

### 3. ระเบียบวิธีธรณีฟิสิกส์

ระเบียบวิธีธรณีฟิสิกส์ (geophysical methods) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินหรือหิน ตัวอย่างเช่น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือนในชั้นเปลือกโลก วิธีวัดความเร็วคลื่นไหวสะเทือนสามารถใช้หาค่าความลึกถึงชั้นโครงสร้างที่มีค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือนต่างกันได้ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้า (คุณสมบัติทางไฟฟ้า) ของชั้นดิน สามารถที่จะนำวิธีสำรวจทางไฟฟ้าหรือทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ได้ เช่น การปนเปื้อนสารเคมีในดินจะทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินแตกต่างไปจากดินที่มีอยู่ในธรรมชาติที่ไม่มีการปนเปื้อน

สำหรับวิธีธรณีฟิสิกส์ที่นำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ ไม่ได้มีความต้องการที่จะตรวจหาปริมาณของสารหนูภายใต้ผิวดินโดยตรง แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจหาบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ภายใต้ผิวดิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารหนูที่มีอยู่ในชั้นดินและชั้นน้ำ หากพบว่าความเข้มข้นของสารหนูและปริมาณทางฟิสิกส์บางตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณทางฟิสิกส์นั้นอาจจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบและกลไกของการปนเปื้อนของสารหนูได้

วิธีธรณีฟิสิกส์ที่เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้มี 6 วิธี ได้แก่ การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) การวัดความเร็วคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห (seismic refraction) เรดาร์ขั้วขั้ว (ground penetrating radar) การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติ (self-potential) การวัดค่าสนามโน้มถ่วง (gravity) และ การวัดค่าสภาพรับไวได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)

#### 3.1 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

##### 3.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหิน (Electrical properties of rock)

ความแตกต่างกันระหว่างค่าความนำไฟฟ้าสามารถเห็นได้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น ระหว่างดินกับหิน หรือระหว่างชั้นดินที่อยู่เหนือชั้นน้ำใต้ดินกับชั้นดินที่อยู่ใต้ชั้นน้ำใต้ดิน ความสามารถของตัวกลางที่จะต้านทานการนำกระแสไฟฟ้าคือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ )) ส่วนกลับของค่านี้คือค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity  $\sigma$  (S/m)) เมื่อมีสนามไฟฟ้าสถิต (static electric field  $E$  (V/m)) เกิดขึ้น จะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density  $J$  (A/m<sup>2</sup>)) ไหล กฎของโอห์ม (Ohm's law) ในกรณีของตัวกลางที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการแบบเชิงเส้น (linear isotropic medium) เขียนได้ดังสมการ

$$E = \rho J = \frac{J}{\sigma} \quad (3.1-1)$$

สสารที่เป็นส่วนประกอบของโลกประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง (solid phase) เช่น หินและดิน กับอีกส่วนหนึ่งที่เป็นช่องว่าง (space phase) ได้แก่ รูพรุน (pores), รอยแตก (cracks), micro fissures, fractures เป็นต้น ช่องว่างเหล่านี้จะแทรกตัวอยู่ระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งของวัตถุ ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุทั้งก้อนจึงขึ้นอยู่กับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของส่วนที่เป็นของแข็ง (rock matrix) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารที่บรรจุอยู่ในส่วนที่เป็นช่องว่าง ซึ่งอาจจะเป็น อากาศ (air), น้ำมัน (oil) หรือของเหลว (liquid) โดยปกติค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลายที่บรรจุอยู่ในช่องว่างของหินจะส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหินทั้งก้อนมากกว่าส่วนอื่นๆ นั่นหมายถึงค่าสภาพต้านทานของส่วนที่เป็นของแข็งมีผลน้อยมาก ยกเว้นในกรณีที่ตัวกลางที่เป็นพวกโลหะ เช่น pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite ฯลฯ และดินเหนียว (clay) เป็นต้น ในการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ สมการที่เก่าแก่ที่สุดที่ได้จากการทดลองและใช้กันอย่างกว้างขวาง คือสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน (porosity,  $\phi$ ) ความอิ่มตัวของน้ำ (water saturation,  $S_w$ ) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลาย (resistivity of the electrolyte,  $\rho_e$ ) และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุทั้งก้อน (bulk resistivity,  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\rho = \rho_w S_w^{-n} \phi^{-m}$$

