



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปลูกเมลอนด้วยวิธีการรากแขวนโดยใช้พลังงานสะอาด  
Optimization Growth melon in Aeroponic System for clean energy

กุลยุทธ์ บุญแข่ง (สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์)

ศุภชัย ชัยณรงค์ (สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์)

เอกรินทร์ วาโย (สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและไอโอที)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565)



**Research Title** Optimization Growth melon in Aeroponic System for clean energy

**Researcher** Asst. Prof. Dr.Kulyuth boonseng

Asst. Prof. Dr.Suppachai Chainarong

Mr. Ekkarin Wayo

**Research Consultants**

**Organization** Logistic Engineering Program, Information Technology and IoT  
Songkhla Rajabhat University

**Year** 2025

Structural problems inherent in greenhouse melon cultivation using substrate bags include the excessive use of water and fertilizer, high energy costs, and inconsistent fruit quality. These challenges are exacerbated in the context of energy price volatility and agricultural water scarcity. This research, therefore, aimed to develop and evaluate a "clean energy-powered aeroponic melon cultivation system" as a sustainable alternative to reduce resource consumption and enhance produce quality. The experiment was based on a Central Composite Design, defining 13 different spray-pause cycle formulas (M1–M13) within the same greenhouse, which were compared against the standard substrate bag cultivation method. Key parameters—including fruit weight, sweetness ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), coefficient of variation (CV), water and fertilizer consumption, electricity usage, and cost—were monitored throughout the 90-day cultivation period. The results indicated that the M4 formula (a cycle of 15 seconds of spraying followed by a 3-minute pause during the day and a 5-minute pause at night) yielded the highest efficiency. Melons from this aeroponic system had an average weight of 1.02 kg (CV  $\approx$  5%) and a sweetness of 14.0  $^{\circ}\text{Bx}$ . In comparison, the standard substrate bag method produced melons with an average weight of 1.48 kg (CV  $\approx$  12%) and a sweetness of 12.1  $^{\circ}\text{Bx}$ . Although the aeroponically grown melons were lighter, this difference does not impede their viability in the premium market, as the aeroponic system yielded significantly higher and more consistent sweetness levels ( $p < 0.05$ ). Furthermore, the aeroponic system reduced water and fertilizer consumption by 60–70% and consumed only approximately 0.13 kWh of electricity per day.

**Keywords** Aeroponics system, Melon, Water-fertilizer efficiency, Solar energy

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามแผนการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยในครั้งนี้ได้ด้วยดี จากความร่วมมือของผู้มีส่วนร่วมทุกภาคส่วน ขอขอบคุณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนฉิม ตำบลทุ่งหว้า อำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล ที่ดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในการพัฒนาดำเนินการวิจัยตลอดตั้งแต่เริ่มต้นจนแล้วเสร็จ แหล่งทุนที่ใช้งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และต้นสังกัดของผู้ดำเนินงานวิจัย หลักสูตรวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เป็นหน่วยงานที่ให้โอกาสในการสร้างโอกาสดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างประโยชน์ในการพัฒนาสร้างองค์ความรู้ ถ่ายทอด พัฒนาและแก้ปัญหาให้กับกลุ่มชุมชนตลอดถึง นักศึกษาและผู้ร่วมดำเนินงานในการวิจัยที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาสร้างงานวิจัยในครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

2568



## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
ขอบเขตการวิจัย .....	4
สมมติฐานการวิจัย .....	4
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย .....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
Node MCU (โหนด เอ็มซียู) .....	5
DHT22 (เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ).....	5
หลักการใช้งานของมอดูล DHT .....	6
ระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL .....	7
Arduino .....	10
Internet of Things (IoT) .....	13
การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) .....	20
การปลูกพืชด้วยระบบบรอกแวนหรือแอโรโพนิกส์ .....	29
แนวคิดเกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ .....	30
ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย .....	31
เซลล์แสงอาทิตย์ .....	32

## สารบัญ (ต่อ)

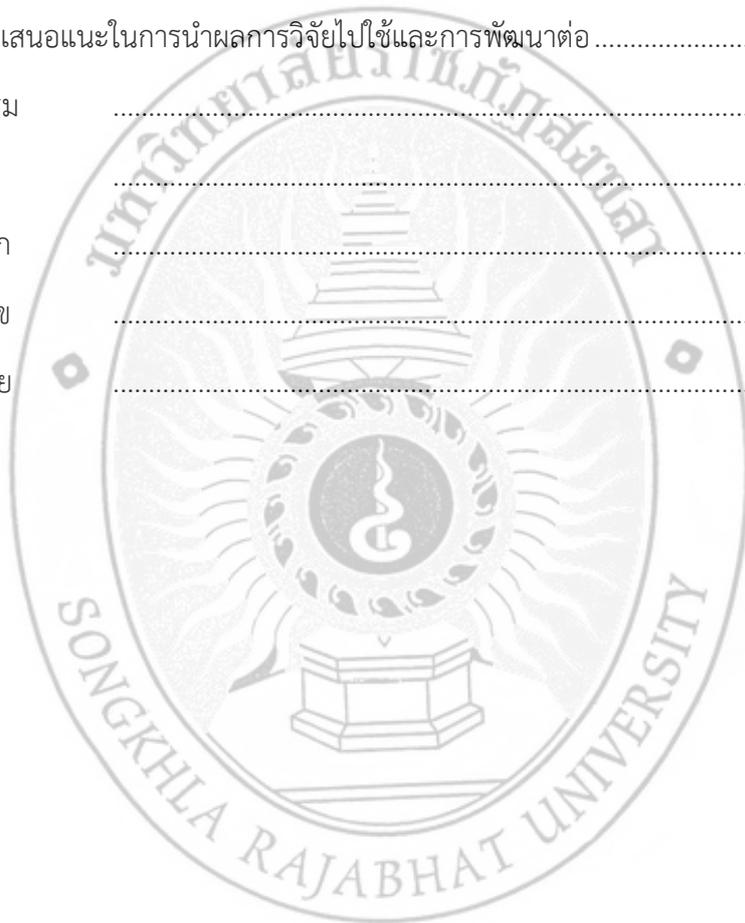
	หน้า
คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	39
ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	40
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง.....	43
กรอบแนวคิดในการวิจัย .....	49
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
ขั้นตอนและแผนดำเนินงานวิจัย.....	50
การออกแบบและสร้างระบบการเพาะปลูก.....	51
การออกแบบและสร้างระบบควบคุมและพลังงานสะอาด.....	51
การออกแบบการทดลอง.....	52
การเก็บรวบรวมข้อมูล .....	53
การวิเคราะห์ข้อมูล .....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	54
ออกแบบสร้างระบบการปลูกด้วยระบบรากแขวนในอากาศ.....	54
1. การสำรวจพื้นที่บริเวณแปลงปลูก.....	54
2. เตรียมปรับสภาพโรงเรือนและสร้างแปลงปลูก .....	56
3. ศึกษาแนวคิดและหลักการทำงานเพื่อสร้างระบบควบคุมการปลูกแบบรากแขวน .....	60
4. การออกแบบและพัฒนาสร้างระบบควบคุมโรงเรือน .....	64
5. การสร้างระบบการทำงานเพื่อควบคุมการการปลูก .....	71
6. เตรียมต้นอ่อนเมล็ดและนำลงแปลงปลูก.....	79
ออกแบบสร้างระบบการใช้พลังงานสะอาดในการควบคุมระบบ .....	82
1. การออกแบบและพัฒนาระบบ Solar Cell เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับโรงเรือน .....	82
2. องค์ประกอบของระบบ Solar Cell .....	83
3. ออกแบบวงจรการทำงาน.....	84

## สารบัญ

	หน้า
4. คำนวณหาตำแหน่งการวางมุมแผงรับแสงอาทิตย์ของแผงโซลาร์เซลล์.....	85
5. ดำเนินการติดตั้งระบบแผงโซลาร์เซลล์ .....	86
ทดสอบระบบนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกเมล่อน .....	87
1. ลักษณะการปลูกเมล่อนในระบบรากแขวนและระบบดั้งเดิมผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก	
2. ระบบแสดงรายละเอียดการควบคุมในช่วงการปลูก .....	91
ออกแบบการทดลองเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก .....	91
1. รูปแบบการปลูกเมล่อน .....	91
2. ออกแบบการทดลองปลูก .....	92
เก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง .....	95
1. สังเกตและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล่อน .....	95
2. เก็บข้อมูลรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต้นเมล่อน .....	98
3. ข้อมูลการเจริญเติบโตในการปลูก .....	99
4. ลักษณะทางกายภาพของต้นเมล่อนที่ปลูก.....	102
5. ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก .....	110
6. วิธีการ เครื่องมือ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล .....	111
วิเคราะห์เปรียบเทียบผลด้านต้นทุนการปลูกด้วยถุงปลูกและแบบรากแขวนลอย .....	113
1. พลังงานที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการจ่ายน้ำให้ต้นเมล่อน .....	113
2. พลังงานที่ใช้ในการจ่ายน้ำเลี้ยงต้นเมล่อนทั้งสองระบบ .....	115
3. ปริมาณน้ำและปุ๋ยที่ใช้ในการดูแลระบบ .....	117
4. น้ำหนักและค่าความหวานของผลเมล่อน.....	120
5. วิเคราะห์ผลที่เกิดจากการนำระบบโซลาร์เซลล์มาใช้ในการปลูกเมล่อน .....	129
ข้อเสนอแนะและประเด็นปัญหาที่เกิดในกระบวนการดำเนินงาน .....	130

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	132
สรุปผลการวิจัย.....	132
อภิปรายผล.....	133
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้และการพัฒนาต่อ .....	134
บรรณานุกรม .....	135
ภาคผนวก .....	141
ภาคผนวก ก .....	143
ภาคผนวก ข .....	150
ประวัติผู้วิจัย .....	155



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การทดลองแฟคทอเรียลแบบ 22.....	26
2.2 การทดลอง 2 <sup>k</sup> Full Factorial.....	27
4.1 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) ของเซนเซอร์ SHT30 และ DHT22 เปรียบเทียบกับ เครื่องมือมาตรฐาน.....	66
4.2 รายการอุปกรณ์หลักที่ใช้ภายในโรงเรือน พร้อมระยะเวลาการใช้งานและการคำนวณค่า พลังงานที่ใช้ต่อวัน.....	82
4.3 รายละเอียดการให้น้ำในการปลูกเมล่อนแบบถุงปลูก.....	93
4.4 สถานะการทดลองปลูกด้วยระบบรากแขวนเบื้องต้น.....	93
4.5 รูปแบบการทดลองเพื่อใช้ในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวนลอย.....	94
4.6 ข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนของการปลูกสัปดาห์ที่ 10.....	100
4.7 ผลข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบถุงปลูกการปลูกสัปดาห์ที่ 10.....	101
4.8 การคำนวณเวลาการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละการทดลอง.....	116
4.9 การคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละแบบการทดลอง.....	117
4.10 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกแบบถุงปลูก.....	118
4.11 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกแบบรากแขวนลอย.....	120
4.12 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของน้ำหนักเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก.....	121
4.13 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำหนักผลเมล่อนในรูปแบบการปลูกแบบถุงปลูก.....	123
4.14 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักการปลูกแต่ละรูปแบบการทดลอง.....	123
4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) น้ำหนักเมล่อน.....	125
4.16 ผลการวิเคราะห์ค่าความหวานผลเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก.....	126
4.17 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนความหวานของเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก.....	128
4.18 รายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าความหวานผลเมล่อนปลูกแบบรากแขวนลอย.....	128
4.19 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนความหวานของเมล่อนที่ปลูกแบบรากแขวนลอย.....	129

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการแปลภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่อง .....	9
2.2 ขั้นตอนการแปลภาษาโปรแกรม .....	10
2.3 A wireless sensor network (WSN).....	14
2.4 WSN Nodes.....	15
2.5 Diagram อธิบายการเชื่อมต่อ Gateway หลายๆตัวเข้ากับ local network.....	15
2.6 Network Layers ของ Internet of Things โดย IBM.....	17
2.7 Information and Analysis.....	18
2.8 Information and Analysis การต่อกับ Arduino .....	18
2.9 Security of Everything .....	19
2.10 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย [47] .....	31
2.11 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline .....	33
2.12 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว .....	34
2.13 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline .....	34
2.14 ขั้นตอนของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก .....	35
2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon .....	35
2.16 ขบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Amorphous Si Solar Cell.....	36
2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบอิสระ .....	36
2.18 แบบเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย [48].....	37
2.19 แบบเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบผสมผสาน [48].....	38
2.20 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย .....	49
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	50
4.1 ลักษณะโรงเรือนก่อนดำเนินงาน.....	55
4.2 สำรองและวางแผนการปรับปรุงโรงเรือน.....	55
4.3 แบบแสดงลักษณะและขนาดโรงเรือน.....	56
4.4 ลักษณะแบบโรงเรือนและแปลงปลูกในการทดลอง.....	56
4.5 ถมดินปรับสภาพพื้นโรงเรือน .....	57
4.6 กำหนดตำแหน่งวางถังเก็บและจ่ายน้ำเข้าแปลงปลูก .....	57
4.7 วางถังใส่น้ำระบบการปลูก .....	57

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 ออกแบบและวางร่างตำแหน่งแปลงปลูก.....	58
4.9 สร้างโครงสร้างรับแปลงปลูกระบบรากแขวน.....	58
4.10 วางระบบท่อส่งน้ำเข้าแปลงปลูก.....	58
4.11 วางหลุมปลูกและปูแผ่นพลาสติกในตำแหน่งพื้นของแปลงปลูก.....	58
4.12 ออกแบบการวางหลุมปลูกในระบบรากแขวน.....	59
4.13 สร้างแปลงปลูกของระบบรากแขวน.....	59
4.14 สร้างส่วนประกอบตัวปิดระบบส่วนบนของแปลงปลูก.....	59
4.15 สร้างระบบปิดหลุมปลูก.....	59
4.16 กำหนดตำแหน่งหลุมปลูก.....	60
4.17 เตรียมตัวรับประคองลำต้นเมล็ด.....	60
4.18 กรอบแนวคิดการทำงานจากระบบควบคุม.....	61
4.19 ภาพขณะเก็บน้ำ.....	61
4.20 อุปกรณ์ดึงน้ำเข้าสู่ระบบ.....	61
4.21 อุปกรณ์ส่องกล้องฝังตัว.....	62
4.22 อุปกรณ์ฟั่นละอองหมอก.....	62
4.23 โปรแกรมประยุกต์.....	62
4.24 ผู้ใช้งาน หรือเจ้าของฟาร์มที่ปลูกเมล็ด.....	63
4.25 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม.....	64
4.26 สถาปัตยกรรมของระบบควบคุมโรงเรือน.....	65
4.27 แผนภาพแสดงลำดับการเชื่อมต่อของระบบฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุมโรงเรือน.....	68
4.28 โครงสร้างเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายของระบบควบคุมโรงเรือนที่พัฒนาขึ้น.....	69
4.29 แผนภาพตรรกะการควบคุมการทำงานของระบบควบคุมโรงเรือนแบบอัตโนมัติ.....	70
4.30 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างระบบการทำงาน.....	71
4.31 ศึกษาอธิบายรายละเอียดการทำงานส่วนประกอบของอุปกรณ์.....	71
4.32 สร้างและกำหนดตำแหน่งตัวยึดมอเตอร์ปั้มน้ำเข้าระบบ.....	72
4.33 ติดตั้งมอเตอร์ปั้มน้ำบนแผงยึด.....	72
4.34 ประกอบแผงวงจรควบคุม.....	73
4.35 แผงวงจรควบคุมที่ประกอบบนบอร์ด.....	73

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.36 เขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบ.....	73
4.37 ต่อบางจรและทดสอบการทำงาน.....	73
4.38 ทดสอบการทำงานของบอร์ดวงจรการทำงาน.....	74
4.39 ทดสอบการทำงานโปรแกรมควบคุมต่อกับอุปกรณ์การทำงาน.....	74
4.40 ติดตั้งกล่องใส่แผ่นควบคุมในโรงเรือน.....	75
4.41 นำบอร์ดติดตั้งกล่องควบคุมในแปลงปลูก.....	75
4.42 เชื่อมต่อระบบในการควบคุมแปลงปลูกในโรงเรือน.....	76
4.43 ต่อไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบควบคุมการทำงานของระบบรากแขวน.....	76
4.44 ติดตั้งระบบไฟฟ้าจ่ายปั้มน้ำ.....	76
4.45 เชื่อมระบบปั้มน้ำเข้าเข้ากับบอร์ดควบคุม.....	76
4.46 ทดสอบการทำงานของระบบปั้มน้ำ.....	77
4.47 ทดสอบการทำงานของระบบหัวพ่นน้ำ.....	77
4.48 ตรวจสอบความเรียบร้อยพร้อมติดตั้งคาร์บอนฟอสฟอรัส.....	77
4.49 ติดตั้งและทดสอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ.....	78
4.50 ติดตั้งกล่องสังเกตการณ์ในโรงเรือน.....	78
4.51 ติดตั้งมิเตอร์วัดปริมาณการจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปลูก.....	78
4.52 มิเตอร์ตรวจวัดการใช้ไฟฟ้า.....	79
4.53 การเตรียมเพาะพันธุ์ต้นกล้าเมล็ดก่อนนำลงแปลงปลูก.....	79
4.54 ต้นเมล็ดที่บ่มเพาะก่อนนำลงปลูกในแปลง.....	80
4.55 การอนุบาลต้นกล้าให้มีความแข็งแรงก่อนนำลงปลูกในระบบรากแขวน.....	80
4.56 การเตรียมส่วนประกอบในการปลูกแบบถุงปลูก.....	80
4.57 ติดตั้งวางระบบน้ำในการปลูกด้วยถุง.....	80
4.58 การปลูกในถุงและระบบให้น้ำ.....	81
4.59 นำต้นเมล็ดลงปลูกในระบบรากแขวน.....	81
4.60 วัดขนาดความยาวของรากก่อนนำลงแปลงปลูกในระบบรากแขวน.....	81
4.61 ต้นเมล็ดหลังปลูกในระบบรากแขวน.....	81
4.62 ผสมปุ๋ยและตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายในถังเก็บน้ำ.....	82
4.63 แบบวงจรการทำงานต้นแบบในการเรียนรู้.....	85

