



การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ

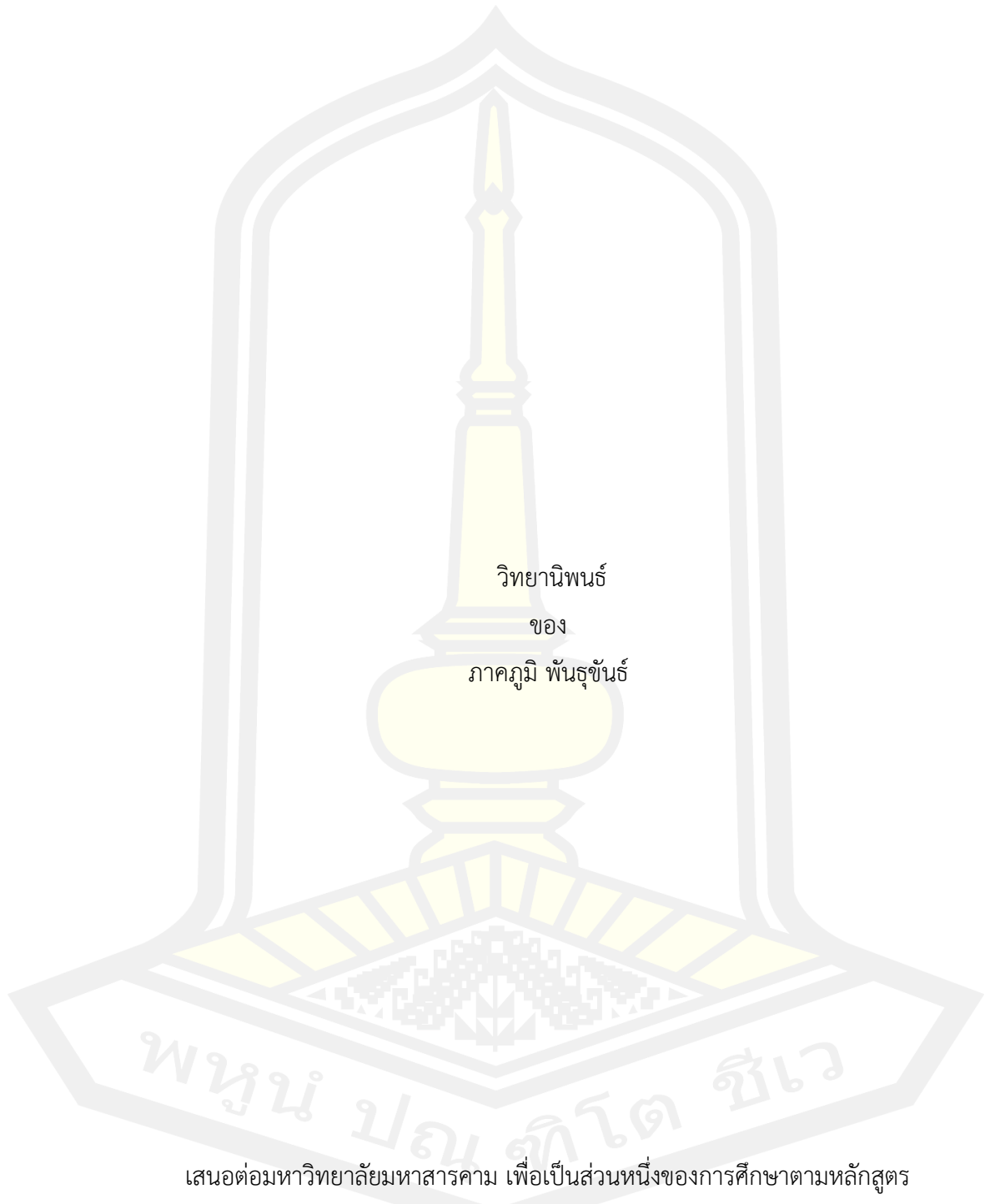
วิทยานิพนธ์
ของ
ภาคภูมิ พันธุ์จันทร์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ



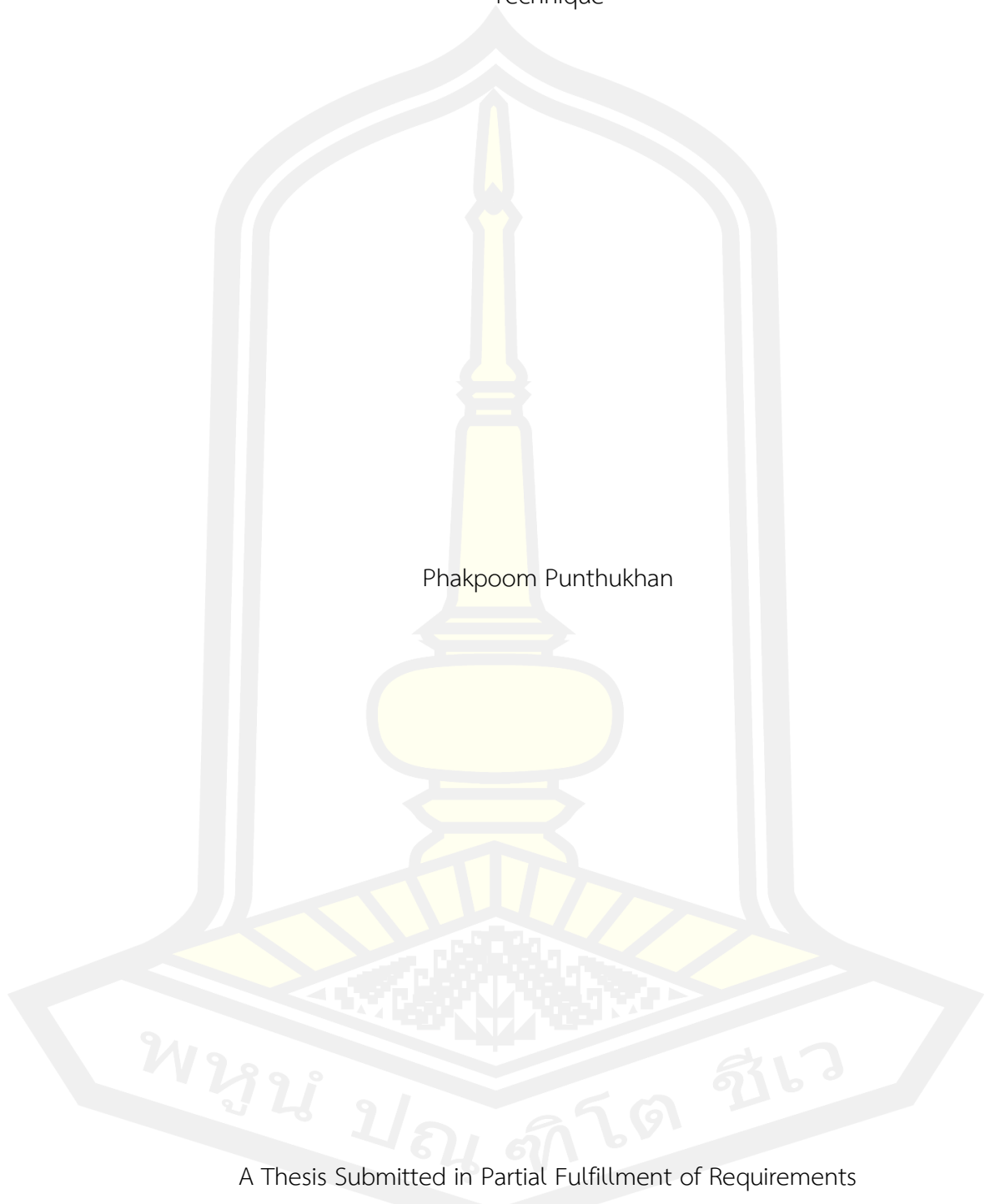
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Soil Humidity Measurement using Multi-Level Capacitance
Technique

Phakpoom Punthukhan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

May 2022

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายภาคภูมิ พันธุ์จันทร์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ		
ผู้วิจัย	ภาคภูมิ พันธุ์ขันธุ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

ผลการสำรวจสถิติการเกษตรของไทยปี 2562 พบว่ามีการใช้พื้นที่ทำการเกษตรกว่า 149.24 ล้านไร่ และมีมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์กว่า 1.315 ล้านล้านบาท แต่ในปัจจุบันเกษตรกรในหลายพื้นที่ประสบปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำ ดังนั้นการชลประทานแบบอัตโนมัติด้วยการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความชื้นที่บริเวณโซนรากของพืชเพื่อรักษาความชื้นให้เหมาะสม คือหนึ่งในวิธีการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาระบบต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินอัตโนมัติด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า หลายระดับความลึก เน้นการออกแบบให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและราคาประหยัด จากการทดลองพบว่าระบบต้นแบบและโปรบวัด (capacitive moisture sensor v1.2) สามารถประมาณค่าความชื้นของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลจากการวิเคราะห์พบว่าดินทรายมีอัตราการซึมเฉลี่ยที่ 0.62-1.34 ซม./นาที่, ดินเหนียว 0.57-0.87 ซม./นาที่ และดินร่วน 0.78-1.20 ซม./นาที่ ดังนั้นผลการทดลองนี้ จึงเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและนักวิชาการเกษตร เช่น นำไปเปรียบเทียบค่าความชื้นจากพื้นที่เกษตรกรเพื่อหาชนิดของดินหรือลักษณะทางกายภาพ และหวังว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยยกระดับมาตรฐานการเกษตรในประเทศไทยหรือประเทศที่กำลังพัฒนาให้สูงขึ้นได้

คำสำคัญ : ความชื้นของดิน, การวัดค่าความชื้นในดิน, หลายระดับความลึก, เทคนิคเก็บประจุไฟฟ้า, โปรไฟล์ของดิน, การชลประทาน และการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ

TITLE	Development of Soil Humidity Measurement using Multi-Level Capacitance Technique		
AUTHOR	Phakpoom Punthukhan		
ADVISORS	Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

ABSTRACT

Results of the Thai Agricultural Statistics Survey 2019, it was found that more than 58.98 million acres of agricultural land were used and has an export value of agricultural products more than 1.315 trillion baht. But at present, farmers in many areas face the water scarcity, by automatic irrigation with Installing a humidity measuring device at the root zone of the plant to maintain optimum humidity. Therefore, this thesis presents the development of a prototype system for automatic soil humidity determination with electric capacitance method and multi-depth, design with a simple structure and low-cost. The experiment showed that prototype system and probe (capacitive moisture sensor v1.2) can work effectively in estimating soil humidity, And the results showed that the sand soil had an average seepage rate of 0.62-1.34 cm/min, clay soil 0.57-0.87 cm/min and loam soil 0.78-1.20 cm/min. Therefore, the results of this experiment are beneficial to farmers and agricultural scholars. And hoped that the developed prototype system will be an important part to raising the standards of agriculture in Thailand or developing countries.

Keyword : Soil moisture, Soil humidity, Soil humidity measurement, Multi-level deep, Capacitive technique, Soil profile, Irrigation and Water resource management

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือและให้ความอนุเคราะห์อย่างสูงยิ่งจากหลายฝ่ายดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์และได้อนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่สำหรับทำงานวิจัยตลอดจนช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ทางผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงที่ได้ทำงานวิจัยร่วมกับบริษัท All Information Technologies Co., Ltd ขอขอบพระคุณโครงการ TIME ที่มอบทุนการศึกษาและวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่วิชาการระดับบัณฑิตศึกษาประจำคณะ เจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนในหลายๆเรื่อง ขอขอบพระคุณน้องๆที่น่ารักทุกท่านที่สนับสนุนทั้งร่างกาย แรงใจ ตลอดงานวิจัยเสร็จสิ้นสุดท้ายนี้ที่ข้าพเจ้าได้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่คอยสนับสนุนในทุกๆด้านมาตลอด

ภาคภูมิ พันธุ์จันทร์

พหุ อนุ ทัต ชีเว

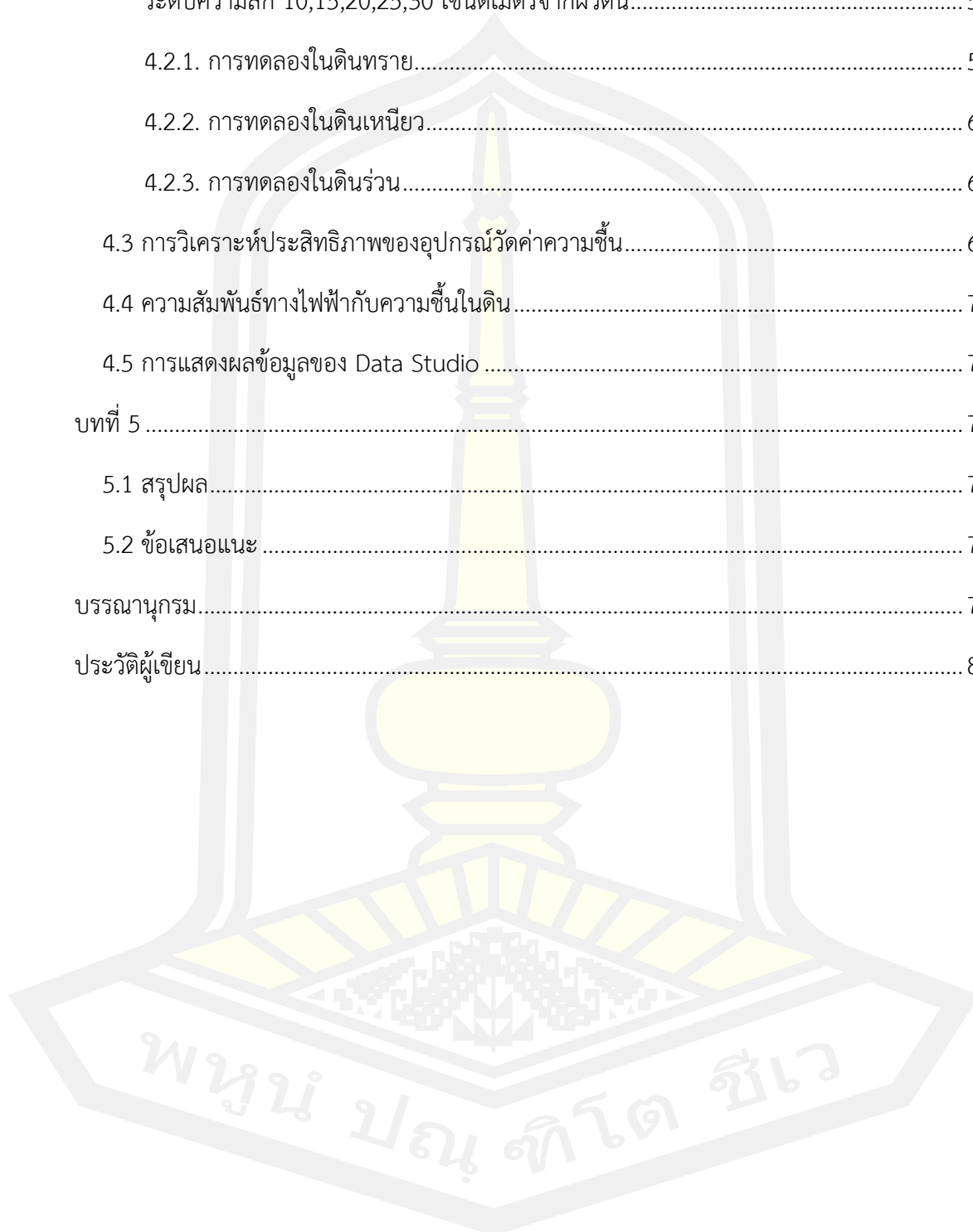
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ความสำคัญของปัญหา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4
1.7 สถานที่ดำเนินงาน.....	5
บทที่ 2.....	6
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช.....	6
2.1.1 ส่วนประกอบของดิน.....	6
2.1.2 อนุภาคของดินและเนื้อดิน.....	7
2.1.3 โครงสร้างของดิน.....	8
2.1.4 ความถ่วงจำเพาะของเนื้อดิน.....	9
2.1.5 ความชื้นในดิน.....	10

2.2 การจัดการทรัพยากรน้ำ.....	12
2.3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับดิน.....	13
2.4 ตัวเก็บประจุ.....	14
2.4.1 โครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	15
2.4.2 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ.....	16
2.4.3 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ.....	17
2.4.4 อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์.....	18
2.5 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator).....	19
2.5.1 หลักการพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์.....	19
2.5.2 วงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ (Phase-Shift Oscillator).....	19
2.5.3 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ (Wien-Bridge Oscillator).....	20
2.5.4 โคลพิตซ์ออสซิลเลเตอร์ (Colpitts Oscillator).....	21
2.5.5 วงจรฮาร์ทลีย์ออสซิลเลเตอร์ (Hartley Oscillator).....	21
2.5.6 คริสตัลออสซิลเลเตอร์ (Crystal Oscillator).....	21
2.5.7 วงจรรวมกำเนิดความถี่.....	22
2.5.8 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์.....	22
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	23
2.6.1 โครงสร้างและระบบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	23
2.6.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ AVR.....	25
2.6.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino.....	25
2.7 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT).....	26
2.7.1 การประยุกต์ใช้งาน Internet of Things.....	27
2.8 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วันความขึ้นดิน.....	31
2.8.1 การพัฒนาพัลส์ด้วยจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม.....	31

2.8.2 การออกแบบและพัฒนางจรตรวจวัด	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
2.9.1 งานวิจัยในประเทศ	32
2.9.2 งานวิจัยต่างประเทศ	33
บทที่ 3	36
3.1 แผนการเตรียมอุปกรณ์วัดค่าความชื้นดินในดินเพื่อการทดลอง	36
3.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นดิน	36
3.3 ระบบการทำงานอุปกรณ์วัดค่าความชื้นดิน	37
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.4.1 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล	38
3.4.2 ออสซิลโลสโคป.....	39
3.4.3 กระบอกสำหรับใส่ดิน	40
3.4.4 ชุดสายน้ำเกลือ	40
3.4.5 Arduino Uno R3.....	41
3.4.6 Node MCU ESP8266 V.3.....	41
3.4.7 Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2.....	42
3.5 ดินตัวอย่างในการทดลอง.....	42
3.6 วิธีการเก็บผลทดลอง.....	43
3.6.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึม การกระจาย และการเก็บรักษา น้ำในดินทราย ดินเหนียว และดินร่วน.....	43
3.7 การวิเคราะห์ผลทดลอง.....	44
บทที่ 4	45
4.1 ผลการทดลองระยะห่างของโพรบที่มีผลของการวัด	45

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการแทรกซึม การกระจาย และการเก็บรักษาน้ำในดินที่ละ	
ระดับความลึก 10,15,20,25,30 เซนติเมตรจากผิวดิน.....	57
4.2.1. การทดลองในดินทราย.....	58
4.2.2. การทดลองในดินเหนียว.....	61
4.2.3. การทดลองในดินร่วน.....	65
4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดค่าความชื้น.....	69
4.4 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับความชื้นในดิน.....	72
4.5 การแสดงผลข้อมูลของ Data Studio	73
บทที่ 5	75
5.1 สรุปผล.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	83



สารบัญตาราง

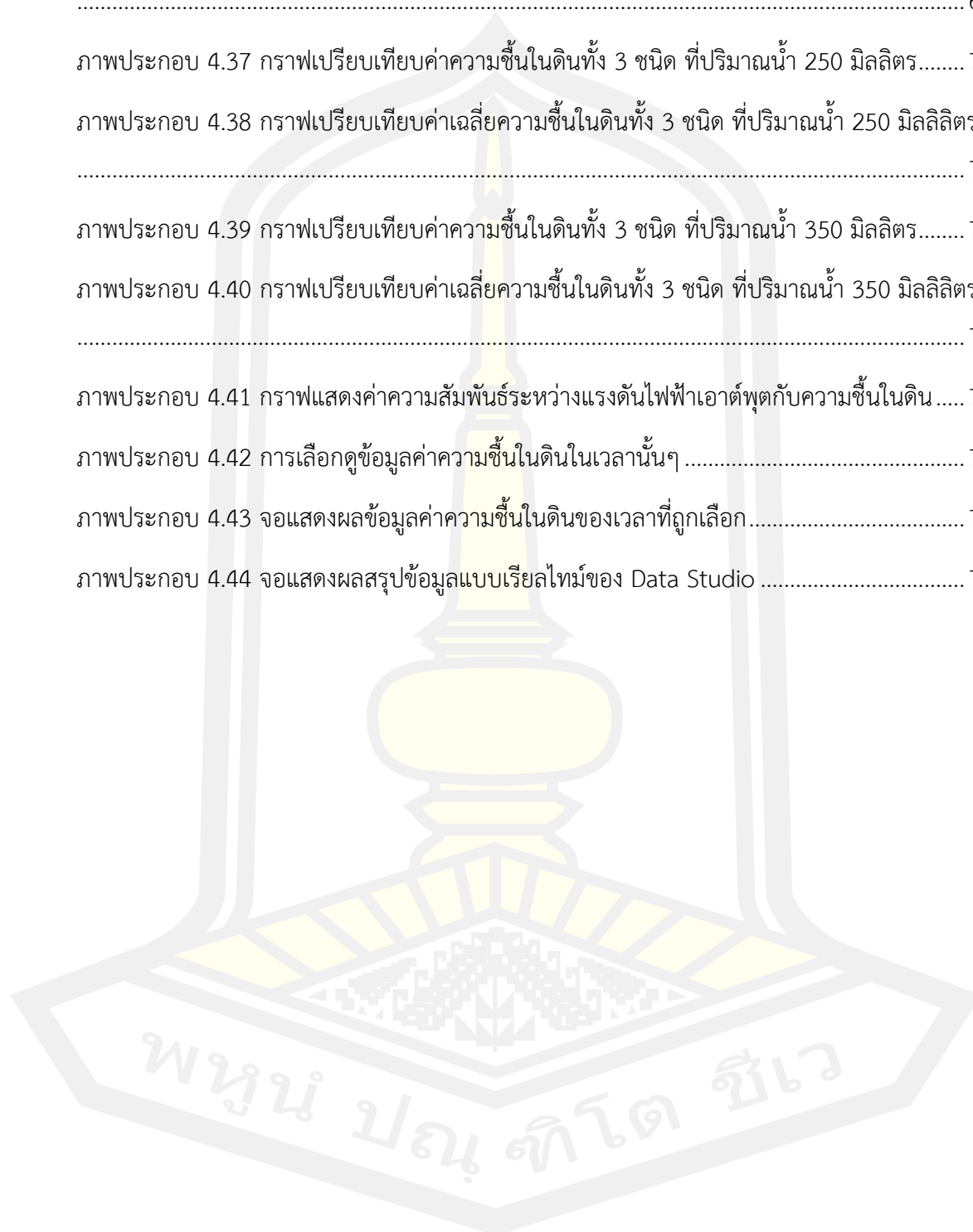
	หน้า
ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานการศึกษาค้นคว้าและวิจัย	4
ตารางที่ 3.1 การเก็บผลการทดลอง	43
ตารางที่ 3.2 การบันทึกผลการทดลองและการชลประทาน	44
ตารางที่ 4.1.1 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม.	46
ตารางที่ 4.4.2 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม.	47
ตารางที่ 4.4.3 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม.	48
ตารางที่ 4.4.4 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม.	49
ตารางที่ 4.4.5 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม.	50
ตารางที่ 4.4.6 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม.	51
ตารางที่ 4.4.7 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม.	52
ตารางที่ 4.4.8 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 ซม.	53
ตารางที่ 4.4.9 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม.	54
ตารางที่ 4.4.10 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม.	55
ตารางที่ 4.4.11 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม.	56

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 ส่วนประกอบของโครงสร้างดิน.....	7
ภาพประกอบ 2.2 การแบ่งแยกประเภทเนื้อดินตามสัดส่วนของเม็ดดินตามมาตรฐานกระทรวงเกษตร สหรัฐอเมริกา [16]	8
ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างของดินแต่ละประเภท [16]	9
ภาพประกอบ 2.4 การเรียงตัวของเม็ดดิน (soil aggregate) ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กและใหญ่ขึ้น ในดินซึ่งเป็นที่อยู่ของน้ำและอากาศในดิน.....	11
ภาพประกอบ 2.5 ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่พืชดูดไปจากดินในชั้นต่างๆ [18].....	12
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างตัวเก็บประจุ [25]	15
ภาพประกอบ 2.7 ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [26]	16
ภาพประกอบ 2.8 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [26].....	17
ภาพประกอบ 2.9 กราฟแสดงเฟสของอิมพีแดนซ์ที่เกิดจาก R และ L [28].....	18
ภาพประกอบ 2.10 วงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ด้วยวงจรตามแรงดัน [29].....	20
ภาพประกอบ 2.11 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ [29]	20
ภาพประกอบ 2.12 วงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ [29].....	21
ภาพประกอบ 2.13 สถาปัตยกรรมภายในของไมโครโปรเซสเซอร์ [34]	24
ภาพประกอบ 2.14 สถาปัตยกรรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR [35]	25
ภาพประกอบ 2.15 ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ขนาดเล็ก	26
ภาพประกอบ 2.16 การแสดงผลแผนที่ซึ่งได้จากการวัดข้อมูลความชื้นในพื้นที่เพาะปลูกผ่านเซนเซอร์ ในระบบของ GeoVantage [36].....	28
ภาพประกอบ 2.17 ตัวอย่างการแสดงผลแผนที่ของระบบติดตามตำแหน่ง รถโดยสารภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CUPopbus [36]	29
ภาพประกอบ 3.1 ต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ.....	37

ภาพประกอบ 3.2 ระบบการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน แบบหลายระดับ	37
ภาพประกอบ 3.3 Wiring Diagram Probe Sensing	38
ภาพประกอบ 3.4 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล [56]	39
ภาพประกอบ 3.5 ออสซิลโลสโคป [57]	39
ภาพประกอบ 3.6 การออกแบบกระบอกใส่ดินสำหรับใช้ในการทดลอง.....	40
ภาพประกอบ 3.7 ชุดสายน้ำเกลือ.....	40
ภาพประกอบ 3.8 Arduino Uno R3.....	41
ภาพประกอบ 3.9 Node MCU ESP8266 V.3	41
ภาพประกอบ 3.10 Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2	42
ภาพประกอบ 3.11 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	43
ภาพประกอบ 3.12 การเตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง.....	44
ภาพประกอบ 4.1 ภาพตัวอย่างแสดงการทดลองระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัด (1) ขณะอยู่ใน อากาศ (2) ขณะอยู่ในน้ำ.....	45
ภาพประกอบ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม.	46
ภาพประกอบ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม.	47
ภาพประกอบ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม.	48
ภาพประกอบ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม.	49
ภาพประกอบ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม.	50
ภาพประกอบ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม.	51
ภาพประกอบ 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม.	52
ภาพประกอบ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 ซม.	53
ภาพประกอบ 4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม.	54
ภาพประกอบ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม.	55
ภาพประกอบ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม.	56

ภาพประกอบ 4.36 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร	69
ภาพประกอบ 4.37 กราฟเปรียบเทียบค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร.....	70
ภาพประกอบ 4.38 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร	70
ภาพประกอบ 4.39 กราฟเปรียบเทียบค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร.....	71
ภาพประกอบ 4.40 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร	71
ภาพประกอบ 4.41 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับความชื้นในดิน.....	72
ภาพประกอบ 4.42 การเลือกดูข้อมูลค่าความชื้นในดินในเวลานั้นๆ	73
ภาพประกอบ 4.43 จอแสดงผลข้อมูลค่าความชื้นในดินของเวลาที่ถูกล็อก.....	74
ภาพประกอบ 4.44 จอแสดงผลสรุปข้อมูลแบบเรียลไทม์ของ Data Studio	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากผลการสำรวจของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [1] ในปี 2562 พบว่าในประเทศไทยทำการเพาะปลูกกว่า 149.24 ล้านไร่ แบ่งเป็น นาข้าว 68.71, สวนผลไม้/ไม้ยืนต้น 36.93, พืชไร่ 30.732, สวนผัก/ไม้ดอก/ไม้ประดับ 1.401, อื่นๆ 11.458 (หน่วย: ล้านไร่) และมีมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์กว่า 1.315 ล้านล้านบาท อย่างไรก็ตามพบว่าการทำเกษตรกรรมในประเทศไทย ณ ปัจจุบันยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช [2] ส่งผลให้พืชที่ทำการเพาะปลูกไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามที่ควรและให้ผลผลิตต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และประเทศไทยยังประสบกับปัญหาภัยแล้งซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ [3] เช่น ฝนทิ้งช่วง การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศหรือสาเหตุอื่นๆ ส่งผลให้เกษตรกรขาดทรัพยากรน้ำในการเพาะปลูก เมื่อพืชขาดน้ำจึงทำให้คุณภาพและผลผลิตทางการเกษตรลดลง สินค้ามีราคาแพงขึ้นส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจภายในประเทศ [3-4] อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตของประชาชน เช่น ดินขาดความชุ่มชื้นทำให้ต้นไม้ทั้งใบ เกิดเป็นใบไม้แห้งที่เป็นเชื้อเพลิงของไฟป่า [5] ควันไฟจากธรรมชาตินั้นได้พัดพาฝุ่นละอองขนาดเล็กไปยังชั้นบรรยากาศปกคลุมไปทั่วเมืองที่อยู่รอบข้าง ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ นอกจากนี้ยังมีหมอกควันฟุ้งกระจายทำให้การทำกิจกรรมประจำวันของผู้คนหรือสิ่งมีชีวิตมีความยากลำบาก และเสี่ยงต่อปัญหาด้านสุขภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นภัยแล้งจึงส่งผลกระทบเป็นวงกว้างต่อมนุษย์และเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างมาก

งานวิจัย [6] Michael D. Dukes และคณะได้ศึกษาผลกระทบของผลผลิตด้วยวิธีการชลประทานแบบปกติและแบบอัตโนมัติ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินบริเวณโซนรากพืชเพื่อรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่ตั้งไว้ ผลการทดลองพบว่าการควบคุมระบบชลประทานด้วยเซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นในดินแบบอัตโนมัติให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันกับการชลประทานแบบปกติ แต่การชลประทานแบบระบบอัตโนมัติมีความต้องการน้ำเพื่อการเพาะปลูกลดลงประมาณ 50% ดังนั้นการควบคุมค่าความชื้นในดินที่เหมาะสมตามความต้องการของพืชเพื่อไม่ให้มากเกินไปตามช่วงเวลาที่พืชต้องการก็จะส่งผลดีต่อการเพาะปลูก [7] และยังเป็นอีกหนึ่งในวิธีการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด [2-8] ส่งผลให้คุณภาพและผลผลิตทางการเกษตรมีเพิ่มมากขึ้น รายได้ของเกษตรกรและประเทศก็จะเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [9] นอกจากนี้ยังเป็น การส่งเสริมนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ของรัฐบาลที่มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการเกษตรใน

ลักษณะเกษตรกรรมสมัยใหม่ อาทิเช่น เกษตรแม่นยำที่ช่วยให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณภาพ และจำนวนที่เพิ่มขึ้น [10] ดังนั้นอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินเพื่อควบคุมค่าความชื้นในดินให้เหมาะสมกับความต้องการของพืชที่ทำการเพาะปลูกจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก [11] แต่ปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความชื้นในดินที่มีประสิทธิภาพ สามารถวัดได้หลายระดับความลึกยังคงมีราคาแพง [12] เช่น CropX Basic Sensor Tel Aviv, HOBOnet Multi-Depth Soil Moisture Sensor, EXTECH MO750, Fliwer Sensor, Edyn Wi-Fi Garden Sensor. ด้วยเหตุนี้จึงเกิดปัญหาที่ตามมา ก็คือกำลังซื้อของเกษตรกร ส่งผลให้มีการเข้าถึงหรือการนำเทคโนโลยีทางด้านนี้มาใช้อยู่ในระดับที่จำกัด ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าหาวิธีการหรือการต่อยอดจากงานวิจัยที่มีอยู่จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จากการศึกษางานวิจัยพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นดินมีหลากหลายเทคนิคได้แก่ Remote Sensing ,Hygrometric ,Capacitive ,Resistive ,EMI [13] เป็นต้น จากข้อมูลงานวิจัย [14] Hong Tiansheng และคณะ กล่าวว่าความชื้นในดินเป็นส่วนสำคัญของการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสภาวะการเจริญเติบโตและการผลิตที่สำคัญของพืช การวัดค่าความชื้นในดินเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการประหยัดน้ำในการเกษตร เพื่อทำให้เกิดระบบชลประทานทางการเกษตรแบบอัตโนมัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบเซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีประจุไฟฟ้า ความถี่สูง เน้นการออกแบบให้มีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก สามารถฝังในดินที่ระดับความลึกต่างๆ และง่ายต่อการโต้ตอบกับระบบชลประทานอัตโนมัติต่างๆ โดยระบบสามารถตรวจสอบค่าความชื้นในดินเพื่อการชลประทานแบบเรียลไทม์ได้

อย่างไรก็ตามเทคนิคที่กล่าวมาในข้างต้นมีประสิทธิภาพและราคาที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่มุ่งเน้นศึกษาการวัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีการเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นในดินอัตโนมัติ แบบหลายระดับความลึก เน้นการออกแบบให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาประหยัดเพื่อให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงได้ง่าย ด้วยการริเริ่มนำโพรบวัดค่าความชื้นในดินแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive moisture sensor V1.2) ที่มีราคาประหยัดและสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด มาพัฒนาใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3) และเก็บบันทึกข้อมูลด้วยระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยใช้ Node MCU ESP8266-WiFi V3 ส่งข้อมูลผ่านระบบ Wi-Fi ไปที่ Google Sheet เพื่อดึงข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ มาวิเคราะห์และแสดงผลบน Data Studio แบบเรียลไทม์ กล่าวโดยสรุปวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเทคโนโลยีที่มีสื่อการเรียนการสอนอย่างแพร่หลาย และสามารถเข้าถึงได้ง่ายมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินเพื่อให้เกษตรกรเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงคาดหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกษตรกรสามารถบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้มีประสิทธิภาพเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยยกระดับมาตรฐานการเกษตรในประเทศไทยให้สูงขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และราคาประหยัด
2. ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินที่จัดสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินทราย ดินเหนียว ดินร่วน และนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน

