



รายงานสหกิจศึกษาระดับสมบูรณ

การศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

The study and development of capacitive soil moisture sensor

นายจักรกฤษณ์ พาทีทิน

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ Capacitive

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายจักรกฤษณ์ พาทีทิน

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.จีรายุทธ หงษ์เวียงจันทร์

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายสุพัฒน์พงศ์ ศรีทอง, นายณัฐชนน ชัยสิทธิ์วรกุล

สถานประกอบการ บริษัท อะกรินโน เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด

บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นให้มีความเหมาะสมกับชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน และทำให้เซนเซอร์สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ และใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่มีราคาถูก โดยเริ่มจากการศึกษาเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมทั้งหลักการและราคาของเซนเซอร์ จากนั้นนำเซนเซอร์ไป calibrate กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งของดินร่วน เพื่อให้เซนเซอร์สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำและสามารถแยกความแตกต่างของความชื้นในดินได้ และนำเซนเซอร์มาประกอบชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน เพื่อใช้สำหรับการส่งค่าสถานะของแปลงของเกษตรกรผ่านระบบ cloud platform ของ NEXPIE จากการทดสอบพบว่าสมการ calibration ของดินร่วน มีค่า $R^2 = 0.9362$ เซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive สามารถแยกความแตกต่างความชื้นในดิน 5 ระดับ การวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งของดินร่วน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 10\%d.b.$ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งขึ้นแพลตฟอร์มแสดงในช่วง 0-100%

คำสำคัญ ชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน, เซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive, ความชื้นในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cooperative Title: A study and development of capacitive soil moisture sensor

Student intern name: Jakkrit Phateetin

Faculty: Engineering **Department:** Agricultural Engineering

Advisor name: Dr.Jeerayut Hongwiangjan

Mentor name: Mr.Supatpong Srithong, Mr.Natchanon Chaiyasitworakul

Company: Agrinno Tech & Services Co,Ltd.

ABSTRACT

This project aims to study and develop the low-cost soil moisture sensor for IoT-based moisture monitoring system. Capacitive soil moisture sensor was selected as its cost is low and it is corrosive resistance. The sensor was used to measure moisture content of loam soil. Calibration of the sensor was conducted using loam soil samples with known moisture contents in the range of 0-100%d.b. R^2 of the calibrated model was 0.9362. This model was used in sensor coding. The coded sensor was used to measure the moisture contents of both loam soil samples and silt soil samples. The sensor was be able to determine the moisture content and classify the moisture content into 5 levels. The moisture measurement capability of the sensor was acceptable in practice with the error of $\pm 10\%$ d.b. The sensor was then installed in the IoT-based moisture monitoring system. The system was field tested. The system was successfully applicable and could show the soil moisture content data in the NEXPIE cloud platform.

Keywords : IoT-based moisture monitoring system, capacitive soil moisture sensor

กิตติกรรมประกาศ

การสหกิจศึกษาในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยการรับความอนุเคราะห์จากบริษัท อะกรีนโน้ เทค แอนด์ เซอร์วิสেস จำกัด ที่ได้มอบโอกาสให้เข้ามาทำสหกิจศึกษา ขอขอบคุณภานุพล นฤสิงห์สำราญ ผู้บริหาร นายสุพัฒน์พงศ์ ศรีทอง นายณัฐชนน ชัยสิทธิ์วรกุล วิศวกรที่ปรึกษาสำหรับสหกิจในครั้งนี้ และพนักงาน บริษัท อะกรีนโน้ เทค แอนด์ เซอร์วิสেস จำกัด ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ คำปรึกษา ความรู้ ประสบการณ์การทำงาน จนทำให้การสหกิจศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.จิรายุทธ หงส์เวียงจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ทุก ๆ ท่าน สำหรับการสหกิจศึกษาในครั้งนี้ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการช่วยเหลือ ความรู้ คำปรึกษา จนทำให้การสหกิจศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสหกิจศึกษาในครั้งนี้ทั้งหมดที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ กำลังใจจนทำให้การสหกิจศึกษาครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จักรกฤษณ์ พาทีทิน

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ)	V
สารบัญ (ต่อ)	VI
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญภาพ (ต่อ)	IX
สารบัญกราฟ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความขึ้นของดิน.....	3
2.1.1 ความหมายความขึ้นของดิน	3
2.1.2 ประโยชน์ของความขึ้นของดิน.....	3
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความขึ้นของดิน.....	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 การหาความชื้นของดิน.....	4
2.2.1 การวัดความชื้นในดินโดยให้ความร้อนโดยตรงตามมาตรฐาน ASTM D 4959-00	4
2.2.2 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	4
2.3 เนื้อดิน.....	8
2.3.1 กลุ่มเนื้อดินละเอียด (Fine-texture Soil).....	8
2.3.2 กลุ่มเนื้อดินปานกลาง (Medium-texture Soil).....	8
2.3.2 กลุ่มเนื้อดินหยาบ (Coarse-texture Soil).....	8
2.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density).....	8
2.5 Internet of Things	10
2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของระบบ.....	11
2.6.1 Arduino.....	11
2.6.2 โมดูลสื่อสาร 3G Module UC15-T.....	13
2.6.3 DS3231 Real Time Clock Module	14
2.7 NEXPIE.....	15
2.8 Root Mean Square Error.....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	16
3.1 ศึกษาออกแบบการทำงานของอุปกรณ์.....	17
3.2 การออกแบบการทำงานและโครงสร้างอุปกรณ์	17
3.2.1 วงจรเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน.....	17
3.2.2 วงจร Real time clock.....	18
3.2.3 วงจรโมดูล 3G.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 วงจรไฟฟ้าเลี้ยง.....	19
3.2.5 ซอฟต์แวร์การทำงานระบบ.....	20
3.2.6 ออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์.....	20
3.3 ทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	21
3.3.1 การทดลองเพื่อหาสมการ calibration.....	21
3.3.2 การทดลองนำสมการ calibration ทำนายดินชนิดอื่น.....	25
3.3.3 การทดลองหาค่าความแม่นยำ.....	26
3.3.4 การทดลองหาความหนาแน่นรวมของดิน.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 การพิจารณาเลือกเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์.....	27
4.2 ผลการทดลองเพื่อหาสมการ calibration.....	28
4.3 การทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน.....	29
4.4 การทดสอบหาความแม่นยำ.....	30
4.4.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของดินร่วน.....	30
4.4.2 ผลการทดสอบความแม่นยำของดินชนิดอื่น.....	30
4.5 การทดสอบการแบ่งแยกความแตกต่างความชื้นของดิน.....	32
4.6 การพัฒนาโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน.....	32
4.7 การทดสอบระบบการทำงานของอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	35
เอกสารอ้างอิง	36

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
4.1 ตารางการพิจารณาเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน.....	27
4.2 ตารางแสดงการหาความหนาแน่นรวมของดินร่วน.....	29
4.3 ตารางแสดงการหาความหนาแน่นรวมของดินทรายแป้ง.....	29
4.4 ตารางแสดงการปรับแก้ค่าความชื้นในดินของดินทรายแป้งที่ความหนาแน่นรวม 1.368g/cm^3	31
4.5 ตารางแสดงการแบ่งแยกความแตกต่างของความชื้นในดิน.....	32



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้าที่
2.1 แสดงการทดสอบค่าไดอิเล็กทริก.....	6
2.2 resistive soil moisture sensor.....	6
2.3 Time domain reflectometry (TDR)	7
2.4 Gypsum block	8
2.5 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเนื้อ.....	9
2.6 Arduino Mega 2560 Pro.....	10
2.7 บอร์ดโมดูลสื่อสาร 3 G Module UC15-T.....	14
2.8 DS3231 Real Time Clock Module.....	15
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	16
3.2 รูปผังแสดงอุปกรณ์หลัก.....	17
3.3 รูปวงจรที่ใช้กับเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน.....	18
3.4 รูปวงจรที่ใช้กับ Real time clock.....	18
3.5 รูปวงจรที่ใช้กับโมดูล 3G.....	19
3.6 รูปวงจรจ่ายไฟให้แก่อุปกรณ์.....	19
3.7 รูปแสดงแผนผังการออกแบบซอฟต์แวร์การทำงาน.....	20
3.8 รูปแสดงวงจรต้นแบบ และวงจร PCB ที่ถูกพัฒนาขึ้น.....	21
3.9 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างดินร่วน.....	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.10 รูปแสดงภาชนะที่บรรจุดินแห้ง.....	22
3.11 รูปแสดงการเพิ่มน้ำให้กับดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้.....	23
3.12 รูปแสดงเซนเซอร์ที่เลือก.....	23
3.13 รูปการนำเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้.....	24
3.14 รูปการนำดินแต่ละภาชนะบรรจุลง moisture can.....	24
3.15 รูปตู้อบลมร้อน รุ่น JSOF-Series Convection Oven แปรนต์ JSR.....	25
3.16 รูปการเตรียมตัวอย่างดินทรายแบ่ง.....	25
3.17 รูปการบรรจุดินใส่ moisture can.....	26
4.1 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบสภาพดิน version 1.1.....	33
4.2 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบสภาพดิน version 1.2.....	33
4.3 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบสภาพดิน version 1.3.....	33
4.4 รูปแดชบอร์ดแสดงผลบนแพลตฟอร์ม.....	34

สารบัญกราฟ

กราฟ	หน้า
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกของถั่วเขียว.....	9
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง digital number กับความชื้นในดินฐานแห้ง.....	28
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง.....	30
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง.....	31



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) นั้นได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน ดังที่พบเห็นได้ในปัจจุบัน เช่น Smart watch, Smart lamp เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้มีการทำงานที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจได้ถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสุขภาพ หรือสถานะของอุปกรณ์ที่กำลังทำงาน นอกจากนี้ยังสามารถสั่งการด้วยระบบไร้สาย เพื่อให้ผู้ใช้งานปฏิบัติให้ถูกต้องและสะดวกสบายมากขึ้น การนำเทคโนโลยีข้างต้นมาใช้งานทางด้านการเกษตรจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถเข้าใจถึงสถานะของแปลง สาเหตุที่ทำให้พืชผลได้ผลผลิตไม่ได้ตามต้องการ ซึ่งจะทำให้สามารถจัดการกับแปลงได้ถูกต้องและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

เซนเซอร์วัดความชื้นในดินเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่จะตรวจจับความชื้นที่อยู่ในดิน ซึ่งค่าความชื้นในดินเป็นค่าที่สำคัญของการบอกสถานะของแปลง เพราะความชื้นนั้นมีผลต่อการเติบโตของพืช และผลผลิตของพืช ซึ่งจะสามารถทำให้สารจัดการแปลงได้ถูกต้อง นอกจากนี้การให้น้ำที่ถูกต้องและเพียงพอต่อพืชนั้นยังช่วยลดต้นทุน และเวลาของผู้ใช้งาน

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นคือความแม่นยำของเซนเซอร์ที่ใช้วัดความชื้นในดินซึ่งมีผลกับราคาของเซนเซอร์ ถ้าหากต้องการความแม่นยำที่สูงเซนเซอร์นั้นจะมีราคาสูง เกษตรกรจึงไม่สามารถนำเทคโนโลยีไปใช้ได้กับแปลง ทางผู้จัดทำจึงหาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่มีราคาถูกมาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงการใช้เทคโนโลยีนี้ได้ และผู้จัดทำได้พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินดังกล่าวให้สามารถวัดค่าได้แม่นยำขึ้น รวมไปถึงการติดตั้งที่เหมาะสมกับชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดินและสามารถบอกสถานะของแปลงได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบการทำงานที่เหมาะสมของเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน
2. เพื่อลดต้นทุนในการสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน
3. เพื่อสร้างสมการ calibration ให้เซนเซอร์สามารถวัดค่าได้แม่นยำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

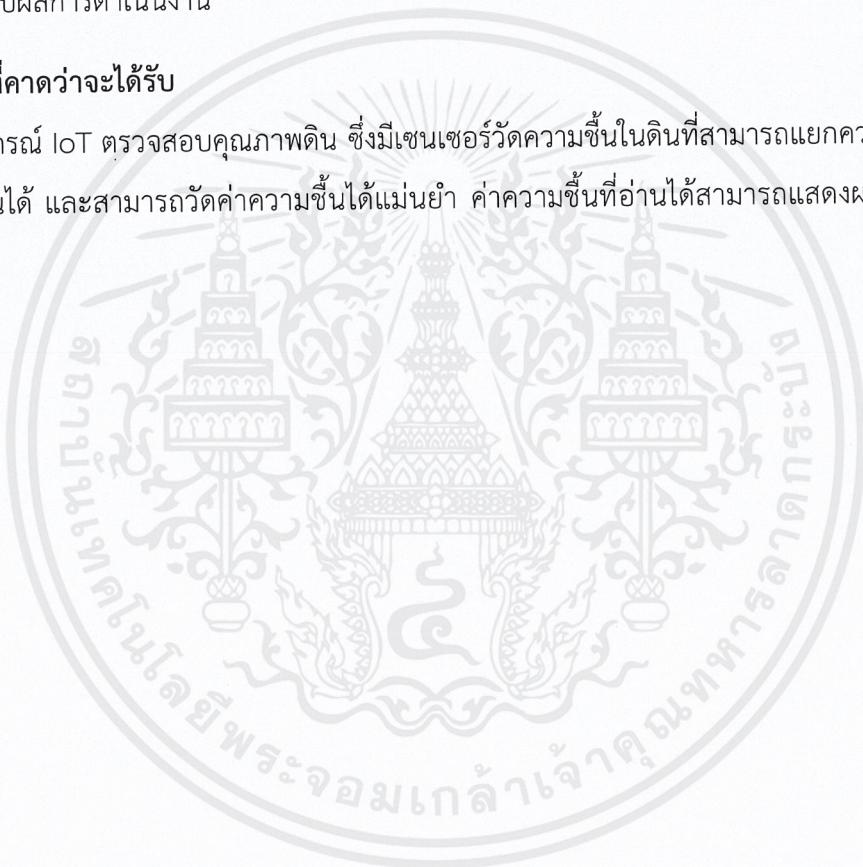
เซนเซอร์วัดความชื้นในดินต้องสามารถแยกความแตกต่างของความชื้นของดินได้และสามารถวัดค่าความชื้นในดินได้ ค่าความชื้นที่อ่านได้สามารถแสดงผลบนแพลตฟอร์ม และราคาของชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดินมีราคาไม่แพงเกษตรกรเข้าถึงได้ง่าย

