในรูปที่ 22).
3. วางไม้บรรทัดบังคับระยะลงบนภาตโคลน.
4. บนภาตโคลนขนาด 20 x 38 x 22 เซนติเมตร ให้ใช้ค่า a ตั้งแต่ 1.5 ถึง 12 เซนติเมตร สำหรับการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ ทำการวัดค่ากระแส และความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าไว้.
5. บนภาตโคลนขนาด  $\varnothing$  60 x 86 เซนติเมตร ให้ใช้ค่า a ตั้งแต่ 1.5 ถึง 20 เซนติเมตร สำหรับการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ ทำการวัดค่ากระแส และความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าไว้.
6. นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานปรากฏ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังสมการ

$$\rho_{app} = \left(\frac{V}{I}\right)K$$

เมื่อ  $\rho_{app}$  = ค่าสภาพความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity)

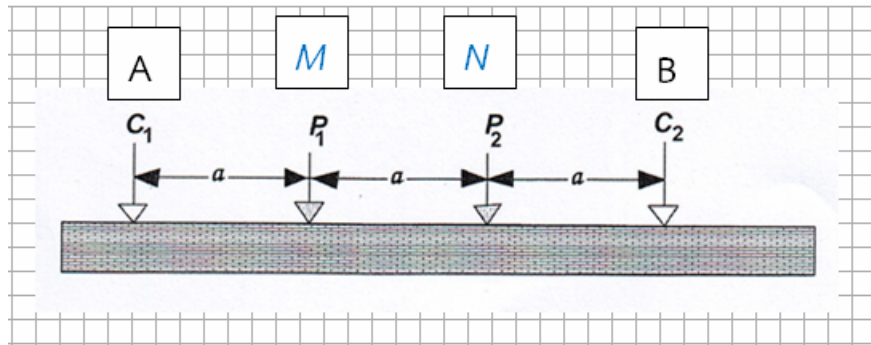
V = ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากหมุดคู่ใน

$I$  = ค่ากระแสที่จ่ายออกมาได้ที่หมุดคู่นอก

$K$  =  $2\pi a$

7. นำค่าสภาพความต้านทานปรากฏที่คำนวณได้มาพลอตกราฟ (graph plotting) เทียบกับค่าความลึก effective depth ( $Z$ ) โดยกำหนดให้  $Z = AB/2$  และให้  $Z$  อยู่บนแกน X.

8. เมื่อชั้นค่าความต้านทานเปลี่ยนจะทำให้ค่าความชันของกราฟเปลี่ยนไป ให้ทำการเฉลี่ยกราฟในช่วงชั้นค่าความต้านทานต่างๆ ด้วยกราฟเส้นตรง จุดตัดของกราฟเส้นตรงเมื่อลากลงมาตั้งฉากกับแกน X ก็จะได้ค่าระยะความลึกของชั้นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง.



รูปที่ 22. การจัดวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ.

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการทดสอบ

ในเบื้องต้น จากการทดสอบงานออกแบบเครื่องสร้างไฟฟ้ากระแสตรงในบทที่ 2 พบว่า เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ที่ได้ออกแบบมานี้สามารถปรับค่าโวลเตจในการทำงานตั้งแต่ประมาณสิบกว่าโวลต์จนถึง 100 โวลต์ ได้ ในส่วนของกระแสสามารถปรับใช้งานได้จนถึงประมาณ 1 แอมแปร์ ซึ่งเป็นไปตามความประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพกำลังงานขึ้นไปอีก ก็สามารถจะกระทำตามวงจรนี้ได้ แต่ต้องเลือกใช้การปรับปรุงตัดแปลงอุปกรณ์ในวงจรให้เหมาะสมสำหรับกำลังงานที่ต้องการใช้งาน.

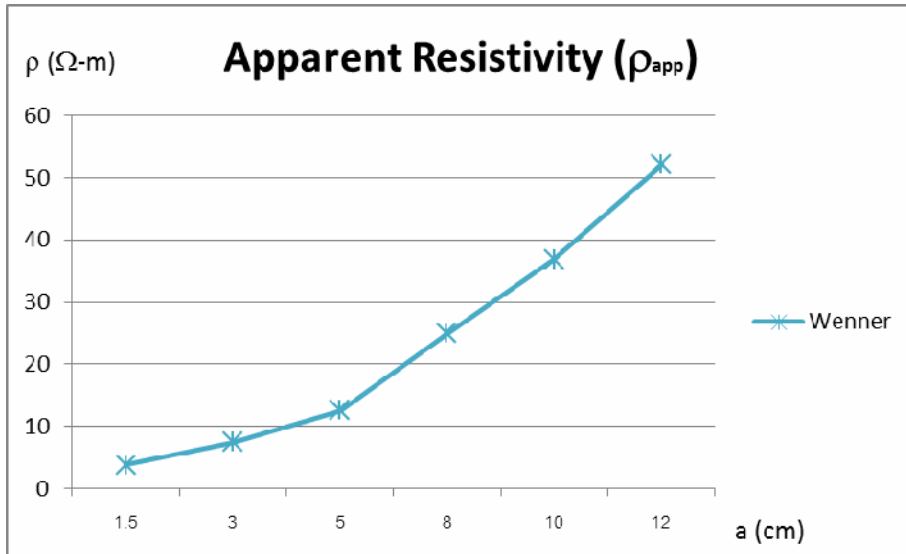
##### 3.1.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ถาดโคลน (mud pan) ที่ได้จัดทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีหลายขนาดด้วยกัน