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.64 แนวคิดวงจรระบบโซล่าเซลล์.....	85
4.65 แสดงการหาค่ามุมตกกระทบของแสงกับแผงโซล่าเซลล์.....	85
4.66 สร้างฐานรองรับแผงโซล่าเซลล์.....	86
4.67 สร้างฐานรองรับแผงโซล่าเซลล์และกล่องพลังงาน.....	86
4.68 ติดตั้งแผงโซล่าเซลล์.....	86
4.69 ติดตั้งกล่องเก็บพลังงาน และระบบแปลงไฟฟ้า.....	87
4.70 ต่อระบบโซล่าเซลล์เข้ากับกล่องเก็บพลังงาน.....	87
4.71 ติดตั้งระบบแปลงไฟและตัวเก็บพลังงาน.....	87
4.72 ทดสอบระบบควบคุมการสเปรย์น้ำและสารละลายในแปลงปลูกแบบรากแขวน.....	88
4.73 สภาพโรงเรือนหลังนำต้นเมล่อนลงปลูก.....	88
4.74 ตรวจสอบตำแหน่งการพ่นน้ำในส่วนรากของการปลูกด้วยระบบรากแขวน.....	89
4.75 ลักษณะต้นเมล่อนที่ปลูกในโรงเรือนทั้งสองระบบหลังปลูก 21 วัน.....	89
4.76 ลักษณะรากและต้นที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนหลังปลูก 28 วัน.....	89
4.77 ลักษณะต้นที่ปลูกด้วยถุงปลูกและปลูกด้วยระบบรากแขวนหลังปลูก 28 วัน.....	89
4.78 ลักษณะต้นที่ปลูกด้วยระบบรากแขวน 28 วัน.....	90
4.79 บริเวณภายในโรงเรือนหลังการปลูก 28 วัน.....	90
4.80 หน้าแสดงข้อมูลการทำงานของระบบพ่นน้ำในระบบรากแขวน.....	91
4.81 รูปแบบตำแหน่งการปลูกทั้งสองระบบในแปลงปลูก.....	92
4.82 ต้นเมล่อนหลังปลูกในระบบรากแขวน 1 วัน.....	95
4.83 หลังนำปลูกในระบบรากแขวน 10 วัน.....	96
4.84 หลังนำปลูกในระบบ 10 วัน ของการปลูกแบบรากแขวนและถุงปลูก.....	96
4.85 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยระบบรากแขวน 6 สัปดาห์.....	96
4.86 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยระบบรากแขวน 9 สัปดาห์.....	96
4.87 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยระบบรากแขวน 12 สัปดาห์.....	97
4.88 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยถุงปลูก 12 สัปดาห์.....	97
4.89 ลักษณะผลเมล่อนที่ปลูกด้วยถุงปลูก.....	97
4.90 ลักษณะผลเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนลอย.....	97
4.91 แสดงการเก็บผลผลิตเมล่อนเมื่อครบอายุการปลูก.....	98

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.92 ต้นเมล่อนที่ได้รับความเสียหายก่อนกำหนดเก็บผลที่ปลูกแบบบรากแขวนลอย .....	98
4.93 การตรวจสอบลักษณะต้นและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต .....	99
4.94 ตรวจวัดขนาดความสูงและรายละเอียดของการเจริญเติบโตต้นเมล่อน .....	99
4.95 ตรวจสอบขนาดความโตของผลเมล่อน .....	99
4.96 การทดลองที่ 1 (M1).....	103
4.97 การทดลองที่ 2 (M2).....	103
4.98 การทดลองที่ 3 (M3).....	104
4.99 การทดลองที่ 4 (M4).....	104
4.100 การทดลองที่ 5 (M5).....	105
4.101 การทดลองที่ 6 (M6).....	105
4.102 การทดลองที่ 7 (M7).....	106
4.103 การทดลองที่ 8 (M8).....	106
4.104 การทดลองที่ 9 (M9).....	107
4.105 การทดลองที่ 10 (M10) .....	107
4.106 การทดลองที่ 11 (M11) .....	108
4.107 การทดลองที่ 12 (M12) .....	108
4.108 การทดลองที่ 13 (M13) .....	109
4.109 แสดงลักษณะภาพรวมของแปลงปลูกแบบบรากแขวนลอย .....	109
4.110 แสดงลักษณะภาพรวมของแปลงปลูกด้วยถุงปลูก .....	109
4.111 ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก.....	110
4.112 ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก (ก.แบบบรากแขวนลอย ข.แบบถุงปลูก).....	110
4.113 เครื่องมือวัดที่ใช้เก็บข้อมูล.....	111
4.114 วัดความสูงต้นเมล่อน.....	111
4.115 วัดขนาดความโตของใบเมล่อน .....	111
4.116 ลักษณะการวัดความโตผลเมล่อน .....	112
4.117 ชั่งน้ำหนักผลหลังเก็บเกี่ยว .....	112
4.118 ลักษณะผลที่ผิดปกติจากการโดยทำลายจากศัตรูพืช.....	112
4.119 ลักษณะผลและเนื้อเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบบรากแขวนลอย .....	112

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.120 มอเตอร์ควบคุมการปลูกแบบถุง.....	114
4.121 มอเตอร์ควบคุมการปลูกแบบระบบรากแขวนลอย.....	114
4.121 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกหนึ่งรอบ.....	118
4.123 ลักษณะการให้น้ำที่เมล่อนแบบถุงปลูก.....	118
4.124 ลักษณะการให้น้ำและปุ๋ยรูปแบบการปลูกระบบรากแขวนลอย.....	119
4.125 ผลการทดสอบความปกติของน้ำหนักผลเมล่อนจากปลูกแบบถุงปลูก.....	121
4.126 การกระจายตัวของน้ำหนักผลเมล่อนปลูกแบบถุงปลูก.....	122
4.127 รายงานโดยรวมค่าน้ำหนักผลเมล่อนในรูปแบบ Boxplot.....	122
4.128 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลเมล่อนที่ปลูกแบบรากแขวนลอย.....	124
4.129 การกระจายตัวของข้อมูลค่าน้ำหนักผลเมล่อน.....	125
4.130 ผลการทดสอบความปกติของค่าความหวานผลเมล่อนจากปลูกแบบถุงปลูก.....	127
4.131 ค่าความหวานผลเมล่อนเฉลี่ยแต่ละรูปแบบการทดลอง.....	127
4.132 การกระจายตัวของค่าความหวานผลเมล่อนจากปลูกแบบถุงปลูก.....	127
4.133 ค่าเฉลี่ยความหวานผลผลเมล่อนแต่ละแบบการทดลอง.....	129
4.134 ต้นเมล่อนที่ถูกทำลายจากศัตรูพืช.....	130
4.135 ลักษณะใบต้นเมล่อนถูกราน้ำค้างเข้าทำลาย.....	130
4.136 บริเวณรอบถุงปลูกเกิดตระไคร้ขึ้น.....	131

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรประกอบอาชีพเกษตรกรรมมากเป็นอันดับต้นๆ ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่เอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูกทั่วทุกภูมิภาค แต่การผลิตนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศอย่างเดียว โดยเฉพาะปัจจุบันเกิดความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ ฤดูกาล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศส่งผลกระทบต่อ การเพาะปลูก และขั้นตอนกระบวนการผลิตของแต่ละพื้นที่ส่งผลต่อการดำเนินการทางภาคเกษตรกรรมได้ผลผลิตไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น มีประสิทธิภาพการผลิตต่ำ มีต้นทุนการผลิตที่สูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หรือผลผลิตทางการเกษตรมีคุณภาพที่ไม่สูงมากนัก ราคาค่อนข้างต่ำ ทำให้รายได้ของเกษตรกรต่อคนต่อปีค่อนข้างน้อย เหตุผลหลักของปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากเกษตรกรขาดความรู้ในด้านมาตรฐานการผลิต การรักษาคุณภาพ หรือการนำนวัตกรรมและเทคโนโลยีมาช่วยในกระบวนการผลิตให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพในกระบวนการที่สูงขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเพาะปลูกจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากและถือเป็นต้นน้ำของกระบวนการผลิตในโซ่อุปทาน (Supply chain) หากมีการพัฒนากรรมวิธีกระบวนการเพาะปลูกก็จะช่วยให้เกษตรกรมีโอกาสสร้างกำไรในการดำเนินกิจกรรมทางการเกษตร เกิดการพึ่งพิงตนเองให้สามารถดำเนินกิจกรรมอยู่ต่อไปได้อย่างมั่นคง ในส่วนความต้องการบริโภคอาหารก็เป็นความต้องการที่มีเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่มีและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของมนุษยชาติที่มีความต้องการด้านความมั่นคงทางอาหาร เกิดความเพียงพอที่จะนำมาบริโภคของบุคคลถือเป็นหนึ่งในความท้าทายที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในปัจจุบัน การสร้างระบบการเกษตรเพื่อสร้างระบบอาหารที่ยั่งยืน เพื่อการจัดหาอาหารที่สะอาดและสดใหม่สำหรับประชากรโลกถือเป็นความกังวลที่เป็นปัญหาหลักในอนาคตโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการเติบโตของประชากรโลก [1]

โดยทั่วไปการทำเกษตรกรรมมีปริมาณการใช้น้ำสูงสุดเมื่อเทียบกับอาชีพอื่นๆ [2] ประกอบด้วยปัจจุบันสภาพอากาศค่อนข้างมีความแปรปรวนและยากที่จะควบคุม ส่งผลกระทบต่อ การดำเนินชีวิตของมนุษย์ สัตว์ สิ่งแวดล้อม รวมถึงพืช แต่ข้อจำกัดของพืชคือไม่สามารถเลือก สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้อย่างมนุษย์หรือสัตว์ ดังนั้นเพื่อควบคุมปัจจัยด้าน สภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกพืชให้มีความเหมาะสม การค้นหาระบบวิธีการเพาะปลูกเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพในกระบวนการเป็นสิ่งจำเป็นและช่วยสร้างสภาวะที่เหมาะสม ลดต้นทุนในกระบวนการ นำมาซึ่งผลผลิตที่สูงขึ้น ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคหลายอย่าง เช่น ไฮโดรโปนิคส์ เทคนิคฟิล์มสารอาหาร (Nutrient Film Technique: NFT) ระบบอควาโพนิก (Aquaponic

systems) ฯลฯ [3] [4] เทคนิคเหล่านี้ส่วนใหญ่ต้องเผชิญกับข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการให้อากาศต่อรากไม่เพียงพอเนื่องจากความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำต่ำ [5] ด้วยเหตุนี้ระบบรากแขวนหรือแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) จึงได้รับการพัฒนาเพื่อให้รากได้รับออกซิเจนสูงสุดเป็นอีกหนึ่งระบบที่ปราศจากการใช้ดินในการเพาะปลูก [6] การสัมผัสรากอย่างต่อเนื่องกับออกซิเจนจะกระตุ้นกระบวนการเผาผลาญ ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของรากและการดูดซึมสารอาหาร [7] การปลูกพืชด้วยระบบรากแขวนหรือแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) เป็นวิธีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถตอบสนองต่อปัจจัยในการเพาะปลูกมีการใช้ทรัพยากรน้อยลง สามารถควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ให้ผลผลิตสูงขึ้น และมีประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงขึ้นด้วย [8]

การปลูกพืชด้วยระบบรากแขวนหรือแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) มีลักษณะการปลูกที่รากพืชไม่ได้แช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหาร แต่จะปล่อยให้รากอยู่ในอากาศ ไม่สัมผัสกับสิ่งใด โดยจับยึดส่วนโคนของลำต้นพืชให้ตั้งตรงและรากลอยอยู่ในอากาศ มีการสเปรย์สารละลายธาตุอาหารให้กับรากพืชหล่อเลี้ยงต้นพืชให้เจริญเติบโต ระบบนี้ต้องการน้ำน้อย ใช้พื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการดำเนินการ และรากปลอดโรคที่มีชีวมวลสูง ลดการใช้สารละลายธาตุอาหาร พลังงาน และพื้นที่เพาะปลูก [9] [10] ประหยัดสารละลายธาตุอาหาร 5-10 เท่าใน 1 รอบการปลูก และได้ผลผลิตมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับ การปลูกแบบดั้งเดิมที่ใช้ดิน [11] แต่สิ่งที่จะต้องควบคุมมากที่สุดก็คือ อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งต้องพยายามรักษาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับพืช (20–25 °C) หากอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารสูงจะส่งผลต่อกิจกรรมของรากและผลผลิตลดลง [12] นอกจากนี้วิธีการเพาะปลูกด้วยระบบรากแขวนสามารถนำน้ำสารละลายธาตุอาหารหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ช่วยประหยัดการใช้น้ำ และน้ำได้อีกด้วย [13] [14] [15] ผลการวิจัยที่มีเผยแพร่อยู่พบว่าระบบการเพาะปลูกแบบไม่ใช้อากาศสามารถประหยัดน้ำได้ 98% สารอาหาร 60% และยาฆ่าแมลงและสารกำจัดวัชพืช 100% [16] นอกจากนี้ประโยชน์มากมายที่ได้กล่าวมาแล้วยังรวมถึงการปลูกก็ไม่ต้องไม่จำเป็นต้องใช้ดินเกิดการประหยัดทรัพยากร และยังสามารถสนับสนุนกระบวนการผลิตให้ปลูกได้ตลอดทั้งปีเพราะสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมในระบบให้เป็นไปตามความต้องการได้ [17] ผลการทบทวนวรรณกรรมที่ได้จากการเปรียบเทียบวิธีการเพาะปลูกด้วยระบบรากแขวนกับพืชชนิดต่างๆ พบว่าวิธีการเพาะปลูกด้วยระบบรากแขวนสามารถให้ผลที่ดีกว่าตามความคาดหวังจากการปลูกมะเขือเทศ แตงกวา ผักกาดหอม และสตรอเบอร์รี่ [18] [19] [20] ผักใบ [21] [22], มันฝรั่ง [13] [14] [13,14], สมุนไพรและยา พืช [23] [24] ไม้ประดับ [23] [25] [26] ต้นไม้และไม้พุ่ม [27] [28] [29] แต่ในกระบวนการเพาะปลูกด้วยระบบรากแขวนจะต้องมีการควบคุมการเปิดจ่ายสเปรย์สารละลายธาตุอาหารให้กับรากพืชต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามาควบคุม เป็นต้นทุนและพลังงานที่เกิดจากการผลิตที่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อมหรือระบบนิเวศน์ มีงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมทางการเกษตรมีส่วนทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกถึง 24% [30] เป็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อมวลมนุษย์อย่างมากในปัจจุบัน เหตุผล

ดังกล่าวเป็นความสำคัญในการนำพลังงานสะอาดหมุนเวียนมาใช้เพื่อแก้ปัญหาจะช่วยลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับโลก ควบคู่กับการลดพื้นที่เพาะปลูกและจำนวนปริมาณสารอาหารต่างๆ ที่ใช้ในการเพาะปลูก ผลที่จะเกิดจากงานวิจัยจะได้มาซึ่งแนวทางการรวมวิธีการเพาะปลูกจากระบบรากแขวนนำมาซึ่งต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลงส่งผลให้สามารถดำเนินการแข่งขันต่อไปได้ในอนาคต จากสถิติ [31] ในภูมิภาคเอเชียมีประเทศญี่ปุ่นเป็นผู้นำในการเกษตรแนวตั้ง 41% รองลงมาคือประเทศจีน 25% เกาหลีใต้ 7% และที่เหลือคือ สิงคโปร์ ฮองกง เวียดนาม และมองโกเลีย โดยทั้งทางญี่ปุ่น จีน และเกาหลีใต้ มีเงินอุดหนุนหรืองบประมาณจากรัฐบาลสนับสนุนในการทำวิจัยต่างๆของโครงการที่เกี่ยวข้องกับเกษตรแนวตั้ง ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีสิงคโปร์เป็นผู้นำอุตสาหกรรมเกษตรแนวตั้ง เนื่องจากสิงคโปร์ขาดแคลนที่ดิน และ 90% ของอาหารเป็นของนำเข้า [32] การทำฟาร์มแนวตั้งเป็นแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับภาคการเกษตรเป็นการปลูกพืชที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆตามแนวตั้ง ในทางกลับกันจะทำให้การใช้ดินก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เกษตรไร้ดินมีเทคนิคต่างๆ เช่น ไฮโดรโปนิกส์ แอโรโปนิกส์ และอะควาโปนิกส์ นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยระบบการทำฟาร์มแนวตั้งนอกจากการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสมกับพืชแล้วยังช่วยปรับปรุงผลผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นระบบนี้จึงสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ แสง สารอาหาร และระดับ pH จึงสามารถทำการเพาะปลูกได้ทั้งปีโดยที่ไม่ขึ้นกับสภาพอากาศ

