

# การใช้ Time Domain Reflectometry (TDR) ในการวัดปริมาณความชื้นในดิน

## Measuring Soil Moisture Content with Time Domain Reflectometry

วิทยา ตรีโลเกศ<sup>1/</sup> ปานชีวัน ปอนพังกา<sup>2/</sup>

Vidhaya Trelo-ges<sup>1/</sup> Panchewan Pornpang-nga<sup>2/</sup>

---

### ABSTRACT

Time Domain Reflectometry (TDR) is a method to measure the dielectric constant ( $\epsilon$ ) which is the capacity ratio of insulated material and capacity of air used as an insulator. It relates directly to volume of soil moisture. The principle is to use rods after being injected into the soil. The signal will be sent back to TDR and graph is shown for soil moisture content in terms of percentage by volume.

**Key words :** Time Domain Reflectometry, soil moisture content measurement

### บทคัดย่อ

Time Domain Reflectometry (TDR) เป็นวิธีหนึ่งของการวัดค่า dielectric constant ( $\epsilon$ ) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของค่าความจุของตัวเก็บประจุของโลหะนั้น ๆ ที่นำมาเป็นฉนวนกับค่าความจุของตัวเก็บประจุที่นำเอาอากาศมาเป็นฉนวนแล้วจะมีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร โดยมีหลักการ คือ ใช้แท่งโลหะที่เป็นคู่ขนาน (rods) รับสัญญาณจากการเสียบเข้าไปในดิน สัญญาณจะถูกส่งกลับไปยังเครื่องรับ TDR และแสดงผลออกมาเป็นกราฟของปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตรในรูปแบบเปอร์เซ็นต์

**คำหลัก :** การใช้ Time Domain Reflectometry (TDR) การวัดความชื้นในดิน

---

<sup>1/</sup> ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

<sup>1/</sup> Department of Soil Resources and Environment, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khonkaen province 40002

<sup>2/</sup> มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ อ. เมือง จ.สกลนคร 47000

<sup>2/</sup> Kasetsart University, Chalerm Phrakiat campus, Muang district, Sakon Nakhon province 47000

## คำนำ

ความชื้นในดินจะปรากฏตัวอยู่ในช่องว่างของดิน ในรูปของเหลวเป็นส่วนใหญ่ ความชื้นในดินมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และชีวภาพของดินตลอดจนพืชที่ขึ้นอยู่บนดินนั้น วิธีการวัดปริมาณความชื้นในดินมีทั้งโดยทางตรงได้แก่ การแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินโดยน้ำหนัก (percentage by weight) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และโดยทางอ้อมได้แก่การใช้เครื่องมือแต่ละชนิดต่างๆกันในการวัดความชื้นในดิน ทั้งทางภาคสนามหรือภาคห้องปฏิบัติการ แต่ละเครื่องมือจะแตกต่างกันออกไป ทั้งหลักการ วิธีการ อุปกรณ์ ระยะเวลา วิธีการคำนวณ การแปลผล ตลอดจนความละเอียดถูกต้องแม่นยำของแต่ละเครื่องมือ (นิรนาม, 2544)

การวัดปริมาณความชื้นในดินโดยวิธีการใช้ Time Domain Reflectometry (TDR) เป็นอีกวิธีหนึ่งของการวัดค่า dielectric constant ( $\epsilon$ ) เป็นค่าที่วัดโดยตรงที่ช่วงความถี่ประมาณ 1 MHz ถึง 1 GHz ซึ่งการวัดค่า dielectric constant นี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร ( $\theta_v$ ) (Horino and Maruyama, 1995) ค่า dielectric constant คืออัตราส่วนของค่าความจุของตัวเก็บประจุของสารนั้นๆ ที่นำมาเป็นฉนวนกับค่าความจุของตัวเก็บประจุที่นำเอาอากาศมาเป็นฉนวน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้ (Hillel, 1998) dielectric constant (relative permittivity),  $\epsilon = \epsilon/\epsilon_0$  หลักการการใช้ TDR