(Archie's law)

(3.1-2)

เมื่อ  $m$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง โดยที่ค่า  $m$  เป็นแฟคเตอร์แสดงการเชื่อมประสานของเนื้อวัตถุ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มการกดอัด (compaction), การเชื่อมประสาน (cementation) และการปรับเปลี่ยนเป็นของแข็ง (consolidation) มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1.3 - 1.5 สำหรับค่า  $n$  เป็นแฟคเตอร์ของการอิมิตัว โดยทั่วไปจะใช้ค่า  $n = 2$

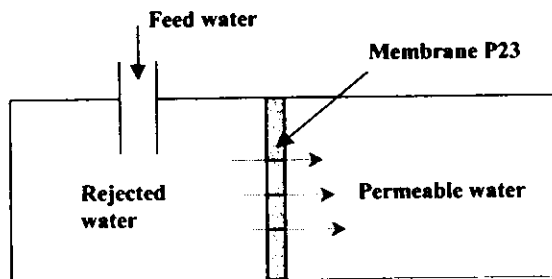
ส่วนประกอบของหินที่เป็นของแข็งไม่สามารถจะพิจารณาเป็นจำนวนได้หากมีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากดินเหนียวมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนภายในเม็ดดินเหนียวและการสะสมตัวของไอออนตรงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเม็ดของดินเหนียว (grain) กับสารละลาย ไอออนบวกในสารละลายจะถูกดึงดูดโดยไอออนลบที่อยู่ผิวของเม็ดดิน ในขณะที่ไอออนลบในสารละลายก็จะถูกผลักให้ห่างออกไปจากผิวสัมผัส ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส (electric double layer) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัส (surface resistivity  $\rho_s = l/\sigma_s$ ) มีหน่วยเป็นโอห์ม - เมตร ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุทั้งก้อนเมื่อมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสมาเกี่ยวข้องด้วย สามารถเขียนได้โดยการคิดแปลงสมการของ Archie ดังสมการ

$$\rho = \rho_w S_w^{-n} \phi^{-m} + \rho_s \quad (3.1-3)$$

สำหรับปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุทั้งก้อนได้แก่ อุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

### 3.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่ปนเปื้อนสารหนู

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของสารหนูในน้ำได้ทำการทดลองโดย ศศ.ดร.พิฑูล วาณิชชาภิตและทีมงาน ห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดลองได้เก็บจากบ่อน้ำชาวบ้านในพื้นที่เดียวกันกับพื้นที่ที่ทำวิจัยนี้ จากนั้นจึงนำมากรองโดยใช้เทคนิค reverse osmosis filtration ซึ่งเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้ความดันสูงๆ เพื่อผลักดันไอออนในน้ำที่ปนเปื้อนสารหนู (polluted water) ให้เคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (membrane) ดังรูปที่ 3.1-1 จากนั้นจึงทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของสารหนูของน้ำที่เก็บมาจากบ่อน้ำชาวบ้าน (feed water or original water from dug well) น้ำจากส่วนที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นเมมเบรน (permeable water) และส่วนของน้ำที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (rejected water) ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1-1



รูปที่ 3.1-1 Schematic of membrane filtering.

## ใบแก้คำผิด

หน้าที่ 13 บรรทัดที่ 14 “ทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น” แก้เป็น “ทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น  
(Llera et al., 1990)”

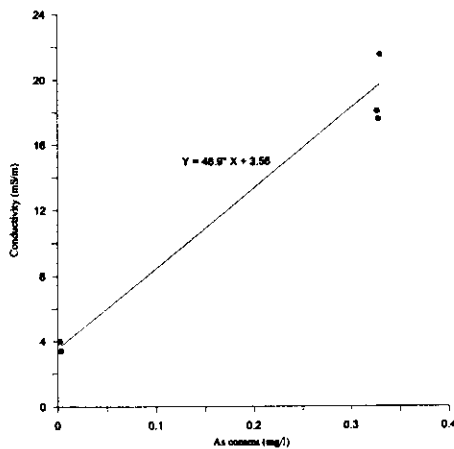
บรรณานุกรม (เพิ่มเติม)

Llera, F.J., Sato, M., Nakatsuka, K. and Yokoyama, H., 1990. Temperature Dependence of the Electrical Resistivity of Water-Saturated Rocks, Geophysics, Vol. 55, No. 5, p. 576-585.

