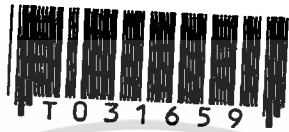


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หัวข้อความขึ้นดิน



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 31659

วัน, เดือน, ปี 19 พ.ค. 2541

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่มีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## **Soil Humidity Sensor**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Applied Physics**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**1997**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

หัวข้อความขึ้นดิน

โดย

นางสาวไยศิริ

ไชยวงศ์

นางสาวรัชณี

บุรพาพาณิชย์

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต

ศิริโชค

อาจารย์บัณฑิต

ดำรงศักดิ์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  
(รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิชัย)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

~~.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชค)~~

ประธานกรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิชัย)

กรรมการ

~~.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา)~~

กรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	หัวข้อความชื้นดิน	
โดย	นางสาวโยลิริ	ไชยวงศ์
	นางสาวรัชณี	บูรพาพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต	ศิริโชติ
	อาจารย์บดินทร์	ดำรงศักดิ์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2540	

### บทคัดย่อ

อุปกรณ์นี้ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวัดปริมาณความชื้นของดินโดยอาศัยหลักการของการนำความร้อนโดยองค์ประกอบของหัวข้อความชื้นดินมีดังต่อไปนี้

- 1) วงจรวัดอุณหภูมิความไวสูงโดยการใช้เทอร์มิสเตอร์ในวงจรขยายแบบบริดจ์
- 2) ขดลวดความร้อนขนาดเล็กเพื่อใช้สร้างพลังความร้อน
- 3) เซรามิกที่ใช้ห่อหุ้มขดลวดความร้อนและเทอร์มิสเตอร์

หลักการการทำงานของหัววัดเริ่มจากการให้ความร้อนเป็นเวลา 5 วินาทีโดยจะมีเซ็นเซอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำความร้อนไปยังเทอร์มิสเตอร์ ปริมาณของความร้อนที่เคลื่อนที่จากขดลวดความร้อนมายังเทอร์มิสเตอร์จะสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นดิน จากการทำการทดลองหัวข้อความชื้นดินที่ค่าความชื้นดินต่างๆ กันพบว่าหัววัดสามารถบอกเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินได้ในช่วง 13-20 เปอร์เซ็นต์

<b>Special Project Title</b>	<b>Soil Humidity Sensor</b>	
<b>Name</b>	<b>Miss.Yaisiri</b>	<b>Chaiwong</b>
	<b>Miss.Ratchanee</b>	<b>Burapapanich</b>
<b>Special Project Adviser</b>	<b>Asst. Prof.Wichit</b>	<b>Sirichote</b>
	<b>Mr. Badin</b>	<b>Damrongsak</b>
<b>Department</b>	<b>Applied Physics</b>	
<b>Academic Year</b>	<b>1997</b>	

### Abstract

A device used for in-situ measuring soil humidity employing thermal conduction has been designed and built. The thermal conduction sensor consist of 1) a sensitive temperature measuring circuit utilizing thermistor with a bridge amplifier, 2) a small heater wire for providing heat pulse, and 3) a ceramic slab on with the heater and thermistor are mounted. The operation of the sensor starts by applying a 5 sec thermal pulse. The ceramic slab is the thermal conduction path to the thermistor. The amount of heat reached the thermistor is correlated to the percent of soil humidity. Testing of the sensor has been carried out with different humid soil humidity. The result showed a 13-20% of soil humidity can be obtained.

## กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายดังนี้

- บิดาและมารดา ผู้ที่คอยให้กำลังใจทรัพย์และกำลังใจในการศึกษาและการดำรงชีวิต
- ผศ.วิชิต ศิริโชติ ผู้ให้โอกาสและคำปรึกษาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับโครงการพิเศษ รวมถึง datalogger ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
- รศ.ดร.อิทธิสุนทร นันทกิจ ผู้ให้คำปรึกษาและแนวทางในการสร้างห้วัดความชื้นดิน รวมถึงข้อมูลที่เป็นเกี่ยวกับห้วัดความชื้นดิน
- เจ้าหน้าที่คณะเกษตร ผู้อนุเคราะห์ดินที่ใช้ในการทดลองโครงการพิเศษ
- อ.บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์ ผู้รับฟังและแนะนำทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง
- อ.ภูมินทร์ จินดาจิรววัฒน์ ผู้ให้ความสนใจและบอกถึงจุดผิดพลาดที่ควรแก้ไข
- เพื่อน ๆ ที่น้องทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและถามไถ่ทุกข์สุขมาโดยตลอด
- ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามด้วยความจริงใจ

โยสิริ และ รัชณี

## สารบัญเรื่อง

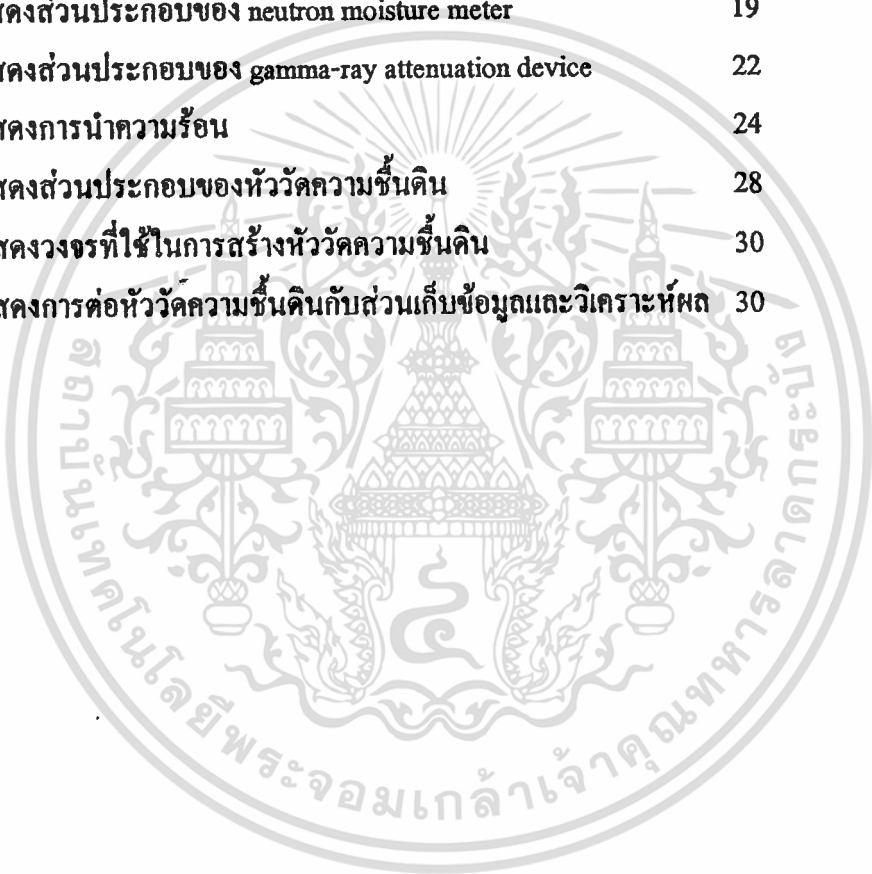
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูป	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 วิธีดำเนินการ	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ดิน	3
2.1.1 ความสำคัญของดิน	3
2.1.2 องค์ประกอบของดิน	4
2.1.3 เนื้อดิน	5
2.1.4 อุณหภูมิดิน	6
2.2 ความชื้นในดิน	8
2.2.1 ความหมายของความชื้น	8
2.2.2 ความหมายของความชื้นในดิน	8
2.2.3 ความสำคัญของความชื้นในดินที่มีต่อการเกษตร	8
2.2.4 การแสดงระดับความชื้นของดิน	9
2.2.5 เครื่องมือบางชนิดสำหรับศึกษาความชื้นของดิน	10
2.3 การนำความร้อน	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย</b>	<b>26</b>
<b>3.1 อุปกรณ์สำหรับการสร้างห้วงวัดความชื้นดิน</b>	<b>26</b>
3.1.1 ขดลวดความร้อน	26
3.1.2 เทอร์มิสเตอร์	26
3.1.3 สารหล่อหุ้ม	27
<b>3.2 วงจรสำหรับการสร้างห้วงวัดความชื้นดิน</b>	<b>27</b>
<b>บทที่ 4 การทดลอง</b>	<b>28</b>
4.1 ขั้นตอนการสร้างห้วงวัดความชื้น	28
4.2 วิธีการทดลอง	28
4.3 ผลการทดลอง	31
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	<b>33</b>
5.1 สรุปและการประยุกต์ใช้งาน	33
5.2 แนวทางในการพัฒนาโครงการ	33
<b>ภาคผนวก ก ข้อมูลของห้วงวัดความชื้นดินด้วยหลักการนำความร้อน</b>	
<b>ภาคผนวก ข ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินแต่ละชนิดที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช</b>	
<b>ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ</b>	
<b>ภาคผนวก ง รูปถ่ายของห้วงวัดความชื้นดิน</b>	
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	
<b>ประวัติผู้จัดทำโครงการพิเศษ</b>	

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของดินที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก	4
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของ tensiometer	11
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของ moisture block	13
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของ pressure cooker และ pressure membrane apparatus	15
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของ porous-bottomed cell	17
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของ neutron moisture meter	19
รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของ gamma-ray attenuation device	22
รูปที่ 2.8 แสดงการนำความร้อน	24
รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของหีวัดความชื้นดิน	28
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการสร้างหีวัดความชื้นดิน	30
รูปที่ 4.3 แสดงการต่อหีวัดความชื้นดินกับส่วนเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล	30



# บทที่ 1

## บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า การดำรงชีวิตของมนุษย์เรานั้น ขึ้นอยู่กับพื้นฐานทางด้านการเกษตรมาเป็นเวลาช้านานแล้ว ประเทศไทยของเราก็เป็นประเทศที่ประชาชนส่วนใหญ่ทำการเกษตรกันเป็นส่วนมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นในการจะเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรชนิดใดก็ตามให้ได้ผลผลิตดีนั้น เราจำเป็นต้องเลือกดินที่จะใช้ในการเพาะปลูกอย่างเหมาะสมและมีธาตุอาหารที่จำเป็นแก่การเจริญเติบโตของพืชผลชนิดนั้น ๆ ในปริมาณและอัตราส่วนที่พอเหมาะด้วย นอกจากนี้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แสงแดด อากาศ ก็นับเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตของพืชเป็นอย่างยิ่ง ความชื้นของดินก็เป็นปัจจัยสภาพแวดล้อมหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากความชื้นในดินจะเป็นแหล่งน้ำแหล่งเดียวของพืชที่ขึ้นอยู่กับดินนั้นจะสามารถดูดและนำไปใช้ได้ จากแนวความคิดเหล่านี้จึงทำให้เกิดโครงการนี้ขึ้นมา โดยที่โครงการนี้จะเป็นการสร้างหัววัดความชื้นดิน (Soil Humidity Sensor) เพื่อใช้ในการศึกษาหาค่าความชื้นของดินให้เหมาะสมกับพืชชนิดต่าง ๆ โดยหัววัดความชื้นดินในโครงการนี้จะใช้หลักการการนำความร้อนในสาร

### 1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและนำหลักการการนำความร้อนมาประยุกต์ใช้งานในด้านการเกษตร
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพของดินในเชิงความชื้น
3. สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางการเกษตรและด้านอื่น ๆ

### 1.2 วิธีการดำเนินการ

การดำเนินการในการสร้างหัววัดความชื้นดินนั้น ได้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูล เกี่ยวกับความชื้นดินและชนิดของหัววัดความชื้นดิน
2. เลือกชนิดของหัววัดความชื้นดินที่จะสร้าง รวมถึงจัดหาอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคุณนำไปใช้

3. จัดหาเครื่องมือที่มาช่วยในการเก็บและวิเคราะห์ผลการทดลอง
4. เตรียมดินอบแห้งที่จะใช้ในการทดลองวัดความชื้นดิน, หัววัดความชื้นดินและส่วนเก็บข้อมูล
5. กำหนดปริมาณน้ำที่จะเติมในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน
6. ทดลองวัดความชื้นดินในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น
7. บันทึกผลการทดลอง
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง
9. สรุปผลการทดลอง

### 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ศึกษาองค์ประกอบของดินและสิ่งต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความชื้นดิน
2. ศึกษาวิธีการวัดความชื้นดินโดยทางตรงและทางอ้อม
3. ศึกษาหลักการนำความร้อนในสสารต่าง ๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ดิน (Soils)

ในแนวความคิดของเกษตรกรนั้น เกษตรกรถือว่าดินเป็นตัวกลางที่ใช้ในการปลูกพืช ดินที่ให้ผลผลิตสูงถือว่าเป็นดินที่ดี ในทางตรงกันข้ามดินที่ให้ผลผลิตต่ำถือว่าเป็นดินที่เลว แต่ในแนวความคิดของนักปฐพีวิทยา เมื่อศึกษาโดยมีความมุ่งหมายเพื่อการใช้ประโยชน์ของดินในด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (Edaphological Approach) ซึ่งเป็นทัศนะของการศึกษาดินที่มุ่งไปในทางที่จะใช้ดินให้เป็นประโยชน์ต่อการเพาะปลูก ความหมายของดินในด้านนี้ “ดิน คือ เทหวัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติรวมตัวเป็นชั้น ๆ เป็นผลมาจากการสลายตัวผุพังของหินและแร่ธาตุต่าง ๆ ผสมกับอินทรีย์วัตถุ ซึ่งห่อหุ้มผิวโลกเป็นชั้นบาง ๆ และเมื่อมีน้ำและอากาศในปริมาณที่เหมาะสมก็จะช่วยค้ำจุนในการยังชีพและการเจริญเติบโตของพืช”

##### 2.1.1 ความสำคัญของดิน

สิ่งที่มีชีวิตทั้งหลายจำเป็นต้องอาศัยดินทั้งทางตรงและทางอ้อมในการยังชีพและการเจริญเติบโต ซึ่งถ้าปราศจากดินแล้วก็อาจจะไม่มีสิ่งที่มีชีวิตเหลืออยู่ในโลกนี้ได้เลย

ความสำคัญของดินที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืช

ดินและพืชมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน ในการเจริญเติบโตของพืชนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ดินเป็นปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่งโดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเจริญเติบโตของพืช พืชต้องอาศัยดินในการเจริญเติบโตตั้งแต่เริ่มงอกออกจากเมล็ดจนกระทั่งโตให้ดอกออกผล

หน้าที่ของดินต่อการเจริญเติบโตของพืช

ดินมีหน้าที่ที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนี้

1. ดินทำหน้าที่เป็นที่ยึดเหนี่ยวของรากพืช เพื่อยึดลำต้นให้แน่นไม่ให้ล้มเอียง
2. ดินทำหน้าที่เป็นที่กักเก็บน้ำ เพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้ได้โดยการดูดน้ำเข้าทางราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ดินทำหน้าที่เป็นที่กักเก็บอากาศ เพื่อให้พืชนำไปใช้ในการหายใจ
4. ดินทำหน้าที่เป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช เพื่อการเจริญเติบโตและความทนทานต่อโรค แมลง และภัยธรรมชาติอื่น ๆ

### 2.1.2 องค์ประกอบของดิน (Soil Component)

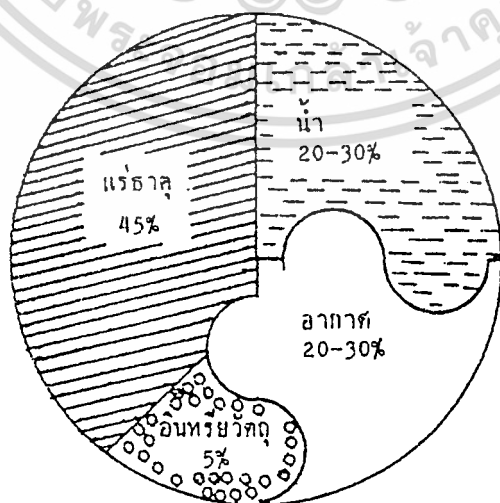
องค์ประกอบของดิน หมายถึง ส่วนประกอบต่าง ๆ ของดิน ดินโดยทั่วไปประกอบไปด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ของแข็ง (Solids) ส่วนที่เป็นของแข็งของดินนี้จะประกอบไปด้วย

- แร่ธาตุ (Mineral Matter) เป็นอนินทรีย์สารที่ได้จากการสลายตัวผุพังของแร่และหินต่าง ๆ
- อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังเน่าเปื่อยของซากพืชและสัตว์ที่ตายทับถมลงในดิน

2. ของเหลว (Liquid) ได้แก่ น้ำหรือความชื้นในดินเป็นส่วนประกอบที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคดินและในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน

3. แก๊ส (Gaseous) ได้แก่ อากาศในดินเป็นส่วนประกอบของดินที่ประกอบไปด้วย ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และก๊าซเฉื่อย ซึ่งจะอยู่ในช่องว่างระหว่างก้อนดิน และช่องว่างระหว่างอนุภาคดินโดยอยู่ร่วมกับน้ำหรือความชื้นในดิน ถ้าช่องว่างในดินมีน้ำอยู่มาก ก็จะมีอากาศอยู่น้อย แต่ถ้าช่องว่างนี้มีน้ำน้อยก็จะทำให้มีอากาศอยู่มาก



เอกสารรูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของดินที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของแต่ละส่วนประกอบของดินที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งประมาณ 50% โดยปริมาตร (ซึ่งมีแร่ธาตุประมาณ 45 % โดยปริมาตร และอินทรีย์วัตถุประมาณ 5 % โดยปริมาตร) และส่วนประกอบที่เป็นช่องว่างและน้ำประมาณ 50 % โดยปริมาตร (ซึ่งมีอากาศและน้ำประมาณอย่างละ 20-30 % โดยปริมาตร)

### 2.1.3 เนื้อดิน (Soil Texture)

เนื้อดิน หมายถึง ดินที่ประกอบด้วยสัดส่วนของอนุภาคหรือเม็ดทราย (sand) เม็ดตะกอน (silt) และเม็ดดินเหนียว (clay) ดินจะมีเนื้อหยาบหรือละเอียดมากน้อยขนาดไหนขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอนุภาคดินทั้งสามนี้

#### ประเภทของเนื้อดิน

ดินแต่ละประเภทที่ประกอบด้วย เม็ดทราย, เม็ดตะกอน, เม็ดดินเหนียวในอัตราส่วนที่ต่างกันนั้นสามารถแบ่งออกเป็นดินประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ดินทราย (Sands) หมายถึงดินที่เนื้อดินมีลักษณะเนื้อหยาบ ประกอบด้วยอนุภาคทราย 70 % หรือมากกว่า 70 % ขึ้นไป เนื้อดินประเภทนี้อากาศจะเกาะตัวกันหลวม ๆ ไม่จับตัวกันเป็นก้อน คือมักจะอยู่ในรูปของอนุภาคเดี่ยว ดังนั้นจึงร่วนไม่ว่าจะแห้งหรือเปียก
2. ดินร่วน (Loams) หมายถึงดินที่เนื้อดินมีลักษณะเนื้อหยาบปานกลาง เนื้อปานกลาง และเนื้อละเอียดปานกลาง
3. ดินเหนียว (Clays) หมายถึงดินที่เนื้อดินมีลักษณะเนื้อละเอียด ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียว 40 % หรือมากกว่า 40 % ขึ้นไป เนื้อดินประเภทนี้จะจับตัวกันเป็นก้อน แข็งเมื่อแห้งและเหนียวเหนอะหนะเมื่อเปียก

#### ความสำคัญของเนื้อดิน

เนื้อดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าเนื้อดินจะไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง แต่จะมีผลในทางอ้อมในการควบคุมสมบัติอื่น ๆ ของดิน ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอีกต่อหนึ่ง เช่น การดูดซับธาตุอาหารพืชของดิน การดูดซับน้ำและการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน การถ่ายเทอากาศของดิน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วดินยังมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเสถียร (stable) คือจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงสภาพได้สภาพธรรมชาติทั่วไป

ดินเหนียวเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เพราะอนุภาคดินเหนียวมีเนื้อที่ผิวจำเพาะมาก จึงทำให้สามารถดูดซับไอออนที่เป็นอาหารพืชไว้ได้มากและอุ้มน้ำได้ดี อย่างไรก็ตามดินเหนียวก็ยังมีข้อเสียที่ว่ามีการถ่ายเทอากาศและการระบายน้ำไม่ดี อากาศในดินไม่พอเพียงต่อความต้องการของรากพืช นอกจากนี้ยังมีการขยายตัวและหดตัวสูงเมื่อเปียกและแห้ง

ดินทรายเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เพราะมีเนื้อที่ผิวจำเพาะที่น้อยจึงดูดซับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้น้อยนอกจากนี้ธาตุที่จำเป็นต่อชีวิตของพืช ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคดินทรายไม่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำเนื่องจากอนุภาคดินเกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ ดินทรายยังเป็นดินที่มีการชะล้างสูงเพราะน้ำเคลื่อนที่ในดินทรายได้เร็วจึงทำให้ดินแห้งได้ง่าย การขยายตัวเมื่อเปียกและหดตัวเมื่อแห้งมีน้อยมาก

ดินที่นับว่าเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชได้แก่พวกดินร่วนเป็นดินที่มีดินเนื้อปานกลาง สามารถอุ้มน้ำได้ดี มีการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศพอเหมาะ สามารถตรึงธาตุอาหารพืชไว้ได้มากพอสมควร การไถพรวนทำได้สะดวก

#### 2.1.4 อุณหภูมิดิน (Soil Temperature)

อุณหภูมิดินเป็นสมบัติที่บ่งถึงระดับความร้อนของดิน อุณหภูมิของดินจะเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากพื้นดินได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์และจะค่อย ๆ เย็นลงหลังจากดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้าไปแล้ว

##### ความสำคัญของอุณหภูมิดิน

อุณหภูมิดินเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การเจริญเติบโตของพืชและควบคุมกิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ดิน เนื่องจากอุณหภูมิดินมีผลโดยตรงต่อพืชที่ขึ้นอยู่บนดินนั้น ดังนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิดินที่เหมาะสมจะมีผลต่อพืชหลายประการด้วยกัน คือ

1. ทำให้รากและต้นพืชเจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะการลงหัวของพืชหัว สำหรับพืชเขตร้อนโดยทั่วไปแล้วช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชจะอยู่ระหว่าง  $15 - 40^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ  $30^{\circ}\text{C}$
2. ทำให้เมล็ดพืชที่ปลูกไว้ในดินนั้นงอกได้เร็วขึ้น โดยเมล็ดของพืชแต่ละชนิดจะมีช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่แตกต่างกันไป
3. ทำให้จุลินทรีย์ดินประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ได้ดี ส่งผลให้อินทรีย์วัตถุที่ผสมอยู่ในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรรมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ระหว่าง 0 - 40 °C และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 25 - 30 °C

แต่ถ้าอุณหภูมิดินไม่เหมาะสมแล้วอาจทำให้เกิดความเสียหายได้มาก โดยเฉพาะรากพืชในดินจะมีผลทำให้การทำงานของรากพืชหยุดชะงักหรือเป็นไปได้ช้า ทำให้อัตราการดูดน้ำและธาตุอาหารพืชลดลง ปริมาณน้ำและธาตุอาหารที่จะขึ้นไปหล่อเลี้ยงต้นพืชและส่วนอื่น ๆ ก็ลดลงซึ่งจะมีผลกระทบไปถึงการเจริญเติบโตของต้นพืชด้วย ทำให้ต้นพืชมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำและใช้ช่วงเวลาของการเจริญเติบโตนาน ในกรณีที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ อาจจะทำให้รากพืชตายได้ นอกจากนี้แล้วอุณหภูมิดินที่ไม่เหมาะสมยังมีผลต่อการระบาดของโรคพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อการเจริญเติบโตของพืชไม่ดีทำให้มีความต้านทานต่อโรคลดน้อยลง การระบาดของโรคพืชก็จะรุนแรงมากขึ้น และในดินยังเป็นแหล่งสะสมโรคพืชหลายชนิดด้วย

#### ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิดิน

อุณหภูมิดินในแต่ละแห่งที่แตกต่างกันนั้น เป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน คือ

1. พลังงานแสงแดด (Solar radiation) ที่ตกกระทบกับผิวพื้นดิน หากมีมากก็จะทำให้ดินบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงมาก
2. สีของดิน (Soil color) จะมีผลต่อการดูดกลืนและการแผ่รังสีความร้อนของดิน ดินที่มีสีคล้ำหรือสีดำจะดูดกลืนและแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่าดินที่มีสีจาง
3. ความชื้นในดิน (Soil moisture) จะมีผลต่อการร้อนขึ้นหรือเย็นลงของพื้นดิน
4. วัสดุที่ปกคลุมดินอยู่ (Mulching materials) วัสดุปกคลุมดินชนิดต่าง ๆ ดูดและสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ต่างกัน นอกจากนี้แล้วยังนำความร้อนได้ต่างกันด้วย ดังนั้นอุณหภูมิในขณะหนึ่ง ๆ ของดินที่มีวัสดุปกคลุมจะเป็นเท่าใดจึงขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุปกคลุมดินนั้น
5. หนุ่มพืช (Vegetation) พืชพรรณชนิดต่าง ๆ ที่ขึ้นปกคลุมผิวดินอยู่จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิดิน โดยช่วยลดจำนวนพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ที่จะกระทบพื้นผิวดินให้น้อยลง และป้องกันการสะท้อนกลับของความร้อนจากผิวดิน ดังนั้นจึงช่วยทำให้อุณหภูมิดินไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

## 2.2 ความชื้นในดิน

ความชื้น เป็นสารที่ปรากฏเสมอในดินในธรรมชาติ และเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมีและทางชีววิทยาของดินเป็นอย่างมาก ความชื้นของดินจึงมีความสัมพันธ์ทั้งโดยตรงและโดยอ้อมเป็นอย่างมากกับความเป็นอยู่ของพืชที่ขึ้นอยู่บนดินและของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน เพื่อให้การใช้ดินเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยเฉพาะเพื่อการผลิตพืชได้ผลดีที่สุดภายใต้สภาพการณ์หนึ่ง ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเรื่องความชื้นของดิน

### 2.2.1 ความหมายของความชื้น

ความชื้น หมายถึง ไอน้ำหรือน้ำที่รวมอยู่หรือผสมปะปนอยู่ในสาร สสารหรือวัตถุต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ความชื้นในอากาศหมายถึง ไอน้ำที่ปนอยู่ในอากาศผสมปะปนอยู่กับก๊าซ หรือความชื้นของต้นไม้ก็คือน้ำที่มีอยู่ในต้นไม้ ฯลฯ

ในด้านของสิ่งมีชีวิต ความชื้นนับว่ามีความสำคัญต่อชีวิตทุกชีวิตในโลก นับตั้งแต่สัตว์หรือพืชชั้นต่ำจนถึงพืชหรือสัตว์ที่มีวิวัฒนาการซับซ้อน ความชื้นจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของชีวิต โดยมีอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชีวิตมากน้อยแตกต่างกัน ความชื้นในสิ่งมีชีวิตมีความจำเป็นสำหรับขบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) จำเป็นสำหรับขบวนการหายใจ การคายน้ำและการสังเคราะห์แสง ความชื้นมีผลทำให้ชีวิตมีความว่องไวกระฉับกระเฉง

ความชื้นที่มีอิทธิพลต่อการเกษตรแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ความชื้นในอากาศและความชื้นในดิน

### 2.2.2 ความหมายของความชื้นในดิน

ความชื้นในดิน หมายถึง ปริมาณน้ำและไอน้ำที่มีอยู่ในดินทั้งที่หุ้มอนุภาคดินอยู่และที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคดิน (Soil pore)

ความชื้นของดินจะมีผลโดยตรงต่อพืชที่ขึ้นอยู่บนดินนั้น ทั้งนี้เพราะความชื้นในดินจะเป็นแหล่งน้ำแหล่งเคี้ยวของพืชที่ขึ้นอยู่ในดินนั้นจะสามารถดูดและนำไปใช้ได้และความชื้นในดินจะมีผลโดยทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในโลกและต่อสภาพแวดล้อม

### 2.2.3 ความสำคัญของความชื้นในดินที่มีต่อการเกษตร

1. จะควบคุมการระเหยน้ำของดิน
2. จะควบคุมการระเหยน้ำจากดินพืชและควบคุมอุณหภูมิภายในดินพืช
3. ควบคุมการแพร่กระจายและการหยั่งรากของพืช

4. ควบคุมปริมาณน้ำในดินพืช
5. ความชื้นในดินจำเป็นต่อการงอกของเมล็ดพืชในดิน
6. ความชื้นในดินจะเป็นตัวทำลายธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อดินพืช
7. ช่วยให้อินทรีย์วัตถุในดินเน่าเปื่อยได้ดี
8. ความชื้นของดินจะช่วยให้อุณหภูมิของดินเหมาะต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ดิน

#### 2.2.4 การแสดงระดับความชื้นของดิน

ระดับความชื้นของดิน เป็นสิ่งที่แสดงถึงจำนวนหรือปริมาณของความชื้นที่มีอยู่ในดินจำนวนหนึ่ง ๆ การแสดงระดับความชื้นของดินอาจกระทำได้หลายวิธีทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่สำคัญและนิยมใช้กัน คือ

##### 1. ทางตรง

โดยการเก็บตัวอย่างดินที่มีน้ำอยู่มากชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบให้ดินแห้งสนิท ซึ่ง “ดินแห้งสนิท” ในที่นี้หมายถึงดินที่ได้ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 - 110 °C จนดินนั้นมีน้ำหนักคงที่ ซึ่งโดยปกติต้องใช้เวลาอบไม่น้อยกว่า 15 ชั่วโมง การอบดินตามวิธีการนี้ทำให้ทุก ๆ ส่วนของความชื้นของดินยกเว้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคดิน หายไปจากดินโดยสิ้นเชิงแต่ไม่ทำให้สิ่งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความชื้นสูญเสียไปจากดินแต่อย่างใด ดินที่ได้ผ่านการอบตามวิธีการนี้แล้วเรียกว่า oven - dry soil หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักของดินที่อบแล้วอีกครั้งหนึ่ง น้ำหนักที่หายไปก็คือน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในดินนั้น การวัดความชื้นโดยวิธีทางตรงนี้สามารถแสดงผลได้โดย

##### 1.1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (Percentage by weight)

เปอร์เซนต์ความชื้น โดยน้ำหนักของดินเป็นตัวเลขที่แสดงถึงน้ำหนักของความชื้นของดินเมื่อคิดเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักของดินเมื่อดินแห้งสนิทสามารถคำนวณหาได้จากสมการ คือ

$$P_w = (M_w / M_s) 100$$

เมื่อ  $P_w$  คือ เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของน้ำในดิน (%)

$M_w$  คือ น้ำหนักของน้ำในดิน (กรัม)

$M_s$  คือ น้ำหนักของดินที่แห้งสนิท (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Percentage by volume)

เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตรของดิน หมายถึงปริมาตรของส่วนที่เป็นความชื้นของดิน เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดของดิน คำนวณหาได้จากสมการ คือ

$$P_v = (V_w / V_b)100$$

$$\text{หรือ } P_v = (P_w D_b) / D_w$$

- เมื่อ  $P_v$  คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำในดินโดยปริมาตร (%)  
 $V_w$  คือ ปริมาตรของน้ำในดิน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $V_b$  คือ ปริมาตรของดินทั้งหมด (ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $D_b$  คือ ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $D_w$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)

## 2. ทางอ้อม

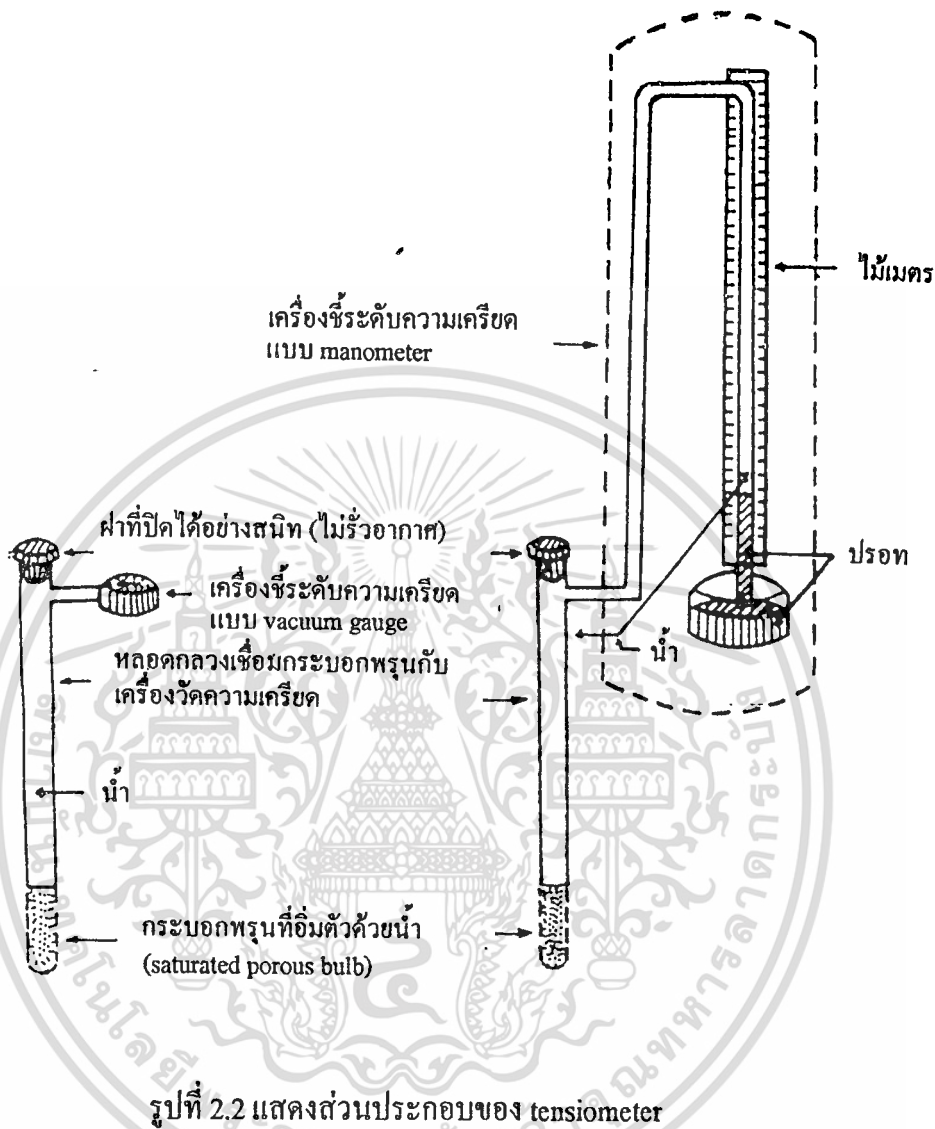
วิธีการวัดโดยทางอ้อมนี้เป็นวิธีที่อาศัยเครื่องมือชนิดต่าง ๆ เช่น Tensiometer, Moisture block, Pressure cooker, Pressure membrane apparatus, Porous - bottomed cell, Neutron moisture meter, Gamma - ray attenuation device เป็นต้น

### 2.2.5 เครื่องมือบางชนิดสำหรับศึกษาความชื้นของดิน

#### ● Tensiometer

Tensiometer เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความเครียดของความชื้นของดิน ส่วนประกอบที่สำคัญของ Tensiometer ได้แก่

1. วัสดุพรุน (porous material) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแผ่นหรือกระเปาะกลวงก็ได้
2. เครื่องชี้ระดับความเครียด (tension indicator) ซึ่งอาจเป็นหน้าปัทม์สำหรับวัดสุญญากาศ หรือ manometer ซึ่งได้แก่หลอดโปร่งแสงที่มีของเหลวซึ่งโดยปกติได้แก่ปรอทบรรจุอยู่หรือเครื่องเปลี่ยนความดันเป็นพลังงานไฟฟ้าก็ได้
3. หลอดสำหรับเชื่อมโยงระหว่างวัสดุพรุนกับเครื่องชี้ระดับความเครียด



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของ tensiometer

ในการวัดความเคียดของความชื้นของดินโดย tensiometer นั้น ให้น้ำที่บรรจุอยู่จนเต็มช่องว่างทั้งหมดของช่องของวัตถุพรุนและของส่วนที่เชื่อมโยงวัตถุพรุนกับเครื่องชี้ระดับความเคียด ซึ่งเป็นน้ำที่มีความเคียดเท่ากับศูนย์สัมพันธ์กับความชื้นของดิน โดยมีช่องว่างของวัตถุพรุนเป็นทางติดต่อ ถ้าความเคียดของความชื้นของดินไม่เท่ากับความเคียดของน้ำใน tensiometer (ไม่เท่ากับศูนย์) น้ำใน tensiometer และความชื้นของดินจะปรับตัวเพื่อให้ความเคียดที่เท่ากัน กล่าวคือ ถ้าความชื้นของดินมีความเคียดที่มากกว่าศูนย์ บางส่วนของน้ำใน tensiometer จะเคลื่อนออกจาก tensiometer เข้าสู่ดิน โดยผ่านทางช่องของวัตถุพรุนของ tensiometer และถ้าความเคียดของความชื้นของดินน้อยกว่าศูนย์ (มีความดัน) บางส่วนของความชื้นของดินจะเคลื่อนเข้าไปใน tensiometer โดยผ่านทางช่องของวัตถุพรุนของ tensiometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่เผยแพร่หรือใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นกัน การเคลื่อนที่ของน้ำออกจาก tensiometer หรือเข้าไปใน tensiometer นี้เป็นสิ่งที่ทำให้เครื่องซึ่งระดับความเครียดของ tensiometer ทำงานและการเคลื่อนที่นี้จะหยุดเมื่อความเครียดของน้ำภายในและภายนอก tensiometer เท่ากันพอดีและเครื่องซึ่งระดับความเครียดจะให้ค่าที่คงที่เมื่อถึงจุดนี้ ด้วยเหตุที่การเคลื่อนที่ของน้ำออกจาก tensiometer หรือเข้าไปใน tensiometer ในขณะที่วัดอุณหภูมของ tensiometer สัมผัสอยู่กับดินมีแนวโน้มที่จะทำให้ระดับความชื้นของดินที่สัมผัสอยู่กับวัดอุณหภูมของ tensiometer เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงจำเป็นที่จะต้องให้ปริมาณของน้ำที่จะต้องเคลื่อนที่เข้าหรือออกนี้น้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้โดยการใช้เครื่องซึ่งระดับความเครียดที่มีความไว (sensitivity) มาก ๆ จึงจะได้ความเครียดที่ใกล้เคียงกับความเครียดของความชื้นของดินก่อนที่ดินจะสัมผัสกับวัดอุณหภูมของ tensiometer มากที่สุด นอกจากนี้ในขณะที่ใช้ tensiometer วัดความเครียดของความชื้นของดินนั้น จะต้องไม่มีอากาศแทรกซึมเข้าไปภายใน tensiometer เป็นอันขาดไม่ว่าจะเป็นโดยทางใดไม่เช่นนั้นเครื่องซึ่งระดับความเครียดจะปฏิบัติงานไม่ถูกต้องด้วยเหตุที่วัดอุณหภูมของ tensiometer ส่วนใหญ่รั่วอากาศเมื่อความเครียดของน้ำที่ขังอยู่ในช่องของวัดอุณหภูม นั้น ๆ มากกว่าประมาณ 0.8 บรรยากาศ tensiometer จึงใช้ไม่ได้ผลถูกต้องเมื่อความเครียดของความชื้นของดินเกิน 0.8 บรรยากาศ อีกประการหนึ่งก็คือวัดอุณหภูมของ tensiometer จะต้องสัมผัสดินอย่างแนบสนิทโดยทั่วถึง tensiometer จึงจะวัดความเครียดของความชื้นของดินได้ถูกต้อง วัดอุณหภูมของ tensiometer เป็นสิ่งที่ทั้งน้ำและไอออนชนิดต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเคลื่อนผ่านได้ ความเครียดที่วัดได้โดย tensiometer จึงเป็นความเครียดเมตริกเท่านั้น