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาหลักการของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่เหมาะสมสอดคล้องกับวัตถุประสงค์
2. เปรียบเทียบและเลือกเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน
3. ออกแบบชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน
4. ออกแบบซอฟต์แวร์การทำงาน
5. ทดลองเพื่อหาสมการ calibration ของเซนเซอร์
6. ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์
7. สร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน
8. สรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน ซึ่งมีเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่สามารถแยกความแตกต่างความชื้นของดินได้ และสามารถวัดค่าความชื้นได้แม่นยำ ค่าความชื้นที่อ่านได้สามารถแสดงผลบนแพลตฟอร์มได้



บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความชื้นของดิน

2.1.1 ความหมายความชื้นของดิน

ความชื้นของดิน ตามความหมายของปทานุกรมปฐพีวิทยา คือ น้ำซึ่งถูกดูดซับบน ผิวอนุภาคดิน หรือขังอยู่ชั่วคราว หรืออยู่ในสภาวะไอน้ำในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน น้ำเหล่านี้ ทำให้สามารถหมดได้ เมื่ออบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 25 ชั่วโมง หมายถึง น้ำในดิน อยู่ในรูปของน้ำเหลว ในดิน ซึ่งมีบทบาท ต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างมากเมื่อเทียบกับส่วนที่อยู่ในรูปของไอน้ำ

2.1.2 ประโยชน์ของความชื้นของดิน

ความชื้นในดินจะมีผลโดยตรงต่อพืชที่ขึ้นอยู่บนดินนั้น ทั้งนี้เพราะความชื้นในดิน จะเป็นแหล่งน้ำ แหล่งเดียวของพืชที่ขึ้นอยู่ในดินนั้นจะสามารถดูดและนำไปใช้ได้ความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการเกษตร ได้แก่ ความชื้นในดินจำเป็นต่อการงอกของเมล็ดพืชในดินเป็น ตัวช่วยทำลายธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อต้านพืช ช่วยให้อินทรีย์วัตถุในดินเน่าเปื่อยได้ดี ช่วยให้สภาพแวดล้อมของดินเหมาะต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ดิน ควบคุมปริมาณน้ำและ อุณหภูมิในดินพืช ควบคุมการระเหยน้ำออกจากต้นพืช ควบคุมการแพร่กระจายและการหยั่ง รากของพืช และจะควบคุมการระเหยน้ำของดิน ความชื้นในดินจะมีผลโดยทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิต

อื่น ๆ ในโลกและสภาพแวดล้อม และมีความสำคัญต่อความเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรของพลัง งานและน้ำบนโลก ช่วยป้องกันการเกิดการไหลบ่าหน้าดินจากน้ำฝน (Runoff) การกักเก็บน้ำผิว ดิน กระบวนการแทรกซึมน้ำสู่ดิน เป็นข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะเชิงพื้นที่ (Spatial) และช่วงเวลา (Temporal) เกี่ยวกับความชื้นของดินบน (Top soil) (0-5 เซนติเมตร) มีความสำคัญต่องาน ด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถช่วยประเมินปรากฏการณ์การไหลบ่าหน้าดินของน้ำ การระเหยของน้ำจากผิวดิน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของผิวดิน

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นของดิน

สิ่งสำคัญต่อปริมาณของความชื้นในดิน คือการซึมของน้ำ หรือการเคลื่อนย้ายน้ำ ลงดิน ซึ่งน้ำที่มีการซึมลงดินนี้เองจะเป็นส่วนหนึ่งของความชื้นในดิน กล่าวคือถ้าปริมาณการซึม น้ำมีมากก็จะทำให้มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นในดินได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิ พลต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดิน ได้แก่ กระบวนการตกตะกอน ปริมาณแสงอาทิตย์ สภาพภูมิประเทศ สมบัติของดิน โครงสร้างดิน อินทรีย์วัตถุในดิน ความลึกของดินจนถึงชั้นหิน แข็ง ชนิดและความหนาแน่นของพืชพรรณที่ปกคลุมดิน ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน และ ปริมาณน้ำฝน

2.2 การหาความชื้นของดิน

ระดับความชื้นของดิน หรือ ปริมาณน้ำในดิน มี 4 แบบ คือ ความชื้นโดยมวล ความชื้นโดยปริมาตร ระดับความชื้นในดินที่แสดงเป็นความสูงของน้ำในดิน และความชื้นที่เป็น ระดับอิ่มตัวของน้ำ ดังนั้นการวัดจำนวนของน้ำในดินจึงวัดเป็นระดับความชื้น (Water content) คือ สัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับปริมาณของดินที่น้ำนั้นบรรจุอยู่ ระดับความชื้นของดินมี ค่าตั้งแต่ความชื้นของดินที่แห้ง (Air-dried water content) ไปจนถึงจุดอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation point) ขึ้นกับฤดูกาล การจัดการดิน สมบัติของดิน การวัดความชื้นของดิน (Measuring water content) โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วัดโดยตรง และวัดโดยอ้อม การ วัดระดับความชื้นโดยตรงมักใช้วิธีวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric method) ส่วนวิธีวัดโดยอ้อมนั้น อาศัยการวัดค่าที่อ่านได้หลายชนิดจากเครื่องมือ ซึ่งมีความสัมพันธ์แน่นนอนกับความชื้นของดิน เช่น การใช้เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) ความต้านทานไฟฟ้าและจำนวนนิวตรอนความเร็วต่ำ (Slow neutron) เป็นต้น ซึ่งมักจะให้ผลการวัดที่รวดเร็วกว่าการวัดโดยตรง

2.2.1 การวัดความชื้นในดินโดยให้ความร้อนโดยตรงตามมาตรฐาน ASTM D 4959 – 00 เป็นการหาความชื้นในดินโดยนำตัวอย่างดินที่มีขนาดน้ำหนักมากพอ (สำหรับขนาดเม็ดดินแต่ละชนิด) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105-5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 – 24 ชั่วโมง จนดินแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วคิดความชื้นของดินเป็นสัดส่วนต่อน้ำหนักดินแห้งเป็นเปอร์เซ็นต์ สูตรคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งดังสมการที่ 2.1

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

$$W = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ W = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง (%)

W_w = น้ำหนักน้ำในดิน (กรัม)

W_s = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

W_1 = น้ำหนักกระป๋องดิน (กรัม)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างดินเปียก+กระป๋อง (กรัม)

W_3 = น้ำหนักตัวอย่างดินแห้ง+กระป๋อง (กรัม)

2.2.2 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

เซนเซอร์วัดความชื้นในดินสำหรับศึกษาหลักการทำงานให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบสภาพดิน มีการศึกษาเซนเซอร์ 4 แบบ คือ เซนเซอร์วัดความชื้นแบบ Capacitive soil moisture sensor, Resistive soil moisture sensor, Time domain reflectometry, gypsum block

1. Capacitive soil moisture sensor

The electrical component known as a capacitor consist of three pieces. A positive plate, a negative plate and the space in-between the plates, known as the dielectric. The physical form and construction of practical capacitors vary widely and many capacitor types are in common use. Most capacitors contain at least two electrical conductors often in the form of metallic plates or surfaces separated by a dielectric medium.

A capacitive moisture sensor works by measuring the changes in capacitance caused by the changes in the dielectric. It does not measure moisture directly (pure water does not conduct electricity well), instead it measures the ions that are dissolved in the moisture. These ions and their concentration can be affected by a number of factors, for example adding fertilizer for instance will decrease the resistance of the soil. Capacitive measuring basically measures the dielectric that is formed by the soil and the water is the most important factor that affects the dielectric.

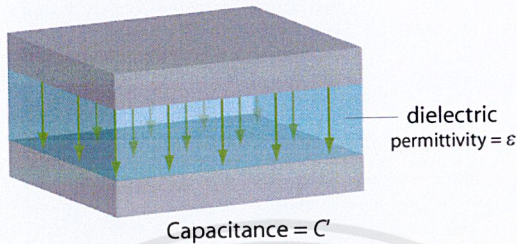
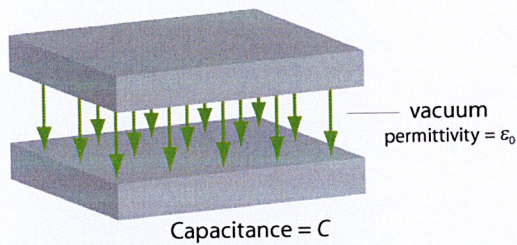
1.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ)

เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า

วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า

1.2 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุใด ทำโดยนำวัสดุชิ้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแสดงในรูปที่ 2.1



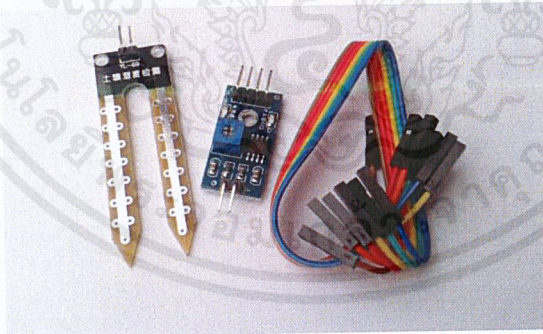
$$\kappa = C'/C$$

$$\kappa = \epsilon/\epsilon_0$$

รูปที่ 2.1 แสดงการทดสอบค่าไดอิเล็กทริก

(ที่มา : http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php)

2. Resistive soil moisture sensor หลักการวัดค่าความชื้นในดินนั้น จะต้องนำเอาแท่งอิเล็กโทรดปักลงไปเป็นดินที่ต้องการวัดซึ่งก็จะสามารถอ่านค่าความชื้นของดินได้ หลักการ คือ การวัดค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรด 2 ข้าง ในกรณีที่อ่านค่าความต้านทานได้น้อย ก็แปลว่ามีความชื้นในดินมาก หรือดินชุ่มชื้นไม่ต้องรดน้ำ ในกรณีที่อ่านค่าความต้านทานได้มาก ก็แปลว่ามีความชื้นในดินน้อย หรือดินแห้งอาจจะต้องรดน้ำ



รูปที่ 2.2 resistive soil moisture sensor

(ที่มา <https://sites.google.com/site/projectphysics122/hlak-kar-thangan-khxng-sensexr-wad-khwamchun-ni-din>)

3. Time domain reflectometry (TDR) is an indirect measure of soil water content based on the travel time of a high frequency electromagnetic pulse through the soil; this travel time is used to calculate the permittivity (dielectric constant) of the material. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TDR probes are inserted directly into the soil for in situ measurement at the desired soil depth. The measurement takes only seconds, and the instrument can be attached to a data logger for ongoing measurements. TDR applied to soil water content determinations is cable radar in which a very fast rise-time voltage pulse is propagated down and reflected back from the end of a transmission line or wave guide (the probes) in the soil.



รูปที่ 2.3 Time domain reflectometry (TDR)

(ที่มา <https://labmodules.soilweb.ca/time-domain-reflectometry/>)

4. Gypsum block The resistance blocks use electrical resistance instead of vacuum pressure to determine how much water is in the soil. Resistance blocks or “gypsum blocks” are made by imbedding two electrodes in a block of gypsum. They are then buried in the soil and a current of electricity is sent through them. They measure the electrical resistance between the electrodes and the resistance is directly related to the soil’s water content. These detectors are soil moisture switches that are buried in the soil when switches on when soil moisture reaches above a set point. When the soil dries below the set label, the detector is activated sending out signal that water has reached a given depth. All types of soil moisture sensors can be used as Wetting-front detectors, however a special product is designed suitable for only information required when the wetting front arrives at a set depth in the soil.