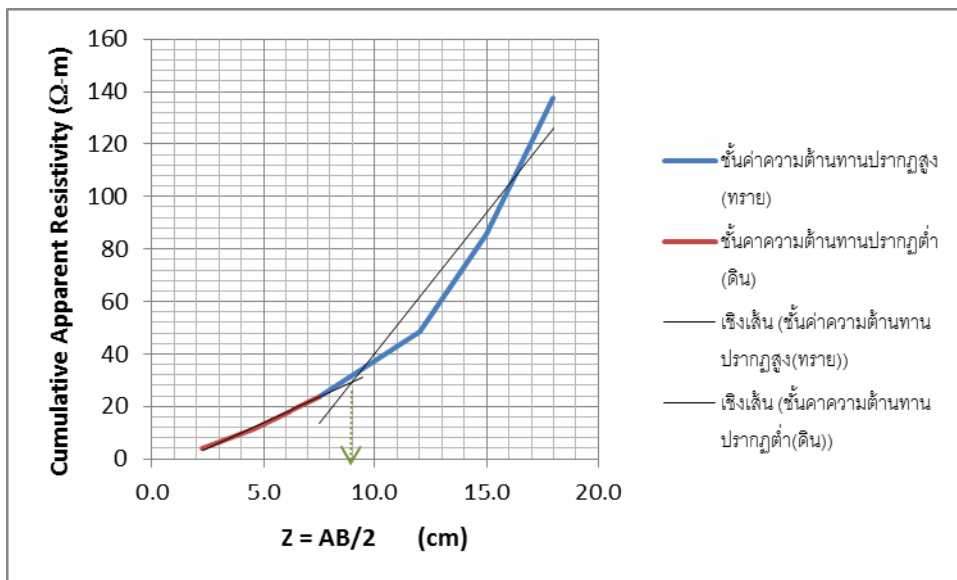
1. สำหรับถาดโคลนขนาด ขนาด 20 x 38 x 22 เซนติเมตร ชั้นบนใส่ดินเหนียวสูงประมาณ 5 เซนติเมตร ชั้นที่เหลือเป็นทราย ได้ใช้ค่า  $a$  ตั้งแต่ 1.5 ถึง 12 เซนติเมตร สำหรับการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรง และความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าไว้ โดยใช้เครื่องสำหรับสร้างกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่กล่าวแล้ว (ในที่นี้ใช้ประมาณ 100 โวลต์) ทำการปล่อยกระแสเข้าสู่ระบบที่จะทำการวัด (ณ ตำแหน่ง AB) แล้ววัดหาค่าสนามความต่างศักย์ (ณ ตำแหน่ง MN) ได้ผลออกมา ดังแสดงในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. การหาค่าความต้านทานปรากฏของชั้นดินในถาดโคลนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง  
(ความสูงของชั้นดิน  $\approx$  5 เซนติเมตร)

$a$ (cm)	$K=2\pi a$	$V_{MN}$ (V)	$I$ (mA)	$\rho_{Wenner}$ (ohm-m)	$\Sigma\rho_{app}$	$Z = AB/2$
1.5	9.4248	2.79	69.9	4	4	2.3
3	18.8496	2.366	60.6	7	11	4.5
5	31.416	2.306	57.9	13	24	7.5
8	50.2656	2.605	52.5	25	49	12.0
10	62.832	2.971	50.6	37	85	15.0
12	75.3984	3.255	47.1	52	138	18.0

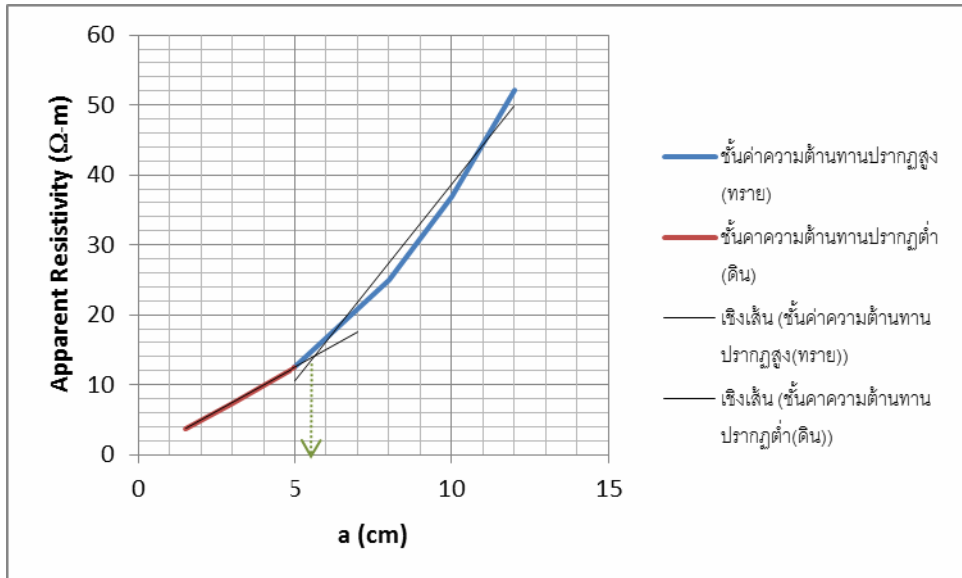


รูปที่ 23. ค่าความต้านทานปรากฏเทียบกับระยะ  $a$  ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก (20 x 38 x 22 เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร.