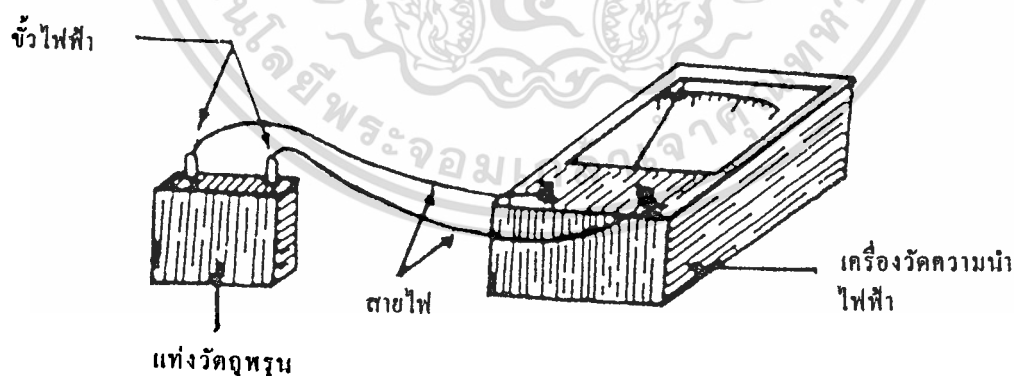
ค่าที่อ่านได้จากเครื่องซึ่งระดับความเครียดของ tensiometer อาจไม่ใช่ค่าความเครียดโดยตรงเสมอไป โดยเฉพาะเมื่อ tensiometer มีเครื่องซึ่งระดับความเครียดที่เป็นประเภทหน้าปัทม์สำหรับวัดสูญญากาศ (vacuum gauge) เช่นในกรณีของ tensiometer ที่มีชื่อพิเศษว่า irrometer เป็นต้น หากเป็นเช่นนี้จำเป็นจะต้องมี calibration curve ซึ่งได้แก่กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือกับค่าของความเครียดที่แท้จริงจึงจะทราบได้ว่า ค่าหนึ่ง ๆ ที่อ่านได้จากเครื่องมือ นั้นตรงกับค่าความเครียดที่แท้จริงเท่าใด นอกจากนี้หากประสงค์จะทราบระดับความชื้นของดิน ในขณะที่ความชื้นของดินมีความเครียดในระดับหนึ่ง ๆ ก็จำเป็นจะต้องมีกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของความชื้นของดินกับระดับความชื้นของดินหรือระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือกับระดับความชื้นของดิน เพื่อใช้สำหรับเปลี่ยนความเครียดของความชื้นของดินหรือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือให้เป็นระดับความชื้นของดิน ในบางกรณีแทนที่จะใช้กราฟดังกล่าวแล้วนี้ อาจใช้สมการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักวิชาทางสถิติ (regression equation) ก็ได้

### ● Moisture block

Moisture block เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับความชื้นของดินที่ใช้ความผันแปรของความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุพูนบางชนิดกับระดับความชื้นของวัตถุพูนนั้นเป็นพื้นฐาน ส่วนประกอบของเครื่องมือนี้ได้แก่

1. แท่ง (block) ของวัตถุพูนที่มีรูปร่างเหมือนกลักไม้ขีดไฟและมีขนาดเท่า ๆ กันด้วยในแท่งวัตถุพูนนี้มีขั้วไฟฟ้า (electrode) ฝังอยู่สองอัน
2. เครื่องวัดความนำไฟฟ้าหรือเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า
3. สายไฟสำหรับเชื่อมขั้วไฟฟ้าที่ฝังอยู่ในแท่งวัตถุพูนกับเครื่องวัดความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้า

แท่งวัตถุพูนโดยปกติทำด้วย gypsum หรือ nylon หรือ fiberglass ซึ่ง gypsum มีข้อเสียเปรียบ nylon และ fiberglass ตรงที่ gypsum ฟูพองง่ายกว่า nylon หรือ fiberglass เมื่อฝังไว้ในดินนาน ๆ และบางส่วนของ gypsum ซึ่งได้แก่  $\text{CaSO}_4$  ยังอาจละลายและเจือปนอยู่กับน้ำที่ซึมเข้าไปในแท่ง gypsum ซึ่งจะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของแท่ง gypsum ขึ้นกับปริมาณของ  $\text{CaSO}_4$  ที่ละลายอยู่ในน้ำนี้ด้วย จึงไม่ขึ้นกับระดับความชื้นของแท่ง gypsum แต่อย่างเดียว แต่ moisture block ที่ทำด้วย gypsum ก็มีราคาถูกกว่าที่ทำด้วย nylon หรือ fiberglass ส่วนประกอบของ moisture block แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของ moisture block

การใช้ moisture block วัดระดับความชื้นของดินมีหลักการว่า ความนำไฟฟ้าของ moisture block เพิ่มขึ้น (ความต้านทานไฟฟ้าของ moisture block ลดลง) เมื่อระดับความชื้นของ moisture block มากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำ moisture block ที่แห้งไปสัมผัสกับดิน ถ้าดินมีความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการค้าในชื่อของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นจากดินจะซึมเข้าไปใน moisture block ความนำไฟฟ้าของ moisture block จึงย่อมมากกว่า เมื่อ moisture block แห้ง ปริมาณของความชื้นที่ซึมเข้าไปใน moisture block ย่อมผันแปรโดยตรงกับระดับความชื้นของดินที่สัมผัสอยู่กับ moisture block ดังนั้นความนำไฟฟ้าของ moisture block จึงย่อมผันแปรโดยตรงกับระดับความชื้นของดินที่สัมผัสอยู่กับ moisture block จึงอาจหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นของดินกับความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของ moisture block ในรูปของกราฟหรือในรูปของสมการ สำหรับใช้เปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้าที่อ่านได้จาก moisture block เมื่อให้ moisture block สัมผัสกับดินให้เป็นระดับความชื้นของดิน moisture block จึงไม่ใช่เครื่องมือที่วัดระดับความชื้นของดินได้โดยตรงและถ้าประสงค์จะทราบความเครียดของความชื้นของดินด้วย ก็จะต้องใช้กราฟหรือสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของความชื้นของดินกับระดับความชื้นของดินอีกชั้นหนึ่งด้วยกราฟหรือสมการสำหรับเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของ moisture block ให้เป็นระดับความชื้นของดินรวมทั้งกราฟหรือสมการสำหรับเปลี่ยนระดับความชื้นของดินให้เป็นความเครียดของความชื้นของดิน เป็นกราฟหรือสมการที่เจาะจงสำหรับดินชนิดหนึ่ง ๆ จะใช้กราฟหรือสมการของดินชนิดหนึ่งกับดินอีกชนิดหนึ่งไม่ได้ เรื่องนี้เป็นความจริงสำหรับ tensiometer และเครื่องมือชนิดอื่น ๆ ที่ต้องใช้สมการเช่นนี้ด้วย

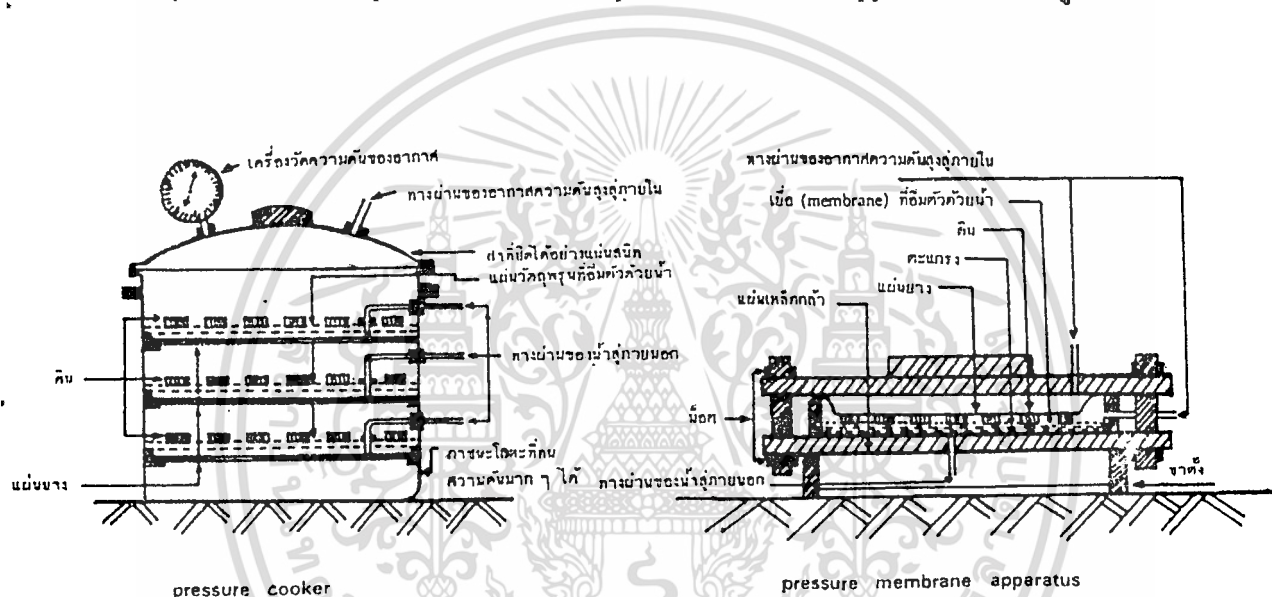
ความไว (sensitivity) ของ moisture block โดยปกติต่ำมากเมื่อ moisture block แห้งหรือชื้นมาก ๆ กล่าวคือ ความนำไฟฟ้าของ moisture block เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อระดับความชื้นของ moisture block เปลี่ยนแปลงในช่วงของระดับความชื้นที่ต่ำหรือสูงมาก ๆ ดังนั้น moisture block จึงใช้ได้ผลดีแต่เฉพาะในกรณีที่ระดับความชื้นของดินไม่สูงหรือต่ำมากนักเท่านั้น ข้อควรสังเกตอีกประการหนึ่งเกี่ยวกับ moisture block ก็คือ โดยปกติความไวของ moisture block จะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อฝังไว้ในดินเป็นเวลานาน ๆ เพราะจุลินทรีย์ดินมักเคี้ยวเปิดช่องของ moisture block ทำให้ความชื้นเคลื่อนเข้าไปใน moisture block หรือออกจาก moisture block ได้ยาก เรื่องนี้เป็นความจริงสำหรับส่วนที่เป็นวัสดุพรุนของ tensiometer ด้วย ปัญหานี้อาจแก้ไขโดยการนำ moisture block หรือส่วนที่เป็นวัสดุพรุนของ tensiometer ไปแช่ในสารละลายกรดเจือจางเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามช่องของ moisture block หรือของส่วนที่เป็นวัสดุพรุนของ tensiometer

- **Pressure cooker และ pressure membrane apparatus**

เครื่องมือทั้งสองชนิดนี้ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของความชื้นของดินกับระดับความชื้นของดินโดยใช้ความดันหรือแรงผลักดัน (pressure) ทั้ง pressure cooker และ

เอกสารที่แนบมาทั้งหมดนี้จัดทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายให้แก่นักศึกษาและบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pressure membrane apparatus ทำด้วยเหล็กกล้าที่สามารถทนความดันสูง ๆ ได้ และมีฝาที่ปิดได้อย่างสนิทและแข็งแรง เพื่อไม่ให้ก๊าซหรืออากาศที่มีความดันสูง ๆ ที่อยู่ภายในเครื่องมือรั่วออกมาภายนอกได้ ภายใน pressure cooker มีที่สำหรับวางแผ่นวัตถุพอรุน (porous plate) และภายใน pressure membrane apparatus มีที่สำหรับวางแผ่นเยื่อ (membrane) ที่น้ำและไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำเคลื่อนผ่านได้ ภายใต้แผ่นวัตถุพอรุนและแผ่นเยื่อนี้ มีท่อเล็ก ๆ สำหรับให้น้ำผ่านออกสู่ภายนอก ส่วนประกอบอีกอย่างหนึ่งของเครื่องมือทั้งสองนี้ ได้แก่เครื่องอัดก๊าซหรืออากาศให้มีความดันมาก ๆ โคอะแกรมของ pressure cooker และ pressure membrane apparatus แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของ pressure cooker และ pressure membrane apparatus

ในขณะที่ใช้ pressure cooker และ pressure membrane apparatus แผ่นวัตถุพอรุนของ pressure cooker และแผ่นเยื่อของ pressure membrane apparatus จะต้องอิมตัวด้วยน้ำอยู่เสมอและจะต้องไม่รั่วอากาศที่มีความดันสูงที่อยู่ในเครื่องมือ นอกจากนี้ตัวอย่างดินจะต้องสัมผัสกับแผ่นวัตถุพอรุนหรือแผ่นเยื่ออย่างแนบสนิทอีกด้วย วิธีใช้เครื่องมือทั้งสองนี้โดยสังเขปประกอบด้วยการวางตัวอย่างดินลงบนแผ่นวัตถุพอรุนหรือแผ่นเยื่อที่อิมตัวด้วยน้ำ แล้วทำให้ตัวอย่างดินนั้นอิมตัวด้วยน้ำ ต่อจากนั้นก็ปิดฝาเครื่องมือให้แน่น แล้วเปิดก๊อกให้อากาศหรือก๊าซที่มีความดันเท่ากับค่าความเครียดที่ต้องการเข้าไปในเครื่องมือ รอจนกระทั่งไม่มีน้ำหยดออกมาจากภายในเครื่องมืออีกต่อไป เมื่อถึงจุดนี้แล้วแสดงว่า ความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในดินในขณะนั้นสมดุลกับความเครียดที่มีค่าเท่ากับความดันของอากาศที่ปล่อยเข้าไปในเครื่องมือ ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างดินในขณะนั้นไปหา ระดับความชื้น ย่อมทราบระดับความชื้นของดินในขณะที่ความชื้นของดินสมดุลกับความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ขึ้นชื่อของเอกสารนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นถ้าประสงค์จะทราบระดับความชื้นของดินที่ระดับความเครียดอื่นก็อาจทราบได้โดยเปลี่ยนความดันของก๊าซหรืออากาศให้เท่ากับค่าความเครียดที่ต้องการและปฏิบัติเช่นเดิมทุกประการ

สมมติว่าความดันของอากาศที่อยู่ในเครื่องมือเท่ากับ  $P_a$  และความเครียดของความชื้นของดินขณะเกิดสมดุลกับความดันนี้ของอากาศในเครื่องมือเท่ากับ  $T$  ผลรวมระหว่างความดันของอากาศในเครื่องมือกับความดันของความชื้นของดินจะต้องเท่ากับความดันของอากาศที่อยู่ภายนอกเครื่องมือพอดี น้ำจึงจะหยุดหยดออกมาจากตัวอย่างดินที่อยู่ในเครื่องมือ ดังนั้น เมื่อถือว่าความดันของอากาศภายนอกเครื่องมือเป็นศูนย์ จะเห็นว่า

$$P_a + (-T) = 0$$

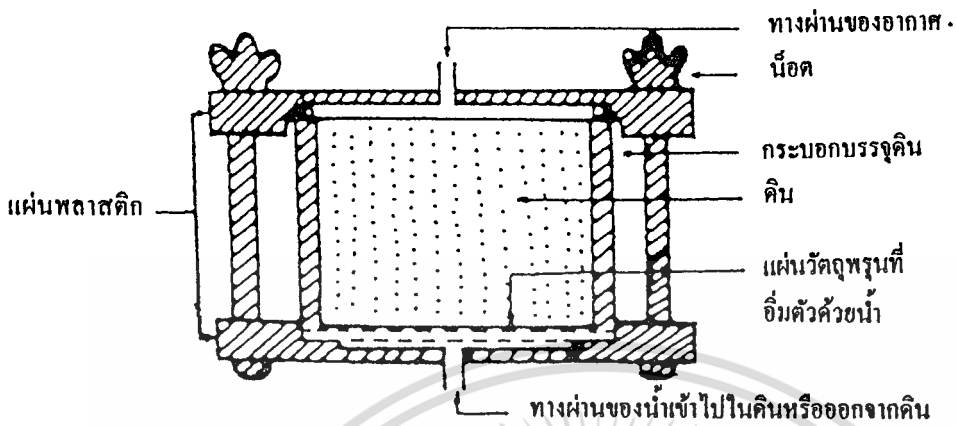
ซึ่งแสดงว่า

$$T = P_a$$

แผ่นวัตถุพรุนของ pressure cooker และแผ่นเยื่อของ pressure membrane apparatus เป็นสิ่งที่ทั้งน้ำและสิ่งที่ละลายอยู่ในน้ำเคลื่อนผ่านได้ ดังนั้นความเครียดที่ได้จากการใช้เครื่องมือทั้งสองนี้จึงเป็นความเครียดเมตริกเท่านั้น แผ่นวัตถุพรุนของ pressure cooker รั่วอากาศง่ายกว่าแผ่นเยื่อของ pressure membrane apparatus มาก โดยปกติ pressure cooker จึงใช้ได้ผลดีแต่เฉพาะในช่วงความเครียดที่ไม่เกิน 1 บรรยากาศ แต่ pressure membrane apparatus ยังคงใช้ได้ผลดีแม้ว่าความเครียดจะสูงถึง 25 บรรยากาศ

#### ● Porous - bottomed cell

Porous - bottomed cell เป็นเครื่องมือสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของความชื้นของดินกับระดับความชื้นของดินโดยวิธีใช้แรงดึง (suction) มีหลายแบบ แบบหนึ่งเรียกว่า Tempe cell ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือจำพวกนี้ได้แก่กระบอกสำหรับบรรจุตัวอย่างดินที่สามารถเชื่อมยึดปลายหนึ่งอย่างแนบสนิทกับแผ่นวัตถุพรุนได้ ได้แผ่นวัตถุพรุนเป็นช่อง (cavity) สำหรับบรรจุน้ำและมีหลอดเล็ก ๆ สำหรับเป็นทางติดต่อระหว่างช่องนี้กับภายนอก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของ porous - bottomed cell

วิธีการใช้เครื่องมือนี้โดยสังเขปประกอบด้วย การทำให้แผ่นวัตถุพรุนอิมตัวด้วยน้ำแล้ว เชื่อมยึดกระบอกที่บรรจุดินไว้บนแผ่นวัตถุพรุน โดยให้ดินสัมผัสกับแผ่นวัตถุพรุนอย่างแนบสนิท โดยตลอดแล้วใช้แรงดึงกระทำต่อผิวล่างของแผ่นวัตถุพรุน suction flask แล้วใช้ vacuum pump ดูด โดยใช้แรงดูดที่สมดุลกับระดับความเครียดที่ต้องการ หรือต่อสายยางเข้ากับหลอดที่เป็นทางติด ต่อระหว่างใต้แผ่นวัตถุพรุนกับภายนอก เติมน้ำจนเต็มช่องใต้แผ่นวัตถุพรุนและสายยางโดยไม่ให้มี ฟองอากาศเจือปนอยู่ด้วยเลยแล้วกลดอีกปลายหนึ่งของสายยางให้อยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางของตัว อย่างดินเท่ากับความเครียดที่ต้องการเมื่อคิดเป็นความยาวของลำน้ำ พร้อมกับเปิดปลายนั้นของสาย ยางสู่บรรยากาศ ถ้าความเครียดของความชื้นของดินก่อนที่จะใช้แรงดึงน้อยกว่าแรงดึงนั้น บาง ส่วนของความชื้นของดินจะเคลื่อนออกจากดินโดยผ่านทางแผ่นวัตถุพรุน แล้วหยดลงใน vacuum flask หรือหยดจากสายยางลงสู่บรรยากาศ จนกระทั่งความเครียดของความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในดิน สมดุลย์กับแรงดึงนั้น น้ำจึงจะหยุดหยดถ้าลำตัวอย่างดินในขณะนั้นไปหาระดับความชื้น หรือถ้า ทราบปริมาณของความชื้นที่มีอยู่ในดินก่อนที่จะใช้แรงดึงกับปริมาณของความชื้นทั้งหมดที่หยด ออกจากดินเมื่อใช้แรงดึงนั้นก็ย่อมทราบระดับความชื้นของดินในขณะที่ความชื้นของดินอยู่ใน สมดุลย์กับความเครียดที่มีค่าเท่ากับแรงดึงนั้นได้ ถ้าประสงค์จะทราบระดับความชื้นของดินใน ขณะที่มีความชื้นของดินอยู่ในสมดุลย์กับความเครียดระดับอื่นก็อาจทราบได้โดยการปรับแรงดึงให้ เท่ากันกับความเครียดที่ต้องการแล้วปฏิบัติเช่นเดิมทุกประการ ด้วยเหตุที่โดยปกติแผ่นวัตถุพรุน ของเครื่องมือจำพวกนี้ไม่อาจคงความอิมตัวด้วยน้ำไว้ได้ (รั่วอากาศ) เมื่อความเครียดมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำขึ้นหรือจะเผยแพร่เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 0.8 บรรยากาศและสิ่งทีละลายอยู่ในน้ำเคลื่อนผ่านแผ่นวัตถุพรุนนี้ได้ เครื่องมือจำพวกนี้ จึงใช้ได้ผลดีแต่เฉพาะในช่วงความเครียดไม่เกิน 0.8 บรรยากาศ และความเครียดที่ได้จากการใช้ เครื่องมือประเภทนี้เป็นความเครียดเมตริกเท่านั้น

#### ● Neutron moisture meter

Neutron moisture meter เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับความชื้นของดินโดยมีหลักวิชาทาง ฟิสิกส์เกี่ยวกับการปะทะกันอย่างจ้งหน้าแบบอีลาสติก (elastic head on collision) ของวัตถุที่มีมวล ใกล้เคียงกันเป็นพื้นฐาน ซึ่งพอที่จะกล่าวสรุปได้ว่า เมื่อวัตถุที่มีมวลใกล้เคียงกันปะทะกันอย่างจ้ง หน้าแบบอีลาสติกจะเกิดการแลกเปลี่ยนความเร็วระหว่างวัตถุนั้น ๆ ขึ้น ดังนั้น หลังจากที่ได้ปะทะ กันแล้ววัตถุอันหนึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ใกล้เคียงกันกับความเร็วเดิมของวัตถุอีกอันหนึ่ง แต่ ถ้าวัตถุที่ปะทะกันนั้นมีมวลแตกต่างกันมาก การปะทะจะไม่มีผลกระทบต่อความเร็วของ วัตถุทั้งสอง แม้ว่าจะทำให้ทิศทางของการเคลื่อนที่ของวัตถุอันที่มีมวลน้อยกว่าเปลี่ยนแปลง ไปจาก เดิมก็ตาม ด้วยเหตุที่ในจำนวนสิ่งของต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของดินนั้น ไฮโดรเจนอะตอม (hydrogen atom) เป็นสิ่งเดียวที่มีมวลใกล้เคียงกับนิวตรอน (neutron) มาก และส่วนใหญ่ของ ไฮโดรเจนอะตอมในดินอยู่ในส่วนที่เป็นความชื้นของดิน เมื่อปล่อยนิวตรอนความเร็วสูง (high-speed neutron หรือ energetic neutron) เข้าไปในดิน สิ่งที่จะมีผลกระทบต่อความเร็วของนิวตรอน มากที่สุด ได้แก่ น้ำในดินเป็นส่วนใหญ่ และผลกระทบนี้น่าจะเป็นไปในทำนองที่ว่า ความเร็วของ นิวตรอนจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อนิวตรอนความเร็วสูงเคลื่อนที่ผ่านดิน เพราะไฮโดรเจนอะตอม ในดินไม่เคลื่อนที่เลยหรือแม้จะมีการเคลื่อนที่บ้างก็จะ เป็นไปด้วยความเร็วที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ ความเร็วเดิมของนิวตรอน เมื่อปะทะกับนิวตรอนจึงเกิดการแลกเปลี่ยนความเร็วกันกับนิวตรอน ความเร็วของนิวตรอนจะลดลงเป็นอย่างมากหลังจากที่ได้ปะทะกับไฮโดรเจนอะตอมในดินแล้ว ดัง นั้นถ้าปล่อยนิวตรอนความเร็วสูงจำนวนหนึ่งเข้าไปในดิน จำนวนนิวตรอนที่จะถูกลดความเร็วลง เป็นอย่างมากจึงผันแปรโดยตรงกับปริมาณของความชื้นของดิน ดังนั้น หากสามารถวัดจำนวน นิวตรอนความเร็วต่ำ (slow neutron หรือ thermal neutron) ที่เกิดขึ้นจากการปล่อยนิวตรอน ความเร็วสูงจำนวนหนึ่งเข้าไปในดิน ได้ก็จะมีทางที่จะทราบระดับความชื้นของดินนั้นได้

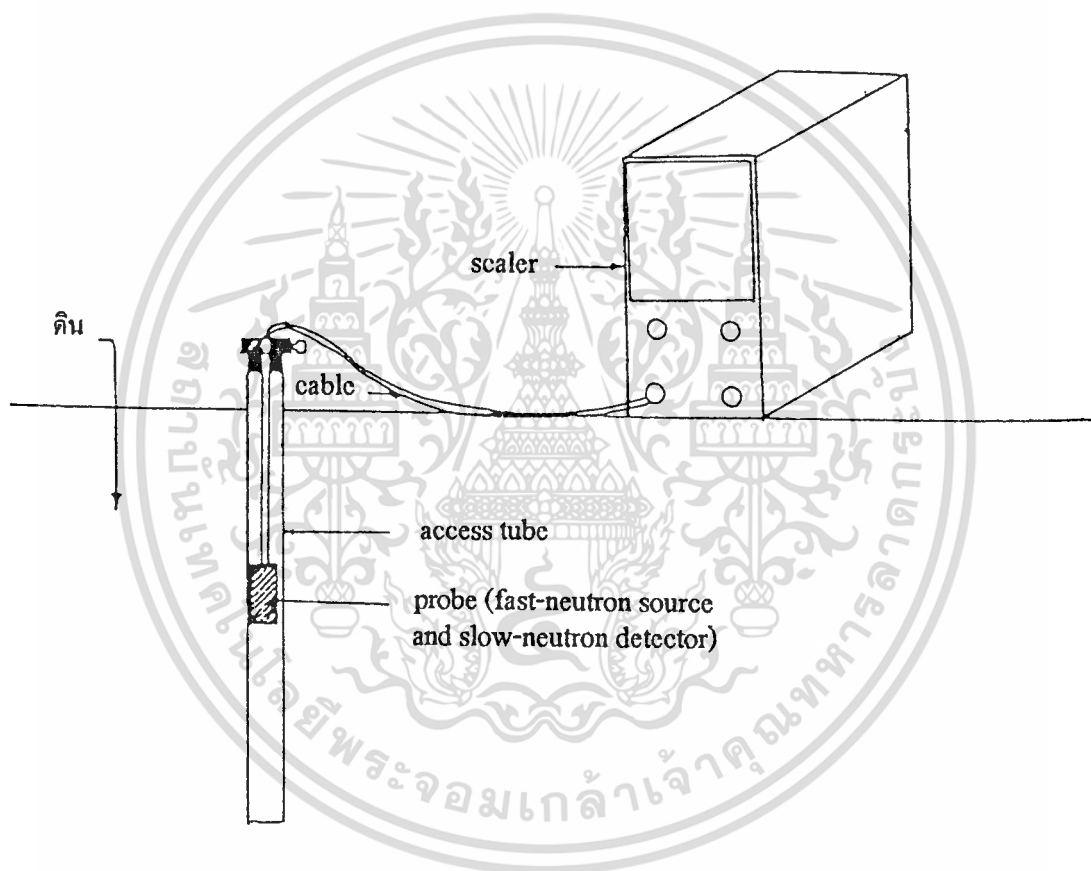
ส่วนประกอบของ neutron moisture meter ได้แก่

1. probe ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งโลหะที่มีสารที่ให้นิวตรอนความเร็วสูง (neutron source) และเครื่องตรวจสอบ (detector) นิวตรอนความเร็วต่ำฝังอยู่ภายใน
2. scaler ซึ่งได้แก่เครื่องนับนิวตรอนความเร็วต่ำ
3. สาย (cable) สำหรับเชื่อมระหว่าง probe กับ scaler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. access tube ซึ่งได้แก่ท่อกลวงสำหรับฝังไว้ในดินเพื่อหย่อน probe ลงไปยังระดับความลึกที่ประสงค์จะวัดระดับความชื้นของดิน

ซึ่งส่วนประกอบของ neutron moisture meter แสดงดังรูปที่ 2.6 และเป็นที่น่าสนใจที่ในปัจจุบันนี้ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติของประเทศไทยสามารถประกอบเครื่องมือชนิดนี้ได้แล้ว จึงคาดว่าเครื่องมือนี้จะเป็นที่รู้จักและมีผู้ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยภายในเวลาไม่นานนี้



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของ neutron moisture meter

วิธีการในการใช้ neutron moisture meter วัดระดับความชื้นของดินประกอบด้วย การฝัง access tube ที่มีกั้นดินไว้ในดินตรงบริเวณที่ประสงค์จะวัดความชื้นของดิน access tube โดยทั่วไปเป็นท่ออะลูมิเนียม แต่อาจใช้ท่อตะกั่ว เช่น แป้น้ำหรือท่อพลาสติกแข็งแทนก็ได้แล้วหย่อน probe ลงไปที่ระดับความลึกที่ประสงค์จะทราบระดับความชื้นของดิน ต่อสาย (cable) ที่ติดอยู่กับ probe เข้ากับ scaler เปิดสวิตช์ของ scaler กดปุ่ม reset ของ scaler เพื่อให้ตัวเลขที่ปรากฏบนแผงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

scaler เป็นศูนย์โดยตลอด ตั้งเครื่องจับเวลาของ scaler ให้อ่านได้ค่าที่เท่ากับระยะเวลาที่ต้องการนับจำนวนนิวตรอนแล้วกดปุ่ม count ของ scaler เพื่อให้ scaler นับจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่เกิดขึ้น scaler จะหยุดทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อได้นับจำนวนนิวตรอนเป็นระยะเวลาเท่ากับที่ได้ตั้งไว้ ตัวเลขที่ปรากฏบนแผงของ scaler เมื่อ scaler หยุดทำงานคือจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่ scaler นับได้ในช่วงเวลานั้น ถ้าประสงค์จะทราบระดับความชื้นของดินที่ระดับความลึกอื่นที่เลื่อน probe ไปที่ระดับความลึกนั้น แล้วดำเนินการนับจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำเช่นเดิมอีก

เนื่องจากตัวเลขที่ได้จากการใช้ neutron moisture meter วัด ไม่ใช่ระดับความชื้นของดินโดยตรง จำเป็นจะต้องมีกราฟหรือสมการสำหรับเปลี่ยนจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำนี้ให้เป็นระดับความชื้นของดินและใช้กราฟหรือสมการนี้อีกชั้นหนึ่ง จึงจะทราบระดับความชื้นของดินจากตัวเลขที่ได้จากเครื่องมือ กราฟหรือสมการนี้เป็นของดินแต่ละชนิดโดยเฉพาะ คือจะใช้กราฟหรือสมการที่มีไว้สำหรับดินชนิดหนึ่งกับดินอีกชนิดหนึ่งไม่ได้ แม้แต่สำหรับดินชนิดเดียวกันกราฟหรือสมการดังกล่าวนี้มีแนวโน้มที่จะไม่เหมือนกันสำหรับดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ อีกด้วย จึงควรมีกราฟหรือสมการเช่นนี้สำหรับใช้กับระดับความลึกหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะ

Neutron moisture meter เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับการวัดระดับความชื้นของดินภายใต้สภาวะธรรมชาติมาก และอาจเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดเกี่ยวกับเรื่องนี้เมื่อพิจารณาในแง่ของความสะดวกในการใช้ การวัดความชื้นของดินด้วย neutron moisture meter เป็นการวัดที่ไม่ต้องรบกวนสภาวะต่าง ๆ โดยทั่วไปของดินในขณะที่วัด จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของดินในระยะเวลาต่าง ๆ เช่น ในระหว่างฤดูเติบโตของพืชตลอดทั้งฤดู เป็นต้น โดยไม่ต้องรบกวนหรือก่อให้เกิดความกระทบกระเทือนแก่ดินนอกเหนือไปจากการเจาะดินเพื่อฝัง access tube อย่างไรก็ตามการใช้ neutron moisture meter ก็มีข้อควรสังเกตหลายประการ ที่สำคัญคือ

1) นิวตรอนความเร็วสูงที่ออกจาก probe ของเครื่องมือพุ่งออกไปทุกทิศทางรอบ ๆ แหล่งกำเนิดของนิวตรอน ดังนั้นตามทางทฤษฎี ระดับความชื้นที่ได้จากการใช้เครื่องมือนี้จึงเป็นระดับความชื้นเฉลี่ยของดินจำนวนหนึ่งที่อยู่ภายในบริเวณทรงกลมที่มีแหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็นจุดศูนย์กลาง มิได้เป็นระดับความชื้นที่จุดใดจุดหนึ่งภายในดินโดยเฉพาะ รัศมีของบริเวณทรงกลมนี้ผันแปรโดยกลับกับระดับความชื้นของดินที่อยู่ภายในบริเวณทรงกลมนั้น ด้วยเหตุนี้ neutron moisture meter จึงใช้ไม่ได้ผลดีในการวัดระดับความชื้นของดินที่ผิวดินหรือที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวดิน เพราะเมื่อให้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่อยู่ภายใน probe เสมอกับระดับผิวดินหรือต่ำกว่าระดับผิวดินไม่มากพอ ครึ่งบนของบริเวณทรงกลมที่นิวตรอนความเร็วสูงพุ่งผ่านจะไม่มีดินบรรจุอยู่จนเต็ม บางส่วนของนิวตรอนความเร็วสูงที่พุ่งออกมาจากแหล่งกำเนิด จึงมีโอกาสนี้ไม่เท่ากับส่วนอื่น ๆ ที่

จะปะทะกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่ในดิน จำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่เกิดขึ้นจึงไม่ใช่ครรชนที่ดีของระดับความชื้นของดินเพราะตามหลักการที่ถูกต้องนั้น นิวตรอนความเร็วสูงทั้งหลายที่พุ่งออกจาก probe ควรมีโอกาสที่เท่ากันที่จะปะทะกับไฮโดรเจนอะตอมที่มีอยู่ในดิน จำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่เกิดขึ้นจึงจะเป็นครรชนที่ดีของระดับความชื้นของดิน

2) ไฮโดรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบของสารอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่เป็นส่วนประกอบของดิน โดยเฉพาะอินทรีย์วัตถุและแร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay mineral) ดังนั้นเมื่อดินมีอินทรีย์วัตถุมาก ๆ หรือมีแร่ดินเหนียวมาก ๆ หรือทั้งสองอย่าง จำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่ได้จากการใช้เครื่องมือนี้อาจไม่เป็นครรชนที่ดีของระดับความชื้นของดิน อย่างไรก็ตาม สำหรับดินแร่ส่วนใหญ่ที่ใช้ทำการเกษตร โดยปกติเรื่องนี้ไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญแต่อย่างใด

3) มีธาตุบางธาตุที่ปรากฏในดิน เช่น โบรอนและคลอรีน จับนิวตรอนความเร็วต่ำไว้ได้ดี ดังนั้นบางส่วนของนิวตรอนความเร็วต่ำอาจถูกธาตุเหล่านี้จับไว้แทนที่จะเคลื่อนเข้าถึงเครื่องนับและถ้ามีธาตุเช่นนี้มากในดิน จำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำที่นับได้อาจไม่เป็นครรชนที่ดีของระดับความชื้นของดิน

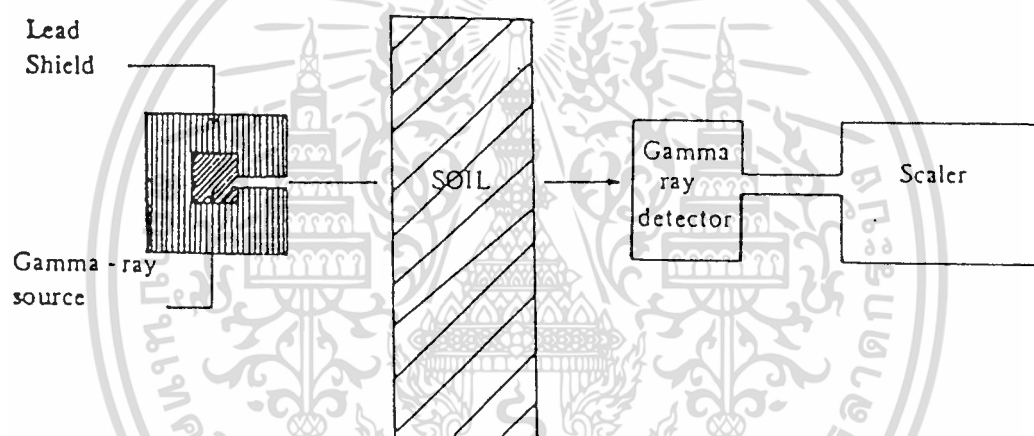
4) นิวตรอนความเร็วสูงสามารถก่อให้เกิดอันตรายแก่เซลล์ของมนุษย์ได้ นอกจากนี้สารที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดของนิวตรอนความเร็วสูงสำหรับวัดระดับความชื้นของดินยังปลดปล่อยรังสีแกมมา (gamma - ray) ด้วย แม้ว่าโดยปกติจะไม่มากนักและรังสีแกมมานี้ทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางได้ดีและเป็นอันตรายต่อเซลล์ของมนุษย์ ดังนั้นการใช้เครื่องมือนี้จึงจะต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษและผู้ใช้ควรมีความรู้เกี่ยวกับสารกัมมันตภาพรังสีพอสมควร จึงจะได้ผลดีและไม่เป็นอันตราย

#### ● Gamma - ray attenuation device

เครื่องมือนี้ใช้วัดได้ทั้งระดับความชื้นของดินและความหนาแน่นรวมของดิน หลักการมีว่าเมื่อรังสีแกมมาจำนวนหนึ่งเคลื่อนผ่านสารหนึ่ง ๆ บางส่วนของรังสีแกมมาจะถูกสสารยับยั้งไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ต่อไป ปริมาณของรังสีแกมมาที่จะถูกยับยั้งไว้ผันแปรโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การยับยั้งรังสีแกมมา (gamma - ray absorption coefficient) ความหนาแน่น (density) และความหนา (thickness) ของสสารที่รังสีแกมมาเคลื่อนผ่าน ซึ่งถ้าวัตถุนั้นเป็นดิน ปริมาณของรังสีแกมมาที่จะถูกยับยั้งไว้จะผันแปรโดยตรงกับความหนาแน่นรวม ความหนาและระดับความชื้นเมื่อคิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของดิน ดังนั้นถ้าปล่อยรังสีแกมมาจำนวนหนึ่งเข้าไปในดิน จำนวนรังสีแกมมาที่สามารถทะลุดินนั้นไปได้ย่อมผันแปรโดยกลับกับความหนาแน่นรวม ความหนาและระดับ

ความชื้นเมื่อคิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของดินนั้น นักวิจัยทางฟิสิกส์และทางเคมีได้พบว่าการคำนวณว่าครรชนใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยั้บยั้บรังสีแกมมาโดยสสารต่าง ๆ เป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่แน่นอน จึงสามารถสร้างสมการสำหรับอธิบายการยั้บยั้บรังสีแกมมาโดยดินได้ โดยที่สมการนั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรังสีแกมมาที่เคลื่อนผ่านดินไปได้กับสิ่งต่าง ๆ ซึ่งได้แก่จำนวนรังสีแกมมาที่ปล่อยเข้าไปในสสาร สัมประสิทธิ์การยั้บยั้บรังสีแกมมาของดินและของความชื้นของดิน ความหนาแน่นรวมของดิน ระดับความชื้นของดินและความหนาของดินจึงอาจใช้สมการนี้คำนวณหาระดับความชื้นของดินหรือคำนวณหาความหนาแน่นรวมของดิน จากข้อมูลเกี่ยวกับการยั้บยั้บรังสีแกมมาโดยดินได้ ซึ่งส่วนประกอบของ gamma - ray attenuation device แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของ gamma - ray attenuation device

วิธีใช้ gamma - ray attenuation device ประกอบด้วย การปล่อยลำรังสีแกมมา (gamma - ray beam) จากแหล่งกำเนิดรังสี (source) เข้าไปทางด้านหนึ่งของดิน ใช้เครื่องตรวจสอบรังสีแกมมา (gamma - ray detector) ดักจับรังสีแกมมาที่อีกด้านหนึ่งของดินตรงระดับเดียวกับที่ปล่อยรังสีแกมมาเข้าไปในดิน ซึ่งเครื่องตรวจสอบรังสีมีสาย (cable) เชื่อมโยงกับเครื่องนับ (scaler) รังสีแกมมาแล้วบันทึกตัวเลขบนแผงของเครื่องนับเมื่อครบระยะเวลาตามที่ได้ตั้งไว้ ตัวเลขที่ปรากฏบนแผงของเครื่องนับเป็นครุฑของจำนวนรังสีแกมมาที่ทะลุดินไปได้ที่เครื่องตรวจสอบจับไว้ได้

รังสีแกมมาเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงจากแหล่งกำเนิด ดังนั้นถ้าเปิดช่องให้รังสีพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดสู่ภายนอกได้แต่เพียงด้านเดียวของแหล่งกำเนิด ย่อมได้ลำแสงตรงที่มีหน้าตัดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

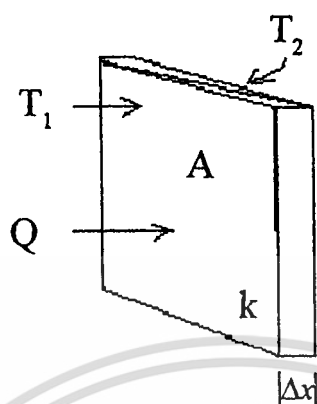
โดยตลอดตรงทุก ๆ ส่วนของลำแสงและเท่ากับเนื้อที่ของช่องที่ลำแสงพุ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดผู้ภายนอก ถ้าให้ช่องที่ลำแสงพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดผู้ภายนอกเล็กมาก ๆ ก็จะสามารถใช้วัดระดับความชื้นของดินเฉพาะที่ระดับความลึกหนึ่ง ๆ ที่กำหนดให้ได้ และจะสามารถใช้วัดระดับความชื้นของดินตรงบริเวณใกล้ผิวดินมาก ๆ ได้อีกด้วย จึงนับว่า gamma - ray attenuation device มีข้อได้เปรียบ neutron moisture meter อย่างน้อย 2 ประการ ดังที่ได้กล่าวแล้วนี้ อย่างไรก็ตาม gamma - ray attenuation device เป็นเครื่องมือที่ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในสนาม เพราะนอกจากจะเคลื่อนย้ายยากเนื่องจากมีน้ำหนักมากแล้ว ยังจะต้องขุดดินที่ต้องการจะวัดระดับความชื้นให้เป็นแห่ง เพื่อวางแหล่งกำเนิดของรังสีไว้ด้านหนึ่งและเครื่องตรวจสอบรังสีไว้อีกด้านหนึ่งของแห่งดินนี้อีกด้วย ซึ่งอาจปฏิบัติได้ไม่ง่ายเสมอไป กับทั้งอาจเป็นการรบกวนสภาวะของดินให้แตกต่างจากสภาวะจริงในธรรมชาติมากเกินไปอีกด้วย อีกประการหนึ่งก็คือ รังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูงต่าง ๆ ที่มากกว่ารังสีประเภทอื่น ๆ และนิวตรอนมาก ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งจึงจะไม่เกิดอันตราย และผู้ใช้จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีและความรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างดีอีกด้วยจึงจะใช้เครื่องมือนี้ได้ผลดี

### 2.3 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อน หมายถึง การถ่ายเทพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้ต้องมีตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.8 และอัตราการความร้อนที่ไหลทั้งหมดแสดงได้ดังสมการ

$$Q = \frac{kA(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

- เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของความร้อนทั้งหมด  
 $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเนื้อสารที่ความร้อนไหลผ่าน  
 $T_1, T_2$  คือ อุณหภูมิผิวของสารแต่ละด้าน ซึ่งมีค่าอุณหภูมิต่างกัน  
 $A$  คือ พื้นที่ที่ตัดฉากกับทิศทางการไหลของ Heat Flux  
 $\Delta x$  คือ ความหนาของเนื้อสารที่ความร้อนไหลผ่าน  
 $q$  คือ อัตราการไหลของความร้อนโดยการนำต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux)



รูปที่ 2.8 แสดงการนำความร้อน

การนำความร้อนขึ้นอยู่กับ

1. พื้นที่ซึ่งความร้อนเกิดการถ่ายเท
2. ผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวทั้งสองซึ่งความร้อนผ่าน
3. เวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน
4. ความหนาของวัสดุที่ความร้อนผ่าน
5. ชนิดของวัสดุ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุ มีหน่วยเป็น [วัตต์ / (เมตร • องศาเซลเซียส)] ( $W / m \text{ } ^\circ C$ ) โดยวัสดุประเภทโลหะนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าวัสดุประเภทโลหะ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแสดงได้ดังสมการ

$$k = k_0(1 + b\theta)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$k_0$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ค่าอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_{ref}$ )

$\theta = T - T_{ref}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโลหะบริสุทธิ์ ค่า  $k$  มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่สำหรับธาตุที่เป็นส่วนประกอบของโลหะผสมนั้น มีแนวโน้มในทางกลับกัน

ค่าความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non - homogeneous) ตามปกติจะกำหนดให้มีค่าขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัสดุที่ปรากฏจริง ซึ่งหาได้จาก การนำเอามวลของวัสดุหารด้วยปริมาตรรวมของวัสดุทั้งหมด ปริมาตรรวมของวัสดุทั้งหมดนี้จะรวมทั้งปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่าง เช่น ช่องว่างของอากาศภายในขอบเขตทั้งหมดของชิ้นวัสดุ ดังนั้นค่าความสามารถในการนำความร้อนจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ หารับกฎโดยทั่วไป ค่า  $k$  ในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัสดุที่ปรากฏจริงซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์สำหรับการสร้างห้วงความชื้นดิน

วัสดุอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการสร้างห้วงความชื้นดินมีดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 ขดลวดความร้อน

ขดลวดความร้อน คือ เส้นลวดที่สามารถให้ความร้อนออกมาได้เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่มัน โดยแรงดันไฟฟ้าที่ให้นั้นต้องไม่มากจนเกินจุดหลอมเหลวของมัน (melting point)

##### 3.1.2 เทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (ความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น) เทอร์มิสเตอร์นี้ทำมาจากออกไซด์โลหะของสารกึ่งตัวนำ เช่น โคบอลต์ แมงกานีส เหล็ก ทองแดง เซอร์มันเนียม แมกนีเซียม นิเกิล วัสดุเหล่านี้จะถูกนำมาอัดให้ได้รูปร่างที่ต้องการและผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จุดเด่นของเทอร์มิสเตอร์ก็คือสามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ไวมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอย่างไวมากนี้ ทำให้เทอร์มิสเตอร์เหมาะสมสำหรับใช้วัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีค่าน้อย ๆ ได้ดี นอกจากนี้แล้วเทอร์มิสเตอร์ยังมีความต้านทานที่สูง ดังนั้นความต้านทานของสายวัดจึงเกือบจะไม่ผิดพลาดต่อการวัดเลย เราจึงสามารถใช้สายวัดเพียง 2 เส้น ที่มีความยาวตามต้องการได้อย่างสะดวก แต่เนื่องจากเทอร์มิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทนกระแสไฟฟ้าได้ต่ำ ดังนั้นในการเลือกใช้งาน เราควรคำนึงถึงการทนต่อกำลังไฟฟ้าที่จะใช้งานของเทอร์มิสเตอร์ด้วย

ตามปกติ เทอร์มิสเตอร์โดยทั่วไปนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการใช้งานเราจึงต้องเลือกใช้งานได้เฉพาะบางช่วงเท่านั้น สำหรับการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ให้มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น วิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ นำตัวต้านทานที่มีค่าต่ำมาก ๆ มาต่อขนานกับเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งจะมีผลต่อค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การใช้เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมินั้น ส่วนใหญ่จะใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ในรูปของความต้านทาน) ให้เป็นความถี่แล้วจึงกำหนดสเกลในรูปแบบอุณหภูมิอีกทีหนึ่ง

### 3.1.3 สารหล่อหุ้ม

จากการทดลองนี้ เราใช้ epoxy หรือกาวยิลิโคนเป็นสารหล่อหุ้ม ซึ่งลักษณะสำคัญของสารหล่อหุ้มมีดังนี้

1. ทนความร้อนและไม่ติดไฟ
2. สามารถนำความร้อนได้
3. ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ใต้น้ำ เช่น สารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ รวมถึงแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ภายในดิน
4. สามารถกันน้ำได้

### 3.2 วงจรสำหรับการสร้างห้วงวัดความชื้นดิน

เราใช้วงจรบริดจ์สำหรับการสร้างห้วงวัดความชื้นดิน วงจรบริดจ์แบ่งได้เป็น 2 สภาวะ คือ วงจรบริดจ์แบบสมดุลและแบบไม่สมดุล ถ้าหากบริดจ์สมดุลพบว่าจะไม่มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด A และ B ( $V_{AB}$ ) เกิดขึ้น ( $V_{AB} = 0$ )

โดย 
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

แต่ถ้าหากบริดจ์ไม่สมดุล พบว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด A และ B ( $V_{AB} \neq 0$ ) ได้

$$V_0 = |V_A - V_B|$$

$V_A$  คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด A เทียบกับกราวด์

$V_B$  คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด B เทียบกับกราวด์

วงจรบริดจ์

$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$R_4$  เป็นเทอร์มิสเตอร์ขนาด  $10 \text{ k}\Omega$  ที่  $20^\circ\text{C}$

$$R_5 = R_6 \text{ เป็น } R_f \quad R_7 = R_8 \text{ เป็น } R_f$$

$$\text{Gain} = \frac{R_f}{R_i} \quad \therefore V_0 = |V_A - V_B| \times \frac{R_f}{R_i}$$

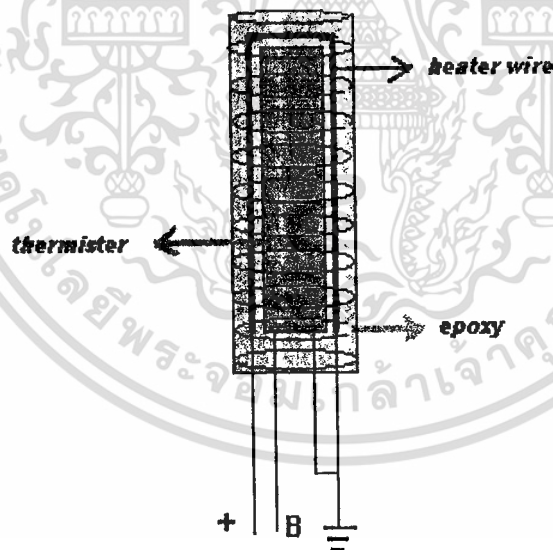
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 ขั้นตอนการสร้างหัววัดความชื้น

1. นำขดลวดความร้อนที่เลือกไว้มาตัดให้มีความยาวประมาณ 2 เซ็นติเมตร จากนั้นต่อสายไฟที่มีความยาวประมาณ 90 - 120 เซ็นติเมตร ทั้งสองด้าน
2. เลือกใช้เทอร์มิสเตอร์ขนาด 10 k $\Omega$  จากนั้นนำมาต่อสายไฟความยาวเท่ากับสายไฟที่ต่อให้กับขดลวดความร้อน
3. ทำการโค้งงอขดลวดความร้อนให้แนบชิดกับเทอร์มิสเตอร์ ดังรูป
4. จากนั้นก็ห่อหุ้มด้วย epoxy โดยตลอด ดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของหัววัดความชื้นดิน

#### 4.2 วิธีการทดลอง

##### ขั้นตอนที่ 1 เตรียมดิน

1. นำดินที่สนใจจะหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินมาทำการตากแห้งประมาณ 1 - 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากนั้นนำดินที่ตากแห้งแล้วมาโขลก เพื่อให้ดินนั้นละเอียด และมีเม็ดดินทุกเม็ดมีขนาดใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงนำไปร่อน

3. นำเม็ดดินที่ร่อนเสร็จแล้วใส่กระป๋องโลหะแล้วนำเข้าตู้อบ โดยตั้งอุณหภูมิที่ทำการอบไว้ที่  $105^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาในการอบ 24 ชั่วโมง

4. ร่อนดินที่อบอยู่ในเตาอบเย็นตัวลง แล้วนำเข้าหม้อดูดความชื้นเพื่อป้องกันดินที่อบแห้งแล้วจากความชื้นในอากาศ (ขณะนี้ดินมีความชื้นเป็น 0 % คือไม่มีน้ำอยู่เลย)

ขั้นตอนที่ 2 การชั่งน้ำหนักและคำนวณค่าปริมาณน้ำที่จะเติมในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น

5. ชั่งน้ำหนักถุงพลาสติกที่จะนำมาบรรจุดินก่อน จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักรวมของดินและถุงบรรจุดิน

6. นำดินที่แห้งและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้ว ใส่ถุงพลาสติก นำไปชั่งน้ำหนัก

7. นำน้ำหนักรวมของดินและถุงบรรจุดินลบกับน้ำหนักถุงบรรจุจะได้น้ำหนักดินสุทธิ คือ

$$W_{\text{ดินและถุง}} - W_{\text{ถุง}} = W_{\text{ดิน}}$$

8. เมื่อทราบน้ำหนักดินแห้งสุทธิแล้ว ให้นำมาคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไปในแต่ละครั้งของการทดลอง ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน (เชิงมวล)} = \left( \frac{W_w}{W_s} \right) \times 100$$

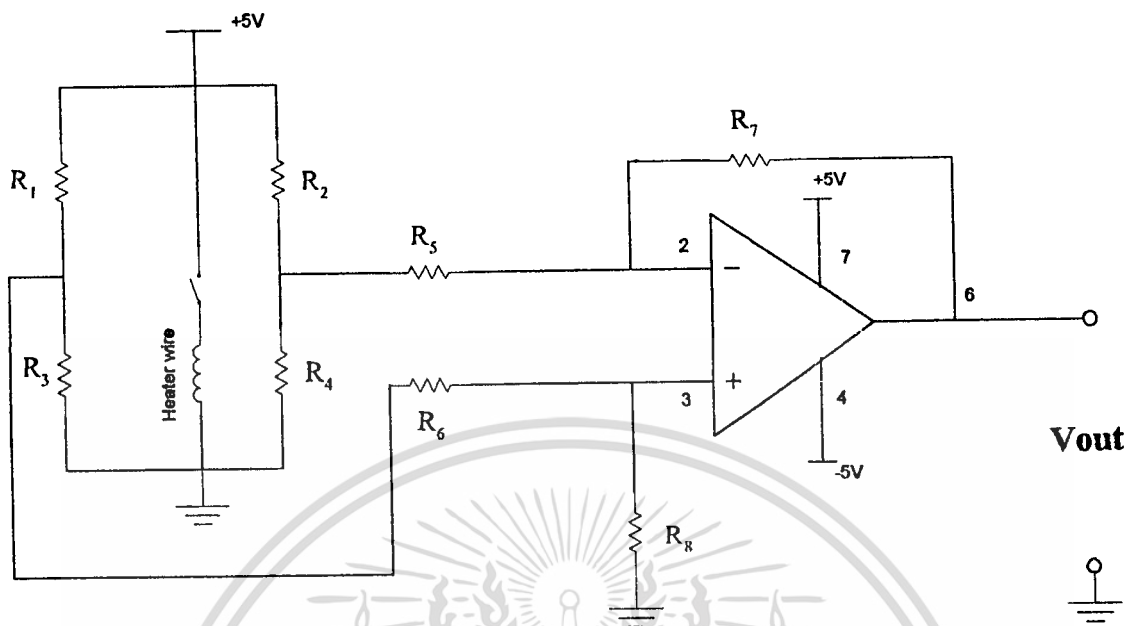
เมื่อ  $W_w$  คือ มวลน้ำที่เติมลงไป

$W_s$  คือ มวลดินแห้ง

9. เราต้องการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินที่ 0, 10, 11, 12, ..., 25 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนที่ 3 จัดเตรียมอุปกรณ์และเก็บผลการทดลอง

10. ต่อดวงจรรังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการสร้างหัววัดความชื้นดิน

โดย  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

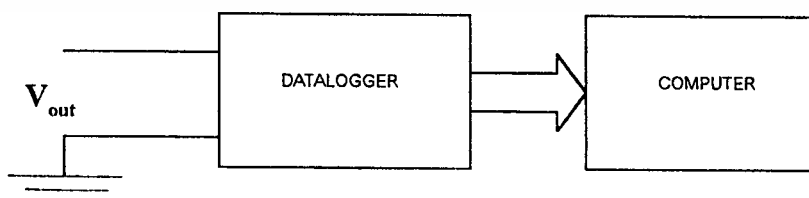
$R_4$  เป็นเทอร์มิสเตอร์ขนาด  $10 \text{ k}\Omega$  ที่  $20^\circ \text{C}$

$R_5 = R_6 = 5 \text{ k}\Omega$

$R_7 = R_8 = 24 \text{ k}\Omega$

$$\text{Gain} = \frac{R_f}{R_i} = \frac{24}{5} = 4.8$$

แสดงลักษณะการต่อวงจรของหัววัดความชื้นที่  $R_4$



รูปที่ 4.3 แสดงการต่อหัววัดความชื้นดินกับส่วนเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ภาพข้างบนนี้แสดงการเก็บผลการทดลอง โดยใช้ datalogger และ computer ใช้ program xtalk ในการติดต่อกันระหว่าง computer และ datalogger (datalogger ทำการส่งข้อมูลไปยัง computer ทุก ๆ 3 วินาที)

12. เมื่อต่อวงจรเสร็จดังภาพ ในตอนแรกนี้ เรายังจะไม่ให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อน (open circuit) สังเกตแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรในตอนเริ่มต้น (ขณะนี้หัว probe ปักอยู่ในดินแห้ง 0%)

13. ให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนเป็นเวลา 5 วินาที จากนั้น open circuit ขดลวดความร้อน สังเกตค่า  $V_{out}$  ว่ามี และลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า  $V_{out}$  ทำเช่นนี้ 10 ครั้ง

14. ข้อมูลที่ได้เก็บไว้ในรูปของ Text file (\*.TXT)

15. เติมน้ำในปริมาณที่ทำให้ดินแห้งมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็น 10%

จากนั้นทำตามข้อ 12 - 14

16. เติมน้ำให้ดินมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็น 11, 12, 13, ..., 25 แล้วทำตามข้อ 12 - 14

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

17. เปิดข้อมูลที่เป็น text file ใน Microsoft excel หาผลต่างของ  $V_{out}$  ที่ 3, 6, 9, 12, 15, 18 วินาที สังเกตผลการทดลอง

#### 4.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า หัววัดความชื้นดินที่สร้างขึ้นนี้สามารถบอกค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินได้อยู่ในช่วง 13 - 20 % โดยพิจารณาผลต่างของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 9 หรือ 12 วินาที ( $V_9$  หรือ  $V_{12}$ )

$$\text{(ที่ 9 วินาที)} \quad dV_9 = V_{max} - V_9, \quad \text{(ที่ 12 วินาที)} \quad dV_{12} = V_{max} - V_{12}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 9 วินาที (หรือ 12 วินาที) หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปที่วินาทีที่ 9 (หรือวินาทีที่ 12) โดยพิจารณา  $V_{max}$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น ( $V_0$ ) เขียนได้เป็น

$$\text{ที่ 9 วินาที} \quad dV_9 = V_0 - V_9,$$

$$\text{ที่ 12 วินาที} \quad dV_{12} = V_0 - V_{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 9 วินาที ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน โดยให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 5 วินาที จากการทดลองพบว่า มีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.8791 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเท่ากับ 87.91

กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 9 วินาที ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน โดยให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 10 วินาที จากการทดลองพบว่า มีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.8993 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเท่ากับ 89.93

กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 12 วินาที ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน โดยให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 10 วินาที จากการทดลองพบว่า มีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.9070 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเท่ากับ 90.70

กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 12 วินาที ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน โดยให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 5 วินาที จากการทดลองพบว่า มีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.9095 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าเท่ากับ 90.95

กราฟที่ 5 - 8 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ได้จากการทดลองและจากการประมาณ โดยเรียงลำดับจากน้อยไปมากตามค่าความเชื่อถือได้

#### หมายเหตุ

%Hc หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการคำนวณ

%Hc หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทดลอง

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองห่าวัดความชื้นดินที่สร้างโดยหลักการการนำความร้อน พบว่าสามารถบอกเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินได้ เป็นไปตามสมการ

$$y = ax + b$$

โดย  $y$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน (โดยมวล)

$a$  คือ ค่าความชัน

$x$  คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

$b$  คือ ค่าคงที่ ที่  $x=0$  หรือจุดตัดแกน  $y$

ห่าวัดความชื้นดินนี้สามารถบอกได้ในช่วง 14 - 20 % (ดินทราย) ส่วนที่ต่ำหรือสูงกว่านี้ไม่สามารถระบุค่าได้ถูกต้องนัก

#### 5.2 แนวทางในการพัฒนาโครงการ

จากการทดลองสร้างห่าวัดความชื้นดินโดยหลักการการนำความร้อนในโครงการนี้สามารถระบุแนวทางการพัฒนาได้ดังนี้

นำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ต่อเข้ากับส่วนเก็บข้อมูลและประมวลผล จากนั้นแสดงเป็นตัวเลขทาง 7 segment หรือต่อผลที่ได้จากการประมวลผลแล้วไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด - ปิดระบบให้น้ำภายในสวนผลไม้ได้

ผลการทดลองวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน

dV	%H	T4P6(10sec)	dV	%H	T3P6(10sec)	dV	%H	T4P6(5SEC)	dV	%H	T3P6(5SEC)
88.66667	10	R Squ	75.11111	10	R Squ	58.7	10	R Squ	49.7	10	R Squ
91.16667	11	0.90704113	76.33333	11	0.89933509	64.4	11	0.90945053	54.8	11	0.87906593
85.2	12		71.4	12		65.3	12		56.7	12	
89.4	13		73.1	13		64.7	13		55.4	13	
105.7	14		88	14		71.8	14		60.8	14	
113.9	15		97.7	15		88.2	15		56.9	15	
117.7	16		101	16		84.6	16		73.4	16	
120	17		103.4	17		90.5	17		82	17	
136.7	18		122.3	18		92.8	18		83.07143	18	
150.3	19		134.6	19		113	19		102	19	
166.8	20		147	20		129	20		117	20	
						135	21		123	21	

หมายเหตุ

T4P6(10sec) หมายถึงผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 12 วินาทีเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 10 วินาที

T4P6(5sec) หมายถึงผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 12 วินาทีเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 5 วินาที

T3P6(10sec) หมายถึงผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 9 วินาทีเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 10 วินาที

T3P6(5sec) หมายถึงผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ 9 วินาทีเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ขดลวดความร้อนนาน 5 วินาที

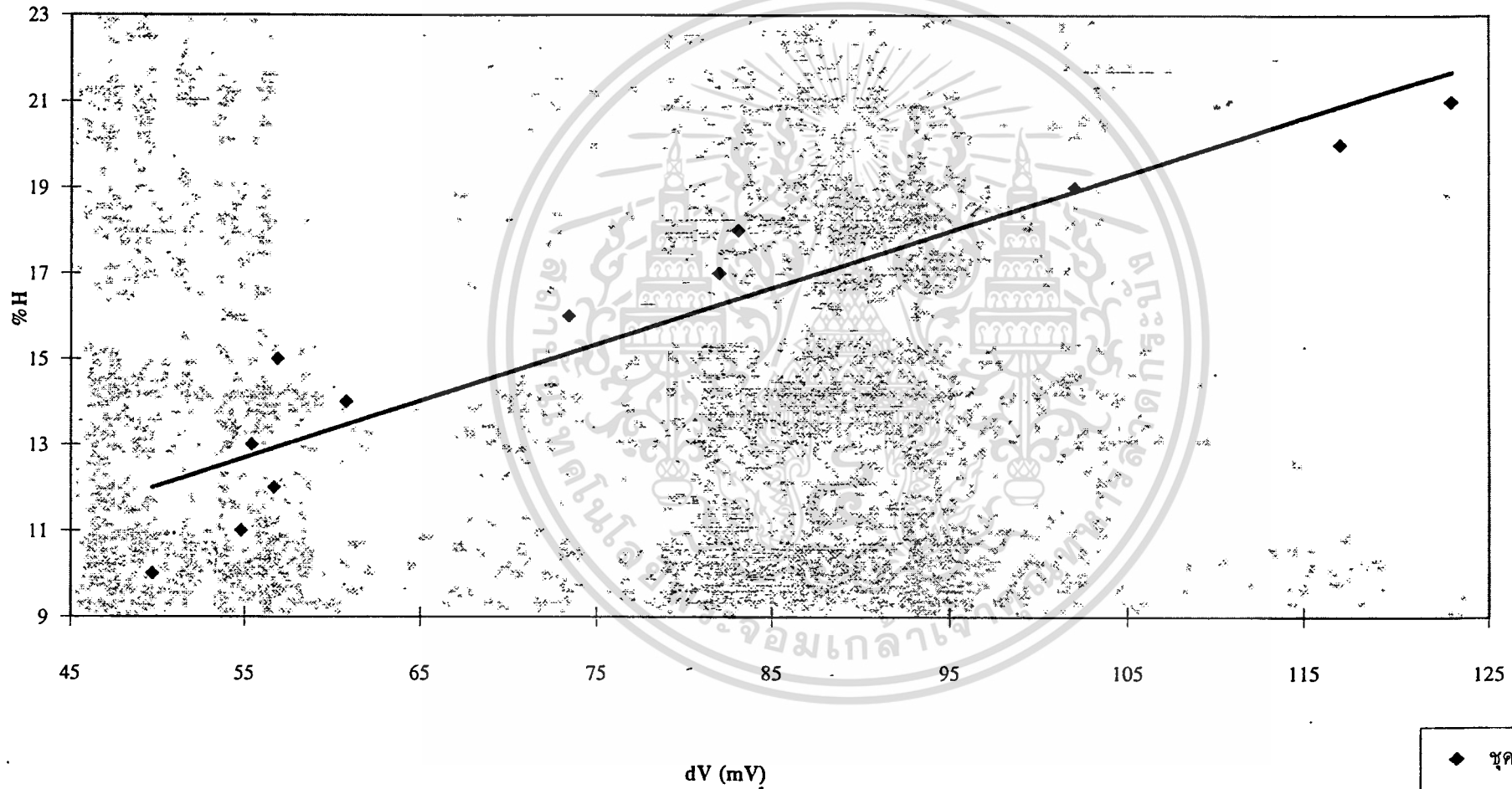
dV หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

%H หมายถึง เปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน

R Square คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นโน้มเอียงที่ลากโดยการประมาณจากข้อมูลจริง ควรมีค่าใกล้เคียง 1.00

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น

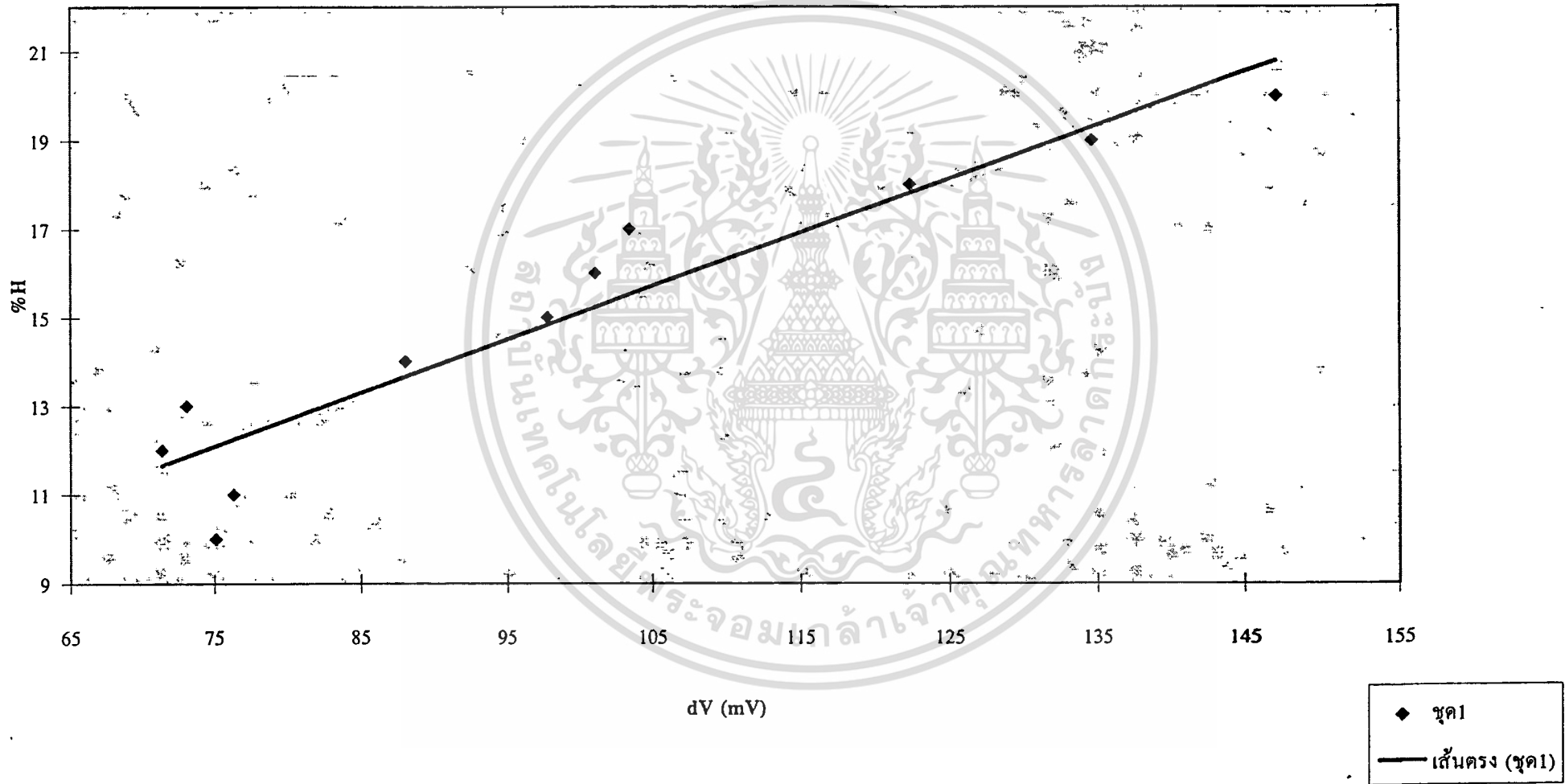
(R Square = 0.879065925)  $y = Ax+B$



◆ จุด1  
— เส้นตรง (จุด1)

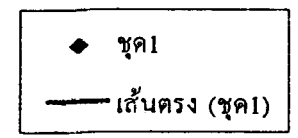
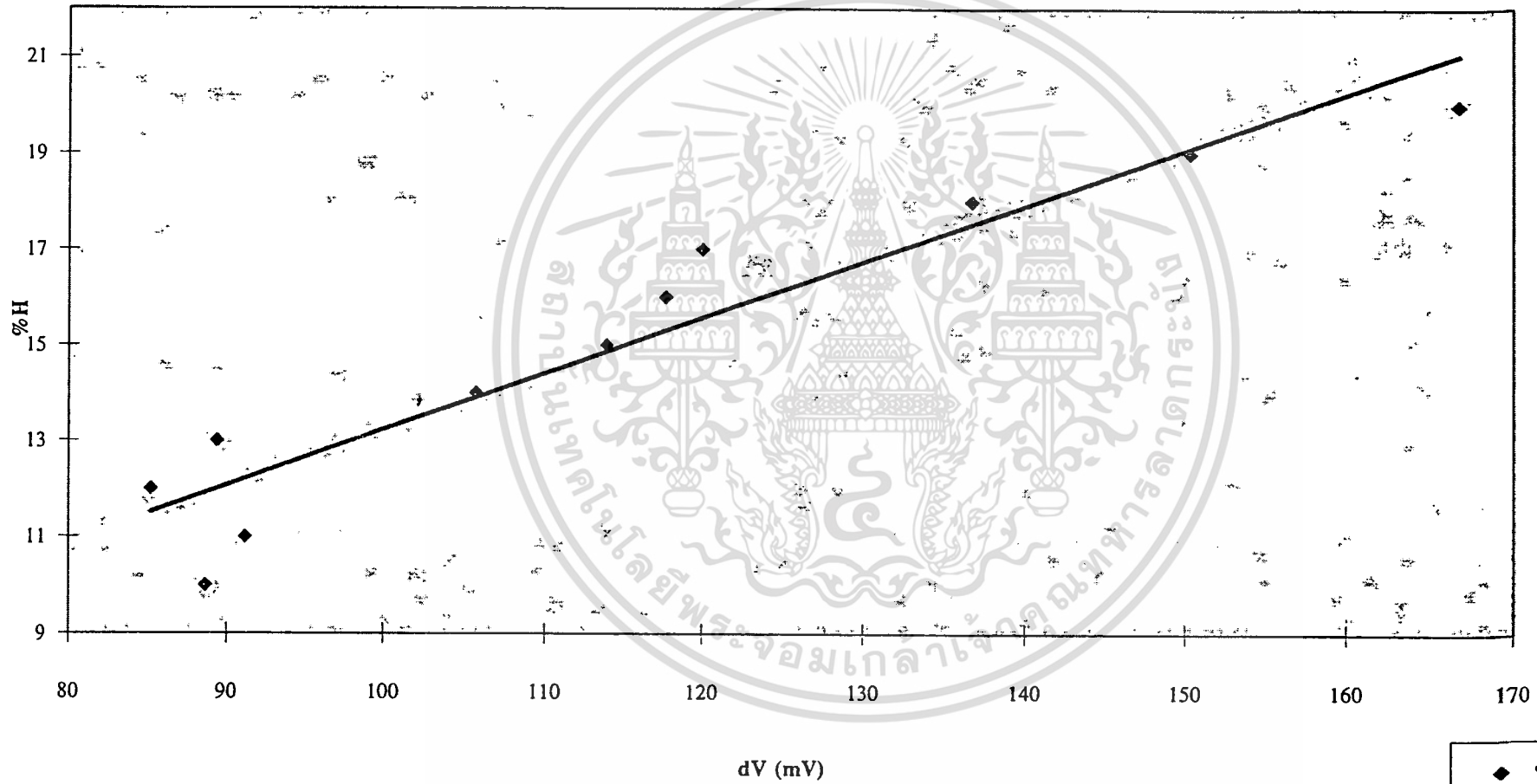
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น

(R Square = 0.89933509)  $y = Ax+B$



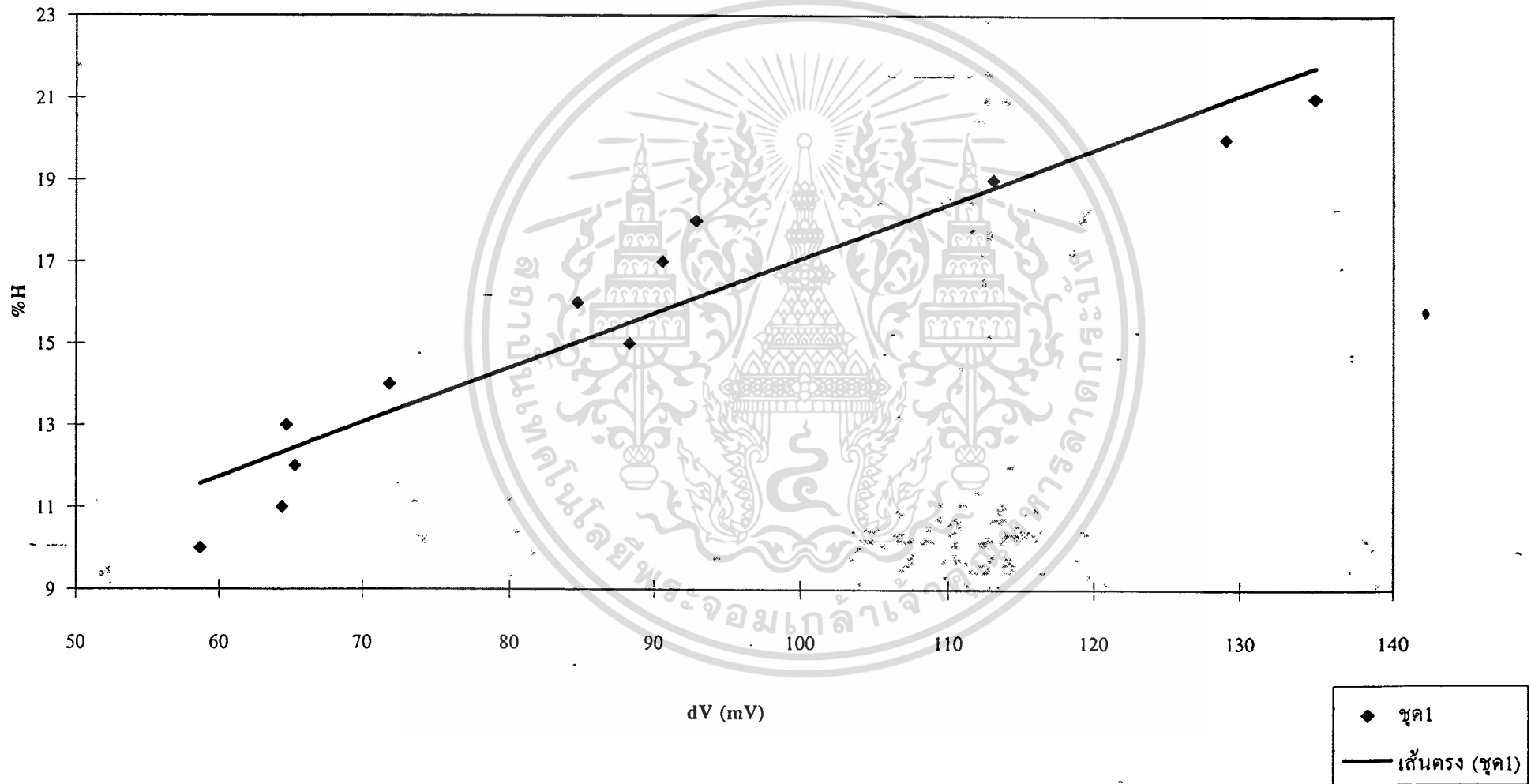
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น

(R Square = 0.907041125)  $y = Ax+B$



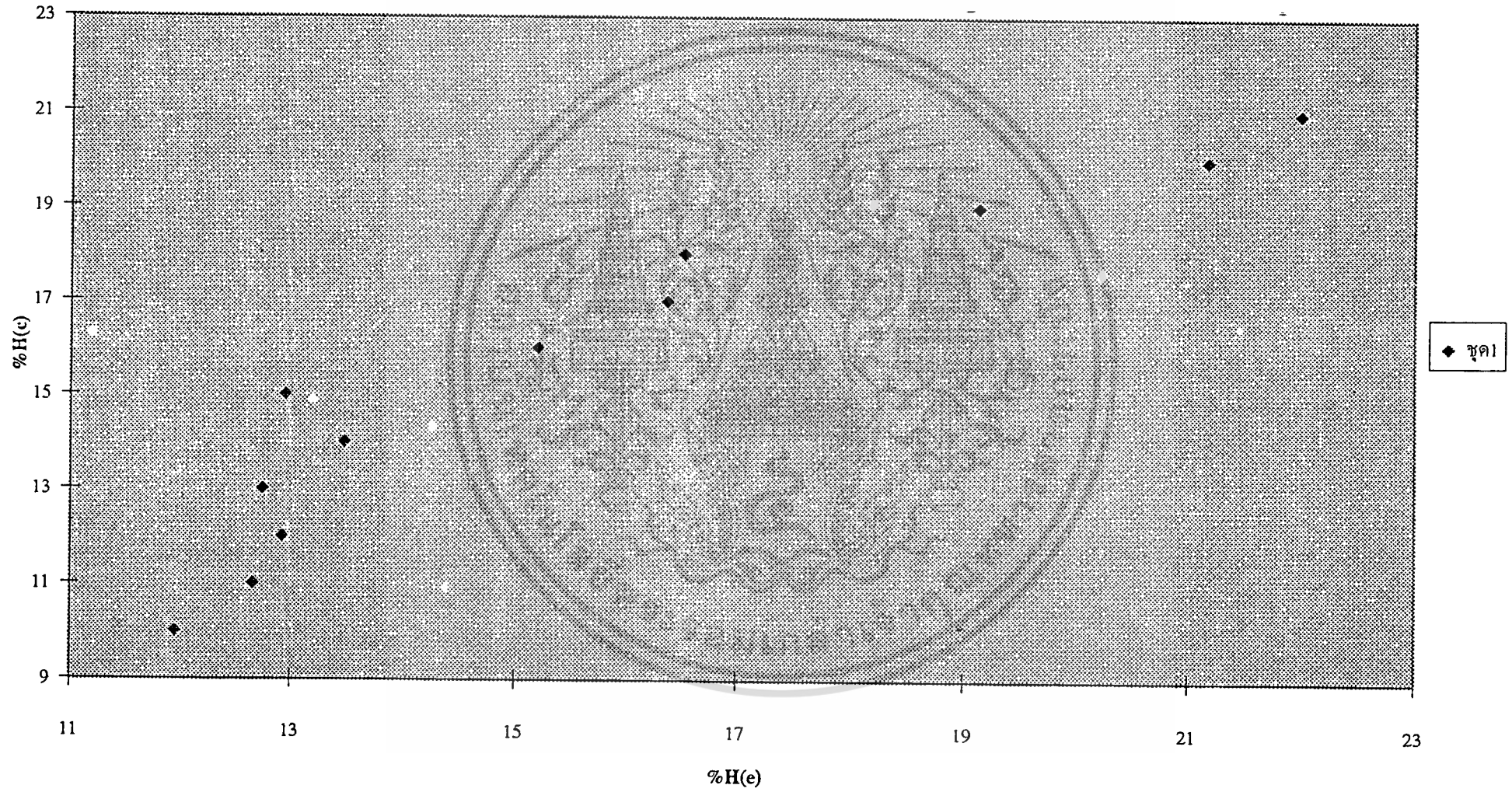
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความชื้น