รูปที่ 2.4 Gypsum block

(ที่มา <https://www.edaphic.com.au/products/soils/gypsum-block/>)

2.3 เนื้อดิน

เนื้อดิน (Soil texture) เป็นสมบัติพื้นฐานที่มีส่วนกำหนดสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ของดิน อีกหลายประการ เนื้อดินถูกกำหนดโดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคอนินทรีย์ 3 กลุ่มขนาด ที่มีขนาดไม่เกิน 2.00 มิลลิเมตร (Soil separates) คือ Sand หรืออนุภาคทราย จัดเป็นกลุ่มขนาดโตที่สุดในดิน Silt หรืออนุภาคทรายตะกอนหรืออนุภาคทรายแป็ง จัดเป็นกลุ่มขนาดปานกลาง Clay หรืออนุภาคดินเหนียว จัดเป็นกลุ่มขนาดเล็กที่สุดในดิน อนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาดนี้ เมื่อประกอบกันในสัดส่วนต่าง ๆ กันจะได้ประเภทหรือชั้นเนื้อ ดิน (Textural class) ซึ่งในทางการเกษตรอาจจำแนกเนื้อดินออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

2.3.1 กลุ่มดินเนื้อละเอียด (Fine-texture Soil) ประกอบด้วยดิน 5 ประเภท ได้แก่ ดิน เหนียว (Clay) ดินเหนียวปนทรายแป็ง (Silly clay) ดินเหนียวปนทราย (Sandy clay) ดินร่วน เหนียว (Clay loam) ดินร่วนเหนียวปนทรายแป็ง (Silly clay loam)

2.3.2 กลุ่มดินเนื้อปานกลาง (Medium-texture soil) ประกอบด้วยดิน 4 ประเภท ได้แก่ ดิน ร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam) ดินร่วน (loam) ดินร่วนปนทรายแป็ง (silt loam) ดินทรายแป็ง (Sil)

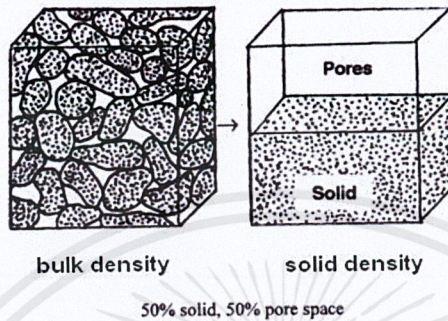
2.3.3 กลุ่มดินเนื้อหยาบ (Coarse-texture soil) ประกอบด้วยดิน 3 ประเภท ได้แก่ ดิน ทราย (Sand) ดินทรายปนร่วน (Loamy sandy) ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)

2.4 ความหนาแน่นรวม (bulk density) เป็นสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของวัสดุ

หมายถึง ความหนาแน่น (density) ของวัสดุปริมาณมวล (bulk material) เช่น แป้ง (flour) สตาร์ช (starch) เมล็ดธัญพืช (cereal grain) กาแฟผง นมผง อาหารสัตว์ ขนมอบเคี้ยว และ ลูกกวาด เป็นต้น ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมที่วางระหว่างชั้นวัสดุด้วย ต่างจากความหนาแน่นเนื้อ (solid density) ซึ่งเป็นความหนาแน่นของชั้นวัสดุแต่ละชั้น และจะไม่รวมที่วางระหว่างชั้นวัสดุ วัสดุชนิดเดียวกันอาจพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

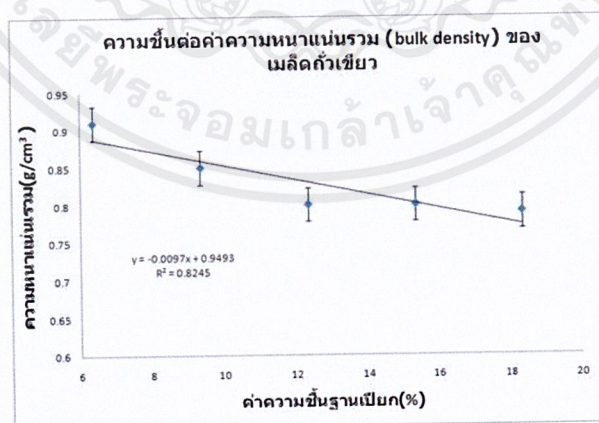
ความหนาแน่นเป็นความหนาแน่นเนื้อ (solid density) และความหนาแน่นรวม (bulk density) เช่น การวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งแต่ละหัว ได้ค่าเป็น solid density แต่หากวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งขณะกองอยู่ หรืออยู่ในถังเก็บ จะได้ค่าเป็น bulk density เป็นต้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นเนื้อเสมอ ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเนื้อแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเนื้อ

(ที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0747/bulk-density>)

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นรวม ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความชื้น (moisture content) ความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุทางการเกษตร เช่น เมล็ดธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้ง เนื่องจากเมื่อวัสดุดูดความชื้น จะขยายตัว มีขนาด เปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นรวมมีผลต่อค่าความชื้น ดังแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกในกราฟที่ 2.1



กราฟที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกของถั่วเขียว

(ที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0747/bulk-density>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า bulk density ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงไปภาชนะที่ทราบปริมาตรเพื่อลดความผิดพลาด ควรใช้ภาชนะขนาดใหญ่พอสมควร เช่น ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปชั่ง ปาดหรือเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ การคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวลของดินแห้ง } g}{\text{ปริมาตรของภาชนะ } cm^3} \quad (2.2)$$

สมบัติของดินรวมทั้งการใช้ประโยชน์ที่ดิน มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับเนื้อดิน ดินเนื้อ ทรายบอนุภาคมักไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน จึงมีลักษณะร่วน มีการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศดี แต่ดินเหล่านี้มีความสามารถในการอุ้มน้ำและดูดซับธาตุอาหารได้น้อย การจัดการดินเนื้อ ทรายจึงต้องพิจารณาเรื่องการชลประทานและการใส่ปุ๋ย โดยกำหนดอัตราและปริมาณต่อครั้งไม่มากเกินไป เนื้อดินละเอียดมักมีช่องขนาดเล็ก ทำให้อุ้มน้ำได้มาก และมีการระบายน้ำเร็ว อย่างไรก็ตามดินเนื้อละเอียดดูดซับธาตุอาหารได้มากจึงมีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื้อดินละเอียดสามารถรับการใส่ปุ๋ยได้ครั้งละมาก ๆ แต่การชลประทานต้องระวังเรื่องผลกระทบต่อ การถ่ายเท อากาศของดิน

2.5 Internet of Things

Internet of Things หรือ IoT คือ สภาพแวดล้อมอันประกอบด้วยสรรพสิ่งที่สามารถสื่อสารและเชื่อมต่อกันได้ผ่านโพรโทคอลการสื่อสารทั้งแบบใช้สายและไร้สาย โดยสรรพสิ่งต่าง ๆ มีวิธีการระบุตัวตนได้ รับรู้บริบทของสภาพแวดล้อมได้ และมีปฏิสัมพันธ์โต้ตอบและทำงานร่วมกันได้ ความสามารถในการสื่อสารของสรรพสิ่งนี้จะนำไปสู่นวัตกรรมและบริการใหม่อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ภายในบ้านตรวจจับการเคลื่อนไหวของผู้อยู่อาศัย และส่งสัญญาณไปสั่งเปิด/ปิดสวิตซ์ไฟตามห้องต่าง ๆ ที่มีคนหรือไม่มีคนอยู่ อุปกรณ์วัดสัญญาณชีพของผู้ป่วย/ผู้สูงอายุ และส่งข้อมูลไปยังบุคลากรทางการแพทย์ หรือส่งข้อความเรียกหน่วยกู้ชีพหรือรถฉุกเฉิน เป็นต้น

นอกจากนี้ IoT จะเปลี่ยนรูปแบบและกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมไปสู่ยุคใหม่ หรือที่เรียกว่า Industry 4.0 ที่จะอาศัยการเชื่อมต่อสื่อสารและทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องจักร มนุษย์ และข้อมูล เพื่อเพิ่มอำนาจในการตัดสินใจที่รวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำสูง โดยที่ข้อมูลทั้งหลายที่เก็บจากเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดตัวอุปกรณ์และสภาพแวดล้อมจะถูกนำมาวิเคราะห์ ให้ได้ผลลัพธ์เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างทันที นอกจากการข้ามขีดจำกัดเรื่องเวลาแล้ว ระบบควบคุมหรือระบบวิเคราะห์ข้อมูล อาจไม่ได้อยู่ในที่เดียวกันกับเครื่องจักร แต่สามารถควบคุมสั่งการได้โดยไร้ขีดจำกัดเรื่องสถานที่

2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของระบบ

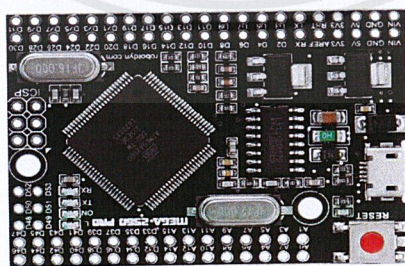
2.6.1 Arduino คือ โครงการที่นำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่างๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะ คือมีการเขียนไวยากรณ์ของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกัน สามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ โดยตัวโครงการได้ออกบอร์ดทดลองมาหลายรูปแบบ เพื่อใช้งานกับ IDE ของตนเอง บอร์ด Arduino มีอยู่หลากหลายรุ่น มีความแตกต่างกันไปตามการใช้งานของผู้พัฒนา ซึ่งบอร์ด Arduino ที่นำมาใช้งานคือรุ่น บอร์ด Arduino Mega 2560 Pro เป็นบอร์ดที่มีขนาดกะทัดรัด มีข้อมูลจำเพาะที่เหมาะสมแก่การทำชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบสภาพดิน การทำงานของบอร์ด Arduino Mega 2560 Pro มีดังนี้

1. บอร์ด Mega Pro Embed CH340G/ATmega2560 อิงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 และอแดปเตอร์ ยูเอสบี-UART CH340 สามารถทำงานร่วมกับ Arduino Mega 2560
2. บอร์ดมีขนาดกะทัดรัด 38X55mm และเป็นทางออกที่ดีสำหรับการพัฒนาโครงการตามมาตรฐาน ATmega2560
3. ฟังก์ชัน Mega Pro ฝังอยู่เหมือนกันกับ Arduino Mega 2560 ถึงแม้จะเป็น Embed board แต่ก็มี ความมั่นคงเหมือนของ Mega Board ใช้ชิพต้นฉบับและเครื่องเรอร์เซอร์ควอทซ์คุณภาพสูง 16 เมกะเฮิร์ตซ์ อยู่บนบอร์ด
4. บอร์ดมีช่องเสียบ Micro ยูเอสบี ที่ช่วยให้คุณเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ผ่านอแดปเตอร์ ยูเอสบี-UART CH340 (อาจจำเป็นต้องติดตั้งไดรฟ์เวอร์) ดาวน์โหลดไดรฟ์เวอร์ : Windows, Linux, Mac, Android
5. บอร์ดสามารถขับเคลื่อนผ่านช่องเสียบ Micro ยูเอสบี หรือผ่านทางช่องเสียบที่ตรงกันบน กระดาน (Vin) ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทำงานอยู่ในช่วงของ 6 ถึง 9V DC
6. กระแสไฟขาออกสูงสุด 5V อยู่ที่ประมาณ 800mA ขณะอยู่ที่ 3.3V ประมาณ 800mA
7. ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าช่วยให้สามารถใช้งานได้ถึง 18V เป็นค่าอินพุตอย่างไรก็ตามไม่แนะนำให้ใช้เกินค่าที่แนะนำดังกล่าวเนื่องจากอาจทำให้เกิดความร้อนและความเสียหายกับอุปกรณ์ได้มากเกินไป

ข้อมูลจำเพาะ:

ไมโครคอนโทรลเลอร์	ATmega2560
ตัวแปลง ยูเอสบี-TTL	CH340
Power Out	5V-800mA
Power IN	5V

Power IN VIN / แจ็ค DC	5V
การใช้พลังงาน	5V 220mA
ระดับลอจิก	5V
ยูเอสบี	ไมโคร ยูเอสบี
ความถี่นาฬิกา	16MHz
การจ่ายแรงดันที่ใช้งาน	5V
I / O ดิจิทัล	54
I / O อนาล็อก	16
ขนาดหน่วยความจำ	256kb
ข้อมูล RAM ชนิด / ขนาด	8Kb
ข้อมูลรอม ชนิด / ขนาด	4Kb
อินเทอร์เน็ต	ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต
อุณหภูมิในการทำงาน	-40 C° / + 85 C°
ความยาว x กว้าง	38 x 54mm



รูปที่ 2.6 Arduino Mega 2560 Pro

(ที่มา <https://www.arduinoall.com/product/2422/arduino-mega2560-pro>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

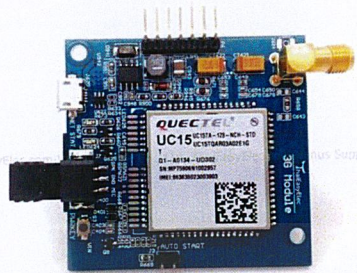
2.6.2 โมดูลสื่อสาร 3G Module UC15-T เป็นบอร์ดสื่อสารเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G ใช้โมดูลสื่อสารยี่ห้อ Quectel รุ่น UC15-T รองรับความถี่ 850/2100 MHz ในระบบ UMTS (3G) และ รองรับความถี่ 850/900/1800/1900 MHz ในระบบ GSM (2G) มีความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงสุด ระหว่างโมดูลกับเครือข่ายที่ 3.6 Mbps Downlink และ 384 Kbps Uplink เมื่อเชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการทำให้ระบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G หรือผู้ที่ต้องการอัปเกรดระบบจาก 2G เป็น 3G ที่มีฟังก์ชันการใช้งานครอบคลุมทั้งการสื่อสารและระบุพิกัด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น ระบบขนส่งและติดตามตำแหน่งรถบรรทุกสินค้า มิเตอร์อัจฉริยะ จุดขายสินค้าไร้สาย การรักษาความปลอดภัย งานด้านสาธารณสุข การติดตามบุคคลหรือสิ่งของ การควบคุมและบำรุงรักษาทางไกล เป็นต้น