รูปที่ 24. ค่าความต้านทานปรากฏสะสม (cumulative apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth;  $Z$ ) ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก (20 x 38 x 22 เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร.

จากกราฟจะเห็นจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นตรงของสองช่วงชั้นค่าความต้านทานที่แสดงถึงความลึกของชั้นแรก (ดิน) ว่าลึกประมาณ 9 เซนติเมตร.



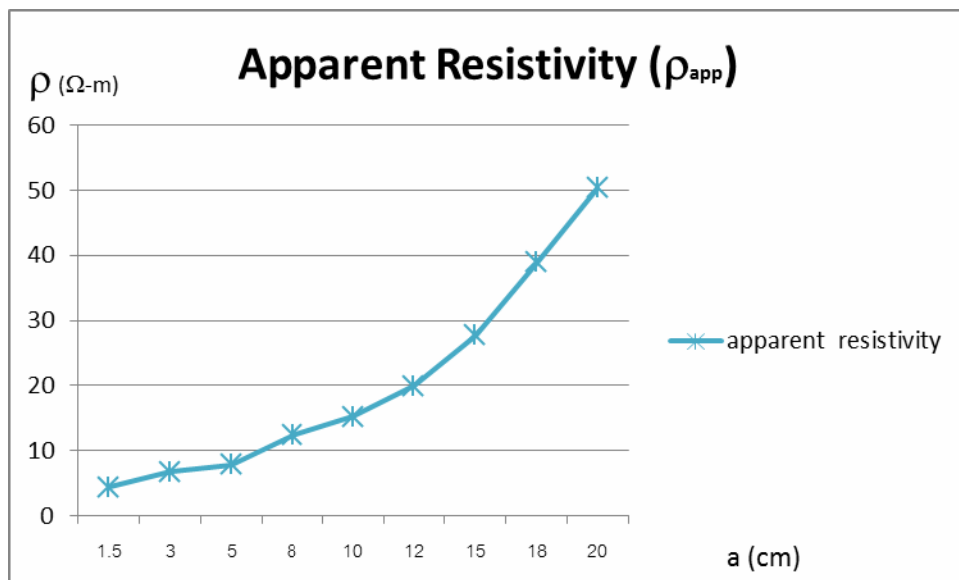
รูปที่ 25. ค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะ  $a$  ที่ได้จากถาดโคลนขนาดเล็ก ( $20 \times 38 \times 22$  เซนติเมตร) ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 5 เซนติเมตร.

จากกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นตรงของสองช่วงชั้นค่าความต้านทานที่แสดงถึงความลึกของชั้นแรก (ดิน) ว่าประมาณ 5.5 เซนติเมตร ซึ่งจะเห็นว่าใกล้เคียงกันกับความจริงมาก.

2.) สำหรับถาดโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร มีชั้นดินสูง 10 เซนติเมตร ชั้นที่เหลือเป็นชั้นอิฐผสมทราย ได้ใช้ค่า  $a$  ตั้งแต่ 1.5 ถึง 20 เซนติเมตร ด้วยการจัดวางการตรวจวัดแบบเวนเนอร์ ได้ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรง และความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าไว้ โดยใช้เครื่องสำหรับสร้างกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่กล่าวแล้ว ทำการปล่อยกระแสเข้าสู่ระบบที่จะทำการวัด (ณ ตำแหน่ง AB) แล้ววัดหาค่าสนามความต่างศักย์ (ณ ตำแหน่ง MN) ได้ผลออกมา ดังแสดงในตารางที่ 2.

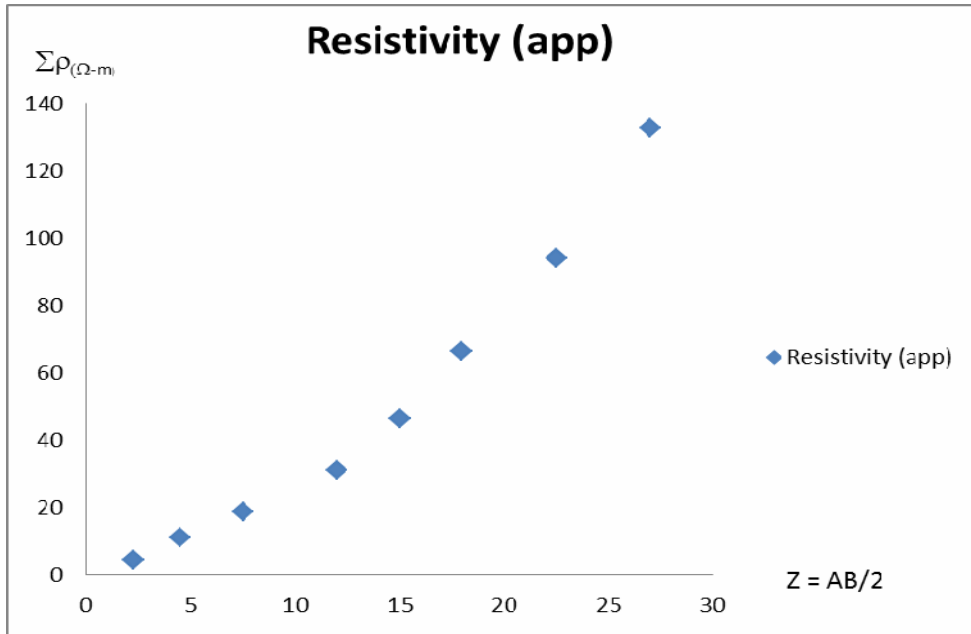
ตารางที่ 2. การหาค่าความต้านทานปรากฏของชั้นดินในภาคโคลนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง  
 ความสูงของชั้นดิน  $\approx 10$  เซนติเมตร ขนาดถังภาคโคลน  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร

a (cm)	$K=2\pi a$	$V_{MN}$ (V)	I (mA)	$\rho_{Wenner}$ ( $\Omega\text{-m}$ )	$\Sigma\rho$ ( $\Omega\text{-m}$ )	Z = AB/2
1.5	9.4248	2.407	52.7	4	4	2.25
3	18.8496	1.83	51.7	7	11	4.5
5	31.416	1.171	47	8	19	7.5
8	50.2656	1.138	46.5	12	31	12
10	62.832	1.139	47	15	46	15
12	75.3984	1.259	47.6	20	66	18
15	94.248	1.364	46.4	28	94	22.5
18	113.0976	1.536	44.7	39	133	27
20	125.664	1.547	38.62	50	183	30

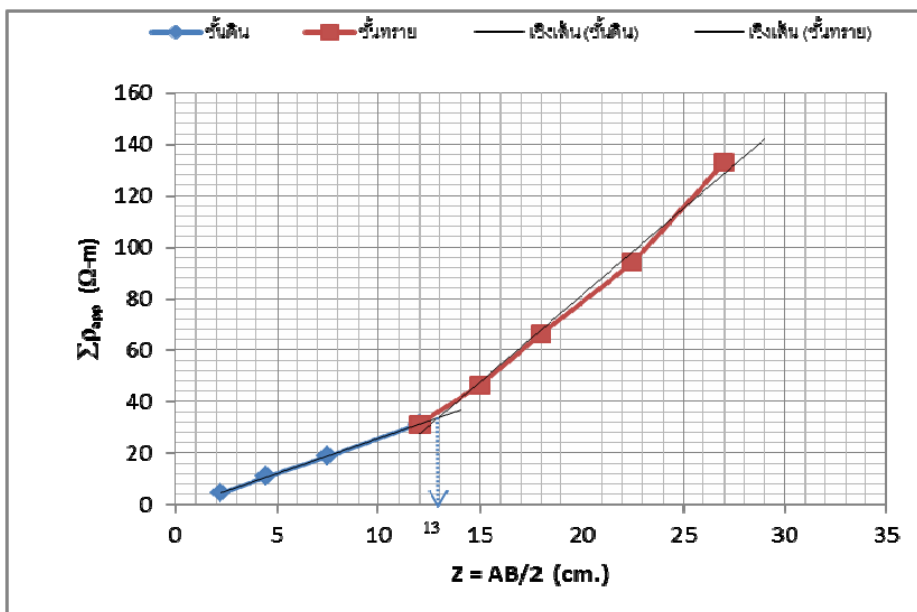


รูปที่ 26. ค่าความต้านทานปรากฏเทียบกับระยะ a ที่ได้จากภาคโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร.



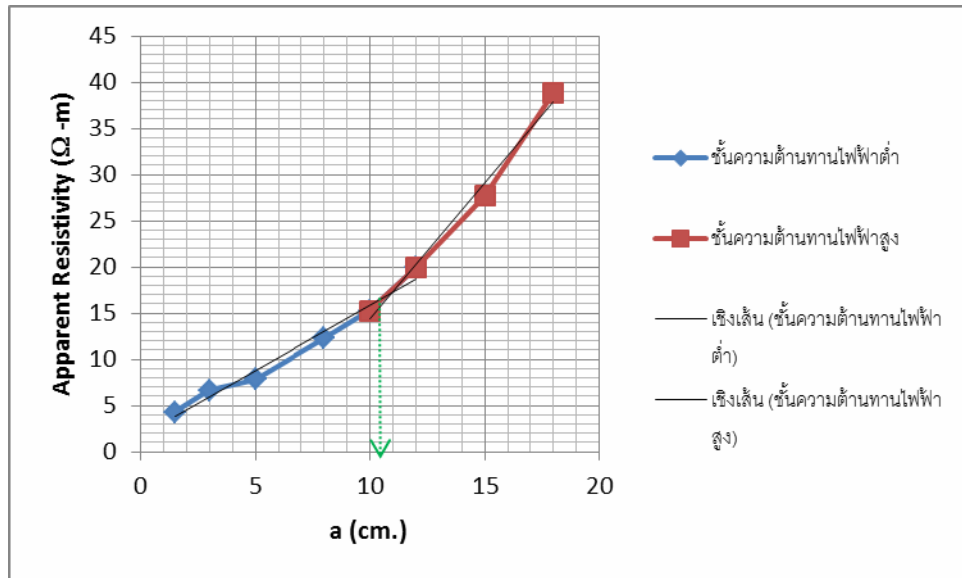


รูปที่ 27. การกระจายของค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth; Z) ที่ได้จากถาดโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร.