(R Square =0.909450526)  $y=Ax+B$



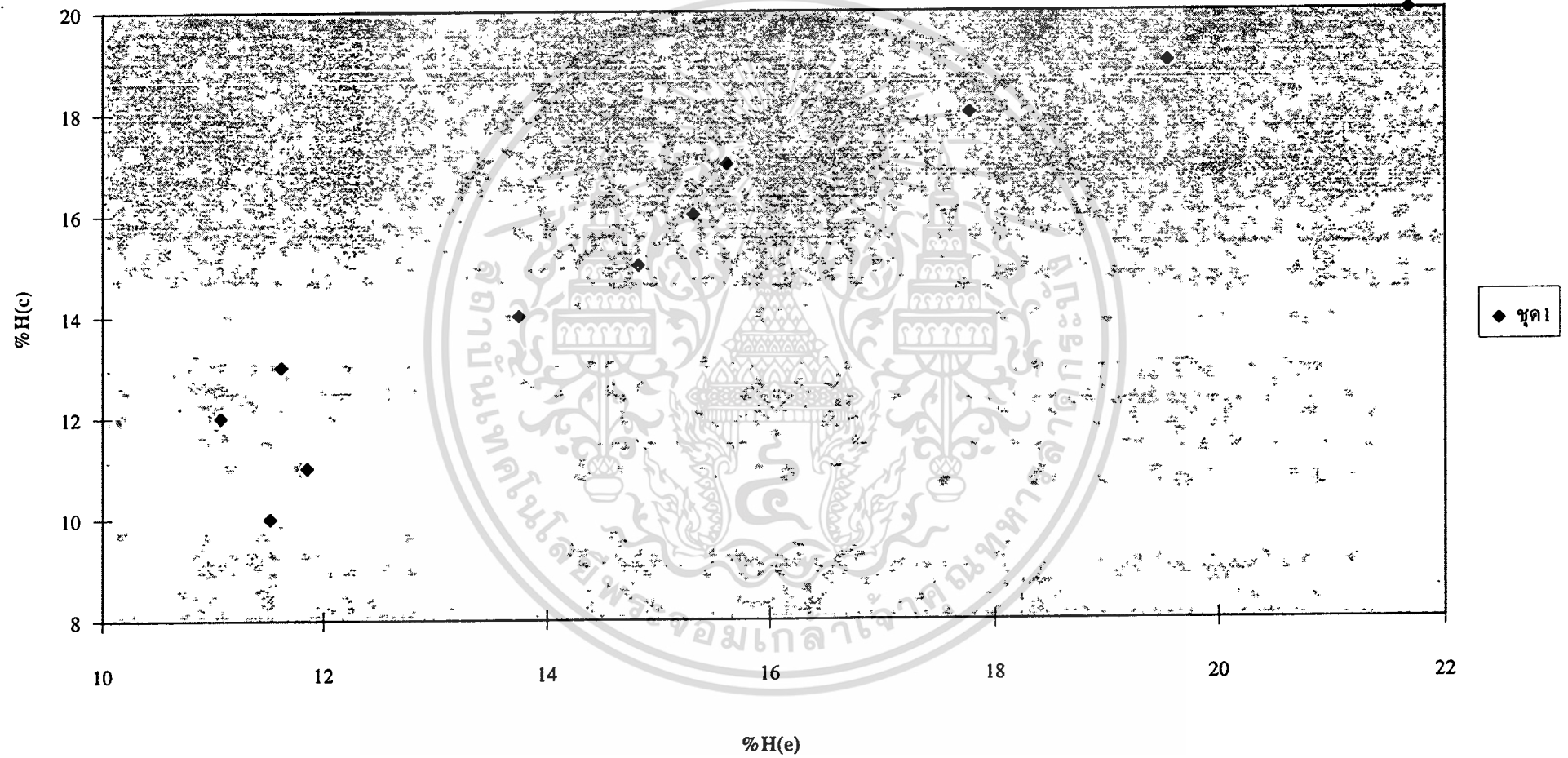
กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ได้จากการทดลองและการประมาณ

(R squ = 0.879065925)



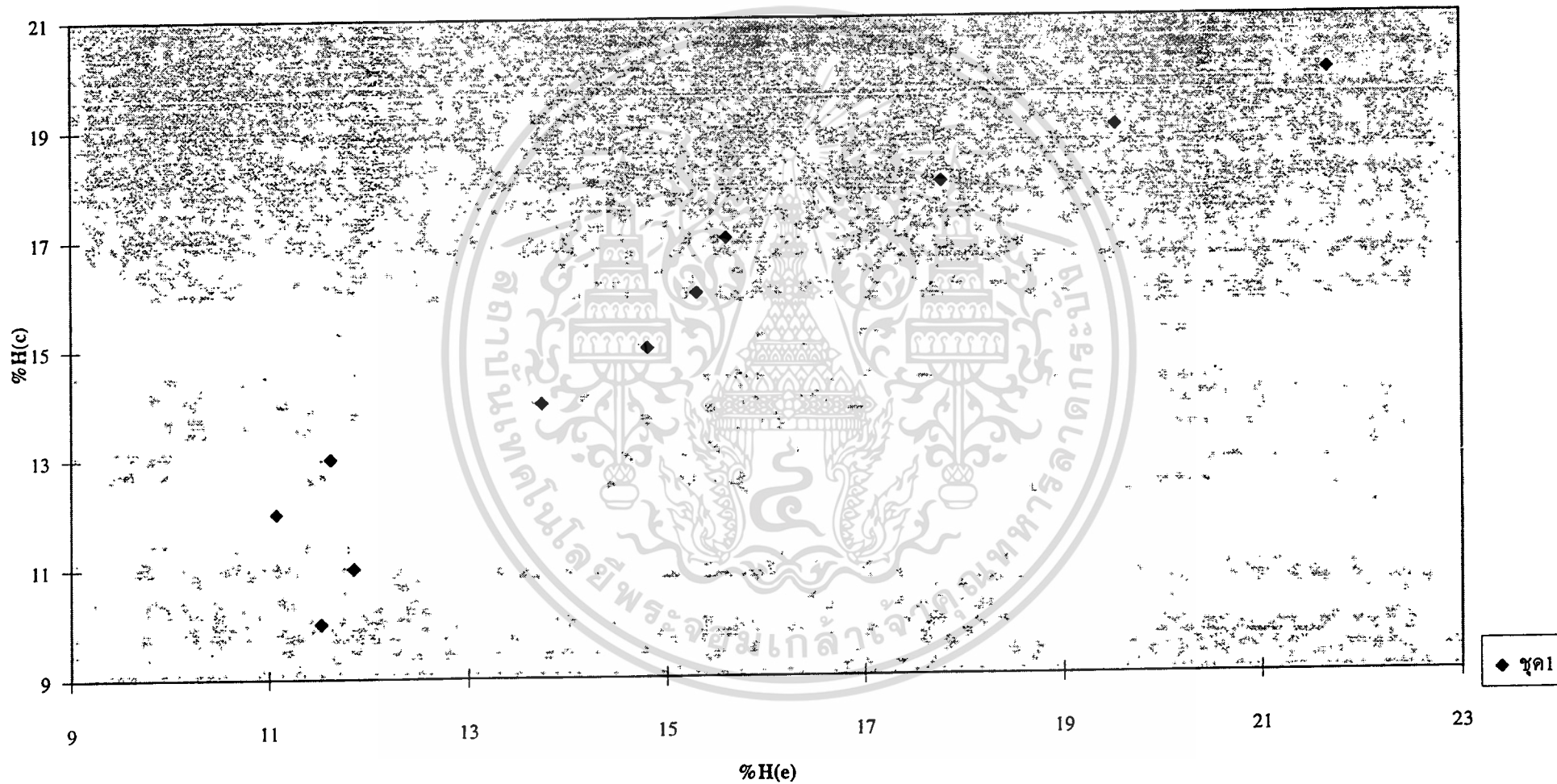
กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ได้จากการทดลองและการประมาณ

(R squ = 0.89933509)



กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ได้จากการทดลองและการประมาณ

(R squ = 0.90704113)





ภาคผนวก ก.  
ข้อมูลของหัวข้อความขึ้นดินด้วยหลักการนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Measuring Soil Water Content in the Laboratory and Field with Dual-Probe Heat-Capacity Sensors

Julie M. Tarara and Jay M. Ham\*

### ABSTRACT

Dual-probe heat-capacity sensors were constructed and tested in laboratory and field conditions to determine their application for measuring volumetric soil water content ( $\theta_v$ ). The dual-probe technique uses a transient heat pulse and a temperature sensor to determine the volumetric heat capacity of the soil ( $\rho c_p$ ), which can be subsequently converted to  $\theta_v$  for a nonswelling soil if bulk density is known. In 1994, 24 dual-probes were simultaneously tested using a multiplexed data acquisition system. In the laboratory, probes were calibrated to the known heat capacity of water. Following calibration, the probes correctly estimated  $\rho c_p$  of glass beads and water-saturated glass beads to within 2.2 and 0.2% of their calculated values, respectively. Gravimetric and dual-probe estimates of  $\theta_v$  were compared using the Tempe pressure cell technique to desorb soil columns. The two methods agreed to within  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  and  $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in two soil types, over a range of  $\theta_v$  from  $0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  to  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ; estimates of the change in  $\theta_v$  ( $\Delta\theta_v$ ) between desorption steps agreed to within  $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . In the field, beneath bare soil, estimates of  $\theta_v$  among three dual-probes installed at the same depth agreed, on average, to within  $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . The probes detected  $\Delta\theta_v$  within 30 min during the 21-d field trial. Dual-probe and gamma-attenuation measurements of  $\theta_v$  agreed to within  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . In 1995, probe design was improved to produce more robust, reliable instruments. Sixteen probes were installed 10 cm beneath a drip-irrigated row crop. A consistent difference in  $\theta_v$  of  $\approx 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  between mulch-covered and bare soil beds was detected during the 25-d trial. The dual-probe heat-pulse technique for measuring  $\theta_v$  has direct applicability in agronomic and horticultural production, where small-scale, automated measurements of  $\theta_v$  are needed.

THE DUAL-PROBE HEAT-CAPACITY SENSOR (dual-probe) has been developed to provide small scale, frequent measurements of soil thermal properties: volumetric heat capacity ( $\rho c_p$ ), thermal conductivity, and thermal diffusivity. The heat capacity of soil influences both the storage and transfer of heat, so it is a necessary parameter in models of soil temperature and heat flow. In a

nonswelling soil, changes in  $\rho c_p$  are due primarily to changes in soil water content; hence, an application of the dual-probe is to allow calculation of volumetric soil water content ( $\theta_v$ ) from measurements of  $\rho c_p$ .

The heat-pulse technique for measuring  $\rho c_p$  is based on an idealized scenario for conduction in a solid material, in which a pulse of heat is released instantaneously by a line source of infinite length (Carslaw and Jaeger, 1959, p. 258). In an actual sensor, a heater wire is enclosed in a needle probe of finite length; the heat pulse is applied during a fixed interval, typically 8 s (e.g., Campbell et al., 1991; Bristow et al., 1993). The increase in temperature that occurs as the heat pulse propagates through the medium is detected by a sensor enclosed in a second needle probe at a known distance from the source. An estimate of  $\rho c_p$  is directly related to the energy released by the source and inversely related to the maximum rise in temperature that occurs at the temperature sensor (Campbell et al., 1991).

Bristow et al. (1993) applied the heat-pulse technique to determine  $\theta_v$  by using a relationship commonly attributed to de Vries (1963), in which  $\rho c_p$  is approximated as the sum of the heat capacities of soil constituents. Given a value of  $\rho c_p$  from the dual-probe, the relationship is solved for  $\theta_v$ . Bristow et al. (1993) performed laboratory experiments to compare estimates of the changes in soil water content ( $\Delta\theta_v$ ) from dual-probe measurements to  $\Delta\theta_v$  measured by gamma attenuation. Dual-probes predicted  $\Delta\theta_v$  to within  $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  of gamma-attenuation estimates at depths of 1, 3, and 8 cm in containers of repacked soil in which  $\theta_v$  was varied. Each of their three dual-probe sensors included two needle probes that were 28 mm long, constructed from No. 20 hypodermic tubing, and mounted 6 mm apart. Noborio et al. (1996) constructed a combination dual-probe-TDR (time domain reflectometry) apparatus

Dep. of Agronomy, Throckmorton Hall, Kansas State Univ., Manhattan, KS 66506-5501. Contribution no. 96-470-J from the Kansas Agric. Exp. Stn., Manhattan, KS. Received 3 June 1996. \*Corresponding author (snafu@ksu.edu).

Published in *Agron. J.* 89:535-542 (1997).

**Abbreviations and variables:**  $c_p$ , heat capacity;  $\rho c_p$ , volumetric heat capacity; PVC, polyvinyl chloride;  $q$ , heat pulse;  $r$ , distance between heater and temperature sensor;  $r'$ , calculated  $r$ ; TDR, time-domain reflectometry;  $T_i$ , initial temperature;  $\Delta T_m$ , maximum rise in temperature at distance  $r$ ;  $X_m$  and  $X_o$ , mineral and organic fraction of soil sample;  $\theta_v$ , volumetric soil water content.

also with No. 20 hypodermic tubing, but the needle probes were 75 mm long and 10 mm apart. In laboratory experiments, estimates of  $\theta_v$  by TDR and the dual-probe were compared with gravimetric measurements. The largest differences between dual-probe estimates and gravimetric measurements of  $\theta_v$  occurred at high values of  $\theta_v$ . Below water contents of  $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , most dual-probe estimates were within  $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  of the gravimetric values. Both Bristow et al. (1993) and Noborio et al. (1996) noted that dual-probe estimates of  $\theta_v$  are sensitive to errors in *probe spacing* (i.e., the distance between the heater and the temperature sensor). Although the reports of Bristow et al. (1993) and Noborio et al. (1996) documented the performance of the dual-probe heat-capacity sensor in measuring  $\theta_v$ , their experiments were conducted in a relatively controlled, laboratory setting. Currently, no results have been published from tests of dual-probes under field conditions. In addition, no data have been collected from multiple dual-probe instruments that are operated simultaneously, which is the next logical step in the development of a useful field instrument.

Our experimental objectives concerned both the construction and testing of dual-probe heat-capacity sensors. Our first objective was to construct sensors robust enough for field use and to operate a number of dual-probes at the same time. Secondly, we wanted to assess the performance of the dual-probes in terms of repeatability and reliability in estimating  $\rho c_p$ . Finally, we wanted to use a combination of laboratory and field experiments to determine the accuracy of the dual-probe heat-pulse method for estimating  $\theta_v$  and  $\Delta\theta_v$ .

## THEORY

A dual-probe heat-pulse instrument with a temperature sensor positioned a fixed distance from a line heat source can measure the volumetric heat capacity of soil as

$$\rho c_p = \frac{q}{\pi e r^2 \Delta T_m} \quad [1]$$

where  $\rho c_p$  is in  $\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $q$  is the amount of energy applied per unit length of heater ( $\text{J m}^{-1}$ );  $e$  is the base of the natural logarithms;  $r$  is the distance between the heater and the temperature sensor (m); and  $\Delta T_m$  is the maximum rise in temperature ( $^\circ\text{C}$ ) that occurs at the distance  $r$  from the heater (Campbell et al., 1991). This model is for an idealized heater that is infinitely long and releases heat ( $q$ ) in an instantaneous pulse. Kluitenberg et al. (1993) determined that for typical probe geometry and heating times, the errors in  $\rho c_p$  that are associated with this model are negligible ( $<1\%$ ).

The relationship between the volumetric heat capacity and the volumetric water content ( $\theta_v$ ) of soil can be expressed by an equation commonly attributed to de Vries (1963):

$$\rho c_p = 1.92X_m + 2.50X_o + 4.18\theta_v \quad [2]$$

where  $X_m$ ,  $X_o$ , and  $\theta_v$  are the mineral, organic, and water fractions of the sample, respectively. The leading coefficients represent the volumetric heat capacity ( $\text{MJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) of each soil constituent. If bulk density and organic content remain constant at a given location, then temporal variations in  $\rho c_p$  are due to corresponding variations in  $\theta_v$ . Substituting Eq. [1] into Eq. [2] and rearranging terms yields an expression for

determining soil water content ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) from dual-probe measurements:

$$\theta_v = \frac{\left(\frac{q}{e\pi r^2 \Delta T_m}\right) - (1.92X_m + 2.50X_o)}{4.18} \quad [3]$$

Figure 1 shows simulated output from a dual-probe following the application of an 8-s heat pulse in a sandy loam soil with water contents of 0.1 and  $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . The data were generated using an analytical model for a pulsed, infinite, line source (Kluitenberg et al., 1993), where  $q = 600 \text{ J m}^{-1}$ ,  $r = 0.006 \text{ m}$ , and  $X_m = 0.54$ . The resultant curves show that the range of  $\Delta T_m$  is small ( $<1.5^\circ\text{C}$ ) and that  $\Delta T_m$  decreases as  $\theta_v$  increases. Typically,  $\Delta T_m$  occurs less than 60 s after the heat pulse, but the exact time of  $\Delta T_m$  varies with probe geometry and the thermal diffusivity of the soil. The determination of  $\rho c_p$  and  $\theta_v$ , however, requires only  $\Delta T_m$ , not its relative time of occurrence (Eq. [1] and [3]).

Eq. [3] can be rearranged to solve for  $\Delta T_m$ :

$$\Delta T_m = \left[\frac{e\pi r^2}{q} (1.92X_m + 2.50X_o + 4.18\theta_v)\right]^{-1} \quad [4]$$

Figure 2 shows  $\Delta T_m$  simulated for a full range of  $\theta_v$ , using the same inputs as Fig. 1. From oven-dry to saturated soil,  $\Delta T_m$  varies by only about  $1.2^\circ\text{C}$ ; therefore, accurate measurements of  $\Delta T_m$  are required to correctly estimate  $\theta_v$ . Taking the partial derivative of  $\Delta T_m$  with respect to  $\theta_v$  yields the sensitivity of the temperature rise to the change in soil water content:

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial \theta_v} = \frac{-4.18q}{e\pi r^2 (1.92X_m + 2.50X_o + 4.18\theta_v)^2} \quad [5]$$

For a given  $\theta_v$ , the sensitivity of  $\Delta T_m$  (inset, Fig. 2) increases as more energy is applied to the probe ( $q$ ), but decreases with larger probe spacings and higher bulk densities. If one considers the range of water contents in a typical agricultural soil ( $0.05$  to  $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), the average sensitivity of the dual-probe is about  $2.5^\circ\text{C}$  per unit change ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) in water content; that is, a 1% change in  $\theta_v$  causes a  $0.025^\circ\text{C}$  change in  $\Delta T_m$ . For copper-constantan thermocouples, a 1% change in  $\theta_v$  would cause only a  $1 \mu\text{V}$  change in the electrical signal. Hence, if thermocouples are used to measure  $\Delta T_m$ , dataloggers with adequate resolution (e.g.,  $0.33 \mu\text{V}$ ) are required to detect small changes in  $\theta_v$ .

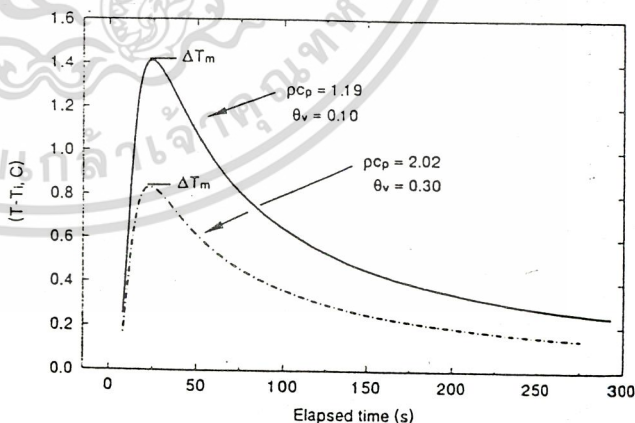


Fig. 1. The change in soil temperature ( $T - T_i$ ) as a function of  $\theta_v$ , following the release of an 8-s pulse of heat from the dual-probe heater. Curves were simulated as representative of a sandy loam soil where  $q = 600 \text{ J m}^{-1}$ ,  $r = 0.006 \text{ m}$ , and  $X_m = 0.54$  (Eq. [3]). Units of  $\rho c_p$  are  $\text{MJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; units of  $\theta_v$  are  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ .  $\Delta T_m$  ( $^\circ\text{C}$ ) refers to the maximum rise in temperature detected at the thermocouple probe.

## SOURCES OF ERROR

To successfully estimate  $\theta$ , with dual-probe heat-capacity sensors, one must measure the following:  $q$ ,  $r$ ,  $\Delta T_m$ , and  $X_m$ , or soil bulk density. In Eq. [3],  $q$  and  $\Delta T_m$  must be measured for every estimate of  $\theta$ , whereas only single, fixed inputs of  $r$  and  $X_m$  are required for each instrument at a given location, assuming that bulk density remains constant with time. However, estimates of  $\rho c_p$  are most sensitive to errors in probe spacing (Campbell et al., 1991; Kluitenberg et al., 1993, 1995). For example, Campbell et al. (1991) showed that a 2% error in  $r$  leads to a 4% error in  $\rho c_p$ . The sensitivity of Eq. [1] to errors in  $r$  shows that probe spacing must be measured accurately and that the needle probes themselves must be rigid enough to withstand installation into soil without bending.

Because the thermocouple is housed in a stainless steel hypodermic needle filled with thermally conductive epoxy, both of which have thermal properties different from those of soil, the heat pulse may travel through the temperature probe differently than through soil. Contact resistance between the soil and the needle probe may reduce the magnitude of the heat pulse crossing the probe (Incropera and De Witt, 1990, p. 86), thereby decreasing  $\Delta T_m$  and leading to overestimates of  $\rho c_p$  and  $\theta$ . Errors in  $\Delta T_m$  also may be caused by the analog-to-digital (A/D) conversion of the temperature signal, but these can be minimized by increasing the sampling frequency of the data logger, using high resolution data logging equipment and applying enough power to the heater probe to ensure that  $\Delta T_m$  exceeds  $0.5^\circ\text{C}$  (Bilskie, 1994).

Although  $\Delta T_m$  varies with  $\rho c_p$  and  $\theta$ , (Fig. 1),  $q$  can be selected to produce an adequate temperature signal ( $\Delta T_m > 0.5^\circ\text{C}$ ) for the expected range of  $\theta$ . The value of  $q$  depends on the resistance of the heater and the amount of current that is passed through it, which is usually determined by measuring the voltage drop across a precision resistor installed in series with the probe's heater. Accuracy in measuring  $q$  can be improved by proper selection of the precision resistor and by using accurate, high resolution equipment to measure resistance and voltage. Lastly, if no other measurement or model errors are present, one must still use an accurate value for the bulk density of the sample and, in soils with high organic contents, an accurate value for the soil organic fraction. This may require that bulk density be sampled directly at the dual-probe, after completion of the dual-probe measurements. Although this is true for estimates of  $\theta$ , if bulk density and soil

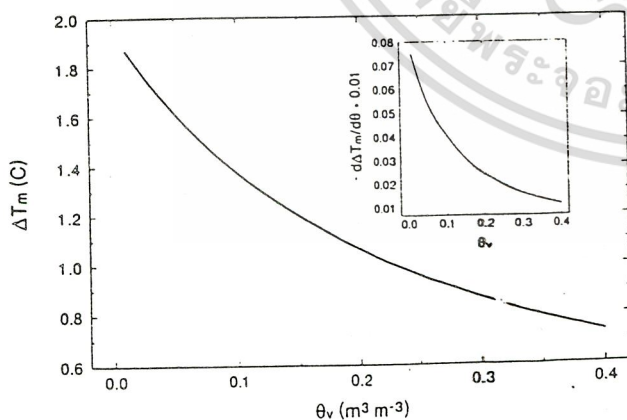


Fig. 2. Expected relationship between  $\Delta T_m$  measured by the dual-probe and volumetric soil water content ( $\theta_v$ ) for a sandy loam soil. The inset depicts instrument sensitivity, i.e., changes in  $\Delta T_m$  with respect to changes in  $\theta_v$ , as a function of  $\theta_v$ . Plotted values were calculated from Eq. [4] and [5] using the same input data listed for Fig. 1.

organic matter are constant with time, such accuracy is not necessary to estimate  $\Delta\theta$ .

## MATERIALS AND METHODS

### Probe Construction

In 1994, 30 dual-probes were constructed using No. 20 hypodermic needles (0.902 mm o.d., 0.584 mm i.d., 0.152 mm wall thickness; Monoject, St. Louis, MO) as housings for the heat source and the temperature sensor. The beveled tip and aluminum hub of each needle were removed. Pairs of needles were mounted in parallel and held a fixed distance apart ( $\approx 6$  mm) by inserting them through predrilled holes in a PVC block (26 by 16 by 6 mm; Fig. 3). Effective probe lengths, or the length of needle protruding from the PVC housing, were 27 to 29 mm. Heater probes were made by threading a single strand of Evanohm enameled wire (0.062-mm diam.,  $444 \Omega \text{ m}^{-1}$ , Evanohm R Alloy; Carpenter Technology Corp., Orangeburg, SC) through a needle four times, creating a double loop. The heater wire was spliced onto 4.75-m copper leads (28-American Wire Gauge [AWG], 9L28026 ribbon cable; Belden Wire and Cable, Richmond, IN). The average total resistance of a finished heater was  $78 \Omega$  ( $1776 \Omega \text{ m}^{-1}$  of heater probe). Temperature sensor probes were made by longitudinally centering a Type T thermocouple junction (0.079-mm diam., 40-AWG, TT-T-40-SLE; Omega Engineering, Stamford, CT) in the second needle. The thermocouple wire was continuous from the junction to the data acquisition system. Both needles were filled with thermally conductive epoxy (RBC-4300 and A-121 epoxy hardener; RBC Industries, Warwick, RI), as was the cavity in the PVC housing; therefore, finished probes were electrically insulated and waterproof.

In 1995, 30 probes were built using No. 18 hypodermic needles (1.27 mm o.d., 0.084 mm i.d., 0.203 mm wall thickness; Monoject, St. Louis, MO) to improve rigidity and to help maintain a fixed probe spacing when the instrument was inserted into soil. A lower resistance heater wire ( $210 \Omega \text{ m}^{-1}$ ) with more durable enamel was substituted (0.079-mm diam., Nichrome 80 Alloy; Pelican Wire Co., Naples, FL). The average total resistance of a finished heater was  $38 \Omega$  ( $840 \Omega \text{ m}^{-1}$  of heater probe). The lower resistance alloy wire allowed us to apply 12 V to the probe to achieve the desired energy input during the heat pulse. Needle probes were filled with a more viscous epoxy (Omegabond 101; Omega Engineering, Stam-

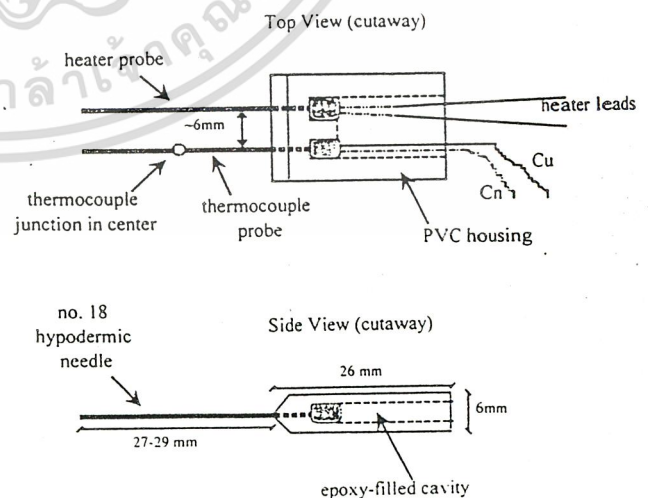


Fig. 3. Schematic diagram of dual-probe heat-capacity sensor (not drawn to scale).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ford, CT), but the PVC housing was filled with the same epoxy used in 1994.

### Laboratory Testing

All probes built in 1994 were tested for reliability and accuracy of determining  $\rho c_p$  in media of known heat capacities. In the first medium, water was stabilized with agar ( $2 \text{ g L}^{-1}$ ) to reduce free convection. We did not determine if the agar affected the heat capacity of the solution and accepted the published value of  $\rho c_p$  for water at  $20^\circ\text{C}$  ( $4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ). Two other media, one composed of dry glass beads and one of glass beads saturated with water, were selected to represent the extreme values of  $\rho c_p$  that one might encounter in an agricultural soil. Glass beads (Spherglass; Potters' Industries, Persippine, NJ) were packed to a bulk density of  $1600 \text{ kg m}^{-3}$ . Values of  $\rho c_p$  for the glass bead media were calculated from an average specific heat ( $c_p$ ) of soda lime glass ( $0.87 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), an average density ( $\rho$ ) of the composite glass ( $2500 \text{ kg m}^{-3}$ ), and the volume fraction of glass spheres in the container (Bansal and Doremus, 1986, p. 35). The heat capacity of the dry glass beads was calculated as  $1.38 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ; the heat capacity of the water-saturated glass beads was  $2.90 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , based on the volume fractions and heat capacities of water and glass. Probes were suspended in each medium such that both the needles and the PVC housing were submerged. Twenty-four probes were tested at the same time, using a data acquisition system composed of a datalogger, multiplexer, and relay driver (CR21-X, AM416, A6REL-12; Campbell Scientific, Logan, UT). Details of the design of the hardware-software system are available from the authors upon request.

Measurements of  $\rho c_p$  in each test medium were recorded at 30-min intervals for 48 h. The data acquisition protocol was as follows: the initial temperature of the medium ( $T_i, ^\circ\text{C}$ ) was measured immediately prior to the application of an 8-s heat pulse to the heater probes ( $q \approx 700 \text{ J m}^{-1}$ ). The value of  $\Delta T_m$  was determined by recording the thermocouple temperature every 0.5 s for 60 s and subtracting  $T_i$ . Values of  $q$  and  $\Delta T_m$  were used in Eq. [1] along with inputs of individual probe spacings ( $r$ ) to compute  $\rho c_p$  at each dual-probe. The amount of energy applied to the heater probe ( $q$ ) was measured by placing a precision resistor ( $1 \Omega$ ,  $\pm 0.1\%$ ; VPRS, Vishay Resistors, Malvern, PA) in series with the power supply and the dual-probe heater. The voltage drop across the precision resistor was used to determine the current applied to the heater probe, according to Ohm's Law. During these and other laboratory tests, approximately 2000 heat pulses were applied to each dual-probe.

Estimates of  $\rho c_p$  by Eq. [1] are most sensitive to measurement errors in probe spacing. In 1994, for each probe, the distance between needles ( $r$ ) was measured to within 0.0025 mm, under a microscope equipped with a vernier scale. Data collected from the water-agar medium were subsequently re-analyzed by inserting the known heat capacity for water into Eq. [1] and solving for  $r$ . This calculated value of probe spacing will be denoted by  $r'$ . This method of calibrating dual-probes to a known heat capacity (Campbell et al., 1991), uses calculated probe spacing to account for nonideal heat flow between the heater and the thermocouple junction and extraneous factors in sensor materials or geometry that may affect the accuracy of a dual-probe measurement. In 1995, all new probes were tested in the water-agar medium and calibrated to the heat capacity of water. The calculated probe spacing ( $r'$ ) for each instrument was then used for determining  $\rho c_p$  in soil columns and in the field.

### Soil Column Desorption

Two dual-probes were affixed from opposite sides of a Tempe pressure cell [Product 1405, with No. 1435B1M3

1-bar (0.1 MPa), high-flow ceramic plate; Soil Moisture, Santa Barbara, CA] and centered vertically. Oven-dried, ground soil, moistened with  $1 \text{ mM CaSO}_4$  solution was hand packed in columns (8.9 cm diam., 3.0 cm high) and around the two dual-probes at midcolumn height. Two columns of Haynie sandy loam (coarse-silty, mixed, calcareous, mesic Mollic Udifluvents) were packed to a bulk density of  $1420 \text{ kg m}^{-3}$ ; two columns of Kahola silt loam (fine-silty, mixed, mesic Cumulic Hapludolls) were packed to bulk densities of 1260 and  $1100 \text{ kg m}^{-3}$ , respectively. The organic matter content in the two soils was 0.7 and 2.75% by volume, respectively, as determined by the Walkley-Black method (Schulte, 1980, p. 5-8). After the columns had been saturated from below with distilled water, free water was allowed to drain, and the columns were left to equilibrate overnight. The soil columns were desorbed at constant temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) by applying incremental pressure to the Tempe cells, in a series of equilibrium steps (Klute, 1986), at 24-h intervals. Kahola silt loam was desorbed in the following steps: 10, 20, 33, 65, and 95 kPa. Haynie sandy loam was desorbed in smaller steps at low pressures (2, 5, 7.5, 10, 15, 20, 33, 65, and 95 kPa) because of the soil's water-retention characteristics. During the desorption, heat pulses were applied to the dual-probes every hour. A 30-min delay occurred between pulses applied to probes in the same soil column to avoid the effects of residual heat or temperature gradients created by the pulse from the companion probe. The soil columns were weighed to the nearest 0.1 g every 24 h. Following desorption, the soil was oven dried ( $105^\circ\text{C}$  for 24 h), and gravimetric water contents associated with each pressure step were converted to volumetric values ( $\theta_v$ ) as described by Klute (1986).

The specific heat of each soil ( $c_p$ ) was analyzed with a differential scanning calorimeter (Perkin-Elmer model DSC-2) at the Thermophysical Properties Research Laboratory (Purdue University, West Lafayette, IN). The specific heats of Haynie and Kahola soils were  $0.7590$  and  $0.7650 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively, at  $26^\circ\text{C}$ . Assuming a particle density of  $2650 \text{ kg m}^{-3}$ , the heat capacity of the soil mineral fraction would be approximately  $2.0 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , which is close to de Vries' (1963) value of  $1.92 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Because most users of the dual-probe will not know the specific heat of soil minerals, we elected to use de Vries' value in all calculations, to emulate how the instruments would be used in the field.

### Field Trials

In 1994, 24 dual-probes were installed at several depths in a 1- by 1-m plot of Eudora silt loam (coarse-silty, mixed, superactive, mesic Fluventic Hapludolls) near Manhattan, KS ( $39.12^\circ\text{N}$ ,  $96.35^\circ\text{W}$ ; 324 m above sea level) as part of a separate experiment on near-surface soil heat flux. Probes were installed horizontally by excavating an area to the desired depth, and then gently depressing the probe to ensure good contact between the needles and the soil. The excavated area was carefully backfilled to approach its original bulk density. Access tubes for the gamma attenuation meter were installed at the north and south ends of the 1- by 1-m plot. The gamma probe was calibrated according to the method of Van Bavel et al. (1985). The plot was irrigated to near saturation over 24 h, using a fine mist to avoid ponding, runoff, and surface crusting. The soil was allowed to dry and was protected from rewetting by a retractable, automated rain shelter (12 by 12 m). Because of accidental continuous heating of the dual-probes at the onset of the field trial, most of the heating elements were damaged. Consequently, results of the 1994 field trial will report the performance of three instruments installed at 4.5 cm that operated successfully for 21 d. Heat pulses were applied to the probes every 30 min during the trial.

In 1995, 16 dual-probes were installed beneath a drip-irri-

Table 1. Mean measured ( $r$ ) and calculated ( $r'$ ) spacing between dual-probe needles, with standard errors and coefficient of variation, for 24 probes built in 1994.

Statistic	Probe spacing <sup>†</sup>			
	$r$	$r'$		
		Water	Dry beads	Wet beads
$\bar{x}$	5.75	5.87	5.81	5.85
SE	0.020	0.003	0.002	0.002
CV, %	1.65	2.09	1.74	1.79

<sup>†</sup> Probe spacing was calculated in three media of known heat capacities: water stabilized with agar ("water"), dry glass beads ("dry beads"), and glass beads saturated with water ("wet beads").

gated tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Mountain Pride) crop on Haynie sandy loam, 1.6 km west of the 1994 site. One-half of the crop had been transplanted onto plastic mulch-covered beds; the other half had been transplanted onto bare soil. Because the probes built in 1995 contained sturdier needles, they were inserted horizontally at the desired depth (10 cm), directly into an excavated soil face. Data were collected every 2 h for 25 d, during which time no instruments failed. Values of  $\rho_{cp}$  were converted to  $\theta_v$  by Eq. [2]. At the end of the experiment, soil bulk density was measured volumetrically at each probe.

## RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 lists the mean values of measured ( $r$ ) and calculated ( $r'$ ) probe spacings for 24 of the dual-probes built in 1994. Calculated values of  $r'$  were in good agreement, regardless of test medium, but were all slightly larger ( $\approx 0.1$  mm) than measured values. Correlation coefficients for the relationship between  $r'$  and  $r$  were 0.84, 0.81, and 0.74 for water, dry glass beads, and water-saturated glass beads, respectively, which suggests that variation in probe spacing causes the variability in  $\rho_{cp}$  measurements, among probes immersed in the same medium. These results support the use of the calibration technique that we described in the methods, in which the input value of probe spacing for each instrument is calculated so that the probe is calibrated to the known heat capacity of water. Calibration to a known heat capacity eliminates the need for precise, accurate, physical measurements of the distance between the heater and the thermocouple junction, and it corrects the probe's estimate of  $\rho_{cp}$  for nonideal heat flow. Despite the slight bias between  $r'$  and  $r$ , the results in Table 1 indicate that  $r'$  is stable and repeatable, and that the  $r'$  measured in one medium can be applied to measurements collected in other media.

The key to successful use of the dual-probe is not the magnitude of  $r$  or  $r'$  per se, but that  $r'$  is known and remains fixed. Once the instruments are calibrated in water, the distance between the needle probes must remain constant. Therefore, the probes must be installed in the soil with care. The use of sturdier hypodermic needles to house the heater and thermocouple should be investigated, particularly if the instruments will be developed further for use by agricultural producers.

Table 2 shows that the  $r'$  determined in water does produce accurate estimates of  $\rho_{cp}$  in other media. By inserting  $r'$  from water into Eq. [1], the heat capacities of dry glass beads and water-saturated glass beads were

Table 2. Heat capacities ( $\rho_{cp}$ ) of three test media: actual values, and values estimated using dual-probes and either measured ( $r$ ) or calculated ( $r'$ ) probe spacing. Dual-probe estimates are means of 2304 observations from 24 instruments.<sup>†</sup>

Medium <sup>‡</sup>	$\rho_{cp}$		
	Actual <sup>§</sup>	Dual-probe estimate <sup>  </sup>	
		$r$	$r'$
	MJ m <sup>-3</sup> °C <sup>-1</sup>		
Water	4.18	4.36	4.18
Dry beads	1.38	1.41	1.35
Wet beads	2.90	3.02	2.90

<sup>†</sup> Standard errors (SE) for all estimates of  $\rho_{cp}$  were  $< 0.003$  MJ m<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>.

<sup>‡</sup> Media of known heat capacities: water stabilized with agar ("water"), dry glass beads ("dry beads"), and glass beads saturated with water ("wet beads").

<sup>§</sup> Published or calculated values, as described in the text.

<sup>||</sup> Heat capacities estimated by the dual-probes were calculated using Eq. [1] with either  $r$  or  $r'$  based on calibration in water.

estimated to within 2.2 and 0.2% of their calculated values, respectively. The overall standard error of the mean for the 24 test instruments was less than 0.003 MJ m<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup> in all three media, which shows that all probes estimated  $\rho_{cp}$  at nearly its actual value. Lack of drift and the small amount of noise in the estimate of  $\rho_{cp}$  support the dual-probes' repeatability. The largest standard deviation from the mean  $\rho_{cp}$  estimated by a single dual-probe was 0.07 MJ m<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>, which occurred in the agar-stabilized water.