เมล่อนเป็นพืชชนิดหนึ่งที่คุณค่าต่อผู้บริโภค และสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เป็นที่ต้องการของตลาด โดยเฉพาะในพื้นที่เพาะปลูก อ.ทุ่งหว้า จังหวัดสตูล เมล่อนที่ผลิตได้จะให้ผลผลิตที่ดีมีคุณภาพและขายได้ราคาที่สูง แต่ในกระบวนการเพาะปลูกแบบที่กลุ่มเกษตรกรใช้ อยู่ในรูปแบบการปลูกด้วยดินมีต้นทุนในการผลิตสูงและได้ผลผลิตไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นหากมีการนำระบบการเพาะปลูกด้วยระบบรากแขวนมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกมีการควบคุมกระบวนการด้วยระบบอัจฉริยะสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการปลูกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมควบคุมกระบวนการผลิต ซึ่งจะได้แนวทางที่เหมาะสมเป็นปัจจัยนำไปสู่การสร้างผลผลิตที่สม่ำเสมอตลอดถึงสามารถนำพลังงานทางเลือกมาใช้ก็จะส่งผลต่อต้นทุนการผลิต ได้เมล่อนที่มีคุณภาพ และได้ผลผลิตที่ดี มีต้นทุนการผลิตลดลง สร้างกำไรให้กับกลุ่มเกษตรกรได้มากขึ้น ตลอดถึงเป็นต้นแบบนวัตกรรมการผลิตรูปแบบใหม่ไปสู่การขับเคลื่อนและสร้างความยั่งยืนในการดำเนินกิจกรรมของกลุ่มเกษตรกร เป็นต้นแบบในการเรียนรู้ให้แก่ภาคเกษตรกรรมเกิดความมั่นคงและยั่งยืนต่อไปได้ในอนาคต

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการปลูกเมล่อน
2. ประยุกต์ใช้ใช้พลังงานสะอาดในการปลูกเมล่อนพร้อมวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

### ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทดลองการปลูกเมล่อนด้วยวิธีการรากแขวนด้วยระบบการควบคุมอัตโนมัติ
2. ศึกษาทดลองการปลูกเมล่อนด้วยวิธีการรากแขวนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยหลักการ

### ออกแบบทางวิศวกรรม

3. มุ่งศึกษาทดลองการใช้พลังงานสะอาดในการปลูกเมล่อนด้วยวิธีการรากแขวน
4. วิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการปลูกเมล่อนด้วยวิธีการรากแขวนกับวิธีดั้งเดิม
5. ทำการทดลองงานวิจัย ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ต.ทุ่งหว้า อ. ทุ่งหว้า จ.สตูล

### สมมติฐานการวิจัย

การปลูกเมล่อนด้วยวิธีการรากแขวนสามารถปลูกเมล่อนได้ผลผลิตไม่แตกต่างจากการปลูกด้วยวิธีดั้งเดิม

### คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

เมล่อน วิธีการปลูกแบบรากแขวน ระบบการควบคุมอัตโนมัติ สภาวะที่เหมาะสม

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบผลของความสามารถในการการประยุกต์ใช้ระบบรากแขวนลอยในการปลูกเมล่อน
2. ได้ระบบการเพาะปลูกที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนในกระบวนการผลิตที่ต่ำกว่าเดิม
3. ลดการใช้พลังงานที่ส่งผลต่อระบบนิเวศนำไปสู่ผลภาวะในระบบธรรมชาติ
4. ได้วิธีการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวน
5. ได้ต้นแบบการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวน

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะเกี่ยวข้องกับ การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะ โดยเน้นการผสมผสานเทคโนโลยี IoT และการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน แพลตฟอร์ม NodeMCU, DHT22, จอ LCD รวมถึงฐานข้อมูล MySQL เพื่อให้การตรวจสอบและ ควบคุมสภาพแวดล้อมการเพาะปลูกเป็นไปอย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังครอบคลุม การประยุกต์ใช้ Arduino และภาษา C++ ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์และการวิเคราะห์ข้อมูลทาง สถิติ เพื่อรองรับการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม งานวิจัยในบทนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการปลูก เมล่อนในระบบรากแขวน รวมทั้งการใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับ ระบบอัตโนมัติและการประหยัดทรัพยากร ทั้งหมดนี้เป็นพื้นฐานสำคัญที่สนับสนุนการพัฒนาเกษตร สมัยใหม่ในยุค Digital Transformation ที่มุ่งเน้นความยั่งยืนและลดต้นทุนการดำเนินงานของ งานวิจัยในครั้งนี้ มีรายละเอียดดังนี้

#### Node MCU (โนนด เอ็มซียู) [33]

Node MCU คือ บอร์ดคล้าย Arduino ที่สามารถเชื่อมต่อกับ Wi-Fi ได้ สามารถเขียน โปรแกรมด้วย Arduino IDE ได้เช่นเดียวกับ Arduino และบอร์ดมีราคาถูกมาก เหมาะแก่ผู้ที่จะ เริ่มต้นศึกษา หรือทดลองใช้งานเกี่ยวกับ Arduino IoT และอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้แต่การนำไปใช้จริง ในโปรเจกต์ต่าง ๆ ก็ตาม เพราะราคาไม่แพง ภายในบอร์ดของ Node MCU ประกอบไปด้วย ESP8266 (ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถเชื่อมต่อ Wi-Fi ได้) พร้อมอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น พอร์ต micro USB สำหรับจ่ายไฟ อับโพลดลวดโปรแกรม ชิพสำหรับอับโพลดลวดโปรแกรมผ่านสาย USB ชิพแปลงแรงดันไฟฟ้า และขาสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก เป็นต้น

#### DHT22 (เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ) [34]

DHT22 คือ อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ หรือความชื้นในบริเวณที่ใช้งาน ซึ่งเหมาะ สำหรับห้องควบคุมอุณหภูมิความชื้น เป็นเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นที่มีความแม่นยำสูง ในการวัด สามารถวัดได้ในย่านอุณหภูมิ ตั้งแต่ -40 องศาเซลเซียส ถึง +80 องศาเซลเซียส ความ แม่นยำน้อยกว่า +0.5เซลเซียส และวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ในย่าน 0-100% RH ความแม่นยำ +-2- 5% RH สามารถวัดได้ละเอียดในระดับทศนิยม 1 ตำแหน่ง (0.1) ใช้งานได้นานและทนทาน เหมาะ สำหรับนำไปใช้ในงานวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง ทนความร้อนเย็นวัดในย่านติดลบได้ โมดูลมา พร้อม PCB และสายไฟ ต่อ R4.7 K เรียบร้อยต่อสายใช้งานได้ทันที ต่อไฟได้ตั้งแต่ 3.3 v – 6 VDC

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (DAT22) อุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature & Relative Humidity Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านระบบสมองกลฝังตัวได้หลากหลาย เช่น การวัดและควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ระบบบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นในห้อง

ส่วนประกอบที่สำคัญของมอดูล DHT22

- ตัวถังทำจากพลาสติก
- ภายในมีลวดโลหะ เช่น ทองแดง ทังสเตน นิกเกิล แพลทินัม เพื่อจับความร้อน

คุณสมบัติของมอดูล DHT22

- 3.3-6V Input
- 1-1.5mA measuring current
- 40-50 uA standby current
- Humidity from 0-100% RH
- -40 - 80 degrees C temperature range
- +-2% RH accuracy
- +-0.5 degrees C

### หลักการใช้งานของมอดูล DHT [22]

ในการอ่านข้อมูลจากไอซีนั้น จะใช้ขาสัญญาณเพียงเส้นเดียวคือ DATA (หรือ SDA) แบบสองทิศทาง และในสถานะปกติสัญญาณ DATA จะเป็น HIGH ในการอ่านข้อมูลแต่ละครั้งไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องกำหนดให้ขา DATA เป็นเอาต์พุต และสร้างบิต START ซึ่งจะต้องเป็น LOW อย่างน้อย 800 use จากนั้นจึงให้เป็น HIGH อย่างน้อย 20 use หลังจากนั้นเป็นการรอการตอบกลับ (response) และจากไอซี ขา DATA จะถูกต้องเปลี่ยนเป็นอินพุต

เริ่มต้นของการตอบกลับไอซี จะดึงสัญญาณลงเป็น LOW และปล่อยให้เป็น HIGH ช่วงละ 80 use โดยประมาณ (เรียกว่า Response Bit) จากนั้นจึงจะเป็นการส่งข้อมูลที่ละบิต รวม 40 บิต (ช่วง LOW ตามด้วยช่วง HIGH) ช่วง LOW ของแต่ละบิตจะกว้างเท่ากันแต่จะต่างกันในช่วง HIGH สำหรับบิตที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 (ใช้ความกว้างช่วง HIGH ในการจำแนกค่าของบิต)

### หน้าจอ LED (Liquid Crystal Display) [35]

จอที่ทำมาจากผลึกคริสตัลเหลว หลักการคือด้านหลังจอจะมีไฟส่องสว่าง หรือที่เรียกว่า Backlight อยู่ เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้นที่ผลึกก็จะทำให้ผลึกโปร่งแสง ทำให้แสงที่มาจากไฟ Backlight แสดงขึ้นมาบนหน้าจอ ส่วนอื่นที่โดนผลึกปิดกั้นไว้จะไม่สว่าง ผลึกมีสีที่แตกต่างกัน

ตามสีของผลึกคริสตัล เช่นสีเขียว หรือ สีฟ้า ฯลฯ ทำให้เมื่อมองไปที่จอก็จะพบกับตัวหนังสือแล้วพบกับพื้นหลังสีต่าง ๆ

การแสดงผลด้วยจอภาพผลึกเหลว (LCD)

LCD (Liquid Crystal Display) เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำไปใช้เป็นตัวแสดงผลข้อความหรือตัวเลข มากกว่านำมาใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงสว่าง เนื่องจากมันมีความเข้มข้นต่ำมาก และกินกำลังไฟฟ้า ต่ำมากด้วยเช่นกัน จึงนิยมนำ LCD มาใช้ในเครื่องคิดเลขและนาฬิกาดิจิทัล

ลักษณะโครงสร้างของ LCD จะประกอบด้วย เพลตแก้ว 2 แผ่น ที่วางขนานกันถูกคั่นกลางด้วยช่องว่างอากาศ ซึ่งบรรจุผลึกเหลวเอาไว้เมื่อจ่ายแรงดันเข้าเพลต ผลึกเหลวก็จะมีการจัดเรียงโมเลกุลแสดงผลออกมา

การแสดงผลของ LCD มีด้วยกัน 2 โหมด คือ ทรานสมิซิฟ(transmissive) และรีเฟล็กซีฟ(reflective) การทำงานในโหมดทรานสมิซิฟโดยจะต้องใช้แสงจากหลอดไฟส่องผ่านมาทางด้านหลัง จึงจะสามารถมองเห็นข้อมูลบนจอ LCD ส่วนแบบโหมดรีเฟล็กซีฟจะทำการสะท้อนแสงจากภายนอกมากกระทบกระจกที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังจอ LCD เพื่อให้ เกิดแสงส่องทางด้านหลังของจอ จึงมองเห็นข้อมูลบนจอ LCD

ปกติ LCD จะกินกระแสไฟฟ้าต่ำมาก ประมาณ 1 ไมโครแอมป์เท่านั้น จึงสามารถ ใช้แบตเตอรี่ธรรมดาเป็นแหล่งจ่ายไฟได้

การขับ LCD ให้แสดงผลนั้น มักใช้ไอซีซีเอ็มอสเป็นตัวขับ ถึงแม้ว่าตัว LCD จะใช้ไฟตรงเป็นไฟเลี้ยงก็ตาม แต่การขับ LCD จะใช้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมมากกระตุ้นที่แผ่นตัวนำใส และที่แผ่นพื้น(backplane) ของ LCD

## ระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL

ความหมายของระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL เป็นระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System) แบบโอเพ่นซอร์ซ (Open Source) พัฒนาจากแนวคิด Relational Algebra และ Relation Calculus ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน รองรับภาษา SQL สามารถเข้าถึงข้อมูลได้หลายประเภท การเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขข้อมูลต่าง ๆ เช่น การจัดการข้อมูลสินค้าในร้านสะดวกซื้อ การบันทึกรายละเอียดการสั่งซื้อต่าง ๆ การสต็อกสินค้า สามารถเรียกดูการสั่งซื้อสินค้าของลูกค้าได้ และรวมถึงการแก้ไขจำนวนสินค้าที่ขายได้ MySQL จะทำงานร่วมกับเครื่อง Web Server เพื่อบริการภาษาสคริปต์ที่ทำงานบนเซิร์ฟเวอร์ไซด์สคริป เช่น ภาษา php ภาษา JSP เป็นต้น และสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ เช่น ภาษา Visual Basic ภาษา JAVA ภาษา C# เป็นต้น

การทำงานของ MySQL มีตัวกลางเพื่อที่จะเข้าไปจัดการหรือเข้าถึงฐานข้อมูลต่าง ๆ เพื่อสร้างโครงสร้างของรีเลชั่น สทูนคิวรีข้อมูล (Query) ในรูปแบบที่ง่ายและแบบที่ซับซ้อน รองรับการทำงานของแอปพลิเคชันต่าง ๆ ทำให้เกิดความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนมาก ๆ ทำให้การทำงานมีความรวดเร็วและมีความยืดหยุ่น

การประยุกต์การใช้งานคำสั่ง SQL แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบโต้ตอบและแบบฝังตัวในโปรแกรม ดังนี้

1 แบบโต้ตอบ (Interactive SQL) เป็นการที่ผู้ใช้เขียนคำสั่ง SQL เพื่อโต้ตอบกันบนหน้าจอ โปรแกรมจะประมวลผลและโต้ตอบกับผู้ใช้ได้ทันที ในการใช้งานแบบโต้ตอบนั้นผู้ใช้งานจะต้องมีความรู้พื้นฐานในการใช้ชุดคำสั่งต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการใช้โปรแกรม อย่างไรก็ตามผู้บริหารต้องจำกัดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้เพื่อความปลอดภัย เช่น ให้สิทธิ์เพียงเรียกดูข้อมูลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ปรับปรุงหรือแก้ไข

2 แบบฝังตัวในโปรแกรม (Embedded SQL) เป็นการนำคำสั่ง SQL ไปใช้งานร่วมกับภาษาระดับสูง เช่น ภาษา Pascal หรือ ภาษา C เป็นต้น ต้องอาศัยโปรแกรมเมอร์ในการเขียนชุดคำสั่ง SQL เพื่อฝังตัวในโปรแกรม เพื่อลดปัญหาที่ SQL ทำไม่ได้ เช่น การสร้างเงื่อนไขที่มีความซับซ้อน การสร้างคำสั่งลูป เพราะฉะนั้นการใช้เขียนคำสั่งเพื่อฝังตัวในโปรแกรม จึงมีความสำคัญในการเพื่อประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรม โดยการประยุกต์ใช้งานชุดคำสั่ง SQL แบบฝังตัวในโปรแกรม สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ Embedded SQL Statements และ Application Programming Interface

ประเภทของชุดคำสั่ง SQL แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1 ภาษานิยามข้อมูล (Data Definition Language: DDL) เป็นคำสั่งที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูล การกำหนดแอตทริบิวต์และคอลัมน์ การเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขข้อมูลในแอตทริบิวต์ในรีเลชั่น รวมถึงการสร้าง แก้ไข และลบตารางต่าง ๆ

2 ภาษาจัดการข้อมูล (Data Manipulation Language: DML) DML เป็นคำสั่งสำคัญของ SQL มีหน้าที่อัปเดต เพิ่ม ปรับปรุง และเรียกดูข้อมูลในฐานข้อมูล

3 ภาษาควบคุมข้อมูล (Data Control Language) เป็นคำสั่งสำหรับผู้บริหารฐานข้อมูล ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก เช่น คำสั่งการอนุญาต หรือคำสั่งยกเลิกสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ ประโยชน์เพื่อรักษาความปลอดภัยของฐานข้อมูล

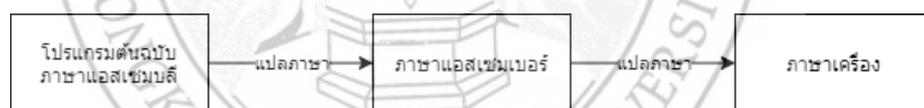
4 ภาษาที่ใช้ในการเขียนโค้ด [36-39]