ตารางที่ 3.1-1 Conductivity of contaminated water and the content of arsenic, as determined from membrane filtering by applying a pressure  $2,800 \times 10^3$  Pascal to drive the dissolved ions in feed water to pass through the membrane.

Number of Experiments	Feed		Permeate		Rejection	
	Conductivity	As	Conductivity	As	Conductivity	As
	(mS/m)	(mg/l)	(mS/m)	(mg/l)	(mS/m)	(mg/l)
1	21.5	0.33	4.0	0.002	17.54	0.328
2	21.5	0.33	3.4	0.003	18.06	0.327

เมื่อนำค่าความเข้มข้นของสารหนูกับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่เก็บมาจากบ่อ น้ำที่ไม่ผ่านการกรอง และน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน ซึ่งมีทั้งหมด 6 ตัวอย่างมาเขียนกราฟ ได้ดังรูป



รูปที่ 3.1-2 Correlation between the conductivity (mS/m) and As content (mg/l).

จากกราฟจะเห็นว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้สมการของ Archie พิจารณาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินที่มีน้ำที่ปนเปื้อนสารหนูแทรกอยู่โดยไม่สนใจปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จะได้ว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินหรือหินที่อยู่ภายใต้ผิวดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในชั้นดินหรือหินนั้นๆ

### 3.1.3 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานลักษณะต่างๆ เช่น ธรณีวิทยาของชั้นน้ำ การสำรวจแหล่งแร่ และการสำรวจหาแหล่งความร้อนใต้พิภพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกโครงสร้างภายใต้ผิวดิน สำหรับปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมวิธีการนี้ถูกนำไปใช้ เช่น การตรวจหาการรั่วไหลของน้ำที่ปนเปื้อนจากแหล่งกักเก็บกากแร่หรือจากแหล่งกักเก็บกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และการศึกษาการรุกตัวของน้ำเค็ม (Edet and Okereke, 2001) เป็นต้น

ถ้ากระแส  $I$  (A) ไหลผ่านภาคตัดขวางของตัวนำพื้นที่  $A$  ( $m^2$ ) และมีความยาว  $L$  (m) จากกฎของโอห์ม

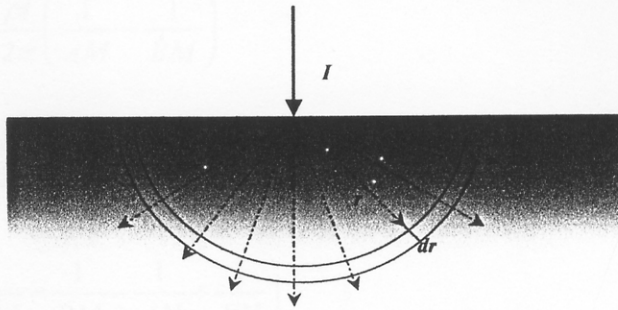
$$\Delta V = IR \tag{3.1-4}$$

$\Delta V$  คือความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า (volt, V) ที่ตำแหน่งพื้นที่ภาคตัดขวางทั้งสองด้านของตัวนำและ  $R$  (ohm,  $\Omega$ ) คือค่าความต้านทานของตัวนำ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของตัวนำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ค่าหนึ่งของตัวนำ เขียนได้ว่า

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3.1-5)$$

หลักการพื้นฐานของวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าคือการส่งกระแสไฟฟ้าที่รู้ค่าแน่นอนลงไปในดินและทำการวัดศักย์ไฟฟ้าแตกต่างบนผิวดิน จากนั้นจึงคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน โดยสมมติให้ขั้วกระแสไฟฟ้าบนพื้นดินที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วไฟฟ้าลงไปในดินทุกทิศทาง มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างจากขั้วเป็นระยะทางในแนวรัศมีเท่ากับ  $r$  และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ  $2\pi r^2$  (รูปที่ 3.1-3) ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $J$ ) ที่ระยะทาง  $r$  มีค่า

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.1-6)$$



รูปที่ 3.1-3 A single current electrode on the surface of a homogeneous ground.