Figures 4a and 4b show  $\theta_v$  with time for one column of each soil type that was desorbed in the Tempe pres

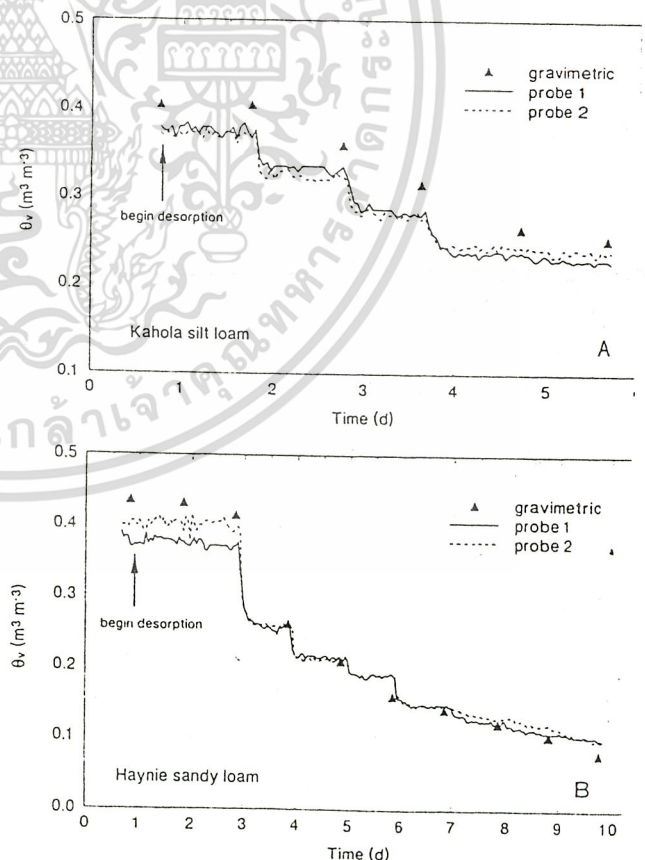


Fig. 4. Soil water content ( $\theta_v$ ) of (a) Kahola silt loam and (b) Haynie sandy loam, estimated by dual-probe and gravimetric method during soil column desorption in Tempe pressure cells. Pressure steps ranged from 2 to 95 kPa at 24-h intervals.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sure cells. Desorption of additional soil columns (data not shown) produced nearly identical results. The mean absolute differences between the dual-probe and gravimetric estimates of  $\theta_v$  were  $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in Kahola silt loam and  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in Haynie sandy loam. Dual-probes estimated the cumulative water losses from columns to within  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  of the gravimetric estimate for Haynie sandy loam and to within  $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  for Kahola silt loam. The dual-probes responded rapidly to the water loss induced by the step changes in pressure; in addition, probe output was very stable after the soil column had equilibrated. At high values of  $\theta_v$ , estimates from the two probes in the column of Haynie sandy loam (Fig. 4b) differed, but at lower  $\theta_v$ , the estimates converged. This behavior may be caused by errors in the measurement of  $\Delta T_m$ . Because  $\Delta T_m$  is smaller in wet soil than in dry soil, the relative magnitude of a measurement error in  $\Delta T_m$  might be larger in wet soil (Fig. 1). One should apply enough power to the heater to minimize the error caused by small values of  $\Delta T_m$ . Alternatively, one can program the datalogger to automatically change  $q$  (i.e., heating time) according to  $\theta_v$ , thereby maintaining a nearly fixed  $\Delta T_m$  (e.g.,  $1.0^\circ\text{C}$ ). Dual-probes in the Kahola silt loam (Fig. 4a) consistently underestimated  $\theta_v$ . The most probable explanation for this result is that of an error in the measurement of soil bulk density because the disagreement was nearly constant over a range of  $\theta_v$ . Equation [3] shows that errors in  $X_m$  and  $X_0$  would cause the same effect. The bulk density value estimated for the entire soil column may have differed from that between the dual-probe needles, or from the bulk density of the layer that contained the dual-probes.

Figure 5 shows combined data from the desorptions of soil columns in Tempe pressure cells. The regression shows that on average, the probes tended to slightly underestimate  $\theta_v$  compared with gravimetric measurements. Disagreement between gravimetric and dual-probe estimates in Fig. 5 could be caused by measurement error in  $\Delta T_m$  or in  $q$ , by model error, by error in the gravimetric method itself, or by the use of incorrect

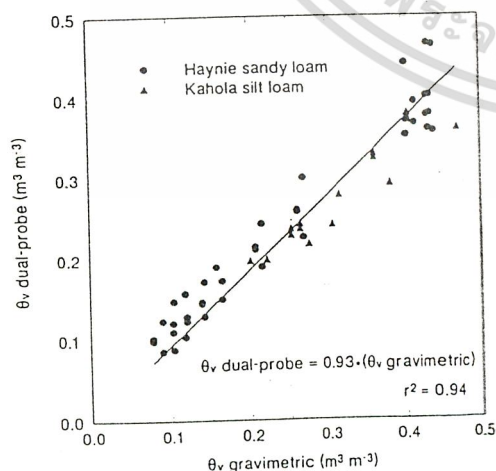


Fig. 5. Comparison between volumetric soil water content ( $\theta_v$ ) estimated by dual-probe and gravimetric methods, from pressure-cell desorptions of soil columns for two soil types. Dual-probe estimates were made using the calculated probe spacing ( $r'$ ). The regression equation was computed by forcing the intercept through the origin.

physical constants in Eq. [3]. Errors associated with the gravimetric method of estimating  $\theta_v$  are discussed by Gardner (1986). However, potential error resulting from the physical constants used in Eq. [3] warrants further discussion here.

Accurate measurement of  $\theta_v$  depends on accurate estimates of the specific heat of the soil constituents and soil bulk density (Eq. [3]). We previously stated our rationale for using de Vries' (1963) estimates of the specific heats of soil minerals and soil organic matter. The following calculation is useful to illustrate the effect of soil bulk density on calculations of  $\theta_v$ . If a value of  $1400 \text{ kg m}^{-3}$  were used in Eq. [3] for soil whose true bulk density is  $1300 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\theta_v$  would be reported as  $0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  instead of its actual value of  $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . This hypothetical error of approximately  $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  is not larger than the total error in  $\theta_v$  that we observed during the soil column desorptions. However, for certain research applications, very accurate measurements of bulk density will be needed to estimate  $\theta_v$  to within 1%. For practical application of dual-probes in agricultural production, small errors in estimating bulk density and the use of de Vries' estimate of the heat capacity of soil minerals would not seriously affect estimates of  $\theta_v$  for the grower. In greenhouse, nursery, and some landscape applications, however, where soilless media predominate, one would need to analyze both the volumetric composition of these products and the heat capacities of their solid constituents. Not only must these values be tabulated, but the shrink-swell characteristics of soilless media must be determined for the dual-probe technique to be useful in the horticulture industry.

If the bulk density and organic matter content of the soil are not known, but remain constant with time, the dual-probes would still correctly estimate changes in  $\theta_v$ . For many applications, it is  $\Delta\theta_v$  that is important, because this value indicates the amount of water that was lost by evaporation, transpiration, and drainage. Figures 6a and 6b show the loss of water ( $\Delta\theta_v$ ) from soil columns at each equilibrium step of the desorption process. Values of  $\Delta\theta_v$ , determined by the dual-probe and gravimetric methods were nearly identical. The mean absolute difference in estimates between two probes in the same column was  $0.004 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . These data show the true strength of the dual-probe heat-pulse technique, that of indicating  $\Delta\theta_v$  with time, especially in the range of  $\theta_v$  typically found in agricultural production.

Figure 7 shows  $\theta_v$  estimated by three dual-probes at the same depth in the 1994 field trial. All three instruments were in good agreement. Although gamma attenuation measurements were collected up to 0.5 m away from an individual dual-probe, the two methods agreed to within  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . As in the laboratory, the dual-probes responded rapidly to changes in  $\theta_v$ , indicated here by irrigation and heavy rain. The sole discrepancy between gamma attenuation and dual-probe estimates of  $\theta_v$  may have been due to soil bulk density, which was measured at the end of the experiment, between the gamma access tubes. This value probably differed from that of the repacked soil between the needles of an individual dual-probe. Additionally, settling may have occurred in the dual-probe area after the heavy rain on

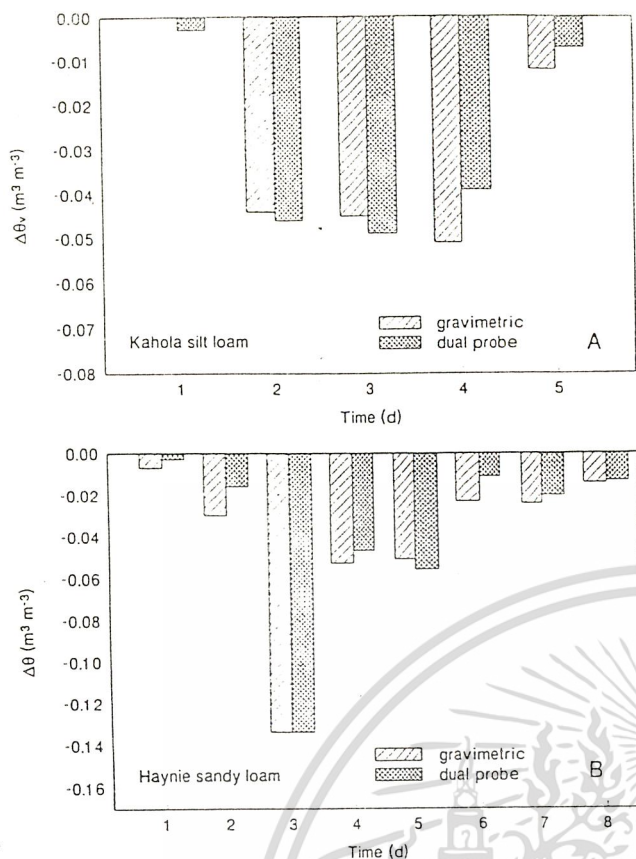


Fig. 6. Changes in water content ( $\Delta\theta$ ) for (a) Kahola silt loam; (b) Haynie sandy loam, estimated by dual-probe and gravimetric methods, during soil column desorptions in Tempe pressure cells. Pressure steps ranged from 2 to 95 kPa at 24-h intervals.

Day of Year 237–238. The accuracy of, and agreement among, multiple probes at shallow depths suggest a potential application of the dual-probe technique in estimating near-surface evaporation (e.g., Baker and Spaans, 1994). Bristow et al. (1993) reported that strong temperature gradients near the soil surface affected dual-probe performance at 1 cm, but did not influence estimates of  $\theta_v$  at 3- or 8-cm depths.

In 1995, improvements in probe design resulted in more robust instruments that could be installed directly into undisturbed soil beneath an established crop. The probes detected a consistent difference in  $\theta_v$  of approximately  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  between mulch-covered and bare soil, under frequent irrigation (data not shown). No instruments failed during the experiment. Dual-probe measurements were not compared against an independent means of estimating  $\theta_v$  because of the position of dual-probes (in the root zone) relative to that of the gamma attenuation access tubes. Local variation in  $\theta_v$  caused by the adjacent root system precluded meaningful comparisons between individual dual-probes. However, from this complication one can propose a further application of dual-probe technology: determining the uptake of water by plants in the field or grown in containers. Positioning several dual-probes in or near the root zone of a potted plant or field crop would permit detailed evaluation of spatial and temporal variation in  $\theta_v$ . The small sampling volume of the dual-probe ( $\approx 3.5 \text{ cm}^3$ ) makes the instrument appropriate for this type of

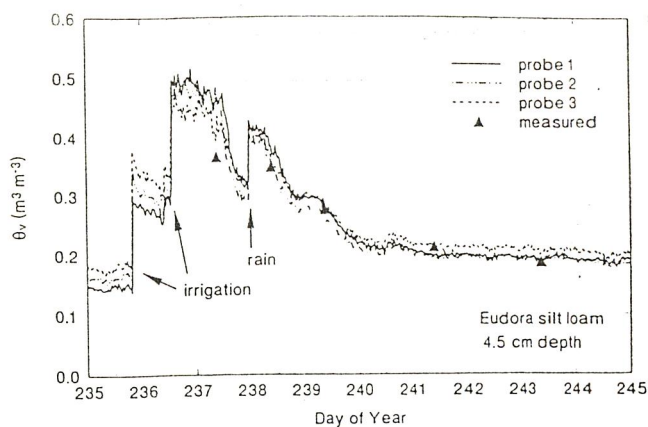


Fig. 7. Field performance of dual-probe heat capacity sensors in estimating  $\theta_v$  in bare soil, compared with measurements from gamma attenuation.

investigation but also requires attention to both the positioning of individual probes in the soil and to the probes' sampling rate.

## CONCLUSIONS

Depending on one's experimental objectives, using dual-probe heat-capacity sensors to determine  $\theta_v$  and  $\Delta\theta_v$  in a nonswelling soil offers a number of advantages over other methods. Because the instruments are electronic, measurements can be automated to provide frequent (e.g., hourly) estimates of  $\rho_c p$  and  $\theta_v$  at a number of locations. In 1994, 24 instruments were used simultaneously, and in 1995, 16 dual-probes were operated successfully. The small volume of soil sampled by a dual-probe makes the technique ideal for detecting small-scale spatial and temporal variation in  $\theta_v$ , especially at shallow depths. The instruments estimated  $\theta_v$  to within  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in the laboratory and to within  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in the field. Nonetheless, the strength of the dual-probe technique is in measuring *changes* in  $\theta_v$ , estimates of which are unaffected by errors in the measurement of soil bulk density, specific heat of the soil mineral fraction, and soil organic matter, if these properties do not change with time. In soil column desorptions in the laboratory, estimates of  $\Delta\theta$  by the dual-probe method and the gravimetric method agreed to within  $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . The dual-probe heat-pulse method has broad utility in soil and plant science, because values of soil temperature, heat capacity, water content, and thermal diffusivity can be determined from a single reading.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Gerard J. Kluitenberg for his assistance during the experimental work and for helpful discussions during the preparation of this manuscript.

## REFERENCES

- Baker, J.M., and E.J.A. Spaans. 1994. Measuring water exchange between soil and atmosphere with TDR-microlysimetry. *Soil Sci.* 158:22–30.
- Bansal, N.P., and R.H. Doremus. 1986. *Handbook of glass properties*. Academic Press, New York.
- Bilskie, J.R. 1994. Dual probe methods for determining soil thermal properties: Numerical and laboratory study. Ph.D. diss. Iowa State Univ., Ames (Diss. Abstr. 9503532).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Bristow, K.L., G.S. Campbell, and K. Calissendorff. 1993. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:930-934.
- Campbell, G.S., C. Calissendorff, and J.H. Williams. 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:291-293.
- Carlaw, H.S., and J.C. Jaeger. 1959. *Conduction of heat in solids.* Oxford Univ. Press, London.
- De Vries, D.A. 1963. Thermal properties of soil. p. 210-234. *In* W.R. van Wijk (ed.) *Physics of plant environment.* John Wiley & Sons, New York.
- Gardner, W.H. 1986. Water content. p. 493-544. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* Agron. Monogr. 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Incropera, F.P., and D.P. De Witt. 1990. *Fundamentals of heat and mass transfer.* 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Kluitenberg, G.J., K.L. Bristow, and B.S. Das. 1995. Error analysis of heat pulse method for measuring soil heat capacity, diffusivity, and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:719-726.
- Kluitenberg, G.J., J.M. Ham, and K.L. Bristow. 1993. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1444-1451.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. p. 635-662. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* Agron. Monogr. 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Noborio, K., K.J. McInnes, and J.L. Heilman. 1996. Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe. *Soil Sci.* 161:22-28.
- Schulte, E.E. 1980. Recommended soil organic matter tests. p. 5-8. *In* W.C. Dahnke et al. (ed.) *Recommended chemical soil test procedures for the North Central region.* Rev. ed. North Central Regional Publ. 221. N. Dak. Agric. Exp. Stn. Bull. 499.
- Van Bavel, C.H.M., R.J. Lascano, and J.M. Baker. 1985. Calibrating two-probe, gamma-gauge densitometers. *Soil Sci.* 140:393-395.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Department of Agronomy

Crop, Soil, and Range Sciences  
2004 Throckmorton Plant Sciences Center  
Manhattan, Kansas 66506-5501  
913-532-6104 785-522-5731

18 December, 1997

Dr. Itthisuntorn Nuntagij  
Department of Soil Science  
Faculty of Agricultural Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrangbang  
Bangkok 10520  
THAILAND

Dear Dr. Nuntagij,

Enclosed are diagrams and text descriptions of two data-acquisition and control (DAC) systems for dual-probe heat-capacity sensors. Documents for the first system are labeled "1994-97 Dual-Probe system." This is the DAC that we have been using since 1994, which will accommodate up to 24 probes. It requires the following equipment:

Campbell Scientific Datalogger, 21-X (1)  
Campbell Scientific Multiplexers, AM-416 (2)  
Campbell Scientific Relay Driver, AREL-12 (1)  
Vishay VPRS Precision Resistors, 1-ohm, 0.1% (1 per dual-probe)  
DC Power Supply, 12-V (2; 1 for datalogger and 1 for DP heaters)

The documents labeled "1998 Dual-Probe system" are for a streamlined, less expensive hardware system. We have yet to test this design. It eliminates the Campbell Scientific Relay Driver (AREL-12) and all but two of the precision resistors, representing a savings of about US\$1200. In addition, this DAC can accommodate up to 32 dual-probes. The 1998 system requires:

21-X or CR10X datalogger (1)  
AM-416 multiplexers (2)  
precision resistors (2)  
relay driver/switch: build-your-own (1)  
DC power supply, 12-V (1 or 2; not tested yet)

I have included two programs written for the Campbell Scientific 21-X datalogger. The larger one is the main DAC program that controls the DP heaters, monitors temperature, then calculates heat capacity, water content, and adjusted probe spacing. As written, it controls 16 probes, but it is expandable to 24 probes by changing various loop counts from "4" to "6". A word of caution: this program is too large for the standard program memory on a 21-X. On the first page, I indicated which sections (namely, the calculation of water content and adjusted probe spacing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

you should eliminate to use the program on a standard 21-X. In a spreadsheet, water content and adjusted probe spacing can be calculated later from the raw data. Alternatively, the program can be used on a 21-X with expanded program memory or it can be rewritten for a CR-10X. The second, smaller program ("DPFOUR") is written specifically for determining adjusted probe spacing ( $r'$ ) in a medium of known heat capacity. Attached is the schematic diagram for wiring and controlling four probes. The "build-your-own" relay driver/heater switch is the same for the 4-probe calibration system and the 32-probe 1998 DAC.

Thank you for your interest in our dual-probe systems. Should you encounter any trouble using our system, please do not hesitate to contact me directly or to send e-mail to Jay Ham.

Sincerely,

*Julie Tarara*

Julie Tarara  
jtarara@ksu.edu



# Development of In-Situ Soil Water Measurement by Heat-Probe Method

Tatsuaki KASUBUCHI

Department of Agricultural Environment, Hokkaido National Agricultural Experiment Station (Hitsujigaoka, Sapporo, Hokkaido, 062 Japan)



Reprinted from JARQ Vol. 26, No. 3, 1992

**Tropical Agriculture Research Center**  
Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries  
Tsukuba, Ibaraki, 305 JAPAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Development of In-Situ Soil Water Measurement by Heat-Probe Method

Tatsuaki KASUBUCHI\*

Department of Agricultural Environment, Hokkaido National Agricultural Experiment Station (Hitsujigaoka, Sapporo, Hokkaido, 062 Japan)

### Abstract

Thermal conductivity of soil which increases linearly with the soil water content over a wide range of values of soil water content can be measured accurately by the twin transient-state cylindrical-probe method (twin heat probe method). An automated measuring system with a micro-processor was developed to measure the in-situ soil water content continuously in the field.

Discipline: Soils, fertilizers and plant nutrition

Additional key words: soil water content, thermal conductivity, twin heat probe method

### Introduction

It is important but difficult to measure the in-situ soil water content continuously in the field, because the measurement of the soil water content which consists of mass measurement, requires the use of the weighing or mass adsorption method. The former is a destructive method of measurement and the latter cannot be applied in the field due to the use of a gamma beam.

Therefore several methods were examined to determine the soil water content based on other physical properties, including soil water potential, neutron scattering, electrical resistance, etc. However, most of the methods currently used are not practical for routine application in the field.

The thermal conductivity of soil which increases linearly with the soil water content over a wide range of values of soil water content, can be measured accurately by the twin transient-state cylindrical-probe method (twin heat probe method). An automated measuring system with a micro-processor was developed to measure the soil water content in the field.

### Principle and method

#### 1) Principle

The twin transient-state cylindrical-probe method (twin heat probe method) was developed to measure the thermal conductivity of soil<sup>1)</sup>.

When an infinitely long line source of heat is embedded in an infinite, homogeneous, isotropic medium, the increase of the temperature of the line source can be approximated by the equation:

$$T - T_0 = q / (4\pi\lambda) \{ d + \ln(t - t_0) \}, \text{ for } t < t_1,$$

where  $T$  is the temperature at time  $t$ ,  $T_0$  is the temperature at  $t=0$ ,  $q$  is the amount of heat produced per unit time and unit length of the line source,  $\lambda$  is the conductivity,  $d$  is a constant, and  $t_1$  is the end of the heating period. The decrease of the temperature during the time of cooling can be approximated by the equation:

$$T - T_0 = q / (4\pi\lambda) \{ d + \ln(t + t_0) \} - q / (4\pi\lambda) \{ d + \ln(t - t_1 - t_0) \}, \text{ for } t > t_1.$$

For the thermal conductivity measurements, the infinite long line source can be approximated by a

\* Present address: Faculty of Agriculture, Yamagata University (Tsuruoka, Yamagata, 997 Japan)

long, electrically heated wire enclosed in a cylindrical probe, and the temperature of the line source can be measured with a thermocouple or metal wire resistor placed next to the wire.

When the two probes with the same characteristics are introduced into material A (thermal conductivity  $\lambda_A$ ) and material B (thermal conductivity  $\lambda_B$ ), respectively, the ratio of the temperature rise of the two probes is represented by the equation:

$$\frac{T_A - T_0}{T_B - T_0} = \frac{q/(4\pi\lambda_A) \{d + \ln(t-t_0)\}}{q/(4\pi\lambda_B) \{d + \ln(t-t_0)\}} = \frac{\lambda_B}{\lambda_A}$$

where  $T_A$  and  $T_B$  are the temperature of the probe of A and B, respectively. The tangent of the locus of the temperature changes of both probes is the inverse ratio of the thermal conductivities of both the standard and measuring materials. If the thermal

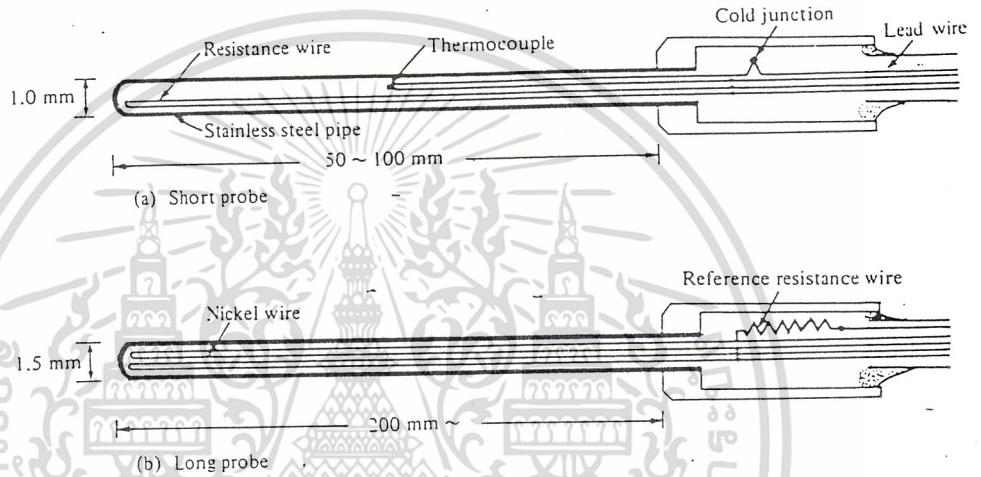


Fig. 1. Structure of heat probes

Plate 1. Heat probes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

conductivity of the standard material is known, the thermal conductivity of the measuring material can be calculated by multiplying the value of the standard material and the ratio as follows:

$$\lambda_B = \lambda_A(T_A - T_0)/(T_B - T_0)$$

The decrease of the temperature of the two probes is also represented by the same equation.

2) Structure of the probe

The structure of the probe is shown in Fig. 1 and Plate 1. The temperature of the probe can be measured by two methods, one requiring the use of a thermocouple and the other requiring the use of a metal wire resistor. The former method can be used for

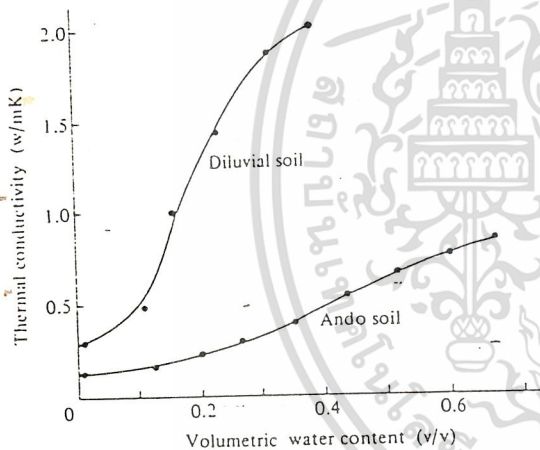


Fig. 2. Relationship between soil water content and thermal conductivity

a short probe and the latter for a long probe. As a long probe can measure the average thermal conductivity, the average soil water content can be determined<sup>2)</sup>.

Accuracy by this method mainly depends on the accuracy of the temperature measurement. One of the ways to increase the accuracy is to increase the temperature of the probe. However when the temperature increases, the soil water around the probe moves due to the heat generated from the probe. Therefore, the temperature increases by at most several degrees (centigrade) and the accuracy should reach a value of more than 1/500 of the temperature increase.

3) Structure of the system

This method was applied by using a micro-computer system. By switching on and off the electric current sent to the heater, the storage of the data on the temperature changes with time and the calculation can be performed by using a computer. As the data on the temperature change of the probe in the standard material can be stored in the memory of the computer beforehand, the ratio of the temperature change between the standard and the measuring material can be calculated by applying a self-correlation method. This computerized measuring system enabled us to use only one heat probe instead of two probes to measure the thermal conductivity by the twin heat probe method.

It is also possible to measure many points at the same time by using the scanner which is controlled by the computer.

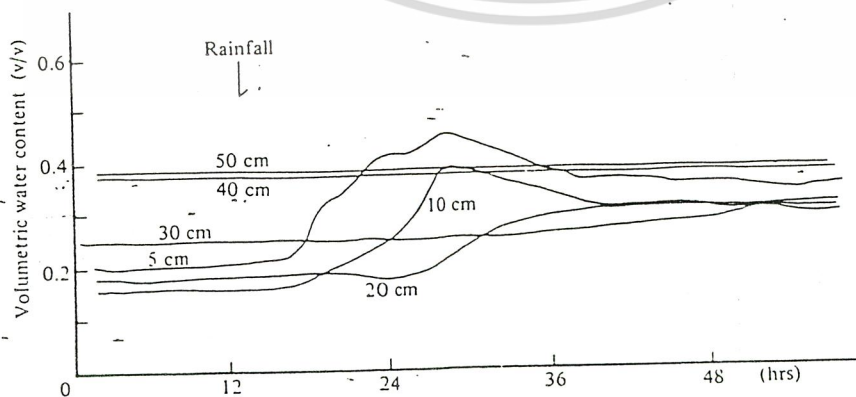


Fig. 3. Changes in soil water content after rainfall

This system can operate with a battery for more than one month and the data stored in the memory of the system can be collected by a handy computer through RS232C interface.

The system is currently being manufactured by two companies.

#### 4) Measurement of soil water content in the field

The probes are fixed in the soil from the wall of a small pit in the field. After the setting, the pit is refilled carefully.

### Results and discussion

Fig. 2 shows the relationship between the thermal conductivity and soil water contents measured in the laboratory. There was a linear relation in the range of the values of the field water content. Since the relationship between the thermal conductivity and soil water content varies with the kinds of soils, the conversion coefficient must be calculated for each soil type. To determine the conversion coefficients, it is recommended to take samples several times near the pit from each horizon where the probes are set up.

Since the thermal conductivity depends on the temperature of the soil, the thermal conductivity increases with the increase of the temperature. The changes in the thermal conductivity associated with the changes in the temperature amount to approximately a few percent for 10°C. However since the temperature changes in the soil are not very large, the error is not considerable in relation to the changes of the soil water content except for the soil layers near the soil surface.

Fig. 3 shows the changes of the soil water content measured by the method. The results indicate that this system can be used for the measurement of the soil water content in the field.

### References

- 1) Kasubuchi, T (1977): Twin transient-state cylindrical-probe method for the determination of thermal conductivity of soil. *Soil Sci.*, 124, 255-258.
- 2) Kasubuchi, T. & Hasegawa, S. (1990): A long heat probe method to measure average water content of soils having nonuniform soil water content. *Trans. ICSS*, 1, 214-219.

(Received for publication, Jan. 13, 1992)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Soil taxonomy, land type (L=lowland, U=upland, H=highland), land use and location of soil sampling.

Soil series	Soil taxonomy	Land type and use	Longitude/ Latitude	Soil map	
<b>Central Plain</b>					
Bk	Bangkok	Typic Tropequepts very fine, montmorillonitic, nonacid	L Paddy	99° 51' 00" E 13° 20' 20" N	49
Bl	Bang Len	Typic Haplaquolls very fine, montmorillonitic	L Paddy	100° 04' 40" E 13° 41' 55" N	40
Bn	Bang Chen	Typic Tropequepts fine, mixed, acid	L Paddy/Sugar cane	100° 08' 30" E 14° 01' 30" N	40
Dn	Damnoen Saduak	Typic Haplaquolls very fine, montmorillonitic	U Mango orchard/ Vegetable	100° 07' 00" E 13° 36' 20" N	A
Ks-1	Kamphaeng Saen	Typic Haplustalfs fine silty, mixed	U Sugar cane	100° 00' 20" E 13° 57' 45" N	40
Kyo	Khao Yoi	Aeric Tropequalfs fine loamy, mixed	L Paddy/Sugar cane	99° 48' 40" E 13° 33' 40" N	49
Nn	Nakhon Phanom	Aeric Plinthic Paleaquolls clayey mixed	L Paddy	99° 47' 50" E 13° 29' 50" N	49
Np	Nakhon Pathom	Aeric Tropequalfs fine, mixed	L Paddy	100° 00' 15" E 13° 58' 00" N	40
Pth	Pak Tho	Aeric Plinthic Paleaquolls clayey, kaolinitic	L Paddy	99° 48' 10" E 13° 32' 00" N	49
Rb	Ratchaburi	Aeric Tropequepts fine, mixed, nonacid	L Paddy/Vegetable	99° 51' 45" E 13° 39' 05" N	49
Sb	Saraburi	Aeric Tropequepts fine, mixed, nonacid	L Paddy/Sugar cane	99° 59' 55" E 14° 00' 30" N	40
Se	Sena	Sulfic Tropequepts very fine, mixed, acid	L Paddy/Sugar cane	100° 02' 30" E 14° 01' 55" N	40
Sm	Samut Prakan	Typic Tropequepts fine, mixed, nonacid	L Degraded mangrove	99° 56' 55" E 13° 23' 30" N	29
Tm	Tha Muang	Typic Ustifluvents loamy, mixed, nonacid	U Bare plot/Maize	99° 52' 25" E 13° 39' 25" N	49
<b>Northern Region</b>					
Ce	Chiang Saen	Orthoxic Palehumults clayey, kaolinitic	H Mixed deciduous	100° 04' 00" E 20° 15' 50" N	15
Cr	Chiang Rai	Plinthic Paleaquolls clayey, kaolinitic	L Paddy	99° 02' 00" E 18° 33' 50" N	38
Hd-1	Hang Dong	Typic Tropequalfs fine, kaolinitic	L Paddy/Soybean	100° 13' 50" E 18° 15' 00" N	25
Hd-2	Hang Dong	Typic Tropequalfs fine, kaolinitic	L Soybean/Paddy	98° 56' 20" E 18° 42' 50" N	27
Ks-2	Kamphaeng Saen	Typic Haplustalfs fine silty, mixed	U Mungbean	99° 50' 00" E 17° 24' 10" N	32
Lp	Lampang	Typic Tropequalfs fine silty, mixed	L Paddy	100° 06' 30" E 18° 00' 00" N	25
Ms	Mae Sai	Aeric Tropequalfs fine silty, mixed	L Paddy	100° 06' 30" E 17° 27' 30" N	23
Mt	Mae Taeng	Typic Paleustults clayey, kaolinitic	H Merkusii pine	98° 57' 10" E 19° 10' 10" N	27
Na	Nan	Aeric Tropequalfs fine, kaolinitic	L Paddy	100° 44' 40" E 18° 35' 00" N	6
Ph	Phan	Typic Tropequalfs fine, kaolinitic	L Paddy	100° 10' 10" E 18° 07' 20" N	25
Sai	San Sai	Typic Tropequalfs coarse loamy, mixed	L Paddy	98° 49' 00" E 18° 29' 30" N	27
Sir	Si Satchanalai	Ultic Haplustalfs fine silty, mixed	U Sugar cane	99° 51' 55" E 17° 24' 30" N	32
Sp	San Pa Tong	Oxic Paleustults coarse loamy, mixed	U Eucalyptus	98° 49' 00" E 18° 22' 45" N	38
Tp	That Phanom	Ultic Haplustalfs fine, mixed	U Sugar cane	100° 05' 30" E 17° 26' 00" N	23
Utt	Uttaradit	Aeric Tropequalfs fine, mixed	L Paddy	100° 05' 40" E 17° 35' 40" N	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 (continued)

Soil series	Soil taxonomy	Land type and use	Longitude/ Latitude	Soil map	
<b>Northeastern Region</b>					
Kj	Kula Ronghai	Typic Natraqualls fine loamy, mixed	L Paddy	102° 26' 40" E 15° 20' 05" N	21
Kt	Korat	Oxic Paleustults fine loamy, siliceous	U Cassava	102° 44' 10" E 16° 05' 00" N	14
Ng	Nam Phong	Ustoxic Quartzipsammens sandy, siliceous	U Sugar cane	102° 49' 15" E 16° 36' 10" N	14
Pc	Pak Chong	Oxic Paleustults clayey, kaolinitic	H Custard apple	101° 18' 20" E 14° 38' 10" N	21
Pm	Phimai	Vertic Tropaquepts very fine, mixed, nonacid	L Paddy	102° 36' 10" E 16° 05' 10" N	14
Re	Roi Et	Aeric Paleaquults fine loamy, mixed	L Paddy	102° 46' 40" E 16° 26' 50" N	14
Rn	Renu	Aeric Plinthic Paleaquults fine loamy, mixed	L Paddy/Sugar cane	102° 53' 20" E 16° 56' 30" N	12
Suk	Satuk	Oxic Paleustults fine loamy, siliceous	U Deserted cassava	102° 38' 20" E 16° 05' 10" N	14
Ub	Ubon	Aquic Quartzipsammens sandy, siliceous	L Paddy	102° 49' 10" E 16° 36' 00" N	14
Ud	Udon	Typic Tropaquepts coarse loamy, siliceous	L Bare plot	102° 48' 55" E 16° 26' 30" N	14
Ud,cl	Udon, clay	Typic Tropaquepts fine loamy, mixed	L Paddy	102° 40' 50" E 16° 04' 00" N	14
Wn	Warin	Oxic Paleustults fine loamy, siliceous	U Cassava	102° 38' 30" E 16° 05' 45" N	14
Yt	Yasothon	Oxic Paleustults fine loamy, siliceous	H Cassava	102° 34' 20" E 16° 05' 40" N	14
<b>Southern Region</b>					
Ak	Ao Luk	Rhodic Paleudults clayey, kaolinitic	H Cocoa orchard	98° 50' 00" E 8° 11' 40" N	61
Ba	Bangnara	Typic Paleaquults clayey, kaolinitic	L Paddy	100° 04' 10" E 6° 43' 00" N	34
Bc	Bacho	Typic Quartzipsammens sandy, siliceous	U Coconut orchard	101° 48' 20" E 6° 24' 30" N	4
Bh	Ban Thon	Typic Tropohumods sandy, noncemented	U Cashew nut orchard	101° 56' 30" E 6° 20' 00" N	4
Cp	Chumphon	Typic Paleudults clayey skeletal, mixed	H Secondary forest	99° 07' 50" E 10° 25' 45" N	7
Fd	Fang Daeng	Rhodic Paleudults fine loamy, mixed	H Coconut orchard	99° 16' 30" E 10° 24' 30" N	7
Kh	Kohong	Typic Paleudults coarse loamy, siliceous	U Para rubber	100° 30' 20" E 7° 00' 45" N	18
Kl	Klaeng	Typic Plinthaquults clayey, kaolinitic	L Paddy	100° 19' 30" E 7° 06' 30" N	18
Kt	Khlong Teng	Dystropeptic Tropudults fine loamy, mixed	U Para rubber	99° 40' 20" E 7° 34' 00" N	46
Km	Khlong Thom	Typic Paleudults fine loamy, mixed	U Para rubber	98° 57' 20" E 8° 06' 00" N	61
Ko	Kokkiean	Typic Paleaquults fine loamy, mixed	L Paddy	101° 43' 50" E 6° 24' 10" N	4
Koi	Khok Kloi	Orthoxic Tropudults clayey, kaolinitic	U Para rubber	98° 20' 20" E 8° 06' 10" N	35
Lgu	Langu	Typic Tropaqualls fine, kaolinitic	L Paddy	105° 05' 40" E 6° 42' 00" N	34
Li	Lamphu La	Typic Paleudults clayey, kaolinitic	U Para rubber	99° 34' 10" E 7° 41' 30" N	46
Ntm	Na Tham	Oxic Plinthudults fine loamy, mixed	U Cashew nut orchard	98° 56' 30" E 8° 09' 30" N	61
Pga	Phangnga	Typic Paleudults clayey, kaolinitic	H Para rubber	98° 20' 05" E 8° 07' 10" N	35
Ran	Ranot	Typic Tropaqualls clayey, mixed	L Paddy	100° 30' 05" E 7° 17' 05" N	18
Sd	Sadao	Oxic Dystropepts coarse loamy, siliceous	H Para rubber	98° 53' 35" E 8° 05' 30" N	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 (continued)

Soil series	Soil taxonomy	Land type and use	Longitude/ Latitude	Soil map
Ta Tak Bai	Typic Tropaquepts fine loamy, mixed, acid	L Paddy	102° 05' 20" E 6° 14' 30" N	4
Tan,v Thanyaburi variant	Sulfic Tropaquepts very fine, mixed, acid	L Bare plot	101° 53' 05" E 6° 23' 50" N	4
Te Tha Sae	Typic Paleudults fine loamy, mixed	H Para rubber	99° 04' 30" E 10° 03' 20" N	7

\* Detailed Reconnaissance Soil Map. Province Series. Division of Soil Survey, Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok.

Map No.	Province	Year
4	Narathiwat	1975
6	Nan	1972
7	Chumphon	1972
12	Udon Thani	1972
14	Khon Kaen	1973
15	Chiang Rai	1973
18	Songkhla	1973
21	Nakhon Ratchasima	1977
23	Uttaradit	1975
25	Phrae	1976
27	Chiang Mai	1976
29	Samut Songkhram	1977
32	Sukhothai	1977
34	Satun	1980
35	Phuket	1980
38	Lamphun	1981
40	Nakhon Pathom	1979
46	Trang	1980
49	Ratchaburi	1981
61	Krabi	1986
A	Southern Central Plain Area	1972

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 Basic physical properties of soils, soil layer 1 is from 0-0.1 m, layer 2 is 0.1-0.3 m, and layer 3 is 0.3-0.6 m.