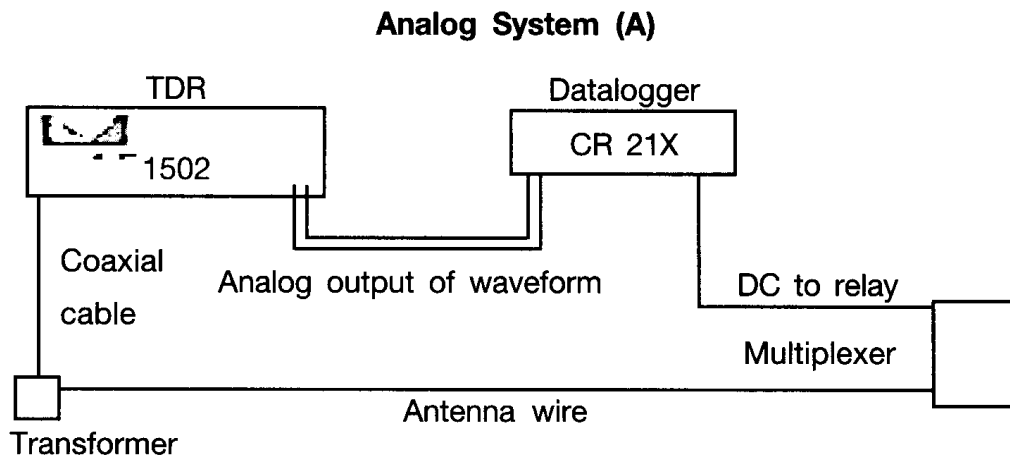
คือ การใช้แท่งโลหะที่เป็นคู่ขนาน (rods) เป็นตัวรับสัญญาณเสียบเข้าไปในดิน เนื่องจาก rods ที่เป็นฉนวนตัวกลางเมื่อมีความต่างศักย์ของสัญญาณที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณน้ำในดิน สัญญาณจะถูกส่งมาตามสายส่งผ่านสัญญาณ (transmission lines) สัญญาณที่ส่งมาจากปลาย rods ที่อยู่ในดินกลับไปยังเครื่องรับ TDR (cable tester) แสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ (Topp et al., 1980) ปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร ( $\theta_v$ ) นั้นจะแสดงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์หมายถึง สัดส่วนระหว่างความชื้นในดินขณะนั้นๆ ( $V_w$ ) กับปริมาตรทั้งหมดของดิน ( $V_b$ ) สามารถเขียนเป็นสูตรได้ว่า  $\theta_v = (V_w/V_b) \times 100$  (วิทยา, 2541)

## หลักการทํางานและส่วนประกอบของเครื่อง Time Domain Reflectometry (TDR)

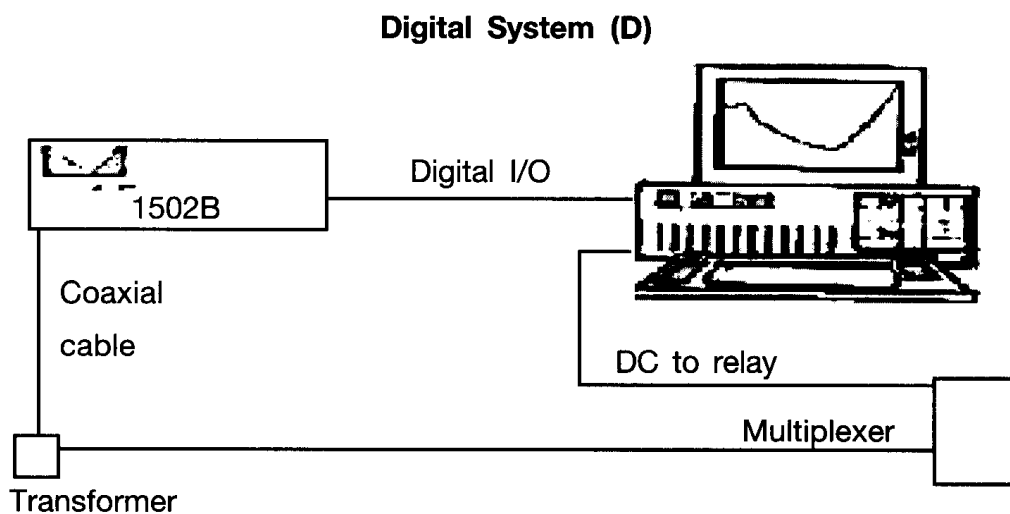
เครื่องวัดความชื้นในดิน TDR เป็นเครื่องที่ทํางานโดยระบบอัตโนมัติ และมัลติเพล็กซ์ (multiplex system) ที่มี 2 ระบบ คือ Analog system และ Digital system (Baker and Allmaras, 1990)

1. Analog system จะส่งสัญญาณความต่างศักย์จาก เครื่อง TDR มายัง data logger (Figure 1.1A) ระบบนี้แสดงผลการวัดออกมาเป็นจุดตัด XY

2. Digital system เครื่อง TDR อ่านผลจากการวัดออกมาเป็นจุดตัด XY และ ตัวเลขเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ (Figure 1.2D)