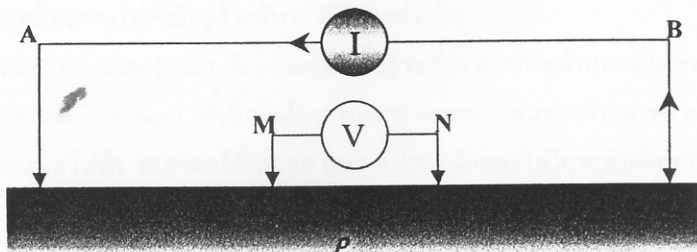
กฎของโอห์มจึงสามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้

$$E_r = \rho J_r = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (3.1-7)$$

ค่าศักย์ไฟฟ้า  $V$  ที่ระยะทาง  $r$  ห่างจากขั้วไฟฟ้าหาได้จากการอินทิเกรตค่า  $E_r$  โดยที่  $r$  มีค่าตั้งแต่ระยะ  $r$  ถึง  $\infty$  และกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ  $\infty$  มีค่าเป็นศูนย์

$$V_r = \int_r^\infty E_r dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3.1-8)$$

โดยปกติการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จะทำการส่งกระแสลงไปในดินโดยใช้ขั้วกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว (ขั้ว A และ B ในรูปที่ 3.1-4) และวัดศักย์ไฟฟ้าแตกต่างบนผิวดินด้วยขั้วศักย์ไฟฟ้า M และ N



รูปที่ 3.1-4 Outline of four electrodes array for resistivity measurement on the surface.

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางสามารถคำนวณได้จากค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า

$$\Delta V = V_M - V_N \quad (3.1-9)$$

เมื่อ

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (3.1-10)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3.1-11)$$

ดังนั้น

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3.1-12)$$

ค่าสภาพต้านทาน

$$\rho = \left( \frac{\Delta V}{I} \right) G \quad (3.1-13)$$

$$G = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (3.1-14)$$

G คือค่า geometrical factor ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดขบวนขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ขั้ว

หากชั้นดินมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้จะต้องมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าจะรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้าแบบไหนก็ตาม ในทางตรงข้ามถ้าชั้นดินมีคุณสมบัติต่างกันและในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีการจัดรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้าต่างกัน อาจจะโดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า หรือโดยการย้ายขบวนขั้วไฟฟ้าทั้งหมดในขณะที่ยังคงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้จะต้องมีค่าไม่คงที่และเรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (apparent resistivity,  $\rho_a$ ) ซึ่งน่าจะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในดิน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจริงเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อยๆ ในทางปฏิบัติ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏสามารถเขียนในรูปสมการที่เป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทาน (Resistance,  $R = \Delta V/I$ ) และ ค่า geometrical factor ได้ว่า

$$\rho_a = RG \quad (3.1-15)$$

ในปัจจุบันวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีที่แตกต่างกัน

1. Vertical electrical sounding (VES) วิธีนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวตั้ง (Vertical direction) ทั้งนี้เพื่อต้องการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวตั้ง เมื่อขยาระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลลงไปในระดับลึกมากขึ้น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งการจัดวางขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นๆ จะมีผลมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินที่ระดับความลึกที่กระแสไหลผ่าน VES เป็นวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สำคัญที่ใช้ในการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดิน

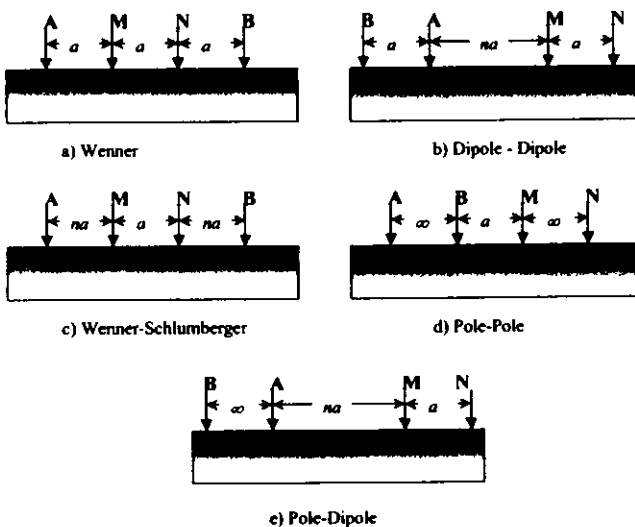
2. Resistivity mapping วิธีนี้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะคงที่ ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่คำนวณได้จะสะท้อนถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่ระดับลึกค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้า เมื่อย้ายขบวนขั้วไฟฟ้า ทั้งชุดเพื่อทำการวัดให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ จากนั้นแผนภาพแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ความลึกค่านี้สามารถแสดงได้ สำหรับวิธี Resistivity pseudosections เป็นวิธีการวัดที่รวมวิธีการวัดแบบ VES และ Resistivity mapping ไว้ด้วยกัน ซึ่งสามารถตรวจหาการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินได้ทั้งในแนวตั้งและในแนวระดับ (vertical & horizontal resistivity variation) และวิธีการวัดแบบนี้เป็นวิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

### 3.1.4 ข้อเด่นของวิธี resistivity pseudo-section ในงานวิจัยนี้

วิธีการวัดแบบ pseudo-section สามารถให้แผนภาพการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้ผิวดินได้อย่างต่อเนื่องใน 2 มิติตลอดแนววัด โดยตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงทั้งในแนวตั้งและแนวระดับ ซึ่งเป็นแผนภาพข้อมูลที่ต้องการจะได้ในพื้นที่วิจัย เพราะคาดหวังว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสารหนูในชั้นน้ำใต้ดิน แผนภาพที่ได้จะถูกนำไปแปลความหมายร่วมกับวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห วิธีเรดาร์หยังลึกและวิธีวัดค่าสนามโน้มถ่วง เพื่อหาภาพโครงสร้างธรณีวิทยาภายใต้ผิวดิน

### 3.1.5 การจัดรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้า (Configurations)

ขบวนขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปสำหรับวิธี resistivity pseudosection ที่ให้แผนภาพใน 2 มิติ ได้แก่ Wenner, Dipole-Dipole, Wenner-Schlumberger, Pole-Pole และ Pole-Dipole ดังรูปที่ 3.1-5 รูปแบบขบวนขั้วที่ดีที่สุดที่จะเลือกใช้ปกติจะพิจารณาจาก ชนิดของโครงสร้างภายใต้ผิวดินที่ต้องการตรวจวัด ความไวในการตอบสนองของเครื่องวัด (resistivity meter) ระดับของสัญญาณรบกวนพื้นฐาน และจำนวนผู้ช่วยงานภาคสนาม



รูปที่ 3.1-5 Common electrode arrays that are used in resistivity pseudosection surveys.

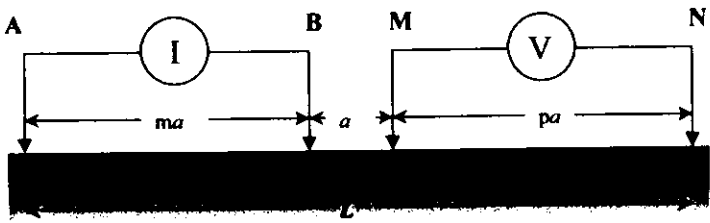
ปัจจัยสำคัญที่สุดในการเลือกรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมได้แก่

1. ความไวในการตอบสนองของของรูปขบวนขั้วไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้ผิวดินในแนวดิ่งและในแนวระดับ
2. ความสามารถในการหยั่งลึก(depth of penetration)
3. ข้อมูลครอบคลุมในแนวระดับ (horizontal data coverage)
4. ความแรงของสัญญาณ (signal strength)