Soil			Particle size distribution			Textural	Textural	Density ( $Mg\ m^{-3}$ )		Total
type	series	layer	%sand	%silt	%clay	index	class	particle	bulk	porosity
Central Plain										
L	Bk	1	2.51	19.77	77.72	83.90	clay	2.10	1.07	0.490
L	Bk	2	2.69	18.17	79.14	84.86	clay	2.19	1.27	0.420
L	Bk	3	0.73	20.68	78.59	84.87	clay	2.19	1.16	0.470
L	Bl	1	11.72	18.70	69.58	76.36	clay	2.25	1.20	0.467
L	Bl	2	11.30	17.41	71.29	77.64	clay	2.27	1.33	0.414
L	Bl	3	11.89	18.60	69.51	76.28	clay	2.20	1.15	0.477
L	Bn	1	7.85	18.75	73.40	79.81	clay	2.16	1.30	0.398
L	Bn	2	5.97	17.69	76.34	82.24	clay	2.26	1.67	0.261
L	Bn	3	2.15	17.23	80.62	86.00	clay	2.26	1.35	0.403
L	Kyo	1	31.40	22.87	45.73	55.73	clay	2.38	1.60	0.328
L	Kyo	2	57.95	12.67	29.38	38.98	sandy clay loam	2.50	1.67	0.332
L	Kyo	3	50.17	10.55	39.28	47.46	sandy clay	2.47	1.92	0.223
L	Nn	1	20.98	30.99	48.03	59.42	clay	2.46	1.48	0.398
L	Nn	2	12.74	28.34	58.92	68.70	clay	2.37	1.53	0.354
L	Nn	3	12.28	30.88	56.84	67.33	clay	2.40	1.61	0.329
L	Np	1	12.85	33.70	53.45	64.84	clay	2.37	1.34	0.435
L	Np	2	9.62	32.96	57.42	68.27	clay	2.37	1.44	0.392
L	Np	3	3.10	33.33	63.57	73.88	clay	2.40	1.32	0.450
L	Pth	1	63.15	16.07	20.78	31.92	sandy clay loam	2.35	1.01	0.570
L	Pth	2	57.68	12.28	30.04	39.49	sandy clay loam	2.59	1.83	0.293
L	Pth	3	55.47	17.51	27.02	37.82	sandy clay loam	2.53	1.79	0.292
L	Rb	1	8.14	23.99	67.87	75.88	clay	2.32	1.08	0.534
L	Rb	2	2.13	19.66	78.21	84.32	clay	2.30	1.36	0.409
L	Rb	3	5.15	21.16	73.69	80.55	clay	2.34	1.43	0.389
L	Sb	1	19.89	24.67	55.44	64.83	clay	2.40	1.25	0.479
L	Sb	2	20.38	23.63	55.99	65.12	clay	2.41	1.38	0.427
L	Sb	3	20.24	25.49	54.27	63.94	clay	2.43	1.39	0.428
L	Se	1	0.68	25.52	73.80	81.52	clay	2.07	1.26	0.391
L	Se	2	2.12	23.18	74.70	81.87	clay	2.34	1.48	0.368
L	Se	3	3.13	21.02	75.85	82.47	clay	2.32	1.45	0.375
L	Sm	1	7.48	15.71	76.81	82.27	clay	2.16	1.19	0.449
L	Sm	2	0.45	24.62	74.93	82.36	clay	2.09	0.94	0.550
L	Sm	3	3.57	23.08	73.35	80.63	clay	1.94	0.67	0.655
U	Dn	1	4.96	20.78	74.26	80.99	clay	2.17	1.25	0.424
U	Dn	2	5.63	22.18	72.19	79.41	clay	2.21	1.17	0.471
U	Dn	3	6.50	22.86	70.64	78.15	clay	2.16	1.27	0.412
U	Ks-1	1	30.83	36.42	32.75	46.76	clay loam	2.41	1.18	0.510
U	Ks-1	2	22.03	35.70	42.27	55.18	clay	2.38	1.37	0.424
U	Ks-1	3	14.86	31.63	53.51	64.48	clay	2.40	1.34	0.442
U	Tm	1	63.90	8.84	27.26	36.30	sandy clay loam	2.50	1.22	0.512
U	Tm	2	64.10	12.39	23.51	33.64	sandy clay loam	2.49	1.33	0.466
U	Tm	3	71.29	9.91	18.80	28.90	sandy loam	2.55	1.33	0.478

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 (continued)

Soil			Particle size distribution			Textural	Textural	Density ( $Mg\ m^{-3}$ )		Total
type	series	layer	%sand	%silt	%clay	index	class	particle	bulk	porosity
Northern Region										
H	Ce	1	18.52	26.72	54.76	64.63	clay	2.61	1.03	0.606
H	Ce	2	16.23	27.19	56.58	66.36	clay	2.67	1.14	0.574
H	Ce	3	13.97	34.07	51.96	63.58	clay	2.65	1.15	0.568
H	Mt	1	63.29	22.56	14.15	27.25	sandy loam	2.61	1.41	0.462
H	Mt	2	55.52	28.42	16.06	30.14	sandy loam	2.62	1.48	0.435
H	Mt	3	51.51	32.43	16.06	30.94	loam	2.64	1.47	0.441
L	Cr	1	36.13	39.55	24.32	39.80	loam	2.62	1.51	0.424
L	Cr	2	32.72	45.06	22.22	39.01	loam	2.63	1.59	0.394
L	Cr	3	26.14	39.29	34.57	48.97	clay loam	2.68	1.59	0.406
L	Hd-1	1	23.22	66.17	10.61	32.78	silt loam	2.53	1.54	0.390
L	Hd-1	2	26.74	52.32	20.94	39.31	silt loam	2.60	1.70	0.345
L	Hd-1	3	23.74	55.97	20.29	39.46	silt loam	2.60	1.68	0.353
L	Hd-2	1	25.07	37.56	37.37	51.15	clay loam	2.54	1.24	0.511
L	Hd-2	2	24.93	40.43	34.64	49.26	clay loam	2.58	1.49	0.422
L	Hd-2	3	21.11	46.33	32.56	48.57	clay loam	2.56	1.45	0.433
L	Lp	1	13.78	75.86	10.36	34.50	silt loam	2.59	1.55	0.400
L	Lp	2	24.88	64.83	10.29	32.23	silt loam	2.62	1.63	0.377
L	Lp	3	19.79	70.08	10.13	33.13	silt loam	2.62	1.50	0.426
L	Ms	1	1.47	56.52	42.01	59.11	silty clay	2.58	0.94	0.638
L	Ms	2	2.06	33.22	64.72	74.89	clay	2.59	1.51	0.414
L	Ms	3	4.40	31.22	64.38	74.19	clay	2.62	1.42	0.458
L	Na	1	3.73	65.33	30.94	50.91	silty clay	2.58	1.21	0.532
L	Na	2	5.95	63.02	31.03	50.53	silty clay loam	2.59	1.41	0.456
L	Na	3	6.43	63.02	30.55	50.10	silty clay loam	2.61	1.50	0.423
L	Ph	1	13.21	65.88	20.91	42.00	silt loam	2.56	1.37	0.465
L	Ph	2	11.25	68.36	20.39	42.02	silt loam	2.60	1.65	0.364
L	Ph	3	11.03	68.77	20.20	41.93	silt loam	2.63	1.53	0.419
L	Sai	1	65.64	14.10	20.26	31.05	sandy loam	2.59	1.64	0.368
L	Sai	2	77.38	14.55	8.07	20.17	sandy loam	2.61	1.68	0.359
L	Sai	3	75.13	20.83	4.04	17.80	loamy sand	2.63	1.69	0.359
L	Utt	1	4.34	65.17	10.49	36.48	silt	2.58	1.20	0.536
L	Utt	2	17.91	71.84	10.25	33.59	silt loam	2.59	1.49	0.425
L	Utt	3	16.98	62.46	20.56	41.00	silt loam	2.60	1.42	0.453
U	Ks-2	1	2.06	87.32	10.62	37.02	silt	2.60	1.21	0.533
U	Ks-2	2	2.14	87.50	10.36	36.82	silt	2.60	1.30	0.499
U	Ks-2	3	1.40	88.35	10.25	36.90	silt	2.61	1.23	0.530
U	Sir	1	4.94	74.31	20.75	43.54	silt loam	2.57	1.37	0.467
U	Sir	2	4.82	74.55	20.63	43.48	silt loam	2.60	1.36	0.477
U	Sir	3	5.78	73.48	20.74	43.36	silt loam	2.63	1.34	0.489
U	Sp	1	80.13	15.85	4.02	16.79	loamy sand	2.67	1.57	0.412
U	Sp	2	76.89	19.10	4.01	17.43	loamy sand	2.65	1.55	0.414
U	Sp	3	74.36	21.63	4.01	17.94	loamy sand	2.67	1.79	0.331
U	Tp	1	59.98	29.86	10.16	25.12	sandy loam	2.65	1.58	0.404
U	Tp	2	54.47	35.43	10.10	26.18	sandy loam	2.65	1.53	0.420
U	Tp	3	55.37	34.51	10.12	26.01	sandy loam	2.59	1.38	0.470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 (continued)

Soil			Particle size distribution			Textural	Textural	Density ( $Mg\ m^{-3}$ )		Total
type	series	layer	%sand	%silt	%clay	index	class	particle	bulk	porosity
Northeastern Region										
H	Pc	1	22.00	38.00	40.00	53.60	clay	1.86	0.99	0.468
H	Pc	2	6.00	19.00	75.00	81.30	clay	2.10	1.03	0.510
H	Pc	3	0.00	8.00	92.00	94.40	clay	1.88	1.15	0.388
H	Yt	1	72.00	18.00	10.00	22.60	sandy loam	2.25	1.25	0.444
H	Yt	2	65.00	15.00	20.00	31.00	sandy loam	2.61	1.49	0.429
H	Yt	3	66.00	15.00	19.00	30.10	sandy loam	2.26	1.35	0.403
L	Ki	1	82.00	9.00	9.00	19.90	loamy sand	2.36	1.60	0.322
L	Ki	2	86.00	9.00	5.00	16.30	loamy sand	2.32	1.73	0.254
L	Ki	3	59.00	14.00	27.00	37.10	sandy clay loam	2.48	1.54	0.379
L	Pm	1	59.00	27.00	14.00	28.00	sandy loam	2.38	1.28	0.462
L	Pm	2	54.00	27.00	19.00	32.50	sandy loam	2.33	1.60	0.313
L	Pm	3	52.00	10.00	38.00	46.20	sandy clay	2.43	1.60	0.342
L	Re	1	73.00	21.00	6.00	19.60	sandy loam	2.42	1.48	0.388
L	Re	2	73.00	19.00	8.00	21.00	sandy loam	2.30	1.67	0.274
L	Re	3	73.00	19.00	8.00	21.00	sandy loam	2.45	1.62	0.339
L	Rn	1	83.00	12.00	5.00	16.90	loamy sand	2.51	1.36	0.458
L	Rn	2	85.00	11.00	4.00	15.80	loamy sand	2.45	1.55	0.367
L	Rn	3	76.00	15.00	9.00	21.10	sandy loam	2.78	1.46	0.475
L	Ub	1	78.00	20.00	2.00	15.80	loamy sand	2.43	1.41	0.420
L	Ub	2	72.00	21.00	7.00	20.50	sandy loam	2.42	1.62	0.331
L	Ub	3	84.00	15.00	1.00	13.90	loamy sand	2.44	1.45	0.406
L	Ud	1	83.00	14.00	3.00	15.50	loamy sand	2.53	1.64	0.352
L	Ud	2	82.00	15.00	3.00	15.70	loamy sand	2.47	1.77	0.263
L	Ud	3	80.00	13.00	7.00	18.90	loamy sand	2.54	1.68	0.339
L	Ud,cl	1	45.00	37.00	18.00	33.60	loam	1.96	1.49	0.240
L	Ud,cl	2	37.00	36.00	27.00	41.50	clay loam	2.25	1.53	0.320
L	Ud,cl	3	35.00	35.00	30.00	44.00	clay loam	2.07	1.64	0.208
U	Kt	1	86.00	10.00	4.00	15.60	loamy sand	2.66	1.49	0.440
U	Kt	2	84.00	11.00	5.00	15.70	loamy sand	2.35	1.53	0.349
U	Kt	3	74.00	15.00	11.00	22.90	sandy loam	2.41	1.52	0.369
U	Ng	1	84.00	12.00	4.00	16.00	loamy sand	2.50	1.45	0.420
U	Ng	2	90.00	7.00	3.00	14.10	sand	2.38	1.53	0.357
U	Ng	3	92.00	6.00	2.00	13.00	sand	3.26	1.45	0.555
U	Suk	1	79.00	14.00	7.00	19.10	loamy sand	2.74	1.54	0.438
U	Suk	2	78.00	13.00	9.00	20.70	loamy sand	2.61	1.56	0.402
U	Suk	3	75.00	13.00	12.00	23.40	sandy loam	2.15	1.36	0.367
U	Wn	1	53.00	32.00	15.00	29.90	sandy loam	2.38	1.50	0.370
U	Wn	2	37.00	33.00	30.00	43.60	clay loam	2.03	1.34	0.340
U	Wn	3	33.00	30.00	37.00	49.30	clay loam	2.27	1.29	0.432
Southern Region										
H	Ak	1	13.00	24.00	63.00	71.50	clay	2.59	1.05	0.595
H	Ak	2	6.00	20.00	74.00	80.60	clay	2.63	1.06	0.597
H	Ak	3	6.00	18.00	76.00	82.00	clay	2.61	1.16	0.556
H	Cp	1	74.00	21.50	4.50	18.35	loamy sand	2.52	1.54	0.389
H	Cp	2	78.00	17.50	4.50	17.55	loamy sand	2.66	1.60	0.398
H	Cp	3	69.00	29.00	2.00	17.60	sandy loam	2.58	1.74	0.326
H	Fd	1	74.00	15.00	11.00	22.90	sandy loam	2.48	1.55	0.375
H	Fd	2	72.00	16.50	11.50	23.65	sandy loam	2.55	1.38	0.459
H	Fd	3	64.00	27.00	9.00	23.50	sandy loam	2.67	1.54	0.423
H	Pga	1	54.00	15.00	31.00	40.90	sandy clay loam	2.47	1.20	0.514
H	Pga	2	52.00	12.00	36.00	44.80	sandy clay	2.61	1.21	0.536
H	Pga	3	51.00	9.00	40.00	47.80	sandy clay	2.49	1.37	0.450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 (continued)

Soil			Particle size distribution			Textural	Textural	Density (Mg m <sup>-3</sup> )		Total
type	series	layer	%sand	%silt	%clay	index	class	particle	bulk	porosity
H	Sd	1	83.00	14.00	3.00	15.50	loamy sand	2.67	1.32	0.506
H	Sd	2	80.00	14.00	6.00	18.20	loamy sand	2.58	1.44	0.442
H	Sd	3	74.00	13.00	13.00	24.30	sandy loam	2.63	1.54	0.414
H	Te	1	65.00	18.00	17.00	28.90	sandy loam	2.57	1.51	0.412
H	Te	2	65.00	19.00	16.00	28.20	sandy loam	2.59	1.50	0.421
H	Te	3	45.00	26.00	29.00	41.30	sandy clay loam	2.57	1.48	0.424
L	Ba	1	9.00	64.00	27.00	47.10	silt loam	2.61	1.22	0.533
L	Ba	2	3.00	62.00	35.00	53.90	silty clay loam	2.64	1.53	0.420
L	Ba	3	4.00	48.00	48.00	62.80	silty clay	2.54	1.45	0.429
L	Kl	1	28.00	48.00	24.00	41.20	loam	2.52	1.61	0.361
L	Kl	2	27.00	53.00	20.00	38.60	silt loam	2.51	1.72	0.315
L	Kl	3	19.00	32.00	49.00	60.50	clay	2.80	1.52	0.457
L	Ko	1	75.00	16.00	9.00	21.30	sandy loam	2.64	1.52	0.424
L	Ko	2	62.00	19.00	19.00	30.90	sandy loam	2.34	1.67	0.286
L	Ko	3	68.00	12.00	20.00	30.40	sandy loam	2.53	1.98	0.217
L	Lgu	1	30.00	45.00	25.00	41.50	loam	2.77	1.54	0.444
L	Lgu	2	22.00	45.00	33.00	48.70	clay loam	2.74	1.70	0.380
L	Lgu	3	20.00	38.00	42.00	55.40	clay	2.67	1.66	0.378
L	Ran	1	32.00	51.00	17.00	35.50	silt loam	2.34	1.42	0.393
L	Ran	2	15.00	37.00	48.00	60.60	clay	2.43	1.49	0.387
L	Ran	3	23.00	39.00	38.00	52.00	clay loam	2.57	1.54	0.401
L	Ta	1	34.00	43.00	23.00	39.30	loam	2.52	1.29	0.488
L	Ta	2	27.00	35.00	38.00	51.20	clay loam	2.54	1.35	0.469
L	Ta	3	22.00	50.00	28.00	45.20	clay loam	2.36	1.31	0.445
L	Tan,v	1	60.00	32.00	8.00	23.60	sandy loam	1.74	0.43	0.753
L	Tan,v	2	37.00	31.00	32.00	45.00	clay loam	2.56	0.92	0.641
L	Tan,v	3	67.00	18.00	15.00	27.10	sandy loam	2.59	1.41	0.456
U	Bc	1	89.50	9.50	1.00	12.80	sand	2.53	1.55	0.387
U	Bc	2	88.00	6.00	6.00	16.60	sand	2.78	1.72	0.381
U	Bc	3	88.00	6.00	4.00	15.20	sand	2.63	1.58	0.399
U	Bh	1	96.00	3.50	0.50	11.15	sand	2.68	1.55	0.422
U	Bh	2	96.00	4.00	0.00	10.80	sand	2.59	1.45	0.440
U	Bh	3	97.00	3.00	0.00	10.60	sand	2.82	1.43	0.493
U	Kh	1	70.00	21.00	9.00	22.30	sandy loam	2.68	1.48	0.448
U	Kh	2	70.00	19.00	11.00	23.70	sandy loam	2.49	1.69	0.321
U	Kh	3	65.00	19.00	16.00	28.20	sandy loam	2.68	1.63	0.392
U	Klt	1	50.00	32.00	18.00	32.60	loam	2.37	1.40	0.409
U	Klt	2	41.00	35.00	24.00	38.60	loam	2.49	1.29	0.482
U	Klt	3	36.00	34.00	30.00	43.80	clay loam	2.34	1.36	0.419
U	Km	1	75.00	21.00	4.00	17.80	loamy sand	2.66	1.46	0.451
U	Km	2	68.00	21.00	11.00	24.10	sandy loam	2.60	1.44	0.446
U	Km	3	62.00	19.00	19.00	30.90	sandy loam	2.65	1.45	0.453
U	Koi	1	58.00	22.00	20.00	32.40	sandy loam	2.58	1.40	0.457
U	Koi	2	61.00	17.00	22.00	33.20	sandy clay loam	2.58	1.34	0.481
U	Koi	3	42.00	21.00	37.00	47.50	clay loam	2.58	1.37	0.469
U	Li	1	17.00	41.00	42.00	56.00	silty clay	2.46	1.11	0.549
U	Li	2	11.00	41.00	48.00	61.40	silty clay	2.52	1.06	0.579
U	Li	3	12.00	47.00	41.00	56.30	silty clay	2.51	1.19	0.526
U	Ntm	1	80.00	14.00	6.00	18.20	loamy sand	2.60	1.41	0.458
U	Ntm	2	82.00	10.00	8.00	19.20	loamy sand	2.46	1.35	0.451
U	Ntm	3	69.00	15.00	16.00	27.40	sandy loam	2.55	1.48	0.420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 Soil water retention functions.

Soil			Volumetric water content ( $m^3 m^{-3}$ ) at matric potential (kPa) of											
type	series	layer	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry
Central Plain			0	65	11	12	13	15	---	3	5	10	15	bar
L	Bk	1	0.5994	0.5791	0.5724	0.5669	0.5607		0.5100	0.3819	0.3253	0.2947	0.2746	0.1010
L	Bk	2	0.7741	0.5683	0.5260	0.5179	0.5132		0.4831	0.4277	0.3790	0.3434	0.3254	0.1096
L	Bk	3	0.6949	0.6317	0.5997	0.5903	0.5638		0.5478	0.4337	0.3885	0.3471	0.3310	0.1040
L	Bl	1	0.6126	0.5375	0.5187	0.5069	0.4985		0.4413	0.3349	0.3003	0.2696	0.2610	0.0802
L	Bl	2	0.5617	0.5451	0.5456	0.5409	0.5322		0.5247	0.3962	0.3562	0.3136	0.2878	0.0963
L	Bl	3	0.6183	0.5823	0.5658	0.5533	0.5450		0.4506	0.3473	0.3138	0.2741	0.2548	0.0818
L	Bn	1	0.5608	0.4885	0.4705	0.4443	0.4260		0.4048	0.3606	0.3310	0.2919	0.2797	0.0831
L	Bn	2	0.7701	0.5489	0.5398	0.5311	0.5266		0.4958	0.4494	0.4130	0.3739	0.3507	0.1152
L	Bn	3	0.5970	0.5077	0.4883	0.4822	0.4776		0.4474	0.3974	0.3681	0.3301	0.3078	0.0997
L	Kyo	1	0.4573	0.3984	0.3573	0.3490	0.3259		0.3142	0.3007	0.2653	0.2380	0.2277	0.0643
L	Kyo	2	0.3697	0.2887	0.2619	0.2384	0.2307		0.2140	0.1858	0.1694	0.1501	0.1343	0.0386
L	Kyo	3	0.5220	0.4164	0.3650	0.3557	0.3304		0.3092	0.3099	0.2699	0.2437	0.2262	0.0595
L	Nn	1	0.4260	0.3694	0.3678	0.3692	0.3409		0.3121		0.3044	0.2721	0.2400	0.0478
L	Nn	2	0.3625	0.3604	0.3391	0.3318	0.3230		0.3091		0.3081	0.2654	0.2385	0.0575
L	Nn	3	0.4714	0.3971	0.3736	0.3739	0.3458		0.3279		0.3302	0.2865	0.2739	0.0646
L	Np	1	0.4694	0.4468	0.4314	0.4119	0.3981		0.3850	0.3818	0.3580	0.3101	0.2962	0.0614
L	Np	2	0.4740	0.4035	0.3982	0.3881	0.3711		0.3522		0.3315	0.2852	0.2753	0.0585
L	Np	3	0.4897	0.4183	0.4104	0.4056	0.3970		0.3634		0.3551	0.3117	0.3041	0.0748
L	Pth	1	0.8854	0.8791	0.7973	0.5682	0.4239		0.2160	0.1280	0.1017	0.0941	0.0760	0.0244
L	Pth	2	0.5385	0.2962	0.2563	0.2497	0.2236		0.2235	0.1323	0.1139	0.0907	0.0780	0.0151
L	Pth	3	0.4705	0.3268	0.3111	0.2794	0.2595		0.2480	0.2071	0.1878	0.1655	0.1520	0.0284
L	Rb	1	0.4062	0.3831	0.3825	0.3648	0.3579		0.3544	0.3014	0.2712	0.2402	0.2209	0.0544
L	Rb	2	0.5199	0.4355	0.4120	0.4125	0.3951		0.3725	0.3581	0.3369	0.2964	0.2842	0.0738
L	Rb	3	0.5027	0.4754	0.4722	0.4650	0.4443		0.4237	0.3836	0.3573	0.3147	0.3029	0.0723
L	Sb	1	0.4230	0.4067	0.4041	0.3935	0.3819		0.3674	0.3160	0.2919	0.2634	0.2624	0.0545
L	Sb	2	0.4653	0.4261	0.4094	0.3811	0.3648		0.3276	0.3179	0.2978	0.2568	0.2559	0.0579
L	Sb	3	0.4202	0.3950	0.3838	0.3711	0.3715		0.3667	0.3066	0.2823	0.2532	0.2370	0.0547
L	Se	1	0.5977	0.4527	0.4117	0.3816	0.3741		0.3664	0.3559	0.3255	0.2908	0.2868	0.0694
L	Se	2	0.6095	0.5018	0.4846	0.4634	0.4662		0.4561	0.4345	0.3995	0.3622	0.3560	0.0835
L	Se	3	0.6153	0.5025	0.4896	0.4819	0.4741		0.4609	0.4481	0.4042	0.3645	0.3465	0.0864
L	Sm	1	0.6729	0.6316	0.5974	0.5753	0.5612		0.5202	0.4717	0.4210	0.3711	0.3516	0.1150
L	Sm	2	0.6970	0.6296	0.5998	0.5806	0.5435		0.4848	0.4101	0.3599	0.3197	0.3176	0.0995
L	Sm	3	0.7112	0.6345	0.6278	0.6239	0.6099		0.5500	0.2993	0.2622	0.2409	0.2350	0.0948
U	Dn	1	0.6954	0.6463	0.6180	0.5842	0.5730		0.5227	0.4042	0.3674	0.3334	0.3153	0.0974
U	Dn	2	0.6090	0.5154	0.4943	0.4862	0.4826		0.4305	0.3723	0.3262	0.2927	0.2735	0.0976
U	Dn	3	0.7324	0.6374	0.6048	0.5935	0.5841		0.5407	0.4103	0.3614	0.3250	0.2985	0.1127
U	Ks-1	1	0.5731	0.4466	0.4011	0.3789	0.3479		0.3130	0.2917	0.2613	0.2274	0.2089	0.0502
U	Ks-1	2	0.5731	0.4148	0.4028	0.3832	0.3593		0.3422	0.3417	0.3035	0.2709	0.2619	0.0581
U	Ks-1	3	0.5183	0.3777	0.3749	0.3552	0.3309		0.3100		0.2967	0.2758	0.2463	0.0576
U	Tm	1	0.4471	0.3059	0.2828	0.2645	0.2513		0.2245	0.1518	0.1367	0.1086	0.0991	0.0265
U	Tm	2	0.3779	0.2539	0.2173	0.1949	0.1840		0.1732	0.1312	0.1147	0.0962	0.0872	0.0235
U	Tm	3	0.3917	0.2704	0.2214	0.1753	0.1755		0.1505	0.1018	0.0914	0.0797	0.0732	0.0199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 (continued)

SI unit

Soil			Volumetric water content ( $m^3 m^{-3}$ ) at matric potential (kPa) of											
type	series	layer	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry
Northern Region														
H	Ce	1	0.5308	0.3416	0.3231	0.3005	0.3190		0.2984		0.2768	0.2243	0.2140	0.0351
H	Ce	2	0.4898	0.3744	0.3733	0.3562	0.3653		0.3607		0.3175	0.2663	0.2561	0.0346
H	Ce	3	0.4997	0.4470	0.4424	0.4022	0.3964		0.3953		0.3332	0.2838	0.2723	0.0327
H	Mt	1	0.3820	0.2782	0.2431	0.2206	0.2136		0.1967		0.1307	0.1208	0.1152	0.0131
H	Mt	2	0.3635	0.2707	0.2647	0.2426	0.2322		0.2174		0.1568	0.1509	0.1494	0.0142
H	Mt	3	0.3737	0.2755	0.2666	0.2430	0.2401		0.2357		0.2018	0.1885	0.1827	0.0162
L	Cr	1	0.3416	0.3496	0.3285	0.2743	0.2848		0.2502		0.0844		0.0648	0.0068
L	Cr	2	0.3053	0.2482	0.2530	0.2402	0.2275		0.2291		0.1702		0.1273	0.0102
L	Cr	3	0.3232	0.2973	0.2926	0.2862	0.2957		0.2846		0.2226		0.1860	0.0194
L	Hd-1	1	0.3435	0.3123	0.2983	0.2678	0.2066		0.2453		0.2082	0.2046	0.1465	0.0193
L	Hd-1	2	0.3168	0.2512	0.2548	0.2454	0.2340		0.2388		0.2115	0.2199	0.1698	0.0216
L	Hd-1	3	0.3258	0.2769	0.2742	0.2537	0.2666		0.2507		0.2266	0.2325	0.1801	0.0222
L	Hd-2	1	0.4960	0.3890	0.3903	0.3717	0.3593		0.3531		0.2428	0.1536	0.1499	0.0241
L	Hd-2	2	0.3650	0.3494	0.3314	0.2941	0.2881		0.2837		0.2523	0.2777	0.1807	0.0276
L	Hd-2	3	0.3866	0.3144	0.3144	0.2869	0.2898		0.2797		0.2681	0.2782	0.2072	0.0369
L	Lp	1	0.3356	0.3867	0.3715	0.3193	0.3450		0.2824		0.1978	0.1961	0.1234	0.0175
L	Lp	2	0.3463	0.2734	0.2782	0.2631	0.3084		0.2793		0.2130	0.2126	0.1291	0.0201
L	Lp	3	0.3609	0.3017	0.3007	0.2778	0.2993		0.2978		0.2434	0.2535	0.1614	0.0252
L	Ms	1	0.5735	0.3731	0.3698	0.3849	0.3703		0.3629		0.2812	0.2898	0.2306	0.0264
L	Ms	2	0.4814	0.4558		0.4657	0.4496				0.4078	0.3695	0.3362	0.0450
L	Ms	3	0.4674	0.3803	0.3911	0.3878	0.4198		0.3995		0.3345	0.3406	0.2990	0.0465
L	Na	1	0.5167	0.3966	0.3933	0.4057	0.3756		0.3692		0.2389	0.2005	0.1746	0.0246
L	Na	2	0.4386	0.3610	0.3597	0.3301	0.3473		0.3462		0.2457	0.2106	0.1864	0.0283
L	Na	3	0.6251	0.5000	0.4799	0.4523	0.4359		0.4955		0.4228	0.3672	0.2962	0.0332
L	Ph	1	0.4529	0.3754	0.3702	0.3754	0.3455		0.3121		0.1955	0.1600	0.1459	0.0283
L	Ph	2	0.3888	0.3467	0.3356	0.3473	0.3410		0.3154		0.2156	0.1877	0.1690	0.0330
L	Ph	3	0.4118	0.3219	0.3327	0.3205	0.3160		0.3041		0.2107	0.1843	0.1660	0.0291
L	Sai	1	0.3373	0.2061	0.1898	0.1685	0.1571		0.1423		0.0720	0.0556	0.0524	0.0088
L	Sai	2	0.2558	0.1693	0.1458	0.1307	0.0972		0.1006		0.0419	0.0352	0.0302	0.0070
L	Sai	3	0.2485	0.1603	0.1586	0.1248	0.1097		0.1080		0.0337	0.0304	0.0270	0.0053
L	Utt	1	0.4991	0.3992	0.3832	0.3611	0.3480		0.3956		0.3376	0.2932	0.2365	0.0265
L	Utt	2	0.3749	0.3286	0.3340	0.3193	0.3242				0.3230	0.2977	0.2500	0.0372
L	Utt	3	0.3546	0.3225	0.3232	0.3253	0.3036				0.3134	0.2857	0.2594	0.0355
U	Ks-2	1	0.4434	0.3206	0.3176	0.2834	0.2669		0.2594		0.2157	0.2280	0.1673	0.0229
U	Ks-2	2	0.3983	0.3114	0.3196	0.2849	0.2955		0.2973		0.2534	0.2634	0.1987	0.0280
U	Ks-2	3	0.4112	0.3128	0.3070	0.2799	0.2575		0.2570		0.2200	0.2292	0.1872	0.0264
U	Sir	1	0.4073	0.3510	0.3632	0.3222	0.3204		0.3304		0.2830	0.2992	0.2243	0.0315
U	Sir	2	0.3871	0.3163	0.3335	0.3068	0.2702		0.3191		0.2820	0.2929	0.2436	0.0390
U	Sir	3	0.3998	0.3081	0.3194	0.2901	0.2960		0.3042		0.2624	0.2736	0.2226	0.0348
U	Sp	1	0.3289	0.1600	0.1538	0.1114	0.0941		0.0722		0.0345	0.0329	0.0282	0.0034
U	Sp	2	0.2904	0.1583	0.1536	0.1133	0.0869		0.0745		0.0636	0.0636	0.0590	0.0024
U	Sp	3	0.2519	0.1767	0.1678	0.1267	0.0964		0.0660		0.0125	0.0125	0.0089	0.0018
U	Tp	1	0.3151	0.2296	0.2146	0.1803	0.1323		0.1478		0.1246	0.1025	0.0859	0.0141
U	Tp	2	0.3054	0.2060	0.1953	0.1783	0.1443		0.1614		0.1348	0.1396	0.0928	0.0135
U	Tp	3	0.3351	0.1988	0.1877	0.1628	0.1312		0.1514		0.1272	0.1316	0.0875	0.0120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 (continued)

Soil			Volumetric water content ( $m^3 m^{-3}$ ) at matric potential (kPa) of											
type	series	layer	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry
<b>Northeastern Region</b>														
H	Pc	1	0.5440	0.3181	0.3011	0.2713	0.2554		0.2569		0.2233	0.2149	0.2092	0.0591
H	Pc	2	0.4810	0.2957	0.2839	0.2629	0.2348		0.2608		0.2316	0.2280	0.2199	0.0732
H	Pc	3	0.4890	0.4151	0.3703	0.3410	0.2951		0.3141		0.2858	0.2787	0.2729	0.0947
H	Yt	1	0.4440	0.3034	0.2447	0.1846	0.1326		0.0839		0.0560	0.0453	0.0425	0.0160
H	Yt	2	0.4300	0.2862	0.2495	0.2009	0.1832		0.1545		0.1132	0.1028	0.0917	0.0308
H	Yt	3	0.4040	0.2856	0.2208	0.1864	0.1554		0.1317		0.0976	0.0807	0.0805	0.0292
L	Ki	1	0.4301	0.4049	0.3169	0.2638	0.2138		0.1282		0.0915	0.0854	0.0667	0.0261
L	Ki	2	0.3302	0.3161	0.2172	0.1573	0.1388		0.0726		0.0514	0.0471	0.0373	0.0173
L	Ki	3	0.3757	0.3008	0.2988	0.2980	0.2701		0.2344		0.1689	0.1566	0.1296	0.0521
L	Pm	1	0.5320	0.4221	0.2886	0.3212	0.3078		0.1999		0.0979	0.0868	0.0708	0.0140
L	Pm	2	0.5190	0.3921		0.2845	0.2149				0.1495	0.1252	0.1130	0.0408
L	Pm	3	0.4880	0.3432		0.2994	0.2653					0.2663	0.2193	0.0833
L	Re	1	0.3890	0.2741	0.2175	0.1605	0.1293		0.0995		0.0472	0.0370	0.0427	0.0130
L	Re	2	0.4340	0.2846	0.2484	0.2037	0.1707		0.1455		0.0792	0.0702	0.0716	0.0217
L	Re	3	0.4420	0.3069	0.2178	0.1485	0.1081		0.1258		0.0560	0.0487	0.0479	0.0235
L	Rn	1	0.4580	0.2749	0.2179	0.0862	0.0528		0.0474		0.0299	0.0274	0.0281	0.0076
L	Rn	2	0.3700	0.3326	0.2761	0.1868	0.0976		0.0404		0.0224	0.0195	0.0220	0.0062
L	Rn	3	0.4760	0.3288	0.2635	0.1777	0.1391		0.0942		0.0688	0.0634	0.0606	0.0156
L	Ub	1	0.4220	0.2476	0.2220	0.1095	0.0448		0.0609		0.0346	0.0309	0.0342	0.0089
L	Ub	2	0.4140	0.3342	0.3022	0.2532	0.2129		0.1362		0.0864	0.0773	0.0706	0.0256
L	Ub	3	0.4040	0.2395	0.1758	0.0708	0.0334		0.0234		0.0091	0.0082	0.0138	0.0033
L	Ud	1	0.3830	0.3646	0.2173	0.1878	0.1484		0.0781		0.0424	0.0337	0.0311	0.0108
L	Ud	2	0.3790	0.3384	0.2718	0.2066	0.1445		0.0747		0.0406	0.0320	0.0294	0.0091
L	Ud	3	0.3510	0.2709	0.2277	0.1692	0.1146		0.0735		0.0414	0.0323	0.0305	0.0098
L	Ud,cl	1	0.5220	0.3274	0.2936	0.2523	0.2208		0.2443		0.1523	0.1295	0.1161	0.0449
L	Ud,cl	2	0.4900	0.3078	0.3027	0.2932	0.2951		0.3351		0.2300	0.1839	0.1735	0.0609
L	Ud,cl	3	0.5120	0.3647	0.3530	0.3319	0.3230				0.2891	0.2595	0.2255	0.0692
U	Kt	1	0.3660	0.2120	0.1679	0.1055	0.0617		0.0539		0.0330	0.0280	0.0233	0.0093
U	Kt	2	0.3320	0.2642	0.1734	0.1144	0.0890		0.0533		0.0362	0.0307	0.0266	0.0115
U	Kt	3	0.3430	0.2568	0.1918	0.1512	0.1388		0.0971		0.0713	0.0657	0.0546	0.0214
U	Ng	1	0.3710	0.2609	0.1771	0.1160	0.1090		0.0518		0.0324	0.0285	0.0284	0.0064
U	Ng	2	0.3330	0.1915	0.1230	0.0861	0.0566		0.0434		0.0271	0.0252	0.0248	0.0052
U	Ng	3	0.3330	0.2352	0.1065	0.0631	0.0345		0.0278		0.0193	0.0160	0.0148	0.0020
U	Suk	1	0.2030	0.1553	0.1496	0.0783	0.0571		0.0634		0.0419	0.0390	0.0375	0.0095
U	Suk	2	0.3210	0.2106	0.1842	0.1230	0.0849		0.0699		0.0499	0.0448	0.0421	0.0153
U	Suk	3	0.3930	0.1885	0.1576	0.1352	0.1138		0.0825		0.0611	0.0579	0.0544	0.0161
U	Wn	1	0.3520	0.3097	0.2821	0.2527	0.1650		0.1927		0.1179	0.0971	0.0887	0.0031
U	Wn	2	0.3730	0.3326	0.3067	0.2635	0.2121		0.2447		0.1869	0.1758	0.1535	0.0637
U	Wn	3	0.3890	0.3385	0.2951	0.2586	0.1926		0.2521		0.1975	0.1681	0.1611	0.0580
<b>Southern Region</b>														
H	Ak	1	0.5180	0.3190	0.3100	0.3050	0.3020		0.2890		0.2580	0.2490	0.2470	0.0240
H	Ak	2	0.5930	0.3400	0.3510	0.3540	0.3400		0.3150		0.2880	0.2810	0.2780	0.0260
H	Ak	3	0.5070	0.4030		0.3850	0.3750		0.3370		0.3120	0.3030	0.3000	0.0380
H	Cp	1	0.5810	0.1870	0.1820	0.1460	0.1200	0.1080	0.0750		0.0440	0.0390	0.0400	0.0060
H	Cp	2	0.6190	0.2110	0.1880	0.1460	0.1130	0.0970	0.0670		0.0380	0.0330	0.0320	0.0050
H	Cp	3	0.5080	0.2060	0.1700	0.1400	0.1200	0.0870	0.0650		0.0340	0.0270	0.0270	0.0030
H	Fd	1	0.5690	0.2110	0.2100	0.1650	0.1370	0.1330	0.1140		0.0890	0.0450	0.0740	0.0090
H	Fd	2	0.5580	0.1860	0.1960	0.1320	0.1210	0.1150	0.1030		0.0830	0.0780	0.0730	0.0080
H	Fd	3	0.5580	0.2500	0.2280	0.2010	0.1890	0.1530	0.1450		0.1180	0.1060	0.1020	0.0090
H	Pga	1	0.4760	0.2900	0.3060	0.3000	0.2780	0.2640	0.2460		0.2090	0.1930	0.1870	0.0230
H	Pga	2	0.5220	0.2720	0.2540	0.2730	0.2580	0.2680	0.2230		0.2010	0.1870	0.1990	0.0170
H	Pga	3	0.5500	0.3130	0.3080	0.3060	0.2770	0.2690	0.2730		0.2340	0.2250	0.2340	0.0190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 (continued)