1.3 ความสำคัญของปัญหา

1. ความชื้นในดินมีความสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตของพืช ถ้าหากดินมีความชื้นน้อยหรือมากเกินไปต่อความต้องการของพืชชนิดนั้นๆ จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้มีผลผลิตต่ำกว่ามาตรฐานที่ควรจะเป็นจึงทำให้พืชผลทางการเกษตรมีราคาแพง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจภายในประเทศ
2. อุปกรณ์วัดความชื้นดินในปัจจุบันที่มีความแม่นยำสูง มักจะมีราคาแพง ยากต่อการเข้าถึงและใช้งานในภาคการเกษตร
3. เกษตรกรไม่มีข้อมูลที่จะใช้ในการจัดสรรทรัพยากรน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. ดินใช้ในการทดสอบคือ ดินทราย ดินเหนียว และดินร่วน เนื่องจากดินร่วนจัดเป็นเนื้อดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก [15]
2. ทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน ด้วยการจำลองการวัดค่าความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10,15,20,25,30 ซม. จากผิวดินเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของโปรบวัด
3. การพิจารณาในการทดลอง ได้แก่
 - 3.1 ระยะห่างของโปรบที่มีผลต่อการวัด
 - 3.2 ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินทราย ดินเหนียว ดินร่วนในที่มีความลึก 10,15,20,25 และ 30 ซม. จากผิวดิน
 - 3.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินของดินทราย ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบต้นแบบอุปกรณ์วัดความชื้นดินที่ประสิทธิภาพและราคาประหยัด
2. ได้ข้อมูลสำหรับใช้ในการวางแผนการจัดการทรัพยากรน้ำให้มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด
3. อุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับความลึก สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและเพิ่มคุณภาพสินค้าให้เกษตรกรได้
4. เกิดคลังข้อมูลโปรไฟล์ดินเพื่อช่วยให้เกษตรกรบริหารจัดการทรัพยากรน้ำได้ง่ายขึ้น
5. สามารถยกระดับมาตรฐานการเกษตรและช่วยให้เกษตรกรเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่ายขึ้น

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานการศึกษาค้นคว้าและวิจัย

รายการ	ระยะเวลา									
	ภาคการศึกษา 2/2563					ภาคการศึกษา 1/2564				
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ทบทวนและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←→									
2. ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน			←→							
3. สร้างต้นแบบและเตรียมการทดลอง					←→					
4. ทดลองและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น						←→				
6. เก็บผลการทดลอง						←→				

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานการศึกษาค้นคว้าและวิจัย (ต่อ)

รายการ	ระยะเวลา									
	ภาคการศึกษา 2/2563					ภาคการศึกษา 1/2564				
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
7. วิเคราะห์ข้อมูลสรุปผล							←→			
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และเผยแพร่ผลงานวิจัย						←→				

1.7 สถานที่ดำเนินงาน

1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีประจุไฟฟ้าที่สามารถวัดได้หลายระดับ ดังนั้นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อทดลองมีองค์ประกอบอยู่หลายส่วน จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับนิยามของความชื้นในดิน การชลประทาน การวัดค่าความชื้นในดินทั้งทางตรงและทางอ้อม ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับความชื้นในดิน เป็นต้น ดังนั้นเอกสารและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วย ทฤษฎี ข้อมูลของงานวิจัย รวมถึงความรู้พื้นฐาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช

ดิน หมายถึง วัตถุตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากผลของการผุพังสลายตัวของหินและแร่ต่างๆ ผสมคลุกเคล้ารวมกับอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์สารที่ได้มาจากการสลายตัวของเศษซากพืชและสัตว์จนเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะร่วนไม่เกาะกันแข็งเป็นหิน เกิดขึ้นปกคลุมพื้นผิวโลกอยู่เป็นชั้นบางๆ และเป็นที่ยึดเหนี่ยวในการเจริญเติบโตของพืช [15]

อภิมวล อนุภาคอาไฟ และคณะ [16] ดินเป็นสารเนื้อผสม (Heterogeneous Substances) ซึ่งประกอบด้วย แร่ธาตุอินทรีย์วัตถุ น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิต คุณสมบัติของดินไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและขนาดของอนุภาคดิน (Soil Particles) วัตถุต้นกำเนิดดิน ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ฯลฯ ซึ่งเป็นเหตุให้ดินในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน เช่น แตกต่างกันในเรื่องสีหรือในเนื้อของดิน เป็นต้น

2.1.1 ส่วนประกอบของดิน

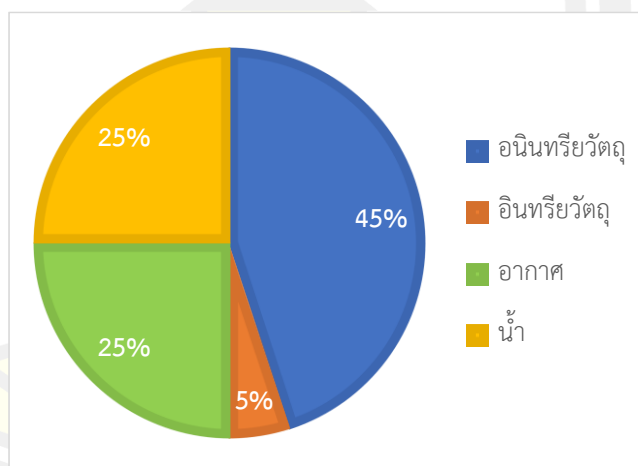
ดินเป็นสารที่ประกอบด้วย [16] แร่ธาตุ หิน กรวด ทั้งที่ผุพังสลายตัวแล้วและที่ยังไม่สลายตัวรวมทั้ง ซากพืช ซากสัตว์น้ำ อากาศ และสิ่งที่มีชีวิตทั้งหลายส่วนประกอบเหล่านี้ไม่มีสัดส่วนที่แน่นอน แตกต่างกันไป ตามชนิดของดิน นักวิชาการทางด้านดินได้แบ่งส่วนประกอบโครงสร้างของดินออกเป็น 4 ส่วน (ดังภาพประกอบ 2.1) คือ

1. ส่วนที่เป็นแร่ธาตุ หรือ อนินทรีย์วัตถุ เป็นส่วนที่เกิดจากการผุพังสลายตัวของแร่ต่างๆ ที่เป็นวัตถุต้นกำเนิดโดยขบวนการทางเคมี และทางกายภาพที่เกิดขึ้นเองโดยการกระทำของธรรมชาติ

2. ส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุ เป็นส่วนที่เกิดจากซากพืช ซากสัตว์ที่เน่าเปื่อยผุพังแล้ว และทั้งที่กำลังสลายตัวอยู่ทับถมกันบนดิน อินทรีย์วัตถุมีส่วนช่วยให้โครงสร้างของดินมีความร่วนซุยและดูดซับน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในดินและแหล่งธาตุอาหารพืชบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน

3. ส่วนที่เป็นน้ำ ในที่นี้หมายถึงน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือโพรงของดิน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถหาปริมาณน้ำในดินได้ด้วยการเก็บตัวอย่างดินมาชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งใหม่จะพบว่าน้ำหนักของดินน้อยลงกว่าเดิม ดังนั้น น้ำหนักที่หายไปคือน้ำที่อยู่ในช่องว่างดังกล่าว น้ำในดินมีประโยชน์ต่อพืชคือ เป็นตัวละลายแร่ธาตุต่างๆ ทำให้พืชสามารถดูดไปใช้เป็นอาหารได้ ถ้าน้ำในดินมีน้อยพืชอาจเกิดการขาดน้ำทำให้ใบและลำต้นเหี่ยวเฉาได้

4. ส่วนที่เป็นอากาศ อากาศอยู่ในดินได้ด้วยลักษณะเดียวกันกับน้ำคือ อยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือโพรงของดิน อากาศในดินประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณของอากาศในดินไม่คงที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของน้ำที่อยู่ในดิน



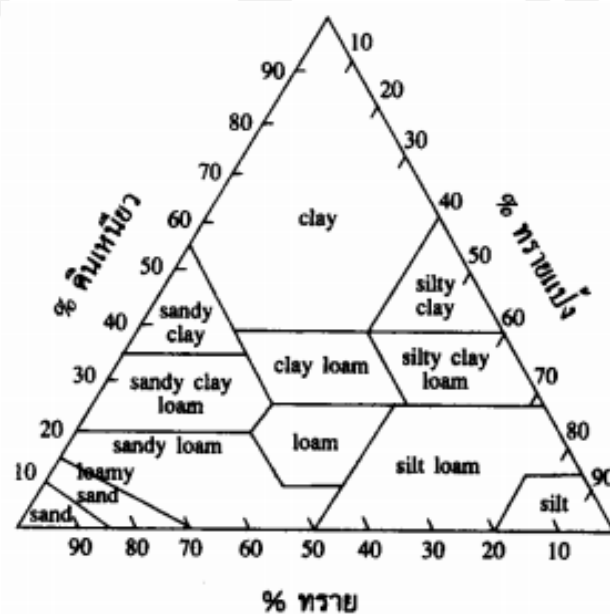
ภาพประกอบ 2.1 ส่วนประกอบของโครงสร้างดิน

2.1.2 อนุภาคของดินและเนื้อดิน

อนุภาคของดิน [16] คือ ส่วนที่เล็กมากๆของดิน ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันเข้าจึงเกิดเป็นเม็ดดิน ในที่นี้หมายถึงส่วนที่เป็นของแข็งคืออินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุ อนุภาคของดินส่วนที่

เป็นอนุภาคนิวตรียัตถุ์นั้นจะมีขนาดของอนุภาคไม่เท่ากัน แตกต่างกันอย่างน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอายุของดิน การผุพัง และวัตถุต้นกำเนิดของดิน นักวิชาการทางด้านดินจัดกลุ่มอนุภาคของดินไว้ดังนี้

1. กลุ่มที่มีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 2 มม. เรียกว่า อนุภาคทราย (Sand Particles)
2. กลุ่มที่มีขนาดตั้งแต่ 0.002 – 0.05 มม. เรียกว่า อนุภาคทรายแป้ง (Silt Particles)
3. กลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 เรียกว่า อนุภาคดินเหนียว (Clay Particles)



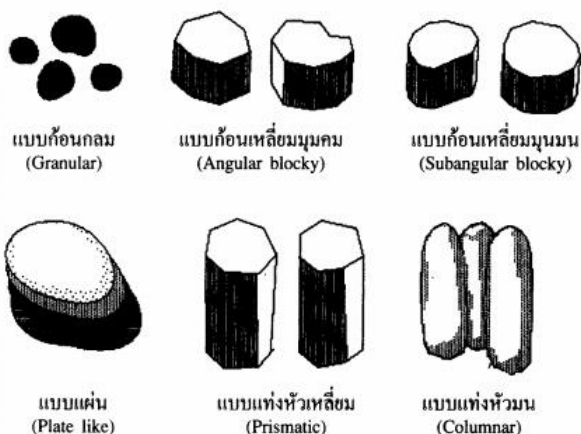
ภาพประกอบ 2.2 การแบ่งแยกประเภทเนื้อดินตามสัดส่วนของเม็ดดินตามมาตรฐานกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา [16]

นอกจากนี้ยังมีพวก หิน กรวด ที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มม. ขึ้นไปปะปนอยู่กับอนุภาคของดิน เรียกว่า หินกรวด (Gravels) อนุภาคที่เล็กที่สุดคือ อนุภาคของดินเหนียวจึงอยู่ในสภาพสารแขวนลอย (Colloid) ตามธรรมชาติและปะปนอยู่กับอนุภาคของทรายและทรายแป้งในดิน

2.1.3 โครงสร้างของดิน

โครงสร้างของดิน (Soil Structure) ตามภาพประกอบ 2.3 หมายถึง การเรียงตัวและเกาะตัวของเม็ดดินจนดิน กลายเป็นก้อน ซึ่งอาจเป็นรูปก้อนกลม ก้อนเหลี่ยม แบบแผ่น หรือแบบแท่ง โครงสร้างของดินจะเกี่ยวข้องกับงานชลประทานในส่วนของ อัตราการซึมของน้ำในดิน ความสามารถ

ในการอุ้มน้ำ การระบายน้ำ การถ่ายเทอากาศ ซึ่งในขั้นตอนสุดท้าย ตามหลักวิศวกรรมชลประทาน จะนำไปสู่การ เลือกรูปวิธีการให้น้ำชลประทาน และการกำหนดการให้น้ำแก่พืช



ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างของดินแต่ละประเภท [16]

2.1.4 ความถ่วงจำเพาะของเนื้อดิน

อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักดินต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่าเม็ดดิน จำแนกได้เป็นความถ่วงจำเพาะแท้จริงกับความถ่วงจำเพาะปรากฏ ดังนี้

$$R_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (2.1)$$

$$A_s = \frac{W_s}{V \gamma_w} \quad (2.2)$$

เมื่อ R_s = Real Specific Gravity = ความถ่วงจำเพาะแท้จริง

A_s = Apparent Specific Gravity = ความถ่วงจำเพาะปรากฏ

W_s = น้ำหนักของดินที่อบให้แห้งด้วยเตาอบ

V_s = ปริมาตรของเม็ดดินเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็ง

V = ปริมาตรของดินทั้งก้อน

γ_w = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

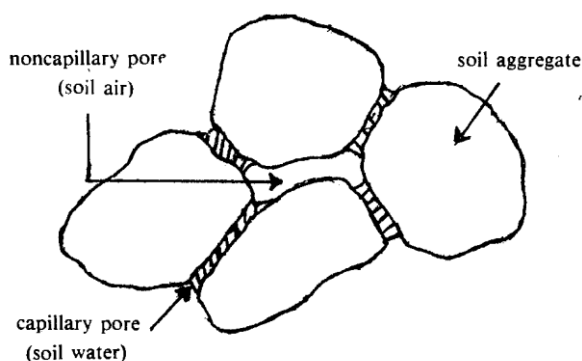
จะเห็นได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะแท้จริงและความถ่วงจำเพาะปรากฏ จะแตกต่างกันตรงวิธีคิดปริมาตรเท่านั้น โดยประโยชน์ของความถ่วงจำเพาะในงานด้านชลประทาน จะใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาณน้ำที่จะให้กับพืช โดยเปลี่ยนน้ำหนักเป็นปริมาตร เพื่อจะได้กำหนดระยะเวลาในการให้น้ำได้ถูกต้อง

2.1.5 ความชื้นในดิน

ธวัชชัย ณ นคร [17] ดินทุกชนิดจะมีน้ำประกอบอยู่เสมอ จะมากน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและเนื้อดิน บางส่วนของน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ น้ำหรือความชื้นในดินในที่นี้ หมายถึงน้ำที่อยู่ในช่องว่างของดินซึ่งอาจเป็นได้ทั้งของเหลวหรือแก๊สแต่น้ำที่มีความสำคัญต่อพืชมากที่สุดคือ น้ำที่อยู่ในสภาพของเหลว น้ำในดินไม่ใช่ น้ำบริสุทธิ์ แต่จะมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ตามสภาพแวดล้อมในดินและองค์ประกอบทางเคมีของดิน ปริมาณน้ำในดินในขณะใดขณะหนึ่งคือมวลสารซึ่งหายไปเมื่อนำดินมาอบที่อุณหภูมิ 100-110° C นาน 24-48 ชม. หรือจนน้ำหนักของดินคงที่

น้ำในดินอาจเป็นอย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายๆ อย่าง เช่น น้ำฝน น้ำค้าง ทิมะ น้ำใต้ดิน และน้ำชลประทาน เป็นต้น น้ำที่ได้มาเหล่านี้บางส่วนดินจะดูดซับไว้ในช่องว่างของดิน บางส่วนก็ไหลบ่าไปตามผิวดิน และบางส่วนก็ไหลซึมลึกลงไปในดินเกินกว่ารากพืชจะนำมาใช้ได้ น้ำส่วนที่ดินดูดซับไว้เรียกว่า Capillary Water ส่วนที่ซึมลึกลงไปในดินหรือส่วนที่ดินไปสามารถดูดซับไว้ได้เรียกว่า Gravitational Water หรือ Free Water น้ำประเภทหลังนี้คือ น้ำที่อยู่ในช่องว่างของดินขนาดใหญ่ ซึ่งจะไหลซึมลึกลงไปได้ดินตามแรงดึงดูดของโลก ส่วนน้ำประเภทแรกหรือ Capillary Water นั้นเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างในดินขนาดเล็กซึ่งแรงดึงดูดของโลกไม่สามารถดึงดูดให้ซึมลึกลงไปได้ดินได้ และเป็นน้ำซึ่งรากพืชสามารถนำมาใช้ได้

Capillary Water หรือปริมาณน้ำที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้เต็มที่ในที่นี้ เรียกว่าปริมาณน้ำที่ Field Capacity ของดินหรือน้ำที่ดินสามารถดูดซับไว้ที่ความดัน 1/3 บรรยากาศ กล่าวคือในช่องว่างของดินที่ดูดซับน้ำไว้แล้ว จะมีแรงดึงดูดประมาณ 1/3 บรรยากาศ หรือมากกว่าปริมาณน้ำในดินขั้นต่ำสุดหรือปริมาณน้ำในดินที่พืชนำมาใช้ไม่ได้ ซึ่งสังเกตจากพืชแสดงอาการเหี่ยวอย่างเห็นได้ชัดคือปริมาณน้ำที่ดูดซับไว้ด้วยแรงดึงดูด 15 บรรยากาศ (Wilting Point) ฉะนั้นประมาณน้ำในดินซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืชจริงๆ คือปริมาณของดินที่อยู่ระหว่างแรงดึงดูด 1/3-15 บรรยากาศ ซึ่งเรียกว่า Plant Available Water



ภาพประกอบ 2.4 การเรียงตัวของเม็ดดิน (soil aggregate) ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กและใหญ่ขึ้นในดินซึ่งเป็นที่อยู่ของน้ำและอากาศในดิน

การหาปริมาณน้ำหรือความชื้นของดินทำได้โดย 2 วิธีการใหญ่ๆ คือโดยทางตรงและทางอ้อม การหาค่าความชื้นในดินโดยทางตรงหาได้โดยวิธีการที่เรียกว่า Gravimetric Method โดยการเก็บตัวอย่างดินมาอบที่อุณหภูมิ 100-110° C จนดินแห้งหรือน้ำหนักคงที่ ถ้าปริมาณดินไม่มากนัก เช่น 200-300 กรัม จะใช้เวลาประมาณ 24 ชม. วิธีนี้ถือเป็นวิธีมาตรฐานแต่ใช้เวลาและแรงงานมากกว่าวิธีอื่น ความชื้นของดินจากวิธีการนี้หาได้จากสมการ (2.3)

$$\% \theta_w = \frac{100(M_1 - M_2)}{M_2} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\% \theta_w$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินโดยน้ำหนัก

M_1 = น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)

M_2 = น้ำหนักดินหลังอบที่ 100-110° C จนน้ำหนักคงที่ (กรัม)

ถ้าหากทราบความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk Density) ก็สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินโดยปริมาตรได้ โดยสมการ (2.4)

$$\% \theta_v = \% \theta_w \times p \quad (2.4)$$

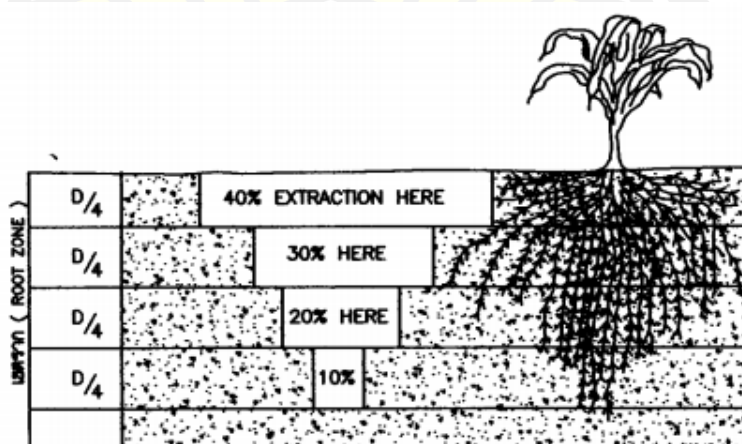
เมื่อ $\% \theta_v$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินโดยปริมาตร

p = ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัม/ลบ.ซม.)

การหาความชื้นของดินทางอ้อมอาจทำได้หลายวิธี เช่น Gypsum Block, Tensiometer, Neutron Probe, Resister, Induction, Capacitive

2.2 การจัดการทรัพยากรน้ำ

การพิจารณาว่าจะให้น้ำชลประทานเวลาไหนและปริมาณเท่าไรนั้น [18] จำเป็นต้องทราบความต้องการน้ำของพืช ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และปริมาณของน้ำชลประทานที่มีอยู่ โดยความต้องการน้ำของพืชในที่นี้หมายถึง การระเหยของน้ำจากผิวดินรวมกับการคายน้ำออกจากต้นพืชหรือการคายระเหยน้ำนั่นเอง ความต้องการน้ำของพืชแต่ละระยะการเจริญเติบโตจะไม่เท่ากัน และจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาวะภูมิอากาศเหนือดินด้วย ฉะนั้นความถี่ในการให้น้ำแก่พืชไม่จำเป็นต้องเหมือนกันตลอดฤดูกาลปลูก การให้น้ำที่มีประสิทธิภาพ (ภาพประกอบ 2.5) ต้องไม่มากเกินไปจนเกิดการไหลซึมลึกของน้ำลงไปใต้ดินเกินกว่ารากพืชจะสามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นเราต้องการทราบค่าความชื้นของดินที่ Field Capacity และ Wilting Point ณ ระดับความลึกต่างๆ เมื่อทราบค่าความชื้นของดินก็จะง่ายกว่าสมควรต่อการให้น้ำแก่พืชเมื่อไร การให้น้ำแก่พืชนั้นไม่ควรรอจนความชื้นของดินลดลงจนถึง Wilting Point หรือพืชเหี่ยวจึงให้น้ำ ในทางปฏิบัตินั้นควรให้น้ำเมื่อความชื้นของดินลดลง ณ ระดับใดระดับหนึ่งระหว่าง Field Capacity และ Wilting Point เช่น ให้น้ำเมื่อ plant available water ลดลง 20 ,40 หรือ 60% เป็นต้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชเหมือนกันว่าจะอ่อนไหวต่อการขาดน้ำมากน้อยแค่ไหน ที่สำคัญคือ ระยะการเจริญเติบโตของพืชซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาเป็นพิเศษคือ ระยะของพืชที่อ่อนไหวต่อการขาดน้ำมาก เช่น ระยะออกดอกไม่ควรปล่อยให้ถึงความชื้นของดินลดลงใกล้จุด Wilting Point เกินไป เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.5 ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่พืชดูดไปจากดินในชั้นต่างๆ [18]

สามารถ ใจเตี้ย [19] ทรัพยากรน้ำนับเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์รวมทั้งสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งพืชและสัตว์ เมื่อขาดน้ำมนุษย์และสิ่งมีชีวิตก็ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ น้ำเป็นสื่อหรือปัจจัยสำคัญของการเจริญเติบโต และเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์แก่สิ่งมีชีวิตทั้งมวล นอกจากนี้ น้ำยังเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศอีกด้วย สามารถ ใจเตี้ย ได้เสนอแนวทางการจัดการทรัพยากรน้ำบนฐานเชิงระบบนิเวศวัฒนธรรมด้วยการสนับสนุนการอนุรักษ์การใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนและยุติธรรม อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการพัฒนาอย่างยั่งยืนและบรรเทาความยากจนของประชาชนโดยอยู่บนพื้นฐานของความรู้ที่เหมาะสมที่เน้นในเรื่องของวิถีชีวิตที่ผูกพันกับระบบนิเวศในพื้นที่ที่คุ้นเคยตั้งแต่เกิด

ภาควิชา ทัศนศิลป์ [20] ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิผลในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรในเขตลุ่มน้ำชี แนะนำแนวทางการปรับปรุงประสิทธิผลการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรในเขตลุ่มน้ำชี โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิผลการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรในเขตลุ่มน้ำชีประกอบด้วย 3 ปัจจัย เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ปัจจัยด้านสังคม ปัจจัยด้านการบริหารจัดการ และปัจจัยด้านนโยบาย การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรในเขตลุ่มน้ำชีที่มีประสิทธิผล คือ 1. ควรมีการทบทวนแผนงาน 2. ควรมีรูปแบบการบริหารจัดการแบบผสมผสาน โดยกำหนดแผนงานและข้อตกลงร่วมในการบริหารจัดการให้มีความชัดเจน 3. ควรจัดตั้งสถาบันการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางด้านวิชาการพัฒนาหลักสูตร การศึกษา จัดการฝึกอบรมและเป็นสถานที่ฝึกปฏิบัติงาน 4. จัดทำพระราชบัญญัติการบริหารจัดการน้ำเพื่อให้มีกฎหมายแม่บทสำหรับการพัฒนา 5. จัดตั้งหน่วยงานกลางเพื่อบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ โดยการรวบรวมหน่วยงานที่ทำหน้าที่บริหารจัดการทรัพยากรน้ำมาอยู่หน่วยงานเดียวกัน 6. ควรประยุกต์รวมการจัดการน้ำในมิติภูมิปัญญาชาวบ้านเพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ในการจัดการน้ำที่เหมาะสมกับสภาพความเป็นจริงของแต่ละพื้นที่

2.3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับดิน

วรชัย สุกุลพจน์วรชัย และวรชัย ก้องกิจกุล [21] ศึกษาพฤติกรรมกรรมนำไฟฟ้าของดินที่ได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าความชื้นในดินและความหนาแน่นแห้ง โดยในการศึกษานี้พบว่าปริมาณของสมบัติทั้งสองชนิดดังกล่าวแปรผกผันกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน ซึ่งจากการทดสอบที่กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ดินนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ยังสามารถอ้างอิงได้จากเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และ การศึกษานี้ได้มีการสร้างสมการพหุนามแบบถดถอยของดินทั้งสองชนิดเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรม

การเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต้องการกำหนดได้

วกร สีสัมฤทธิ์ และคณะ [22] พิจารณาจากค่าเฉลี่ยจากผลการวัดค่าความต้านทานดินพบว่า ที่ระดับความชื้นต่ำสุดระดับ 1 มีค่าความต้านทานสูงสุดคือ $169.47 \text{ K}\Omega$ ที่ระดับความชื้นสูงสุด ระดับ 10 มีค่าความต้านทานต่ำสุด คือ $2.36 \text{ K}\Omega$ การเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานดินลดต่ำลง

สมกรณ์ ชัยวรารกรณ์ และคณะ [23] วิเคราะห์ความสัมพันธ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริก(k) ในน้ำยางพาราสดกับร้อยละเนื้อยางแห้ง (%DRC) จากการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัด %DRC ของน้ำยางพาราสดโดยวิธีตัวเก็บประจุแผ่นขนาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%DRC) ลดลงเมื่ออัตราส่วนหรือร้อยละของน้ำในน้ำยางพาราสดเพิ่มขึ้น
2. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน หรือร้อยละของน้ำในน้ำยางพาราสดเพิ่มขึ้น
3. ความสัมพันธ์ระหว่าง %DRC และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีรูปแบบสมการในลักษณะโพลีโนเมียลมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในช่วง $0.983 - 0.9877$
4. อุปกรณ์วัด %DRC ที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถใช้วัดความเข้มข้นน้ำยางพาราสดได้ โดยเกษตรกรผู้ทำสวนยางพารา ต้นทุนการผลิตต่ำ ซ่อมบำรุงและใช้งานง่าย

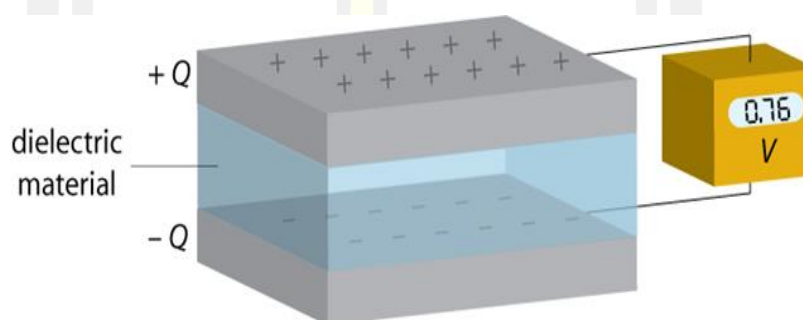
อัษฎางค์ บุญศรี และคณะ [24] นำเสนอการวิเคราะห์หาความต้านทานทางไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดระดับความชื้นที่อยู่ในดิน ในบทความวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบการตรวจวัดระดับความชื้นภายในดินโดยใช้คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในดินเปลี่ยนเป็นแรงดัน จากผลการทดสอบพบว่าระดับความชื้นภายในดินจากน้อยไปมากจะขึ้นอยู่กับสภาพความนำไฟฟ้า ซึ่งแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในดิน กล่าวโดยสรุปคือค่าความต้านทานภายในดินที่มีค่ามากจะทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในดินต่ำ ในทางกลับกันถ้าค่าความต้านภายในดินมีค่าน้อย จะทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในดินสูง สภาพของดินที่ได้จะมีลักษณะแฉะหรือมีความชื้นมาก

2.4 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ [25] หรือเรียกว่าคาปาซิเตอร์ (capacitor) หรือ คอนเดนเซอร์ (condenser) เรียกย่อว่า C เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ นำไปใช้ในวงจรกรองแรงดันไฟฟ้า วงจรกรองความถี่ เป็นต้น โครงสร้างภายในตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นโลหะตัวนำ 2 แผ่น วางห่างกันโดยมีสารที่เป็นฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริกกั้นอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

2.4.1 โครงสร้างตัวเก็บประจุ

โครงสร้างของตัวเก็บประจุตามภาพประกอบ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นซึ่งเรียกว่า “แผ่นเพลต” และคั่นกลางด้วย “แผ่นไดอิเล็กตริก” ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ, เซรามิก หรืออากาศ แผ่นไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดเราสามารถวัดค่าความเป็นฉนวนได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นๆ สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ (2.5)



ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างตัวเก็บประจุ [25]

$$C = \epsilon_r \frac{A}{4\pi d} \quad (2.5)$$

- เมื่อ C = ขนาดตัวเก็บประจุ (ฟารัด)
 ϵ_r = เป็นค่าคงที่ของฉนวนขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนนั้นๆ
 (dielectric's relative permittivity)
 A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ
 D = ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

ตัวแปรที่ทำให้ค่าของตัวเก็บประจุมากหรือน้อยมีอยู่ 3 ประการ คือ

1. พื้นที่แผ่นเพลตที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลตมากก็ยังมีค่าความจุมาก
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต ยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลตมากค่าความจุก็ยิ่งลดลง
3. ชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริก

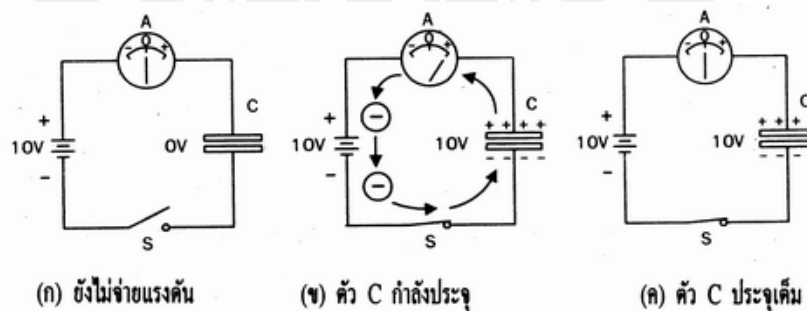
หน่วยของตัวเก็บประจุ คือ "ฟารัด" (Farad) เขียนสัญลักษณ์ย่อว่า "F" ในทางปฏิบัติถือว่าหนึ่งฟารัดมีค่ามาก ส่วนใหญ่ค่าที่ใช้จะอยู่ในช่วงไมโครฟารัดกับพิโกฟารัด

2.4.2 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ

หลักการทำงานของตัวเก็บประจุ [26] เมื่อนำตัวเก็บประจุไปต่อเข้ากับวงจรหรือแหล่งจ่ายแบบครบวงจร เราจะสังเกตเห็นว่ากระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านตัวเก็บประจุได้ (มองเป็น Open Circuit) ก็เพราะว่าในตัวเก็บประจุมีฉนวนกั้นอยู่ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดประจุไฟฟ้าที่ไม่สามารถไหลข้ามฉนวนไปได้ก็จะติดอยู่ที่แผ่นตัวนำทำให้ด้านนั้นมีประจุไฟฟ้าลบ (Electron) เยอะ ส่วนแผ่นตัวนำด้านตรงข้ามก็กลายเป็นประจุไฟฟ้าด้านบวกเพราะอิเล็กตรอนไหลไปอีกด้านหนึ่งจำนวนมาก การที่มีประจุติดอยู่ที่แผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุได้ก็เพราะว่าแต่ละด้านมีประจุไฟฟ้าที่เป็นขั้วตรงกันข้ามกันทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (electric field) ดึงดูดซึ่งกันและกัน (ขั้วบวกและขั้วลบดึงดูดกัน) ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บพลังงานศักย์ หรือ แรงแดันไว้ได้

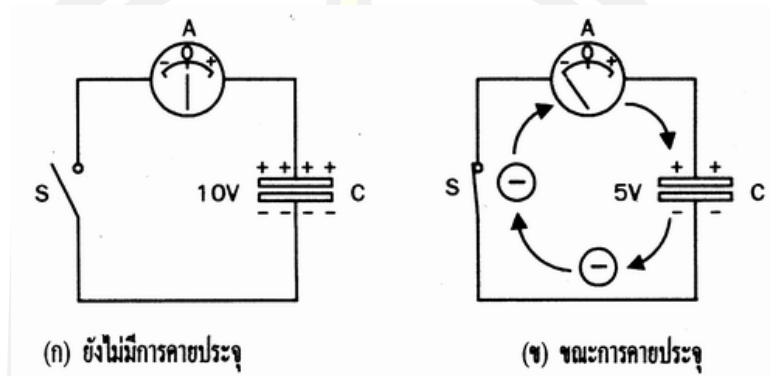
การทำงานของตัวเก็บประจุตัวเก็บประจุมีสถานะการทำงานอยู่ 2 สถานะคือ ประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ดังนี้