**Figure 1.1A.** Analog Time Domain Reflectometry (TDR) automatic system controlled by data logger

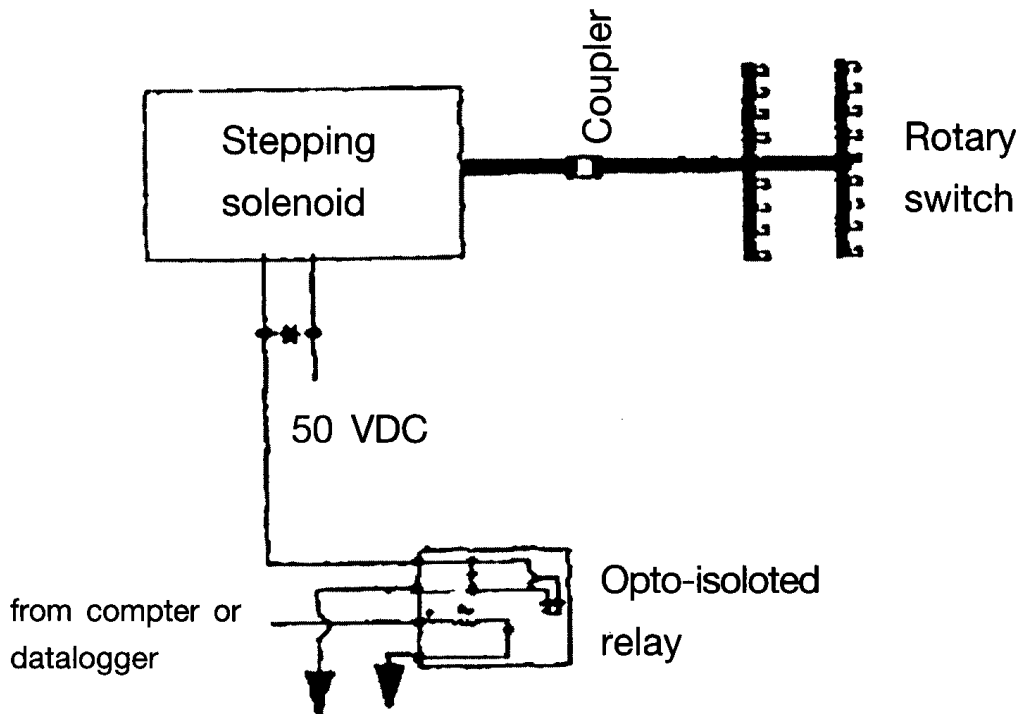


**Figure 1.2D.** Digital Time Domain Reflectometry (TDR) automatic system controlled by computer (Baker and Allmaras, 1990)

อย่างไรก็ตามทั้ง 2 ระบบนี้ใช้ระบบ multiplexer เหมือนกัน ซึ่งระบบ multiplexer ที่ใช้มีกลไกทางไฟฟ้าเป็นตัวควบคุม rotary multiplexing switch ระบบจะสมบูรณ์ก็เมื่อต่อ coupler ครบทุกตำแหน่งของช่อง switch กับ stepping solenoid ที่จะทำการวัด solenoid ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูง และกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าที่

data logger และ คอมพิวเตอร์ สามารถจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ได้ (Figure 2)

ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีแหล่งสำรองกระแสไฟฟ้าที่จะนำกระแสไฟฟ้า 2 Am 5V. มาจากแหล่ง 50V. ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเข้า Solenoid (Baker and Allmaras, 1990)



**Figure 2.** Multiplexer system of Time Domain Reflectometry have 12 switches (Baker and Allmaras,1990)

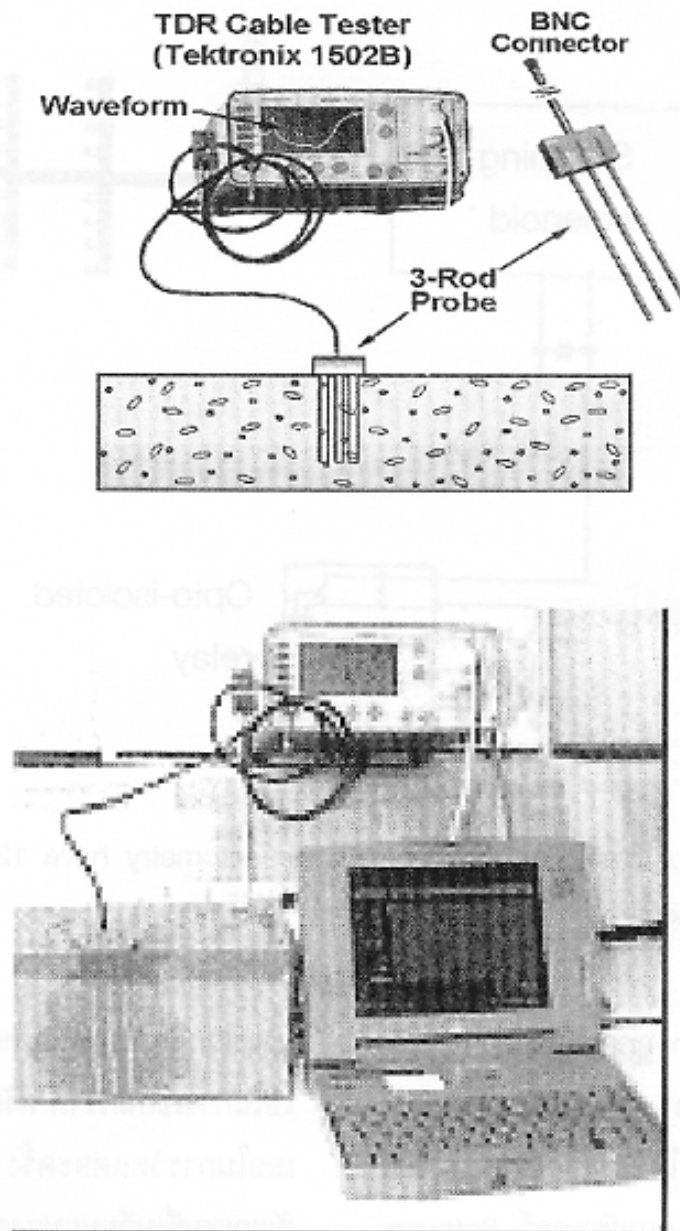
Analog system ถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้า 5V. ช่วงระยะเวลา 400 ms จาก data logger ระบบ Digital ได้รับสัญญาณจาก I/O (input/output) card จากคอมพิวเตอร์ Software ที่ใช้สื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ และ TDR เริ่มพัฒนามาจากภาษา Pascal (PC) โดย Tektronix และถูกปรับให้เหมาะสมเพื่อวัตถุประสงค์ใช้ใน