รองรับความถี่ UMTS (3G) คลื่น 800, 850, 900, 1900 และ 2100 MHz สามารถใช้ 3G บนความถี่ 2100MHz ได้ทุกเครือข่ายผู้ให้บริการในเมืองไทย เช่น AIS 3G, DTAC Trinet และ True 3G+ เป็นต้น และสามารถใช้ 3G บนความถี่ 850 MHz ของผู้ให้บริการ My by CAT

คุณสมบัติของบอร์ด 3G Module

- ใช้โมดูลสื่อสาร UC15-T จาก Quectel Wireless Solutions Co., Ltd.
- รองรับความถี่ 850/2100 MHz ในระบบ UMTS 3G
- รองรับความถี่ 850/900/1800/1900 MHz ในระบบ GSM 2G
- รองรับความเร็วในการสื่อสาร HSPDA สูงสุดที่ 3.6 Mbps Downlink และ 384 Kbps Uplink
- รองรับ HSPA Release 5 (Category 6)
- รองรับ EDGE Downlink only
- รองรับ GPRS Multi-slot class 12
- รองรับ UMTS Release 99/5
- รองรับ GSM Release 99/4
- รองรับคำสั่ง AT Command 3GPP TS27.007 กับ 3GPP TS27.005 และ enhanced AT command ของ Quectel
- รองรับโปรโตคอลต่างๆ ได้แก่ PPP / TCP / UDP / FTP / HTTP / FILE / MMS / SMTP / SSL
- ออกแบบเป็น Module บอร์ดขนาดเล็ก
- เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง Serial UART
- มีพอร์ต Micro USB สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ได้
- มีจัมป์เปอร์สำหรับเริ่มต้นการทำงานทันทีเมื่อจ่ายไฟ (Auto start)
- มีพินเฮดเดอร์สำหรับเริ่มต้นและปิดการทำงานด้วย Software โดยการทริกขา I/O
- มีสวิตช์สำหรับเริ่มต้นและปิดการทำงานด้วยการกดปุ่ม (Power switch)
- มีไฟแสดงสถานะเปิดการทำงาน (Status LED)

- มีไฟแสดงสถานะเชื่อมต่อเครือข่าย (Network LED)
- คอนเน็คเตอร์สำหรับเสาอากาศสื่อสารหลัก (Main Antenna) แบบ RP-SMA
- มีช่องเสียบ SIM Card แบบ Push-Pull พร้อมวงจรป้องกัน ESD



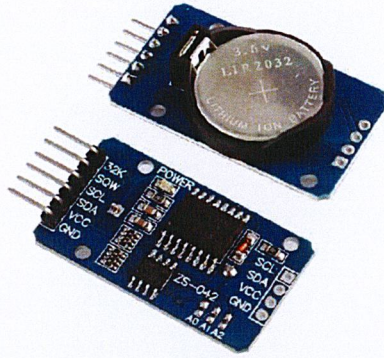
รูปที่ 2.7 บอร์ดโมดูลสื่อสาร 3G Module UC15-T

(ที่มา <https://www.thaieasyelec.com/3g-module-uc15-t.html>)

2.6.3 DS3231 Real Time Clock Module โมดูล DS3231 เป็นโมดูลแบบ RTC (Real Time Clock) ที่มีความแม่นยำสูง โมดูลนี้สามารถตั้งค่า วัน เวลา ได้อย่างง่าย และยังมาพร้อมกับวงจรวัดอุณหภูมิที่สามารถแสดงอุณหภูมิที่ภายนอกได้

ประโยชน์และคุณสมบัติ

- มีความแม่นยำสูงในฟังก์ชันจับเวลา
- เป็นนาฬิกาตามเวลาจริงนับวินาที, นาที, ชั่วโมง, วันที่ของเดือน, เดือน, วันในสัปดาห์และปีพร้อมการชดเชยแบบปรีอิกสุรทิน ใช้ได้สูงสุดถึงปี 2100
- ความแม่นยำ $\pm 2\text{ppm}$ จาก 0°C ถึง $+40^\circ\text{C}$
- ความแม่นยำ $\pm 3.5\text{ppm}$ จาก -40°C ถึง $+85^\circ\text{C}$
- เอาต์พุตเซ็นเซอร์อุณหภูมิดิจิตอล: ความแม่นยำ $\pm 3^\circ\text{C}$
- อินเทอร์เฟซ I2C รวดเร็ว (400kHz)
- อินพุตแบตเตอรี่สำรองสำหรับการจับเวลาอย่างต่อเนื่อง
- ใช้ไฟเลี้ยง 3.3V
- ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน: เซิงพาณิชย์ (0°C ถึง $+70^\circ\text{C}$) และอุตสาหกรรม (-40°C ถึง $+85^\circ\text{C}$)
- ได้รับการยอมรับ Underwriters Laboratories® (UL)



รูปที่ 2.8 DS3231 Real Time Clock Module

(ที่มา <https://www.arduinoall.com/product/410/ds3231-module>)

2.7 NEXPIE เป็น Cloud Platform ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางที่ทำให้สิ่งต่าง ๆ เชื่อมโยงกันได้ผ่านอินเทอร์เน็ต โดยสิ่งเหล่านั้นก็คือ IoT หรือ Internet of Things ซึ่งหมายถึงการที่สิ่งต่าง ๆ ถูกเชื่อมโยงเข้าสู่โลก เครือข่ายอินเทอร์เน็ตทำให้มนุษย์สามารถสั่งการ ควบคุม การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ เช่น การสั่งเปิด - ปิดอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ โทรศัพท์มือถือ เครื่องใช้สำนักงาน เครื่องใช้ในชีวิตประจำวันผ่านทาง อินเทอร์เน็ตได้ หรือรวมถึงการแสดงผลข้อมูลของเซนเซอร์

2.8 Root Mean Square Error คือ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง หาได้ดังสมการ 2.3

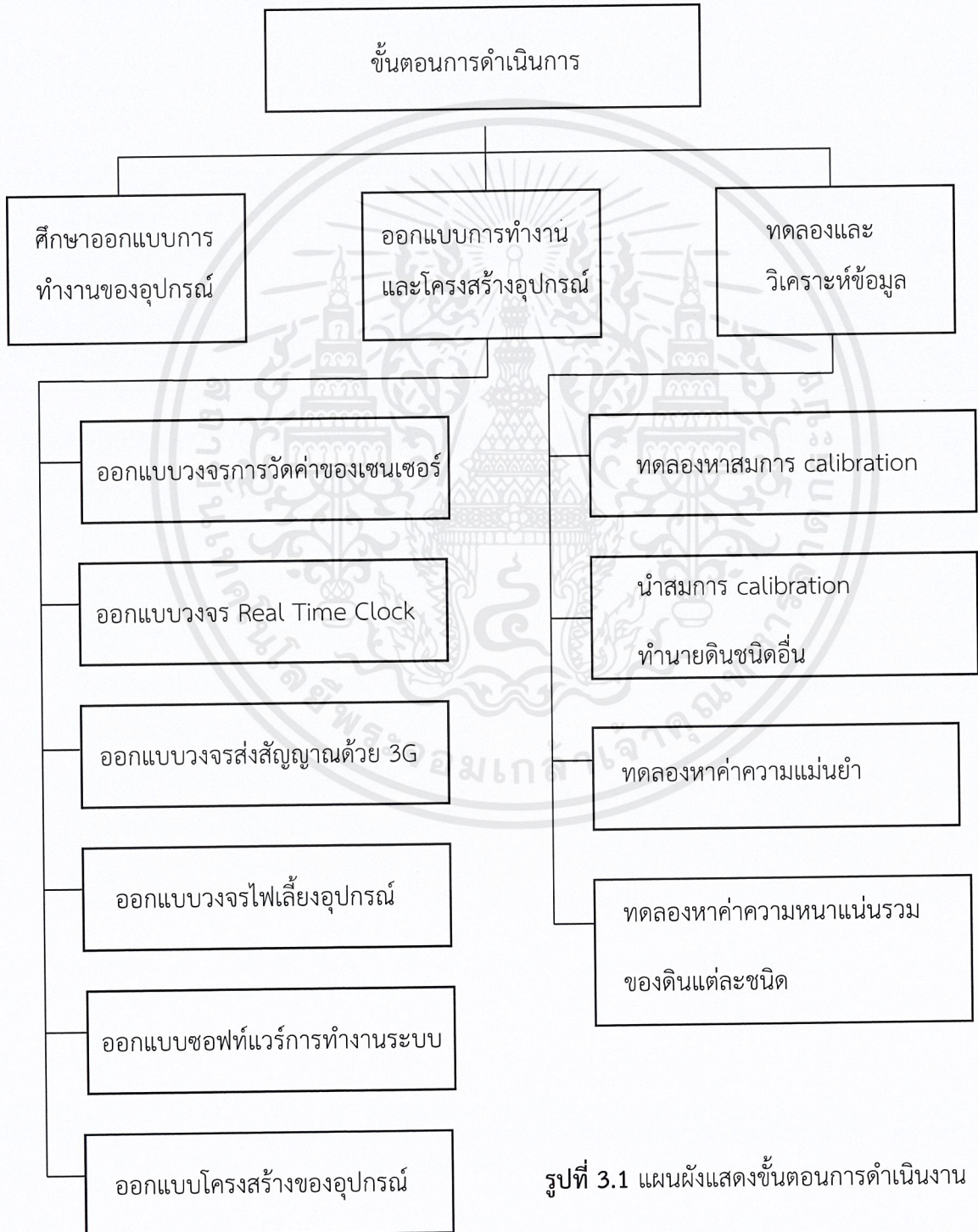
$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{\text{Error}^2}{n}} \quad (2.3)$$

โดยที่ n คือ จำนวนตัวอย่าง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

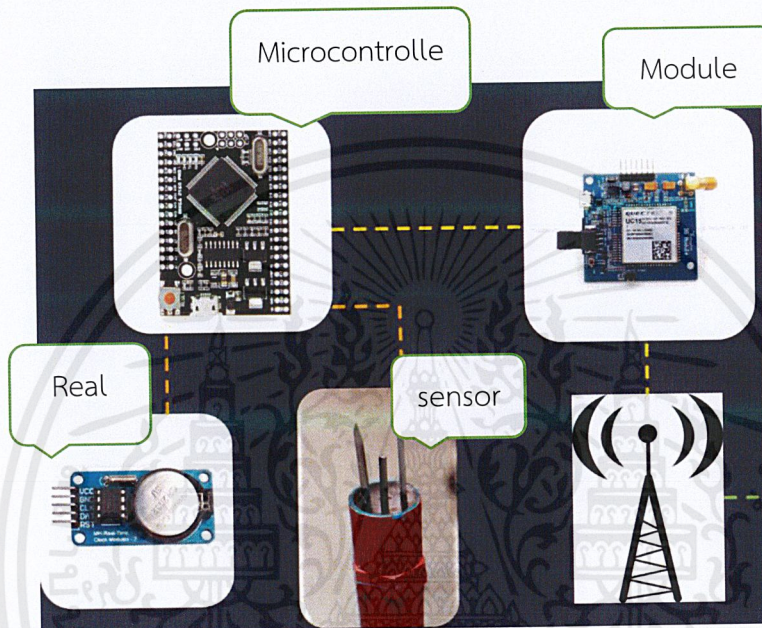
เพื่อให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์จึงเริ่มจากการศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน การออกแบบและเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานจริง รวมทั้งการออกแบบการดำเนินงานเพื่อหาสมการ calibration ของเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน กระบวนการและขั้นตอนการดำเนินงานดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาออกแบบการทำงานของอุปกรณ์

การศึกษาเริ่มจากการศึกษาเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสม และตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งเงื่อนไขที่สำคัญที่สุดคือการเลือกเซนเซอร์ที่สามารถทำงานได้ดี ทนการกัดกร่อน และราคาที่ถูก จากนั้นศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการอ่านค่าที่ได้จากเซนเซอร์อุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็นในการทำงาน เช่น การประหยัดพลังงาน และการส่งค่าไปยังแพลตฟอร์ม รวมถึงการศึกษาซอฟต์แวร์ที่จำเป็นในการใช้ จะแสดงอุปกรณ์หลักดังรูปที่ 3.2