1. การประจุโดยการเก็บประจุก็ตามภาพประกอบที่ 2.7 คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุนั้นเอง ซึ่งอธิบายโดยละเอียดก็คือเมื่อจ่ายแรงดันให้กับตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปรวมกันที่แผ่นเพลตทำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไปผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาใกล้กันมันก็จะผลักกัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมีประจุเป็นบวกและลบปะปนกันอยู่เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูกผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น (เมื่อเทียบกับอีกด้าน)



ภาพประกอบ 2.7 ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [26]

2. การคายประจุของตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้ว (ดังภาพประกอบ 2.8) ถ้ายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจรระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นเพลตทางด้านบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า "การคายประจุ"



ภาพประกอบ 2.8 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [26]

2.4.3 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ

คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ ประกอบไปด้วยดังนี้

1. เก็บประจุไฟฟ้าในรูปสนามไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า
2. กั้นกระแสตรงไม่ให้ไหลผ่านหลังจากประจุเต็มแล้ว
3. กระแสนำแรงดัน 90°
4. กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ (X_C) หาได้จากสมการ (2.6)

$$X_C = \frac{1}{2\pi FC} \quad (2.6)$$

เมื่อ X_C = ค่าความต้านทานต่อกระแสสลับ

F = ความถี่ (Hz)

C = ค่าความจุ (Farad)

π = ค่าคงที่ (3.14)

5. ค่าเวลาคงที่ในการเก็บประจุ (Time Constant) หาได้จากสมการ (2.7)

$$T = R \times C \quad (2.7)$$

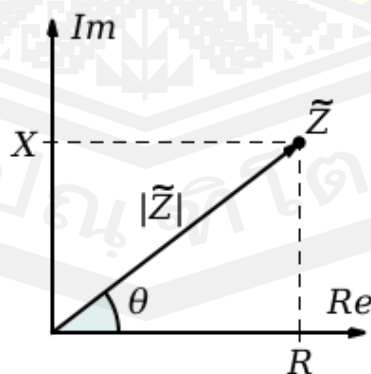
เมื่อ T = เวลา (วินาที)
 R = ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
 C = ค่าความจุ (ฟารัด)

2.4.4 อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์

อิมพีแดนซ์ (สัญลักษณ์ Z) [27] คือค่ารวมทั้งหมดที่ต้านกระแสในวงจรหรืออาจเรียกว่าเป็นสิ่งที่ขวางการไหลของกระแส (Impedes) คล้ายกับความต้านทานแต่ก็ไม่เหมือนกันทีเดียวเพราะต้องคำนึงถึงผลกระทบของความจุและการเหนี่ยวนำด้วยอิมพีแดนซ์มีหน่วยวัดเป็นโอห์ม สัญลักษณ์คือ Ω อิมพีแดนซ์มีความซับซ้อนมากกว่าความต้านทาน เพราะหากความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวความจุและตัวเหนี่ยวนำ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ อิมพีแดนซ์สามารถแยกเป็นสองส่วนคือ

1. ความต้านทาน R (เป็นส่วนที่คงที่โดยไม่คำนึงถึงความถี่)
2. รีแอกแตนซ์ X (เป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ เนื่องจากความจุและความเหนี่ยวนำ)

ความจุและความเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างกระแสและแรงดัน ทำให้ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ไม่สามารถรวมกันเป็นอิมพีแดนซ์ ด้วยวิธีง่ายๆ โดยต้องรวมกันทางเวกเตอร์ ซึ่งรีแอกแตนซ์จะตั้งฉากกับความต้านทาน (ดังภาพประกอบ 2.9)



ภาพประกอบ 2.9 กราฟแสดงเฟสของอิมพีแดนซ์ที่เกิดจาก R และ L [28]

การเคลื่อนเฟส (Phase shift) หมายถึงกระแสและแรงดันไม่ก้าวไปพร้อมกัน ให้ลองนึกถึงการประจุของตัวเก็บประจุ เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นศูนย์กระแสจะสูงสุด แต่เมื่อตัวเก็บประจุได้ประจุและได้ค่าแรงดันสูงสุดกระแสก็จะต่ำสุด การประจุและคลายประจุเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสลับกันโดยกระแสจะถึงค่าสูงสุดก่อนที่แรงดันถึงค่าสูงสุดเราจึงเรียกว่า “กระแสนำหน้าแรงดัน”

2.5 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์ [29] คือ วงจรกำเนิดความถี่ที่มีความสำคัญอย่างมากซึ่งถูกนำไปใช้รวมกับวงจรอื่น เช่น วงจรเข้ารหัส, วงจรถอดรหัส, วงจรผสมสัญญาณ, วงจรสวิตซ์ชิงคอนเวอร์เตอร์, วงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึง พื้นฐานการกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ของวงจรออสซิลเลเตอร์การวิเคราะห์และการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบต่างๆ

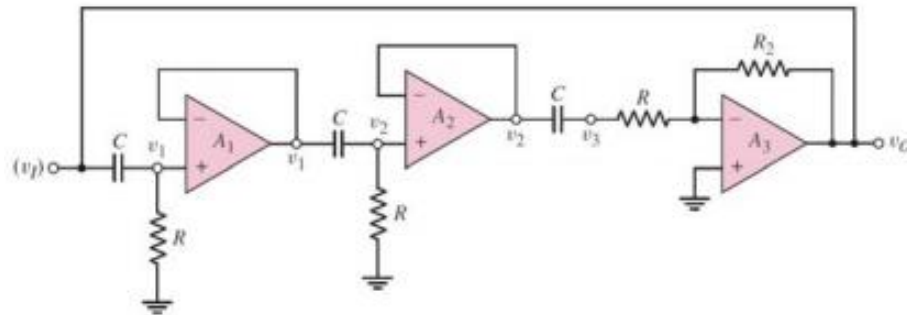
2.5.1 หลักการพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์คือวงจร ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณเอซีซึ่งวงจรออสซิลเลเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด 1. วงจรจูนออสซิลเลเตอร์ (Tuned Oscillator) 2. วงจรมัลติไวเบรเตอร์ (Multivibrator) วงจรจูนออสซิลเลเตอร์จะอาศัยหลักการพื้นฐานของการป้อนกลับแบบบวกซึ่งวงจรประกอบด้วยวงจรขยายและวงจรป้อนกลับที่เลือกความถี่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับผ่านวงจรป้อนกลับที่เลือกความถี่แล้วออกมาเสริมกับสัญญาณอินพุต แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรป้อนกลับแบบลบพื้นฐาน ซึ่งเราสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรูปปิดได้

2.5.2 วงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ (Phase-Shift Oscillator)

วงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ (Phase-Shift Oscillator) ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานวงจรขยายด้วยออปแอมป์ 3 วงจร ซึ่งต่อในลักษณะกลับเฟส และวงจรกรองด้วย RC 3 ภาค วงจรตามแรงดัน ถูกต่อระหว่างวงจรกรองด้วย RC เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบของโหลด วงจรขยายแบบกลับเฟสมีการเลื่อนเฟส -180° ซึ่งวงจร RC หนึ่งวงจรจะต้องมีการเลื่อนเฟส 60° องศา ดังนั้น เฟสที่ถูกเลื่อนของวงจร RC ต้องเท่ากับ 180° องศา เพื่อให้เกิดการป้อนกลับแบบบวกจากวงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ขาลบของออปแอมป์ A3 เสมือนต่อลงกราวด์ ดังนั้น วงจร RC ที่อยู่ระหว่างออปแอมป์ A2 กับ A3 จะเกิดฟังก์ชันเนื่องจากวงจร RC อีกสองวงจร เราสมมุติให้ความถี่ที่ออปแอมป์ทำงานได้มีความถี่ที่สูงกว่าการ

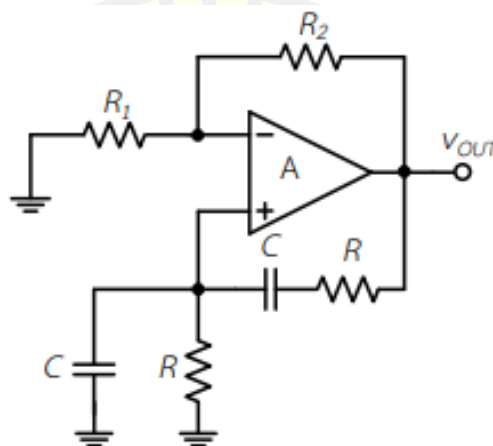
ตอบสนองเนื่องจากวงจร RC นอกจากนี้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เราถือว่าสัญญาณอินพุต (v_i) มีอยู่ที่ โหนดที่หนึ่ง ตามภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 วงจรเฟสชิฟออสซิลเลเตอร์ด้วยวงจรตามแรงดัน [29]

2.5.3 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ (Wien-Bridge Oscillator)

วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวงจรที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ วงจรประกอบด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสและวงจรป้อนกลับเลือกความถี่ RC เราสามารถวิเคราะห์วงจรด้วยการสมมุติว่ามีสัญญาณที่อินพุตของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส เนื่องจากวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสไม่มีการเลื่อนเฟส ดังนั้นวงจรป้อนกลับเลือกความถี่จะต้องไม่มีการเลื่อนเฟส เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขวงจรป้อนกลับแบบบวก



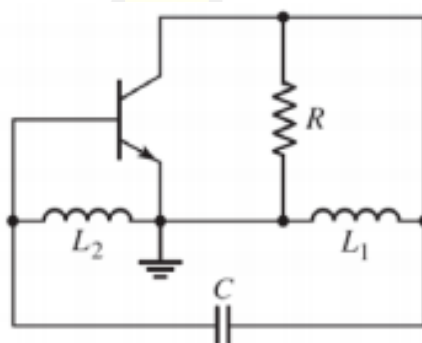
ภาพประกอบ 2.11 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ [29]

2.5.4 โคลพิตซ์ออสซิลเลเตอร์ (Colpitts Oscillator)

วงจรโคลพิตซ์ออสซิลเลเตอร์ซึ่งวงจรประกอบด้วยมอสเฟต เราสามารถใช้ทรานซิสเตอร์แบบ BJT ออกแบบวงจรโคลพิตซ์ออสซิลเลเตอร์ได้เช่นเดียวกัน วงจร LC เรโซแนนซ์ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณออสซิลเลตและแรงดันป้อนกลับคือแรงดันที่ถูกแบ่งมาจาก C1 และ C2 ตัวต้านทาน R คือตัวกำหนดอัตราขยายที่จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ การสมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่ความถี่สูงมากซึ่งเพียงพอต่อการกำเนิดสัญญาณและความถี่ที่จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภายนอกเพียงอย่างเดียว

2.5.5 วงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ (Hartley Oscillator)

วงจรเทียบเคียงทางเอเชียของวงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์แบบบีเจที (Transistor BJT) ซึ่งเราสามารถใช้ออสเฟตแทนบีเจทีได้วงจรประกอบด้วย วงจร LC เรโซแนนซ์เพื่อสร้างความถี่ออสซิลเลเตอร์และแรงดันป้อนกลับเท่ากับแรงดันแบ่งระหว่าง L1 และ L2



ภาพประกอบ 2.12 วงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ [29]

2.5.6 คริสตัลออสซิลเลเตอร์ (Crystal Oscillator)

คริสตัลออสซิลเลเตอร์คือ เพียโซอิเล็กทริกส์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นแร่คริสตัล เช่น แร่ควอตซ์ ซึ่งจะมีหลักการคือ เมื่อมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวผลึกคริสตัลจะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ทางกลไฟฟ้า ทำให้เกิดสัญญาณเอเชียทางเอาต์พุต การเกิดออสซิลเลตจะคงที่เมื่อเวลาและอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าที่กำหนดซึ่งสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ความถี่ที่เกิดการออสซิลเลตสามารถหาได้จากขนาดของคริสตัล หรือ กล่าวได้ว่า คริสตัลออสซิลเลเตอร์จะถูกกำหนดให้มีความถี่คงที่

2.5.7 วงจรรวมกำเนิดความถี่

วงจรรวม (Integrated circuit) ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณโดยที่เราสามารถออกแบบเพื่อให้สัญญาณมีความถี่ตามที่เราต้องการได้ด้วยการใช้ไอซีไทเมอร์ 555 คือไอซีกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในวงจรดิจิทัล และในวงจรที่มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบดิจิทัลและระบบอนาล็อก ซึ่งจะให้ค่าเวลาที่เที่ยงตรงและมีเสถียรภาพสูง โดยที่เวลาถูกออกแบบได้ด้วยอุปกรณ์ภายนอกคือ ตัวต้านทาน 1 ตัว และตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้แรงดันแหล่งจ่ายได้ย่านกว้าง และเมื่อใช้ระดับเดียวกับ TTL เอาต์พุตของไทเมอร์ 555 จะสามารถเชื่อมต่อกับวงจร TTL ได้

2.5.8 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์

พัฒนา อินทนิ และคณะ [30] ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนซึ่งถูกออกแบบโดยใช้โมสทีไบแอสแบบเกต-บอดี (VTMOS) วงจรจะมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังงานต่ำ เหมาะสำหรับการออกแบบวงจรรวมความจุสูงมาก (VLSI) สมรรถนะจากการออกแบบวงจรโดยใช้เทคโนโลยีระดับ 90 นาโนเมตร ที่แรงดันไฟเลี้ยง 0.2 โวลต์ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าที่ความถี่ 1.9 เมกะเฮิร์ตซ์ วงจรออสซิลเลเตอร์สิ้นเปลืองพลังงานเพียง 8.26 พิโกวัตต์ และวงจรสามารถกำเนิดความถี่ได้สูงสุดที่ 104 เมกะเฮิร์ตซ์ และมีการสิ้นเปลืองพลังงาน 80.3 ไมโครวัตต์

อาร์มภ์ กิตติพงษ์วัฒนา และคณะ [31] เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการหายานการลือกของวงจรรวมความถี่ที่อาศัยวงจรรวมออสซิลเลเตอร์แบบพอนคลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือก โมเดลที่นำเสนอสามารถชี้ให้เห็นว่าอัตราการหารความถี่ที่เหมาะสมของวงจรรวมออสซิลเลเตอร์แบบพอนคลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือกเป็นจำนวนคี่ ยานการลือกของวงจรรวมที่ได้มาจากโมเดลนั้นนอกจากจะหามาได้จากอิทธิพลของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แล้ว แต่ยังสามารถหามาได้จากสัญญาณอินพุตไม่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อีกด้วย

อิทธิพล กันศิริ และมนตรี คำเงิน [32] วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามโดยใช้วงจรรวมโอเปอเรชันแนลทรานส์ซิสแตนท์ แอมพลิไฟเลอร์ (Operational Trans resistance Amplifier: OTRA) เป็นวงจรรวมพื้นฐาน วงจรรวมออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ กำเนิดสัญญาณได้แม่นยำ เงื่อนไขของการออสซิลเลทและความถี่ของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้อิสระจากกัน ด้วยการกำหนดค่าอุปกรณ์พาสซีฟ ขั้วสัญญาณเอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งทำให้สามารถต่อใช้งานกับโหลดได้

โดยไม่ต้องการวางจรรยาบรรณ แต่ข้อเสียหลักของวงจรถ่าย OTRA เป็นวงจรถ่ายพื้นฐานคือต้องการอุปกรณ์พาสซีฟแบบลอยตัว

อนุชา แก้วพูลสุข [33] ประยุกต์ใช้วงจรถ่ายแบบพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดผลต่าง ความถี่ของสัญญาณภายในเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ จุดเด่นของวิธีการดังกล่าวนี้คือความเรียบง่ายในการต่อวงจร นอกจากนี้วงจรถ่ายแบบพื้นฐานยังเป็นวงจรถ่ายที่มีการผลิตเป็นไอซีสำเร็จรูปที่มีราคาถูกและหาซื้อได้โดยง่าย

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ [34-35] (อังกฤษ: Microcontroller มักย่อว่า μC , uC หรือ MCU) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอา ซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุส่วนประกอบทั้งหมดเข้าไว้ในบอร์ดเดียวกัน

2.6.1 โครงสร้างและระบบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ ระบบคอนโทรลขนาดเล็กเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ ระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะกับงานต่างๆ และยังสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุม Input/Output เพื่อสั่งงานให้ไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ได้อีกด้วย ซึ่งก็นับว่าเป็นระบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งทางด้านดิจิทัลและอนาล็อกยกตัวอย่าง เช่น ระบบสัญญาณตอบรับอัตโนมัติ, ระบบบัตรคิว, ระบบตอกบัตรพนักงาน และอื่นๆ ยิ่งระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในยุคปัจจุบันนั้นสามารถทำการเชื่อมต่อกับระบบเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้อีกด้วย ดังนั้นการสั่งงานจึงไม่ใช่แค่หน้าแผงวงจรแต่อาจจะเป็นการสั่งงานอยู่คนละซีกโลกผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก็ได้

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ (ดังภาพประกอบ 2.13) สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

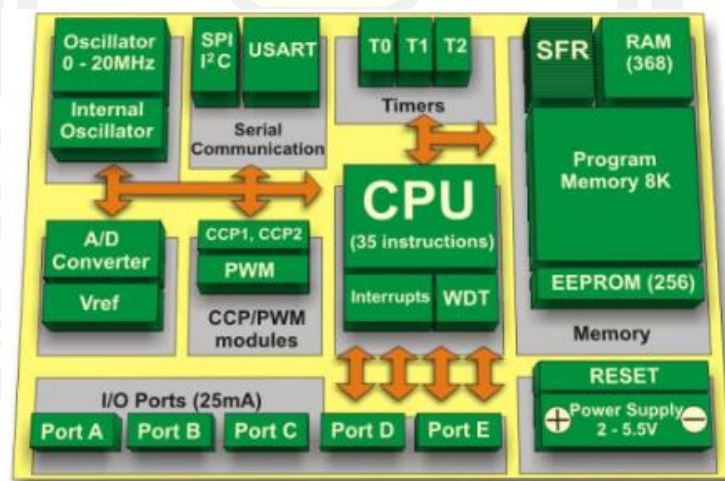
1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit)
2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือหน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เช่น Flash Memory ลักษณะการทำงานของหน่วยความจำนี้ เป็นหน่วยความจำที่อ่าน-เขียนได้ด้วยไฟฟ้า เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่ง

คือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกับกระดาดขุดในการคำนวณของ ซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงานแต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ในการทำงานข้อมูลจะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับ ไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่นั้น หน่วยความจำข้อมูลมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงและเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยงก็ตาม

3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก พอร์ตอินพุตรับสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปแสดงผลที่พอร์ตเอาต์พุต เช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus)

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

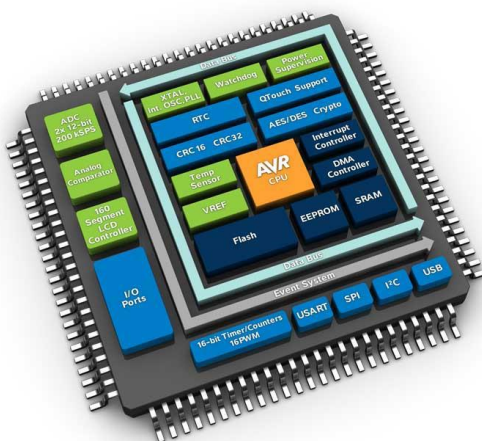


ภาพประกอบ 2.13 สถาปัตยกรรมภายในของไมโครโพรเซสเซอร์ [34]

2.6.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ AVR

AVR เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลหนึ่งผลิตโดยบริษัท Atmel AVR อยู่ในรูปแบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) ตามภาพประกอบที่ 2.14 ซึ่งมีลักษณะสถาปัตยกรรมเป็นแบบ RISC (Reduced Instruction Set Computing) มีความเร็วในการประมวลผล 1 คำสั่งต่อ 1 สัญญาณนาฬิกา ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำโดยบางรุ่นใช้ไฟเพียง 1.5 V - 5.5 V เท่านั้น และยังมีโหมดประหยัดพลังงานอีก 6 โหมด

ภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายภาษา เช่น ภาษาเครื่อง, Assembly, BASIC, C เป็นต้น แต่ละภาษาก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ภาษาที่เป็นที่นิยมคือภาษา C เนื่องจากเขียนง่าย แก้ไขเปลี่ยนแปลงได้ง่าย โปรแกรมเขียนภาษา C สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega48 นั้นนิยมใช้โปรแกรม MikroC. for AVR เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่ายและมีไลบรารีให้มาพร้อมด้วย

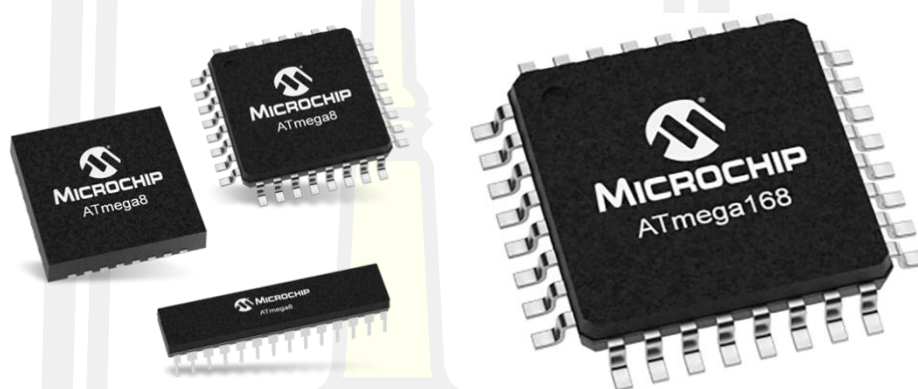


ภาพประกอบ 2.14 สถาปัตยกรรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR [35]

2.6.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

Arduino เป็นภาษาอิตาลี โดยเป็นชื่อโครงการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในรูปแบบ Open Source คือวิธีการในการออกแบบพัฒนาและแจกจ่ายสำหรับต้นฉบับของสินค้าหรือความรู้โดยเฉพาะ ซอฟต์แวร์แบบ Open Source ถูกพิจารณาว่าเป็นรูปแบบหนึ่งในการออกแบบและแผนการในการดำเนินการโดย Open Source เปิดโอกาสให้บุคคลอื่นนำเอาระบบไปพัฒนาต่อได้ ต่อมาการพัฒนาจากโครงการ Open Source แต่เดิมของ AVR ที่ชื่อ Wiring โดยโครงการ Wiring ใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega128 ซึ่งมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น เป็นชิปที่มีตัวถังแบบ SMD ทำให้นำมาใช้งานยากเพราะตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็กเกินไป ทำให้ไม่สะดวกในการต่อใช้งานจริง มีขาอินพุตและเอาต์พุตจำนวนมากเกินไป ตัวบอร์ดมีขนาดใหญ่เกินไป ไม่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นเรียนรู้ด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงทำให้ไม่ได้รับความนิยมในระยะต่อมาที่ทีมงาน Arduino จึงได้นำโครงการ Wiring มาพัฒนาใหม่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ขนาดเล็ก (ดังภาพประกอบ 2.15) คือ ATmega8 และ ATmega168 ทำให้ได้รับความนิยมจนถึงปัจจุบัน



ภาพประกอบ 2.15 ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ขนาดเล็ก

2.7 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) [36] เป็นกรอบแนวคิดของระบบโครงข่ายที่รองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ หลากหลายชนิด ตั้งแต่ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ อุปกรณ์โครงข่าย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซ็นเซอร์ และวัตถุต่างๆ เข้าด้วยกันอันเป็นผลให้ระบบต่างๆ สามารถติดต่อสื่อสารและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ทั้งยังเป็นผลให้มนุษย์สามารถเข้าถึงข้อมูลได้หลากหลายยิ่งขึ้น ควบคุมอุปกรณ์และระบบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น IoT อาจถือเป็นแนวคิดใหม่ที่มีการกล่าวถึงไม่นานมานี้ แต่ IoT เป็นผลสืบเนื่องของการพัฒนาระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างโครงข่ายเพื่อเชื่อมโยงอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานแตกต่างกันให้สามารถสื่อสารกันได้โดย IoT จะเปิดโอกาสให้มีการเชื่อมต่อในรูปแบบที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และรองรับอุปกรณ์ที่พัฒนาโดยผู้ผลิตที่มีเทคโนโลยีแตกต่างกันมากกว่าเดิม ในปัจจุบันสามารถจัดกลุ่มการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ได้ตามรูปแบบดังต่อไปนี้

1. การเชื่อมต่อผ่านอุปกรณ์สื่อสารระยะสั้น (Short-Range Devices) เป็นรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระยะสั้นมากโดยใช้กำลังส่งต่ำมากเหมาะสำหรับการสื่อสารในพื้นที่ครอบคลุมขนาดเล็ก ซึ่งอยู่ในลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ (peer-to-peer) หรือการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายก็ได้ ตัวอย่างของการเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ Wi-Fi ,Bluetooth ,Z-Wave ,ZigBee ฯลฯ

2. การเชื่อมต่อผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นรูปแบบการให้บริการที่มีพื้นที่ครอบคลุมโดยกว้าง อาศัยการเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องลูกข่าย IoT เข้ากับโครงสร้างพื้นฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีอยู่แล้ว ตัวอย่างของการเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าวได้แก่ เทคโนโลยี NB-IoT และ LTE-M

3. การเชื่อมต่อผ่านโครงข่าย LPWAN เป็นรูปแบบการเชื่อมต่อผ่านโครงข่ายกำลังส่งต่ำบริเวณกว้าง Low Power Wide Area Network (LPWAN) โดยเน้นใช้งานในลักษณะการสื่อสารแบบ Narrow Band หรือ Ultra Narrow Band ที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำมาก ประหยัดพลังงานมาก และมีราคาอุปกรณ์ต่อหน่วยที่ต่ำ ตัวอย่างของการเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าวได้แก่ LoRaWAN, SigFox, และ Ingenu ฯลฯ

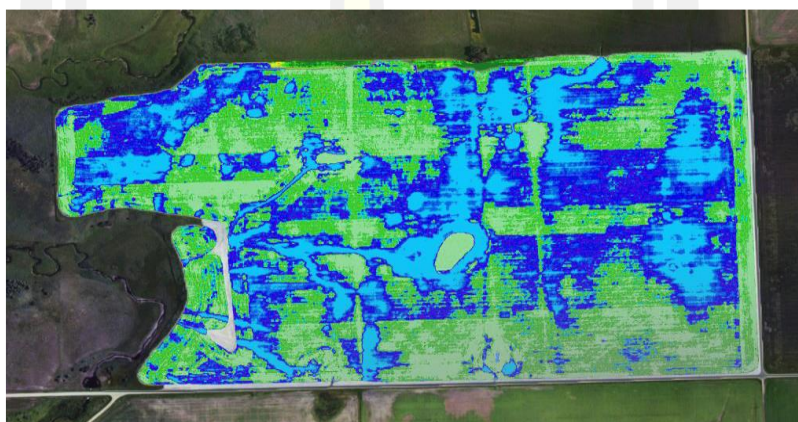
4. การเชื่อมต่อผ่านข่ายสื่อสารดาวเทียมซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่มีพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการที่กว้างมาก แต่การเชื่อมต่อดังกล่าวจะมีระยะเวลาการตอบสนองที่ช้า (latency) กว่า การเชื่อมต่อรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากระยะเวลาที่สัญญาณเดินทางไป-กลับระหว่างอุปกรณ์สื่อสารภาคพื้นโลกและดาวเทียม

2.7.1 การประยุกต์ใช้งาน Internet of Things

ความสามารถในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่หลากหลายเข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตเปิดโอกาสให้มีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายและกว้างขวางมาก โดยรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆ จำนวนมากเข้ากับโครงข่ายจะช่วยให้สามารถตรวจวัดข้อมูลที่หลากหลายประเภทประเภทได้เป็นจำนวนมาก ช่วยให้นำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์และแสดงผลแบบกราฟฟิกเพื่อช่วยในการตัดสินใจได้เมื่อนำระบบดังกล่าวผนวกเข้ากับระบบ Big Data จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อน มีจำนวนมาก และทันเหตุการณ์ (real-time) ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งาน Internet of Things ในภาคส่วนหลักของการผลิตในประเทศไทย มีดังต่อไปนี้

1. การเกษตรแม่นยำ (Precision Farming) คือการทำงานร่วมกันของระบบเซ็นเซอร์ที่วัดความชื้น ปริมาณแสงแดด อุณหภูมิ ระบบ ฐานข้อมูลพีช และระบบให้น้ำ ปรับปริมาณแสง และระบบปรับอุณหภูมิ ที่ทำงานสอดคล้องกันเพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

ของพืชมากที่สุดและแม่นยำที่สุด ระบบดังกล่าวนอกจากจะช่วยให้เกษตรกรประหยัดและใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น ยังช่วยให้เกษตรกรสามารถประมาณการช่วงเวลาเก็บเกี่ยวและปริมาณพืชผลที่จะได้อีกด้วย โดยภาพประกอบที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของการรวบรวมและประมวลผลปริมาณความชื้นในพื้นที่เพาะปลูกที่เก็บจากโครงข่ายของเซนเซอร์ในระบบ Precision Farming ที่ช่วยเฝ้าระวังความชื้นและความแห้งแล้ง โดยพื้นที่สีฟ้าแสดงพื้นที่ที่มีความชื้นสูง พื้นที่สีเขียวแสดงพื้นที่ที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งการแสดงผลดังกล่าวจะช่วยให้เกษตรกรสามารถตัดสินใจได้ดีขึ้นสำหรับการควบคุมปริมาณน้ำ



ภาพประกอบ 2.16 การแสดงผลแผนที่ซึ่งได้จากการวัดข้อมูลความชื้นในพื้นที่เพาะปลูกผ่านเซนเซอร์ในระบบของ GeoVantage [36]

2. อินเทอร์เน็ตอุตสาหกรรม (Industrial Internet) คือโครงข่ายข้อมูลขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องจักร เครื่องวัดและระบบการควบคุมในระบบอุตสาหกรรมเข้าด้วยกัน การส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายจะช่วยให้อุปกรณ์และระบบต่างๆ มีการทำงานที่แม่นยำสามารถทำงานสอดคล้องกันได้โดยไม่ต้องมีการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพของเครื่องจักรเช่น อุณหภูมิ การสั่น การหมุน นอกจากนี้จะช่วยตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักรได้และยังช่วยใช้คาดการณ์เวลาที่จำเป็นต้องเปลี่ยนอะไหล่ของอุปกรณ์ก่อนจะถึงเวลาเสียหายได้ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอะไหล่ใหม่โดยไม่จำเป็นได้ นอกจากนี้การเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างร้านสะดวกซื้อ ระบบโลจิสติกส์ และโรงงาน จะช่วยให้สามารถบริหารการผลิตและกระจายสินค้าให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งประเทศไทยในฐานะที่มีสัดส่วนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมที่สูง จะมีโอกาสได้ประโยชน์จากการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนที่ไม่จำเป็น

3. ระบบคมนาคมและการจัดการโลจิสติกส์ คือโครงข่าย IoT จะเข้ามามีส่วนช่วยในการพัฒนาระบบคมนาคมและการจัดการโลจิสติกส์โดยช่วยสนับสนุนให้มีการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างยานพาหนะด้วยกัน หรือระหว่างยานพาหนะและระบบควบคุมการจราจรอื่น เช่น ระบบสัญญาณจราจร ระบบข้อมูลสภาพจราจร หรือการนำเอาระบบดังกล่าวมาใช้กับระบบขนส่งมวลชนที่จะช่วยให้การบริการมีความปลอดภัย สะดวกและตรงเวลามากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การนำระบบดังกล่าวไปใช้ในการขนส่งสินค้า จะทำให้สามารถทราบตำแหน่งยานพาหนะ ทราบสถานการณ์รับ-ส่งสินค้า อันส่งผลให้การจัดการสินค้าคงคลังมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างของการใช้งานระบบติดตามยานพาหนะในประเทศไทยแสดงในภาพประกอบ 2.17



ภาพประกอบ 2.17 ตัวอย่างการแสดงผลแผนที่ของระบบติดตามตำแหน่ง รถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CUPopbus [36]

4. ระบบการจัดการพลังงานและสาธารณูปโภค (Utility Management) คือระบบการจัดการพลังงานและสาธารณูปโภคที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีการตรวจวัดที่แม่นยำการประมวลผลในภาพรวม และการประมาณการที่มีความเชื่อถือได้ ระบบ IoT จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในลักษณะการตรวจวัดระยะไกล (telemetry) เช่น ระบบ Smart Meter ซึ่งมีความสามารถในการวัดปริมาณการใช้สาธารณูปโภค หรือวัดคุณภาพสาธารณูปโภค ก่อนจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังหน่วยประมวลผลกลางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในภาพรวมต่อไป ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานประเภทนี้ คือ บริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณการใช้งานพลังงานไฟฟ้าและรวบรวมข้อมูลเพื่อประมาณการค่าอุปสงค์ (demand forecast) การใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมการจ่ายไฟฟ้า การวางแผนสร้างโรงไฟฟ้าจัดการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และการคิดราคาค่าไฟฟ้าแบบสอดคล้องกับค่าอุปสงค์-อุปทาน

5. ระบบสาธารณสุขอัจฉริยะ (Smart Health) คือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อระบบสาธารณสุขอัจฉริยะสามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ IoT ที่เก็บข้อมูลสุขภาพและสัญญาณทางร่างกาย (bio signals) เช่น สัญญาณชีพจร ความดันโลหิต คุณภาพการนอน การเคลื่อนไหว การหายใจ ผ่านการใช้อุปกรณ์สวมใส่ (wearable devices) เพื่อรวบรวมและประมวลผลออกมาเป็นข้อมูลสุขภาพและอาการเจ็บป่วย ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการเจ็บป่วยที่มีประโยชน์ต่อการวินิจฉัยก่อนที่คนไข้มาถึงการดูแลของแพทย์ การคาดการณ์และการวินิจฉัยการเจ็บป่วยล่วงหน้า (predictive diagnostic) การแจ้งเตือนการเจ็บป่วยทันทีและระบบติดตามการแพร่กระจายของโรค ซึ่งข้อมูลและค่าสถิติการเจ็บป่วยและสุขภาพของกลุ่มประชาชนโดยรวมจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนทางสาธารณสุข

6. ระบบเทคโนโลยีการเงิน (Fintech) คือเทคโนโลยี IoT สามารถเข้ามามีบทบาทสนับสนุนเทคโนโลยีทางการเงินได้หลายรูปแบบ เช่น ระบบการจ่ายเงินอัตโนมัติ (auto-payment) ในร้านค้าปลีก ระบบการจ่ายเงินโดยผ่านอุปกรณ์สวมใส่ (wearable devices) และโทรศัพท์เคลื่อนที่รวมถึงสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม ในงานเกษตรกรรม เพื่อสั่งซื้อและจ่ายเงินวัสดุอุปกรณ์ วัตถุดิบอย่างอัตโนมัติ นอกจากภาคส่วนที่เกี่ยวข้องประเทศไทยยังสามารถนำ Internet of Things มาช่วยสนับสนุนการสร้างคุณค่าและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการให้บริการในภาคส่วนอื่น เช่น การท่องเที่ยว ค้าปลีก และการจัดการข้อมูลกลางภาครัฐ

7. ผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจของ IoT จะเห็นได้ว่าโครงข่าย IoT สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายระดับและกว้างขวาง ยิ่งไปกว่านั้นยังใช้ได้ในระดับประชาชนทั่วไป รถ บ้าน ร้านค้า บริษัท โรงงาน หรือแม้กระทั่งตัวเมือง ดังนั้นด้วยประโยชน์ที่หลากหลายจึงไม่น่าแปลกที่จะมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตผลกระทบทางเศรษฐกิจของโครงข่าย IoT จะมีค่ามหาศาล สถาบันวิจัย McKinsey Global ได้ประเมินไว้ว่าในปี พ.ศ. 2568 ผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจของ IoT ทั่วโลก อาจจะมีค่าได้สูงระหว่าง 3.9 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ถึง 11.1 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ต่อปีเลยทีเดียว โดยที่เกือบร้อยละ 70 จะเป็นผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นระหว่างธุรกิจกับธุรกิจ Business-to-Business (B2B) ในขณะที่อีกร้อยละ 30 จะเป็นผลประโยชน์จากการที่ผู้บริโภคใช้งาน Applications ต่างๆ นอกจากนี้ทาง McKinsey Global ยังประเมินไว้สูงกว่าร้อยละ 40 ของค่าที่ประเมินไว้จะมาจากสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งมีโอกาสในการนำโครงข่าย IoT มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้มากมาย โดยในภาคธุรกิจโครงข่าย IoT จะมีส่วนสำคัญในการสร้างประสิทธิภาพในการผลิตและดำเนินงานลดต้นทุนที่ไม่จำเป็น ประเมินผลการดูแลรักษา และจำนวนสินค้าคงเหลือ ตลอดจนควบคุมพลังงานและระบบความปลอดภัย ในส่วนของผู้ใช้บริการ การนำ Applications ต่างๆ ของ IoT มาใช้จะช่วยลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายภายในครัวเรือน การมีอุปกรณ์ที่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน รวมไปถึงการดูแลความปลอดภัยภายในบ้าน ในส่วนของด้านการใช้รถ การนำ Applications ของ IoT มาใช้ ทำให้

การดูแลรักษาระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการทำประกันรถยนต์ นอกจากนี้การใช้ อุปกรณ์ IoT ในการตรวจวัดทางสุขภาพและออกกำลังกาย ยังมีส่วนช่วยให้ผู้ใช้มีสุขภาพและการดูแลรักษาตัวเองได้ดีขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลลดลง ในส่วนของระดับเมืองโครงข่าย IoT สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้าน การนำทรัพยากรมาใช้ให้มีประสิทธิภาพ การควบคุมสภาพจราจรบนท้องถนน และการควบคุมความปลอดภัยของเมืองด้วย

ดังนั้นจะเห็นว่าหากประเทศไทยต้องการจะพัฒนาเศรษฐกิจประเทศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การนำโครงข่าย IoTs มาใช้จะสามารถช่วยได้ในหลายภาคธุรกิจ ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรม ด้านอุตสาหกรรม ด้านการค้าส่ง-ปลีก การเงินและการธนาคาร รวมไปถึงทางด้านสุขภาพอีกด้วย

2.8 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นดิน

2.8.1 การพัฒนาพัลวัดด้วยจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม

Zhenran Gao และคณะ [37] ได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยการเสนอโครงสร้างโพรบอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนแบบไม่สัมผัสกับดิน เนื่องจากอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินแบบเดิมสัมผัสกับดินโดยตรง จึงมีความเสี่ยงที่โพรบวัดจะถูกกัดกร่อน ซึ่งส่งผลให้มีความแม่นยำในการวัดต่ำลง นอกจากนี้ระดับความลึกของการวัดไม่เพียงพอต่อการใช้งานจึงได้ออกแบบให้มีหลายระดับความลึก จากผลการทดสอบค่าความถูกต้องของเซ็นเซอร์ในพื้นที่ภาคสนาม พบว่าระบบตรวจวัดค่าความชื้นในดินมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากต้นแบบทดสอบเก็บข้อมูลภาคสนามจากนาข้าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสร้างต้นแบบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันการผกผันในการทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมอื่นๆ

Yan Hua และคณะ [38] ได้ศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของโพรบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินเพื่อหาโครงสร้างโพรบที่เหมาะสมที่สุดของหัววัดเซ็นเซอร์ พารามิเตอร์การออกแบบของโพรบที่สามารถบรรลุความไวที่เหมาะสมและช่วงการตรวจจับคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 38.4 มม. สำหรับอิเล็กทรอนิกส์วงแหวนทองแดงโพรบความยาวตามแนวแกน 20 มม. และระยะห่างตามแนวแกน 10 มม. หัววัดเซ็นเซอร์สามารถประกอบตามความลึกของการวัดจริงเพื่อตอบสนองความต้องการการวัดค่าความชื้นในดินในเขตรากพืชที่แตกต่างกัน ความแม่นยำในการวัดของเซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นในดิน $\pm 1.31\%$ เซ็นเซอร์มีความเสถียรและความสม่ำเสมอที่ดีขึ้น

Juan D. González-Teruel และคณะ [39] ออกแบบ พัฒนาและสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นในดินราคาประหยัดแบบใหม่ที่มีการสื่อสารแบบ SDI-12 (Serial Peripheral Interface) ซึ่งช่วยให้สามารถเลือกสมการการสอบเทียบสำหรับดินต่างๆได้ จากการทดสอบภาคสนามแสดงให้เห็น

ว่าเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟสามารถใช้วัดค่าความชื้นในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดต้นทุนได้ ในขณะที่ยังคงความแม่นยำเพียงพอ นอกจากนี้เซ็นเซอร์ที่ทดสอบนั้นสามารถตรวจจับเหตุการณ์การชลประทานและปริมาณน้ำฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การตอบสนองของเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟนั้นได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของดินเล็กน้อย

2.8.2 การออกแบบและพัฒนางจรตรวจวัด

Shi Qinglan และคณะ [40] ออกแบบและพัฒนาเซ็นเซอร์วัดความชื้นในให้สามารถตรวจวัดค่าความชื้นในดินแบบเรียลไทม์ด้วยระบบ IoT โดยบทความนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาความไวและความแม่นยำ ด้วยการออกแบบเทคโนโลยีที่สำคัญ คือ วงจรตรวจวัดความชื้นโดยการนำเทคนิคมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา จากการสอบเทียบด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่โดยน้ำหนักกับดิน 5 ประเภท พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 1.35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการตรวจวัดได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญโดยใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.12 เปอร์เซ็นต์ กล่าวโดยสรุปวงจรสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของค่าความชื้นในดินได้ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เนื่องจากจำนวนวงจรลดลง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าความชื้นในดินมีอยู่หลายเทคนิค โดยมีงานวิจัยและเทคนิคที่น่าสนใจ ดังนี้

2.9.1 งานวิจัยในประเทศ

ปองพล นิลพฤกษ์ และคณะ [41] ได้พัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนสภาพดิน ผลการศึกษาพบว่า การประเมินประสิทธิภาพของระบบและความพึงพอใจของผู้ใช้งานได้คะแนน 4.31/5.00 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความพึงพอใจในระดับดีมาก นอกจากนี้เกษตรกรรายย่อยยังเข้าถึงอุปกรณ์ตรวจวัดต้นแบบ (ระบบพื้นฐานพร้อมชุดเซนเซอร์) ในราคาไม่เกิน 1,800 และผลการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำสำหรับการตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.25 % อุปกรณ์ตรวจวัดต้นแบบมีข้อจำกัดของระบบคือ ใช้ได้เพียงระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เท่านั้น และอุปกรณ์ต้นแบบไม่มีโมดูล 3G ในตัว จึงจำเป็นต้องการตัวเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

2.9.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Ekanayaka Achchillage Ayesha Dilrukshi Nagahage และคณะ [42] พัฒนาต้นแบบสำหรับการตรวจสอบความชื้นในดินอัตโนมัติโดยใช้เซ็นเซอร์ความชื้นในดินแบบคาปาซิทีฟราคาประหยัด (SKU:SEN0193) เพื่อพัฒนาเซ็นเซอร์พร้อมระบบตรวจสอบความชื้นในดินอัตโนมัติที่มีความแม่นยำของการวัดความชื้นในดินถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการวิเมตริกและเซ็นเซอร์ความชื้นในดินที่เป็นที่ยอมรับ (SM-200, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) สรุปได้ว่าเซ็นเซอร์ (SKU:SEN0193) สามารถใช้ทำนายปริมาณน้ำในดินในช่วงความชื้นในดินสามช่วงที่แตกต่างกันในทางกลับกันเซ็นเซอร์ทำงานไม่ปกติเนื่องจากส่วนผสมของดินที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำของเซ็นเซอร์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสมของดิน อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิดิน ความหนาแน่นรวมของดินที่ใช้ทดสอบ และระดับความเค็มต่อความแม่นยำในการวัดเซ็นเซอร์

Pisana Placidi และคณะ [43] วิเคราะห์รายละเอียดภายในวงจรไฟฟ้าของเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟ และทดสอบการตอบสนองของเซ็นเซอร์ ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าการเตรียมตัวอย่างส่งผลกระทบต่อมากต่อการวัดค่าเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟ จากการבודัดดินตัวอย่างในระดับต่างๆ ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแรงดันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ ดังนั้นชนิดของดินที่กำหนดปริมาตรคงที่ไว้อย่างดีเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่เชื่อถือได้เมื่อเทียบกับวิธีการวิเมตริก

Abdelaziz M. Okasha และคณะ [44] ออกแบบเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินโดยใช้เทคนิคเก็บประจุไฟฟ้าแบบต้นทุนต่ำ และพัฒนาหน่วยตรวจสอบอัจฉริยะโดยใช้พลังงานโซลาร์เซลล์สำหรับการจัดการทรัพยากรน้ำสำหรับโรงเรือน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจจับเหตุการณ์ระหว่างการชลประทานและสภาพแวดล้อมอื่นๆ ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระหว่างการทดสอบภาคสนามข้อมูลจะถูกส่งไปยังการ์ดหน่วยความจำ SD และทำให้ระบบสามารถใช้สำหรับการจัดการทรัพยากรน้ำในโรงเรือนและสภาพแวดล้อมภายนอก นอกจากนี้ในอนาคตมีความตั้งใจที่จะพัฒนาหน่วยอัจฉริยะที่สามารถใช้เป็นระบบการชลประทานอัตโนมัติที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อทำนายความต้องการน้ำของพืช

Pariva Dobriyal และคณะ [45] ทบทวนงานวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าความชื้นในดินและการจัดการทรัพยากรน้ำ โดยการทบทวนวรรณกรรมนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อ 1.รวบรวมข้อมูลความรู้เกี่ยวกับวิธีการที่ใช้ในการประเมินค่าความชื้นในดิน 2.เปรียบเทียบและประเมินวิธีการที่มีอยู่ 3.ระบุวิธีการที่เป็นประโยชน์ที่สุดสำหรับภูมิประเทศที่เป็นป่าและประเทศที่กำลังพัฒนา โดยใช้การเปรียบเทียบด้วย ต้นทุน ความแม่นยำ เวลาตอบสนอง ความยากในการติดตั้ง การจัดการ และความทนทานของอุปกรณ์ สรุปได้ว่าการวัดความชื้นด้วยวิธีการทางอ้อมนั้น วิธีการที่ได้รับข้อมูล

พื้นที่ และมีความถูกต้องคือวิธี Time Domain Reflectometry (TDR) และวิธี Ground Penetrating Radar (GPR)

Wilker Nunes Medeiros และคณะ [46] ได้ศึกษาการทำแผนที่ด้วยการสุ่มตัวอย่างของดิน เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC กับลักษณะของดิน จากการศึกษาสุ่มเก็บตัวอย่างของดินที่ความลึก 0-20, 0-40 และ 0-60 ซม. ข้อมูลที่ได้มีความคล้ายคลึงกันมาก ผลการวิจัยพบว่าการทำแผนที่ของค่าการนำไฟฟ้าของดินเป็นไปได้ที่จะใช้ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ปรากฏในการประมาณลักษณะทั่วไปของดิน อย่างไรก็ตามสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการทำแผนที่ความแปรปรวนเชิงพื้นที่ของคุณลักษณะของดินได้

Zhe Yin และคณะ [47] พัฒนาเซ็นเซอร์วัดความชื้นดินด้วยวิธีการสะท้อนแสงอินฟราเรดในการวัดการสะท้อนของพื้นผิวดิน โดยการวัดการสะท้อนจากพื้นผิวดินด้วยแหล่งกำเนิดแสง LED 1800 นาโนเมตรและความยาวคลื่น 1940 นาโนเมตร เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นในดินและความลึกในการดูดซึมสัมพัทธ์ พบว่าค่าความชื้นในดินที่วัดได้สอดคล้องกับการคาดการณ์ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการสะท้อนแสงสำหรับการวัดค่าความชื้นในดินนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินด้วย

D. L. Corwin และ S.M. Lesch [48] ศึกษาการประยุกต์ใช้การนำไฟฟ้าของดินกับการเกษตรแม่นยำ การวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง แต่การวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินยังคงเข้าใจผิดและตีความผิดอยู่บ่อยครั้ง เพื่อช่วยชี้แจงความเข้าใจผิด บทความนี้ได้สรุปการประยุกต์ใช้การนำไฟฟ้าของดินสำหรับการเกษตรที่มีความแม่นยำ

N. I. Huth และ P. L. Poulton [49] การตรวจสอบค่าความชื้นในดินด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) เทคนิคนี้สามารถลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามฤดูกาล ผลการศึกษาพบว่าภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเทคโนโลยี EMI เป็นวิธีที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบค่าความชื้นในดิน

Atul Kumar Singh และคณะ [50] ศึกษาเทคนิคการตรวจจับค่าความชื้นในดิน การทบทวนแนวคิดต่างๆ ของเทคโนโลยีการตรวจวัด พบว่าเซ็นเซอร์ที่ประมาณค่าคงที่อิเล็กทรอนิกส์มีประโยชน์มากสำหรับการชลประทานตามกำหนดเวลา เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่พบมากที่สุด โดยบางส่วนขึ้นอยู่กับสัญญาณเอาต์พุตถูกจัดประเภทเป็น Time Domain Reflectometry (TDR), Frequency Domain (FD) Reflectometry and Capacitance, Time Domain Transmission (TDT), Amplitude Domain Reflectometry (ADR) และเซ็นเซอร์ Phase Transmission ดังนั้นประเภทของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็นบนพื้นฐานของการเลือกและการสอบเทียบที่เหมาะสม เนื่องจากหลักการทํางานของเซ็นเซอร์แตกต่างกันไปตามการใช้งานและประเภทของดิน

S. Sulaiman และคณะ [51] ออกแบบและทดสอบเซ็นเซอร์ความชื้นดินไร้สายแบบ Fringing Electric Field งานวิจัยนี้นำเสนอผลการจำลองสำหรับการวิเคราะห์ความไวของเซ็นเซอร์สำหรับวัดค่าความชื้นในดิน โดยเซ็นเซอร์จะถูกถ่ายโอนแบบไร้สายไปยังผู้ประสานงาน Zigbee ซึ่งเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล จากการทดสอบพบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับความชื้นจาก 1% ถึง 80% อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์วัดความชื้นแบบคาปาซิทีฟที่มีขนาดเล็ก (ความยาวคลื่นขนาดเล็ก) มีความลึกในการเจาะขนาดเล็กทำให้เซ็นเซอร์มีความไวไม่สม่ำเสมอต่อความหนาแน่นและรูปแบบของดิน

Emmanuel Badewa และคณะ [52] ทดสอบเซ็นเซอร์การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหลายความถี่และหลายขดลวดทำแผนที่ความชื้นในดิน เพื่อศึกษา 1. ความสัมพันธ์ระหว่าง ECa และค่าความชื้นในดิน (SMC) ที่วัดโดยใช้การสะท้อนแสงโดเมนเวลา (TDR) 2. ประเมิน SMC โดยประมาณด้วยการวัด ECa ที่ได้จากเซ็นเซอร์เหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการวัด ECa โดยใช้เซ็นเซอร์ EMI สองตัว (CMD-MINIEXPLORER และ GEM-2) และ SMC โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่ใช้ในการประเมิน SMC จากเซ็นเซอร์ EMI สองตัว ผลการศึกษาพบว่าค่าการคาดการณ์ที่ดีที่สุดสำหรับ SMC ที่ระยะความลึก 0-11 ซม. และ 0-16 ซม. โดยเซ็นเซอร์แบบหลายขดลวดหรือหลายความถี่มีศักยภาพในการใช้กับแผนที่ SMC ในระดับภาคสนามได้

H. Vereecken และคณะ [53] ศึกษาเกี่ยวกับพลวัตเชิงพื้นที่ชั่วคราวของค่าความชื้นในดินในระดับภาคสนาม และได้กล่าวถึงเทคนิคและวิธีการในการวิเคราะห์ค่าความชื้นภาคสนาม การวิเคราะห์คลื่นและฟังก์ชัน รวมไปถึงการออกแบบการวัด และข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

G. Calamita และคณะ [54] ได้ศึกษาและทดสอบเซ็นเซอร์แม่เหล็กเหนี่ยวนำไฟฟ้า หลายความถี่สำหรับการตรวจสอบค่าความชื้นในดิน โดยทดสอบภาคสนามในพื้นที่ทางตอนใต้ของอิตาลี การศึกษาการวัดการนำไฟฟ้า (ECa) ด้วยการใช้หัววัด EMI ความถี่หลายความถี่ (GEM-300) และวัดด้วยหัววัด Time Domain Reflectometry (TDR) ผลลัพธ์ที่ได้เน้นแสดงศักยภาพของเทคนิค EMI ที่ใช้หัววัด TDR มีแม่นยำเพียงพอสำหรับตรวจสอบค่าความชื้นในดินสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ ที่เหมาะสมกับการใช้ในงานด้านอุทกวิทยาและการรับรู้จากระยะไกล

Rhoades JD และคณะ [55] การประเมินผลกระทบของความเค็มในระดับท้องถิ่นและระดับภูมิภาคเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเกษตรที่ยั่งยืน การประเมินเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความเค็มเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งสามารถวัดได้แบบเรียลไทม์หรือทำนายด้วยแบบจำลอง ความเค็มของดินส่งผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรของดินหรือคุณภาพของน้ำบาดาล การค้นหาแหล่งที่มาของความเค็มของดินภายในภูมิภาคที่ซับซ้อนและจำลองการย้ายถิ่นของเกลือผ่านเขต vadose เพื่อให้ได้ค่าประเมินการเคลื่อนที่ของเกลือ โดยเป็นเครื่องมือสำคัญในด้านการเกษตรที่มีความแม่นยำเพื่อต่อสู้กับการเสื่อมโทรมของทรัพยากรดินและน้ำ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยเรื่องอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ นั้นเพื่อให้การดำเนินงานวิจัยเป็นตามขอบเขตและแผนงานที่กำหนดไว้ ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอ การวางแผนการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง การออกแบบอุปกรณ์และระบบต้นแบบเพื่อใช้ในการ ทดลอง รวมไปถึงขั้นตอนวิธีการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แผนการเตรียมอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินเพื่อการทดลอง

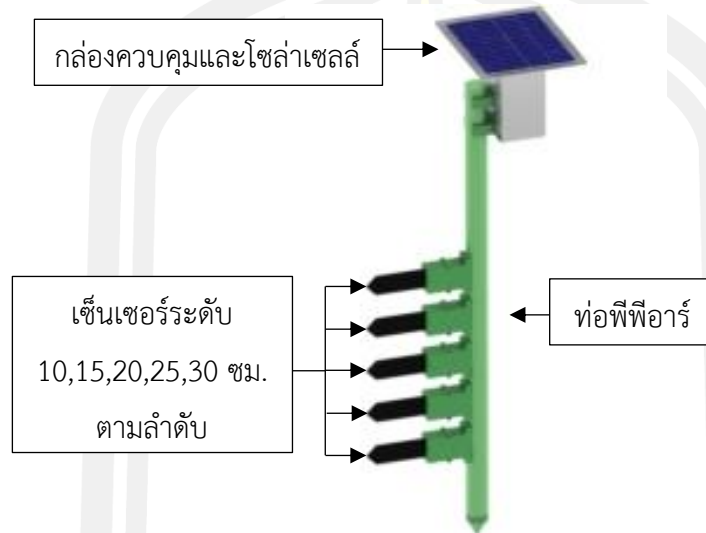
ผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองไว้ดังนี้

1. ออกแบบการทดลองอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ
2. สร้างอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ครอบกใส่ดินสำหรับเพื่อดูการซึมผ่านของน้ำในแต่ละ ระดับความลึก โดยครอบกมีขนาด กว้าง 8 ซม. ,ยาว 8 ซม. ,สูง 45 ซม.
3. เตรียมดินตัวอย่างสำหรับการทดลอง คือ ดินทราย ดินเหนียว ดินร่วน
4. ทดสอบโพรบวัดเพื่อหาระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัด
5. ทดสอบอุปกรณ์วัดความชื้นในดินตัวอย่างเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึม การกระจาย และการเก็บรักษาน้ำในดินที่ระดับความลึก 10,15,20,25,30 เซนติเมตรจากผิวดิน
6. เก็บบันทึกผลการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพและหาค่าความสัมพันธ์

3.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดความชื้นดิน

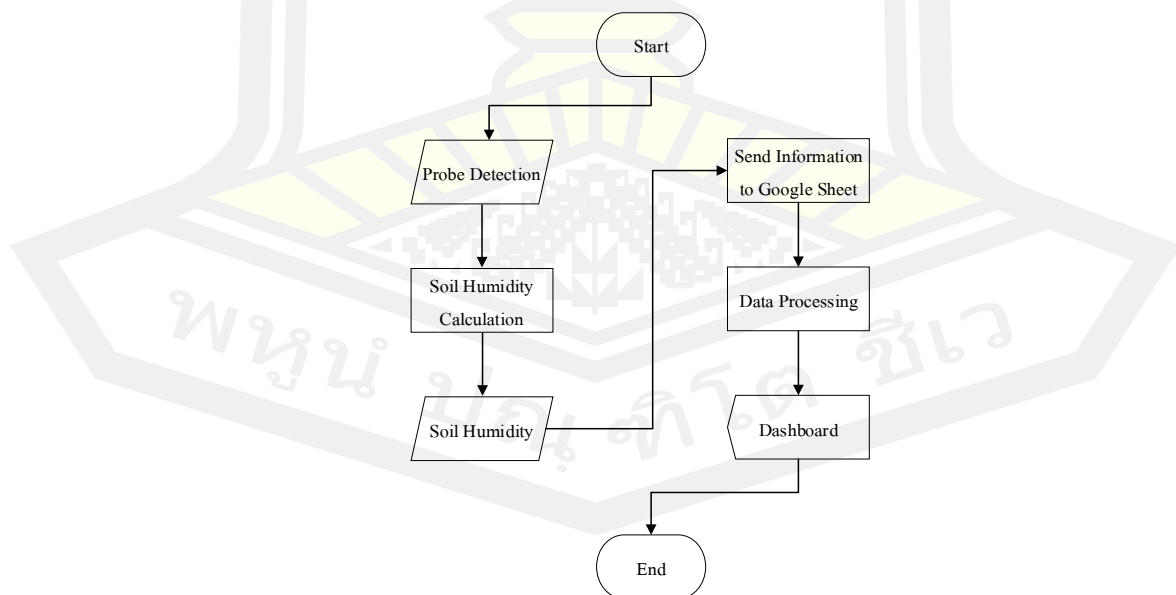
การออกแบบอุปกรณ์วัดความชื้นดินในที่นี้จำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการสร้าง ต้นแบบเพื่อให้โพรบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรภาพ และยังคงคำนึงถึงต้นทุนที่ ใช้ในการสร้างให้มีราคาประหยัดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย รวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและการบำรุงรักษา ทางผู้วิจัยจึงเน้นการออกแบบให้มีโครงสร้างไม่ ซับซ้อน ใช้งานกลางแจ้งได้ และใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาดเพื่อให้เกษตรกร เข้าถึงเทคโนโลยีสำหรับการบริหารจัดการน้ำได้ง่ายขึ้น โดยโครงสร้างหลักทำมาจากท่อ PP-R ช่วง กลางของท่อยึดติดกับหัวโพรบวัดค่าความชื้นในดิน (Capacitive moisture sensor V1.2) ด้วยเคสที่

ทำจาก 3D Printer สามารถกำหนดระยะห่างและระดับความลึกได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ส่วนด้านบนยึดติดกับกล่องควบคุมและติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กด้านบนเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานได้ยาวนานและต่อเนื่อง (ดังภาพประกอบที่ 3.1)



ภาพประกอบ 3.18 ต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ

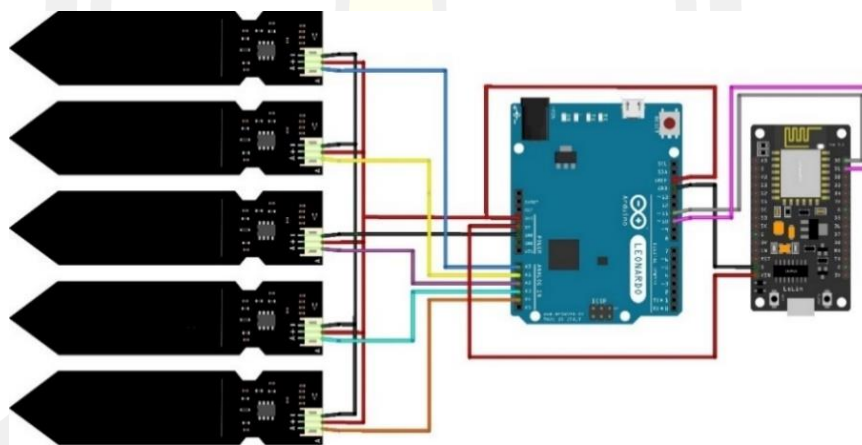
3.3 ระบบการทำงานอุปกรณ์วัดค่าความชื้นดิน



ภาพประกอบ 3.19 ระบบการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน แบบหลายระดับ

จากภาพประกอบ 3.2 คือระบบการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน แบบหลายระดับ ควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโพรบวัดที่ 3.3 โวลต์ และจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ให้ Node MCU ESP-8266 V3 ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากโพรบวัดเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความชื้นในดินแล้วส่งค่าต่อไปยัง Node MCU ESP-8266 V3 เพื่อนำค่าความชื้นในดินไปเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูลด้วยการส่งค่าไปที่ Google Sheet จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายคือการดึงข้อมูลมาใช้สำหรับวิเคราะห์และแสดงผลแบบเรียลไทม์ด้วย Data Studio

วิธีการต่อสายไฟของระบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินตามภาพประกอบที่ 3.3 โพรบวัดค่าความชื้นในดินต่อเข้ากับพิน A0-A4 จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าสัญญาณอนาล็อกและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลค่าความชื้นในดิน และส่งข้อมูลแบบอนุกรมโดยจะถูกทยอยส่งสัญญาณเป็นชุดข้อมูลไปที่ Node MCU ด้วยการต่อพิน 10 ,11 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับพิน D0 ,D1 ของ Node MCU เมื่อได้รับค่าความชื้นในดินที่วัดได้ครบแล้ว Node MCU จะส่งชุดข้อมูลไปที่ Google Sheet



ภาพประกอบ 3.20 Wiring Diagram Probe Sensing

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.4.1 มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล

มัลติมิเตอร์ [56] คือ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าได้หลากหลายชนิด เช่น แรงดัน, กระแส, ความต้านทานและสามารถใช้กับไฟกระแสตรง (DC) หรือไฟกระแสสลับ

(AC) ได้ โดยงานวิจัยนี้มีความจำเป็นที่ต้องทราบค่าปริมาณทางไฟฟ้า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำมัลติ-มิเตอร์มาใช้ในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3.21 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล [56]

3.4.2 ออสซิลโลสโคป

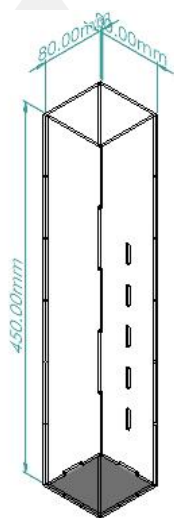
ออสซิลโลสโคป [57] คือ เครื่องมือวัดที่ใช้วัดสัญญาณทางไฟฟ้า คลื่นไฟฟ้า วัดค่าแรงดันของไฟฟ้า วัดความถี่ วัดเฟสของสัญญาณสำหรับการวัดคาบเวลา และรวมถึงการวัดสัญญาณพัลส์ การอ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะเป็น พีค-ทู-พีค หรือค่าพีคและค่าเวลาเป็นวินาที ซึ่งออสซิลโลสโคปจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟ ซึ่งจะแสดงผลผ่านหลอดภาพที่ฉาบด้วยฟอสเฟอร์ จากข้อมูลข้างต้นทางผู้วิจัยจึงนำออสซิลโลสโคปมาวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ความถี่ และอ่านค่าเพื่อนำผลมาวิเคราะห์



ภาพประกอบ 3.22 ออสซิลโลสโคป [57]

3.4.3 ครอบสำหรับใส่ดิน

ขนาด กว้าง 8 ซม. ยาว 8 ซม. สูง 45 ซม. ที่ทำมาจากแผ่นอะคริลิกด้วยวิธีการนำแผ่นอะคริลิกมาตัดตามขนาดที่กำหนด ประกอบแผ่นอะคริลิกด้วยน้ำยาประสานอะคริลิก จากนั้นซีลด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันน้ำรั่วซึม



ภาพประกอบ 3.23 การออกแบบครอบใส่ดินสำหรับการทดลอง

3.4.4 ชุดสายน้ำเกลือ

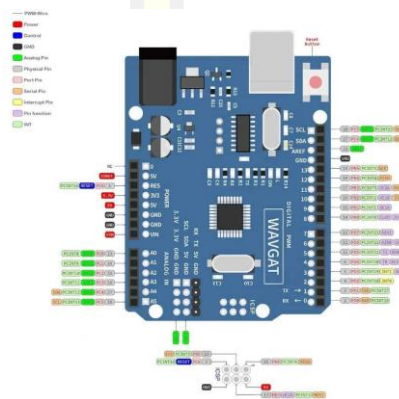
ใช้ชุดสายน้ำเกลือเพื่อจำลองการชลประทานแบบวิธีน้ำหยด และสามารถกำหนดปริมาณการไหลของน้ำได้



ภาพประกอบ 3.24 ชุดสายน้ำเกลือ

3.4.5 Arduino Uno R3

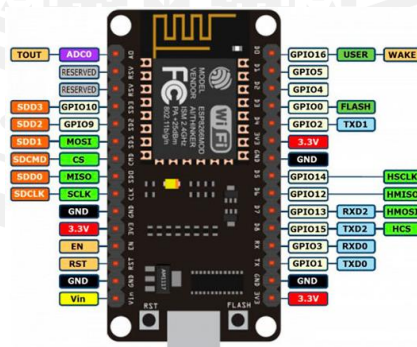
ใช้ควบคุมการทำงานอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ชิป ATmega328 ใช้พลังงานในการทำงานที่ 7-12 โวลต์ สามารถใช้พิน แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ สำหรับเป็นแหล่งพลังงานของโพรบวัดค่าความชื้นในดิน (Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2) และพินแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ สำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้กับบอร์ด Node MCU ESP8266 V.3 ได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 3.25 Arduino Uno R3

3.4.6 Node MCU ESP8266 V.3

ใช้สำหรับรับข้อมูลจากบอร์ด Arduino Uno R3 เพื่อส่งข้อมูลต่อไปยัง Google Sheet ด้วยระบบ Wi-Fi



ภาพประกอบ 3.26 Node MCU ESP8266 V.3

3.4.7 Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2

โพรบวัดค่าความชื้นในดินแบบคาปาซิทีฟที่มีราคาประหยัด สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด โดยเป็นการปรับปรุงวิธีการวัดจากแบบเดิมที่เป็นแบบตัวต้านทาน ซึ่งการวัดแบบตัวต้านทานนั้นโพรบสัมผัสกับดินโดยตรงซึ่งมีข้อเสียคือหัววัดจะไม่ทนทาน เป็นสนิมได้ ส่งผลให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนได้ง่าย ซึ่งโพรบวัดค่าความชื้นในดินแบบคาปาซิทีฟใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าตรวจสอบค่าประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นโพรบจึงไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับดินหรือวัสดุที่ต้องการวัดโดยตรงจึงทนทานและแม่นยำกว่า โพรบวัดค่าความชื้นในดินแบบคาปาซิทีฟใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 3.3 - 5 โวลต์ และมีสัญญาณเอาต์พุตเป็นอนาล็อกจึงเหมาะกับการใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นต่างๆ