กระบวนการขับเคลื่อนของ rotary switches เพื่อใช้ในการเขียนกราฟ หรือบอกออกมาเป็นระบบตัวเลขในการวัดแต่ละครั้ง ซึ่งข้อมูลถูกแปลงมาเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้งจะถูกบันทึกไว้ เมื่อข้อมูลมากขึ้นหน่วยความจำจะเต็ม ปัจจัยหนึ่งที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ ต้องมีการลบข้อมูลที่เก็บไว้ออกไปบ้างเมื่อมีการ

download ข้อมูลเข้ามา เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้หน่วยความจำเพื่อที่จะบันทึกข้อมูลจากการวัดในครั้งต่อไปได้

เทคนิคของการใช้ TDR, Hillel (1998) รายงานว่า แท่งโลหะ (rods) ที่เสียบลงไปในดิน จะแสดงตัวเป็นทั้งตัวรับสัญญาณและตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่ดินที่อยู่รอบๆแท่งโลหะจะเป็น dielectric

เมื่อ Step voltage pulse หรือ สัญญาณที่ส่งมาตามสายส่งสัญญาณ (Parallel Transmission Lines, PTL) สัญญาณจะสะท้อนจากปลาย rods กลับมายัง TDR Cable Tester (Tektronix 1502B) ซึ่งเป็นตัวรับสัญญาณ ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง TDR (Figure 3) และผลที่ได้จากการวัดแสดงออกในรูปของกราฟ (Figure 4)



**Figure 3.** Composition of TDR (<http://psb.usu.edu/wintdr/whatistdr.html> and <http://psb.usu.edu/wintdr/index.html>)

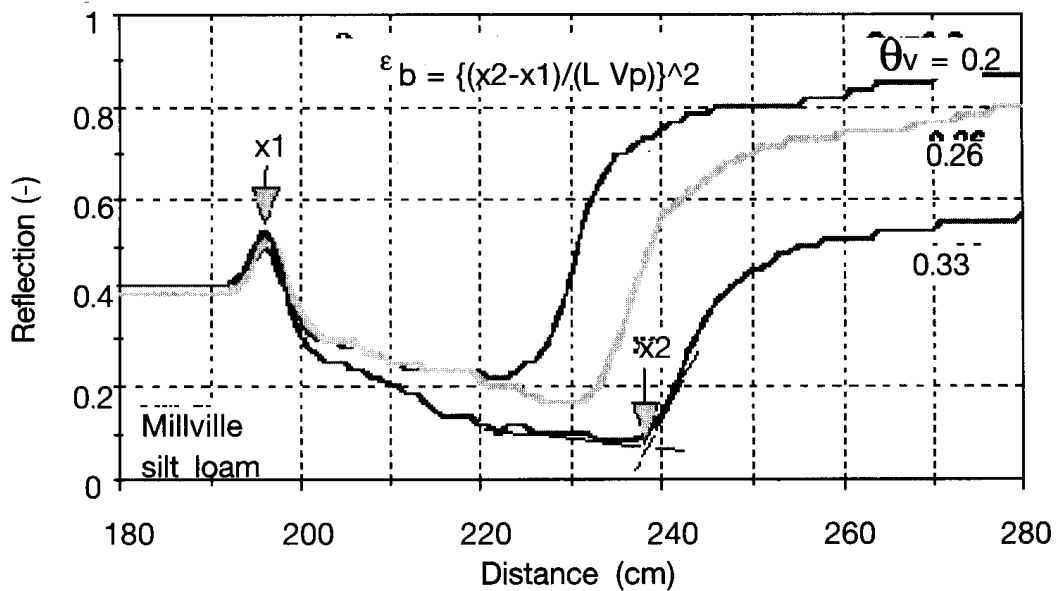


Figure 4. Soil moisture measurement by TDR <http://psb.usu.edu/wintdr/whatistdr.html>

### การใช้เครื่อง TDR วัดความชื้นในดินในภาคสนาม

Topp และคณะ (1980) แสดงความสัมพันธ์ของค่า dielectric constant ( $\epsilon$ ) ของดิน และความชื้นในดินโดยปริมาตร ( $\theta_v$ ) โดยใช้แท่ง