C++ คือ ภาษา C programming language รุ่นใหม่ เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมโดยได้นำความสามารถของ ภาษา C มาพัฒนา ให้เป็นโปรแกรมภาษาที่มีความเป็น Object Oriented Programming (โปรแกรมเชิงวัตถุ) และนี่เองคือที่มาของภาษา C++ จากการพัฒนานี้ทำให้ทุกสิ่ง

ภาษา C ทำได้ ภาษา C++ ก็จะสามารถทำได้ แต่สิ่งที่ภาษา C++ ทำได้ ภาษา C อาจจะทำไม่ได้ C++ เป็นภาษาคอมไพเลอร์เพื่อวัตถุประสงค์ทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมได้ทั้งแบบออบเจ็ค และการเขียนแบบปกติทั่วไป และยังมีเครื่องมืออำนวยความสะดวกในการจัดการและเข้าถึงระดับหน่วยความจำนอกจากนี้มันยังถูกนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมแบบต่าง ๆ มากมาย เช่น โปรแกรมคอมไพเลอร์ ระบบฝังตัว (Embedded) เว็บเซิร์ฟเวอร์ การพัฒนาเกม และแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพอย่างสูง ภาษา C++ เป็นภาษาที่ถูกออกแบบมาในการเขียนโปรแกรมระบบ ซึ่งมีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการออกแบบโปรแกรมสูง C++ เป็นภาษาที่ต้องคอมไพล์ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถพัฒนาได้ในหลายๆ แพลตฟอร์ม ซึ่งได้รับการสนับสนุนโดยองค์กรต่าง ๆ ที่ประกอบไปด้วย Free Software Foundation (FSF's GCC) LLVM Microsoft Intel และ IBM

ในการเขียนโปรแกรมคอมไพเลอร์ไม่ว่าจะเขียนด้วยภาษาระดับสูงหรือภาษาระดับต่ำ จะต้องแปลงภาษาเหล่านั้นให้เป็นรหัสภาษาเครื่องที่คอมไพเลอร์เข้าใจเสียก่อน คอมไพเลอร์จึงจะทำงานได้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าภาษาคอมไพเลอร์เป็นการนำชุดคำสั่งแต่ละคำสั่งมาต่อกันให้คอมไพเลอร์ทำงาน การเขียนชุดคำสั่งนี้ไม่ว่าจะเขียนด้วยภาษาอะไรจะเรียกโปรแกรมต้นฉบับ (Source Program) หรือ (Sources Code) จากนั้นเราจะต้องแปลงให้เป็นภาษาเครื่องที่คอมไพเลอร์ทำได้เรียกว่า Executable Program

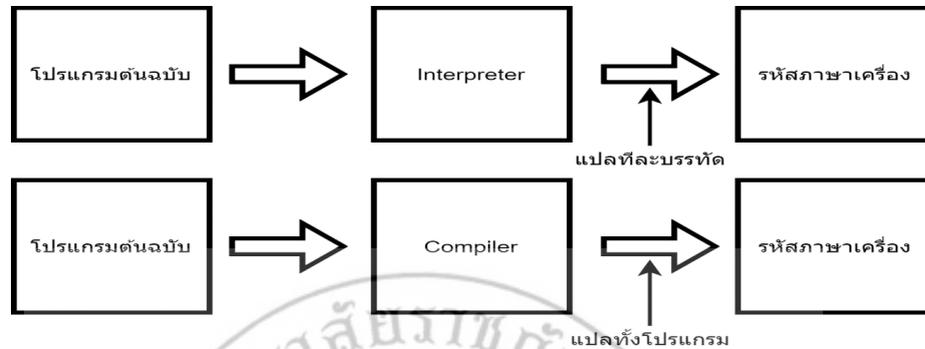
ในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี จะใช้ตัวแปลภาษาให้เป็นภาษาเครื่องที่เรียกว่า แอสเซมเบอร์ (Assembler) ขั้นตอนการแปลสามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการแปลภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่อง



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการแปลภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่อง

สำหรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาระดับสูงจะมีวิธีในการแปลงสองประเภทคือ การแปลคำสั่งทีละคำสั่งให้เครื่องทำงานทีละคำสั่ง จากนั้นจึงแปลคำสั่งบรรทัดต่อไปเช่นการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเบสิกตัวที่แปลภาษาประเภทนี้เรียกว่า อินเทอร์พรีเตอร์ (Interpreter) การทำงานของตัวอินเทอร์พรีเตอร์นี้จะแปลความหมายของคำสั่งทีละคำสั่ง ถ้าไม่พบข้อผิดพลาดเครื่องจะทำคำสั่งที่แปลได้ แต่ถ้าพบข้อผิดพลาดจะหยุดการทำงานและแจ้งข้อผิดพลาดออกมา ส่วนการแปลคำสั่งอีกแบบหนึ่งเรียกว่า คอมไพเลอร์ (Compiler) โดยมันจะมองโปรแกรมต้นฉบับทั้งหมด และแปลให้เป็นรหัสภาษาเครื่องถ้าพบข้อผิดพลาดก็จะแจ้งออกมา ทำให้โปรแกรมทำงานได้เร็ว เพราะเครื่องไม่ต้องแปล

อีกเมื่อจะทำคำสั่งถัดไปสำหรับตัวแปรภาษาเบสิกรุ่นใหม่ ๆ จะทำการแปลแบบคอมไพเลอร์ เช่น เทอร์โบเบสิก เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการแปลภาษาโปรแกรม

สำหรับภาษาซีเป็นภาษาโปรแกรมที่โปรแกรมเมอร์นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นภาษาที่มีความเร็วในการทำงานสูงใกล้เคียงกับภาษาเครื่อง มีโครงสร้างที่ชัดเจน เข้าใจได้ง่าย และสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อกับฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี ภาษาซีเกิดขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ เบลล์แลบ (Bell Labs) โดยมีนายเดนนิส ริทชี (Dennis Ritchie) เป็นผู้พัฒนาขึ้น การศึกษาภาษาซียังถือว่าเป็นพื้นฐานในการศึกษาภาษาใหม่ ๆ ได้

## Arduino

เป็นโครงการที่นำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะ คือมีการเขียนไลบรารีของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกัน สามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ โดยตัวโครงการได้ออกบอร์ดทดลองมาหลายรูปแบบ เพื่อใช้งานกับ IDE ของตนเอง สาเหตุหลักที่ทำให้ Arduino เป็นนิยมมากเป็นเพราะซอฟต์แวร์ที่ใช้งานร่วมกันสามารถโหลดได้ฟรี และตัวบอร์ดทดลองยังถูกแจกเปลี่ยน ทำให้ผู้ผลิตจินนำไปผลิตและขายออกตลาดมาในราคาที่ถูกลง โดยบอร์ดที่ถูกที่สุดในตอนนี้คือบอร์ด Arduino ที่มีราคาเพียง 120 – 150 บาทเท่านั้น Arduino นั้นได้ใช้ชิป AVR เป็นหลักใน Arduino แทบทุกรุ่น สาเหตุมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ของตระกูล AVR นั้นมีความทันสมัย ในชิปในบางตัวสามารถเชื่อมต่อผ่าน USB ได้โดยตรง สามารถใช้กับคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ได้เป็นอย่างดี และในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ยังมีส่วนของโปรแกรมพิเศษที่เรียกว่า Bootloader อยู่ในระดับล่างกว่าส่วนโปรแกรมปกติ ซึ่งจะเป็นส่วนโปรแกรมที่จะถูกเรียกขึ้นมาก่อนการเรียกโปรแกรมปกติ ทำให้สามารถเขียนสั่งให้ทำงานใด ๆ ก็ได้ ก่อนการเรียกโปรแกรมปกติ ทำให้ Arduino นั้นอาศัยส่วนโปรแกรมพิเศษนี้ในการทำให้ชิปสามารถโปรแกรมผ่านพอร์ตอนุกรมชนิด UART ได้ จึงทำให้การเขียนโปรแกรมลงไปบนชิปใช้เพียง USB to UART ก็เพียงพอแล้ว แต่การโปรแกรมด้วยการใช้

โปรโตคอล UART ก็มีข้อเสียตรงที่ต้องใช้เวลาในการบูตเข้าโปรแกรมปกติประมาณ 1-2 วินาที ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล Arduino

Arduino เป็นแพลตฟอร์มต้นแบบด้านอิเล็กทรอนิกส์แบบโอเพนซอร์สซึ่งใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ยืดหยุ่นและใช้งานง่ายมีไว้สำหรับศิลปินนักออกแบบงานอดิเรกและทุกคนที่สนใจในการสร้างวัตถุเชิงโต้ตอบหรือสภาพแวดล้อม

แพลตฟอร์ม Arduino ได้ออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานง่ายผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างสถาปัตยกรรมภายในซีพียูโดยรู้เพียงว่าบอร์ด Arduino ที่เลือกมาใช้งานนั้นมีขาที่ใช้งานอะไรบ้างมีคุณสมบัติต่าง ๆ อะไรบ้างก็สามารถใช้งานได้ด้วยประสบการณ์และจำนวนการใช้งานของผู้ใช้งานจำนวนมาก Arduino จึงถูกใช้งานด้านต่าง ๆ มากมายเนื่องจากการเขียนโค้ดโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Arduino มีความง่ายและยืดหยุ่นสามารถใช้งานในระดับสูงได้อีกด้วยเครื่องมือที่ใช้สำหรับเขียนโค้ดควบคุมมีเวอร์ชันที่สามารถรันได้ในทุกระบบปฏิบัติการไม่ว่าจะเป็นแมคอินทอชวินโดวส์หรือแม้กระทั่งลินุกซ์ก็ตามทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงแพลตฟอร์ม Arduino ประกอบไปด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

ฮาร์ดแวร์ (Hardware) เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นชิ้นส่วนหลักประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานหรือที่เรียกกันว่า “บอร์ด Arduino” โดยบอร์ด Arduino ก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมของงานโดยในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของบอร์ดหรือสเปคเช่นจำนวนของขารับส่งสัญญาณแรงดันไฟที่ใช้ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น

การแสดงผลการควบคุมด้วยรีเลย์ รีเลย์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจร โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าและการที่จะทำให้มันทำงานก็ต้องจ่ายไฟให้มันตามที่กำหนด เพราะเมื่อจ่ายไฟให้กับตัวรีเลย์ มันจะทำให้หน้าสัมผัสติดกัน กลายเป็นวงจรปิด และตรงข้ามทันทีที่ไม่ได้จ่ายไฟให้มัน มันก็จะกลายเป็นวงจรเปิด ไฟที่ใช้ป้อนให้กับตัวรีเลย์ก็จะเป็นไฟที่มาจากเพาเวอร์ของเครื่อง ดังนั้นทันทีที่เปิดเครื่องก็จะทำให้รีเลย์ทำงาน

#### โครงสร้างส่วนประกอบของรีเลย์

การทำงานของรีเลย์ คือ เมื่อมีแรงดันตกคร่อมขดลวดจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวด ซึ่งจะทำให้หน้าสัมผัสเคลื่อนที่ (moving contactor) เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดูดหน้าสัมผัส NO (ปกติเปิดวงจร : normally open) ให้ต่อวงจรและเมื่อปลดแรงดันออก สนามแม่เหล็กก็จะหมดลงหน้าสัมผัสเคลื่อนที่ก็จะติดกลับมายังหน้าสัมผัส NC (ปกติ : normally close) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของรีเลย์มีหลายแบบ

รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการทำงานต่ำดังนั้นในรีเลย์ชนิดแรงดันต่ำจะใช้เวลาในการทำงานราว 15-30 มิลลิวินาที และใช้เวลามากกว่า 100 มิลลิวินาที สำหรับรีเลย์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในวงจรมอเตอร์

ชนิดของรีเลย์

1) รีเลย์กระแส (Current relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยใช้กระแสมีทั้งชนิดกระแสขาด (Under-current) และกระแสเกิน (Over current)

2) รีเลย์แรงดัน (Voltage relay) คือ รีเลย์ ที่ทำงานโดยใช้แรงดันมีทั้งชนิดแรงดันขาด (Under-voltage) และ แรงดันเกิน (Over voltage)

3) รีเลย์ช่วย (Auxiliary relay) คือ รีเลย์ที่เวลาใช้งานจะต้องประกอบเข้ากับรีเลย์ชนิดอื่น จึงจะทำงานได้

4) รีเลย์กำลัง (Power relay) คือ รีเลย์ที่รวมเอาคุณสมบัติของรีเลย์กระแส และรีเลย์แรงดันเข้าด้วยกัน

5) รีเลย์เวลา (Time relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องกับตัว ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ

- รีเลย์กระแสเกินชนิดเวลาผกผันกับกระแส (Inverse time over current relay) คือ รีเลย์ที่มีเวลาทำงานเป็นส่วนกลับกับกระแส

- รีเลย์กระแสเกินชนิดทำงานทันที (Instantaneous over current relay) คือรีเลย์ที่ทำงานทันทีทันทีเมื่อมีกระแสไหลผ่านเกินกว่าที่กำหนดที่ตั้งไว้

- รีเลย์แบบดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Definite time lag relay) คือ รีเลย์ ที่มีเวลาการทำงานไม่ขึ้นอยู่กับความมากน้อยของกระแสหรือค่าไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดงานขึ้น

- รีเลย์แบบอินเวอร์สดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Inverse definite time lag relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยรวมเอาคุณสมบัติของเวลาผกผันกับกระแส (Inverse time) และ แบบดีฟิไนต์ไทม์แล็ก (Definite time lag relay) เข้าด้วยกัน

6) รีเลย์กระแสต่าง (Differential relay) คือ รีเลย์ที่ทำงานโดยอาศัยผลต่างของกระแส

7) รีเลย์มีทิศ (Directional relay) คือรีเลย์ที่ทำงานเมื่อมีกระแสไหลทิศทางมีแบบรีเลย์กำลังมีทิศ (Directional power relay) และรีเลย์กระแสมีทิศ (Directional current relay)

8) รีเลย์ระยะทาง (Directional relay) คือ รีเลย์ระยะทางมีแบบต่าง ๆ ดังนี้

- รีแอคแตนซ์รีเลย์ (Reactance relay)

- อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance relay)

- โมห์รีเลย์ (Mho relay)

- โอห์มรีเลย์ (Ohm relay)

- โพลาริซมโฮรีเลย์ (Polarized mho relay)
- ออฟเซทโฮรีเลย์ (Off set mho relay)

ซอฟต์แวร์ (Software) ภาษาที่ใช้เขียนโค้ดควบคุมบอร์ด Arduino เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมที่มีไวยากรณ์แบบเดียวกับภาษา C / C + + Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโค้ดโปรแกรมการคอมไพล์โปรแกรม (การแปลงไฟล์ภาษาซีให้เป็นภาษาเครื่อง) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ดซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

### Internet of Things (IoT) [40-41]

คำว่า "Internet of Things" ประกาศเกียรติคุณจากผู้ประกอบการ Kevin Ashton หนึ่งในผู้ก่อตั้ง Auto-ID Center ของ MIT แอชตันเป็นส่วนหนึ่งของทีมที่ค้นพบวิธีเชื่อมโยงวัตถุกับอินเทอร์เน็ตผ่านแท็ก RFID เขาใช้วลี "Internet of Things" เป็นครั้งแรกในการนำเสนอในปี 1999 และนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

แอชตันอาจเป็นคนแรกที่ใช้คำว่า Internet of Things แต่แนวคิดของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องที่เชื่อมต่ออยู่เป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น เครื่องสื่อสารกันและกันเนื่องจากเครื่องโทรเลขไฟฟ้าเครื่องแรกถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปลายยุค 1830 เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่ป้อนเข้าสู่ IoT ได้แก่ การส่งสัญญาณเสียงด้วยคลื่นวิทยุเทคโนโลยีไร้สาย (Wi-Fi) และซอฟต์แวร์การควบคุมดูแลและการเก็บข้อมูล (SCADA) จากนั้นในปี พ.ศ. 2525 เครื่องโค้ดตัดแปลงที่ Carnegie Mellon University กลายเป็นอุปกรณ์อัจฉริยะเชื่อมต่อเครื่องแรก การใช้อินเทอร์เน็ตท้องถิ่นของมหาวิทยาลัย หรือ ARPANET ซึ่งเป็นผู้นำทางอินเทอร์เน็ตในปัจจุบันนักเรียนสามารถค้นหาวามีเครื่องตีอะไรบ้าง