ความไวในการตอบสนองของของรูปขบวนขั้วไฟฟ้าพิจารณาได้จากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่สามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ปกติค่าความไวในการตอบสนองสูงสุดจะมีค่ามาก ณ ตำแหน่งใกล้กับขั้วไฟฟ้ามากที่สุด ตัวอย่างเช่น Wenner array สามารถที่จะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่งได้ดีมาก อาทิ ในชั้นดินตะกอน แต่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับได้แย่มาก สำหรับ Dipole-Dipole array สามารถที่จะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่งได้ดี แต่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับได้แย่เช่นเดียวกัน การประมาณค่าความลึกในการตรวจวัดนั้น Edwards (1977) ใช้ค่า median depth of penetration สำหรับการจัดวางขบวนขั้วไฟฟ้าแบบต่างในกรณีของตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าเหล่านี้จะบอกถึงค่าความลึกลงไปชั้นดินที่สามารถตรวจวัดได้จากการจัดรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบ และค่านี้จะเป็นแนวทางอย่างคร่าวๆที่จะใช้เพื่อออกแบบการสำรวจในภาคสนาม การใช้ Dipole-Dipole array จะได้ค่าความลึกในการตรวจวัดดีกว่าการใช้ Wenner array ความลึกมากสุดจะตรวจวัดได้เมื่อใช้ Pole-Pole array สำหรับ Dipole-Dipole array สามารถครอบคลุมข้อมูลในแนวระดับได้กว้างกว่า Wenner array และ Pole-Pole array สามารถครอบคลุมข้อมูลในแนวระดับได้กว้างที่สุด

ความแรงของสัญญาณของขบวนขั้วไฟฟ้าสามารถพิจารณาจากค่าส่วนกลับของ geometrical factor, G ของขบวนขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบ (Loke, 1999) ตัวอย่างเช่น Wenner array มีค่า  $G = 2\pi a$  มีค่าความแรงของสัญญาณสูงสุด เนื่องจากค่า G มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบขบวนขั้วแบบอื่น สำหรับรูปแบบขบวนขั้วไฟฟ้าที่มีค่าความแรงของสัญญาณสูงที่สุด มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในพื้นที่ที่มีค่าสัญญาณรบกวนพื้นฐานสูง

3.1.6 Pole-Pole array



For ideal  $L \geq 10a$  ;  $m = p = \infty$

รูปที่ 3.1-6 Pole-Pole array (modified from Edwards, 1977).

การจัดขบวนขั้วไฟฟ้าแบบ Pole-Pole ขั้วกระแสไฟฟ้า A และขั้วศักย์ไฟฟ้า N ตามทฤษฎีจะต้องมีที่ตำแหน่งห่างจากขั้วกระแสไฟฟ้า B และขั้วศักย์ไฟฟ้า M ที่ระยะไกลมากๆ ดังรูปที่ 3.1-6 ตำแหน่งที่กีดกันค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในชั้น