รูปที่ 28. ค่าความต้านทานปรากฏสะสม (cumulative apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth; Z) ที่ได้จากถาดโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร.

จากกราฟจะเห็นจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นตรงของสองช่วงชั้นค่าความต้านทานที่แสดงถึงความลึกของชั้นแรก (ดิน) ว่าลึกประมาณ 13 เซนติเมตร.



รูปที่ 29. ค่าความต้านทานปรากฏ (apparent resistivity) เทียบกับระยะ  $a$  ที่ได้จากภาคโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร ที่มีหน้าชั้นดินสูงประมาณ 10 เซนติเมตร.

จากกราฟนี้แสดงให้เห็นว่าจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นตรงของสองช่วงชั้นค่าความต้านทานที่แสดงถึงความลึกของชั้นแรก (ดิน) ว่าประมาณ 11 เซนติเมตร ซึ่งการประเมินนี้จะใกล้เคียงกันกับความจริงมาก.

Hermann (2001) ได้ใช้ค่าความต้านทานปรากฏสะสม (cumulative apparent resistivity) เทียบกับระยะความลึกประสิทธิผล (effective depth of penetration;  $Z$ ) มาใช้ในการประเมินค่าความลึกของชั้นผิวดินจากภาคโคลน พบว่า ให้ประสิทธิภาพความถูกต้องแม่นยำในการประเมินสูงมาก แต่ในการศึกษาทดลองนี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก อาจเป็นเพราะการทำภาคโคลนของการศึกษาวิจัยนี้เป็นดินเหนียว การหล่อลงไปภาคโคลนต้องนำดินมาละลายน้ำก่อนจึงจะสามารถเทลงบนภาคโคลนแล้วเกลี่ยได้สม่ำเสมอทั่วผิวน้ำ ดังนั้น อาจเป็นไปได้ว่าน้ำโคลนได้ซึมลึกลงไปชั้นอิฐทรายทำให้การแบ่งช่วงชั้นไม่สามารถกระทำได้อย่างชัดเจนนัก หรืออาจเป็นเพราะดินเหนียวที่หล่อลงไปสามารถอุ้มน้ำได้ดี จึงยังมีความชื้นตกค้างอยู่สูงมากจึงอาจมีลักษณะใกล้เคียงเป็นตัวนำมากกว่าตัวต้านทาน การจำลองเป็นโมเดลเพื่อการศึกษาครั้งนี้จึงอาจคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตามจะ

เห็นได้ว่าอุปกรณ์และกรรมวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแยกแยะความแตกต่างของชั้นดินชั้นหินใต้พื้นดินได้เป็นอย่างดี อุปกรณ์เพื่อการศึกษาคุณลักษณะทางธรณีฟิสิกส์ที่พัฒนาขึ้นจากโครงการนี้สามารถใช้สำหรับการสำรวจ, ศึกษาและวิจัยทางด้านธรณีฟิสิกส์ได้เป็นอย่างดี.

#### 4. สรุปผลการทดลอง

อุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นในโครงการนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาคุณลักษณะทางด้านธรณีฟิสิกส์ได้เป็นอย่างดี ตัวเครื่องใช้งานได้ง่าย มีราคาไม่สูงมากนัก อยู่ในวิสัยที่ผู้ใช้งานสามารถจัดหา มาไว้เป็นอุปกรณ์ประจำตัวได้ มีความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของสภาพพื้นพิภพใต้ดิน ได้ดี ไม่ด้อยไปกว่าอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด มีความสามารถในการจำแนกความแตกต่างของ ชั้นดินได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นใต้ดินที่มีสภาพความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมี ปริมาณน้ำขังอยู่.

เครื่องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงแบบที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ที่ได้ออกแบบมานี้สามารถปรับค่า โวลเตจในการทำงานตั้งแต่ประมาณสิบกว่าโวลต์จนถึง 100 โวลต์ ได้ ในส่วนของกระแส สามารถ ปรับใช้งานได้จนถึงประมาณ 1 แอมแปร์ ซึ่งเป็นไปตามความประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น ในกรณี ที่ต้องการพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพกำลังงานขึ้นไปอีก ก็สามารถจะกระทำตามวงจรนี้ได้ แต่ต้อง เลือกใช้การปรับปรุงดัดแปลงอุปกรณ์ในวงจรให้เหมาะสมสำหรับกำลังงานที่ต้องการใช้งาน สามารถ ใช้งานได้นานตามกำลังของแบตเตอรี่ เมื่อต้องการใช้งานในสนามเป็นเวลานานอาจต้องเลือกใช้ แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการใช้งานที่กำลังงานสูงๆ เป็นเวลานานๆ.

## 5. ข้อเสนอแนะ

เครื่องมือวัดนับเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั่วไป การผลิตจะต้องใช้แรงงานฝีมือคุณภาพสูงกว่าการผลิตผลิตภัณฑ์ทั่วไป การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงเหล่านี้จะช่วยชดเชยการสูญเสียความสามารถในการแข่งขันจากการมีค่าแรงงานที่สูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ โดยเฉพาะประเทศเพื่อนบ้านรอบๆ ได้.