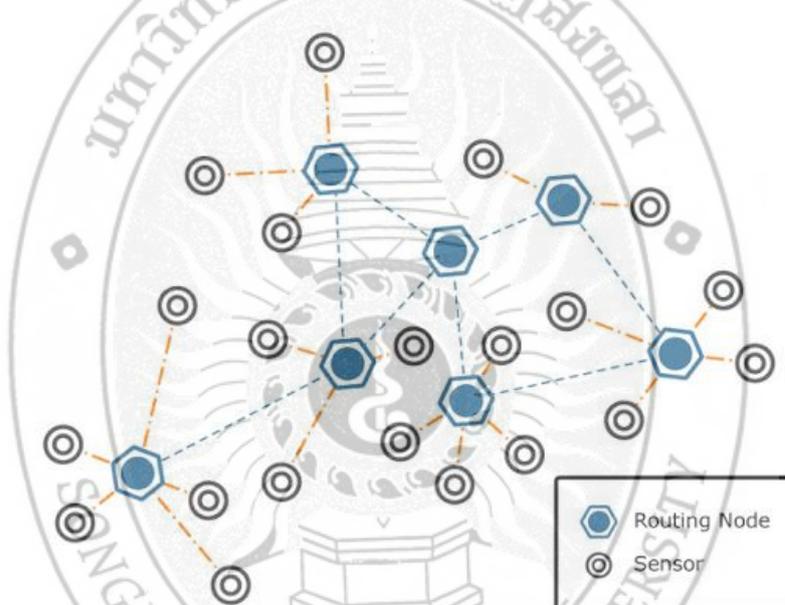
อุปกรณ์เชื่อมต่อ IoT มากกว่ามนุษย์ อุปกรณ์และเครื่องที่เชื่อมต่อ IoT เหล่านี้มีตั้งแต่ อุปกรณ์สวมใส่เช่น smartwatches ไปจนถึงชิปติดตามสินค้าคงคลัง RFID อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ IoT สื่อสารผ่านเครือข่ายหรือแพลตฟอร์มบนคลาวด์ที่เชื่อมต่อกับ Internet of Things ข้อมูลเชิงลึกแบบเรียลไทม์ที่รวบรวมได้จาก IoT นี้รวบรวมข้อมูลเชิงลึกเชิงลึก แปลงดิจิทัล Internet of Things รับประกันการเปลี่ยนแปลงเชิงบวกมากมายเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยการดำเนินธุรกิจผลการดำเนินงานของอุตสาหกรรมและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและด้านมนุษยธรรมทั่วโลก

แนวคิด Internet of Things Kevin นิยามมันไว้ว่าเป็น "internet-like" หรือพูดง่าย ๆ ก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถสื่อสารพูดคุยกันเองได้ ซึ่งศัพท์คำว่า "Things" ก็แทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือบางแห่งเรียก M2M ย่อมาจาก Machine to Machine คือเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมอุปกรณ์ กับเครื่องมือต่าง ๆ เช่นโทรศัพท์มือถือรถยนต์ตู้เย็นโทรทัศน์และอื่น ๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดยการเชื่อมโยงช่วยให้สื่อสารกันผ่านระบบอินเทอร์เน็ต จากการคาดการณ์ ในปี ค.ศ. 2020 สิ่งต่าง ๆ กว่าแสนล้านชิ้นจะสามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยระบบ IoT ซึ่งจะส่งผลให้ผู้บริโภคทั่วไปจะจะเริ่ม

คุ้นเคยกับเทคโนโลยีที่ทำให้พวกเขาสามารถควบคุมสิ่งของต่าง ๆ ทั้งจากในบ้านและสำนักงานหรือจากที่ไหนก็ได้ทั้งนั้น

A wireless sensor network (WSN)

ตัวแปรสำคัญสำหรับ Internet of Things ที่ใช้ในการสื่อสารนั้นไม่เพียงแต่ Internet network เพียงเท่านั้นแต่ยังมีตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีกนั่นคือ Sensor node ต่าง ๆ จำนวนมากที่ทำให้เกิด wireless sensor network (WSN) ให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อเข้ามาได้ซึ่ง WSNs สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ต่าง ๆ (physical phenomena) ในเครือข่ายได้ด้วย ยกตัวอย่างเช่น แสง อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น เพื่อส่งค่าไปยังอุปกรณ์ในระบบให้ทำงานหรือสั่งงานอื่น ๆ ต่อไป แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 A wireless sensor network (WSN)

ที่มา: internetofthingsagenda (2005)

Access Technology

การพัฒนา Internet of Things นั้นนอกจากจะพัฒนาเทคโนโลยีในฝั่ง Hardware ได้แก่ processors, radios และ sensors ซึ่งจะถูกรวมเข้าด้วยกันเรียกว่า a single chip หรือ system on a chip (SoC) แล้วก็ยังพัฒนา WSN ไปพร้อม ๆ กันด้วย และเมื่อพูดถึงการเชื่อมต่อปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่อสำหรับ Internet of Things หรือ Access

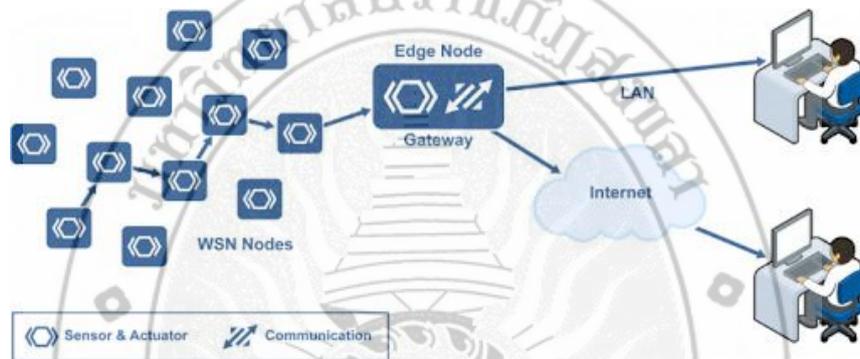
Technology มีอยู่ 3 ตัวได้แก่

- Bluetooth 4.0
- IEEE 802.15.4e

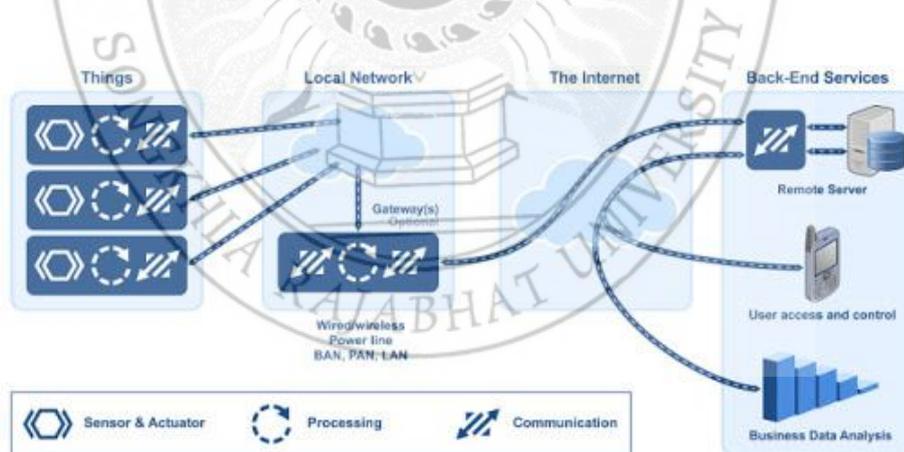
- WLAN IEEE 802.11™ (Wi-Fi) มาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย

### Gateway Sensor Nodes

เมื่อมีโครงข่าย Sensor nodes แล้วก็จำเป็นจะต้องมี Gateway Sensor Nodes เพื่อจะเชื่อมต่อไปยังโลกอินเทอร์เน็ตด้วย โดยตัว Gateway นี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังเครือข่าย Internet ให้อุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่าย Sensor nodes ทั้งหมดส่งข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ตได้ และ Gateway นี้ก็จะอยู่ภายใต้ Local network ซึ่งจะมีการกำหนดกันต่อไปว่า Gateway ภายใต้อุปกรณ์ที่เชื่อมเข้ามาใน Gateway ก็อาจสื่อสารกันได้เฉพาะภายใน Local network เองได้เท่านั้น แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.4-2.5



ภาพที่ 2.4 WSN Nodes  
ที่มา: internetofthingsagenda (2005)



ภาพที่ 2.5 Diagram อธิบายการเชื่อมต่อ Gateway หลายๆตัวเข้ากับ local network  
ที่มา: internetofthingsagenda (2005)

การที่อุปกรณ์ต่าง ๆ สิ่งต่าง ๆ ได้ถูกเชื่อมโยงทุกอย่างอย่างสูโลกอินเทอร์เน็ต ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น การเปิด-ปิด อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า (การสั่งการเปิดไฟฟ้าภายในบ้านด้วยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุม เช่น มือถือ ผ่านทางอินเทอร์เน็ต) การที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลถึงกันได้ด้วยอินเทอร์เน็ต โดยไม่ต้องป้อนข้อมูล การเชื่อมโยงนี้ช่วยจนทำให้สามารถส่งการควบคุมการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ไปจนถึงการเชื่อมโยงการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเข้ากับการใช้งานอื่น ๆ จนเกิดเป็น Smart ต่างๆได้แก่ Smart Device, Smart Grid, Smart Home, Smart Network, Smart Intelligent Transportation ทั้งหลาย ซึ่งแตกต่างจากในอดีตที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเพียงอุปกรณ์สื่อกลางในการส่งและแสดงข้อมูลเท่านั้น

คำอธิบายที่ชัดเจนที่สุดของ Internet of Things คือ สิ่งของทุกอย่างบนโลกใบนี้ที่สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย เพื่อแลกเปลี่ยนและแบ่งปันข้อมูลได้ ซึ่งเป็นไปได้ตั้งแต่เมล็ดยา กล้องบันทึกภาพ นาฬิกา หลอดไฟ รถยนต์ ไปจนถึงเครื่องบิน โดยมีเป้าหมายว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกันโดยมีมนุษย์เกี่ยวข้องน้อยที่สุด และทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างข้อมูลจากโลกดิจิทัลกับโลกทางกายภาพให้ใกล้ชิดกันที่สุด

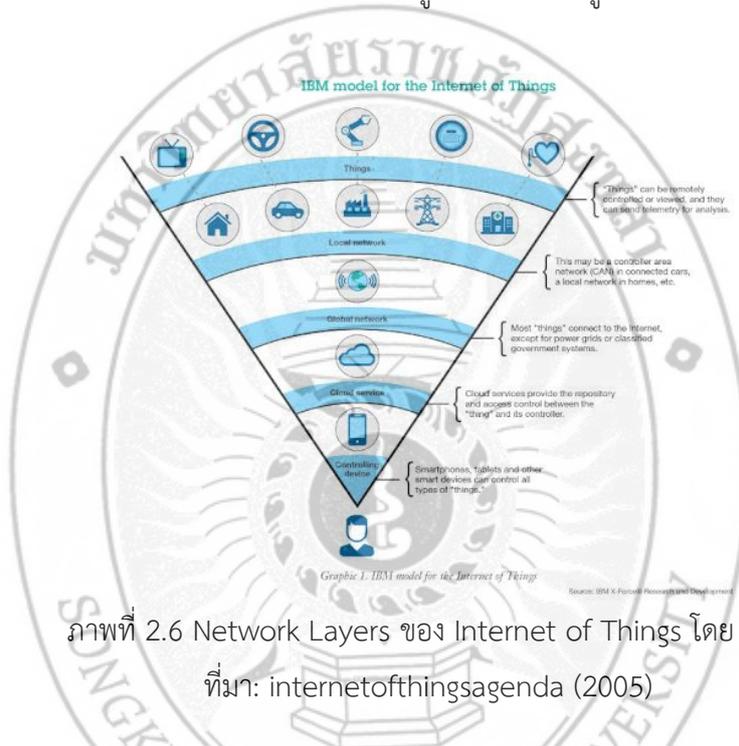
แนวคิดการสร้าง Smart Device เกิดขึ้นในยุค 1970 โดยมาจากแนวคิดที่ชื่อว่า Pervasive Computing ที่นักพัฒนาสมัยนั้นต้องการสร้างคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้งานได้ทุกที่ ทุกเวลา รองรับข้อมูลได้หลาย Format และที่สำคัญคือสามารถส่งต่อหน้าที่ยังคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น ๆ ได้ ตรงข้ามกับ Desktop Computing ที่เน้นการทำงานจบทุกขั้นตอนภายในเครื่อง เพราะข้อจำกัดทางกายภาพและระบบในเวลานั้น ส่วนคำว่า Internet of Things เป็นที่ยอมรับว่าเกิดขึ้นในปี 1999 โดย Kevin Ashton, Co-Founder ของ Auto-ID Labs MIT นำเสนอ Solution เชื่อมโยงสิ่งของด้วยคลื่นวิทยุระบุตัวตน (RFID) แก่บริษัท P&G แต่กลับใช้ชื่อในการนำเสนอว่า “Internet of Things” เพื่ออธิบายคุณสมบัติของเทคโนโลยีที่ทำให้สิ่งของแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้เอง Internet of Things ทำงานอย่างไร จึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในยุค Digital Transformation การทำงานของ IoT นั้นต้องเรียกว่าเป็น Ecosystem เลยทีเดียว เพราะหากขาดส่วนใดส่วนหนึ่งไปก็จะเกิดความบกพร่องได้ ซึ่งองค์ประกอบของ IoT ปัจจุบัน ประกอบด้วย Smart Device อุปกรณ์ที่มีหน้าที่เฉพาะเป็นจุดเริ่มต้นที่ตอบโจทย์การใช้ IoT โดยจำเป็นต้องมีส่วนประกอบอย่าง Microprocessor และ Communication Device อยู่ภายในเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูล ข้อมูลที่ Smart Device ส่งมอบไปยังระบบ ไม่เพียงแต่ข้อมูลตามหน้าที่เท่านั้น แต่ยังรวมถึงสภาพของอุปกรณ์ด้วย ผู้ใช้จึงไม่ต้องเดินทางมาตรวจสอบอุปกรณ์ด้วยตัวเองเป็นประจำ

แบ่งกลุ่ม Internet of Things ปัจจุบันมีการแบ่งกลุ่ม Internet of Things ออกตามการใช้งานเป็น 2 กลุ่มได้แก่

- Industrial IoT คือแบ่งจาก local network ที่มีหลายเทคโนโลยีที่แตกต่างกันในโครงข่าย Sensor nodes โดยตัวอุปกรณ์ IoT Device ในกลุ่มนี้ จะเชื่อมต่อแบบ IP network เพื่อเข้าสู่อินเทอร์เน็ต

- Commercial IoT คือแบ่งจาก local communication ที่เป็น Bluetooth หรือ Ethernet (wired or wireless) โดยตัวอุปกรณ์ IoT Device ในกลุ่มนี้จะสื่อสารภายในกลุ่ม Sensor nodes เดียวกันเท่านั้นหรือเป็นแบบ local devices เพียงอย่างเดียวอาจไม่ได้เชื่อมสู่อินเทอร์เน็ต

- Cloud Computing หรือ Wireless Network สื่อกลางรับส่งข้อมูลจาก Smart Device ไปยังผู้ใช้ ซึ่งมีทั้งการส่งข้อมูลผ่านระบบ Wireless ไปยังผู้ใช้และการส่งผ่าน Cloud Computer ซึ่งการส่งข้อมูลไปยัง Cloud ช่วยรองรับการใช้งาน Smart Device จำนวนมากกว่า ระยะทางไกลกว่า รวมถึงอาจมีการติดตั้งระบบแปลงการแสดงผลข้อมูลให้เหมาะกับผู้ใช้ในส่วนนี้ได้แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Network Layers ของ Internet of Things โดย IBM  
ที่มา: internetofthingsagenda (2005)

IPv6 คือส่วนสำคัญของ Internet of Things

ตัวอุปกรณ์ IoT devices ต่าง ๆ นั้นจะเป็นจะต้องมีหมายเลขระบุเพื่อให้ใช้ในการสื่อสาร เปลี่ยนเสมือนที่อยู่บ้าน การที่จะทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก (รวมถึงอนาคตที่จะผลิตกันออกมา) จำเป็นจะต้องใช้ IP Address version 6 หรือ IPv6 มากกว่าเพื่อให้ได้หมายเลขที่ไม่ซ้ำกันและต้องใช้ได้ทั้งหมด ดังนี้

- IoT network ที่เป็น LAN, PAN, และ BAN: Body Area Network หรือการสื่อสารของตัว Sensor กับร่างกายมนุษย์

- Internet network (protocols) ที่เป็น IP, UDP, TCP, SSL, HTTP, HTTPS, และอื่น ๆ

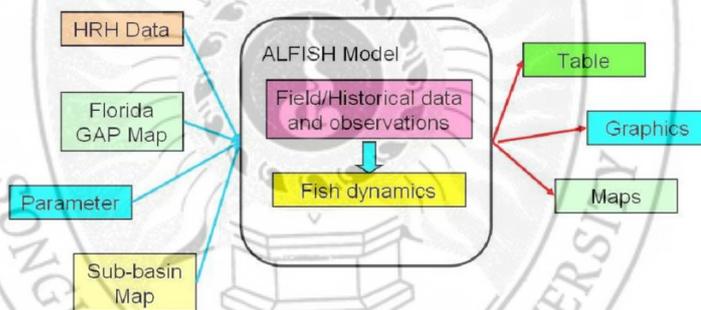
ปัจจุบันข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งผ่านทางอินเทอร์เน็ตมีจำนวนมากขึ้น และเส้นทางของข้อมูลนั้นกำลังเปลี่ยนไป โดยที่สิ่งของวัตถุต่าง ๆ กลายเป็นส่วนหนึ่งของระบบข้อมูลที่เรียกว่า Internet of

Things โดยการใช้ตัวเซนเซอร์ หรือตัวเก็บข้อมูลซึ่งฝังอยู่ในวัตถุต่าง ๆ โดยสิ่งเหล่านี้จะสร้างความได้เปรียบเพราะจะรู้ข้อมูลแม่นยำมากกว่า