โลหะของเครื่อง TDR วัดความชื้นในดินในภาคสนาม ค่าของ  $\epsilon$  คำนวณจากการวัดค่า Transit time (t) คือเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปตามความยาว (l) ของ rods ดังสมการที่ 1

$$\epsilon = [ct / 2l]^2 \quad (1)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ มีค่า  $3 \times 10^8$  m/s ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\epsilon$  และความชื้นในดินโดยปริมาตรที่ได้จากการวัดโดย

วิธีชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) จากงานทดลองของ Topp และคณะ (1980) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (2)$$

สมการที่ (2) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient,  $r^2$ ) = 0.999 (Topp et al., 1980) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นรวมของดิน อุณหภูมิในดิน แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณเกลือในดินจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณของ TDR

จากดินตัวกลาง สมการที่ได้จากการปรับค่า (calibrate) ของข้อมูลที่ได้จากการใช้เครื่อง TDR วัดค่า dielectric constant และความชื้นในดินโดยปริมาตรที่ได้จากการวัดโดยวิธีชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) แตกต่างกันออกไป (Table 1)

**Table 1.** Equation and error of relationships between dielectric constant ( $\epsilon$ ) and soil moisture content by volume from gravimetric method ( $\theta_v$ ) (Topp *et al.*,1980)

Experiment	Medium	Coefficients $K_a = A + B\theta_v + C\theta_v^2 - D\theta_v^3$								Error of Estimate of $K_a$ and $\theta_v \times 10^2$	
		A	B	C	D						
1.	Rubicon SL+ H <sub>2</sub> O	2.74	(±0.32)	18.2	(±3.2)	113	(±9.6)	52.5	(±6.8)	0.42	0.73
2.	Rubicon SL+ H <sub>2</sub> O	2.56	(±0.14)	16.1	(±1.7)	127	(±5.1)	64.4	(±3.6)	0.32	0.77
3.	Rubicon SL+ H <sub>2</sub> O	2.65	(±0.28)	27.6	(±3.4)	80.3	(±9.9)	29.0	(±7.0)	0.65	0.79
4.	Rubicon SL+ NaCl	2.87	(±0.15)	15.4	(±1.8)	125	(±5.3)	61.8	(±3.7)	0.28	0.83
5.	Bainsville CL+ H <sub>2</sub> O	2.76	(±0.54)	-19	(±5.4)	196	(±16.0)	115	(±11.3)	0.62	1.2
6.	Bainsville CL+ H <sub>2</sub> O	4.23	(±1.22)	-566	(±12.9)	350	(±37.1)	216	(±25.5)	1.43	1.2
8.	Bainsville CL+ H <sub>2</sub> O	2.86	(±1.13)	-226	(±11.8)	192	(±33.7)	111	(±23.3)	1.31	1.6
9.	Bainsville C+ H <sub>2</sub> O	3.34	(±0.53)	-77	(±6.4)	222	(±18.6)	136	(±18.8)	0.69	1.1
10.	Organic soil	1.74	(±0.22)	-034	(±2.3)	135	(±6.2)	55.3	(±4.2)	0.38	1.8
11.	Vermiculite	2.45	(±0.35)	1.8	(±3.5)	83.1	(±9.5)	22.2	(±6.5)	0.63	1.4
12.	Glass, 30µm+ H <sub>2</sub> O	3.62	(±0.26)	41.3	(±2.9)	59.2	(±10.2)	22.6	(±7.5)	0.26	0.33
13.	Glass, 30µm+ H <sub>2</sub> O	3.88	(±0.13)	41.3	(±1.9)	74.5	(±6.7)	38.1	(±5.0)	0.35	0.53
14.	Glass, 30µm+ H <sub>2</sub> O	3.03	(±0.17)	43.5	(±2.1)	49.6	(±7.0)	14.6	(±5.1)	0.28	0.46
15.	Glass, 30µm+ NaCl	3.89	(±0.74)	39.6	(±8.2)	69.3	(±25.7)	31.3	(±18.4)	0.85	1.3
16.	Glass, 450µm+ NaCl	3.30	(±0.34)	31.0	(±5.0)	110	(±18.3)	63.1	(±13.8)	0.84	1.4
17.	Glass, 450µm+ H <sub>2</sub> O	3.33	(±0.25)	32.8	(±3.7)	116	(±14.7)	70.9	(±10.3)	0.61	1.0
18.	Glass, 450µm+ H <sub>2</sub> O	3.76	(±0.31)	30.5	(±4.3)	115	(±15.6)	67.8	(±11.7)	0.75	1.2

สมการที่ใช้ในการ calibrate ของดินที่มีเนื้อดินต่างกัน สมการที่ใช้ก็ต่างกันไม่มากนัก ค่าความชื้นดินที่ได้จากสมการที่ใช้ในการ calibrate ของดิน sandy loam มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าดิน clay loam

น้ำถูกแทนที่ด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ละลายอยู่ 2000 ppm (2.112 gml<sup>-1</sup>) เป็นการ