ทรัพยากรน้ำบาดาลเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่ามากอันหนึ่ง โดยเฉพาะในแถบที่แห้งแล้งไม่มีแหล่งน้ำอื่น หรือในฤดูแล้งสำหรับหลายพื้นที่ เพราะบ้านเราไม่มีหิมะที่จะละลายลงมาเป็นน้ำเหมือนในเมืองหนาว น้ำท่าในหลายพื้นที่มักจะหมดลงเมื่อฝนหยุดตกหรือเมื่อพ้นฤดูฝน, เครื่องสำรวจน้ำบาดาลนี้จะช่วยให้สามารถขุดเจาะน้ำบาดาลได้โดยมีความผิดพลาดน้อยลง ลดค่าใช้จ่ายจากการขุดเจาะน้ำบาดาลแล้วไม่ได้น้ำลงได้.

ต้นแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการเริ่มต้นการพัฒนาารายแรกๆ ของประเทศไทยในสาขาวิชาการทางด้านนี้ หากได้รับการสนับสนุนเพื่อเผยแพร่ให้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย ตลอดจนมีการส่งเสริมให้ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดขึ้นไปเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง เชื่อว่าจะสามารถเป็นอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือในระดับนานาชาติได้.

### การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

#### 1. การนำผลผลิตของโครงการไปใช้ประโยชน์

เครื่องต้นแบบและชุดอุปกรณ์ทดสอบต่างๆที่เป็นผลผลิตของโครงการจะสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัย หรือฝึกอบรมบุคลากร ของฝ่ายวิศวกรรม วว. ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นการเตรียมความพร้อมของฝ่ายในการเปิดให้บริการการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินที่อาจเกิดมีขึ้นในอนาคตได้ ซึ่งการนี้จะเป็นการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านน้ำของฝ่ายวิศวกรรม วว. ให้หลากหลาย และครบถ้วนมากยิ่งขึ้น.

เครื่องต้นแบบนี้ช่วยให้เห็นภาพหลักการทำงานพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการสำรวจทางธรณีวิทยาได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษางานทางด้านธรณีวิทยา หรืออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่อง เมื่ออุปกรณ์มีราคาไม่แพง ผู้ที่จะเข้าถึงและสามารถนำมาใช้งานก็จะมีมากยิ่งขึ้น จะเป็นการช่วยสร้างโอกาสให้เกิดการพัฒนาบุคลากรทางด้าน การสำรวจทางธรณีวิทยาและสาขาที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี.

### กลุ่มเป้าหมายที่จะนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. กลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม ที่ต้องการใช้น้ำบาดาลเป็นน้ำดิบ หรือเป็นวัตถุดิบหรือเป็นน้ำใช้ในกิจการ.
2. สถานศึกษาที่มีการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจทรัพยากรใต้ดิน จะสามารถมีกำลังซื้ออุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ไปประกอบการเรียนการสอนได้อย่างพอเพียง ทำให้สามารถขยายการรับนักศึกษาได้มากขึ้น นักศึกษาแต่ละคนจะสามารถเรียนรู้จากของจริงได้ไปพร้อมๆ กัน.
3. บริษัทที่ทำธุรกิจขายเครื่องมือเครื่องวัดวิเคราะห์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท.

### การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลผลิตของโครงการสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้พื้นที่ที่ต้องการจะศึกษา ในการตรวจวัดศักย์สนามไฟฟ้าถ้าต้องการวัดละเอียดกว่ามิเตอร์ที่ได้ติดตั้งไว้แล้วที่เครื่องก็สามารถนำมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูงมากมาต่อรวมเข้ากับวงจรเพื่อทำการวัดค่าด้วยก็ได้.

ผลผลิตที่สองเป็นกระบวนการประเมินเพื่อหาค่าความแตกต่างของชั้นดินด้วยเทคนิคการพล็อตกราฟ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำได้ง่าย แทบจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเลย สามารถบอกขนาดค่าความแตกต่างของชั้นดินได้ดีพอสมควร ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นการหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากเมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ที่ทำการศึกษาและอยู่ในระบบที่มีความแปรปรวนสูงอยู่โดยธรรมชาติ.

เมื่อสรุปผลผลิตของโครงการโดยภาพรวมแล้ว อาจกล่าวได้ว่าเครื่องที่ได้พัฒนาขึ้นมาในโครงการนี้ ถือเป็นการพัฒนาประดิษฐ์เครื่องมือสำรวจ ที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานในประเทศ และสามารถนำไปประยุกต์กับการหาแหล่งน้ำได้ ทั้งยังมีต้นทุนไม่สูงนักจะสามารถจำหน่ายในประเทศได้ในราคาที่ถูกมากเมื่อเทียบกับของต่างประเทศ.