ภาพประกอบ 3.27 Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2

3.5 ดินตัวอย่างในการทดลอง

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด คือ 1.ดินทราย 2.ดินเหนียว 3.ดินร่วน ตามภาพประกอบ 3.11 โดยดินทั้ง 3 ชนิดนั้นนำมาจากพื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บตัวอย่างดินมาใช้ในการทดลองเนื่องจากการระบาดของเชื้อไวรัส Covid-19 จึงไม่สามารถเดินทางไปเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ของเกษตรกรได้ เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการวัดค่าความชื้นเดิมของดินก่อนการชลประทานและหลังการชลประทาน ดังนั้นตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดลองนี้จึงไม่ได้นำดินไปอบแห้ง



ภาพประกอบ 3.28 ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3.6 วิธีการเก็บผลทดลอง

3.6.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึม การกระจาย และการเก็บรักษาน้ำในดินทราย ดินเหนียว และดินร่วน

1. เตรียมตัวอย่างดินที่จะใช้สำหรับการทดลอง
2. นำดินที่เตรียมไว้ใส่ในกระบอกตามปริมาณที่กำหนด
3. เตรียมปริมาณน้ำที่จะทำการทดลองใส่ในขวดน้ำหรือภาชนะเพื่อจำลองการชลประทานแบบน้ำหยด
4. ติดตั้งและเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการทดลอง.
5. ทดลองและบันทึกผลตามตารางที่ 3 และภาพที่ 5
6. เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นให้ทำความสะอาดภาชนะก่อนที่จะบรรจุดินใหม่ทุกครั้ง

ตารางที่ 3.2 การเก็บผลการทดลอง

ปริมาณ/ จำนวนครั้งการทดลอง	ปริมาณน้ำ 150 mL					ปริมาณน้ำ 250 mL					ปริมาณน้ำ 350 mL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ดินทราย															
ดินเหนียว															
ดินร่วน															

ตารางที่ 3.3 การบันทึกผลการทดลองและการชลประทาน

เวลา (นาที)	การบันทึกผลและการชลประทาน
0-5	เริ่มบันทึกผลค่าความชื้นในดินเดิม (ยังไม่ให้น้ำ)
5-45	ในนาทีที่ 5 เริ่มการชลประทาน เมื่อถึงนาทีที่ 45 น้ำที่ทำการชลประทานจะต้องหมดพอดี
45-60	หลังจากนาทีที่ 45 จะเป็นการบันทึกผลของค่าความชื้นหลังจากการชลประทาน



ภาพประกอบ 3.29 การเตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง

3.7 การวิเคราะห์ผลทดลอง

เก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองที่ได้จากการวัดและการทดสอบ จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาระยะห่างที่มีผลต่อการวัด วิเคราะห์ระยะเวลาที่น้ำใช้ในการซึมผ่านดินแต่ละชนิดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึมและการกระจายของน้ำในดิน การเก็บรักษาน้ำในดินทราย ดินเหนียว และดินร่วน วิเคราะห์ประสิทธิภาพและการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน

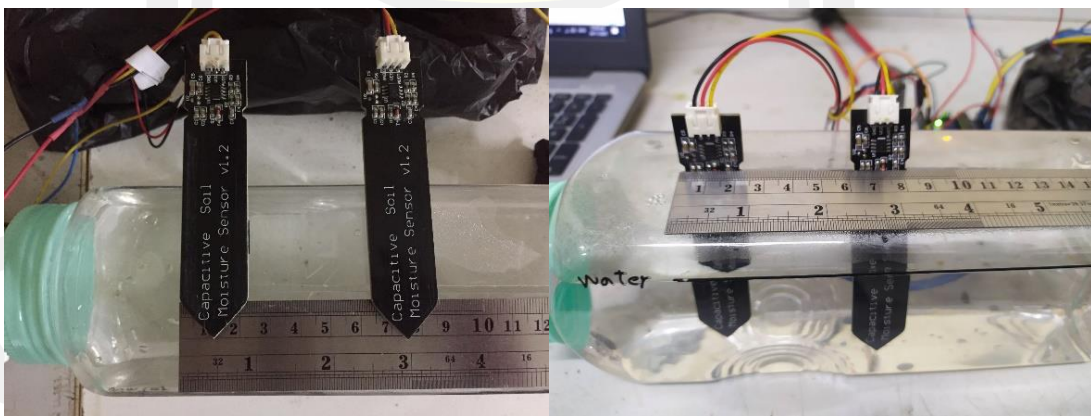
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้จะกล่าวถึง การดำเนินงานวิจัย และผลการทดลองของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน ด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับจากทดลองในอุปกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น ทดลองระยะห่างที่มีผลต่อการวัด ระยะเวลาที่น้ำใช้ในการซึมผ่านแต่ละระดับเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแทรกซึมและการกระจายของน้ำในดิน วิเคราะห์ประสิทธิภาพและการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองและการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองระยะห่างของโพรบที่มีผลของการวัด

ในการหาระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดนี้ จะทดลองด้วยการนำโพรบไปวัดความชื้นในน้ำตามระยะห่างที่กำหนดคือ 0 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 ซม. ตามลำดับ โดยในแต่ละระยะห่างจะบันทึกค่าทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลาทั้งหมด 5 นาที แบ่งเป็นนาทีที่ 0-1 โพรบวัดจะอยู่ในอากาศและนาทีที่ 1-5 โพรบวัดจะอยู่ในน้ำ ซึ่งผลการทดลองวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ.2564 ดังตารางที่ 4.1.1-4.1.11



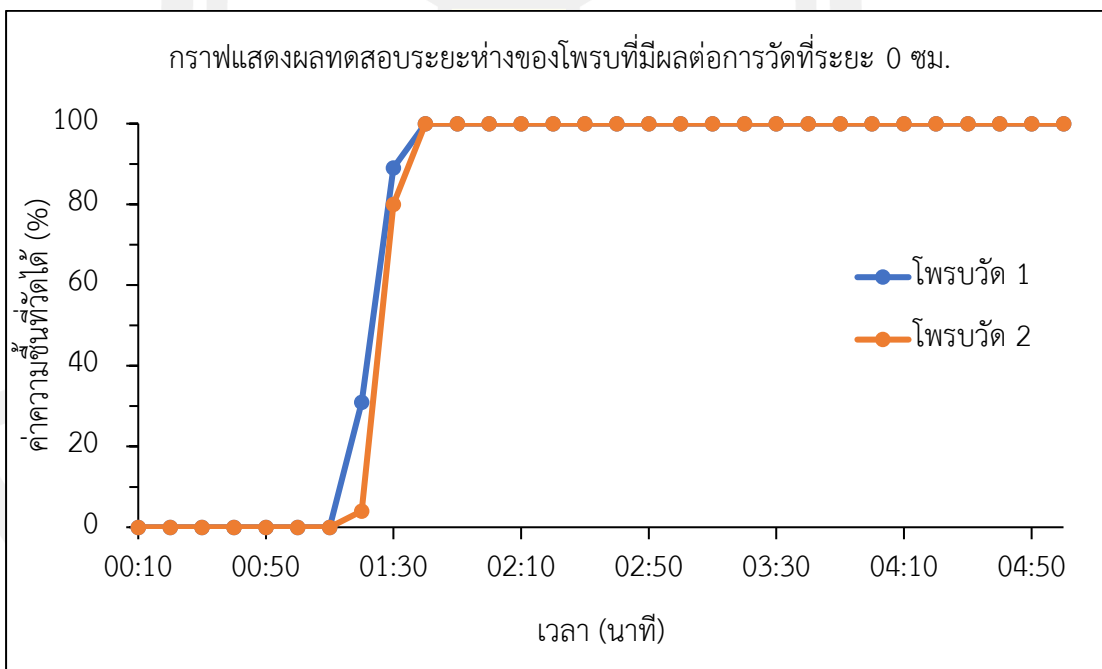
(1)

(2)

ภาพประกอบ 4.30 ภาพตัวอย่างแสดงการทดลองระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัด (1) ขณะอยู่ในอากาศ (2) ขณะอยู่ในน้ำ

ตารางที่ 4.1.4 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม.

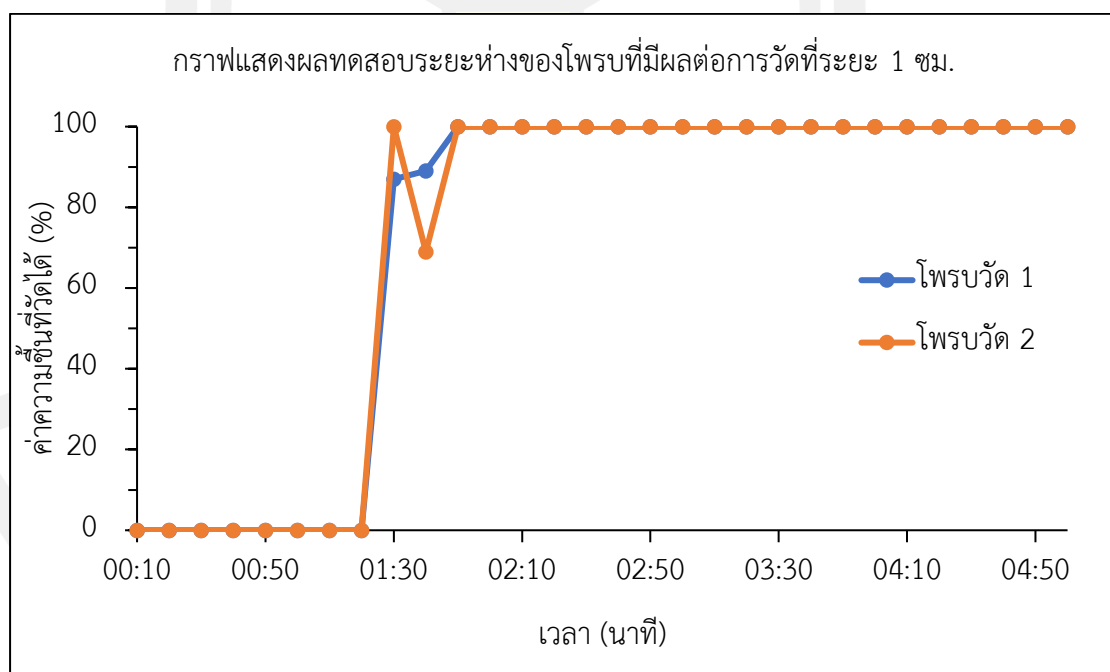
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.4	0	2.48	0	00:02:40	0.41	100	0.31	100
00:00:20	2.56	0	2.59	0	00:02:50	0.21	100	0.72	100
00:00:30	2.69	0	2.69	0	00:03:00	0.31	100	0.31	100
00:00:40	2.74	0	2.69	0	00:03:10	0.26	100	0.31	100
00:00:50	2.48	0	2.48	0	00:03:20	0.21	100	0.62	100
00:01:00	2.48	0	2.48	0	00:03:30	0.31	100	0.31	100
00:01:10	2.48	0	2.56	0	00:03:40	0.62	100	0.33	100
00:01:20	1.77	31	2.02	4	00:03:50	0.21	100	0.62	100
00:01:30	1.24	89	1.32	80	00:04:00	0.6	100	0.31	100
00:01:40	0.82	100	0.72	100	00:04:10	0.21	100	0.51	100
00:01:50	0.6	100	0.41	100	00:04:20	0.21	100	0.51	100
00:02:00	0.41	100	0.31	100	00:04:30	0.26	100	0.31	100
00:02:10	0.21	100	0.72	100	00:04:40	0.21	100	0.51	100
00:02:20	0.62	100	0.42	100	00:04:50	0.57	100	0.36	100
00:02:30	0.6	100	0.31	100	00:05:00	0.57	100	0.36	100



ภาพประกอบ 4.31 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 0 ซม.

ตารางที่ 4.4.5 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม.

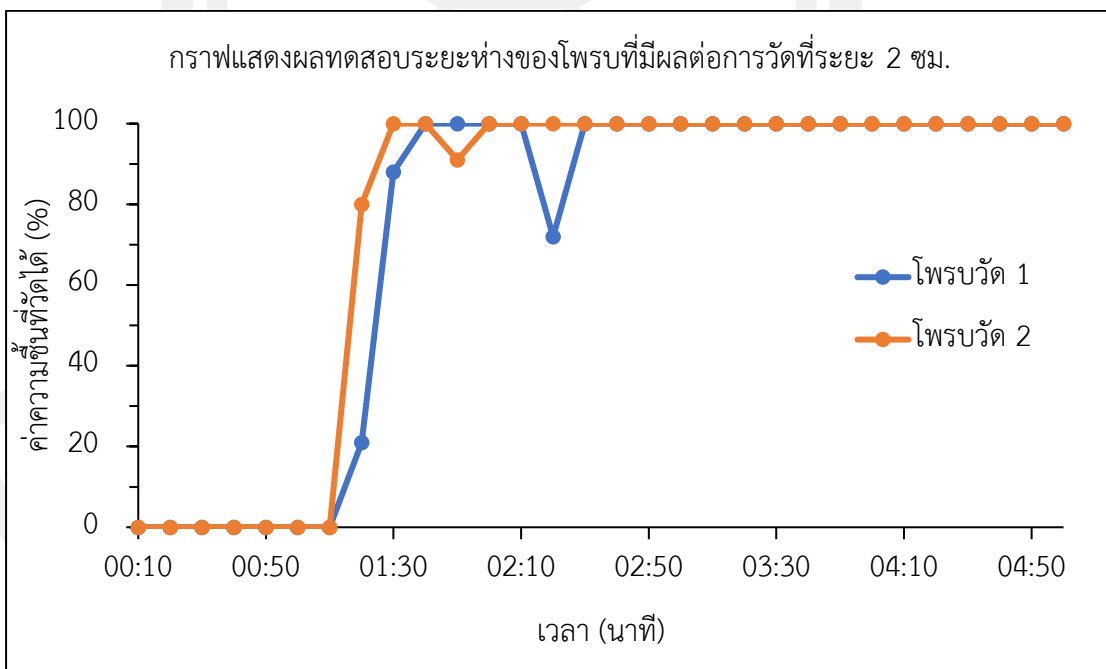
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.43	0	3.31	0	00:02:40	0.31	100	0.31	100
00:00:20	2.33	0	3.26	0	00:02:50	0.41	100	0.31	100
00:00:30	2.48	0	2.79	0	00:03:00	0.31	100	0.31	100
00:00:40	2.59	0	2.85	0	00:03:10	0.21	100	0.72	100
00:00:50	2.33	0	2.9	0	00:03:20	0.21	100	0.46	100
00:01:00	2.53	0	2.79	0	00:03:30	0.52	100	0.36	100
00:01:10	2.74	0	3.31	0	00:03:40	0.21	100	0.62	100
00:01:20	2.28	0	3.31	0	00:03:50	0.41	100	0.31	100
00:01:30	1.26	87	0.83	100	00:04:00	0.21	100	0.67	100
00:01:40	1.24	89	1.42	69	00:04:10	0.41	100	0.31	100
00:01:50	0.63	100	0.83	100	00:04:20	0.26	100	0.26	100
00:02:00	0.41	100	0.31	100	00:04:30	0.21	100	0.67	100
00:02:10	0.21	100	0.51	100	00:04:40	0.21	100	0.72	100
00:02:20	0.23	100	0.41	100	00:04:50	0.21	100	0.51	100
00:02:30	0.21	100	0.67	100	00:05:00	0.21	100	0.67	100



ภาพประกอบ 4.32 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 1 ซม.

ตารางที่ 4.4.6 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม.

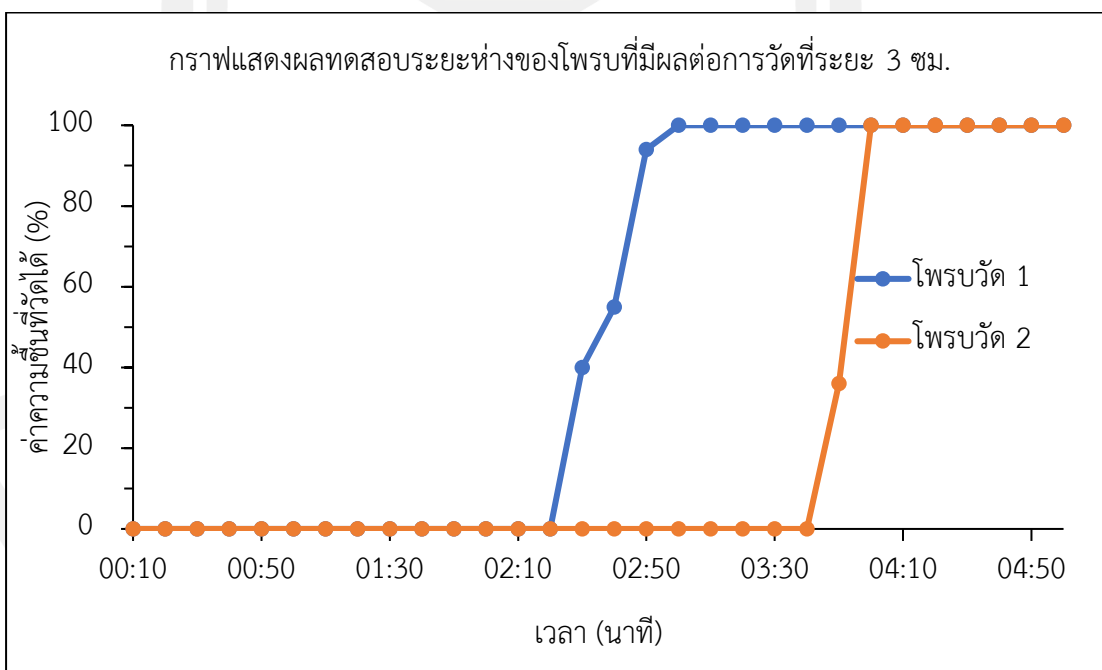
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.69	0	2.87	0	00:02:40	0.72	100	0.33	100
00:00:20	2.38	0	2.59	0	00:02:50	0.65	100	0.31	100
00:00:30	2.56	0	2.79	0	00:03:00	0.52	100	0.44	100
00:00:40	2.69	0	2.87	0	00:03:10	0.21	100	0.72	100
00:00:50	2.56	0	2.79	0	00:03:20	0.62	100	0.32	100
00:01:00	2.69	0	2.9	0	00:03:30	0.41	100	0.31	100
00:01:10	2.69	0	3.31	0	00:03:40	0.62	100	0.33	100
00:01:20	1.86	21	1.32	80	00:03:50	0.22	100	0.62	100
00:01:30	1.24	88	0.83	100	00:04:00	0.21	100	0.62	100
00:01:40	0.72	100	0.51	100	00:04:10	0.21	100	0.67	100
00:01:50	0.52	100	1.22	91	00:04:20	0.21	100	0.46	100
00:02:00	0.42	100	0.62	100	00:04:30	0.23	100	0.52	100
00:02:10	0.52	100	0.44	100	00:04:40	0.21	100	0.62	100
00:02:20	1.39	72	0.72	100	00:04:50	0.21	100	0.46	100
00:02:30	0.83	100	0.31	100	00:05:00	0.57	100	0.33	100



ภาพประกอบ 4.33 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 2 ซม.

ตารางที่ 4.4.7 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม.

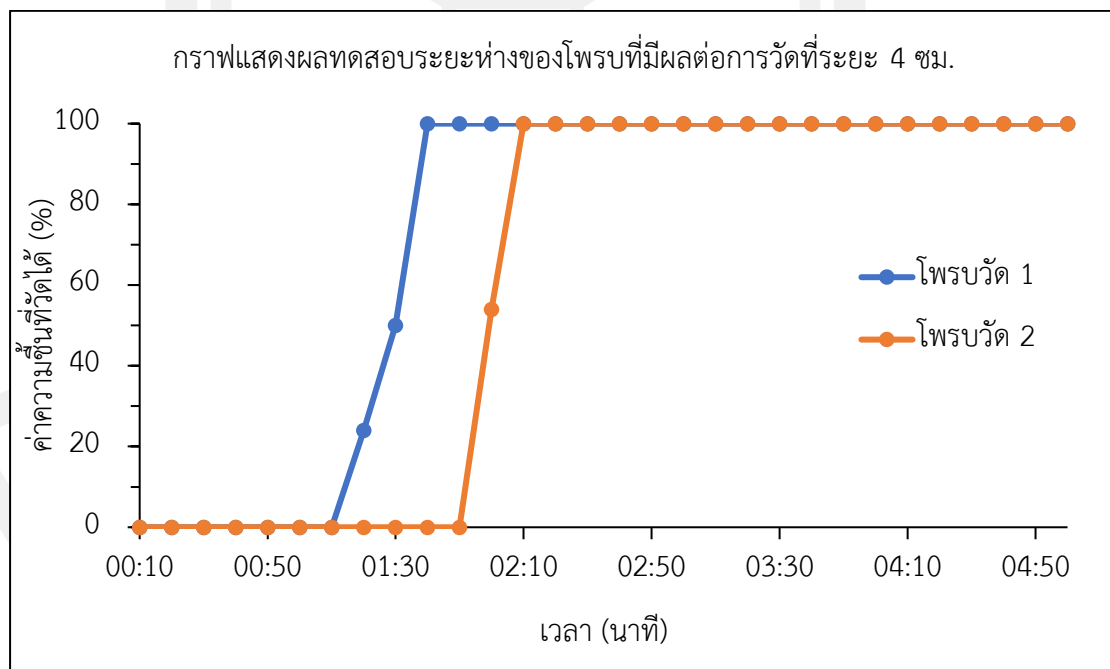
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	3.31	0	3.31	0	00:02:40	1.55	55	3.31	0
00:00:20	3.31	0	3.31	0	00:02:50	1.19	94	3.31	0
00:00:30	3.31	0	3.31	0	00:03:00	0.62	100	3.31	0
00:00:40	3.2	0	3.31	0	00:03:10	0.31	100	3.31	0
00:00:50	2.8	0	2.9	0	00:03:20	0.21	100	3.31	0
00:01:00	2.74	0	2.95	0	00:03:30	0.41	100	3.05	0
00:01:10	2.74	0	3.31	0	00:03:40	0.26	100	2.25	0
00:01:20	2.9	0	3.31	0	00:03:50	0.21	100	1.72	36
00:01:30	2.07	0	3.31	0	00:04:00	0.31	100	0.83	100
00:01:40	3.31	0	3.31	0	00:04:10	0.6	100	0.41	100
00:01:50	3.21	0	3.31	0	00:04:20	0.41	100	0.31	100
00:02:00	2.9	0	3.31	0	00:04:30	0.21	100	0.62	100
00:02:10	3.05	0	2.67	0	00:04:40	0.26	100	0.31	100
00:02:20	2.17	0	3.31	0	00:04:50	0.62	100	0.32	100
00:02:30	1.69	40	3.31	0	00:05:00	0.44	100	0.41	100



ภาพประกอบ 4.34 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 3 ซม.

ตารางที่ 4.4.8 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม.

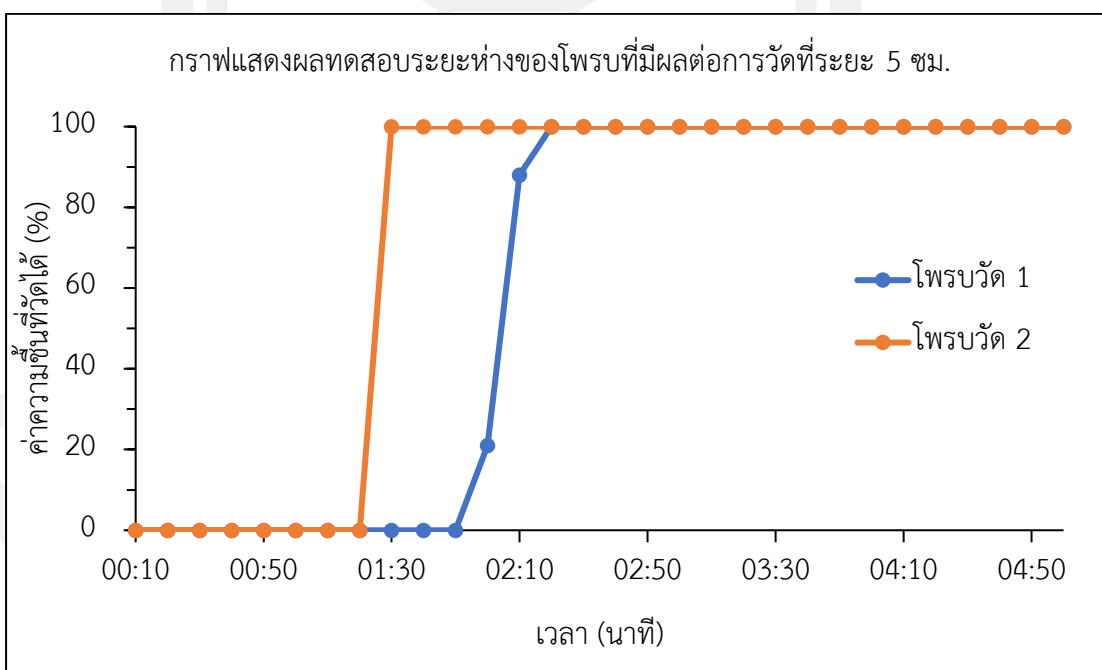
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	3.31	0	3.31	0	00:02:40	0.6	100	0.31	100
00:00:20	3.31	0	3.31	0	00:02:50	0.23	100	0.62	100
00:00:30	3.31	0	3.31	0	00:03:00	0.6	100	0.31	100
00:00:40	3.31	0	3.31	0	00:03:10	0.41	100	0.31	100
00:00:50	3	0	3.31	0	00:03:20	0.62	100	0.32	100
00:01:00	2.74	0	3.05	0	00:03:30	0.41	100	0.31	100
00:01:10	2.9	0	3.31	0	00:03:40	0.26	100	0.26	100
00:01:20	1.83	24	3.31	0	00:03:50	0.31	100	0.26	100
00:01:30	1.59	50	3.31	0	00:04:00	0.26	100	0.31	100
00:01:40	0.83	100	3.31	0	00:04:10	0.52	100	0.33	100
00:01:50	0.78	100	2.46	0	00:04:20	0.21	100	0.67	100
00:02:00	0.61	100	1.55	54	00:04:30	0.21	100	0.67	100
00:02:10	0.47	100	0.88	100	00:04:40	0.21	100	0.41	100
00:02:20	0.67	100	0.31	100	00:04:50	0.52	100	0.36	100
00:02:30	0.52	100	0.32	100	00:05:00	0.6	100	0.31	100



ภาพประกอบ 4.35 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 4 ซม.

ตารางที่ 4.4.9 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม.

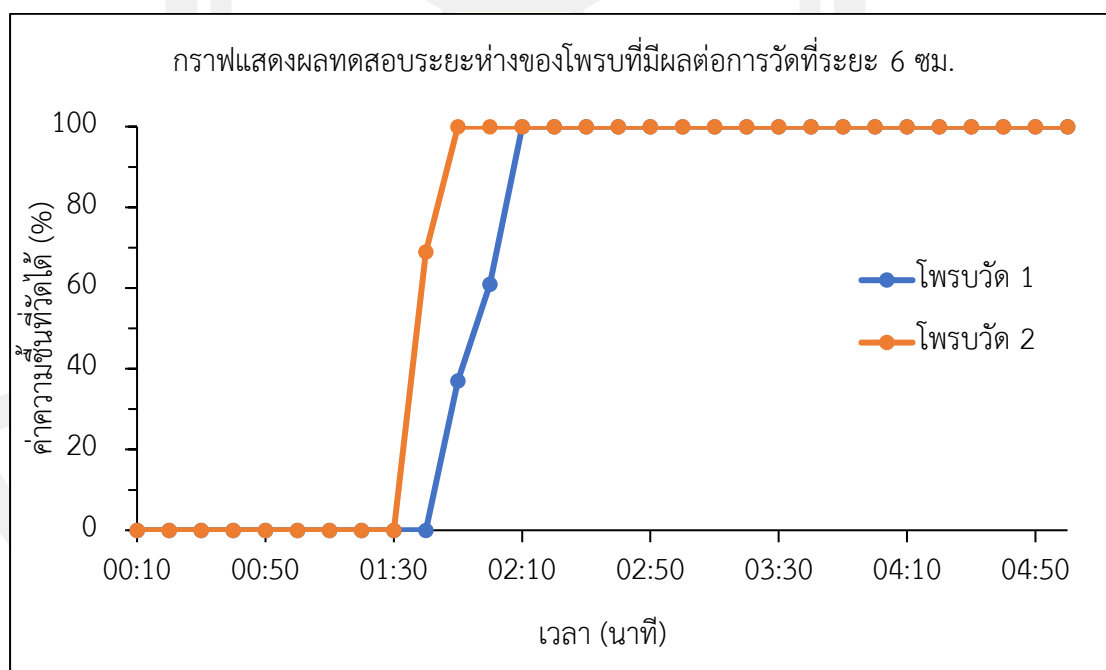
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	3.31	0	3.31	0	00:02:40	0.26	100	0.62	100
00:00:20	3.31	0	3.31	0	00:02:50	0.21	100	0.36	100
00:00:30	3.31	0	3.31	0	00:03:00	0.62	100	0.31	100
00:00:40	2.9	0	3.31	0	00:03:10	0.21	100	0.36	100
00:00:50	2.48	0	3.31	0	00:03:20	0.21	100	0.67	100
00:01:00	2.78	0	3.31	0	00:03:30	0.26	100	0.41	100
00:01:10	2.78	0	3.31	0	00:03:40	0.41	100	0.36	100
00:01:20	3.31	0	3.31	0	00:03:50	0.21	100	0.67	100
00:01:30	3.31	0	1.14	100	00:04:00	0.54	100	0.33	100
00:01:40	3.31	0	0.53	100	00:04:10	0.41	100	0.31	100
00:01:50	2.9	0	0.67	100	00:04:20	0.22	100	0.52	100
00:02:00	1.86	21	0.31	100	00:04:30	0.41	100	0.31	100
00:02:10	1.24	88	0.32	100	00:04:40	0.31	100	0.26	100
00:02:20	0.72	100	0.67	100	00:04:50	0.31	100	0.26	100
00:02:30	0.41	100	0.62	100	00:05:00	0.21	100	0.41	100



ภาพประกอบ 4.36 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 5 ซม.

ตารางที่ 4.4.10 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม.

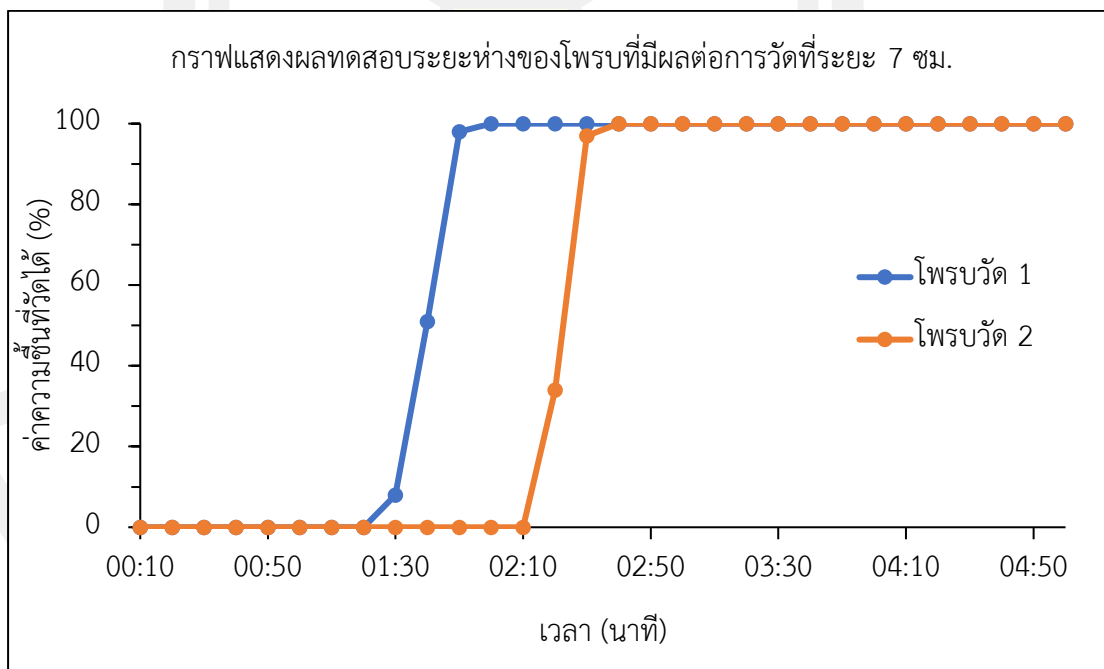
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	3.31	0	3.31	0	00:02:40	0.62	100	0.32	100
00:00:20	3.31	0	3.31	0	00:02:50	0.26	100	0.57	100
00:00:30	3.1	0	3.31	0	00:03:00	0.41	100	0.31	100
00:00:40	2.69	0	3.31	0	00:03:10	0.21	100	0.51	100
00:00:50	2.8	0	3.16	0	00:03:20	0.31	100	0.26	100
00:01:00	2.69	0	3	0	00:03:30	0.21	100	0.67	100
00:01:10	3.31	0	3.31	0	00:03:40	0.21	100	0.67	100
00:01:20	3.31	0	3	0	00:03:50	0.41	100	0.31	100
00:01:30	3.31	0	2.27	0	00:04:00	0.62	100	0.32	100
00:01:40	2.59	0	1.42	69	00:04:10	0.21	100	0.65	100
00:01:50	1.71	37	0.83	100	00:04:20	0.22	100	0.52	100
00:02:00	1.49	61	0.31	100	00:04:30	0.21	100	0.62	100
00:02:10	0.88	100	0.31	100	00:04:40	0.41	100	0.31	100
00:02:20	0.42	100	0.52	100	00:04:50	0.21	100	0.62	100
00:02:30	0.28	100	0.62	100	00:05:00	0.21	100	0.62	100



ภาพประกอบ 4.37 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 6 ซม.

ตารางที่ 4.4.11 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 ซม.