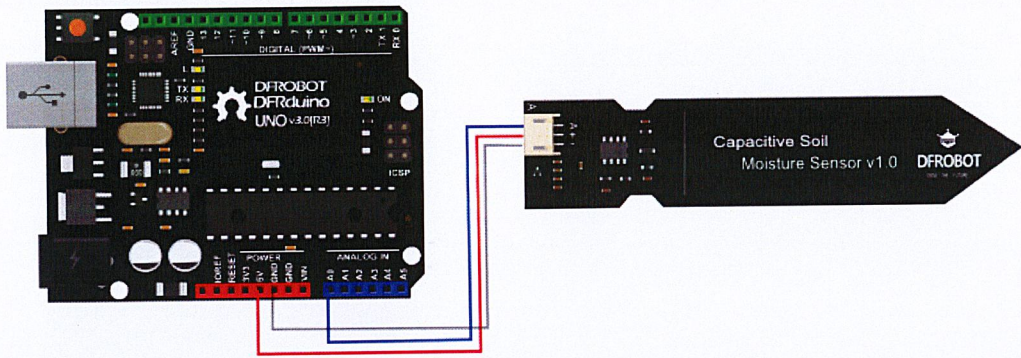
รูปที่ 3.2 รูปผังแสดงอุปกรณ์หลัก

3.2 การออกแบบการทำงานและโครงสร้างอุปกรณ์

ในการออกแบบชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน จำเป็นต้องมีฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทำงานที่เหมาะสม รวมถึงการใช้ซอฟต์แวร์ในการทำงานที่เน้นในเรื่องของการทำงานที่มีเสถียรภาพและประหยัดพลังงาน การทำงานของชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดินประกอบด้วยซอฟต์แวร์และวงจรของระบบดังนี้

3.2.1 วงจรเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

เซนเซอร์วัดความชื้นในดินจะมี 3 pin ที่เชื่อมต่อกับ microcontroller คือ pin VCC 5 volt, pin ground และ pin ที่ใช้ในการวัดค่า ซึ่งจะมีหน้าที่ในการวัดค่าความชื้นในดินจะให้ผลออกมาเป็น digital number ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3

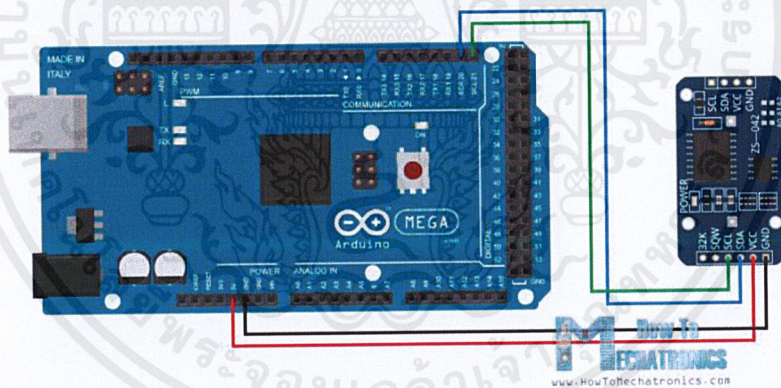


รูปที่ 3.3 รูปวงจรที่ใช้กับเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

(ที่มาจาก https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193)

3.2.2 วงจร Real time clock

Real time clock เป็น module นาฬิกาที่ช่วยในการบันทึกเวลา บอกเวลาของข้อมูลที่ส่งมา และช่วยจัดการทำ sleep mode ซึ่งมีความจำเป็นมากในการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้นโดยขาดการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งจะใช้ 4 pin ที่เชื่อมต่อกับ microcontroller ประกอบด้วย pin VCC 5 volt, pin ground, pin SDA, pin SCL, แสดงดังรูปที่ 3.4



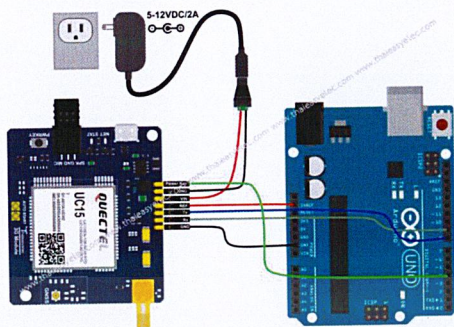
รูปที่ 3.4 รูปวงจรที่ใช้กับ Real time clock

(ที่มาจาก <http://www.daveytxaro.com/arduino-ds3231-rtc.html>)

3.2.3 วงจรโมดูล 3G

โมดูล 3G เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อส่งค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ เพื่อนำขึ้นแสดงบนแพลตฟอร์ม และการสื่อสารด้วย 3G นั้นมีความครอบคลุมหลายพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งกับอุปกรณ์ IoT ที่จำเป็นต้องใช้ได้ทุกพื้นที่ในประเทศ โมดูล 3G ใช้ 7 pin ประกอบด้วย 3 pin สัญญาณ

pin power key, pin Tx, pin Rx และ 4 pin สำหรับไฟเลี้ยง pin VCC 5 volt, pin Vref, pin Ground
 ดังรูปที่ 3.5

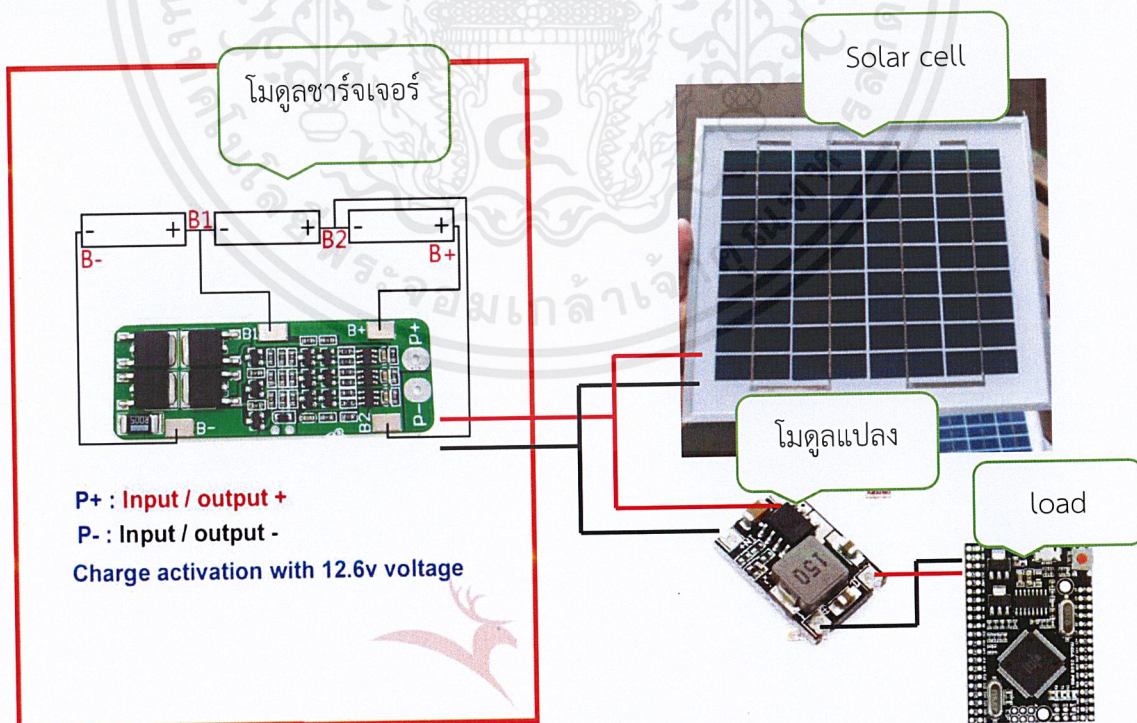


รูปที่ 3.5 รูปวงจรที่ใช้กับโมดูล 3G

(ที่มา <https://www.thaieasyelec.com/3g-module-uc15-t.html>)

3.2.4 วงจรไฟฟ้าเลี้ยง

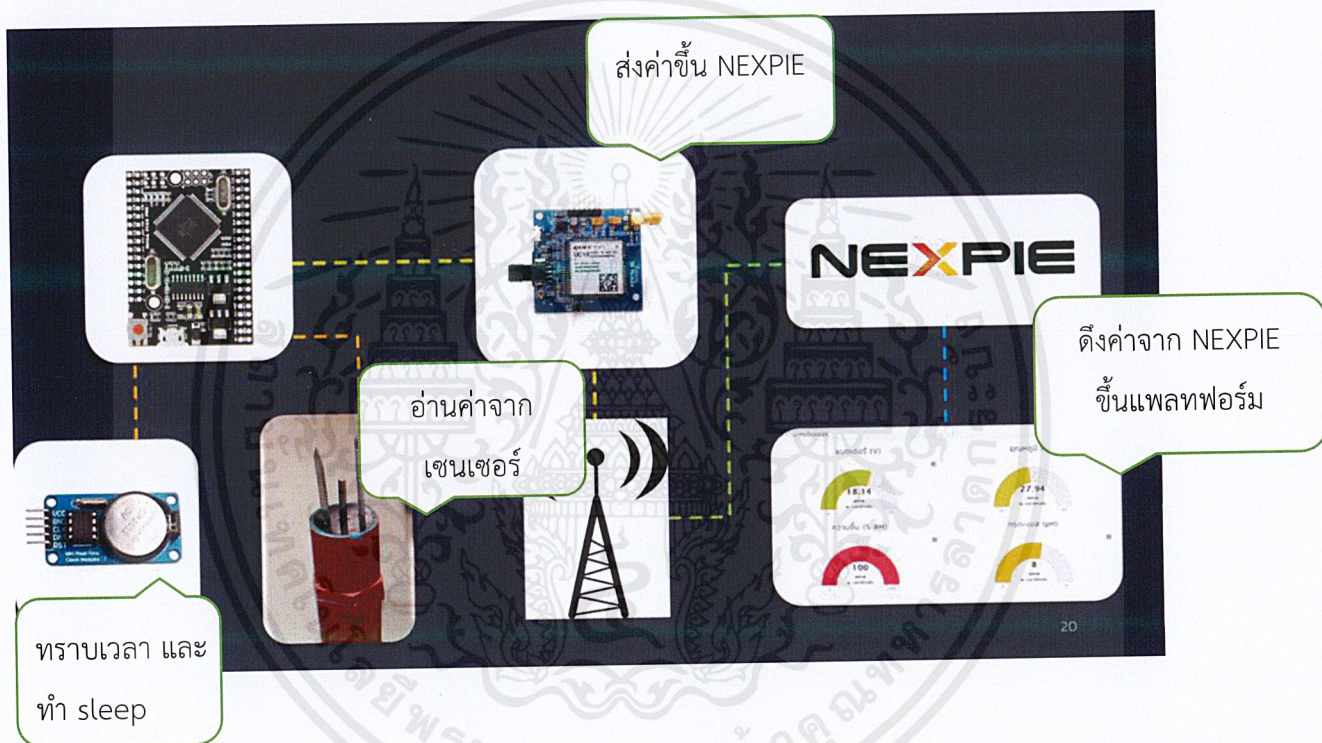
วงจรที่ใช้ในการจ่ายไฟให้กับทั้งระบบในการทำงานก็เป็นอีกสิ่งที่สำคัญที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์ IoT นั้นพลังงานที่ค่อนข้างต่ำ แต่ต้องมีระยะเวลาในการทำงานที่ยาวนานและต่อเนื่องการคำนึงถึงการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์และการชาร์จด้วยโซล่าเซลล์ ซึ่งจะมีการต่อวงจรการชาร์จไฟฟ้างดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปวงจรจ่ายไฟให้แก่อุปกรณ์

3.2.5 ซอฟต์แวร์การทำงานระบบ

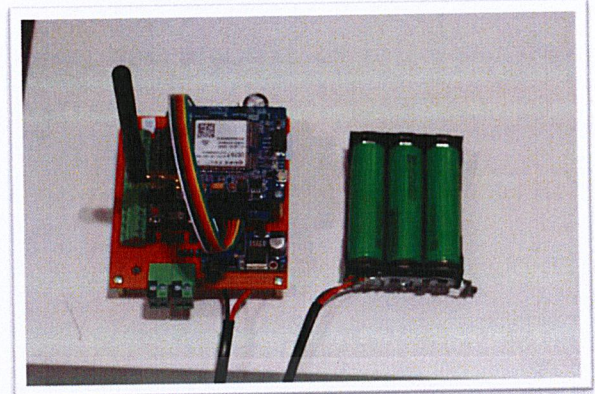
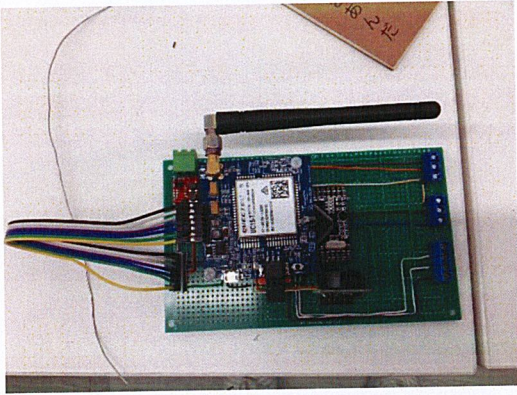
การทำงานของซอฟต์แวร์ในระบบเบื้องต้น จะถูกออกแบบหลัก ๆ ประกอบด้วย ซอฟต์แวร์สำหรับการอ่านค่าจากเซนเซอร์ซึ่งจะรับค่ามาในรูปแบบของ digital number จากนั้นจะต้องถูกกำหนดด้วยเวลาที่ข้อมูลได้ถูกอ่านด้วยอุปกรณ์ Real time clock นอกจากนี้ยังต้องใช้อุปกรณ์นี้ในการทำซอฟต์แวร์สำหรับการ sleep mode เพื่อประหยัดพลังงาน ลำดับต่อไปคือค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์และเวลาที่บันทึกจะถูกส่งขึ้น gateway ไปยังแพลตฟอร์ม NEXPIE เพื่อประมวลผลค่าและแสดงค่า และสุดท้ายคือซอฟต์แวร์การนำค่าที่ได้จากการประมวลผลจาก NEXPIE ไปสู่แพลตฟอร์มที่ลูกค้าใช้งานดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแสดงแผนผังการออกแบบซอฟต์แวร์การทำงาน