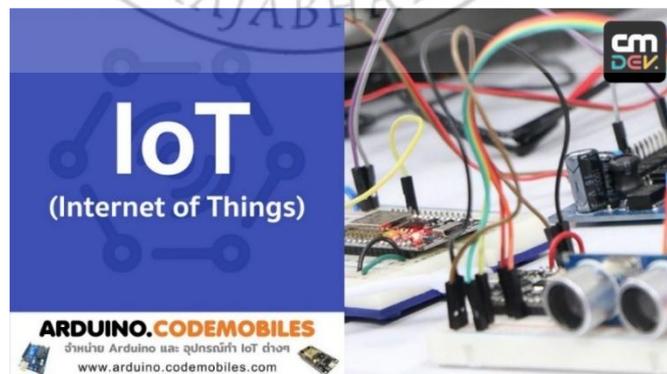
การแพร่กระจายของ IoT จะต้องใช้ระยะเวลาซึ่งเกี่ยวข้องกับการพัฒนาของเทคโนโลยี พื้นฐานความก้าวหน้าของ network ไร้สายและมาตรฐานการสื่อสาร ปัจจุบัน IoT แบ่งตามการนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็น 6 ประเภท โดยจะอยู่กลุ่มหลัก คือ กลุ่มข้อมูลและการวิเคราะห์ (Information and Analysis) และกลุ่มระบบตอบสนองอัตโนมัติและควบคุม (Automation and Control)

- Tracking behavior IoT สามารถใช้เป็นประโยชน์ในการติดตามพฤติกรรม รวมทั้งติดต่อสื่อสารกับสินค้า เช่น บริษัทขายปลีก ตัวเซนเซอร์จะช่วยรวบรวมข้อมูลของสมาชิกและเสนอส่วนลดสินค้าเมื่อมีการกลับมาซื้อสินค้าชนิดนั้นซ้ำ

- Enhance situational awareness ข้อมูลที่ได้จากตัวเซนเซอร์จะรายงานสภาพของสิ่งแวดล้อม เพื่อจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจ เช่น ระบบความปลอดภัยจะใช้ตัวเครือข่ายเซ็นเซอร์ซึ่งรวมเอาระบบภาพ เสียง และตัวจับการสั่นสะเทือน เพื่อชี้ถึงบุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาตเข้ามา แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.7-2.8



ภาพที่ 2.7 Information and Analysis  
ที่มา: internetofthingsagenda (2005)



ภาพที่ 2.8 Information and Analysis การต่อกับ Arduino  
ที่มา:Arduino.codemobiles (2013)

### Information and Analysis

- Sensor –driven decision analytics IoT สามารถใช้ประโยชน์ในการวางแผนและการตัดสินใจระยะยาวที่สลับซับซ้อน โดยเทคโนโลยีจำเป็นต้องใช้การรวบรวมข้อมูลจำนวนมากและระบบคำนวณที่ใช้กับระบบซอฟต์แวร์ที่ทันสมัยที่จะสามารถแสดงข้อมูลกราฟฟิก สำหรับการวิเคราะห์ เช่น ในอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม การใช้ระบบเครือข่ายตัวเซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งที่แม่นยำ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายจำนวนมาก และยังปรับปรุงการขนส่งได้ดีขึ้น

### Automation and Control

- Process optimization ช่วยพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ใน บางอุตสาหกรรม เช่น การผลิตสารเคมีได้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์จำนวนมากเพื่อควบคุมระบบที่ดีกว่า โดยเซ็นเซอร์เหล่านี้จะช่วยรวบรวมข้อมูลไปยังระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงกระบวนการอุณหภูมิ ส่วนผสมต่าง ๆ ให้ดีขึ้น

### Security of Everything

- Internet of Things (IoT) ปัจจุบันมีคำว่า Internet of Everything (IoE) ถูกบัญญัติขึ้น ความหมายของ IoE ก็คือ ทุกสิ่งในชีวิตประจำวันของเราส่วนใหญ่ล้วนแต่เชื่อมกับอินเทอร์เน็ตไม่เฉพาะคอมพิวเตอร์หรือแท็บเล็ต สมาร์ทโฟนอีกต่อไปแต่ หมายถึงอุปกรณ์ไฟฟ้ารอบตัว เช่น Smart TV, Smart Device ต่าง ๆ ที่ใช้เทคโนโลยี RFID หรือ NFC จากงานวิจัยหลายสำนัก สรุปได้ว่าจำนวน IP Devices ของโลกจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในอนาคตอันใกล้ปัญหาด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์จะต้องตามมาอย่างแน่นอน เพราะอุปกรณ์ในชีวิตประจำวันกลายเป็นอุปกรณ์ที่ต่อเชื่อมออนไลน์ตลอดเวลา กับอินเทอร์เน็ตนั่นหมายถึงแฮกเกอร์จากทั่วโลกรวมทั้งผู้ผลิตอุปกรณ์ IP Devices ดังกล่าวสามารถเข้าถึงอุปกรณ์ในบ้านได้ทันที ถ้าป้องกันอุปกรณ์ไม่ดีพอ หรืออุปกรณ์มีช่องโหว่ก็จะทำให้เกิดปัญหาด้านความมั่นคงและความปลอดภัยตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 Security of Everything  
ที่มา: internetofthingsagenda (2005)

Dashboard ส่วนแสดงผลและควบคุมการทำงานในมือของผู้ใช้ อยู่ในรูปของ Device หรือ แอปพลิเคชันในคอมพิวเตอร์หรือ Smartphone ผู้ใช้จะดูข้อมูลที่ Smart Device ส่งมาตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์และระบบ รวมถึงถ่ายทอดคำสั่งใหม่ไปยัง Smart Device จากส่วนนี้ ทั้ง 3 ส่วน จะต้องทำงานสอดประสานกันเพื่อให้ระบบทำหน้าที่ได้คล่องและต้องทำได้เองโดยอัตโนมัติ ผู้ใช้มีหน้าที่เพียงติดตั้งและซ่อมแซมอุปกรณ์ รับข้อมูล และอัปเดตการทำงานของ Smart Device ได้โดยตรงผ่าน Dashboard เท่านั้น โดยคุณสมบัติที่สำคัญของ IoT ก็คือสามารถส่งต่อหน้าที่ไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น Smartwatch หรือ Smartband ที่เก็บข้อมูลสุขภาพเราส่งไปแสดงผลอย่างละเอียดบน Smartphone และ Sensor ต่าง ๆ ที่จับความผิดปกติและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งเราเคยเห็นอยู่บ่อย ๆ หรือคุ้นเคยกันดี แต่ความจริงแล้ว IoT ยังมีประโยชน์และสามารถนำไปใช้ได้อีกมากมายกว่าที่คิด

การใช้ประโยชน์จาก Internet of Things เพื่อทำให้หลาย ๆ อย่างง่ายยิ่งขึ้น การที่เทคโนโลยีเป็นที่แพร่หลายนั้นไม่ได้อยู่ที่ปัจจัยด้านราคาอย่างเดียว แต่เทคโนโลยีนั้นต้องส่งมอบประโยชน์ต่อชีวิตของเราด้วย ซึ่ง Internet of Things ในปัจจุบัน ก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การรับส่งข้อมูลรูปแบบดิจิทัล ปัจจุบันข้อมูลดิจิทัลมีความจำเป็นมาก เพราะสามารถนำไปใช้กับเทคโนโลยีอื่น ๆ ได้ทันที ซึ่ง IoT มีคุณสมบัติด้านการเก็บข้อมูลทางภาพถ่ายให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัลได้อย่างง่ายดายและรวดเร็ว จึงนับเป็นประโยชน์อย่างมากในยุค Digital Transformation แม่นยำ ใช้ได้ตลอดเวลา และส่งข้อมูลแบบ Real-Time ข้อมูลจาก IoT ไม่เพียงแต่เป็นดิจิทัลเท่านั้น แต่ยังสามารถแลกเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วระดับ Real-Time มีความแม่นยำ และสามารถใช้งานได้ตลอดเวลา ช่วยให้เรามีข้อมูลในการตัดสินใจได้ทันท่วงที ลดภาระงานของบุคลากร ในอดีตการเก็บข้อมูลอาจต้องใช้คนเดินทางเข้าไปสอดส่องที่เครื่องมือเพื่อหาความผิดปกติ แต่ปัจจุบัน IoT ไม่เพียงแต่สอดส่องให้ผ่าน Dashboard เท่านั้น แต่ยังสามารถเรียนรู้การหาความผิดปกติด้วยเทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น Artificial Intelligence ได้ทำงานตรวจสอบในจุดที่คนเข้าไม่ถึง สามารถออกแบบ Smart Device ให้มีขนาดเล็กและทนทานเพื่อติดตั้งตามจุดที่คนเข้าถึงยากหรือในจุดที่มีอันตรายระหว่างดำเนินการได้ เช่น ภายในท่อส่งน้ำมัน หรือบ่อบำบัดน้ำเสีย ช่วยลดความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินจากการต้องเข้าพื้นที่อันตรายเป็นประจำได้ ต้องถือว่า Internet of Things เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญมากในยุค Digital Transformation โดยปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ก็เริ่มเข้าไปเกี่ยวข้องกับแวดวงต่าง ๆ ทั้งภาคธุรกิจและสังคม

#### การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) [42]

เซอร์โรนอล เอ. ฟิชเจอร์ (Sir Ronald A. Fisher) เป็นผู้คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลอง เนื่องจากการที่ได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับการรับผิดชอบทางสถิติ และการ

วิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางการเกษตรตลอดมา มหานครลอนดอน ประเทศอังกฤษเป็นเวลานานหลายปี พิชเจอร์เป็นทั้งผู้พัฒนา และเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง ในปี ค.ศ. 1933 พิชเจอร์ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์แห่งมหาวิทยาลัยลอนดอน

การนำการออกแบบการทดลองไปใช้ในยุคแรก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรและชีวภาพ ซึ่งทำให้คำศัพท์และคำนิยามส่วนมากที่ใช้กันอยู่ทางด้านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสาขาทางการเกษตรและชีวภาพ อย่างไรก็ตามการนำการออกแบบการทดลองมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมครั้งแรกปรากฏประมาณช่วง ปี ค.ศ. 1930 ซึ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง คือ อุตสาหกรรมสิ่งทอหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลง วิธีการออกแบบการทดลองก็เริ่มได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกา และยุโรปตะวันตกกลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ ได้รับประโยชน์อย่างมากในการใช้การออกแบบการทดลองสำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต นอกจากนี้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำ และอิเล็กทรอนิกส์ยังได้มีการนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งาน และประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกันหลายปีที่ผ่านมาได้มีการฟื้นฟูความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในสหรัฐอเมริกา เพราะอุตสาหกรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว และวิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จทางด้านการแข่งขัน

1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองจะให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experimental) คือกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้มาซึ่งข้อมูลที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง ก็คือการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ และหลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

(1) เรพลีเคชัน (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำเรพลีเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือประการแรก เรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ด้วยตัวประมาณค่าความผิดพลาด กลายเป็นหน่วยของการชี้วัดขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่

สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมวลผลกระทบบนี้

(2) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง และลำดับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่ทำแรนดอมไมเซชันการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

(3) บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2) แนวทางในการออกแบบการทดลอง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

(1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องการเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

(2) การเลือกปัจจัยระดับ และขอบเขตผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดของเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎีที่มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองให้มีจำนวนน้อยการเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกันในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรกำหนดขอบเขตให้กว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราทราบในตัวแปรใดมีความสำคัญ และระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

(3) เลือกตัวแปรผลตอบแทนในการเลือกตัวแปรผลตอบแทนนี้ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ย หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือทั้งคู่ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบแทน ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบแทนหลายตัว และ

มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าจะอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

(4) เลือกรูปแบบการทดลอง เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไม่เซชัน ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

(5) ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

(6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลองเพื่อผลลัพธ์ และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยวัดที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุน และมีความน่าเชื่อถือ

(7) สรุป และข้อเสนอแนะเมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติ และนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้ว การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

3 การทดลองปัจจัยเดียว และการวิเคราะห์ (Single Factor Experiment) การทดลองปัจจัยเดียว เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว คือมี  $a$  ระดับของปัจจัยโดยการทดลองเป็นแบบการสุ่มสมบูรณ์ ลำดับการทดลองแบบสุ่มเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการหลีกเลี่ยงผลของตัวแปรรบกวนที่ไม่ทราบค่า ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไป หรือไม่สามารถควบคุมได้ในขณะทำการทดลอง

(1) การวิเคราะห์ความแปรปรวน หากมีค่าระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่มเราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่าง ๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นตรง

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, a \end{cases}$$

โดยที่ค่า  $Y_{ij}$  เป็นค่าสังเกตที่  $ij$  และ  $\mu$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกกันว่า มัชฌิมรวม  $\tau_i$  คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  หรือผลกระทบจากระดับที่  $i$  และ  $\varepsilon_{ij}$  คือองค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม จุดประสงค์ก็เพื่อจะตรวจสอบสมมุติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบต่อระดับต่าง ๆ และทำการประเมินค่านั้น

(2) การวิเคราะห์ทางสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองแบบผลกระทบคงที่ ผลกระทบของระดับ  $\tau_i$  มีนิยามเหมือนกับส่วนเบี่ยงเบนของมัชฌิมรวม

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$$

มัชฌิมของระดับ  $i$  คือ  $E(Y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i, i = 1, 2, \dots, a$  ซึ่งในการทดสอบความเท่ากันของมัชฌิมระดับคือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } (i, j)$$

ถ้าหาก  $H_0$  เป็นจริงทุกระดับจะมีมัชฌิมที่เท่ากันคือ  $\mu$  ซึ่งอาจเขียนในรูปสมมุติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ  $H_1$  ได้ดังนี้

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } i$$

จากการคาดหมายกำลังสองเฉลี่ยพบว่าโดยทั่วไป MSE จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียง  $\sigma^2$  เช่นกันภายใต้สมมุติฐานหลัก  $MS_{\text{treatment}}$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าสมมุติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหมายของ MSE จะมากกว่า  $\sigma^2$  ดังนั้นภายใต้สมมุติฐานรองค่าคาดหมายของตัวตั้งต้นสถิติทดสอบจะมากกว่าค่าคาดหมายตัวหาร และจะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่าหรือค่าตกอยู่ในช่วงวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ( $F_{\alpha, a-1, n-a}$ ) ดังนั้นจะปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่ามีความแตกต่างระหว่างมัชฌิมของระดับถ้า

โดยที่

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, n-a}$$

$$F_0 = \frac{SS_{\text{treatment}}/(a-1)}{SS_E/(N-a)} = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_E}$$

ซึ่งค่า  $F_0$  สามารถคำนวณโดยการหาค่า P-Value ในการตัดสินใจก็ได้สูตรสำหรับการคำนวณผลรวมกำลังสองสามารถหาได้จากการลดรูปของ  $MS_{\text{treatment}}$  และ  $SS_T$  ซึ่งจะได้

และ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \bar{Y}^2 \dots an$$

$$SS_{\text{treatment}} = \sum_{i=1}^a n \bar{Y}_{ij}^2 - \bar{Y}^2 \dots an$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองสามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - MS_{\text{treatment}}$$

4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) คือการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือเรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interaction) เช่นกรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัยคือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทคือ

(1) ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบที่ สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

(2) ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor or 2-ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยเป็นคู่พร้อมกัน (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC

(3) ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาสามปัจจัยพร้อมกันในที่นี้ ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษาผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา

5 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับ การลงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ( $k > 2$ ) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการศึกษาร่วม (Interaction) ผู้ทดลองจะใช้จำนวนของระดับปัจจัยที่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยที่วิกฤต (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาละเอียดจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามากในการทดลองเดียวกันผู้ทดลองไม่จำเป็นจะต้องทำการศึกษาปัจจัยแต่ละปัจจัยที่จำนวนระดับเท่ากันค่าจำนวนระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง เช่น กรณีศึกษา 2 ปัจจัย ( $2^k$  Full Factorial) วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ ทำเพื่อคัดปัจจัยออก (Screening Experiment) หรือทำเพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Model) ทั้งนี้ก็เช่นเดียวกับที่กล่าวว่ามีจุด 2 จุดสร้างสมการเส้นตรงได้ ในกรณีทำการศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือโพลีโนเมียลกำลังสองขึ้นไปพิจารณา 2.2 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบซึ่งสามารถเขียนสมการตัวแบบได้ดังนี้คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

โดยที่

- ปัจจัย  $y_{ijk}$  คือ ค่าตอบสนอง (Response) ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i
- $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)
- $\alpha_i$  คือ ผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับ i
- $\beta_j$  คือ ผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j
- $(\alpha\beta)_{ij}$  คือ อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j
- $\epsilon_{ijk}$  คือ ค่าผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

โดยทำการทดลองซ้ำที่ k รูปแบบการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 1 ประโยชน์ของการทดลองซ้ำคือ ผู้ทดลองสามารถทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแฟคทอเรียลโดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 2.1 การทดลองแฟคทอเรียลแบบ 22

ปัจจัย A	ปัจจัย B	
	1	2
1	Y111	Y121
	Y112	Y122
	:	:
	Y11n	Y12n
2	Y211	Y221
	Y212	Y222
	:	:
	Y21n	Y22n