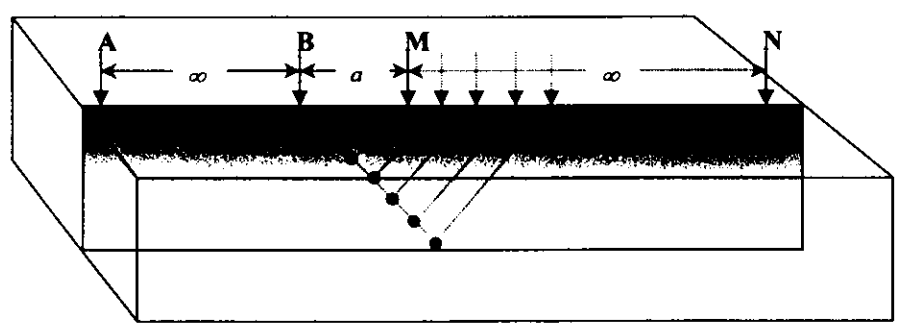


ดิน (data point) ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการ 3-15 ดังรูปที่ 3.1-8 เป็นจุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า B และขั้วศักย์ไฟฟ้า M ที่ระดับความลึกในแนวตั้งเท่ากับ  $0.867a$  (Edwards, 1977) เมื่อ  $a$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า B และขั้วศักย์ไฟฟ้า M เมื่อขยายระยะห่างระหว่างขั้ว B และ M (เพิ่มระยะ  $a$ ) จะทำให้ค่าความลึกในการตรวจวัดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบนี้จะต้องปักขั้ว M และ N ที่ตำแหน่งไกลมากๆ ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ส่วนหนึ่งอาจจะถูกรบกวนจากกระแสเทลลูริก ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องของข้อมูลที่วัดได้มีค่าลดลง ดังนั้นรูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบนี้จึงเหมาะที่จะใช้สำรวจในกรณีที่มีระยะ  $a < 10$  m (Li and Oldenburg, 1992) เช่น ใช้ในงานสำรวจทางด้านโบราณคดี (Loke, 1999) ซึ่งวัตถุที่ต้องการตรวจวัดอยู่ที่ระดับดิน

3.1.7 การออกแบบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้ Pole-Pole array

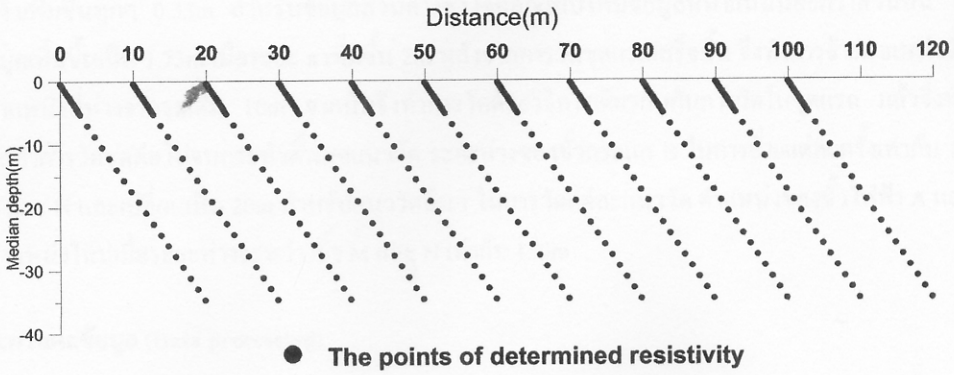
การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่ที่วิจัยได้ตรวจวัดในตัวอย่างดินที่ความลึก 0.3m และ 1.0m และในตัวอย่างน้ำ (auger water) ที่ระดับความลึก 2-5m (JICA, 1999) เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับค่าความเข้มข้นของสารหนูทั้งในชั้นดินและชั้นน้ำ จึงจำเป็นต้องออกแบบ Pole-Pole array เพื่อต้องการรายละเอียดของข้อมูลของดินชั้นบนในช่วงตั้งแต่ผิวดินถึงระดับความลึก 5m ซึ่งในกรณีนี้ Pole-Pole array จะต้องปักขั้วไฟฟ้าให้มีระยะห่าง  $a < 10$ m สำหรับที่ระดับความลึกตั้งแต่ 5-35m ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อต้องการตรวจวัดชั้นดินเหนียว ระดับของชั้นน้ำใต้ดิน (groundwater table) และความลึกถึงชั้นหินฐาน (crystalline basement rock) Pole-Pole array จะให้รายละเอียดข้อมูลที่ช่วงความลึกนี้ได้น้อยเมื่อระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า  $a > 10$ m แต่รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการออกแบบในครั้งนี้เพียงพอกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการแผนภาพตำแหน่งข้อมูลภายใต้แนววัดจากการออกแบบ Pole-Pole array และขั้นตอนภาพการเก็บข้อมูลในภาคสนามแสดงดังรูปที่ 3.1-8 และ 3.1-9 ตามลำดับ