3.2.6 ออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์

ฮาร์ดแวร์ที่ต้องใช้ในชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดินทั้งหมด รวมถึงซอฟต์แวร์ถูกตรวจสอบเพื่อทดสอบการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพโดยหาข้อบกพร่องที่ไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ของฮาร์ดแวร์แต่ละตัว เช่น อุปกรณ์บางตัวที่ใช้พลังงานมากเกินไป เซนเซอร์ที่มีสัญญาณรบกวนกัน เป็นต้น ก่อนนำไปพัฒนาเป็นวงจร PCB ที่นำไปใช้งานจริง วงจรต้นแบบ และวงจร PCB ที่ถูกพัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปแสดงวงจรต้นแบบ และวงจร PCB ที่ถูกพัฒนาขึ้น

การออกแบบโครงสร้างนั้นมีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง เพราะนอกจากเซนเซอร์จะใช้งานได้แล้ว การติดตั้งเซนเซอร์ ความสวยงามของอุปกรณ์ ความแข็งแรงทนทาน การใช้งาน และราคาที่ถูกลงมาเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก สุดท้ายสิ่งที่สำคัญรองลงมาจากปัจจัยดังกล่าวยังมีเรื่องของต้นทุนทางด้านของเวลาในการผลิตอุปกรณ์ ซึ่งได้มีการออกแบบ และพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

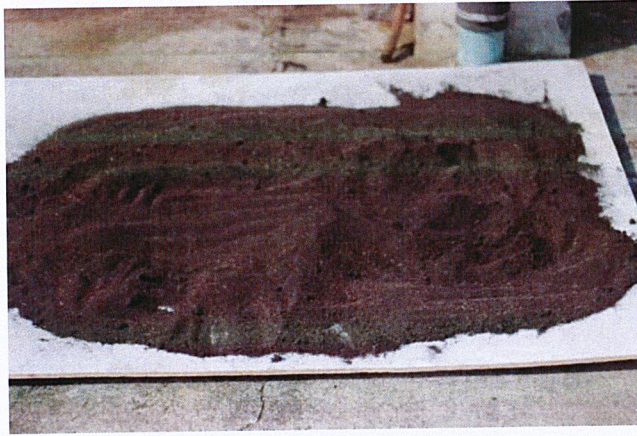
3.3 ทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินให้มีความแม่นยำด้วยการ calibrate เซนเซอร์ ให้มีการแปลงค่าทางไฟฟ้าที่อ่านได้เทียบกับค่าความชื้นในดิน การทดลองวัดค่าจากการนำสมการไปทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งของดิน เพื่อทดสอบการวัดของเซนเซอร์ การนำสมการไปทำนายดินชนิดอื่น และการหาความหนาแน่นรวมของดินที่มีผลต่อการอ่านค่า

3.3.1 การทดลองเพื่อหาสมการ calibration

เซนเซอร์วัดความชื้นในดินนั้นอาศัยหลักการเปลี่ยนของค่าการเก็บประจุ แสดงผลออกมาเป็น digital number การ calibrate ของค่าความชื้นในดินกับค่า digital number ที่ได้จากเซนเซอร์ต้องถูกนำมา calibrate กับค่าความชื้นของดินที่วัดได้ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4959 – 00 เพื่อสามารถแสดงผลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง กระบวนการและขั้นตอนการ calibrate ดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างดินนำไปร่อนเพื่อนำสิ่งที่ไม่ใช่เนื้อดินออก เช่น หิน เศษไม้ แกลบ เป็นต้น และนำไปตากจนความชื้นออก กระบวนการนี้ต้องพลิกดินเป็นระยะ ๆ การเตรียมตัวอย่างดินร่วนแสดงดังภาพที่ 3.12



รูปที่ 3.9 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างดินร่วน

2. นำดินที่แห้งแล้วใส่ในภาชนะที่มีขนาดที่เพียงพอต่อการใส่เซนเซอร์วัดความชื้นในดินได้ โดยจะบรรจุดินแห้งใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ 10 ภาชนะ ภาชนะที่บรรจุดินแห้งแสดงดังรูปที่ 3.13



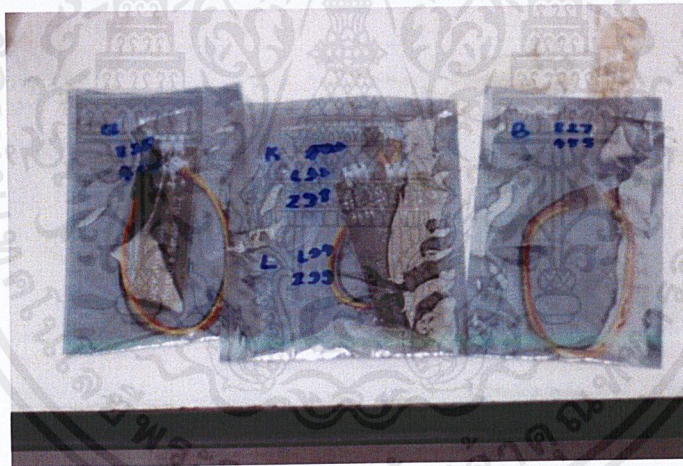
รูปที่ 3.10 รูปแสดงภาชนะที่บรรจุดินแห้ง

3. เพิ่มน้ำให้กับดินที่เตรียมไว้แต่ละภาชนะโดยให้น้ำด้วยขวดพ่นน้ำเพื่อให้น้ำผสมกับดินได้อย่างสม่ำเสมอ โดยให้แต่ละภาชนะมีความชื้นที่ไม่เท่ากันจากดินที่แห้งไปจนถึงดินที่เติมน้ำจนอิ่มตัว การเพิ่มน้ำให้กับดินในแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 3.14



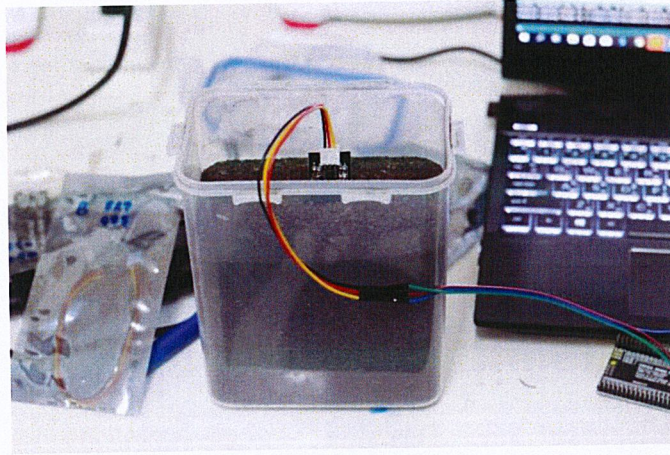
รูปที่ 3.11 รูปแสดงการเพิ่มน้ำให้กับดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้

4. เนื่องจากเซนเซอร์แต่ละอันมีการวัดค่าสูงสุดต่ำสุดที่ไม่เท่ากันจึงต้องเลือกเซนเซอร์บางตัวมาเพื่อใช้ในการวัด เพื่อหาสมการที่สามารถใช้ได้ครอบคลุมที่สามารถใช้ได้ทุกตัว เซนเซอร์ที่เลือกแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.12 รูปแสดงเซนเซอร์ที่เลือก

5. นำเซนเซอร์วัดความชื้นในดินมาวัดดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้ และบันทึกค่า digital-number ที่วัดได้แต่ละภาชนะ 3 ครั้ง การนำเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.13 รูปการนำเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแต่ละภาชนะที่เตรียมไว้

6. นำดินบางส่วนจากแต่ละภาชนะบรรจุลงใน moisture can โดยใช้ 5 ตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักแต่ละตัวอย่าง บันทึกค่าน้ำหนัก การนำดินแต่ละภาชนะบรรจุลงใน moisture can แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.14 รูปการนำดินแต่ละภาชนะบรรจุลงใน moisture can

7. นำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อน รุ่น JSOF-Series Convection Oven แบรินด์ JSR และนำดินที่อบเสร็จและเข้าโถดูดความชื้นจนเย็นตัวและนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า การนำดินตัวอย่างไปเข้าตู้อบ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.15 รูปตู้อบลมร้อน รุ่น JSOF-Series Convection Oven แบนด์ JSR

8. นำค่าน้ำหนักที่ได้จากแต่ละตัวอย่างไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ}}{\text{น้ำหนักดินหลังอบ}} \times 100$$

9. ทำซ้ำกระบวนการทั้งหมด 3 ครั้ง และนำค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่า digital number และหาสมการ calibration เพื่อนำสมการไปทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

3.3.2 การทดลองนำสมการ calibration ทำนายดินชนิดอื่น

จากวัตถุประสงค์สมการที่ได้จากการทดลองเซนเซอร์จะต้องสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินได้ ซึ่งการเตรียมการทดลองนั้นมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.3.1 จะแตกต่างกันเพียงเปลี่ยนชนิดดินที่นำมาทดลอง และค่าที่อ่านได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้น การเตรียมตัวอย่างดินทรายแป้งแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.16 รูปการเตรียมตัวอย่างดินทรายแป้ง

3.3.3 การทดลองหาค่าความแม่นยำ

เมื่อทราบสมการ calibration แล้วนำสมการดังกล่าวอัปโหลดเข้า microcontroller นำไปทำนายดินที่ทำการเตรียมการเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อหาสมการ calibration ดังข้อ 3.3.1 ต่างกันเพียงค่าที่ได้จะเป็น เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งที่วัดได้ จากนั้นนำดินที่ถูกวัดไปอบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงนำมาเปรียบเทียบหาค่า Error และ Root Mean Square Error (RMSE) จากสูตร

$$Error = \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง} - \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้}$$

$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{Error^2}{n}} \text{ เมื่อ } n \text{ คือจำนวนข้อมูล}$$

3.3.4 การทดลองหาความหนาแน่นรวมของดิน

การทดลองนี้ทำให้ทราบความสามารถในการรับน้ำของดินแต่ละชนิด เพื่อปรับมาตรฐานของสมการให้ดินแต่ละชนิดมีตัวแปรที่ตรงกันซึ่งการหาความหนาแน่นรวมของดิน สามารถหาได้จากสูตร และขั้นตอนการเตรียมการทดลองดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวลของดิน } g}{\text{ปริมาตรของภาชนะ } cm^3}$$

1. เตรียมดินตัวอย่างแต่ละชนิดนำไปร่อนกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกเช่น หิน, เศษไม้, ขยะ เป็นต้น

2. นำดินที่เตรียมนำมาบรรจุใส่ภาชนะที่ทราบปริมาตร ซึ่งใช้ moisture can เพราะเราทราบค่าของปริมาตร และบรรจุดินจนเต็มพอดี moisture can โดยแต่ละชนิดของดินใช้ 3 ตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า การบรรจุดินใส่ moisture can แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.17 รูปการบรรจุดินใส่ moisture can

3. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตั้งชั่งก่อนหน้าไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำไปเข้าโถดูดความชื้นจนเย็นตัวลง นำไปชั่งและบันทึกค่า

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การพิจารณาเลือกเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์

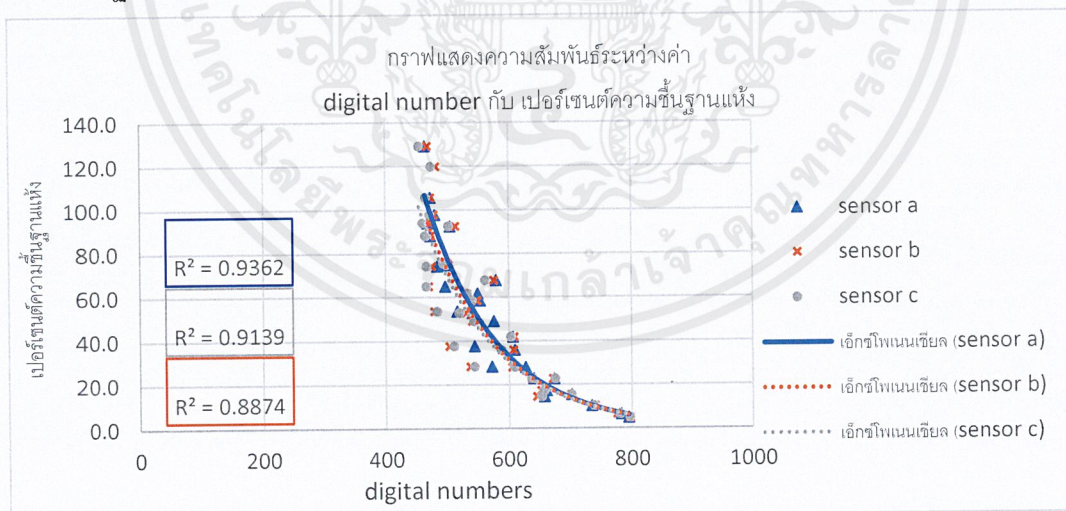
ตารางที่ 4.1 ตารางการพิจารณาเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	ราคา	ความแม่นยำ
Capacitive soil moisture sensor 	ถูกมาก - แพงมาก	ปานกลาง - สูง
resistive soil moisture sensor 	ถูกมาก	ต่ำ - ปานกลาง
Time domain reflectometry 	แพงมาก	สูง
gypsum block 	แพง	สูง