Soil			Volumetric water content ( $m^3 m^{-3}$ ) at matric potential (kPa) of											
type	series	layer	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry
H	Sd	1	0.5900	0.1660	0.1800	0.1350	0.1210	0.1110	0.1010		0.0740	0.0670	0.0610	0.0080
H	Sd	2	0.5430	0.2000	0.1830	0.1650	0.1470	0.1350	0.0970		0.0790	0.0820	0.0660	0.0090
H	Sd	3	0.5350	0.2010	0.1880	0.1880	0.1700	0.1630	0.1370		0.1120	0.1060	0.1030	0.0090
H	Te	1	0.5670	0.2330	0.2270	0.2250	0.2070	0.1940	0.1760		0.1360	0.1230	0.1250	0.0200
H	Te	2	0.4870	0.2330	0.2460	0.2040	0.1820	0.1700	0.1550		0.1220	0.1100	0.1100	0.0150
H	Te	3	0.5700	0.2950	0.2790	0.2660	0.2620	0.2160	0.2270		0.1890	0.1750	0.1740	0.0250
L	Ba	1	0.5960	0.3320	0.3490	0.3430	0.3470	0.3390			0.3020	0.2540	0.2380	0.0220
L	Ba	2	0.6980	0.3930	0.3970	0.4100	0.3950	0.3920			0.3820	0.3280	0.3290	0.0370
L	Ba	3	0.6350	0.3550	0.3660	0.3890	0.3640	0.3670			0.3750	0.3310	0.3310	0.0400
L	Kl	1	0.6130	0.3420	0.4090	0.3440	0.3240	0.3060			0.2020	0.1510	0.1260	0.0130
L	Kl	2	0.5600	0.2600	0.2590	0.2750	0.2810	0.2800			0.2420	0.1940	0.1710	0.0150
L	Kl	3	0.6370	0.3840	0.3800	0.3780	0.3820	0.3230			0.3450	0.2970	0.2720	0.0240
L	Ko	1	0.6820	0.4030	0.3180	0.3060	0.2850		0.2020			0.1290	0.1090	0.0120
L	Ko	2	0.5780	0.4340	0.4670	0.3900	0.3990	0.3470	0.2710		0.1990	0.1690	0.1580	0.0150
L	Ko	3	0.5540	0.2590	0.2470	0.2420	0.2200	0.2280			0.2050	0.1770	0.1520	0.0340
L	Lgu	1	0.5750	0.3560	0.3870	0.3440	0.3080	0.3050	0.3020		0.1980	0.1600	0.1310	0.0140
L	Lgu	2	0.6330	0.3360	0.3150	0.3140	0.3140	0.2620			0.2720	0.2360	0.2230	0.0220
L	Lgu	3	0.6200	0.3410	0.3150	0.3270	0.3220	0.2870			0.2930	0.2590	0.2510	0.0270
L	Ran	1	0.6330	0.3360	0.3530	0.3040	0.2900	0.2870	0.2820		0.1440	0.1500	0.1040	0.0180
L	Ran	2	0.5650	0.3870	0.3320	0.3900	0.3520	0.3190			0.2970	0.2620	0.2420	0.0430
L	Ran	3	0.6580	0.3770	0.3370	0.3640	0.3830	0.3040			0.3270	0.2840	0.2630	0.0510
L	Ta	1	0.7330	0.5290	0.5320	0.5000	0.4610	0.4000			0.2520	0.1980	0.1680	0.0300
L	Ta	2	0.6150	0.4500	0.4200	0.4030	0.3940	0.3920			0.3450	0.2830	0.2480	0.0280
L	Ta	3	0.6810	0.4890	0.4850	0.4650	0.4580	0.4120			0.3830	0.3280	0.2920	0.0340
L	Tan,v	1	0.6000	0.4280	0.4020	0.2950	0.3430		0.2490		0.1760	0.1500	0.1500	0.0320
L	Tan,v	2	0.6800	0.6390	0.6840	0.6320	0.3620		0.3500		0.2570	0.2830	0.2060	0.0190
L	Tan,v	3	0.6610	0.4800	0.4520	0.4390	0.4820	0.4020	0.2370		0.1670	0.1520	0.1310	0.0150
U	Bc	1	0.5980	0.1570	0.1180	0.1070	0.1040	0.1010	0.0950		0.0560	0.0770	0.0490	0.0080
U	Bc	2	0.5340	0.1490	0.1230	0.1180	0.1100	0.0950	0.0780		0.0600	0.0580	0.0530	0.0090
U	Bc	3	0.5300	0.1370	0.1270	0.1140	0.1100	0.0990	0.0710		0.0630	0.0420	0.0590	0.0090
U	Bh	1	0.5460	0.0440	0.0320	0.0250		0.0360	0.0180		0.0210	0.0180	0.0170	0.0020
U	Bh	2	0.5020	0.0550	0.0440	0.0400	0.0450	0.0370	0.0140		0.0160	0.0110	0.0160	0.0010
U	Bh	3	0.4780	0.0390	0.0410	0.0320	0.0340	0.0350	0.0120		0.0150	0.0070	0.0100	0.0010
U	Kh	1	0.5320	0.1710	0.1930	0.1710	0.1680	0.1470	0.1100		0.0880	0.0710	0.0620	0.0090
U	Kh	2	0.5320	0.2260	0.1940	0.1730	0.1670	0.1430	0.1300		0.1010	0.0870	0.0780	0.0100
U	Kh	3	0.5420	0.2100	0.2090	0.1820	0.1650	0.1440	0.1440		0.1060	0.0860	0.0820	0.0020
U	Kit	1	0.5930	0.3280	0.3370	0.3040	0.3050	0.2910	0.2470		0.1580	0.1410	0.1360	0.0200
U	Kit	2	0.5260	0.3350	0.2990	0.3320	0.2700	0.2370	0.2380		0.1720	0.1560	0.1520	0.0180
U	Kit	3	0.6170	0.3170	0.2750	0.2750	0.2480	0.2310			0.2120	0.1940	0.1890	0.1580
U	Km	1	0.6380	0.2070	0.2200	0.1820	0.1380	0.1240	0.0990		0.0800	0.0700	0.0660	0.0120
U	Km	2	0.5960	0.1830	0.1530	0.1360	0.1130	0.0900	0.0730		0.0620	0.0580	0.0540	0.0060
U	Km	3	0.5600	0.1840	0.1710	0.1610	0.1560	0.1540	0.0950		0.0850	0.0790	0.0750	0.0090
U	Koi	1	0.6200	0.2210	0.2240	0.2200	0.1980	0.2210			0.2300	0.1750	0.1550	0.0210
U	Koi	2	0.4410	0.2140	0.2030	0.1860	0.1890	0.1430			0.1610	0.1540	0.1530	0.0170
U	Koi	3	0.5730	0.2690	0.2610	0.2890	0.3050	0.2550			0.2700	0.2450	0.2480	0.0250
U	Li	1	0.5530	0.3940	0.4150	0.3890	0.3670	0.3740	0.3470		0.2650	0.2350	0.2240	0.0300
U	Li	2	0.4320	0.4020	0.4010	0.3910	0.3520	0.2850	0.3200		0.2480	0.2200	0.2020	0.0250
U	Li	3	0.5500	0.3800	0.3650	0.3490	0.3460	0.3270	0.3590		0.2810	0.2460	0.2460	0.0270
U	Ntm	1	0.5030	0.1990	0.2140	0.1620	0.1420	0.1300	0.0980		0.0740	0.0630	0.0610	0.0100
U	Ntm	2	0.5180	0.2040	0.1910	0.1770	0.1680	0.1390	0.1320		0.1010	0.0950	0.0900	0.0120
U	Ntm	3	0.5590	0.2960	0.2630	0.2530	0.2270	0.1960	0.1790		0.1490	0.1340	0.1300	0.0160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 10 · Average values of basic physical properties for the soil profile of 0-0.6 m.

Re- gion	Soil		Particle size distribution			Textural index	Textural class	Density (Mg m <sup>-3</sup> )		Total porosity
	series	type	%sand	%silt	%clay			particle	bulk	
C	Bk	L	1.68	19.69	78.63	84.71	clay	2.18	1.18	0.4569
C	Bl	L	11.67	18.22	70.12	76.75	clay	2.23	1.22	0.4544
C	Bn	L	4.37	17.64	77.99	83.72	clay	2.24	1.45	0.3547
C	Kyo	L	49.64	13.31	37.06	46.01	sandy clay	2.47	1.78	0.2766
C	Nn	L	13.88	30.05	56.07	66.47	clay	2.40	1.56	0.3491
C	Np	L	6.90	33.27	59.83	70.50	clay	2.39	1.35	0.4282
C	Pth	L	57.49	15.53	26.99	37.39	sandy clay loam	2.52	1.67	0.3391
C	Rb	L	4.64	21.13	74.23	81.03	clay	2.32	1.35	0.4198
C	Sb	L	20.23	24.73	55.04	64.48	clay	2.42	1.36	0.4363
C	Se	L	2.39	22.49	75.13	82.11	clay	2.29	1.43	0.3752
C	Sm	L	3.18	22.37	74.45	81.48	clay	2.03	0.85	0.5856
C	Dn	U	5.95	22.29	71.76	79.04	clay	2.18	1.23	0.4335
C	Ks-1	U	19.91	33.79	46.30	58.43	clay	2.40	1.32	0.4474
C	Tm	U	67.66	10.56	21.78	31.71	sandy clay	2.52	1.31	0.4798
N	Ce	H	15.48	30.55	53.97	64.68	clay	2.66	1.13	0.5763
N	Mt	H	54.81	29.45	15.74	30.06	sandy loam	2.63	1.46	0.4425
N	Cr	L	30.00	41.26	28.75	44.12	clay loam	2.65	1.58	0.4052
N	Hd-1	L	24.65	56.45	18.89	38.29	silt loam	2.59	1.66	0.3565
N	Hd-2	L	23.04	42.90	34.06	49.23	clay loam	2.56	1.43	0.4424
N	Lp	L	20.49	69.29	10.22	33.06	silt loam	2.61	1.55	0.4051
N	Ms	L	3.13	36.10	60.77	71.91	clay	2.60	1.37	0.4732
N	Na	L	5.82	63.41	30.78	50.38	silt clay loam	2.60	1.42	0.4523
N	Ph	L	11.47	68.15	20.38	41.97	silt loam	2.61	1.54	0.4085
N	Sai	L	74.30	17.62	8.09	20.80	sandy loam	2.62	1.67	0.3606
N	Utt	L	15.18	69.37	15.45	37.77	silt loam	2.59	1.41	0.4577
N	Ks-2	U	1.76	87.90	10.35	36.89	silt loam	2.61	1.25	0.5205
N	Sir	U	5.32	73.98	20.71	43.43	silt loam	2.61	1.35	0.4911
N	Sp	U	76.17	19.82	4.01	17.58	loamy sand	2.66	1.67	0.3719
N	Tp	U	55.84	34.04	10.12	25.92	sandy loam	2.62	1.45	0.4424
NE	Pc	H	5.67	16.67	77.67	83.23	clay	1.95	1.08	0.4419
NE	Yt	H	66.67	15.50	17.83	29.15	sandy loam	2.38	1.38	0.4184
NE	Ki	L	71.83	11.50	16.67	27.30	sandy loam	2.41	1.61	0.3280
NE	Pm	L	53.83	18.50	27.67	36.60	sandy clay loam	2.39	1.55	0.3522
NE	Re	L	73.00	19.33	7.67	20.77	sandy loam	2.40	1.61	0.3254
NE	Rn	L	80.17	13.17	6.67	18.63	loamy sand	2.63	1.47	0.4362
NE	Ub	L	79.00	17.83	3.17	16.42	loamy sand	2.43	1.50	0.3830
NE	Ud	L	81.17	13.83	5.00	17.27	loamy sand	2.52	1.70	0.3224
NE	Ud,d	L	37.33	35.67	27.00	41.43	loam	2.11	1.58	0.2505
NE	Kt	U	79.33	12.83	7.83	19.62	loamy sand	2.43	1.52	0.3743
NE	Ng	U	90.00	7.33	2.67	13.87	sand	2.84	1.48	0.4667
NE	Suk	U	76.67	13.17	10.17	21.78	sandy loam	2.40	1.46	0.3908
NE	Wn	U	37.67	31.33	31.00	44.17	loam	2.21	1.34	0.3908
S	Ak	H	7.17	19.67	73.17	79.78	clay	2.61	1.11	0.5759
S	Cp	H	72.83	23.92	3.25	17.71	sandy loam	2.60	1.66	0.3604
S	Fd	H	68.33	21.50	10.17	23.45	sandy loam	2.60	1.49	0.4271
S	Pga	H	51.83	11.00	37.17	45.65	sandy clay	2.53	1.29	0.4894
S	Sd	H	77.50	13.50	9.00	20.80	sandy loam	2.62	1.47	0.4388
S	Te	H	55.00	22.33	22.67	34.87	sandy clay loam	2.58	1.49	0.4211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 10 (continued)

Re- gion	Soil		Particle size distribution			Textural index	Textural class	Density ( $Mg\ m^{-3}$ )		Total porosity
	series	type	%sand	%silt	%clay			particle	bulk	
S	Ba	L	22.33	41.50	36.17	50.85	clay loam	2.71	1.65	0.3897
S	Kl	L	25.67	43.83	30.50	46.22	clay loam	2.45	1.32	0.4600
S	Ko	L	67.17	15.00	17.83	29.05	sandy loam	2.49	1.80	0.2748
S	Lgu	L	55.83	24.67	19.50	32.48	sandy clay loam	2.44	1.08	0.5668
S	Ran	L	21.83	40.33	37.83	52.12	clay loam	2.49	1.50	0.3949
S	Ta	L	4.50	55.33	40.17	57.22	silty clay loam	2.59	1.44	0.4435
S	Tan,v	L	23.17	41.67	35.17	49.98	clay loam	2.66	1.60	0.3937
S	Bc	U	88.25	7.58	4.17	15.27	sand	2.66	1.62	0.3913
S	Bh	U	96.50	3.42	0.08	10.76	sand	2.72	1.46	0.4634
S	Kh	U	67.50	19.33	13.17	25.72	sandy loam	2.62	1.63	0.3776
S	Klt	U	40.00	34.00	26.00	40.20	loam	2.40	1.34	0.4383
S	Km	U	66.17	20.00	13.83	26.45	sandy loam	2.64	1.45	0.4503
S	Koi	U	51.00	19.83	29.17	40.22	sandy loam	2.58	1.37	0.4709
S	Li	U	12.50	44.00	43.50	57.95	silty clay	2.51	1.13	0.5475
S	Ntm	U	75.17	13.17	11.67	23.13	sandy loam	2.53	1.43	0.4365



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 11 Average values of water retention functions for the soil profile of 0-0.6 m.

Re-gion	Soil		Volumetric water content (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) at matric potential (kPa) of												
	series	type	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry	
SC	C	Bk	L	0.7054	0.6018	0.5706	0.5623	0.5464	0.5199	0.4231	0.3748	0.3371	0.3197	0.1054	
	C	Bl	L	0.5985	0.5624	0.5512	0.5414	0.5330	0.4738	0.3615	0.3257	0.2865	0.2668	0.0864	
	C	Bn	L	0.6487	0.5182	0.5025	0.4922	0.4853	0.4564	0.4086	0.3769	0.3383	0.3174	0.1021	
	C	Kyo	L	0.4605	0.3708	0.3294	0.3155	0.2964	0.2783	0.2670	0.2356	0.2116	0.1958	0.0533	
	C	Nn	L	0.4275	0.3803	0.3611	0.3591	0.3374	0.3190		0.3185	0.2771	0.2565	0.0594	
	C	Np	L	0.4811	0.4181	0.4098	0.4008	0.3886	0.3633		0.3477	0.3026	0.2932	0.0671	
	C	Pth	L	0.5623	0.4087	0.3739	0.3176	0.2749	0.2345	0.1690	0.1488	0.1287	0.1147	0.0233	
	C	Rb	L	0.4924	0.4467	0.4372	0.4308	0.4135	0.3951	0.3614	0.3362	0.2962	0.2830	0.0698	
	C	Sb	L	0.4424	0.4073	0.3957	0.3782	0.3710	0.3538	0.3119	0.2891	0.2561	0.2475	0.0557	
	C	Se	L	0.6104	0.4940	0.4750	0.4510	0.4548	0.4436	0.4282	0.3895	0.3515	0.3397	0.0826	
C	Sm	L	0.7001	0.6324	0.6134	0.6014	0.5797	0.5233	0.3650	0.3212	0.2889	0.2820	0.0997		
C	C	Dn	U	0.6851	0.5982	0.5702	0.5562	0.5484	0.5010	0.3966	0.3507	0.3156	0.2930	0.1051	
C	C	Ks-1	U	0.5457	0.4016	0.3886	0.3685	0.3432	0.3212	0.3250	0.2931	0.2661	0.2453	0.0565	
C	C	Tm	U	0.3963	0.2708	0.2303	0.1967	0.1910	0.1704	0.1199	0.1067	0.0900	0.0822	0.0222	
SC	N	Ce	H	0.5016	0.4052	0.3995	0.3699	0.3731	0.3676		0.3186	0.2681	0.2572	0.0337	
	N	Mt	H	0.3717	0.2743	0.2621	0.2391	0.2330	0.2231		0.1749	0.1647	0.1603	0.0150	
	N	Cr	L	0.3203	0.2897	0.2854	0.2689	0.2712	0.2604		0.1821		0.1462	0.0142	
	N	Hd-1	L	0.3257	0.2742	0.2718	0.2533	0.2458	0.2458		0.2185	0.2237	0.1711	0.0215	
	N	Hd-2	L	0.3976	0.3385	0.3327	0.3034	0.3008	0.2932		0.2586	0.2573	0.1888	0.0317	
	N	Lp	L	0.3518	0.3065	0.3050	0.2799	0.3100	0.2891		0.2257	0.2303	0.1443	0.0222	
	N	Ms	L	0.4898	0.4043		0.4133	0.4215			0.3501	0.3485	0.3000	0.0426	
	N	Na	L	0.5449	0.4364	0.4254	0.4038	0.3963	0.4247		0.3331	0.2873	0.2393	0.0301	
	N	Ph	L	0.4110	0.3391	0.3399	0.3386	0.3292	0.3092		0.2098	0.1814	0.1637	0.0303	
	N	Sai	L	0.2657	0.1709	0.1595	0.1341	0.1134	0.1112		0.0428	0.0362	0.0323	0.0065	
SC	N	Utt	L	0.3855	0.3373	0.3368	0.3293	0.3179			0.3205	0.2910	0.2525	0.0345	
	N	Ks-2	U	0.4123	0.3136	0.3129	0.2821	0.2717	0.2709		0.2304	0.2404	0.1877	0.0263	
	N	Sir	U	0.3968	0.3180	0.3314	0.3010	0.2915	0.3136		0.2724	0.2843	0.2299	0.0357	
	N	Sp	U	0.2775	0.1678	0.1607	0.1197	0.0929	0.0699		0.0332	0.0329	0.0288	0.0023	
	N	Tp	U	0.3219	0.2063	0.1947	0.1709	0.1358	0.1541		0.1293	0.1294	0.0690	0.0128	
	SC	NE	Pc	H	0.4955	0.3591	0.3300	0.3034	0.2684	0.2868		0.2573	0.2512	0.2446	0.0816
		NE	Yt	H	0.4193	0.2888	0.2344	0.1909	0.1609	0.1313		0.0959	0.0822	0.0779	0.0275
		NE	Kj	L	0.3696	0.3233	0.2746	0.2454	0.2170	0.1628		0.1168	0.1082	0.0884	0.0362
		NE	Pm	L	0.5057	0.3727		0.2981	0.2556			0.1894	0.1591	0.0576	
		NE	Re	L	0.4305	0.2940	0.2280	0.1689	0.1325	0.1280		0.0623	0.0539	0.0549	0.0212
NE		Rn	L	0.4377	0.3211	0.2601	0.1655	0.1109	0.0685		0.0469	0.0428	0.0423	0.0111	
NE		Ub	L	0.4103	0.2724	0.2256	0.1381	0.0951	0.0673		0.0391	0.0350	0.0361	0.0117	
NE		Ud	L	0.3657	0.3090	0.2407	0.1846	0.1302	0.0747		0.0413	0.0324	0.0302	0.0097	
NE		Ud,cl	L	0.5063	0.3395	0.3263	0.3057	0.2967			0.2466	0.2126	0.1899	0.0624	
NE		Kl	U	0.3432	0.2518	0.1817	0.1313	0.1094	0.0753		0.0532	0.0478	0.0401	0.0161	
SC	NE	Ng	U	0.3393	0.2249	0.1238	0.0796	0.0543	0.0370		0.0241	0.0212	0.0204	0.0038	
	NE	Suk	U	0.3373	0.1903	0.1651	0.1217	0.0947	0.0751		0.0542	0.0504	0.0475	0.0147	
	NE	Wn	U	0.3775	0.3317	0.2968	0.2593	0.1945	0.2397		0.1807	0.1588	0.1465	0.0508	
	S	Ak	H	0.5375	0.3680		0.3613	0.3512	0.3217		0.2950	0.2867	0.2838	0.0317	
	S	Cp	H	0.5572	0.2045	0.1780	0.1430	0.1177	0.0938	0.0673		0.0370	0.0310	0.0308	0.0042
	S	Fd	H	0.5598	0.2222	0.2143	0.1720	0.1577	0.1370	0.1258		0.1015	0.0855	0.0877	0.0087
	S	Pga	H	0.5283	0.2955	0.2897	0.2940	0.2708	0.2678	0.2518		0.2188	0.2070	0.2145	0.0190
	S	Sd	H	0.5468	0.1948	0.1850	0.1715	0.1542	0.1450	0.1177		0.0947	0.0915	0.0837	0.0088
	S	Te	H	0.5418	0.2640	0.2593	0.2385	0.2262	0.1970	0.1945		0.1578	0.1447	0.1445	0.0208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 11 (continued)

Re- gion	Soil		Volumetric water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) at matric potential (kPa) of											
	series	type	0	-5	-10	-20	-33	-50	-100	-300	-500	-1000	-1500	Airdry
S	Ba	L	0.6495	0.3638	0.3735	0.3883	0.3715	0.3707			0.3652	0.3172	0.3148	0.0360
S	Kl	L	0.6073	0.3357	0.3445	0.3380	0.3387	0.3058			0.2868	0.2383	0.2140	0.0192
S	Ko	L	0.5833	0.3413	0.3322	0.3020	0.2905				0.1663	0.1468	0.0240	
S	Lgu	L	0.6168	0.3418	0.3270	0.3255	0.3170	0.2817			0.2702	0.2348	0.2217	0.0232
S	Ran	L	0.6228	0.3735	0.3380	0.3627	0.3572	0.3062			0.2865	0.2543	0.2295	0.0428
S	Ta	L	0.6677	0.4827	0.4712	0.4502	0.4372	0.4033			0.3485	0.2913	0.2567	0.0313
S	Tan,v	L	0.6572	0.5243	0.5210	0.4793	0.4188		0.2767		0.1985	0.1953	0.1592	0.0192
S	Bc	U	0.5427	0.1443	0.1242	0.1142	0.1090	0.0983	0.0773		0.0608	0.0532	0.0553	0.0088
S	Bh	U	0.4973	0.0452	0.0405	0.0335		0.0358	0.0137		0.0163	0.0102	0.0132	0.0012
S	Kh	U	0.5370	0.2088	0.2013	0.1772	0.1662	0.1442	0.1337		0.1013	0.0848	0.0773	0.0058
S	Klt	U	0.5827	0.3248	0.2933	0.2988	0.2648	0.2430			0.1897	0.1725	0.1678	0.0883
S	Km	U	0.5850	0.1875	0.1732	0.1562	0.1387	0.1277	0.0883		0.0765	0.0705	0.0665	0.0085
S	Koi	U	0.5368	0.2427	0.2355	0.2432	0.2485	0.2120			0.2270	0.2030	0.2008	0.0217
S	Ll	U	0.5112	0.3897	0.3853	0.3697	0.3515	0.3208	0.3440		0.2673	0.2355	0.2277	0.0268
S	Ntm	U	0.5360	0.2492	0.2308	0.2125	0.1932	0.1660	0.1498		0.1205	0.1092	0.1052	0.0137



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

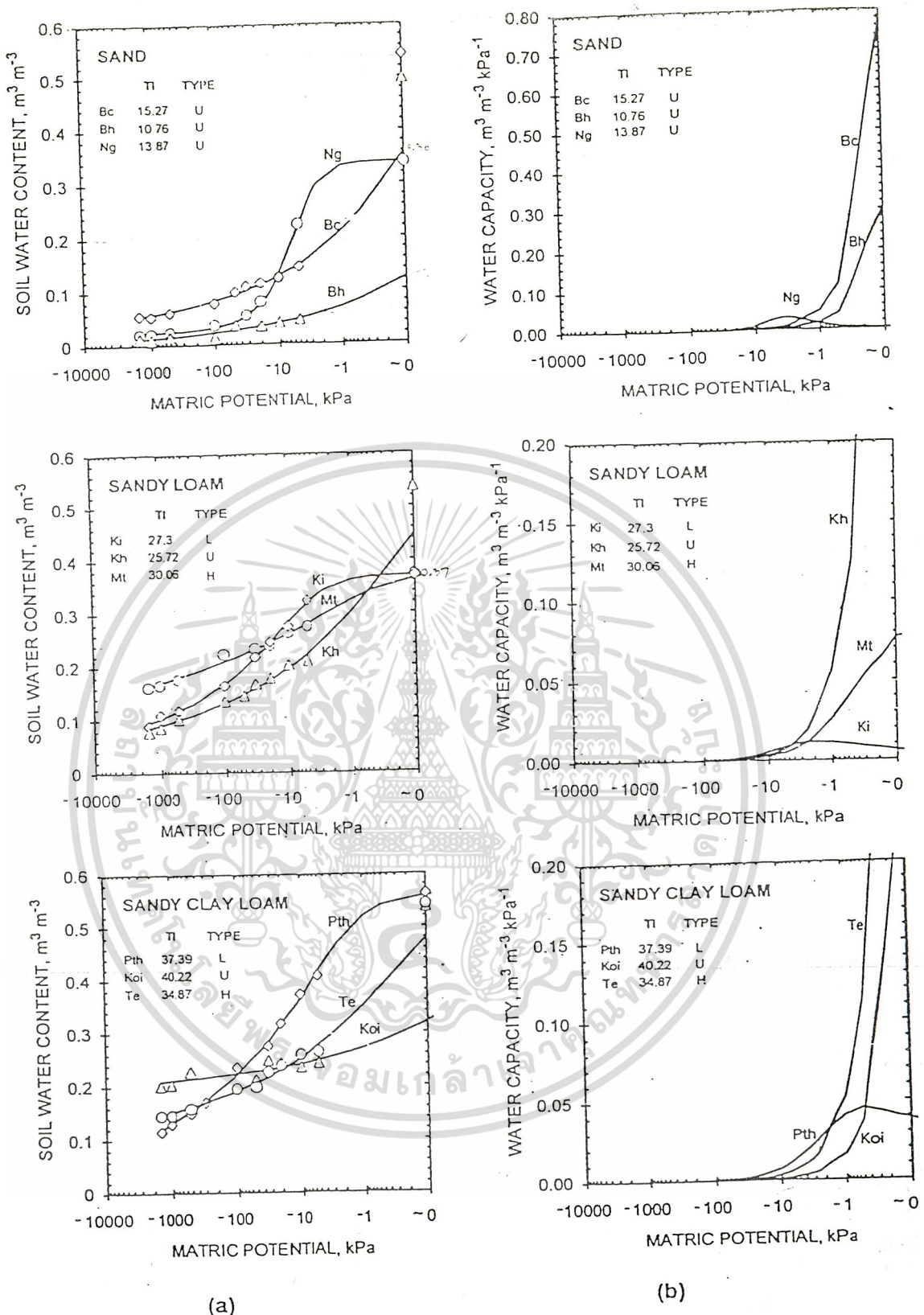
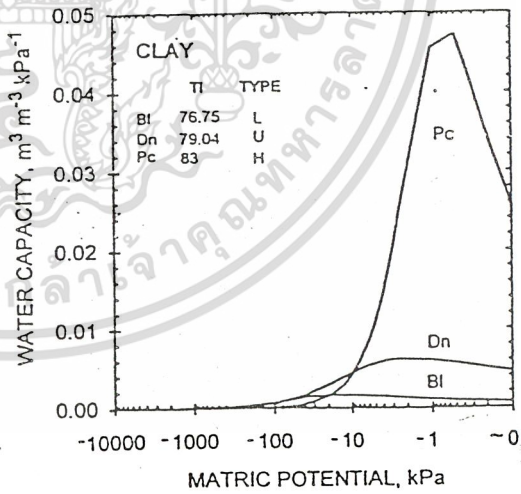
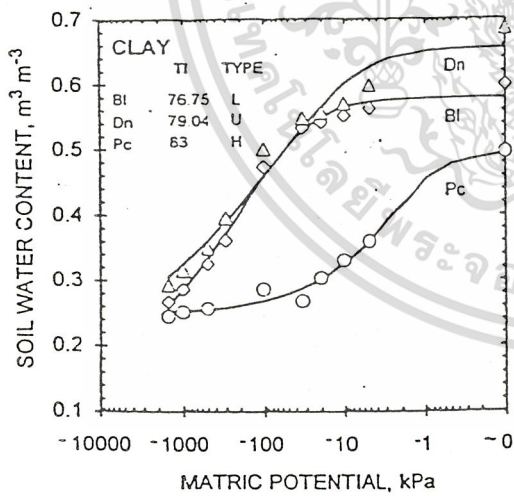
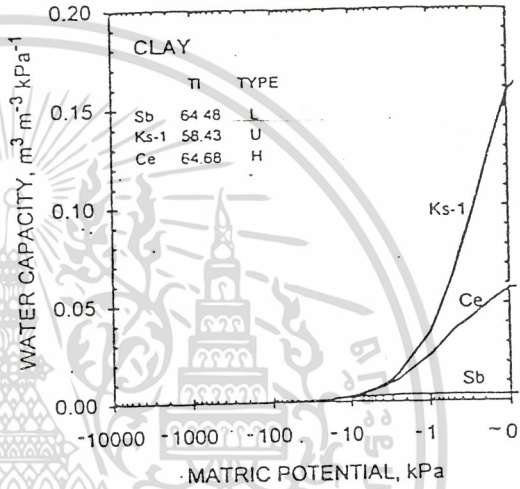
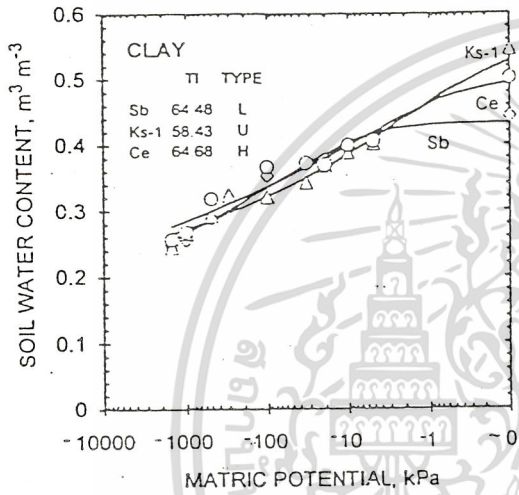
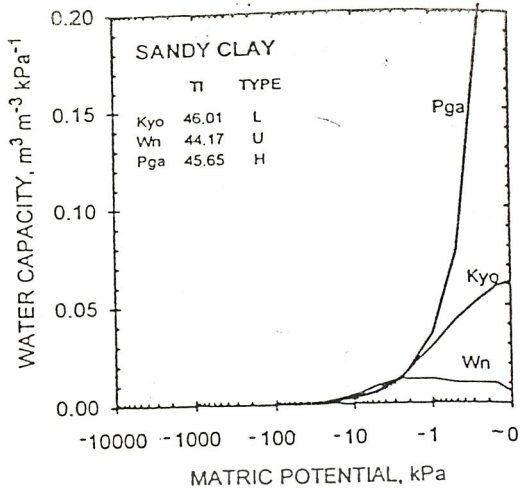
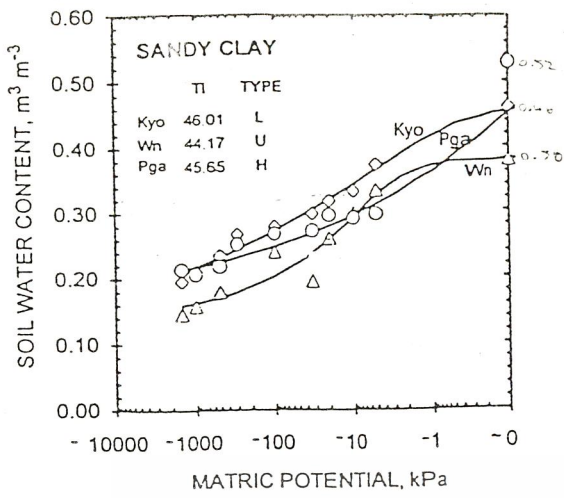


Figure 1 Examples of (a) soil water retention and (b) differential water capacity functions for 6 different textures. In each texture, 3 soil series are shown representing lowland, upland and highland soils (except the sandy soils which are all upland soils). The values are average for the 0.6 m profile.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

Figure 1 (continued)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Temperature Sensors

Nearly every electrical property of a material or device varies as a function of temperature and could in principle be employed as a temperature sensor. The requirements of operation over a wide temperature range with high sensitivity, reproducibility, and linearity greatly limit the possibilities, especially if cost, size, and ease of readout are also considered. No sensor available has all these desirable properties but may have the proper combination for a particular application.

### 4-1 Thermistors

One of the most popular thermosensors is the thermistor, basically a resistor with a high temperature coefficient. A thermistor is a semiconductor in various geometrical configurations to which two leads are attached (Fig. 4-1). One of the advantages of the thermistor is the wide variety of shapes and sizes (down to microscopic) possible. Often a coating is applied for electrical insulation and mechanical protection.

Like most other semiconductors, the standard thermistor has a temperature coefficient  $\alpha$  which is negative (resistance decreases with increasing temperature) and quite high, but is nonlinear in resistance-temperature variation. Over most of its range the resistance ( $R_T$ ) decreases exponentially with temperature (Fig. 4-2)

$$R_T = R_A e^{BT} \quad (4-1)$$

where  $T$  is absolute temperature in Kelvin and  $B$  and  $R_A$  are constants for the device. Most manufacturers express the temperature depen-

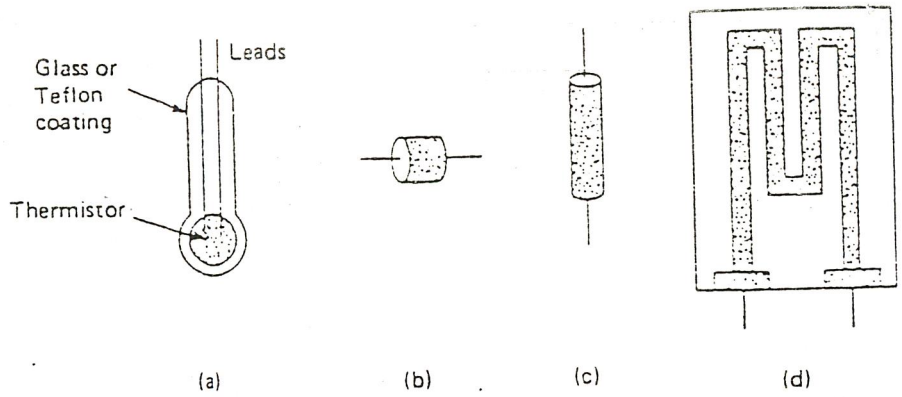


Figure 4-1 Thermistor configurations: (a) coated-bead; (b) disk; (c) diode case; and (d) thin-film.

dependence in terms of the resistance ( $R_a$  at a specified temperature, e.g.,  $25^\circ\text{C}$ ) and temperature coefficient  $\alpha$ , defined as

$$\alpha = \frac{\Delta R_T / R_T}{\Delta T} \tag{4-2}$$

Note that  $\alpha$  is the same at all points along the curve, a characteristic of an exponential dependence. Thermistors with a wide range of resistances are available, and for most commercial units the temperature coefficients are in the range of 3 to 5 percent per degree Celsius. A conversion chart (Table 4-1) or graph line (Fig. 4-2) is generally supplied by the manufacturer. For precision units  $R_0$  is closely controlled (say  $\pm 1$  percent), but for standard units only the temperature coefficient is controlled while  $R_0$  may vary by 10 percent or more from unit to unit. Thus at most each thermistor requires an individual calibration at one temperature. It is fair to observe that most thermistors are not highly precise sensors because the resistance-temperature

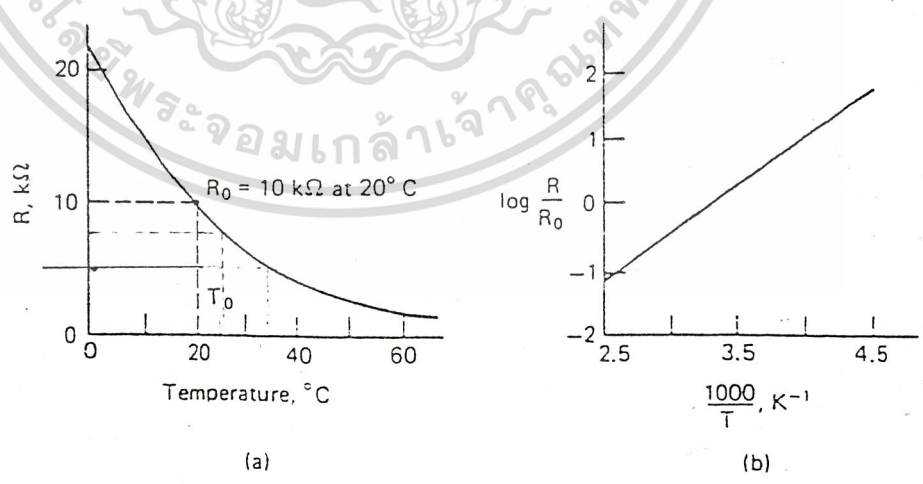


Figure 4-2 Thermistor resistance versus temperature (typical): (a) linear scale and (b) logarithmic plot.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 4-1 Thermistor Resistance as a Function of Temperature ( $R_T = 5 \text{ k}\Omega$  at  $25^\circ\text{C}$ )

Temperature, $^\circ\text{C}$	$R_T, \Omega$	Temperature, $^\circ\text{C}$	$R_T, \Omega$
0	14129	55	1728
5	11335	60	1472
10	9152	65	1260
15	7437	70	1082
20	6080	75	934
25	5000	80	808
30	4134	85	703
35	3438	90	613
40	2873	95	537
45	2414	100	471
50	2038	105	415

characteristics are not highly reproducible. Also, their nonlinearity is a nuisance. Their low cost, high sensitivity, ease of readout, and small size outweigh these disadvantages for many applications.

Two additional parameters can be important, the time constant  $\tau_T$  and the power dissipation constant  $\eta$ . Internal heating or power dissipation is caused by the voltage applied to the thermistor from the readout or converter unit. Both depend on the device thermal insulation and degree of external heat dissipation; these may be 3 to 10 times different for a thermistor in still air compared with a stirred liquid. Typical values in a liquid are  $\tau_T = 0.5$  to  $5 \text{ s}$  and  $\eta = 0.3$  to  $3^\circ\text{C}/\text{mW}$ .

A simple readout is the voltage divider (Fig. 4-3a), which has an output  $V_T$  of

$$V_T = \frac{V_S R_T}{R_T + R_S} \approx \left( \frac{V_S}{R_S} \right) R_T \tag{4-3}$$

High sensitivity is achieved by increasing  $V_S$  and  $V_T$ , but care must be taken to limit the internal heating effect due to the power dissipation in the thermistor ( $P_D = V_T^2/R_T$ ). Typically a temperature rise of  $0.2^\circ\text{C}$  can be tolerated; if we assume  $\eta = 0.3 \text{ mW}/^\circ\text{C}$  and  $R_T = 10 \text{ k}\Omega$ , the maximum value of  $P_D$  is  $6 \text{ mW}$  or  $V_T 7.5 \text{ V}$  (maximum).

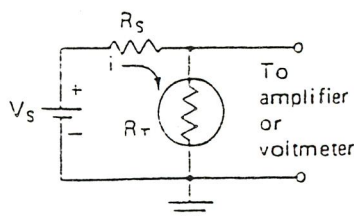


Figure 4-3 Thermistor readout: simple voltage divider.

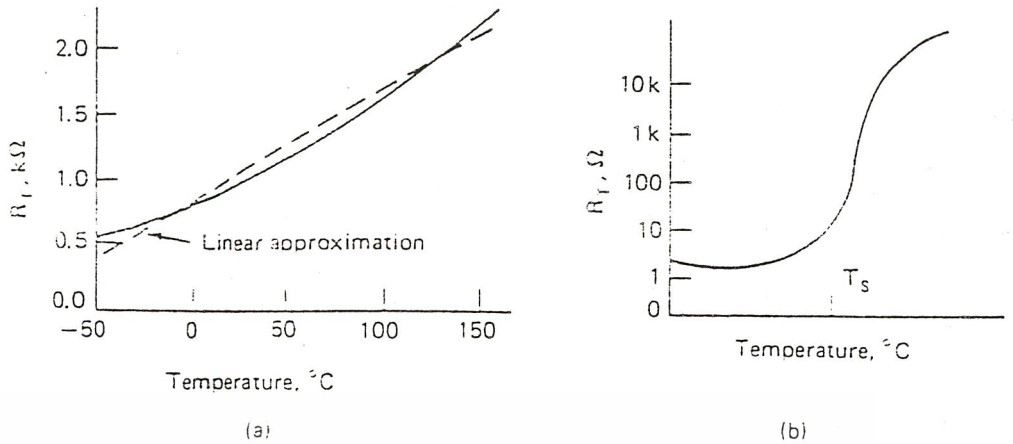


Figure 4-4 Positive-temperature-coefficient thermistors: (a) linear and (b) switching.