### 5.1 คุณลักษณะทั่วไปของผลงานวิจัย

ชุดอุปกรณ์ของเครื่องวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ที่พัฒนาขึ้นมาในโครงการนี้ สามารถใช้ในการสำรวจสภาพของชั้นดินต่างๆ ได้พื้นพิภพของพื้นที่สำรวจ เพื่อใช้ประเมินศักยภาพในการเป็นแหล่งทรัพยากรต่างๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษานี้มุ่งเน้นที่การหาแหล่งทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตและใช้ในกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่แห้งแล้งหรือขาดแคลนน้ำจืด เครื่องวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำลังในการทำงาน เครื่องวัดค่าสภาพ

ความต้านทานไฟฟ้านี้ ได้ออกแบบโดยพยายามยึดแนวทางของการเป็นเครื่องมือวัดทางธรณีฟิสิกส์ที่ดี ซึ่งมักจะมีข้อพิจารณาหลักดังต่อไปนี้

- **Serviceability** หาที่ซ่อมได้ง่าย/มีคู่มือใช้งานที่เข้าใจได้ง่าย.
- **Power supplies** ใช้แบตเตอรี่แห้งได้จะสะดวกต่อการออกสนาม.
- **Data displays** สามารถมองเห็นได้ชัดในภาคสนาม หรือในสถานที่แสงแดด.
- **Hard copy printout** ควรกันน้ำหรือไม่เสียหายเมื่อโดนฝน.
- **Comfort** หอบหิ้วสะดวก/สพายป่าได้ง่าย/น้ำหนักเบา/พกพาติดตัวสะดวก.
- **Convenience** ใช้งานง่าย/ติดตั้งง่าย/ไม่แตกง่าย (เวลาใช้งานไม่ต้องระวังมาก).
- **Fieldworthiness** ปุ่มปรับ/ปุ่มควบคุมต่างๆทนทาน (ตกไม่แตกเวลาออกสนาม).
- **Automation** สามารถนำข้อมูลไปประเมินผลแบบบูรณาการได้ เช่น การประเมินร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ หรือถ้าสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ ก็จะช่วยให้การเก็บข้อมูลหรือประเมินผลหรือจัดทำรายงานสะดวกมากยิ่งขึ้น.

## 5.2 การนำผลผลิตของโครงการไปใช้ประโยชน์

เครื่องต้นแบบและชุดอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ ที่เป็นผลผลิตของโครงการจะสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัย หรือฝึกอบรมบุคลากร ของฝ่ายวิศวกรรม วว. ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นการเตรียมความพร้อมของฝ่ายในการเปิดให้บริการการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้ ซึ่งการนี้จะเป็นการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านน้ำของฝ่ายวิศวกรรม วว. ให้หลากหลาย และครบถ้วนมากยิ่งขึ้น.

เครื่องต้นแบบนี้ช่วยให้เห็นภาพหลักการทำงานพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการสำรวจทางธรณีวิทยาได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาทางด้านธรณีวิทยา หรืออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่อง เมื่ออุปกรณ์มีราคาไม่แพง ผู้ที่จะเข้าถึงและสามารถนำมาใช้งานก็จะมีมากยิ่งขึ้น จะเป็นการช่วยสร้างโอกาสให้เกิดการพัฒนาบุคลากรทางด้าน การสำรวจทางธรณีวิทยาและสาขาที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี.

## 5.3 กลุ่มเป้าหมายที่จะนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

5.3.1 กลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมที่ต้องการใช้น้ำบาดาลเป็นน้ำดิบหรือเป็นวัตถุดิบ หรือเป็นน้ำใช้ในกิจการ.

5.3.2 สถานศึกษาที่มีการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจทรัพยากรใต้ดิน จะสามารถมีกำลังซื้ออุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ไปประกอบการเรียนการสอนได้อย่างพอเพียง ทำให้สามารถขยายการรับนักศึกษาได้มากขึ้น นักศึกษาแต่ละคนจะสามารถเรียนรู้จากของจริงได้ไปพร้อมๆ กัน.

5.3.3 บริษัทที่ทำธุรกิจขายเครื่องมือเครื่องวัดวิเคราะห์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท.

## 6. เอกสารอ้างอิง

- พรหมมา, กิจการ. 2555. อุทกธรณีวิทยา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพียรเจริญ, เจริญ. 2540. น้ำบาดาล – บ่อบาดาล. กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี. 150 หน้า.
- ระมิงค์วงศ์วงศ์, ทวีศักดิ์. 2546. น้ำบาดาล. เชียงใหม่: ภาควิชาธรณีวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สวนบุรี, ดีเซลล์. 2549. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, การศึกษาแหล่งทรัพยากรน้ำบาดาลด้วยเทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ บริเวณวิทยาเขตศรีราชา, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สวนบุรี, ดีเซลล์. โสมนัส, บุญฤทธิ์ และ ลีสัมพันธ์, พงศธร. 2550. การประยุกต์เทคนิคการสร้างภาพค่าสภาพต้านไฟฟ้าเชิง 2 มิติ บริเวณพื้นที่ศักยภาพน้ำบาดาลต่ำ. การประชุมวิชาการทรัพยากรน้ำบาดาล ครั้งที่ 2 ประจำปี 2550 กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 26-27 กันยายน 2550, โรงแรมมิราเคิลแกรนด์.
- Aristodemon, E. and Thomas-Betts, A., 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, **44**, pp. 275-302.
- Burger, H.R., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface. New Sersey: Prentice Hall.
- Rhett, H., 2001. An introduction to electrical resistivity in geophysics, *Am. J. Phys.* **69**(9), pp. 943-952.
- Kinzelbach, W., 1986. Groundwater Modelling, An Introduction with Sample Programs in BASIC. Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Kollert, R., 1969. Ground water exploration by the electrical resistivity method. Geophysical memorandum 3/69. ABEM printed matter No. 90081. ABEM Geophysics & Electronics.
- Loke, M.H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys. (RES2DINV software manual).
- Mooney, H.M., Wetz, W.W., 1956. The potentials about a point Electrode and apparent resistivity curves for a two-, three- and four-layered earth. Minnesota: University of Minnesota Press.
- [Online]. 2014. Available at: <http://www.radford.edu/~rherman/papers/ajp00943.pdf>, [accessed 14 July 2014].