แสดงให้เห็นว่าดินที่มีเกลือละลายอยู่จะส่งผลให้ค่า dielectric constant เปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลลำดับที่ 4 5 และ 6 Horino และ Maruyama (1995) ได้ใช้เครื่อง TDR ในการประเมินความชื้นของดินในกระบวนการเปียกและแห้งของดิน 2 ชนิด ซึ่งเส้นภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า dielectric constant และความชื้นในดินโดย

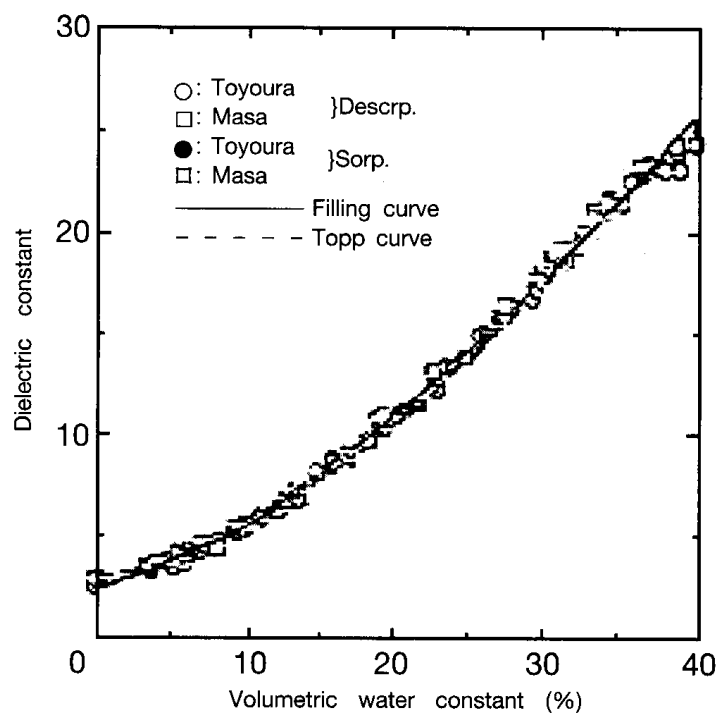
ปริมาณของดินทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการแพร่กระจายตัวของน้ำภายในหน้าตัดดิน (soil water distribution)

สมการของความสัมพันธ์ที่ใช้เปรียบเทียบค่า dielectric constant กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร คือ

$$\epsilon = 2.47 + 20.1\theta_v + 144\theta_v^2 - 56.9\theta_v^3 \quad (3)$$

สมการที่ (3) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เป็น 0.996 เส้นโค้งความสัมพันธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ที่ทำการ calibrate ค่าของ

dielectric constant กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร โดย Topp และคณะ (1980) (Figure 5)

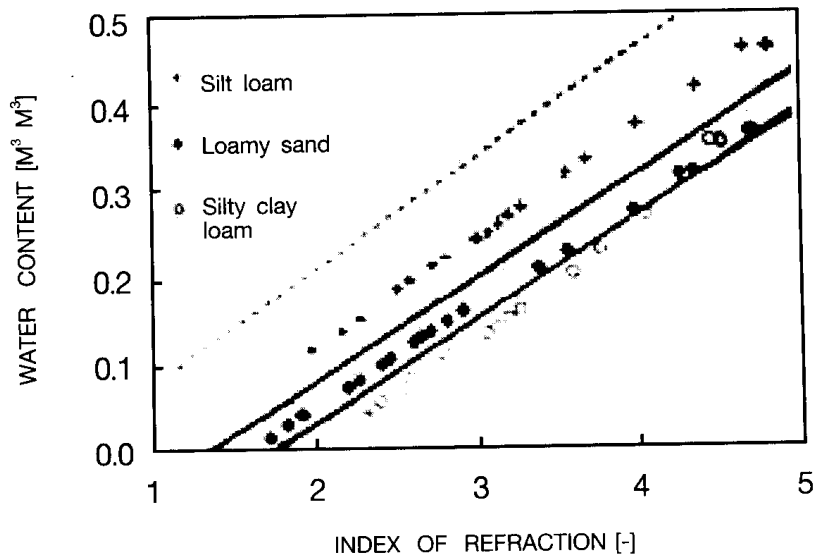


**Figure 5.** Relationships between dielectric constant and soil moisture content by volume ( $\theta_v$ ) of 2 soil types in wetting and drying process (Horino and Maruyama,1995)

Heimovaara (1993) ได้นำสมการเส้นตรงที่ได้จากงานทดลองของ Topp และคณะ (1980) มาแสดง

ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างในดินที่มีเนื้อดินแตกต่างกัน (Figure 6)





**Figure 6.** Relationships between soil moisture content by gravimetric method ( $\theta_w$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) and index of refraction (Heimovaara, 1993)