Positive-temperature-coefficient semiconductors, a nonstandard type of thermistor, are available but not popular. Heavily doped silicon (Fig. 4-4a) has a fairly linear response. Another type (Fig. 4-4b) used for switching exhibits a rapid rise above a specified temperature.

### 4-2 Readout and Linearization of Resistance-Type Sensors

The resistance-to-voltage converter, suitable for the thermistor or any wide-range resistance sensor, is shown in Fig. 4-5. Conversion is done by the first-stage inverting amplifier with an output of

$$-v_T = \left( \frac{V_{ref}}{R_1} \right) R_T \tag{4-4}$$

If the high accuracy is required,  $V_{ref}$  should be a precision-regulated

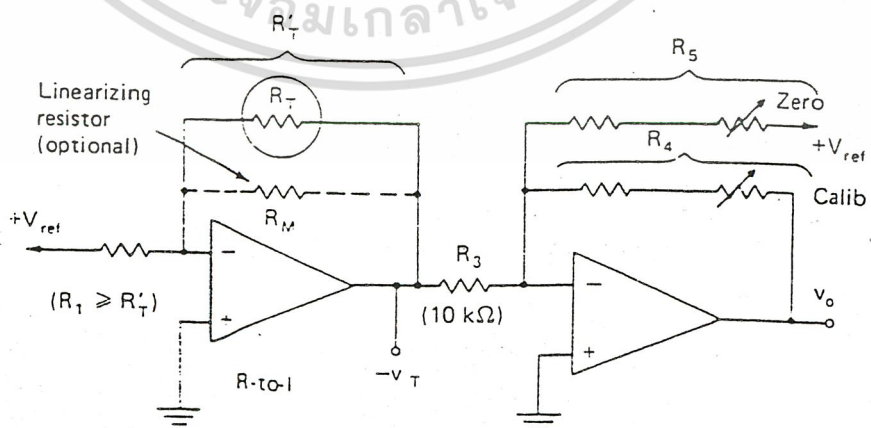


Figure 4-5 Resistance-to-voltage converter for thermistor or other resistance-type sensor.

source (Sec. 10-8), although for most thermistor readout applications a standard power-supply regulator has adequate stability (0.5 percent is typical). Resistor  $R_1$  (with  $V_{ref}$ ) is chosen such that the thermistor voltage ( $v_T$ ) produces an acceptable internal temperature rise at the lowest temperature (max  $R_T$ ). Zero offset and gain are set by the optional second inverting amplifier. The output  $v_o$  is proportional to temperature with any desired offset.

$$v_o = \frac{V_{ref}}{R_1} \left( \frac{R_4}{R_3} \right) R_T - V_Z \quad (4-5)$$

where the zeroing voltage is  $V_Z = V_{ref}(R_4/R_5)$ . Note that the zero (offset) and calibration (gain) controls are noninteracting, a desirable feature. Some users may prefer to digitize the output of the first stage ( $v_T$ ) directly (possibly after changing  $v_T$  to positive polarity by making  $V_{ref}$  negative). Offsets for an individual sensor correction can then be corrected by software, a possible nuisance if sensors are exchanged. The  $R$ -to- $V$  converter may be used for any resistance-type sensor, including those that require an ac drive, by replacing  $V_{ref}$  by an ac source.

The nonlinear (exponential) response of thermistors can be compensated by several methods. One method is to employ a nonlinear amplifier with a response characteristic which is the inverse of the thermistor response.

A simple and surprisingly effective method of thermistor linearization is to add a fixed resistor ( $R_M$ ) in parallel which is approximately equal to the thermistor resistance at the middle of the temperature range ( $T_M$ ). The circuit (Fig. 4-6) acts as a thermistor  $R'_T$  with effectively half the resistance and temperature coefficient of the actual thermistor (Eq. 4-6) but with a substantial linear range (typically a span of 20 to 50°C).

$$R'_T = \frac{R_M}{2} \left[ 1 - \frac{\alpha}{2} (T - T_m) \right] \quad (4-6)$$

The compensation technique is based on the observation that the net resistance of a variable resistor in parallel with a fixed resistor  $R_M$  changes nonlinearly with the resistance of the variable resistor. By proper choice of a shunt resistance, this nonlinearity compensates the thermistor nonlinearity over a certain range. This can be shown mathematically by expanding the thermistor response  $R_T$  as a power series in  $\Delta T = T - T_M$  and retaining terms in  $(\Delta T)^2$ . This linearization technique is not restricted to thermistors nor even to an exponential resistance variation. Several other simple techniques (e.g., series

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

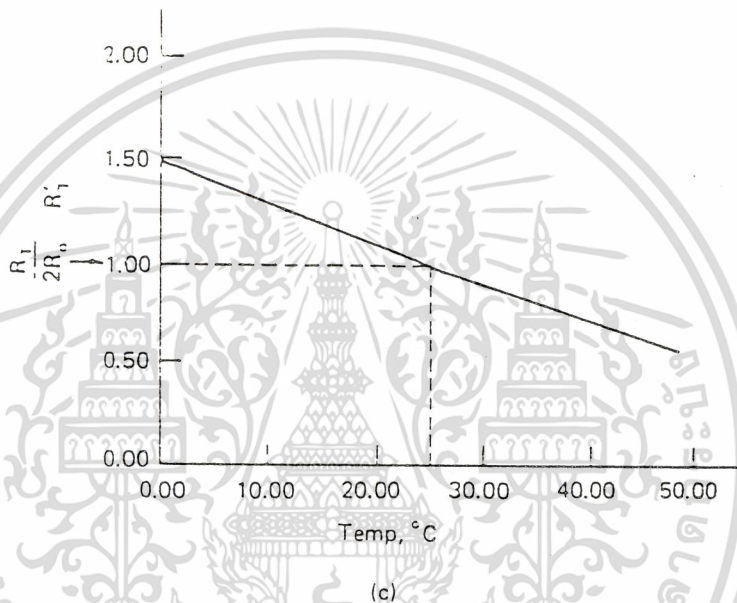
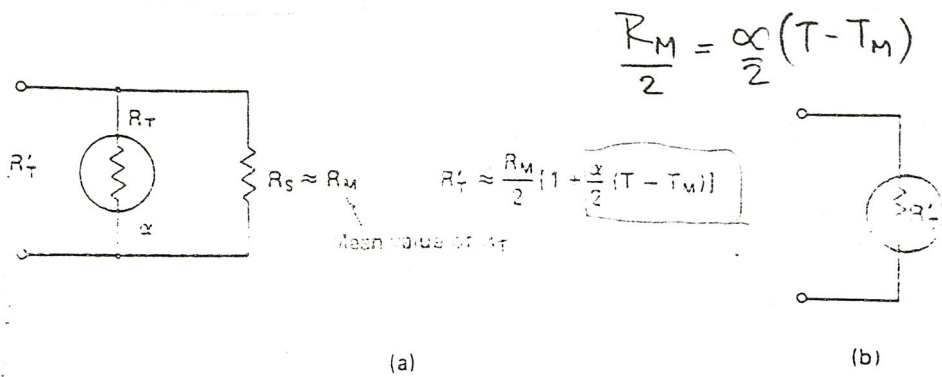


Figure 4-6 Thermistor linearization by shunt resistance: (a) actual circuit; (b) equivalent circuit; and (c) linearized response.

resistor) are equally, but not more, effective. In Fig. 4-6c, the nearly straight line is the linearized thermistor response. Nonlinearity (least-squares fit) is about 1 percent for 30°C range, better over a narrower range, and much worse over a wider range.

Two (or three) thermistors properly combined in a single package (Fig. 4-7) provide good linearization over a wide temperature range (up to 100°C). Each thermistor effectively covers part of the range. The matching of the close-tolerance thermistors and resistors is an involved and somewhat costly process normally done by the manufacturer.

### 4-3 Bridge Amplifier for Resistance Sensors

The bridge amplifier (Fig. 2-16) discussed in Chap. 2 is well suited as a readout device for a resistance thermometer or any resistance-type sensor. Bridge voltage is derived from the precision voltage regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

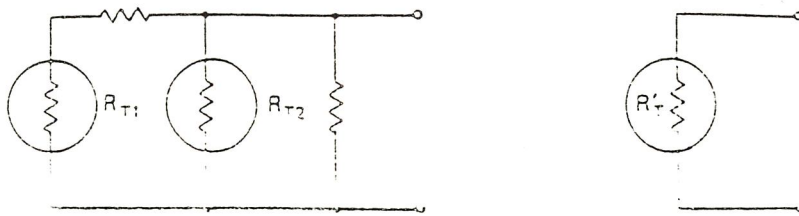


Figure 4-7 Two-thermistor linearization: (a) actual circuit and (b) equivalent circuit.

through an amplifier. The bridge voltage and resistance are chosen such that the sensor power dissipation is not excessive.

From the general expression for the bridge sensitivity [Eq. (2-15)] and the thermistor temperature coefficient [Eq. (4-2)], the circuit response for the bridge near balance ( $\Delta T$  small) is

$$V_o = S_T \Delta T \tag{4-7}$$

where  $S_T = AV/4$  and  $A =$  the amplifier voltage gain.

The bridge readout (Fig. 4-8) can be operated in either of two modes, a null mode or a small-deviation (limited temperature excursion) mode. The bridge output ( $\Delta V$ ), which is balanced with respect to ground, is converted to a single-ended output ( $v_o$ ) by an instrumentation amplifier. With the null mode,  $R_x$  is adjusted until the output voltage  $v_o$  is zero. The value of  $R_T$  is read off the dial, an inconvenience, and the temperature found by referring to a calibration table. With the second mode of operation,  $R_x$  becomes null at the lowest temperature of a limited range (e.g., 95°F for 95 to 105°F). The amplification factor is chosen so that the output voltage change is an even number times the temperature change (e.g., 0.10 V/°F). An advantage of this circuit is that it can measure small changes in temperature accurately, but it has the disadvantage of a limited linear range.

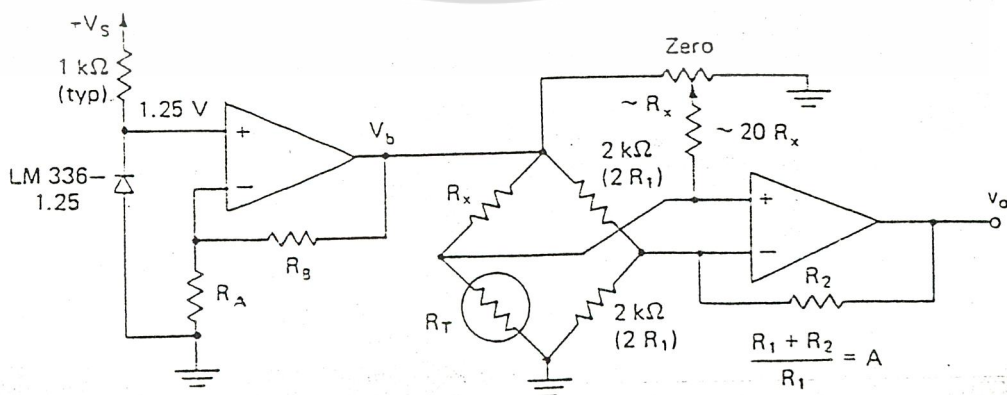


Figure 4-8 Bridge amplifier for resistance sensors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ต่อสาธารณะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When  $\delta = \Delta R/R_x$  is not small, the output  $v_o$  contains quadratic and cubic terms also. From Eq. (2-14) the response becomes

$$v_o \approx \frac{AV_b}{4} \left[ \delta - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{4} \right] \quad (4-8)$$

#### 4-4 Resistance Thermal Detector (RTD)

The RTD is made of a metal with a positive temperature coefficient ( $\alpha$ ). The resistance variation is an order of magnitude less for that of the thermistor, but the response is much closer to linear. Platinum is usually used because of its wide temperature range, stability, and resistance to chemical attack. Sometimes, however, copper and nickel are used (Fig. 4-9).

Both wire-wound and thin-film versions of the platinum RTD are available. Wires are wound strain-free around an insulating form and protected in a housing such as a stainless steel tube (Fig. 4-10b). Two (or more, usually copper) lead wires are brought out of the probe. The resistance ( $R_T$ ) of an RTD as a function of temperature ( $T$ ), in degrees Celsius, is approximated by the linear equation

$$R_T = R_o (1 + \alpha T) \quad (4-9)$$

where  $R_o$  is the RTD resistance at  $0^\circ\text{C}$  and  $\alpha$  is the temperature

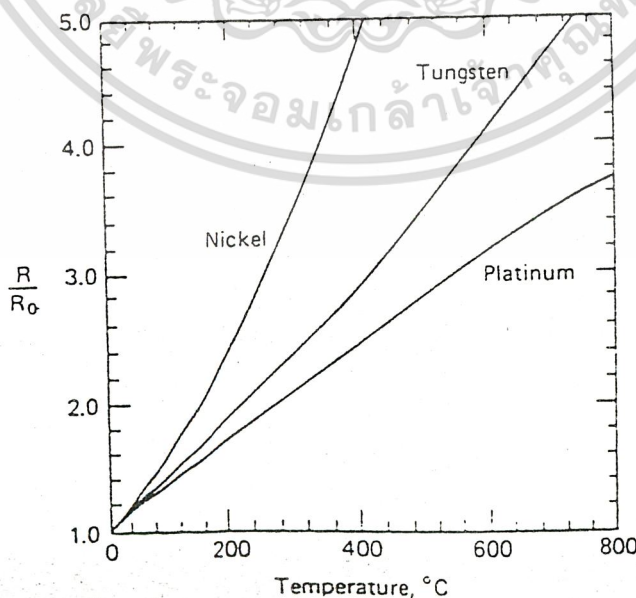


Figure 4-9 Resistance versus temperature for various RTD metals.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

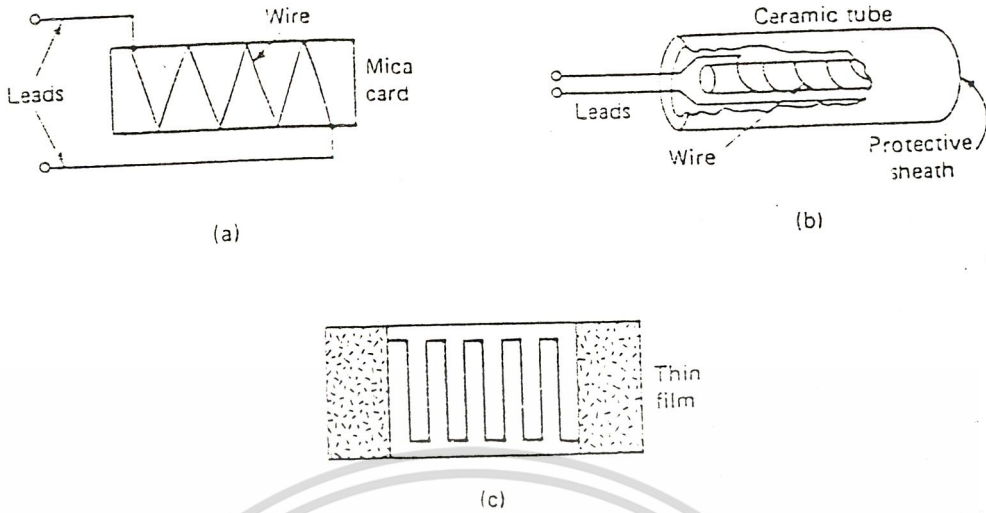


Figure 4-10 RTD configurations: (a) spiral wire wound in probe; (b) filar wound; and (c) thin-film.

coefficient. Note that  $\alpha$  is defined differently here than for the thermistor, since  $\Delta T$  here is large and  $R_o$  is fixed (not  $R_T$ ). For pure platinum, the value of  $\alpha$  (averaged over 0 to 100°C) is 0.003927  $\Omega/\Omega \cdot ^\circ\text{C}$ . More commonly, the RTD is made of platinum with impurities added so that  $\alpha = 0.00385$  (0 to 100°C average), an established standard. A more accurate equation for the resistance variation with temperature is given by

$$R_T = R_o (1 + \Delta T + BT^2) \tag{4-10}$$

where  $A = 3.986 \times 10^{-3}$  and  $B = 5.88 \times 10^{-7}$  for  $\alpha = 0.003927$ , or  $A = 3.90 \times 10^{-3}$  and  $B = 5.7 \times 10^{-7}$  for  $\alpha = 0.00385$  with  $T$  in degrees Celsius and  $R_T$  a best-fit (0.1 to 0.5°C) approximation in the range 0 to 420°C. The resistance-to-temperature conversion\* is given in tabular form in Table 4-2 and in graphical form in Fig. 4-9.

A close tolerance of 0.2 percent for resistance is standard (class B), thus facilitating interchangeability between sensors. Long-term stability of wire-type platinum RTDs is exceptional (0.01°C precision possible).

Thin-film platinum RTDs (Fig. 4-10c) are smaller, lower cost, and higher in resistance ( $R_o = 1000 \Omega$ ) than the wire type. High-resistance units have less internal heating and less lead resistance error. Frequently they are manufactured with the standard temperature coefficient ( $\alpha = 0.00385$ ). Stability over long periods and with multiple

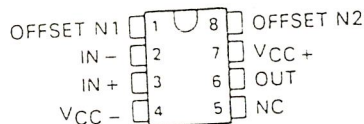
\*International Practical Temperatures Scale established by the International Electrochemical Commission (1968). For a discussion, see Robert P. Benedict, "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements," 2d ed. John Wiley, New York, 1977.

# OP-07C, OP-07D, OP-07E ULTRA-LOW-OFFSET-VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

D2757, OCTOBER 1983—REVISED JUNE 1988

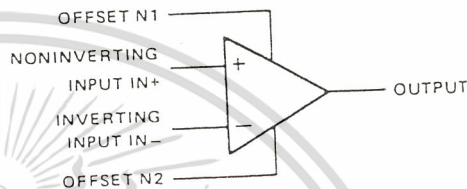
- Ultra-Low Offset Voltage . . . 30  $\mu$ V Typ (OP-07E)
- Ultra-Low Offset Voltage Temperature Coefficient . . . 0.3  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Typ (OP-07E)
- Ultra-Low Noise
- No External Components Required
- Replaces Chopper Amplifiers at a Lower Cost
- Single-Chip Monolithic Fabrication
- Wide Input Voltage Range  
0 to  $\pm$  14 V Typ
- Wide Supply Voltage Range  
 $\pm$  3 V to  $\pm$  18 V
- Essentially Equivalent to Fairchild  $\mu$ A714 Operational Amplifiers
- Direct Replacement for PMI OP-07C, OP-07D, OP-07E

D, JG, OR P PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC—No internal connection

symbol



## description

These devices represent a breakthrough in operational amplifier performance. Low offset and long-term stability are achieved by means of a low-noise, chopperless, bipolar-input-transistor amplifier circuit. For most applications, external components are required for offset nulling and frequency compensation. The true differential input, with a wide input voltage range and outstanding common-mode rejection, provides maximum flexibility and performance in high-noise environments and in noninverting applications. Low bias currents and extremely high input impedances are maintained over the entire temperature range. The OP-07 is unsurpassed for low-noise, high-accuracy amplification of very-low-level signals.

These devices are characterized for operation from 0 $^{\circ}$ C to 70 $^{\circ}$ C.

## AVAILABLE OPTIONS

TA	V <sub>IO</sub> MAX at 25 $^{\circ}$ C	PACKAGE		
		SMALL OUTLINE (D)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (P)
0 $^{\circ}$ C	150 $\mu$ V	OP-07CD	OP-07CJG	OP-07CP
to		OP-07DD	OP-07DJG	OP-07DP
70 $^{\circ}$ C	75 $\mu$ V	OP-07ED	OP-07EJG	OP-07EP

The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type when ordering, i.e., OP-07CDRI

2

Operational Amplifiers

PRODUCTION DATA documents contain information current as of publication date. Products conform to specifications over the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS  
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75265

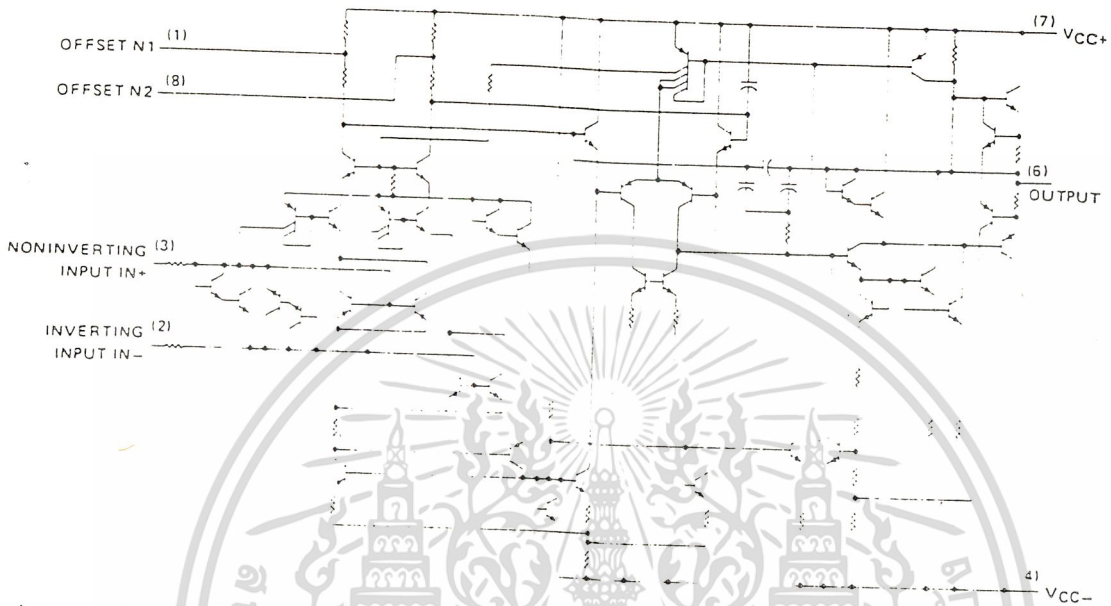
Copyright © 1983 Texas Instruments Incorporated

2-147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

OP-07C, OP-07D, OP-07E  
 ULTRA-LOW-OFFSET VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

schematic



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage $V_{CC-}$ (see Note 1)	22 V
Supply voltage $V_{CC+}$	-22 V
Differential input voltage (see Note 2)	= 30 V
Input voltage (either input, see Note 3)	= 22 V
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 5)	500 mW
Operating free-air temperature range	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: JG package	300°C
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: D or P package	260°C

- NOTES: 1 All voltage values, unless otherwise noted, are with respect to the midpoint between  $V_{CC-}$  and  $V_{CC+}$ .  
 2 Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.  
 3 The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.  
 4 The output may be shorted to ground or either power supply.  
 5 For operation above 64°C free-air temperature, derate the D package to 464 mW at 70°C at the rate of 5.8 mW/°C.

2  
 Operational Amplifiers

OP-07C, OP-07D, OP-07E  
ULTRA-LOW-OFFSET-VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

electrical characteristics at specified free air temperature,  $V_{CC} \pm \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	OP 7C			OP 7D			OP 7E			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	$V_{IO} = 0$ , $R_S = 50 \Omega$ , $25^\circ\text{C}$	60	150	150	60	150	150	30	75	75	$\mu\text{V}$
Temperature coefficient of input offset voltage	$V_{IO} = 0$ , $R_S = 50 \Omega$ , $0^\circ\text{C to } 70^\circ\text{C}$	85	250	250	85	250	45	130	130	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Long term drift of input offset voltage	See Note 6	0.4			0.5		0.3	1.3	1.3	$\mu\text{V}/\text{mo}$	
Offset adjustment range	$R_S = 20 \text{ k}\Omega$ , See Figure 1	-4			-4		1.4			mV	
Input offset current	$25^\circ\text{C}$	0.8	6	6	0.8	6	0.5	3.8	3.8	nA	
Temperature coefficient of input offset current	$0^\circ\text{C to } 70^\circ\text{C}$	1.6	8	8	1.6	8	0.9	5.3	5.3	nA/ $^\circ\text{C}$	
Input bias current	$25^\circ\text{C}$	1.2	50	50	1.2	50	0.8	35	35	pA/ $^\circ\text{C}$	
Temperature coefficient of input bias current	$0^\circ\text{C to } 70^\circ\text{C}$	2.2	7	7	2.2	7	1.1	4	4	nA/ $^\circ\text{C}$	
Common mode input voltage range		1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	V	
Peak output voltage	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$ , $R_i = 2 \text{ k}\Omega$ , $R_i = 1 \text{ k}\Omega$ , $R_i = 2 \text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = \pm 3\text{ V}$ , $V_{IO} = 0.5\text{ V}$	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	V	
Large signal differential voltage amplification	$V_{CC} = \pm 3\text{ V}$ , $V_{IO} = 0.5\text{ V}$ , $R_L = 500 \text{ k}\Omega$	100	400	400	111	12.6	112	12.6	12.6	V/mV	
Unity gain bandwidth	$V_{IO} = 10\text{ V}$ , $R_L = 2 \text{ k}\Omega$	1.1	0.6	0.6	1.1	0.6	0.4	0.6	0.6	MHz	
Common mode rejection ratio	$V_{IC} = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50 \Omega$	97	170	170	94	110	106	123	123	dB	
Supply voltage rejection	$V_{IC} = 1.4\text{ V to } 10\text{ V}$	10	5.1	5.1	10	5.1	7	32	32	$\mu\text{V/V}$	
Power dissipation	$V_{CC} = \pm 3\text{ V}$ , $V_{IO} = 0$ , No load	30	150	150	30	150	75	120	120	mW	

Small signal parameters are measured under open loop conditions with zero common mode input voltage unless otherwise noted.  $R_{OH} = 500 \Omega$ . Some long term drifts cannot be measured on the individual devices prior to shipment; this specification is not intended to be a guarantee or warranty. It is an engineering estimate of the averaged trend line of drift versus time over extended periods after the first thirty days of operation.

OP-07C, OP-07D, OP-07E  
ULTRA-LOW-OFFSET VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

operating characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		OP-7C			OP-7D ✓			OP-7E			UNITY
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_n$ Equivalent input noise voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$f = 10\text{ Hz}$	10.5			10.5			10.3			$nV/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 100\text{ Hz}$	10.2			10.3			10.0			
		$f = 1\text{ kHz}$	9.8			9.8			9.6			
$V_{NPP}$ Peak-to-peak equivalent input noise voltage	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}, T_A = 25^\circ\text{C}$		0.38			0.38			0.35			$\mu\text{V}$
$I_n$ Equivalent input noise current	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$f = 10\text{ Hz}$	0.35			0.35			0.32			$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 100\text{ Hz}$	0.15			0.15			0.14			
		$f = 1\text{ kHz}$	0.13			0.13			0.12			
$I_{NPP}$ Peak-to-peak equivalent input noise current	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}, T_A = 25^\circ\text{C}$		15			15			14			$\text{pA}$
SR Slew rate	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega, T_A = 25^\circ\text{C}$		0.3			0.3			0.3			$\text{V}/\mu\text{s}$

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified.

2 Operational Amplifiers

TYPICAL APPLICATION DATA

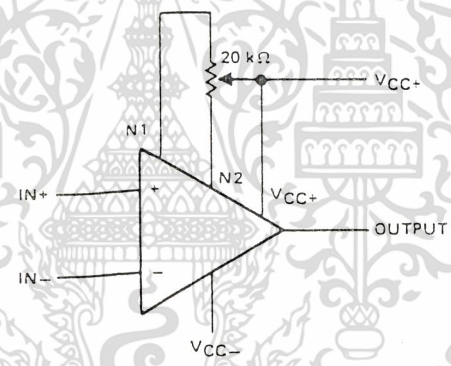
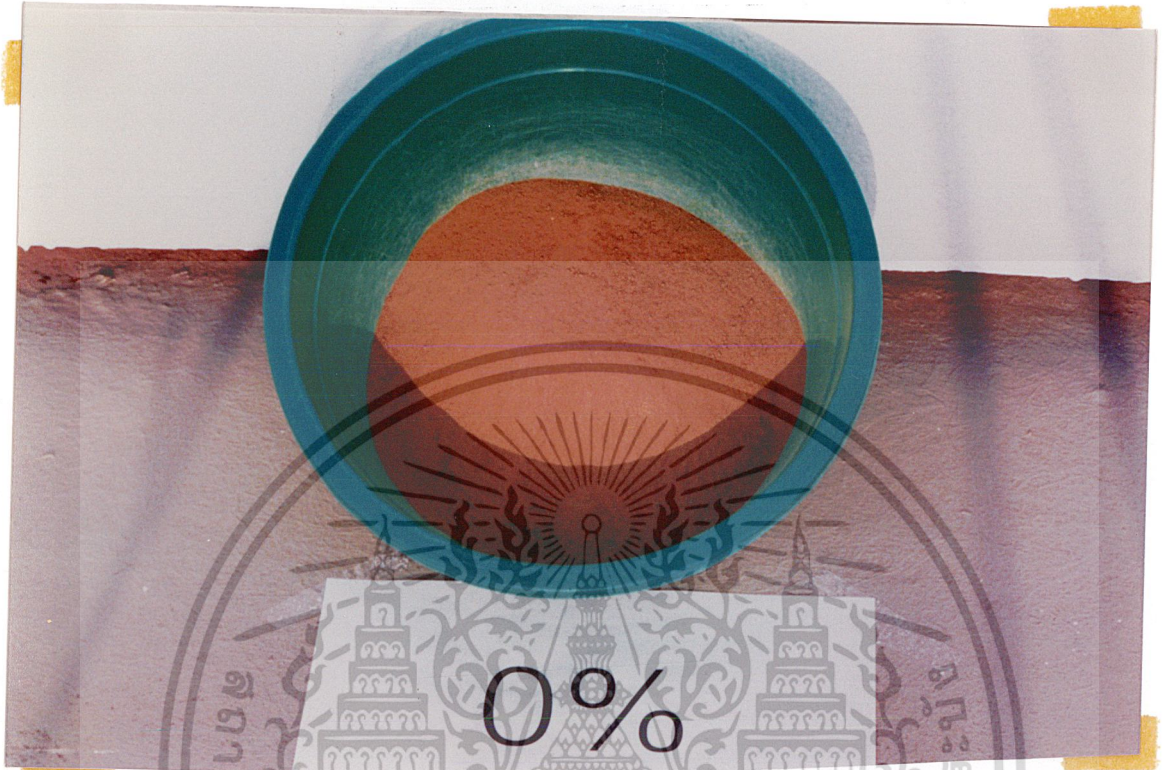


FIGURE 1. INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



0%

ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินทรายที่ 0%

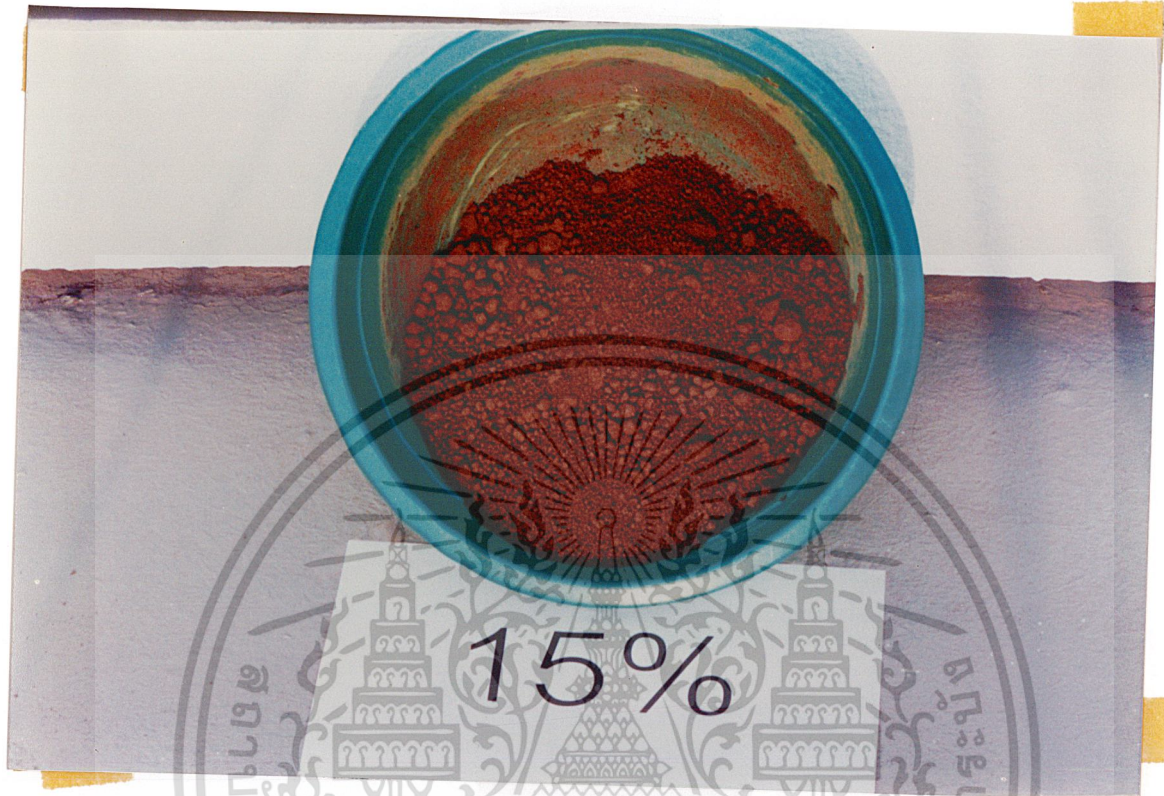
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



10%

ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินทรายที่ 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



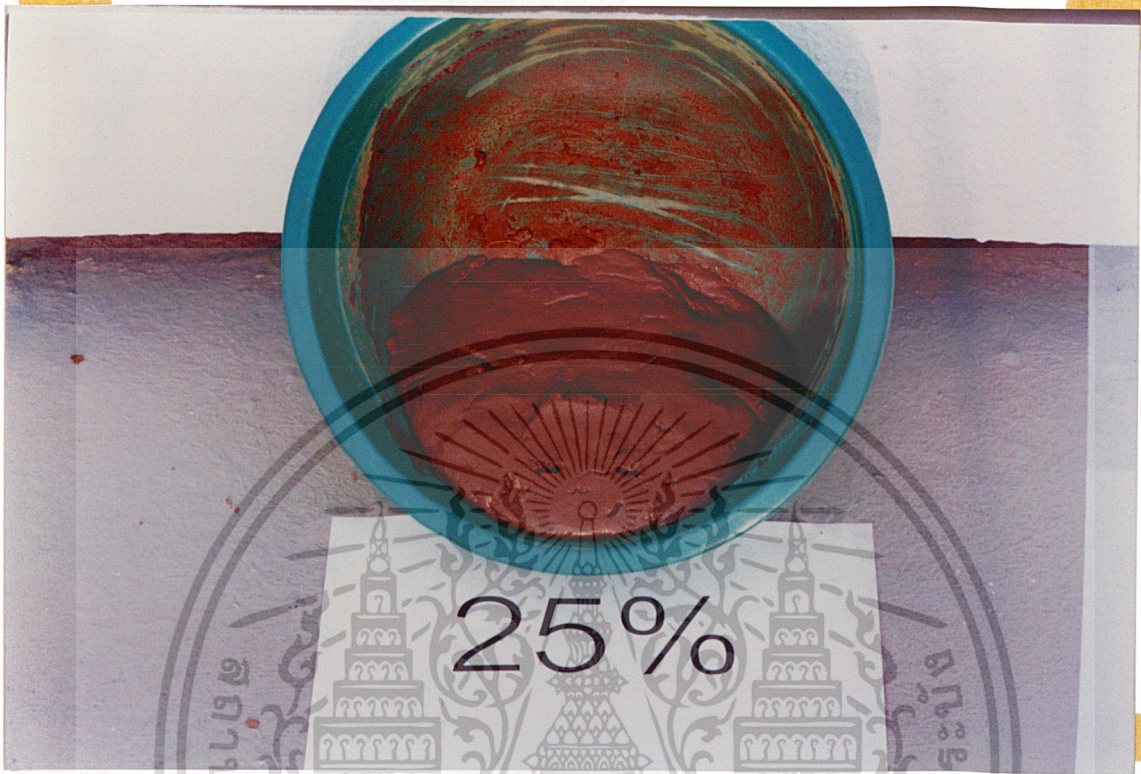
ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินทรายที่ 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินทรายที่ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

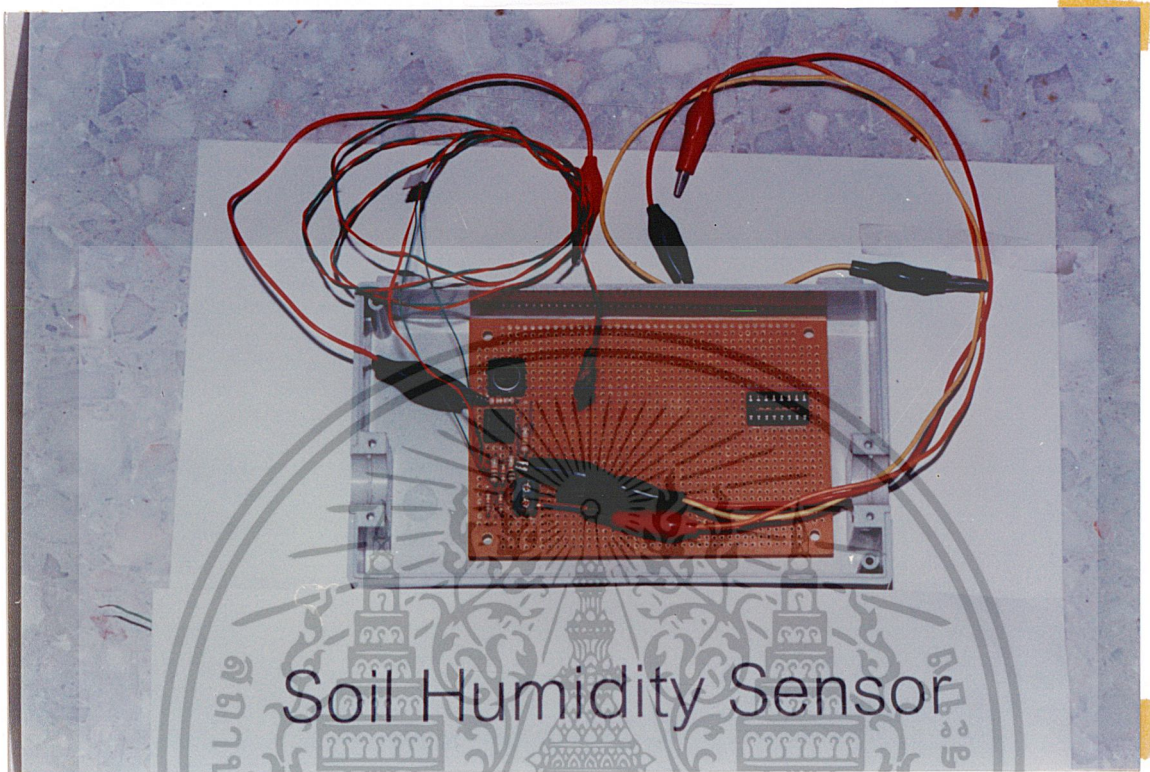


25%

ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินทรายที่ 25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## Soil Humidity Sensor

ภาพแสดงวงจรและหัววัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงชุดทดลองการวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินและ Datalogger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. คณาจารย์ภาควิชาปรัชญา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, “ปรัชญาเบื้องต้น”, 2535.
2. รศ.ดุสิต มานะจติ, “ปรัชญาทั่วไป”, 2535, ภาควิชาปรัชญาและอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
3. ผศ.ว่าที่ รท.ดร.ทรงศักดิ์ จุนติระพงศ์, “อุตินิยมวิทยาเกษตร”, 2539, ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
4. รศ.ชนกาญจน์ กัทรากาญจน์, “เทอร์โมไดนามิกประยุกต์หน่วย SI เล่ม 2”, 2524, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ, โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ, หน้า 338.
5. ดร.ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง, “ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์การถ่ายเทความร้อน”, 2539, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตซันแนล เอ็นเตอร์ไพรส์ อิงค์.
6. ปิยะวัติ บุญหลง, “การถ่ายเทความร้อน2”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

## ประวัติผู้จัดทำโครงการพิเศษ

นางสาวโยสรี ไชยวงศ์ เกิดวันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎ์ จะเชิงเทรา จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2540

นางสาวรัชณี บุรพาพาณิชย์ เกิดวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนท่าใหม่ พุทธสวัสดิ์ราชบุรีนุกูล และมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาอ้อมเกล้า จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้