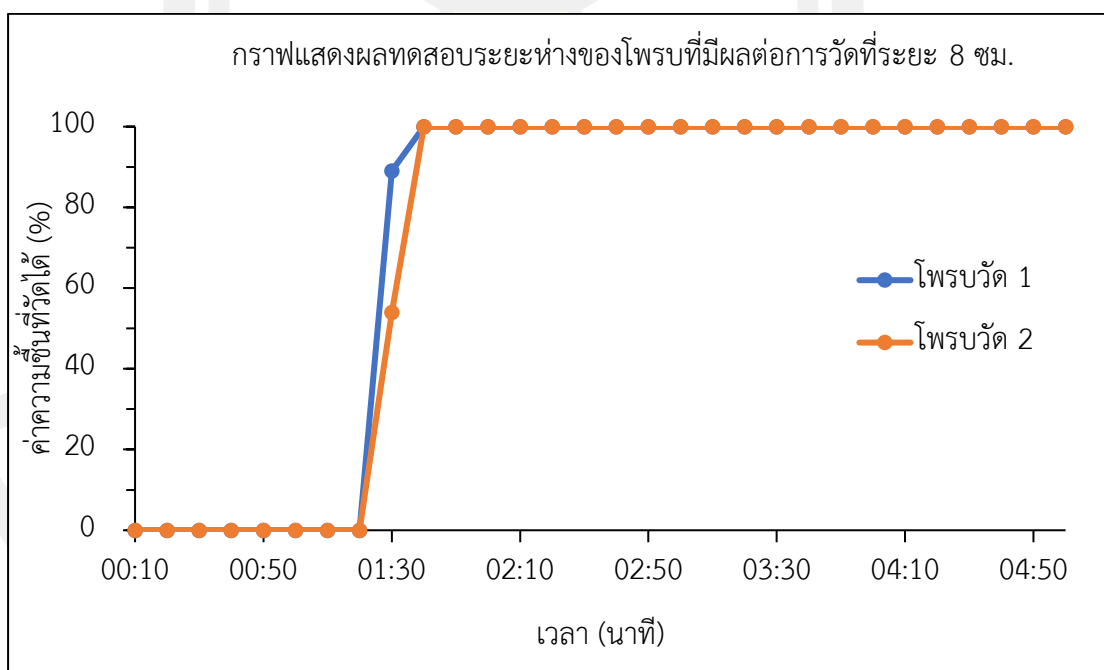
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.48	0	3.31	0	00:02:40	0.41	100	0.31	100
00:00:20	2.48	0	3.31	0	00:02:50	0.31	100	0.31	100
00:00:30	2.79	0	3.31	0	00:03:00	0.21	100	0.62	100
00:00:40	2.79	0	3.11	0	00:03:10	0.21	100	0.62	100
00:00:50	2.77	0	3	0	00:03:20	0.6	100	0.31	100
00:01:00	2.69	0	3	0	00:03:30	0.31	100	0.31	100
00:01:10	2.73	0	2.9	0	00:03:40	0.31	100	0.26	100
00:01:20	2.79	0	3.31	0	00:03:50	0.21	100	0.67	100
00:01:30	1.98	8	3.31	0	00:04:00	0.57	100	0.32	100
00:01:40	1.59	51	3.31	0	00:04:10	0.21	100	0.51	100
00:01:50	1.15	98	3.31	0	00:04:20	0.23	100	0.47	100
00:02:00	0.42	100	3.05	0	00:04:30	0.21	100	0.62	100
00:02:10	0.6	100	2.2	0	00:04:40	0.21	100	0.41	100
00:02:20	0.21	100	1.74	34	00:04:50	0.57	100	0.32	100
00:02:30	0.21	100	1.16	97	00:05:00	0.21	100	0.67	100



ภาพประกอบ 4.38 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 7 ซม.

ตารางที่ 4.4.12 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม.

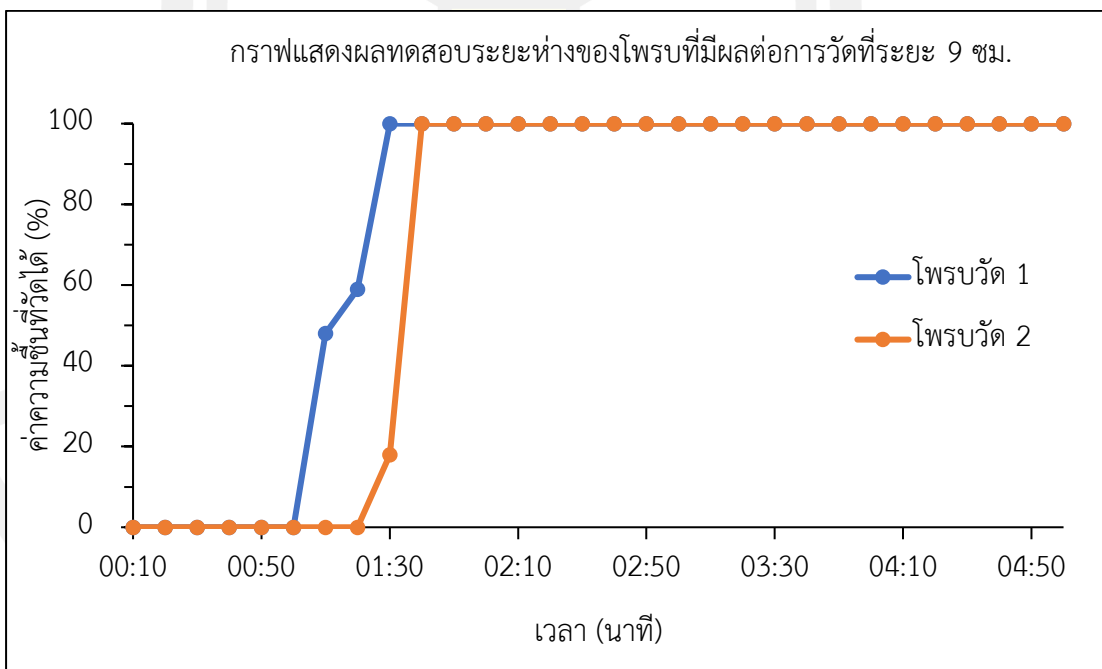
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.74	0	3	0	00:02:40	0.21	100	0.41	100
00:00:20	2.74	0	3	0	00:02:50	0.21	100	0.6	100
00:00:30	2.8	0	3.05	0	00:03:00	0.21	100	0.62	100
00:00:40	2.59	0	2.79	0	00:03:10	0.41	100	0.21	100
00:00:50	2.8	0	3.08	0	00:03:20	0.62	100	0.21	100
00:01:00	2.66	0	3	0	00:03:30	0.41	100	0.21	100
00:01:10	2.9	0	3.11	0	00:03:40	0.26	100	0.21	100
00:01:20	2.56	0	2.99	0	00:03:50	0.62	100	0.21	100
00:01:30	1.24	89	1.55	54	00:04:00	0.31	100	0.21	100
00:01:40	0.93	100	0.68	100	00:04:10	0.21	100	0.41	100
00:01:50	0.62	100	0.21	100	00:04:20	0.57	100	0.21	100
00:02:00	0.21	100	0.6	100	00:04:30	0.31	100	0.21	100
00:02:10	0.21	100	0.26	100	00:04:40	0.31	100	0.26	100
00:02:20	0.62	100	0.21	100	00:04:50	0.26	100	0.21	100
00:02:30	0.31	100	0.21	100	00:05:00	0.26	100	0.21	100



ภาพประกอบ 4.39 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 8 ซม.

ตารางที่ 4.4.13 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม.

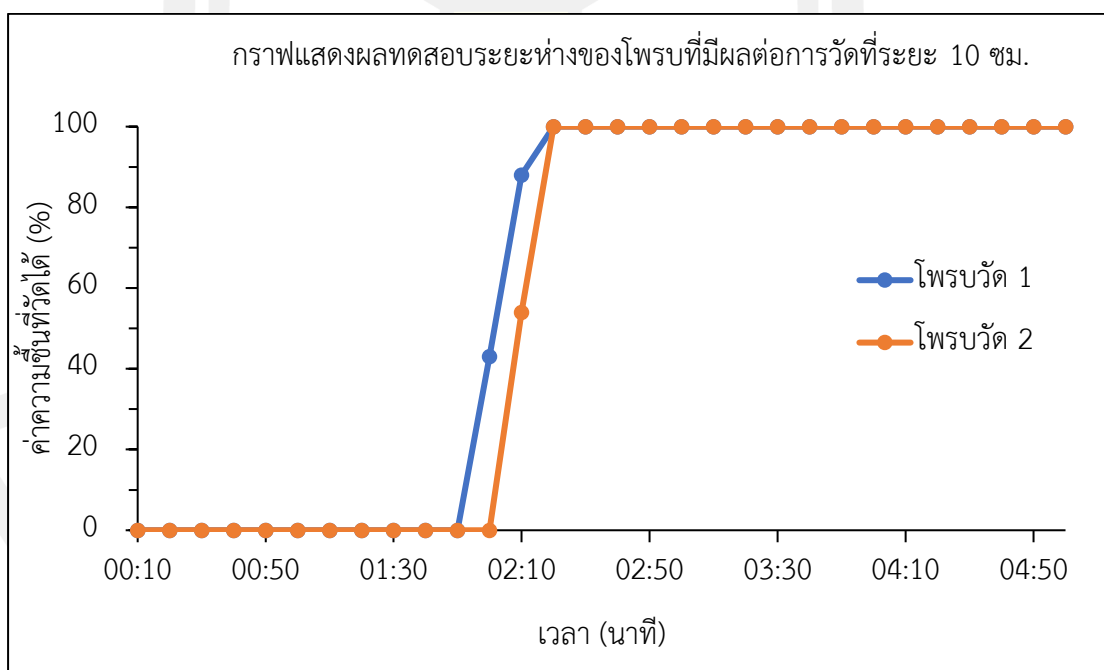
เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.79	0	3.31	0	00:02:40	0.21	100	0.51	100
00:00:20	2.48	0	3.31	0	00:02:50	0.21	100	0.62	100
00:00:30	2.9	0	3.31	0	00:03:00	0.31	100	0.36	100
00:00:40	2.8	0	3.31	0	00:03:10	0.21	100	0.67	100
00:00:50	2.8	0	3.31	0	00:03:20	0.21	100	0.67	100
00:01:00	2.66	0	2.9	0	00:03:30	0.41	100	0.31	100
00:01:10	1.61	48	3.31	0	00:03:40	0.21	100	0.41	100
00:01:20	1.51	59	2.49	0	00:03:50	0.21	100	0.51	100
00:01:30	0.83	100	1.89	18	00:04:00	0.57	100	0.31	100
00:01:40	0.41	100	1.14	100	00:04:10	0.21	100	0.51	100
00:01:50	0.62	100	0.47	100	00:04:20	0.21	100	0.51	100
00:02:00	0.41	100	0.36	100	00:04:30	0.21	100	0.67	100
00:02:10	0.21	100	0.51	100	00:04:40	0.21	100	0.62	100
00:02:20	0.23	100	0.41	100	00:04:50	0.21	100	0.62	100
00:02:30	0.21	100	0.67	100	00:05:00	0.21	100	0.62	100



ภาพประกอบ 4.40 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 9 ซม.

ตารางที่ 4.4.14 ผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม.

เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม.				เวลา	ผลทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม. (ต่อ)			
	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2		แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 1	แรงดัน(โวลต์)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 2
00:00:10	2.77	0	3.08	0	00:02:40	0.44	100	0.36	100
00:00:20	2.9	0	3.05	0	00:02:50	0.62	100	0.31	100
00:00:30	2.69	0	3	0	00:03:00	0.26	100	0.31	100
00:00:40	2.8	0	3.05	0	00:03:10	0.21	100	0.67	100
00:00:50	2.77	0	3	0	00:03:20	0.21	100	0.41	100
00:01:00	3.31	0	3.31	0	00:03:30	0.23	100	0.47	100
00:01:10	3.31	0	3.31	0	00:03:40	0.62	100	0.31	100
00:01:20	3.31	0	3.31	0	00:03:50	0.41	100	0.31	100
00:01:30	3.31	0	3.31	0	00:04:00	0.21	100	0.41	100
00:01:40	3.04	0	3.31	0	00:04:10	0.57	100	0.31	100
00:01:50	2.22	0	3	0	00:04:20	0.21	100	0.41	100
00:02:00	1.66	43	2.48	0	00:04:30	0.41	100	0.33	100
00:02:10	1.24	88	1.55	54	00:04:40	0.41	100	0.31	100
00:02:20	0.72	100	1.07	100	00:04:50	0.41	100	0.31	100
00:02:30	0.21	100	0.82	100	00:05:00	0.32	100	0.26	100

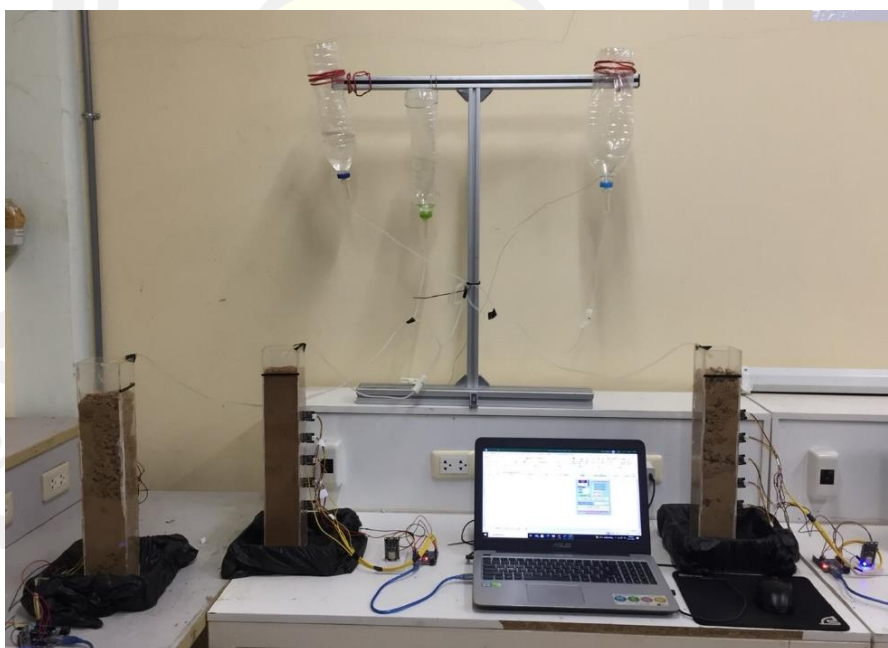


ภาพประกอบ 4.41 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะห่างของโพรบที่มีผลต่อการวัดที่ระยะ 10 ซม.

จากตาราง 4.1.1 - 4.1.11 และภาพประกอบ 4.2 - 4.12 จะเห็นได้ว่าระยะห่างของโพรบที่ระยะ 0-10 ซม. ไม่มีผลต่อการวัดที่ทำให้ค่าความชื้นในดินเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในอนาคตการออกแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ เพื่อความเหมาะสมในการทดลองภาคสนามในอนาคตแนะนำให้ใช้ระยะห่างของโพรบวัดที่ระยะ 10 ซม.

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการแทรกซึม การกระจาย และการเก็บรักษาน้ำในดินที่ระดับความลึก 10,15,20,25,30 เซนติเมตรจากผิวดิน

ในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าความชื้นในดินและเก็บบันทึกผลที่ความลึก 10, 15, 20, 25, 30 ซม. จากผิวดินตามลำดับ ทดลองด้วยปริมาณน้ำ 150 ,250 ,350 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินทราย ดินเหนียว และดินร่วน ทำการบันทึกผลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นเวลา 0-5 นาทีแรกเก็บผลค่าความชื้นในดินก่อนการชลประทาน ในนาที่ที่ 5 เริ่มทำการชลประทานเพื่อเก็บผลการซึมผ่านของน้ำในแต่ละระดับความลึกโดยปริมาณน้ำที่ทำการชลประทานจะต้องหมดในนาที่ที่ 45 และหลังจากนาที่ที่ 45-60 จะเป็นการเก็บผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นหลังจากการชลประทานตามตารางที่ 3.2 จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้



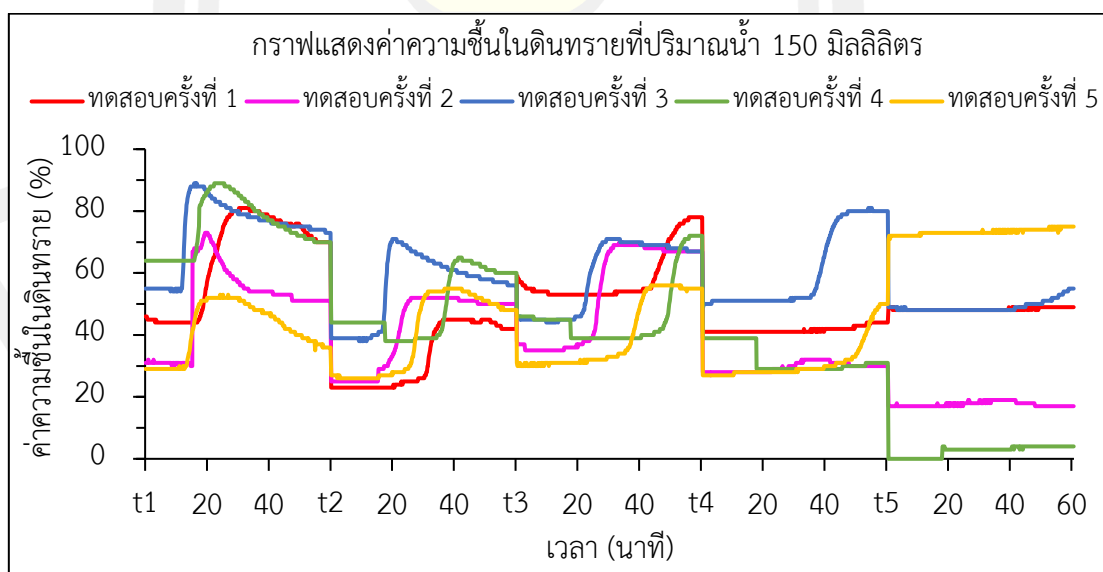
ภาพประกอบ 4.42 การทดลองระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำในดิน

4.2.1. การทดลองในดินทราย

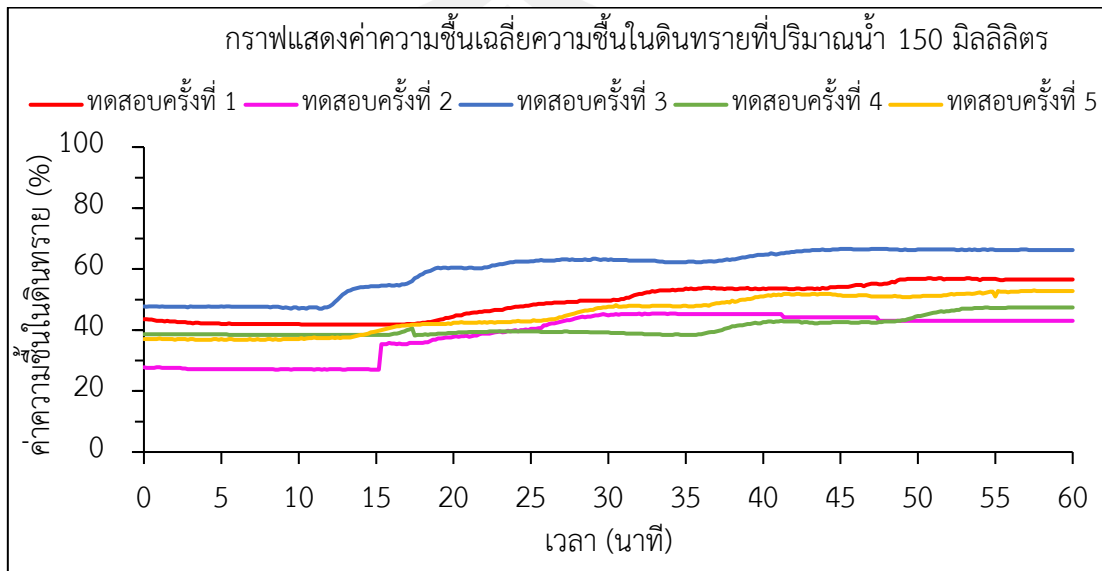


ภาพประกอบ 4.43 การทดลองในดินทราย

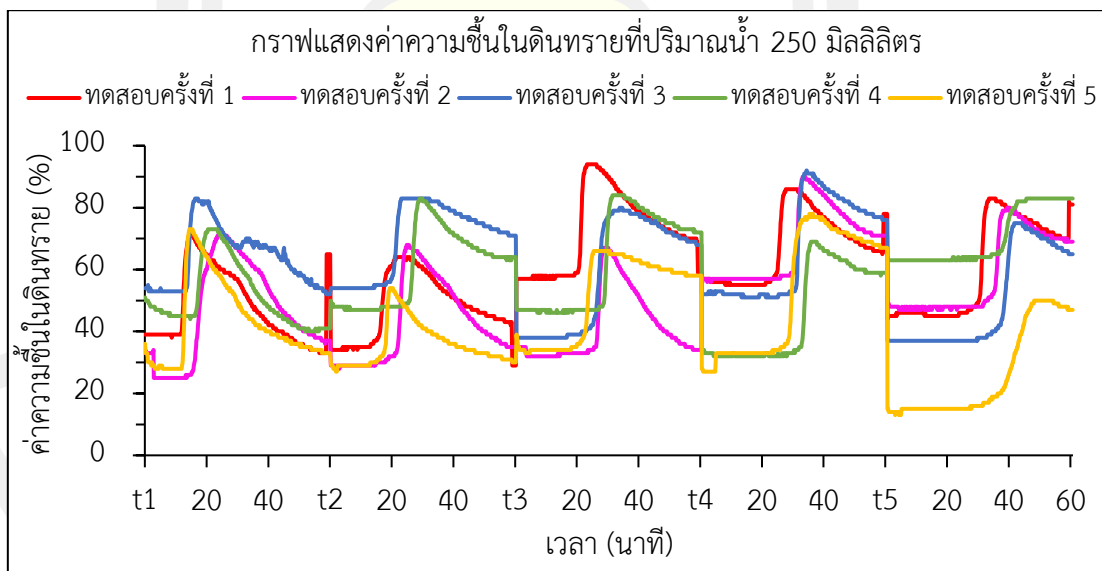
การทดลองและบันทึกผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินทรายที่ระดับความลึก 10, 15, 25, 30 ซม. จากผิวดิน โดยจะแสดงผลการทดลองตามปริมาณน้ำ 150, 250, 350 มิลลิลิตร ตามลำดับดังภาพประกอบ และอธิบายข้อมูลในส่วนท้ายของผลการทดลองดินทราย โดยแกน x ที่เวลาต่างๆ จะบ่งบอกถึงช่วงระยะความลึกคือ $t_1 = 10$ ซม., $t_2 = 15$ ซม., $t_3 = 20$ ซม., $t_4 = 25$ ซม. และ $t_5 = 30$ ซม. ตามลำดับ



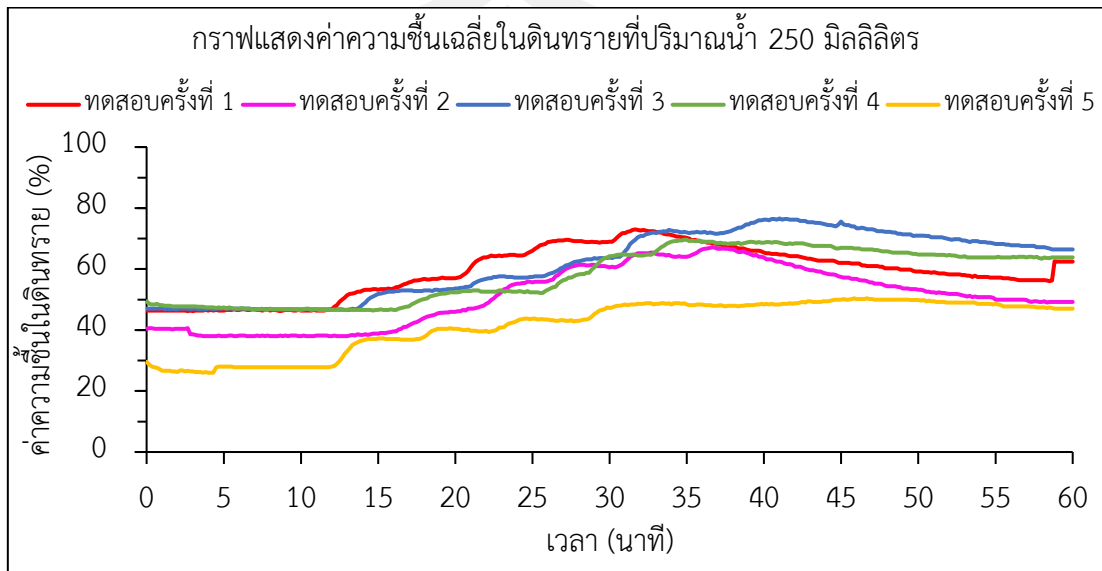
ภาพประกอบ 4.44 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินทรายที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



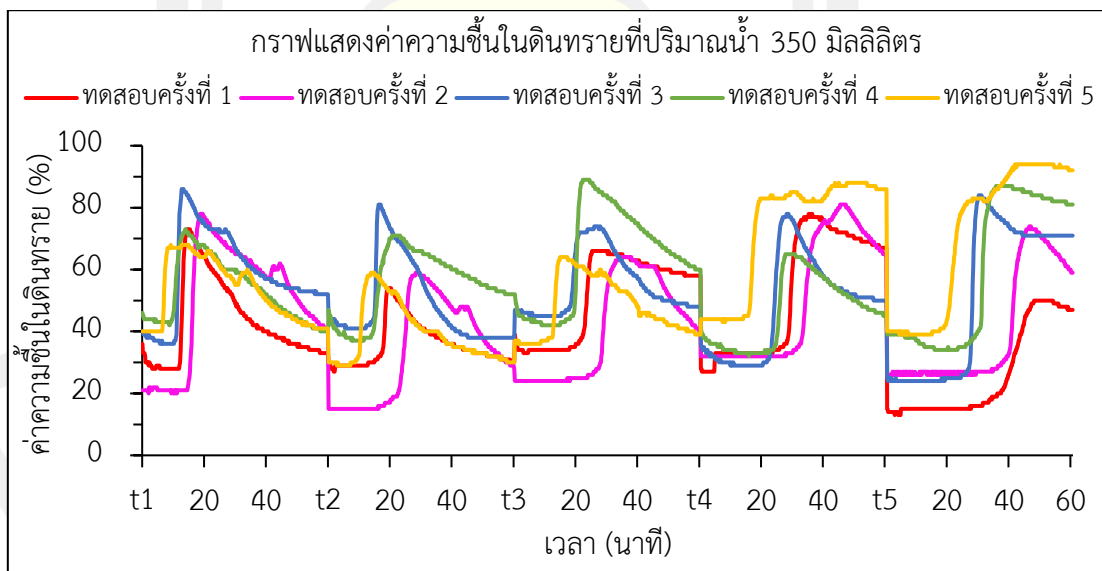
ภาพประกอบ 4.45 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยดินทรายที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



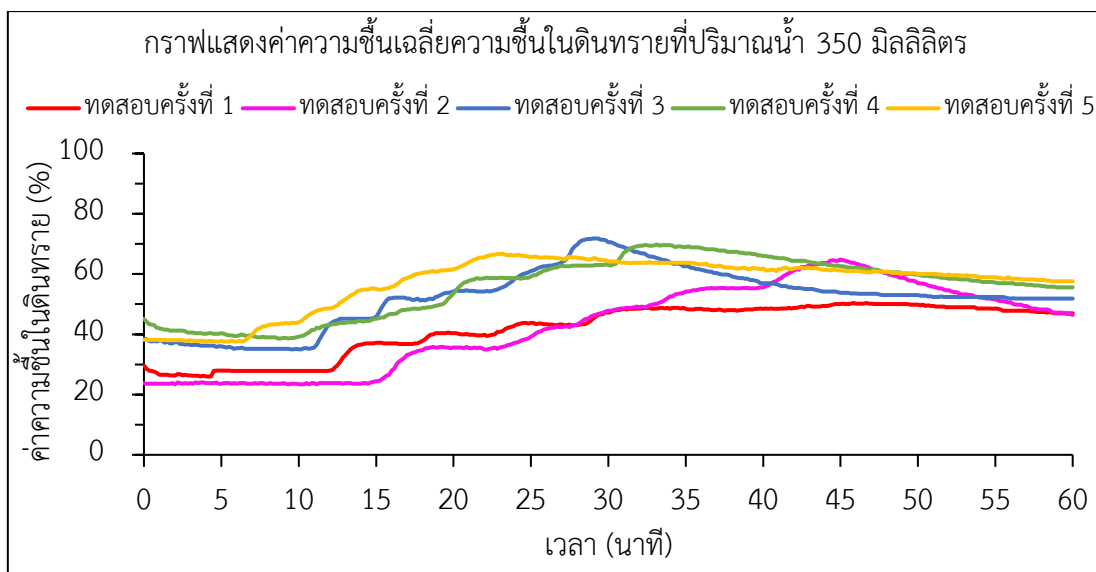
ภาพประกอบ 4.46 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินทรายที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.47 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินทรายที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.48 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินทรายที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.49 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินทรายที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

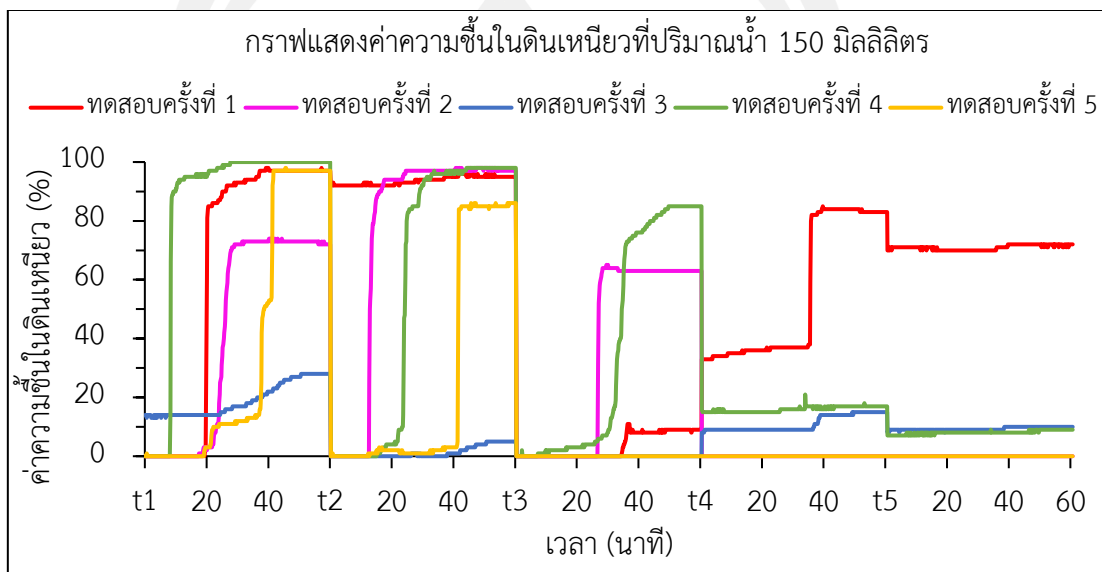
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าน้ำสามารถซึมผ่านชั้นดินทรายได้ดี แต่อุ่มน้ำได้น้อย ดังนั้นการควบคุมค่าความชื้นในดินทรายจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมาก จึงเหมาะสำหรับปลูกพืชที่ต้องการน้ำน้อยและมีความอดทนสูง จากภาพประกอบ 4.15-4.20 แสดงให้เห็นว่าการทำงานของระบบต้นแบบสามารถตรวจวัดค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการตอบสนองต่อความชื้นได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับการใช้งานในสภาพดินที่มีทรายเป็นส่วนใหญ่

4.2.2. การทดลองในดินเหนียว

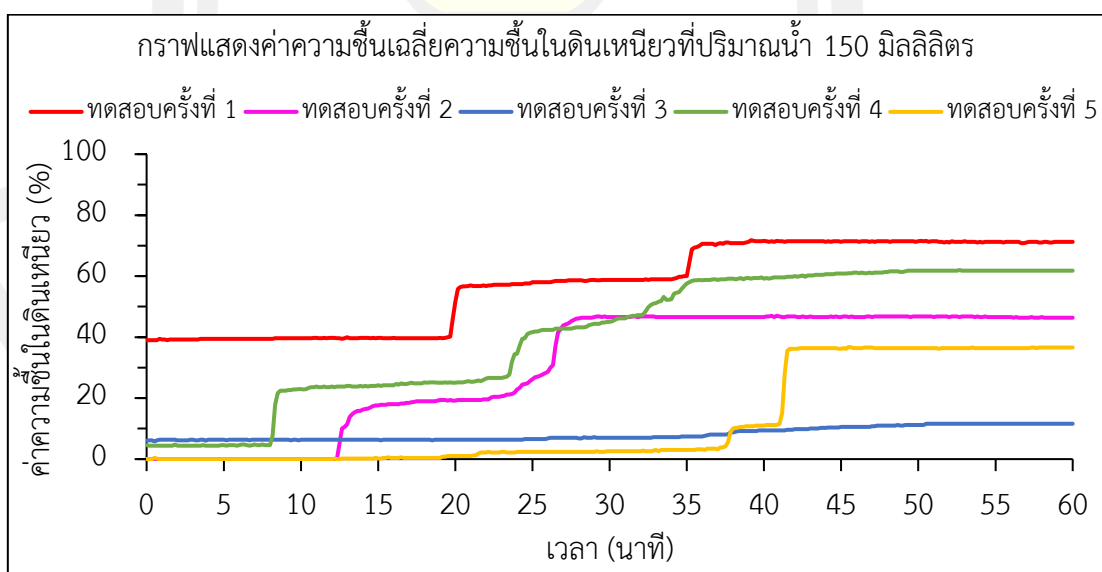


ภาพประกอบ 4.50 การทดลองในดินเหนียว

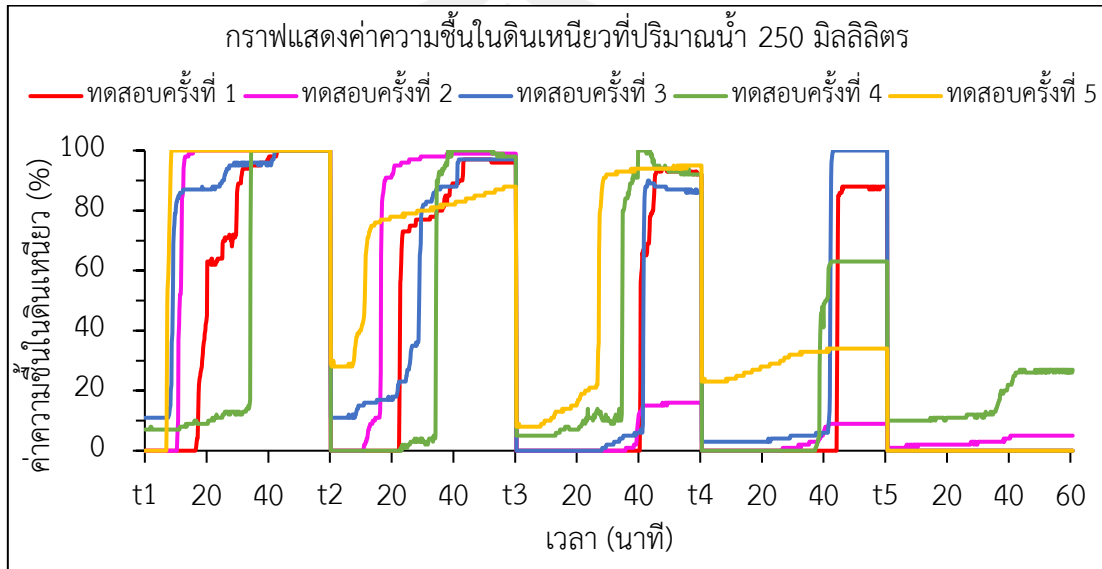
การทดลองและบันทึกผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวที่ระดับความลึก 10, 15, 25, 30 ซม. จากผิวดิน โดยจะแสดงผลการทดลองตามปริมาณน้ำ 150, 250, 350 มิลลิลิตร ตามลำดับดังภาพประกอบ และอธิบายข้อมูลในส่วนท้ายของผลการทดลองของดินเหนียว โดยแกน x ที่เวลาต่างๆ จะบ่งบอกถึงช่วงระยะความลึกคือ $t_1 = 10$ ซม., $t_2 = 15$ ซม., $t_3 = 20$ ซม., $t_4 = 25$ ซม. และ $t_5 = 30$ ซม. ตามลำดับ