การศึกษาการทำงานของเซนเซอร์ พร้อมทั้งพิจารณาเลือกเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ ซึ่งได้ศึกษาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินทั้งหมด 4 แบบ คือ Capacitive soil moisture sensor, Resistive soil moisture sensor, Time domain reflectometry, gypsum block ดังแสดงตารางที่ 4.1 เกณฑ์การพิจารณาที่สำคัญที่สุดคือ ราคาของเซนเซอร์ ความทนทาน และการวัดที่ค่อนข้างแม่นยำ พบว่า Time domain reflectometry มีความแม่นยำสูงด้วยหลักการ แต่ราคาของเซนเซอร์สูงเกินเกณฑ์ที่ต้องการ Gypsum block ก็เป็นเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำที่สูง และราคาที่สูงเช่นเดียวกัน และมีการตอบสนองในการวัดที่ช้า เซนเซอร์ทั้ง 2 แบบ นี้จึงไม่ได้ถูกเลือกถึงแม้จะมีความแม่นยำที่สูง เซนเซอร์ที่มีราคาถูกที่นำมาพิจารณาคือ capacitive soil moisture sensor กับ resistive soil moisture sensor พบว่า resistive soil moisture sensor สามารถวัดค่าได้ไม่แม่นยำ และมีปัญหาการถูกกัดกร่อนเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณา ดังนั้นด้วยคุณสมบัติ และราคาของ capacitive soil moisture sensor เป็นเซนเซอร์ที่ดีที่สุดในการพิจารณา คือมีความทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถวัดค่าได้ค่อนข้างแม่นยำ และราคาถูก

4.2 ผลการทดลองเพื่อหาสมการ calibration

จากการทดลองหาสมการ calibration ของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive ซึ่งใช้ดินร่วนเป็นดินในการทดลอง และดำเนินการทดลองเพื่อแปลงค่า digital number ที่วัดได้ เป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินฐานแห้ง แสดงดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า digital number กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินฐานแห้ง



กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง digital number กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งกับค่า digital number เป็นการแสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์แสดงเป็นสมการ calibration ซึ่งในการทดลองเป็นการเปรียบเทียบสมการของเซนเซอร์แต่ละตัว เพื่อนำสมการที่ครอบคลุมและเหมาะสมที่สุด จากการเลือกเซนเซอร์มา 3 ตัว

โดยเซนเซอร์ที่เลือกมานั้นมีค่า digital number สูงสุด และต่ำสุดไม่เท่ากันแต่มีค่าใกล้เคียงกันมาศึกษาเพื่อหาสมการ calibration ให้เซนเซอร์แต่ละตัววัดค่าได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันหรือมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ผลการทดลองที่ได้คือ แนวโน้มของเซนเซอร์แต่ละตัวมีทิศทางเดียวกัน สมการที่ได้จากการวัดของ sensor a sensor b และ sensor c มีค่า $R^2 = 0.9362$ $R^2 = 0.9139$ และ $R^2 = 0.8874$ ตามลำดับ สมการที่ได้จาก sensor a จึงเป็นสมการที่เลือกมาใช้งานเพราะเป็นสมการที่ครอบคลุมข้อมูลของทุกเซนเซอร์ และมีความเหมาะสมที่สุด

4.3 การทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน

ค่าความหนาแน่นรวมของดินเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวัดความชื้นของดิน เพราะสมการที่ใช้ในการ calibrate นั้นเป็นสมการที่ได้จากการทดลองด้วยดินร่วน เมื่อนำสมการไปวัดกับดินชนิดอื่นจึงจำเป็นต้องวัดความหนาแน่นของดินชนิดอื่นด้วยเพื่อหาความชื้นที่แท้จริงของดินชนิดนั้น และจำเป็นต้องทราบความหนาแน่นรวมของดินที่ใช้สร้างสมการ calibration ด้วยเพื่อระบุความหนาแน่นรวมมาตรฐาน ตัวอย่างดิน 3 ตัวอย่าง ถูกนำมาวัดค่าความหนาแน่นรวมของดิน และเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าความหนาแน่นรวมมาตรฐานของสมการ calibration ค่าความหนาแน่นรวมของดินแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ตารางการหาความหนาแน่นรวมของดินร่วน

ตัวอย่างที่	นน. ถ้วย	นน.ก่อนอบ	นน.หลังอบ	นน.ดินก่อน	นน.ดินหลัง	ปริมาตรถ้วย	ความหนาแน่นรวม
1	17.929	39.633	39.045	21.704	21.116	59.15	0.356
2	14.167	35.961	35.896	21.794	21.729	59.15	0.367
3	14.955	37.649	37.037	22.694	22.082	59.15	0.373
						เฉลี่ย	0.365

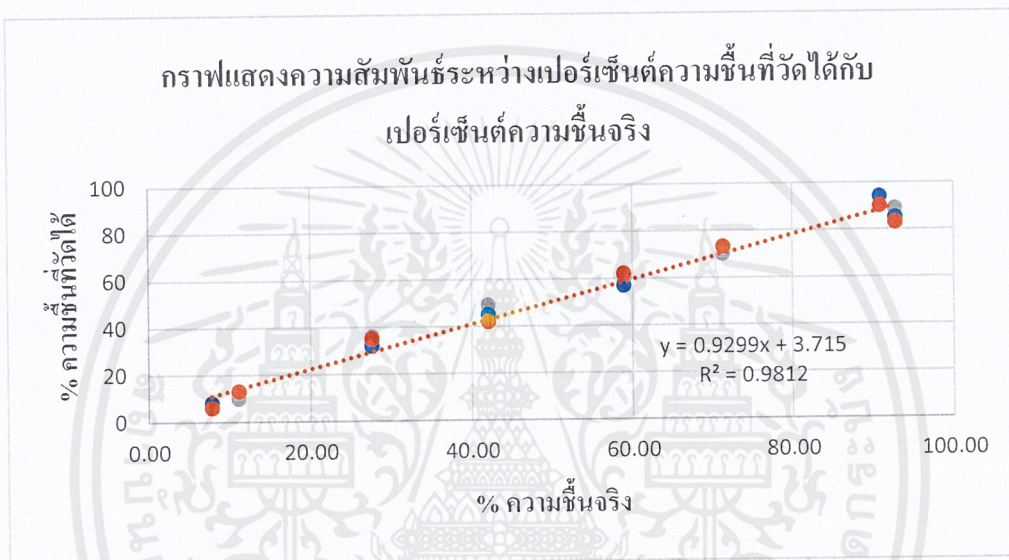
ตารางที่ 4.3 ตารางการหาความหนาแน่นรวมของดินทรายแป้ง

ตัวอย่างที่	นน. ถ้วย	นน.ก่อนอบ	นน.หลังอบ	นน.ดินก่อน	นน.ดินหลัง	ปริมาตรถ้วย	ความหนาแน่นรวม
4	15.215	98.652	98.168	83.437	82.953	59.15	1.402
5	16.689	97.349	96.831	80.66	80.142	59.15	1.354
6	15.634	95.768	95.321	80.134	79.687	59.15	1.347
						เฉลี่ย	1.368

4.4 การทดสอบหาความแม่นยำ

4.4.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของที่ใช้ในการ calibrate

จากการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินของดินร่วนที่มีความหนาแน่นรวม 0.365 g/cm^3 โดยเตรียมตัวอย่างดิน 8 ตัวอย่าง ให้แต่ละตัวอย่างมีความชื้นที่แตกต่างกัน นำเซนเซอร์วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยทำนายจากสมการ calibration 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง จากนั้นนำดินตัวอย่างไปอบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง บันทึกค่า และแสดงกราฟ โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและมีค่า $R^2 = 0.9812$ เป็นค่าที่สูง ค่าความสัมพันธ์นี้สามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำ



กราฟที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง

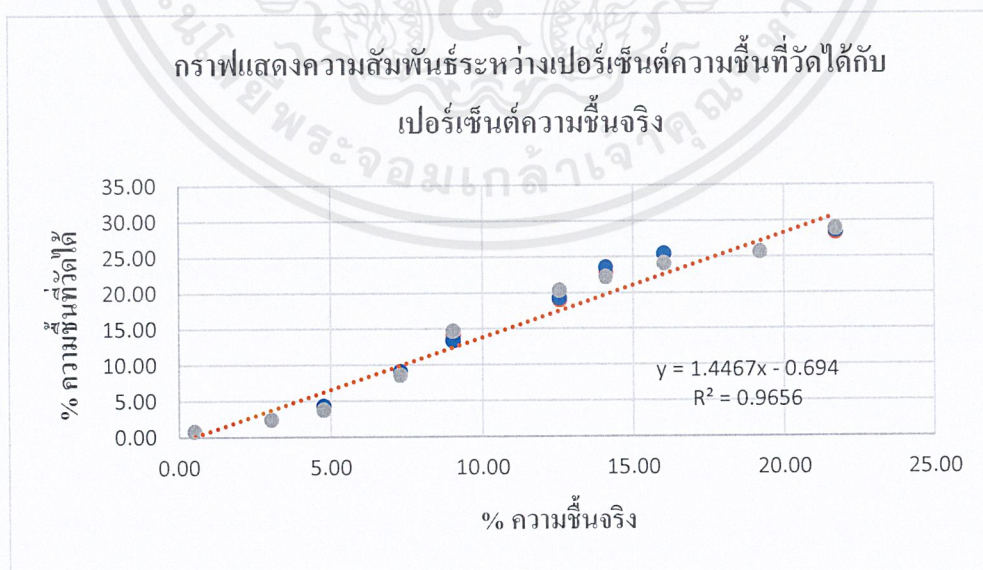
4.4.2 ผลการทดสอบความแม่นยำของดินชนิดอื่น

จากโครงสร้างดินที่แตกต่างกันตัวแปรที่มีผลต่อการวัดความชื้นของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ Capacitive (H.Eller & A.Denoth, 1996, p.137-147) คือค่าความหนาแน่นรวมของดิน จากสาเหตุดังกล่าวจึงทดสอบการทำนายของเซนเซอร์ของดินทรายแป้งที่มีความหนาแน่นรวม 1.368 g/cm^3 จากการเตรียมตัวอย่างดินจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยให้แต่ละตัวอย่างมีความชื้นที่แตกต่างกัน แล้วนำเซนเซอร์วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยทำนายจากสมการ calibration 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง จากนั้นนำดินตัวอย่างไปอบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง ซึ่งการทดสอบนี้ต้องแปลงค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ใช้สร้างสมการ calibration เป็นจำนวนเท่าต่อค่าความหนาแน่นรวมของดินทรายแป้งได้ค่าจำนวนเท่า = 3.748 เท่า ของดินร่วน การปรับแก้ค่าในการวัดค่าความชื้นในดินของดินทรายแป้งให้การวัดมีค่าความชื้นที่แม่นยำขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางการปรับแก้ค่าความชื้นในดินของดินทรายแป้งที่ความหนาแน่นรวม 1.368g/cm³

ตัวอย่าง ที่	% ความชื้น เฉลี่ย	%ความชื้นที่วัด ได้			ความ หนาแน่น รวมดิน ทราย แป้ง	ความ หนาแน่น รวมดิน ร่วน	จำนวน เท่า	%ความชื้นที่ปรับแก้		
1	0.51	3	3	3	1.368	0.365	3.748	0.80	0.80	0.80
2	3.04	9	9	9	1.368	0.365	3.748	2.40	2.40	2.40
3	4.77	15	16	14	1.368	0.365	3.748	4.00	4.27	3.74
4	7.31	32	34	32	1.368	0.365	3.748	8.54	9.07	8.54
5	9.05	53	50	55	1.368	0.365	3.748	14.14	13.34	14.67
6	12.56	71	72	76	1.368	0.365	3.748	18.94	19.21	20.28
7	14.10	85	88	83	1.368	0.365	3.748	22.68	23.48	22.15
8	16.05	90	95	90	1.368	0.365	3.748	24.01	25.35	24.01
9	19.21	96	96	96	1.368	0.365	3.748	25.61	25.61	25.61
10	21.71	106	107	108	1.368	0.365	3.748	28.28	28.55	28.82

จากการตารางที่ 4.4 พบว่าความหนาแน่นรวมของดินทรายแป้งมีผลต่อการปรับแก้ค่าให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและมีค่า R² 0.9656 เป็นค่าที่สูง ค่าความสัมพันธ์นี้สามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำ



กราฟที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัดได้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริง

4.5 การทดสอบการแบ่งแยกความแตกต่างความชื้นของดิน

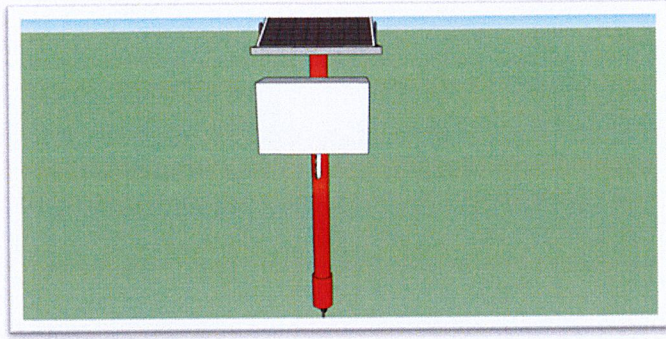
การทำนายของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินเป็นการทำนายด้วยสมการ calibration จากดินร่วน การวัดความชื้นในดินชนิดอื่นหากไม่มีการปรับแก้ค่าด้วยค่าความหนาแน่นรวม เซนเซอร์วัดความชื้นในดินสามารถแบ่งแยกความแตกต่างของความชื้นในดินด้วยช่วงการวัด 0 – 100 การแบ่งแยกความแตกต่างของความชื้นในดินแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการแบ่งแยกความแตกต่างของความชื้นในดิน

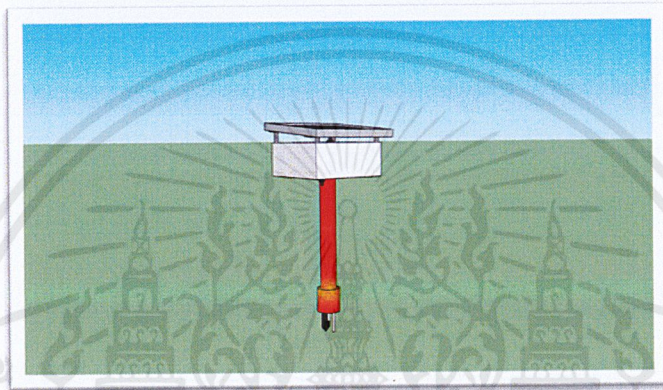
ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์	ลักษณะของดิน
0 – 20	แห้งมาก
21 – 40	แห้ง
41 – 60	ค่อนข้างเปียก
61 – 80	เปียก
81 - 100	เปียกมาก

4.6 การพัฒนาโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน

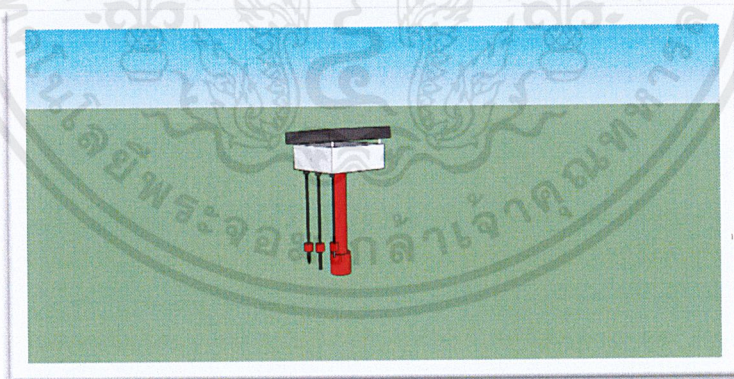
จากการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT และการเลือกวัสดุในการสร้างให้มีความแข็งแรง ทนทาน มีรูปลักษณ์ที่สวยงาม และมีราคาที่ถูก ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ การสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ใน version 1.1 จากรูปที่ 4.1 ได้สร้างโครงสร้างด้วยวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย และราคาถูก เช่น กล่องคอลโทล PVC กันน้ำ มีค่าการมาตรฐานกันน้ำ IPX4, ท่อ PVC, ชุดเซนเซอร์ที่รวบรวมด้วยการหล่อเรซิน จากการพัฒนาใน version 1.1 ได้พบปัญหาคือชุดอุปกรณ์มีความไม่สมดุล ทำให้ชุดอุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะเอียงไปข้างหน้าเสมอชุดเซนเซอร์จึงรับภาระโหลดทำให้เสียหาย มีรูปลักษณ์ที่เทอะทะ และปัญหาที่สำคัญคือใช้เวลาในการประกอบที่นาน จึงพัฒนามาเป็น version 1.2 ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งได้แก้ปัญหาดังกล่าว มีรูปลักษณ์ที่กะทัดรัดขึ้น สมดุล และใช้เวลาในการประกอบน้อยลง แต่พบปัญหาที่สำคัญต่อมาคือ การรบกวนกันของสัญญาณของเซนเซอร์ด้วยสาเหตุมาจากการรวมเซนเซอร์ไว้ด้วยกัน ทำให้เซนเซอร์ไม่สามารถวัดค่าได้แม่นยำ และพัฒนาเป็น version 1.3 เป็น version สุดท้าย ดังรูปที่ 4.3 โดยการแยกเซนเซอร์เป็นอิสระต่อกัน ทำให้สามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้



รูปที่ 4.1 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน version 1.1



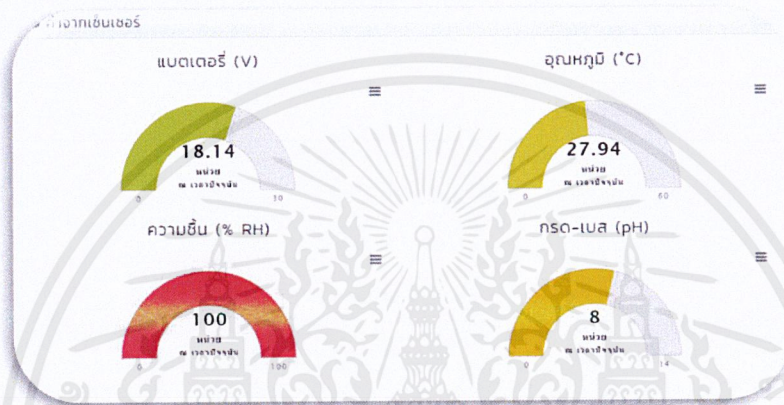
รูปที่ 4.2 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน version 1.2



รูปที่ 4.3 รูปแสดงการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน version 1.3

4.7 การทดสอบระบบการทำงานของอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน

การทดสอบระบบการทำงานโดยนำไปตรวจสอบสภาพดินในแปลงจริง โดยระบบการทำงานของระบบจะอ่านค่าเซนเซอร์ค่าที่ได้จากการอ่านถูกส่งมายัง NEXPIE cloud platform และส่งมาแสดงในบอร์ดแสดงผลใน platform ของเกษตรกร การส่งค่าของระบบจะถูกส่งด้วยการสื่อสารแบบ 3G มีการกำหนดการส่งค่ามายัง platform ทุก ๆ 1 ชั่วโมง การทดสอบพบว่าระบบของอุปกรณ์สามารถอ่านค่าและส่งค่ามาทุก 1 ชั่วโมง มายังแดชบอร์ดแสดงผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน platform ในช่วง 0-100% รวมถึงค่าของเซนเซอร์อื่น ๆ และสามารถบันทึกค่าการวัดค่าย้อนหลังเพื่อเก็บเป็นข้อมูลย้อนหลังใน NEXPIE cloud platform การแสดงผลบนแพลตฟอร์มแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปแดชบอร์ดแสดงผลบนแพลตฟอร์ม

จากการทดลองเซนเซอร์วัดความชื้นในดินจะเห็นได้ว่าการวัดค่าของเซนเซอร์นั้นสามารถแบ่งแยกว่าดินมีความชื้นที่แตกต่างกันได้ดี และค่าความแม่นยำในการวัดนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินแต่ละช่วงอยู่ที่ $\pm 10\%$ ซึ่งเซนเซอร์นั้นทำงานได้อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้สามารถแสดงผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน Platform ในช่วง 0-100 และแสดงผลการอ่านค่าจากเซนเซอร์อื่นในชุดอุปกรณ์ได้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive ซึ่งได้ทำการออกแบบโครงสร้างชุดอุปกรณ์ IoT ตรวจสอบคุณภาพดิน การทำงานของอุปกรณ์สำหรับการแสดงค่าสถานะของแปลงของเกษตรกร รวมถึงการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินให้เหมาะสม และมีความแม่นยำ ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของบริษัท

จากการศึกษาเซนเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ capacitive พบว่าเซนเซอร์สามารถแบ่งแยกความชื้นของดินที่แตกต่างกันได้ดี สามารถทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งได้แม่นยำกับดินร่วนที่มีความหนาแน่นรวม 0.365 g/cm^3 มีค่าที่ค่อนข้างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งของดินชนิดอื่นได้ แต่จะต้องทราบความหนาแน่นรวมของดินชนิดที่ต้องการวัด เพื่อมาปรับแก้ให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งที่แม่นยำขึ้น จากการทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์อยู่ที่ $\pm 10\%$ เป็นค่าที่ยอมรับได้ สามารถแสดงผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน Platform ในช่วง 0-100 และแสดงผลการอ่านค่าจากเซนเซอร์อื่นในชุดอุปกรณ์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สมการที่ใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งในดิน ใช้สำหรับดินที่มีค่าความหนาแน่นรวม 0.365 g/cm^3 ถ้าต้องการวัดดินชนิดอื่นให้แม่นยำตรงจะต้องใช้ดินชนิดนั้น ๆ มาหาสมการ calibrate หรือหาความหนาแน่นรวมของดินชนิดนั้น ๆ เพื่อปรับค่าที่อ่านได้ให้แม่นยำตรง

2. ถ้าหากเซนเซอร์มีค่า digital number อยู่ในช่วง 820 – 460 จะไม่สามารถใช้สมการ calibration ได้

3. เซนเซอร์วัดความชื้นแบบ capacitive มีการตอบสนองต่อการรบกวนสัญญาณ เมื่อติดตั้งร่วมกับเซนเซอร์อื่น

4. ช่วงการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซนเซอร์นั้น มีช่วงที่ค่อนข้างแคบ ควรที่จะพัฒนาช่วงให้กว้างเพื่อทำให้เซนเซอร์วัดค่าได้ละเอียดขึ้น

5. ควรจะศึกษาอายุการใช้งาน และความแข็งแรงของเซนเซอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. KUMAR, P. CORONEL, J. SIMUNOVIC, V.D. TRUONG, AND K.P. SANDEEP. 2007. Measurement of Dielectric Properties of Pumpable Food Materials under Static and Continuous Flow Conditions. Journal of Food Science Vol 72
- [2] กษมศรี ชับซ้อน. ปฐพีวิทยา(พิมพ์ครั้งที่4). กรุงเทพมหานคร : นานาสิ่งพิมพ์,2541.
- [3] คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่8). กรุงเทพมหานคร : เรืองธรรมการพิมพ์,2541
- [4] คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. คู่มือปฏิบัติการปฐพีวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่8). กรุงเทพมหานคร : ชวนพิมพ์,2533
- [5] NEXPIE Co. Ltd. NEXPIE. สืบค้นเมื่อ 7 ธันวาคม 2562. จากเว็บไซต์ : <https://nexpie.com>
- [6] Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. bulk density / ความหนาแน่นรวม. สืบค้นเมื่อ 7 ธันวาคม 2562. จากเว็บไซต์ : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0747/bulk-density-ความหนาแน่นรวม>
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. Internet of Things. สืบค้นเมื่อ 7 ธันวาคม 2562. จากเว็บไซต์ <https://www.nectec.or.th/innovation/innovation-software/netpie.html>
- [8] Edaphic Scientific. soil moisture sensor calibration. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.edaphic.com.au/soil-water-compendium/soil-moisture-sensor-calibration/>
- [9] Soil Lab Modules. Time domain reflectometry. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://labmodules.soilweb.ca/time-domain-reflectometry/>
- [10] PROJECT Phy-122(Lab). หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://sites.google.com/site/projectphysics122/hlak-karthangan-khxng-sensexr-wad-khwamchun-ni-din>
- [11] Community development library. Gypsum-block method. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <http://www.nzdl.org/gsdmod?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-0utfZz-8-00&cl=CL2.19&d=HASH3105beaa24976abbef784e.7.3>=1>

- [12] ArduinoAll. **Capacitive soil moisture sensor**. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.arduinoall.com/product/2271/capacitive-soil-moisture-sensor>
- [13] ArduinoAll. **บอร์ด Arduino Mega2560 Pro**. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.arduinoall.com/product/2422/arduino-mega2560-pro>
- [14] ArduinoAll. **Module Stepdown 6-30V to 5V 3A fix 5v**. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.arduinoall.com/product/2102/module-stepdown-6-30v-to-5v-3a-fix-5v>
- [15] ArduinoAll. **DS3231 Module โมดูลนาฬิกา**. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.arduinoall.com/product/410/ds3231-module>
- [16] ThaiEasyElec. **3G Module (UC15-T)**. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2562. จากเว็บไซต์ : <https://www.thaieasyelec.com/3g-module-uc15-t.html>
- [17] H.Eller and A.Denoth.1996. A capacitive soil moisture sensor. Journal of Hydrology 185:137-146.