จากรูปข้างต้นขอบเขตของกราฟเส้นตรงของ Topp และคณะ (1980) =  $\pm 0.025 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  ความหนาแน่นรวมของดิน silt loam เท่ากับ 1.562 กรัม/ลบ.ซม. ดิน loamy sand เท่ากับ 1.426 กรัม/ลบ.ซม. ดิน silty clay loam เท่ากับ 1.816 กรัม/ลบ.ซม. ค่าปริมาณความชื้นในดินที่วัดโดยเครื่อง TDR และคำนวณโดยใช้สมการของ Topp และคณะ (1980) ดิน silt loam ที่คำนวณปริมาณความชื้นในดินที่ ( $\theta_w = 0.124$ ;  $r^2 = 0.998$  ดิน loamy sand ที่คำนวณปริมาณความชื้นในดินที่ ( $\theta_w = 0.113$ ;  $r^2 = 0.999$  ดิน silty clay loam ที่คำนวณปริมาณความชื้นในดินที่ ( $\theta_w = 0.138$ ;  $r^2 = 0.993$  จะเห็นได้ว่าเส้นภาพความชื้นของดิน loamy sand อยู่ระหว่างเส้นกราฟของ Topp และคณะ (1980) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ =

$$\theta_{\text{TDR}} = 1.02\theta_{\text{grav}} - 0.023$$

$$\theta_{\text{neu}} = 0.86\theta_{\text{grav}} + 0.031$$

0.999 ดังนั้นการวัดความชื้นในดินด้วยเครื่อง TDR สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตรได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้กับดินทรายที่มีความหนาแน่นรวมของดินสูงได้

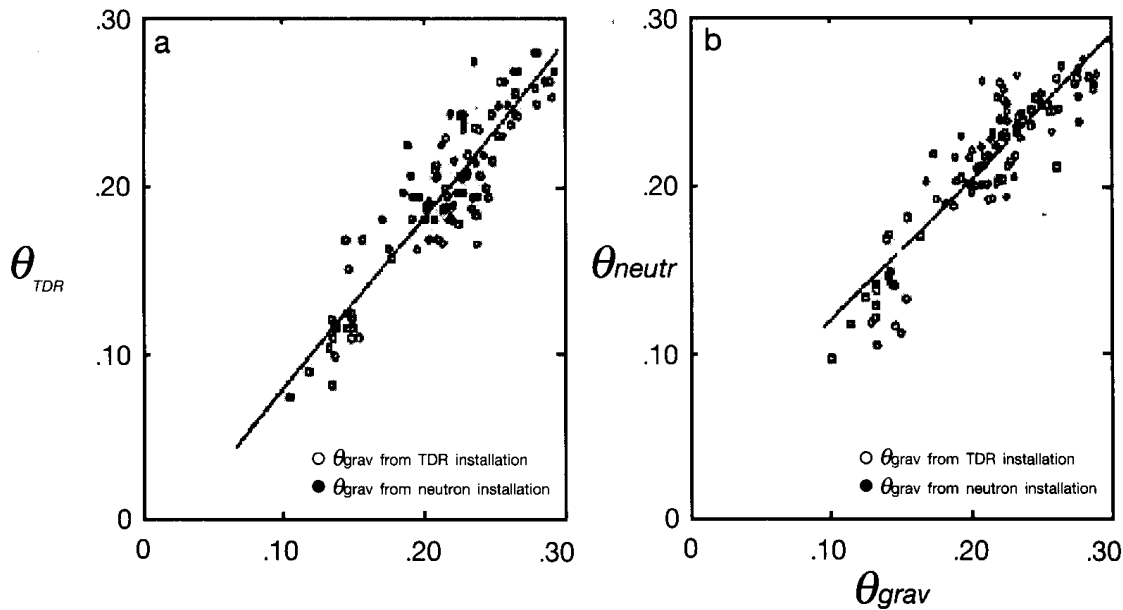
Dasberg และ Dalton (1985) แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นในดินที่ได้โดยวิธีการวัดด้วยเครื่อง TDR กับค่าความชื้นในดินที่ได้โดยวิธีการวัดด้วยเครื่อง Neutron probe ค่าความชื้นที่วัดได้จาก 2 วิธีดังกล่าวเป็นค่าความชื้นโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (gravimetric) กระทำการทดสอบวัดความชื้นในดินทั้งหมด 102 จุด ซึ่งจะได้เส้นภาพแสดงความสัมพันธ์ (Figure 7) สมการการถดถอย (regression equation) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ดังนี้

$$r^2 = 0.84 \text{ ————— (4)}$$

$$r^2 = 0.82 \text{ ————— (5)}$$

สมการที่ใช้ประมาณค่าความชื้นดินที่ได้ทั้งจากการวัดด้วยเครื่อง TDR และโดยวิธีการใช้ Neutron probe วัดความชื้นในดินมีค่าความถูกต้องใกล้เคียง

กัน นั่นก็หมายความว่า เครื่อง TDR สามารถนำมาใช้วัดความชื้นในดินที่ภาคสนามได้ดีเท่ากับการวัดความชื้นในดินด้วยวิธีการใช้ Neutron probe



**Figure 7.** Relationships between soil moisture content measurement by TDR and by Neutron probe ( Dasberg และ Dalton, 1985)