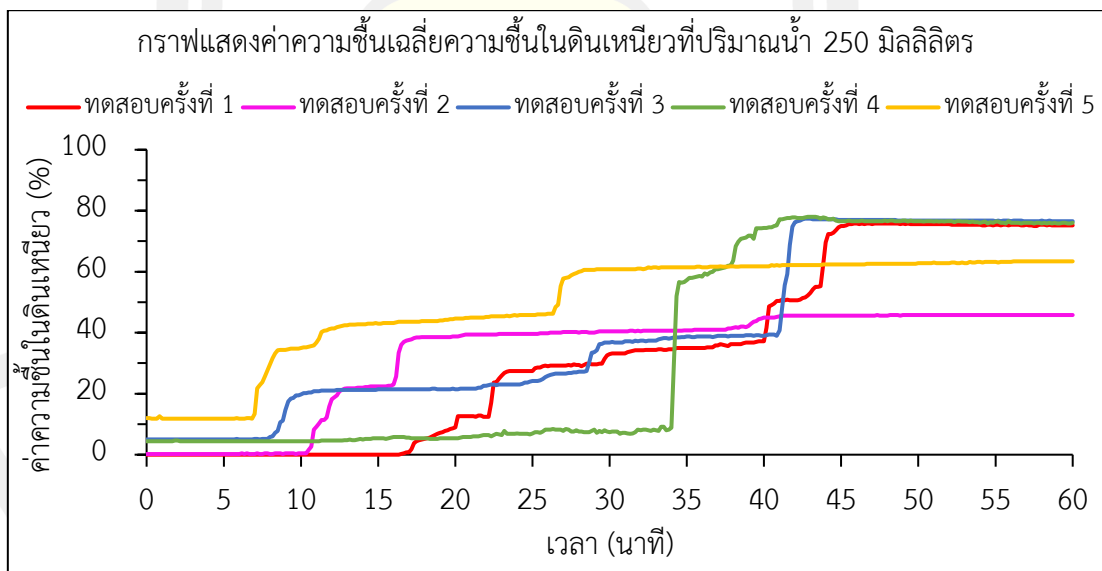
ภาพประกอบ 4.51 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินเหนียวที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



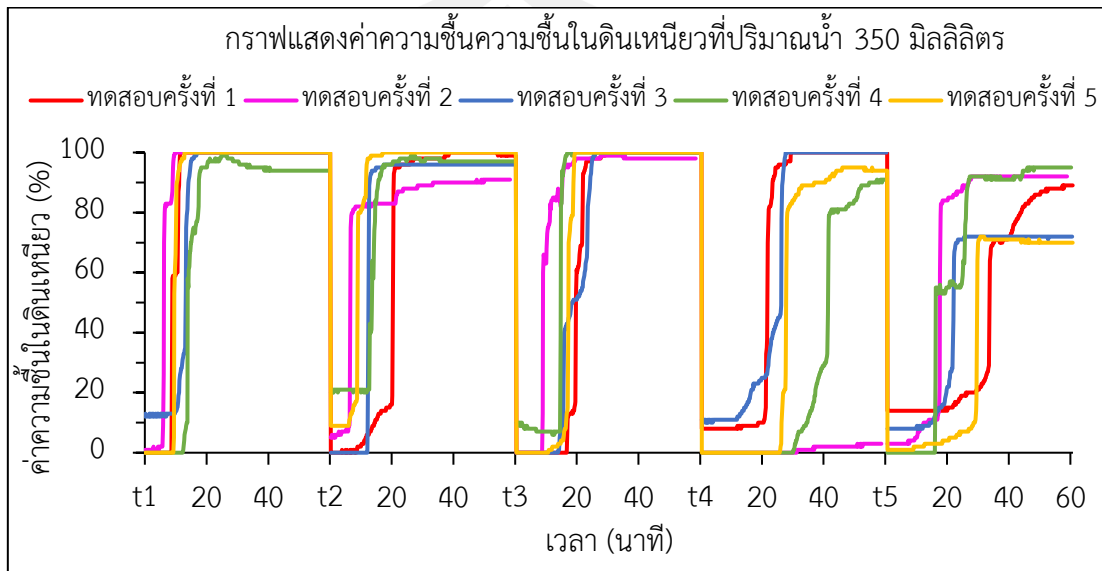
ภาพประกอบ 4.52 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินเหนียวที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



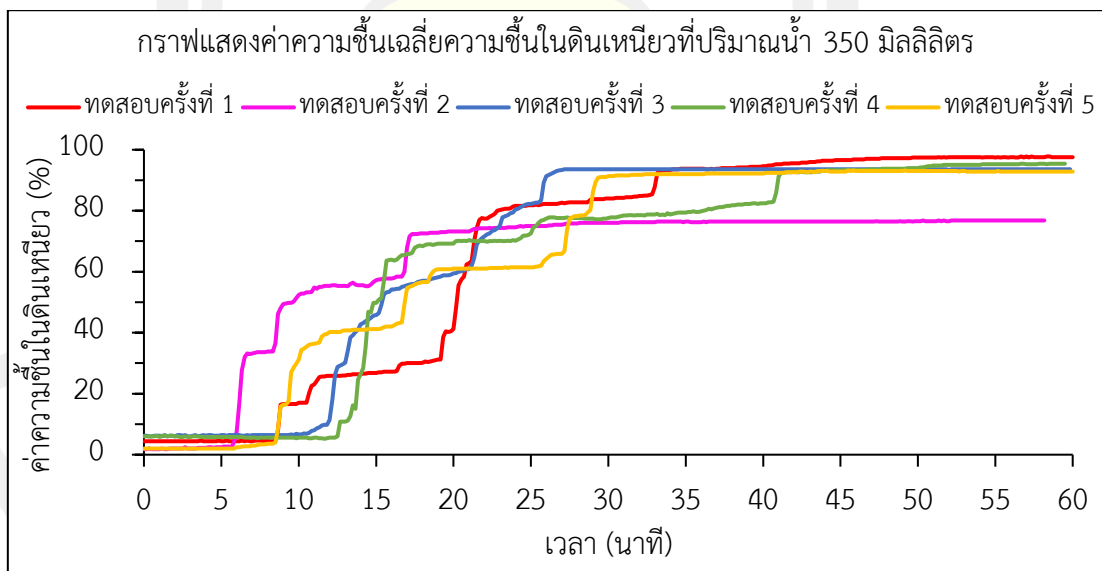
ภาพประกอบ 4.53 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินเหนียวปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.54 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินเหนียวที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.55 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินเหนียวปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.56 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินเหนียวที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

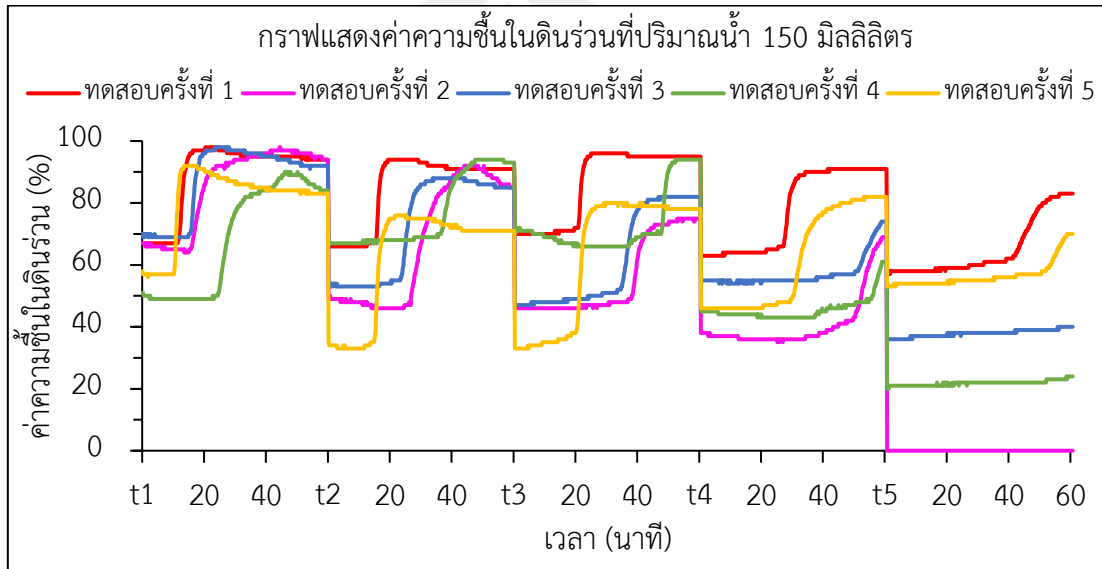
จากภาพประกอบ 4.22-4.27 แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของดินเหนียวสามารถควบคุมค่าความชื้นได้ง่าย เหมาะใช้ทำนาปลูกข้าวเพราะเก็บน้ำได้นาน แต่ถ้าปลูกพืชผลหรือไม้ยืนต้นเพื่อให้ น้ำซึมไปถึงโซนรากพืชที่ใช้ดูดซึ่มสารอาหารตามเวลาที่พืชต้องการควรวางแผนระยะเวลาและปริมาณ น้ำสำหรับการชลประทานเนื่องจากน้ำต้องใช้ระยะเวลานานในการซึมผ่านชั้นดินเหนียว สำหรับการ ทำงานของระบบต้นแบบนั้นจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีระยะเวลาการตอบสนองค่อนข้างช้า จึงไม่ เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับสภาพดินเหนียวร้อยเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเหมาะกับสภาพดินที่มีดิน เหนียวปะปนอยู่ไม่มาก

4.2.3. การทดลองในดินร่วน

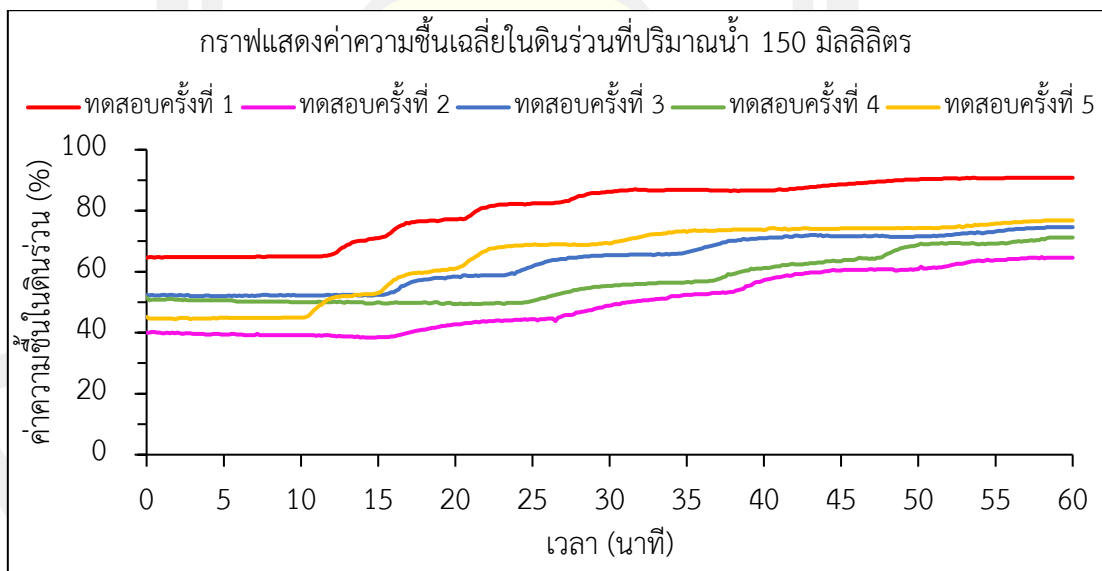
การทดลองและบันทึกผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินร่วนที่ระดับความลึก 10, 15, 25, 30 ซม. จากผิวดิน โดยจะแสดงผลการทดลองตามปริมาณน้ำ 150, 250, 350 มิลลิลิตร ตามลำดับดังภาพประกอบ และอธิบายข้อมูลในส่วนท้ายของผลการทดลองดินร่วน โดยแกน x ที่ เวลาต่างๆ จะบ่งบอกถึงช่วงระยะความลึกคือ $t_1 = 10$ ซม., $t_2 = 15$ ซม., $t_3 = 20$ ซม., $t_4 = 25$ ซม. และ $t_5 = 30$ ซม. ตามลำดับ ในส่วนการสรุปผลจากการทดลองที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการแทรก ซึม การกระจาย และการเก็บรักษาน้ำในดินจะกล่าวในหัวข้อ 4.3



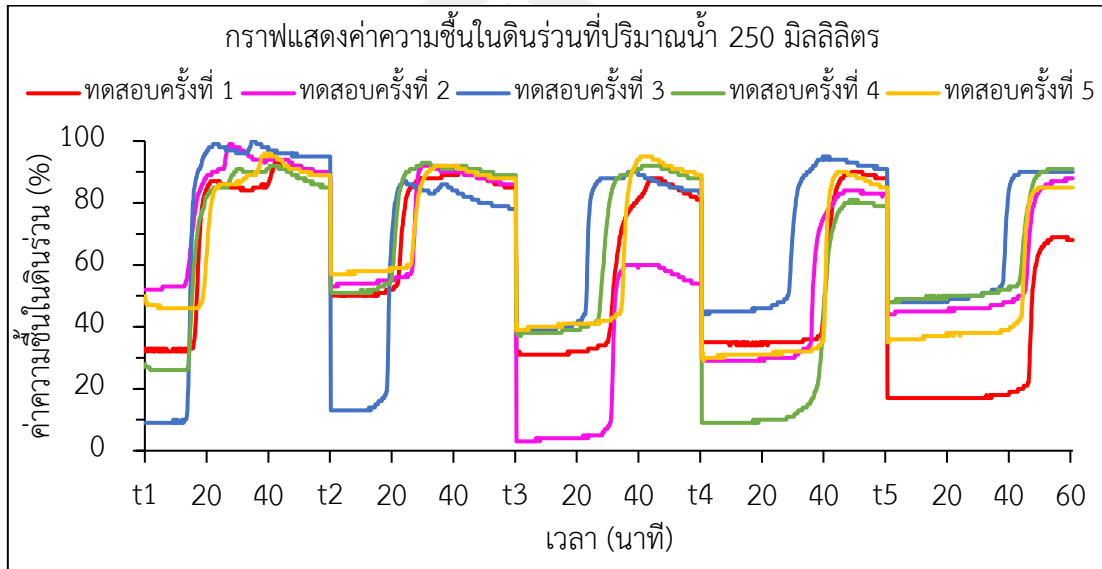
ภาพประกอบ 4.57 การทดลองในดินร่วน



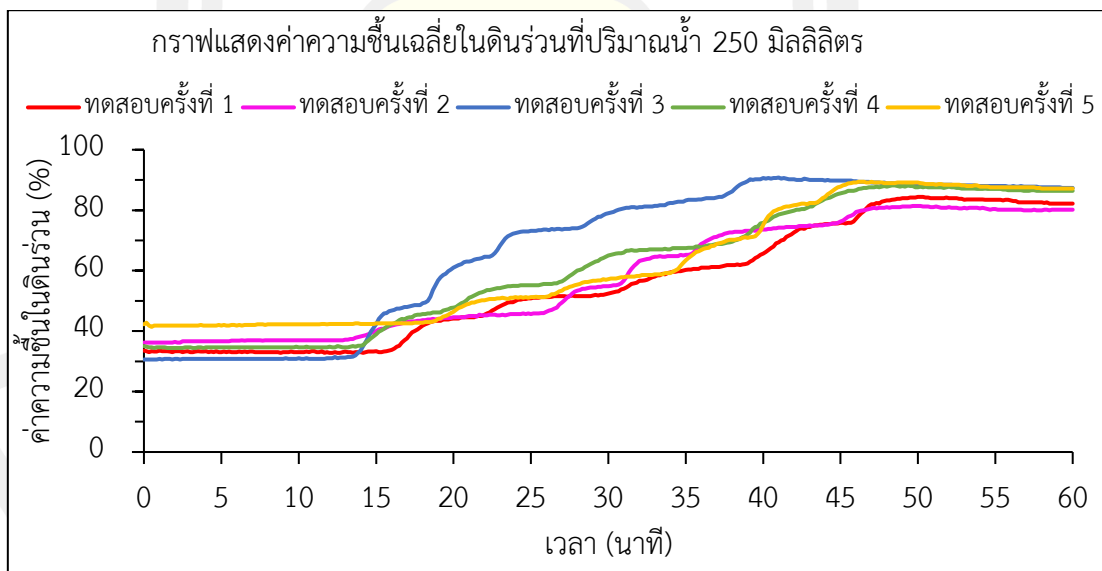
ภาพประกอบ 4.58 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



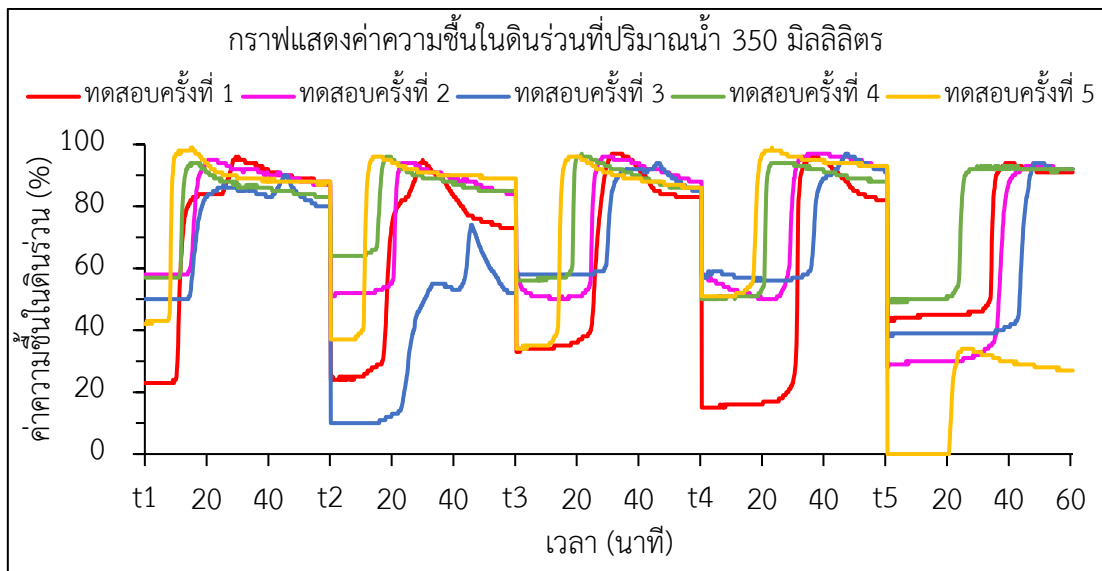
ภาพประกอบ 4.59 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



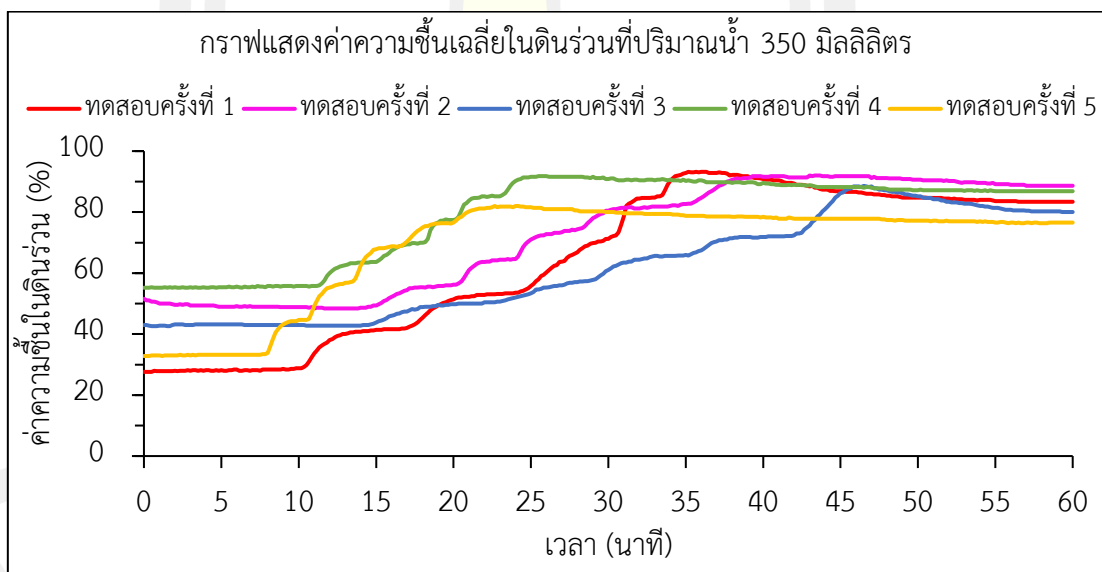
ภาพประกอบ 4.60 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.61 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.62 กราฟแสดงค่าความชื้นในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

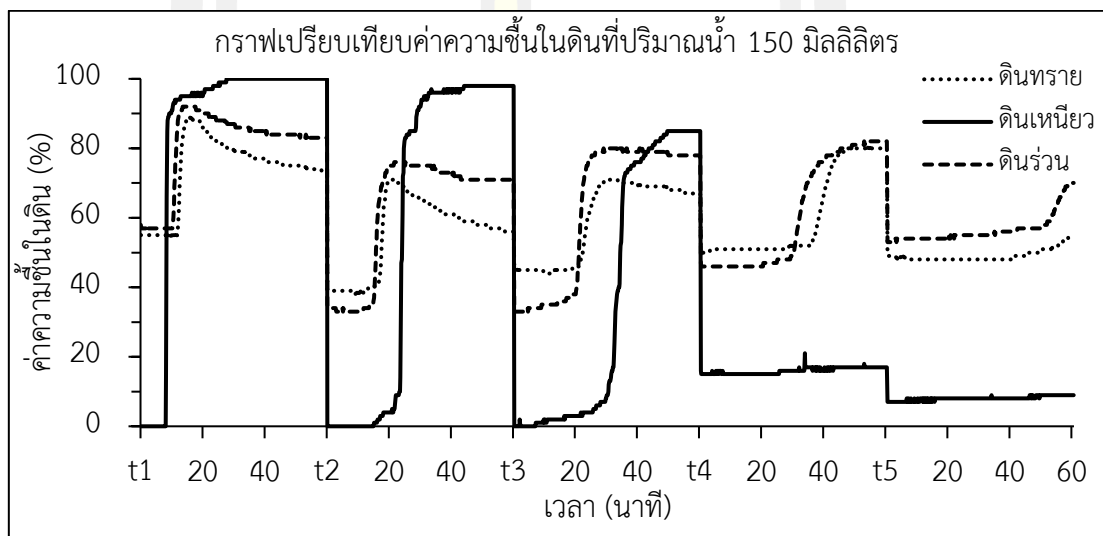


ภาพประกอบ 4.63 กราฟแสดงค่าความชื้นเฉลี่ยในดินร่วนที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

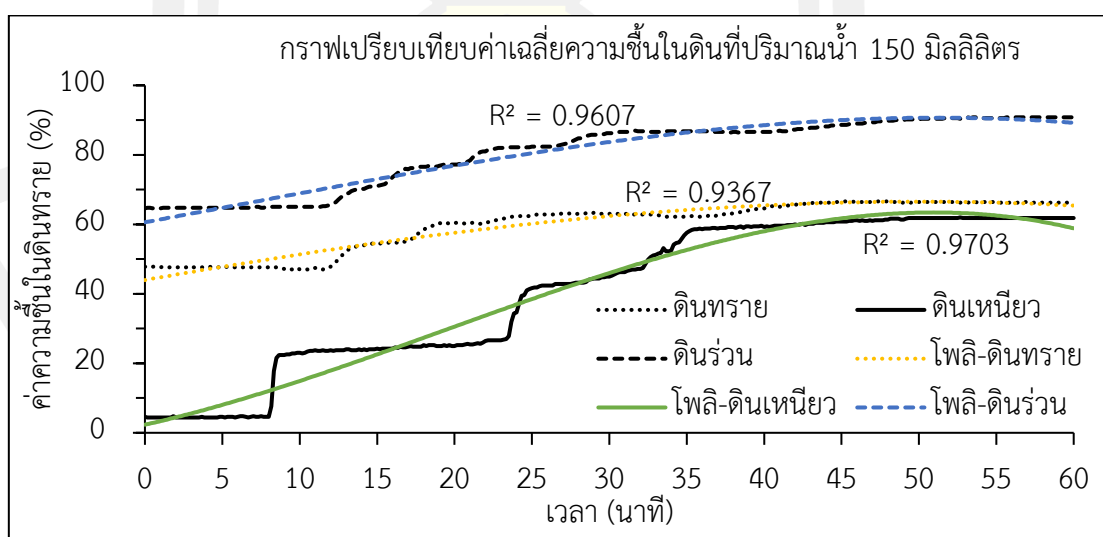
จากภาพประกอบ 4.29-4.34 พฤติกรรมของดินร่วนมีระยะเวลาการอุ้มน้ำและอัตราการซึมที่ดูอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะของดินร่วนเหมาะกับการเพาะปลูกพืช และยังสามารถควบคุมค่าความชื้นตามช่วงที่กำหนดได้ง่าย กล่าวโดยสรุปการทำงานของระบบต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพพื้นที่ที่เป็นดินร่วน

4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดค่าความชื้น

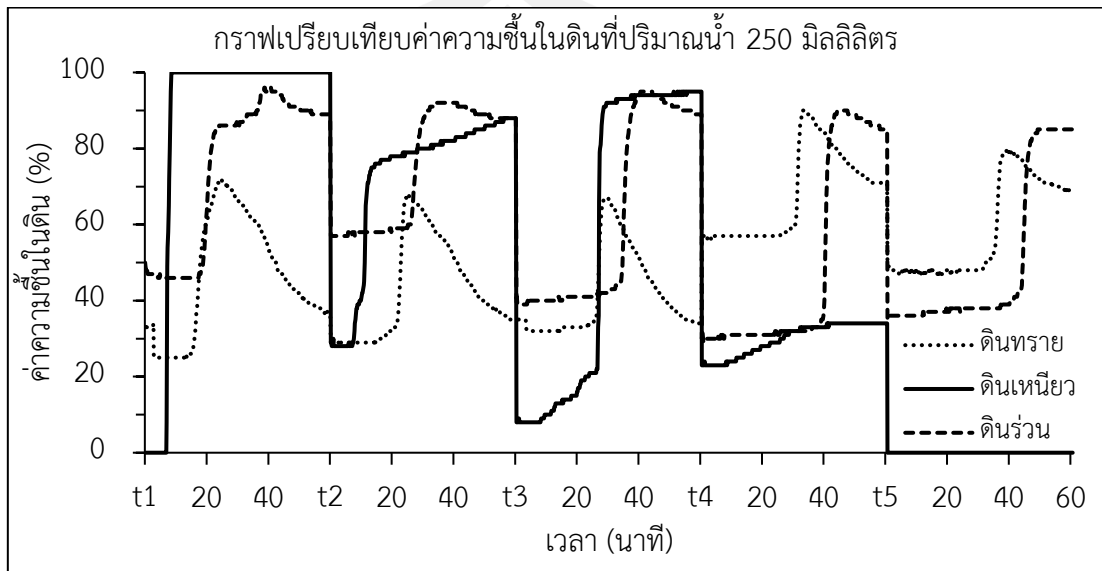
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต้นแบบจะใช้หลักการนำค่าความชื้นเฉลี่ยของดินแต่ละชนิดที่ปริมาณน้ำ 150 ,250 ,350 มิลลิลิตร ตามลำดับ มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์การถดถอยโพลีโนเมียลอันดับสาม เพื่อหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (mean square error) ดังภาพประกอบต่อไปนี้



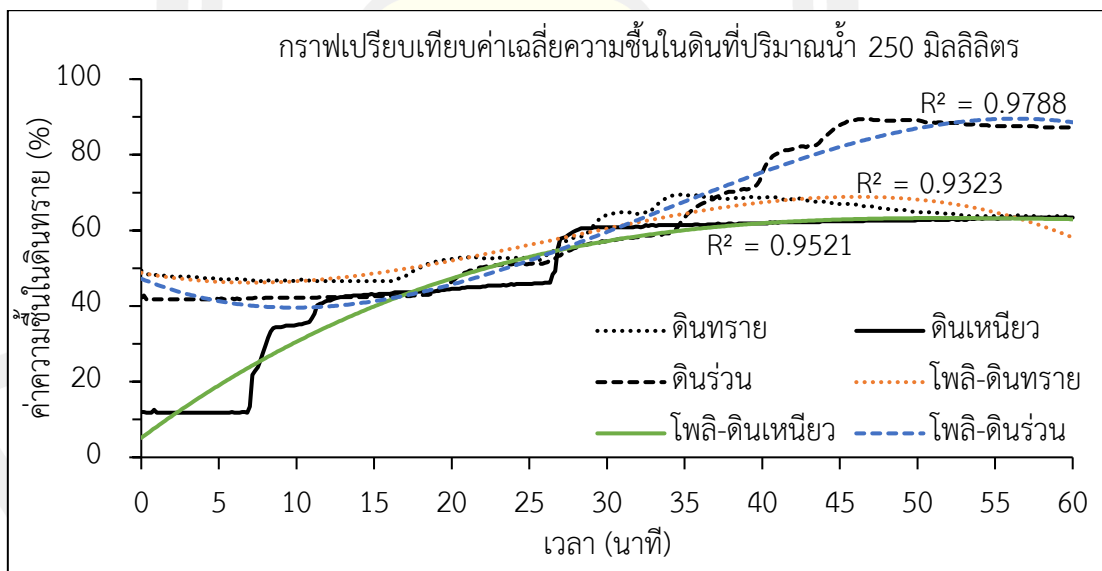
ภาพประกอบ 4.64 กราฟเปรียบเทียบค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



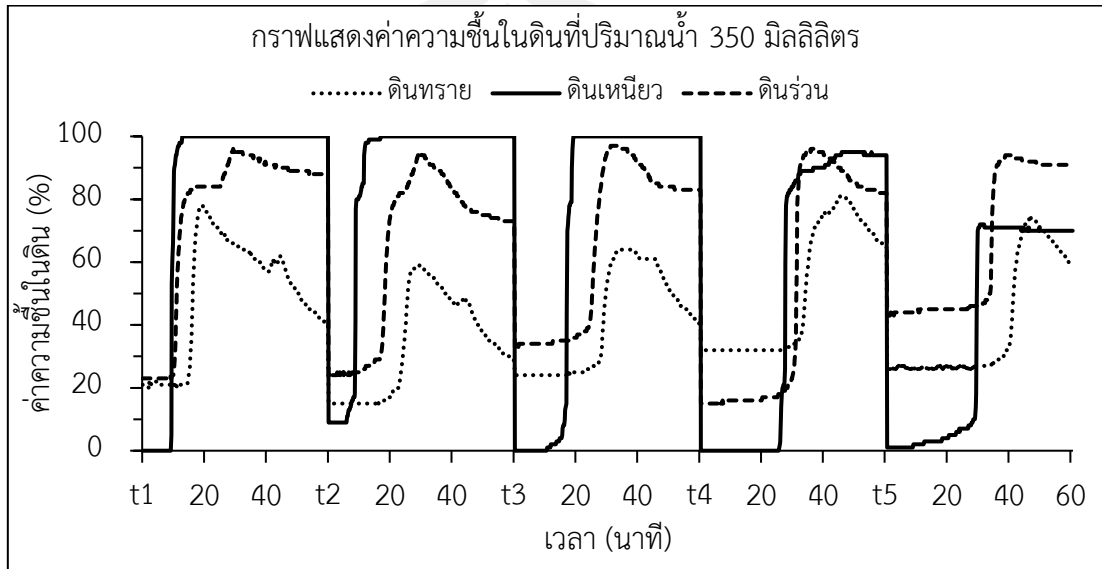
ภาพประกอบ 4.65 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 150 มิลลิลิตร