- [Online]. 2014. Available at: <http://www.Astm.org>, [accessed 14 July 2014].
- Parasnis, D.S., 1997. Principles of Applied Geophysics. 5<sup>th</sup> ed. London: Chapman&Hall.
- Porsania, J.L., Filhob, W.M., Elisa, V. R., Shimelesa, F., Douradob, J.C. and Moura, H.P., 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, **55**(2004), 199–209.
- Promma, K., 1995. Effects of natural and Blast-Induced fractures on seismic velocities. Unpublished Master's thesis, Colorado: Department of Geophysics.
- Promma, K., 2001. Using P-wave velocity logs with petrofabric effects to map natural and Blast-Induced fractures in Hard Rocks. *Environmental and engineering geosciences*, pp. 267-279.
- Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. United Kingdom: Reynold Geo-Sciences Ltd.
- Suanburi, D. and Wathanaku, P., 2009. Subsurface Investigation by receptivity scanning technique for groundwater management at seashore developing site, Pkuket, Thailand. The proceeding in World City Water Forum 2009, August 18~21, 2009, Incheon, Korea.
- Suanburi, D., 2010. Resistivity scanning technique: A New Approach for Effective Groundwater Investigation, proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Applied Geophysics 11-13 November 2010, Phuket Thailand.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Nostrand R.G., Cook, K.L., 1996. Interpretation of Receptivity Data: USA: Geological Survey. Professional Paper 499.
- Wang, H.F., and Anderson, M.P., 1982. Introduction to groundwater modeling, Finite Difference and finite Element Methods. U.S.A.: W.H. Freeman and Company.

## 7. ภาคผนวก

รูปแสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 30. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ KYORITSU ที่ใช้ในการทดลอง.



รูปที่ 31. ตัวอย่างการจัดวางขั้วไฟฟ้าบนถาดโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร.



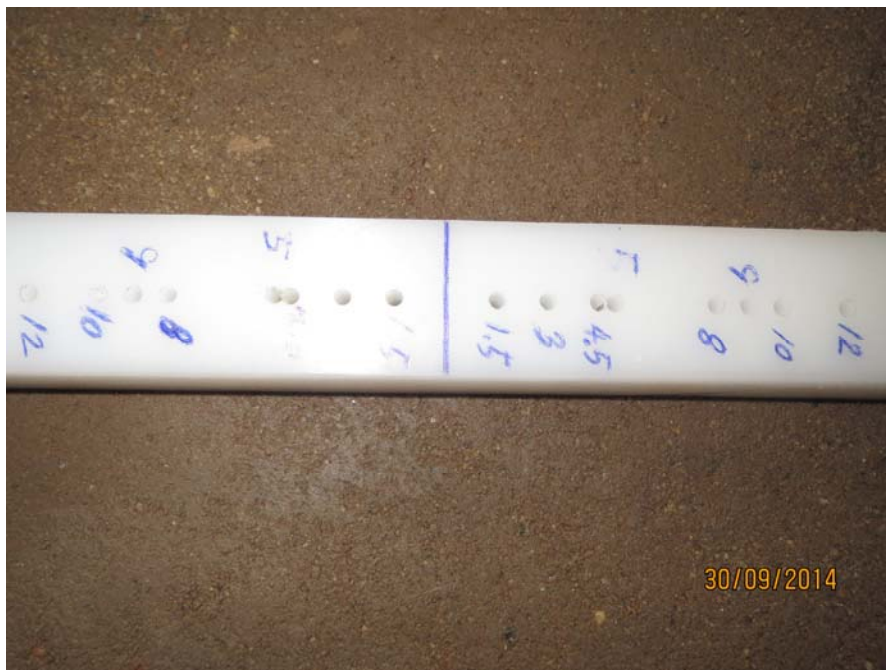
รูปที่ 32. ตัวอย่างการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองบนภาตโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร.



รูปที่ 33. ตัวอย่างหมุดทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าในการทดลองบนภาตโคลน.



รูปที่ 34. วางไม้บรรทัดหน้าบั้งค้ำระยะหมุดชั่วคราวไฟฟ้า (หมุดทองแดง) ในการทดลองบนภาคโคลนขนาด  $\varnothing 60 \times 86$  เซนติเมตร ที่มีชั้นดินด้านบนบั้ง 10 เซนติเมตร.



รูปที่ 35. การเจาะรูบั้งค้ำระยะหมุดทองแดงที่ใช้ทำเป็นชั่วคราวไฟฟ้าบนไม้บรรทัด.