Resistivity pseudosections ได้ทำการวัดครอบคลุมพื้นที่วิจัยโดยกำหนดแนววัดทั้งหมด 14 แนววัด แต่ละแนววัดขนานกันและห่างกัน 20m เริ่มจากแนววัด S ทางทิศเหนือ ถึงแนววัด F ทางทิศใต้ (ดังรูปที่ 2-4) รวมระยะทางทั้งสิ้น 9.16km ทุกแนววัดทำการวัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก โดยมีระยะห่างระหว่างจุดวัดเท่ากับ 20m เฉพาะแนววัด L, M และ N จุดวัดห่างกัน 10m เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอย่างละเอียด ทั้งนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับภาพตัดขวางโครงสร้างทางธรณีวิทยาในแนว A - A' ที่สร้างขึ้นโดย JICA ซึ่งเป็นแนวที่เชื่อมต่อกันระหว่างหลุมเจาะ JICA15 และ JICA1 และอยู่ในแนวเดียวกันกับแนววัด M ในการวัดใช้ DC Terrameter, ABEM SAS 300B พร้อมด้วยตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มเติม (current booster) ABEM SAS 2000 และใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากสแตนเลส



รูปที่ 3.1-7 Pole-Pole array for resistivity pseudosection, electrode A, B and N are fixed, electrode M is moved to new positions. The black spots represents the position of determined resistivity.

ฝ่ายหอสมุด  
 คุนหมิงหลง อรรถกระวีสุนทร



รูปที่ 3.1-8 Schematic distribution of resistivity pseudo-sections as obtained by Pole-Pole array with measuring positions at 10m intervals.



รูปที่ 3.1-9 Field survey of Pole-Pole resistivity pseudo-section.

สำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้รูปขบวนขั้วไฟฟ้าแบบ Pole-Pole สามารถทำการวัดโดยใช้ทีมงานเพียง 2 คน ทั้งนี้เพราะจะทำการย้ายตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้วในการวัด จากรูปที่ 3.1-7 การจัดวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยนี้กระทำโดยการปักขั้วกระแสไฟฟ้า A และขั้วศักย์ไฟฟ้า N ที่ระยะทางมากกว่า 150m (infinite for ideal) จากขั้วกระแสไฟฟ้า B และ ขั้วศักย์ไฟฟ้า M ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไฟฟ้า A และ ขั้วศักย์ไฟฟ้า N มากกว่า 600m การวัดเริ่มโดยการปักขั้วไฟฟ้า A และ N ไว้กับที่ จากนั้นปักขั้วกระแสไฟฟ้า B ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ (point current source) นำขั้วไฟฟ้า M มาปักที่ระยะ 0.4m ห่างจากขั้วไฟฟ้า B ทำการวัดและบันทึกค่าที่วัดได้เป็นค่าแรก จากนั้นจึงย้ายขั้วไฟฟ้า M ไปปักที่ระยะห่าง 0.8m จากขั้วไฟฟ้า B ทำการวัดและบันทึกค่าที่วัดได้เป็นค่าที่สอง ทำการวัดจุดที่สามโดยการย้ายขั้วไฟฟ้า M ไปปักที่จุดถัดไปที่ระยะห่างจากจุดเดิม 0.4m ย้ายขั้วไฟฟ้า M และทำการวัดจนกระทั่งระยะ a เท่ากับ 6m หลังจากนั้นระยะห่างที่เพิ่มขึ้นเมื่อย้ายขั้วไฟฟ้า M เปลี่ยนเป็น 2m ทำการวัดจนกระทั่งจุดสุดท้ายอยู่ที่ระยะ a = 40m การวัดในชุดแรกเมื่อขั้วกระแสไฟฟ้า B ปักอยู่กับที่ ณ จุดใดจุดหนึ่งเสร็จจึงสมบูรณใช้เวลาประมาณ 20 นาที จากรูปที่ 3.1-8 จะเห็นว่าความหนาแน่นของข้อมูลส่วนบนเป็น 3 จุดต่อเมตร การออกแบบใช้ค่าความลึกในแนวดิ่งเท่ากับ  $0.867a$  (Edwards, 1977) ดังนั้นเมื่อระยะ a เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.4m ค่าความ