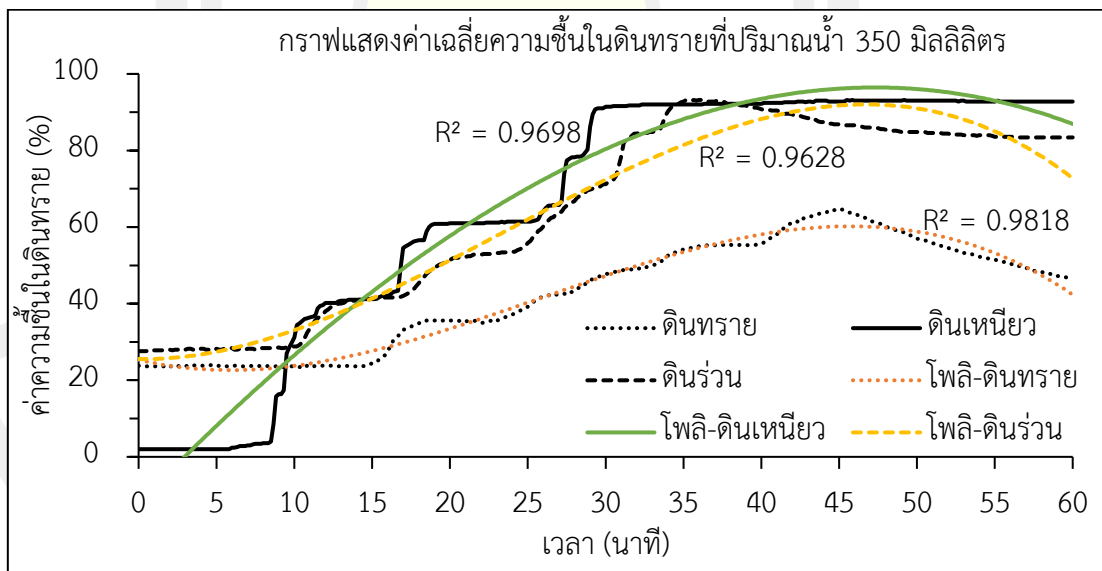
ภาพประกอบ 4.66 กราฟเปรียบเทียบค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.67 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 250 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 4.68 กราฟเปรียบเทียบค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

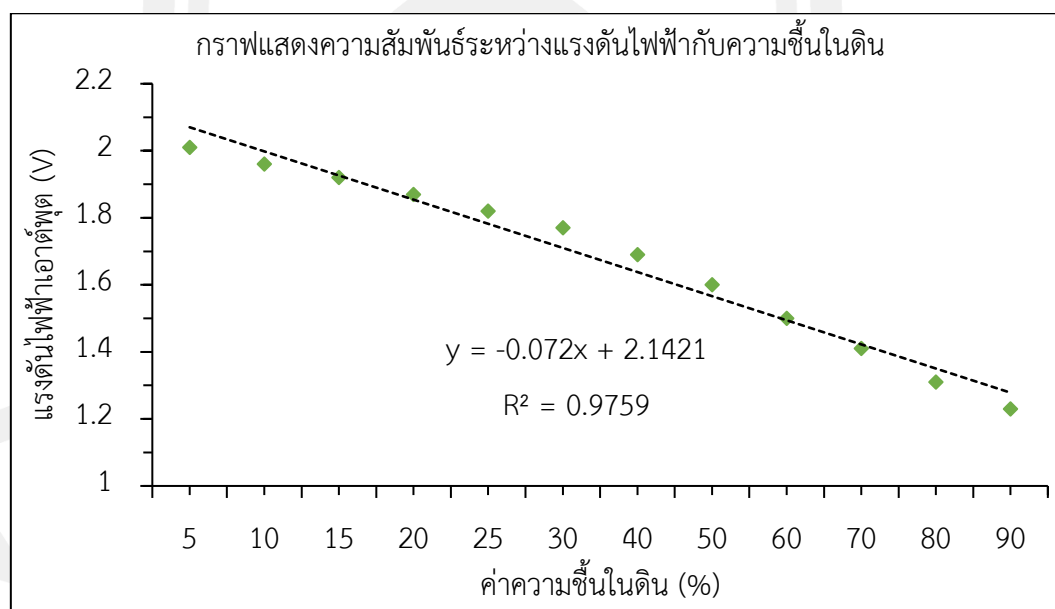


ภาพประกอบ 4.69 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณน้ำ 350 มิลลิลิตร

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต้นแบบนั้นจะใช้การเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มลักษณะของเส้นโค้งว่าสามารถตรวจวัดค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแค่ไหน โดยแกน x ที่เวลาต่างๆ จะบ่งบอกถึงช่วงระยะเวลาความลึกคือ $t_1 = 10$ ซม., $t_2 = 15$ ซม., $t_3 = 20$ ซม., $t_4 = 25$ ซม. และ $t_5 = 30$ ซม. ตามลำดับ จากภาพประกอบที่ 4.35 – 4.40 สามารถสรุปได้ว่าระบบต้นแบบตรวจวัดค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดีโดยที่คืนทรายมีค่า $R^2 = 0.9367$, 0.9323 และ 0.9818 ตามลำดับ, ดินเหนียวมีค่า $R^2 = 0.9703$, 0.9521 และ 0.9698 ตามลำดับ, และดินร่วนมีค่า $R^2 = 0.9607$, 0.9788 และ 0.9628 ตามลำดับ

4.4 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับความชื้นในดิน

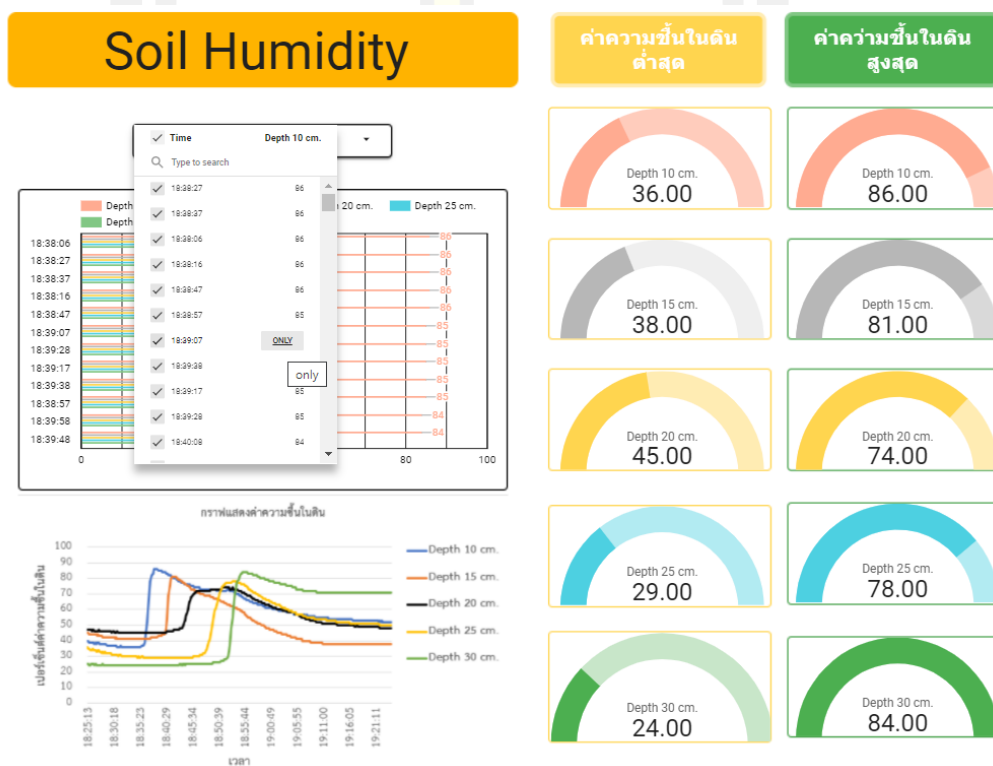
การวัดค่าความชื้นในดินทางอ้อมด้วยเทคนิคเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2) มีแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง 1.2 – 2 โวลต์ ดังภาพประกอบที่ 4.41 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะลดลงและมีค่า $R^2 = 0.9759$ กล่าวโดยสรุปค่าความชื้นในดินแปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



ภาพประกอบ 4.70 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับความชื้นในดิน

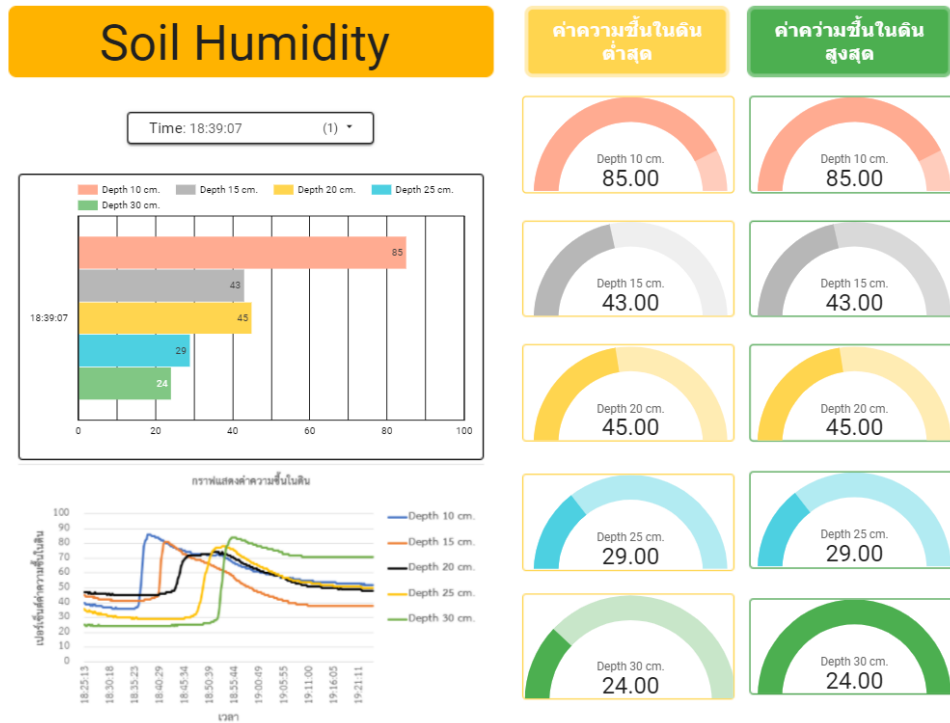
4.5 การแสดงผลข้อมูลของ Data Studio

ข้อมูลที่ได้จากระบบต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน แบบหลายระดับความลึก ถูกดึงมาใช้เพื่อวิเคราะห์และนำมาแสดงเป็นข้อมูลสรุปผลแบบเรียลไทม์บน Data Studio (ดังภาพประกอบ 4.42-4.44) สามารถเลือกดูค่าความชื้นในดินตามเวลาที่บันทึกไว้ได้ เพื่อช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น และเพื่อช่วยวิเคราะห์การควบคุมค่าความชื้นในดินสำหรับการชลประทานด้วยระบบอัตโนมัติ

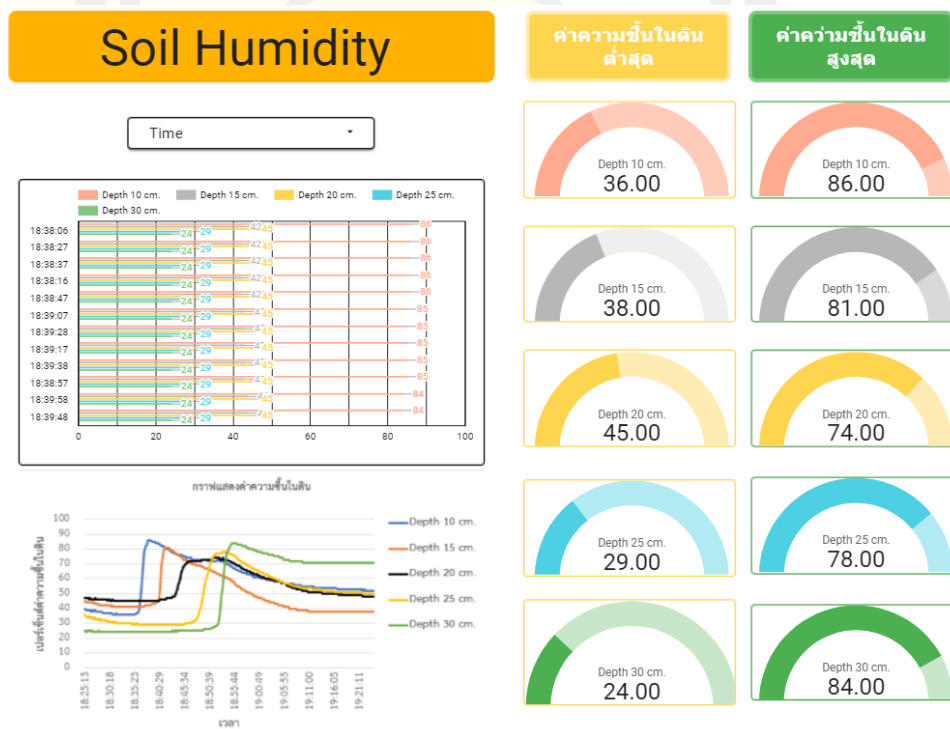


ภาพประกอบ 4.71 การเลือกดูข้อมูลค่าความชื้นในดินในเวลานั้นๆ

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 4.72 จอแสดงผลข้อมูลค่าความชื้นในดินของเวลาที่ถูกลีเลือก



ภาพประกอบ 4.73 จอแสดงผลสรุปข้อมูลแบบเรียลไทม์ของ Data Studio

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการใช้อุปกรณ์ราคาประหยัดที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและมีสื่อการเรียนการสอนที่แพร่หลาย เพื่อให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่ายขึ้น เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเริ่มด้วยการนำโพรบวัดความชื้นในดินที่มีราคาประหยัด (Capacitive moisture sensor V1.2) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3) เก็บข้อมูลด้วยระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วยการใช้ Node MCU ESP8266-WiFi V3 ส่งข้อมูลไปที่ Google Sheet และทำการทดลองวัดอย่างง่ายเพื่อหาระยะห่างที่ทำให้การทำงานของโพรบวัดเกิดความคลาดเคลื่อน, ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินที่ความลึก 10, 15, 20, 25 และ 30 ซม. กับดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทราย, ดินเหนียว และดินร่วน และศึกษาค่าความชื้นที่ความลึกต่างกัน นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเป็นประโยชน์ในการควบคุมค่าความชื้นในดิน, การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด และลักษณะของพืชที่เหมาะสมกับดินทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การทดลองระยะห่างของโพรบที่เหมาะสมตั้งแต่ระยะ 0-10 ซม. เพื่อหาระยะห่างที่ทำให้การวัดของโพรบวัดเกิดความคลาดเคลื่อน พบว่าที่ระยะ 0-10 ซม. ไม่มีผลต่อการวัดที่ทำให้ค่าความชื้นเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในอนาคตการออกแบบอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินสำหรับการทดลองภาคสนามแนะนำให้ใช้ระยะห่างของโพรบวัดที่ระยะ 10 ซม.

2. พฤติกรรมของน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินทรายมีอัตราการซึมเฉลี่ยที่ 0.62-1.34 ซม./นาที่, ลักษณะของการรักษาความชื้นสูงสุดอยู่ในช่วง 60- 80%, ต้องใช้ปริมาณน้ำมากในการรักษาความชื้นจึงเหมาะสำหรับปลูกพืชที่ขยายพันธุ์ได้จากรากเหง้า หน่อ, ทนแล้งและต้องการน้ำน้อย ในส่วนของดินเหนียวมีอัตราซึมเฉลี่ย 0.57-0.87 ซม./นาที่, ต้องการปริมาณน้ำที่น้อยในการรักษาความชื้น, สามารถอุ้มน้ำ คูดียึด และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดีเหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าวเพราะเก็บน้ำได้นาน และดินร่วนมีอัตราซึมเฉลี่ย 0.78-1.20 ซม./นาที่, พบว่าสามารถรักษาความชื้นอยู่ในช่วง 80-90% ไว้ได้ดี, เหมาะกับพืชที่ต้องการรักษาความชื้น ลักษณะของกราฟที่นำมาวิเคราะห์สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่วัดได้จากพื้นที่การเกษตรเพื่อวิเคราะห์ลักษณะและชนิดของดินที่ทำการเพาะปลูก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการชลประทานอัตโนมัติสำหรับใช้ควบคุมค่าความชื้น

ในดินให้เหมาะสมตามความต้องการของพืช, ช่วยเพิ่มคุณภาพของผลผลิต และช่วยประหยัดน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูก

3. จากการนำข้อมูลในการทดลองมาวิเคราะห์รูปแบบการถดถอยไม่เชิงเส้นด้วยรูปแบบโพลิโนเมียลลำดับสาม เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโพรบวัดค่าความชื้นราคาประหยัด (Capacitive moisture sensor V1.2) และการทำงานของระบบต้นแบบ พบว่าในดินทรายมีค่า $R^2 = 0.9367$, 0.9323 และ 0.9818 ตามลำดับ ดินเหนียวมีค่า $R^2 = 0.9703$, 0.9521 และ 0.9698 ตามลำดับและดินร่วนมีค่า $R^2 = 0.9607$, 0.9788 และ 0.9628 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณน้ำและการควบคุมค่าความชื้นในดินทั้ง 3 ชนิด

4. จากความสัมพันธ์ของค่าความชื้นในดินกับแรงดันไฟฟ้า พบว่าถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงค่าความชื้นในดินจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นค่าความชื้นในดินจะน้อยลงตามไปด้วย กล่าวโดยสรุปค่าความชื้นในดินจะแปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หากมีการทดลองในอนาคตควรจะพิจารณาความหนาแน่นของดินและขนาดของก้อนดินเพิ่มเติม เพราะจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างดินส่งผลให้ระยะเวลาที่น้ำใช้ในการซึมผ่านชั้นดินมีความคลาดเคลื่อนได้

2. การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาาระบบต้นแบบของอุปกรณ์วัดความชื้นในดินเพื่อช่วยให้เกษตรกรที่อยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนาและประสบกับปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำได้เข้าถึงเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมค่าความชื้นในดินและสามารถการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

3. พัฒนาโครงสร้างของโพรบวัดให้มีลักษณะวงแหวนเพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. "สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2562". เอกสารเผยแพร่ [Internet]. 2563 [สืบค้นเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2563]. ได้จาก: <http://www.oae.go.th/>.
- [2] สุวัฒน์ เปี่ยมปัจจัย, ดวงตา ตันโซ, คณະนัคศึกษา. "การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : การบริหารจัดการปัญหาภัยแล้ง". Rattaphirak Journal. 2015;57(1):53-67.
- [3] ขวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล, ดุลยพล เหลืองพิ้ง. "ผลกระทบของลักษณะลมและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อภัยแล้ง". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25. 2020;25:WRE19-WRE.
- [4] คชา เศรษฐบุตร. "การวิเคราะห์ผลกระทบของปัญหาภัยแล้งต่อการปลูกพืช ไร่เศรษฐกิจในจังหวัดนครราชสีมาโดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ : กรณีศึกษาอำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย": สาขาวิชาการรับรู้จากระยะไกล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2008.
- [5] สุริรัตน์ คนเพียร, จตุรงค์ สมอาจ, วรวิทย์ จิตรสุขขา, และสาวิตรี รตโนภาสสุวรรณลี. "การตรวจวัดพื้นที่พื้นที่ไฟป่าเขตอนุรักษ์ในพื้นที่จังหวัดเลยด้วยข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT หลายช่วงเวลา". Thai Science and Technology Journal. 2020:1185-201.
- [6] Dukes MD, Simonne EH, Davis WE, Studstill DW, Hochmuth R, editors. Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. Proceedings of 2nd International Conference on Irrigation and Drainage, May; 2003: Citeseer.
- [7] สมมิตร คุณเจตน์, ไพฑูรย์ ศรีนิล, สมบัติ ฝอยทอง, สุขนทิพย์ เภาโมรา, และเอื้อน ปิ่นเงิน. "การศึกษาปริมาณความต้องการน้ำและวิธีการให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับทุเรียนพันธุ์หมอนทอง". โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พศ 2561.
- [8] ลาภวัต วงศ์ประชา, และอังศุมาลิน สมเทพ. "การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดในโรงเพาะเห็ดกรณีศึกษา : ฟาร์มเห็ดบ้านเนินสะอาด". JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2018;8(2):46-55.
- [9] วีระศักดิ์ สมยานะ. "การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตรบนฐานเศรษฐกิจพอเพียง". Rajabhat Chiang Mai Research Journal. 2019;20(2):14-27.

- [10] อนุสรณ์ ยอดใจเพชร. "ระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงสำหรับการบริหารจัดการน้ำระยะไกล". วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม. 2020;2(2):15-23.
- [11] เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, และเดือน แรมแพ่งเกี้ยว. "การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล่อน". วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 2019;11(2):269-78.
- [12] Smartfarmdiys. "CropX Basic Sensor Tel Aviv ประเทศ Israel" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก: <http://www.smartfarmdiys.com>.
- [13] Jorapur N, Palaparthi VS, Sarik S, John J, Baghini MS, Ananthasuresh G. "A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique". Sensors and Actuators A: Physical. 2015;233:108-17.
- [14] Li J, Hong T, Feng R, Yue X, Luo Y. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2011;27(8):216-21.
- [15] สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน. "ประเภทของดิน" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก: http://osl101.ldd.go.th/easysoils/s_type.htm.
- [16] อภิชาติ อนุกุลอำไพ, วิบูลย์ บุญยชโรกุล, มรวราช วุฒินิษฐ์, โกวิท ท้วม เสี่ยงม, และมนตรี คำชู. "คู่มือการชลประทานระดับไร่นา". ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร: สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย; 2524.
- [17] ธวัชชัย ณ นคร. "ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช". Thai Agricultural Research Journal. 1983;1(3):185-95.
- [18] บุญมา ป่านประดิษฐ์. "หลักการชลประทาน". ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2546.
- [19] สามารถ ใจเตี้ย. "นิเวศวัฒนธรรมเพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำ". Ganesha Journal. 2014;10(1):13-23.
- [20] พันธุ์รัตน์ ภ. "ประสิทธิผลการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตรในเขตลุ่มน้ำชี". วารสารบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2016;2(2):182-94.
- [21] วรชัย สกกุลพจน์วรชัย, และวรัช ก้องกิจกุล. "ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดิน". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25. 2020;25:GTE29-GTE.
- [22] วกร สีสัมฤทธิ์, นพดล ไชยประเสริฐ, และธีรพงษ์ จันทะเสน. "เครื่องควบคุมระดับความชื้นในดิน". Vocational Education Innovation and Research Journal. 2018;2(2):15-23.
- [23] สมกรณ์ ชัยวรการณ, สุนิตย์ โรจนสุวรรณ, และยุสรี ต่อเกาะแข็ง. "การวัดค่าความเข้มข้นน้ำ

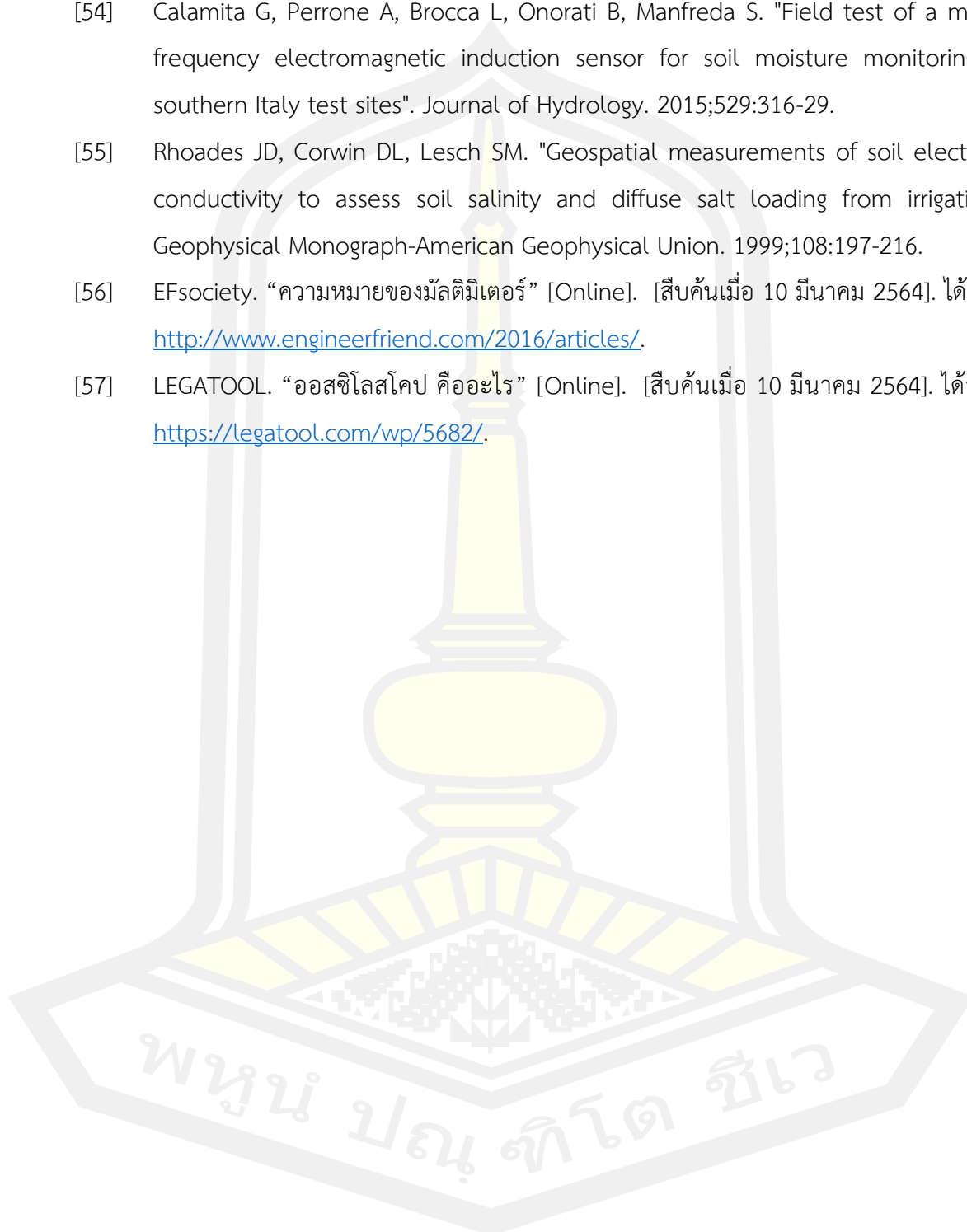
- ยางพาราด้วยเทคนิคตัวเก็บประจุแผ่นขนาน". วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มร ย. 2016;1(2):43-52.
- [24] อัษฎานันท์ บุญศรี, อธิธิพล เหลลาพรม, สัญญา พรหมภาสิต, วิษณุ บัวเทศ, และเทพ เกื้อทวีกุล. "การวิเคราะห์หาความต้านทานทางไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดระดับความชื้นในดิน". รายงานสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ กำแพงเพชร 2558.
- [25] ชิตชัย โพธิ์ประภา. "ตัวเก็บประจุ (Capacitor)" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก: <http://phchitchai.wbvschool.net/archives/611>.
- [26] พิสิทสรชวมงคล. "การทำงานของตัวเก็บประจุ" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้ จาก : <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/hydraulic-pump/hydraulic-pump11.htm>.
- [27] ไอซีอี. "อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก: <http://icelectronic.com/beginner/study/imped.htm>.
- [28] Wikimedia Commons. "Complex Impedance" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Complex_Impedance.svg.
- [29] ธวัชชัย ทองเหลี่ยม. "เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์". เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [Internet]. 15 กุมภาพันธ์ 2564. ได้จาก: <http://sc.npru.ac.th/document/file/1401252951.pdf>.
- [30] พัฒนา อินทนิ, จันทร อัญญาโพธิ์, ชัยนิยม พลตร, และธาดา คำแดง. "วงจรรออสซิลเลเตอร์ แบบวงแหวนที่มีอัตราสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่ำโดยใช้ออสซิลเลเตอร์แบบเกท-บอดี". วารสาร วิชาการ ปทุมวัน Pathumwan Academic Journal. 2014;4(9):11-24.
- [31] อารัมภ์ กิติพงษ์วัฒนา, พูลศักดิ์ โกษิยาภรณ์, จีรสุดา โกษิยาภรณ์, และปราโมทย์ วาดเขียน. "การค้นหาย่านการลือกของวงจรรหาความถี่จำนวนคี่ที่อาศัยวงจรรออสซิลเลเตอร์ แบบผ่อน คลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือก". Ladkrabang Engineering Journal. 2015;32(2):7-12.
- [32] อธิธิพล กันศิริ, และมนตรี คำเงิน. "วงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับสามโดยใช้วงจรร OTRA". Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2015;25(1):53-61.
- [33] อนุชา แก้วพูลสุข. "วงจรรรณะแบบพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณ สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะ แบบออสซิลเลเตอร์ ความถี่บีตส์". Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2011;21(1):41-51.
- [34] Y. RKHISSI KAMMOUN. "โครงสร้างภายในไมโครคอลโทรเลอร์" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 17

- กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก : <https://studylibr.com/doc/4297937/chapitre-2-microcontroleur-pic-16f877>.
- [35] ทันพงษ์ ภูริรักษ์. “ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น” [สืบค้นเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2564]. [Online]. ได้จาก: http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP_Unit_1.pdf.
- [36] คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ. “ความรู้เบื้องต้นโครงข่าย IoT” [Online]. บทความคณะสนับสนุนงานด้านวิชาการของเลขาธิการ กสทช. ไตรมาส 3 ปี 2560; [สืบค้นเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2564]. ได้จาก : <http://www.nbt.go.th/Services/quarter2560/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2560.aspx>.
- [37] Gao Z, Zhu Y, Liu C, Qian H, Cao W, Ni J. "Design and test of a soil profile moisture sensor based on sensitive soil layers". *Sensors*. 2018;18(5):1648.
- [38] Hua Y, Zejun T, Zhen X, Dingneng G, Haoxing H. "Design of soil moisture distribution sensor based on high-frequency capacitance". *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016;9(3):122-9.
- [39] González-Teruel JD, Torres-Sánchez R, Blaya-Ros PJ, Toledo-Moreo AB, Jiménez-Buendía M, Soto-Valles F. Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*. 2019;19(3):491.
- [40] Qinglan S, Yujiao S, Xiaochen L, Shuli M, Lei F. "A high-sensitivity multilayer soil moisture monitoring sensor based on a double high-frequency tuning detection circuit". *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020;16(2):1550147720907826.
- [41] ปองพล นิลพฤษ, กิรติบุตร กาญจนเสถียร, และบุรัสกร อยู่สุข. "โปรโตไทป์ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนสภาพดินในสวนทุเรียนกรณีศึกษา ต. บึงกาสาม อ.หนองเสือ จ. ปทุมธานี". *RMUTT Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*. 2018;17(1):33-44.
- [42] Nagahage EAAD, Nagahage ISP, Fujino T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. *Agriculture*. 2019;9(7):141.
- [43] Placidi P, Gasperini L, Grassi A, Cecconi M, Scorzoni A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. *Sensors*. 2020;20(12):3585.

- [44] Okasha AM, Ibrahim HG, Elmetwalli AH, Khedher KM, Yaseen ZM, Elsayed S. Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management. *Sensors*. 2021;21(16):5387.
- [45] Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, Hussain SA. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*. 2012;458:110-7.
- [46] Medeiros WN, Valente DSM, Queiroz DMd, Pinto FdAdC, Assis IRd. Apparent soil electrical conductivity in two different soil types1. *Revista Ciência Agronômica*. 2018;49:43-52.
- [47] Yin Z, Lei T, Yan Q, Chen Z, Dong Y. "A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement". *Computers and electronics in agriculture*. 2013;99:101-7.
- [48] Corwin D, Lesch S. "Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines". *Agronomy journal*. 2003;95(3):455-71.
- [49] Huth N, Poulton P. "An electromagnetic induction method for monitoring variation in soil moisture in agroforestry systems". *Soil Research*. 2007;45(1):63-72.
- [50] Singh AK, Bhardwaj AK, Verma C, Mishra V, Singh AK, Arora S, et al. "Soil moisture sensing techniques for scheduling irrigation". *J Soil Salin Water Qual*. 2019;11:68-76.
- [51] Sulaiman S, Manut A, Firdaus AN, editors. "Design, fabrication and testing of fringing electric field soil moisture sensor for wireless precision agriculture applications". 2009 International Conference on Information and Multimedia Technology; 2009: IEEE.
- [52] Badewa E, Unc A, Cheema M, Kavanagh V, Galagedara L. "Soil moisture mapping using multi-frequency and multi-coil electromagnetic induction sensors on managed podzols". *Agronomy*. 2018;8(10):224.
- [53] Vereecken H, Huisman J, Pachepsky Y, Montzka C, Van Der Kruk J, Bogaen H, et al. "On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale". *Journal*

of Hydrology. 2014;516:76-96.

- [54] Calamita G, Perrone A, Brocca L, Onorati B, Manfreda S. "Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites". Journal of Hydrology. 2015;529:316-29.
- [55] Rhoades JD, Corwin DL, Lesch SM. "Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation". Geophysical Monograph-American Geophysical Union. 1999;108:197-216.
- [56] EFSociety. "ความหมายของมัลติมิเตอร์" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2564]. ได้จาก: <http://www.engineerfriend.com/2016/articles/>.
- [57] LEGATOOL. "ออสซิลโลสโคป คืออะไร" [Online]. [สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2564]. ได้จาก: <https://legatool.com/wp/5682/>.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายภาคภูมิ พันธุ์จันทร์
วันเกิด	วันที่ 26 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสระแก้ว
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 226/95 ซอยประชาสโมสร 40 ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	Research and Development Engineer
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท All Information Technologies Co., Ltd. (ALLIT) เลขที่ 512 หมู่ 11 ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสมเด็จพระพิทยาคม อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและความพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	โครงการ TIME (Total Innovation Management Enterprise) โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ร่วมกับ ภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ บริษัท All Information Technologies Co., Ltd.

พหุ อนุ ภิ ติ โ ต ชี เว