Ren และคณะ (1999) ได้ทำการวัดหาปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตรในเนื้อดิน 2 ชนิดคือดิน sand และดิน clay loam โดยที่ดิน sand ได้รับการให้น้ำตลอดเวลา ขณะที่ดิน clay loam จะได้รับสิ่งทดลอง 2 ตำรับคือ การให้น้ำ สารละลายเกลือแกง (NaCl) ทำการวัดค่า dielectric constant ด้วยเครื่อง TDR และทดสอบปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตรจากการชั่งน้ำหนัก และหาความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองโดยการสร้างเส้นภาพจากสมการของ polynomial อันดับที่ 3 (3<sup>rd</sup> polynomial equation) ดังสมการ  $\theta_v = -0.161 + 7.01 \times 10^{-2}E - 4.03 \times 10^{-3}E^2 + 8.76 \times 10^{-5}E^3$  และเปรียบเทียบเส้นภาพที่ได้กับเส้นภาพ

ที่ได้จากวิธีของ Topp และคณะ (1980) พบว่าลักษณะแนวโน้มของเส้นภาพทั้งสองใกล้เคียงกัน โดยตลอดทุกๆ ความสัมพันธ์ ปานชีวัน (2545) ได้ทำการวัดติดตามค่า dielectric constant โดยใช้เครื่อง TDR โดยการฝังแท่งโลหะที่เป็นตัวรับส่งสัญญาณของเครื่อง TDR ลงไปในดินที่ความลึก 4 ช่วงระดับความลึกทั้งที่บริเวณในร่องและสันร่องของอ้อยในแปลงเกษตรกรกับความชื้นในดินโดยปริมาตรที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินในภาคสนาม โดยวิธีชั่งน้ำหนัก วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า dielectric constant ที่อ่านได้จากเครื่อง TDR กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตร สามารถสร้างเส้นภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง และ

สมการที่ใช้ในการปรับแก้ค่า dielectric constant มาเป็นค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรในรูปสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 3 คือ  $y = 0.1438E^3 - 3.1492E^2 + 23.83E - 48.097$  และได้นำไปเปรียบเทียบกับสมการปรับแก้ค่าของ Topp และคณะ (1990) ซึ่งสอดคล้องกันดี สมการดังกล่าวข้างต้นให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.90 แสดงว่าสมการปรับแก้ที่เราได้จากการศึกษานี้สามารถนำมาใช้ปรับค่า dielectric constant ที่อ่านได้จากเครื่อง TDR มาเป็นค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรได้ดี

### สรุป

เครื่องมือวัดความชื้นในดินชนิด Time Domain Reflectometry (TDR) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการวัดปริมาณความชื้นในดินได้อย่างแม่นยำ ละเอียดและรวดเร็ว ตามการเปลี่ยนแปลงของเวลาอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยหลักการวัดค่า dielectric constant แล้วนำค่าที่ได้มาทำการเทียบเคียง (calibrate) กับค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรที่ได้จากการวัดโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก สมการที่ได้จากการ calibrate โดยการนำค่า dielectric constant ที่เครื่อง TDR อ่านได้มาเปลี่ยนเป็นค่าความชื้นในดินโดยปริมาตรมีความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างสูง ซึ่งสมการของการ calibrate ในดินแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของดิน เช่น เนื้อดิน ความหนาแน่นของดิน อุณหภูมิของดิน แต่ปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในดินจะมีผลต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่อง TDR ซึ่งอย่างไรก็ตามการวัดค่าความชื้นในดินโดยใช้เครื่อง TDR ยังมีข้อจำกัดในเรื่องราคาของเครื่องมือมีราคาค่อนข้างสูง

### เอกสารอ้างอิง

- นิรนาม. 2544. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. คณะจารย์ภาค วิชาปฐพีวิทยา. คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 หน้า.
- ปานชีวัน ปอนพังกา. 2545. ปริมาณและการเคลื่อนที่ของน้ำในดินทรายชุดน้ำพองที่ใช้ผลิตอ้อยข้ามแล้งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 75 หน้า
- วิทยา ตรีโลเกศ. 2541. เอกสารประกอบการสอน วิชา 112 และ 201 ปฐพีศาสตร์เบื้องต้น: ส่วนวิชาฟิสิกส์ของดิน. ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม, คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 118 หน้า.
- Baker, J. M. and R. R, Allmaras. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1-6.
- Dasberg, S. and F. N. Dalton. 1985. Time domain reflectometry field measurement of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 293-297.
- Heimovaara, T. J. 1993. Design of triple-Wire time-domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1410-1417.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. New York. 771 p.

- Horino, H. and T. Maruyama. 1995. Measurements of volumetric water content and depth of frozen soil using time-domain reflectometry, Pages 79-84. *In* Soil moisture control in arid to semi-arid region for agro-forestry.
- Ren, T., K. Noborio and R. Horton. 1999. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo- time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:450-457.
- Topp, G. C., J. L. Davis and A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.