6 การออกแบบการทดลองกรณี  $2^k$  แฟคทอเรียล ( $2^k$  Factorial Design) ในการออกแบบชนิดนี้ได้ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการทดลองต่าง ๆ ที่ประกอบไปด้วยปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัย นอกจากนี้ยังเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยเหล่านั้นต่อผลตอบสนองที่ต้องการด้วย การออกแบบการทดลองชนิด  $2^k$  นี้มักใช้ในงานทดลองเมื่อมีปัจจัยมาเกี่ยวข้องหลายตัว ซึ่งให้จำนวนการทดลองที่ต่ำที่สุดใน  $k$  ปัจจัยของการออกแบบกรณีปัจจัยที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงเรียกว่าการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาจำนวนปัจจัย

ตารางที่ 2.2 การทดลอง  $2^k$  Full Factorial

A	B	C	Treatment Combination
-	-	-	(1)
+	-	-	A
-	+	-	B
+	+	-	AB
-	-	+	C
+	-	+	AC
-	+	+	BC
+	+	+	ABC

7 การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใดนั้น คือ ในการทดลองจะเกิดความผิดพลาดทุกครั้ง การทดลองที่ดีคือ ต้องมีความผิดพลาดน้อยที่สุด วิธีการทดสอบว่าการทดลองที่มีความเหมาะสมคือ การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นที่เป็นไปตามหลักซึ่งทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้หรือไม่

#### 8 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

(1) การตรวจสอบว่ามีการกระจายของแบบปกติหรือไม่โดยใช้ Normal Probability Paper หรืออิตโตแกรมทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบเส้นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

(2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภาพการกระจายทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าลำดับการสุ่มที่สามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

(3) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภาพการกระจาย ทดสอบโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปฏิบัติ (Treatment) และเศษเหลือว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละการปฏิบัติมีความสูงไม่แตกต่างกันแสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

9 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination:  $R^2$ ) เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ และแสดงผลว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะการควบคุมตามแบบการทดลองแล้วจะทำการวิเคราะห์ค่า  $R^2$  ทั้งหมดของข้อมูลในรูป  $SS_T$  ว่าเกิดความแปรปรวนจากทรีตเมนต์เท่าใด

ซึ่งถ้าค่า  $R^2$  ออกมาต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

- 1) เพิ่มจำนวนการทำซ้ำโดยเพิ่มขึ้นงานในการทดสอบมากขึ้น
- 2) ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องหรือไม่ ถ้ามีการออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าเพิ่มจำนวนทำซ้ำแล้วค่า  $R^2$  ยังคงที่อยู่ควรจะทำการบล็อกเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) เป็นการหาความแปรปรวนโดยรวมแล้วแยกความแปรปรวนเนื่องจาก ทรีตเมนต์ และความแปรปรวนที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่ง หมายถึง รีพีทะบิลิตี (Reproducibility) แล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่เทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือรีโปรดิวซิบิลิตี

11 การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอยเมื่อดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ความซรุขระผิว แต่ก่อนที่จะนำข้อมูลเหล่านี้วิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์ถึงคุณสมบัติ (Model Adequacy Checking) ของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นต้องทราบก่อนว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ตามลักษณะสมบัติของข้อมูล

### การปลูกพืชด้วยระบบรากแขวนหรือแอโรโพนิกส์

การปลูกพืชด้วยระบบรากแขวนหรือแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) เป็นการเพาะปลูกแบบไม่ใช้ดินและเป็นกระบวนการปลูกพืชที่ลอยอยู่ในอากาศหรือในหมอก หลักการของแอโรโพนิกส์ขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้ของการปลูกพืชที่ไม่มีรากในดินหรือดิน แต่ในภาชนะที่เต็มไปด้วยธาตุอาหารพืชไหล ในภาชนะเหล่านี้รากสามารถหาสภาวะที่ดีที่สุดเกี่ยวกับออกซิเจนและความชื้นได้ เงื่อนไขเหล่านี้ช่วยให้ดูดซึมธาตุอาหารพืชได้ดีขึ้นในลักษณะที่สมดุลมากขึ้น โดยเป็นผลสืบเนื่องมาจากการพัฒนาพืชที่ปลูกเร็วขึ้น ระบบแอโรโพนิกส์นั้นเป็นมิตรกับผู้ใช้งานมากกว่าเนื่องจากพืชทั้งหมดถูกแยกออกจากกันและลอยอยู่ในอากาศ รากของพืชไม่ได้อยู่ในดินหรือน้ำ นอกจากนี้การเก็บเกี่ยวพืชผลยังทำได้ง่ายอีกด้วย พืชผักหลายชนิด เช่น มันฝรั่ง มันเทศ มะเขือเทศ ผักกาดหอม และผักใบบางชนิดได้รับการปลูกในเชิงพาณิชย์ในระบบแอโรโพนิกส์ [43] ลักษณะการปลูกรากพืชไม่ได้แช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหาร แต่จะปล่อยให้รากอยู่ในอากาศ ไม่สัมผัสกับสิ่งใด โดยจับยึดส่วนโคนของลำต้นพืชให้ตั้งตรงและรากลอยอยู่ในอากาศ มีการสเปรย์สารละลายธาตุอาหารให้กับรากพืชเพื่อหล่อเลี้ยงต้นพืชให้เจริญเติบโต ซึ่งระบบนี้ต้องการน้ำน้อย พื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการดำเนินการ และรากปลอดโรคที่มีชีวมวลสูง ลดการใช้สารละลายธาตุอาหาร พลังงาน และพื้นที่เพาะปลูก [9] [10] ประหยัดสารละลายธาตุอาหาร 5-10 เท่าใน 1 รอบการปลูก และได้ผลผลิตมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมที่ใช้ดิน [11] แต่สิ่งที่ต้องควบคุมมากที่สุดก็คือ อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งต้องพยายามรักษาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับพืช ( $20-25^{\circ}\text{C}$ ) หากอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารสูงจะส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของรากและผลผลิตลดลง [12] และสามารถนำน้ำสารละลายธาตุอาหารหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ช่วยประหยัดการใช้น้ำและน้ำได้อีกด้วย [13] [14] [15] ผลการวิจัยที่มีเผยแพร่อยู่พบว่าระบบการเพาะปลูกแบบไม่ใช้อากาศสามารถประหยัดน้ำได้ 98% สารอาหาร 60% และยาฆ่าแมลงและสารกำจัดวัชพืช 100% [16] นอกจากนี้ประโยชน์มากมายที่ได้กล่าวมาแล้วยังรวมถึงการปลูกยังไม่ต้องไม่จำเป็นต้องใช้ดิน และยังสามารถสนับสนุนกระบวนการผลิตให้ปลูกได้ตลอดทั้งปีเนื่องจากสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมในระบบให้เป็นไปตามความต้องการได้ [17]

## แนวคิดเกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงาน ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542 ให้ความหมายว่า ความสามารถซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งนี้อาจให้แรงงานได้ ส่วนพลังงานตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 ให้ความหมายว่า ความสามารถในการทำงานซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งนี้อาจให้งานได้ ได้แก่ พลังงานหมุนเวียน พลังงานสิ้นเปลือง และให้หมายความรวมถึงสิ่งที่ให้งานได้ เช่น เชื้อเพลิง ความร้อน ไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับพลังงานงานหมุนเวียนนั้น มีผู้ให้ความหมายไว้หลายแหล่งข้อมูล วรณุช แจงสว่าง [44] ได้ให้ความหมาย พลังงานหมุนเวียนไว้ว่า หมายถึง พลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก นับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่จะนำมาใช้แทนพลังงานจากเชื้อเพลิง

กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [45] ได้นิยาม พลังงานทดแทนไว้ว่า หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทน น้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนที่สามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานทดแทนที่สามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก ทดสอบ พัฒนา และสาธิต รวมถึงการส่งเสริมและเผยแพร่ พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ตามธรรมชาติ เช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ ชีวมวลและอื่น ๆ เพื่อให้มีการผลิต และการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ เป็นประโยชน์ต่อเศรษฐกิจและสังคม

กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [46] ได้ให้คำนิยามเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ว่า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติ ที่มีความสะอาดปราศจากการก่อกมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมีปริมาณมากมาย และสามารถนำมาใช้อย่างไม่หมดสิ้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อาจจำแนกเป็นผลที่ได้รับสองด้านหลัก ๆ คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่งมีสองชนิด คือ การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า (Solar Cell) และการใช้ระบบรวมแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า (Concentrating Solar Power) สำหรับการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เทคโนโลยีที่นำมาใช้ ได้แก่ การใช้แผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค ซึ่งปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลาย และอีกชนิดหนึ่ง คือ การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Drying) เพื่อทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งผลิตภัณฑ์จากเกษตรและอุตสาหกรรม

### ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากก็จะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้สูง สำหรับการนำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้อุปกรณ์รวมแสง เราจำเป็นต้องทราบศักยภาพรังสีตรงด้วยในกรณีของประเทศไทย ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในบริเวณต่าง ๆ โดยเฉลี่ยทั้งปีสามารถแสดงได้ด้วยแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีเป็นบริเวณกว้างทางตอนล่างของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่จังหวัดอุดรธานีรวมทั้งบางส่วนของภาคกลาง สำหรับส่วนที่เหลือจะมีศักยภาพลดหลั่นกัน ตามที่ แสดงในแผนที่ เมื่อทำการจำแนกดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย [47]

จากข้อมูลด้านศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สรุปได้ว่าประเทศไทยนั้นมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนาเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเสนอให้การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานงานทางเลือกทดแทนทางหนึ่ง โดยเริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 แต่พลังงานทางเลือกยังไม่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายมากนักในตอนนั้น (เนื่องจากราคาน้ำมันมีราคาถูก) แต่ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา พลังงานทดแทนได้รับความสำคัญอีกครั้งหนึ่งซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเป็นพลังงานทดแทน

## เซลล์แสงอาทิตย์ [48]

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ (อังกฤษ: solar cell) หรือ เซลล์สุริยะ หรือ เซลล์โฟโตโวลตาอิก(Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตวอลเทอิก นั่นก็คือ คุณสมบัติของสารเช่น ค่าความต้านทานแรงดัน และกระแส จะเปลี่ยนไปเมื่อมีแสงตกกระทบ ปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกสาธิตให้ดูครั้งแรกในปี 1839 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสวัย 19 ปีชื่อ A.E. Becquerel โดยสาธิตว่า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุบางอย่าง จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เขาได้ทดลองโดยการใช้โลหะสองขั้วจุ่มลงในสารละลายไอออน แล้วให้แสงตกกระทบได้แค่ขั้วเดียว จะปรากฏกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วทั้งสอง แสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในวัตถุ เมื่อมีแสงกระทบเขายังพบว่าเมื่อเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น พลังงาน) ของแสง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าก็เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผู้ที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เป็นคนแรก ในปี 1883 คือ นักวิจัย Charles Fritts เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกนี้ทำจากซีลีเนียม โดยมีประสิทธิภาพเพียง 1% เท่านั้น แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมาในเชิงพาณิชย์ จนกระทั่งใน ปี ค.ศ. 1954 และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 เซลล์แสงอาทิตย์คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟต์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลเลอไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

ในประเทศไทย เริ่มมีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้ามาตั้งแต่ปี 2526 จนถึงปี 2553 มียอดติดตั้งรวม 100.39 MW แจกจ่ายไฟฟ้า(เฉพาะเชื่อมกับสายส่งของ กฟผ แล้ว) ทั้งปี 2553 รวม 21.6 GWh หรือ 0.0134% ของปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 161,350 GWh โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ผลิตไฟฟ้าได้ 2.2 GWh ผู้ผลิตรายย่อย 19.4 GWh ตามพระราชบัญญัติการพัฒนาพลังงานหมุนเวียน 15 ปีนับจากปี 2552 กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานหมุนเวียนไว้ที่ 20.3% ของพลังงานทั้งหมด โดยมีสัดส่วนของพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 6% ดังนั้น ตามแผนงาน ในปี 2565 ประเทศไทยต้องมีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีกำลังการผลิตรวม 500 MW ตัวเลขในปี 2554 อยู่ระหว่างดำเนินการติดตั้ง 265 MW และอยู่ระหว่างการพิจารณาจาก กฟผ อีก 336 MW โรงไฟฟ้าที่สร้างที่จังหวัดลพบุรีด้วยเทคโนโลยี amorphous thin film ต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถึง 540,000 ชุด มีกำลังการผลิต 73 MW จะเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใหญ่ที่สุดในโลก

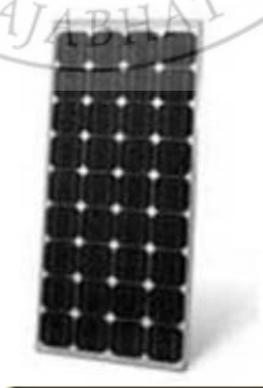
## 1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุด และมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถู และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปน เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าซึ่งรับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้านด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

### 2 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [48]

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก คือ

1. Mono crystalline หรือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สร้างโดยการนำเอาซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากถึง 99.999% ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) จากผลึกตั้งต้น (Seed crystal) ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไปก็จะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่น ๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก็จะขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟออกใช้ และขั้นสุดท้ายก็จะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด



ภาพที่ 2.11 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline [48]



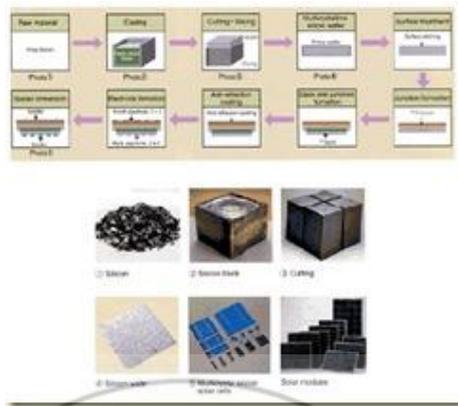
ภาพที่ 2.12 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว [48]

2. Poly crystalline หรือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก

เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอนแบบหลายผลึกก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็ก ๆ (ขนาดระดับไมโครเมตร-มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน เป็นการแสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน ด้านบนของรูปแสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าไปใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของซิลิคอนหลายผลึกที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้ หลังจากนั้นการนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกเดี่ยว คือนำไปตัดเป็นเวเฟอร์หนาขนาด 300-400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำ p-n junction ต่อไป ด้านล่างของรูปเป็นการสร้างแผ่นซิลิคอนหลายผลึกที่จะใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจากสารหลอมเหลวของซิลิคอน เรียกรูปนี้ว่า ribbon โดยวิธีนี้จะช่วยลดขั้นตอนที่จะต้องหันเป็นแผ่นเวเฟอร์ในกรณีที่ใช้ ingot



ภาพที่ 2.13 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline [48]



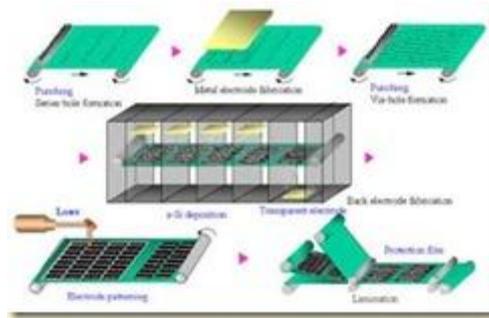
ภาพที่ 2.14 ขั้นตอนของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก [48]

### 3. Amorphous silicon หรือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสมีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ แสดงให้เห็นขั้นตอนการผลิต เราจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนบนแผ่นฐานรองโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเลน ( $\text{SiH}_4$ ) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้น เช่น โดยพลาสมาเพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซเข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นแก้ว สเตนเลส หรือพลาสติก ที่ได้ทำการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่นเกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้หากเราใส่ก๊าซที่มีโบรอน เช่น  $\text{B}_2\text{H}_6$  เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด p และถ้าหากใส่ก๊าซที่มีฟอสเฟต เช่น  $\text{PH}_3$  เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด n ซึ่งจะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีนี้เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซเพื่อสร้างให้เกิดชั้นของ pin อะมอร์ฟัสซิลิคอนขึ้นได้อย่างค่อนข้างง่ายตาย หลังจากได้ pin แล้ว เราก็จะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้าให้เสร็จเป็นเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon [48]

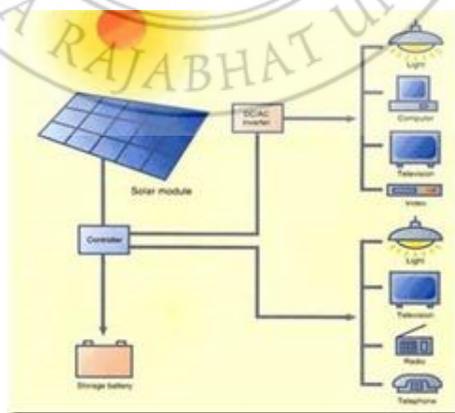


ภาพที่ 2.16 ขบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Amorphous Si Solar Cell (Film Substrate) [48]

การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีรูปแบบที่หลากหลายต่างกัน แต่ทั้งหมดจะมีรูปแบบการใช้งานหลัก ๆ อยู่ 3 รูปแบบ ดังนี้ [48]

1. ระบบติดตั้งแบบอิสระ (Stand alone system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้าเข้าถึง หลักการทำงานของระบบติดตั้งแบบอิสระ แบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืน โดยในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้รับแสงแดดจะ สามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อม ๆ กัน ส่วนในช่วงเวลากลางคืน เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้นพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บประจุไว้ในช่วงกลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลด จึงกล่าวได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบอิสระนี้ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน



ภาพที่ 2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบอิสระ [48]

รายละเอียดของระบบติดตั้งอิสระ ประกอบด้วย

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
- เครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ ทำหน้าที่ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่
- แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อไว้ในตอนที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เช่น กรณีที่ฟ้า ครึ้ม หรือตอนกลางคืน

•เครื่องแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเครื่องใช้ ไฟฟ้า เช่น หากเครื่องใช้ไฟฟ้าต้องการไฟฟ้าที่แรงดัน 220Vac 50Hz เครื่องแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220Vac 50Hz เพื่อให้สามารถใช้งานได้ เป็นต้น ส่วนในกรณีที่เครื่องใช้ไฟฟ้าต้องการ แรงดันกระแสตรง ก็สามารถใช้งานโดยตรงจากแบตเตอรี่ได้เลย

## 2. ระบบติดตั้งแบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย (Grid connected system)

เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน การลงทุนไม่สูงมากเท่าแบบติดตั้งอิสระ แต่ต้องติดตั้งในพื้นที่ที่มีระบบสายส่งไฟฟ้าอยู่แล้ว ระบบนี้จะไม่มีการเก็บพลังงานลงแบตเตอรี่ ผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แล้วก็จ่ายเข้าระบบได้เลย ทำให้ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในส่วนของการดูแลรักษาแบตเตอรี่ แต่หากระบบไฟฟ้าหลักขัดข้องระบบนี้ก็หยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าระบบด้วย เนื่องจากเป็นมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับช่างไฟฟ้าที่จะซ่อมบำรุงระบบ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่บังคับใช้ทั่วโลก



ภาพที่ 2.18 แบบเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย [48]

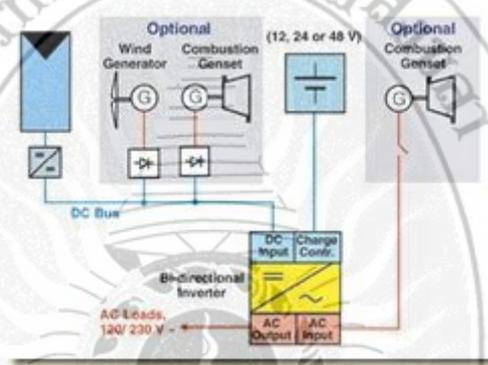
รายละเอียดของระบบติดตั้งแบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย ประกอบด้วย

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
- เครื่องแปลงกระแสสลับชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากชุดแผง เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มี

ขนาดและแรงดันเท่ากับระบบไฟฟ้าหลัก เช่น ระบบไฟฟ้าหลักมีแรงดัน 220Vac 50Hz ก็จะต้องใช้เครื่องแปลงไฟฟ้าเป็นรุ่นที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน 220Vac 50Hz ด้วย ซึ่งระบบแบบต่อร่วมระบบจำหน่ายนี้มีการติดตั้งใช้งานกันมากในปัจจุบันเนื่องจากการส่งเสริมจากทางภาครัฐ ทำให้ในปัจจุบันจะเห็นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ต่าง ๆ กันมาก

### 3. ระบบติดตั้งแบบผสมผสาน (Hybrid system)

เป็นระบบซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ตามเกาะต่าง ๆ และเหมาะสำหรับออกแบบให้เป็นแหล่งไฟฟ้าหลักได้เลย เนื่องจากจะใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหลาย ๆ แหล่งมาช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น เช่น มีแหล่งจ่ายจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้า จากชุดเครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.19 แบบเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตั้งแบบผสมผสาน [48]

รายละเอียดของระบบติดตั้งแบบผสมผสาน ประกอบด้วย

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
- เครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ ทำหน้าที่ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่
- แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อไว้ในตอนที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เช่น กรณีที่ฟ้า ครึ้ม หรือตอนกลางคืน
- เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าชนิด 2 ทิศทาง จะทำหน้าที่ในการแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นกระแสสลับเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า และในขณะเดียวกันหากแรงดันชุดแบตเตอรี่ต่ำลงหรือไม่มีแสงอาทิตย์สำหรับประจุลงแบตเตอรี่ เครื่องแปลงก็จะ ทำหน้าที่ในการเป็นเครื่องประจุแบตเตอรี่โดยอัตโนมัติ เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ที่จ่ายกระแสเข้ามาและเมื่อเครื่องยนต์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์เครื่องแปลงไฟฟ้าทำการประจุไฟฟ้าจนแบตเตอรี่เต็มแล้ว เครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้าก็จะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์เครื่องแปลง

ไฟฟ้าก็จะกลับมาทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยอัตโนมัติทันที ทำให้ระบบสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

### คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบ หรือคำนวณจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

1. ความเข้มของแสง กระแสไฟ (Current) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหมอก และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 mW ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 1,000 W ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 mW ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 750 W ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง

2. อุณหภูมิ กระแสไฟ (Current) จะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุก ๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรมืด (Open Circuit Voltage หรือ Voc) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ( $0.5\% \times 5$  องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ Voc จะลดลง 0.525 V ( $21\text{ V} \times 2.5\%$ ) เหลือเพียง 20.475 V ( $21\text{V} - 0.525\text{V}$ ) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ก่อนที่ผู้ใช้จะเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผงที่ระบุไว้ในแผงแต่ละชนิดด้วยว่า ใช้มาตรฐานอะไร หรือมาตรฐานที่ใช้วัดแตกต่างกันหรือไม่ เช่น แผงชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 80 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,200 W ต่อตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ขณะที่อีกชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 75 วัตต์

ที่ความเข้มแสง 1,000 W ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียสแล้ว จะพบว่าแผง ที่ระบุว่าให้กำลังไฟฟ้า 80 W จะให้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ที่จะใช้แผงจึงต้องคำนึงถึง ข้อกำหนดเหล่านี้ในการเลือกใช้แผงแต่ละชนิดด้วย

### ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

#### 1 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน [49]

ระยะเวลาคืนทุนหมายถึง ระยะเวลาทั้งหมดที่โครงการจะให้กระแสเงินสดสุทธิรวมเท่ากับ เงินลงทุนที่จ่ายเริ่มแรกพอดี

มูลค่าเงินในปัจจุบัน

มูลค่าเงินในปัจจุบันเป็นการหาจำนวนเงินในปัจจุบันเทียบเท่ากับกระแสเงินที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยใช้การคำนวณด้วยสูตร หรือจากการเปิดตาราง ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการแปลงค่าของเงินอัตรา ดอกเบี้ยที่ใช้เป็นตัวคูณต่าง ๆ นั้นจะใช้อัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ (Minimum Attractive Rate of Return, MARR) ดังนั้นถ้าทางเลือกใดให้เงินในปัจจุบันมีค่ามากกว่าศูนย์หรือหมายความว่า เมื่อใช้อัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้แล้วทางเลือกนั้นยังมีกำไร(กระแสเงินเป็นบวก)หรืออาจ กล่าวได้ว่าอัตราผลตอบแทนของทางเลือกนั้นมีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้แล้ว คำนวณหามูลค่าเงินในปัจจุบันได้น้อยกว่าศูนย์ หมายความว่า ทางเลือกนั้นขาดทุน(กระแสเงินเป็น ลบ)เมื่อเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ หรืออัตราผลตอบแทนของทางเลือกนั้นมีค่า น้อยกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ ดังนั้นทางเลือกในลักษณะดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่ ไม่สมควรลงทุน ในกรณีที่มีมูลค่าเงินปัจจุบันเท่ากับศูนย์ นั้นหมายความว่า อัตราผลตอบแทนของ ทางเลือกนั้นมีค่าเท่ากับอัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้พอดี ซึ่งหมายความว่า เราสามารถ เลือกหรือไม่เลือกลงทุนก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะตัดสินใจไม่เลือกลงทุน เนื่องจากว่า การลงทุน โดยทั่วไปจะมีความเสี่ยงมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจำนวนเงินที่คาดว่าจะได้รับในอนาคต อาจจะไม่เป็น ดังที่คาดการณ์ ดังนั้นการเลือกนำเงินไปลงทุนในสิ่งที่ไม่มีความเสี่ยงมาเกี่ยวข้องแล้วได้อัตรา ผลตอบแทนเท่ากัน น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ(NPV)

เป็นการประเมินโดยการนำความสำคัญของค่าเงินตามเวลาเข้ามาคิดด้วย วิธีการนี้จะหา มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับที่เกิดจากโครงการในแต่ละงวดมารวมกัน แล้วเปรียบเทียบกับกับ มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนโดยกำหนดอัตราส่วนลดหรือผลตอบแทนที่ต้องการ หากมีค่าเท่ากันหรือ มูลค่าสุทธิเป็นศูนย์ แสดงว่าโครงการนั้นคุ้มทุนพอดี หากมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดเข้ารวมกัน มี มากกว่ามูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน ถือว่าโครงการนั้นให้ผลตอบแทนสูงกว่าที่เราต้องการหรือคาดหวัง ไว้ ควรจะลงทุนในโครงการนั้น หากไม่แล้ว ก็ควรปฏิเสธไม่ลงทุนโครงการนั้น

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ= มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ-มูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนของการลงทุน(Internal Rate of Return-IRR)

เป็นอัตราส่วนลด/หรืออัตราดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายออกไปเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่คาดว่าจะได้รับเข้ามาตลอดอายุของโครงการ หรือคือการหาส่วนลดหรืออัตราดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ=0

จุดคุ้มทุน (Break Even Point) และระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period) ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัดสินใจประเด็นที่แตกต่างกัน โดยเครื่องมือทั้งสองนี้มีวิธีการหา ดังนี้

จุดคุ้มทุน (Break Even Point) หมายถึง ระดับของยอดขายของกิจการที่เท่ากับค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกิจการ ซึ่งก็คือจุดที่กิจการไม่มีผลกำไรหรือขาดทุนนั่นเอง โดยจุดคุ้มทุนจะสามารถหาได้ก็ต่อเมื่อผู้ประกอบการสามารถแยกได้ว่าค่าใช้จ่ายของธุรกิจนั้นมีอะไรเป็นต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปรอย่างละเท่าไรบ้าง

จากการคำนวณดังนี้

จุดคุ้มทุน (หน่วยขายที่คุ้มทุน) = ต้นทุนคงที่

ราคาขายต่อหน่วย-ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย

จุดคุ้มทุน (ยอดขายที่คุ้มทุน) = หน่วยขายที่คุ้มทุน x ราคาขายต่อหน่วย หรือ ต้นทุนคงที่

อัตรากำไรส่วนเกิน จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเป็นการวางแผนการทำกำไรจากการดำเนินงานของธุรกิจโดยมองที่ราคาขาย ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยหากต้องการให้มีจุดคุ้มทุนที่ต่ำลง เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำกำไรก็สามารถทำได้โดย เพิ่มราคาขาย หรือลดต้นทุนผันแปรและต้นทุนคงที่ลง ซึ่งการใช้การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนจะใช้ในการวางแผนระยะสั้น ๆ เช่น ต่อเดือนหรือต่อปี เป็นต้น

ส่วนระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period) หมายถึง ระยะเวลาที่ได้รับผลตอบแทนในรูปของกระแสเงินสดเข้าเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุน โดยไม่คำนึงถึงเรื่องมูลค่าของเงินตามระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนจึงมองที่กระแสเงินสดรับ ไม่ใช่ตัวกำไรหรือขาดทุนของกิจการ โดย ณ จุดได้ที่ผลสะสมของกระแสเงินสดรับเท่ากับเงินลงทุนในครั้งแรกก็จะได้ระยะเวลาคืนทุนนั่นเอง ยกตัวอย่าง ลงทุนในโครงการหนึ่ง ใช้เงินลงทุน 1,200,000 บาท จะให้กระแสเงินสดในแต่ละปีจำนวน400,000 บาท เป็นเวลา 6 ปี ระยะเวลาคืนทุนก็คือ 3 ปี

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนจึงเป็นการวิเคราะห์โครงการลงทุนที่มีระยะค่อนข้างนาน และพิจารณาความเสี่ยงจากการลงทุน เพื่อใช้ในการเลือกโครงการลงทุน โดยดูจากระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด เพราะจะทำให้ผู้ประกอบการมีความเสี่ยงจากการลงทุนน้อยที่สุดด้วย แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การลงทุนโดยใช้ระยะเวลาการลงทุนเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมนักต้องใช้เครื่องมืออื่น ๆ

ประกอบด้วย เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return) เป็นต้น

การคำนวณ

การวิเคราะห์ค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาและมูลค่าที่เทียบเท่ากันของค่าของเงินในแต่ละช่วงเวลาโดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ การคำนวณนั้นจะใช้ตัวคุณมาช่วยในการคำนวณในการคุณนั้นมีสัญลักษณ์และความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้

1.P= มูลค่าเงินในปัจจุบัน เป็นมูลค่าของเงินช่วงเวลาที่เรากำหนดว่าเป็นเวลาปัจจุบัน

2.F=มูลค่าเงินในอนาคต เป็นมูลค่าเงิน ณ จุดใดจุดหนึ่งที่เรากำหนดว่าเป็นอนาคต

3.A=มูลค่าเงินรายปี เป็นมูลค่าที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่ากันทุกช่วงเวลาซึ่งช่วงเวลานั้นไม่จำเป็นต้องเป็นปีเสมอไป อาจเป็นเดือนหรือเป็นวันก็ได้

4.G= มูลค่าหรือจำนวนเงินที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างคงที่ในแต่ละช่วงเวลา

5.n= จำนวนช่วงเวลาที่พิจารณา

6.i= อัตราดอกเบี้ย

7.t=ช่วงเวลาใดๆ

อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน (Internal rate of return = IRR)

มีการกล่าวถึงอัตราผลตอบแทนบ่อยครั้ง โดยได้กล่าวว่า มูลค่าในปัจจุบันหรือมูลค่าเงินรายปีมีมูลค่ามากกว่าศูนย์ หมายถึงอัตราผลตอบแทนของการลงทุนมีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ และถ้ามูลค่าเงินในปัจจุบันหรือมูลค่าเงินรายปีมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ หมายถึงอัตราผลตอบแทนของการลงทุนมีค่าน้อยกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ สูตรในการคำนวณ อัตราผลตอบแทนคือ

$$\text{อัตราผลตอบแทน} = (\text{จำนวนเงินปัจจุบัน} - \text{จำนวนเงินตั้งต้น}) \times 100$$

จำนวนเงินตั้งต้น

สูตรการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนข้างต้น เป็นสูตรที่ใช้สำหรับหาอัตราผลตอบแทนของทั้งโครงการ ไม่ใช่อัตราผลตอบแทนต่อช่วงเวลา ทำให้ยากต่อการนำไปเปรียบเทียบเพื่อใช้ประโยชน์ในการตัดสินใจ และเนื่องจากเราพิจารณาเรื่องค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามเวลา เราจึงไม่สามารถนำจำนวนช่วงเวลาหาผลตอบแทนต่อช่วงเวลาได้ ดังนั้นเราจึงต้องมีวิธีการหาอัตราผลตอบแทนแบบใหม่โดยสิ่งที่คุณคำนวณได้นั้นจะเป็นอัตราผลตอบแทนต่อช่วงเวลา

ความหมายของอัตราผลตอบแทนต่อช่วงเวลานั้น คือ อัตราที่ได้รับจากการกู้ยืม หรือการลงทุน ซึ่งจะทำให้ผลตอบแทนและการลงทุนมีค่าเท่ากันพอดี หรือเป็นอัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่า

เงินในปัจจุบันและมูลค่าเงินรายปีมีค่าเท่ากับศูนย์พอดี กล่าวคือ เมื่อมูลค่าเงินในปัจจุบันและมูลค่าเงินรายปีมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึง หมายถึงอัตราผลตอบแทนมีค่าเท่ากับอัตราผลตอบแทนที่ต่ำสุดที่ยอมรับได้ จากความหมายของอัตราผลตอบแทนก็จะทำให้เราสามารถหาอัตราผลตอบแทนได้ แต่ปัญหาก็คือเมื่อหาได้แล้วเราจะนำตัวเลขเหล่านั้นไปทำอะไร แล้วเราจะตัดสินใจโดยใช้ตัวเลขนั้นอย่างไร เราต้องยอมรับว่าตัวเลขโดดๆ นั้นไม่สามารถทำให้เราตัดสินใจได้ เราจะต้องมีตัวอื่นมาเทียบซึ่งตัวเทียบที่เราจะนำมาเทียบก็คือ อัตราผลตอบแทนต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เราก็จะบอกว่าการลงทุนครั้งนั้นเป็นการลงทุนที่สมควรลงทุน แต่ถ้าการลงทุนที่ให้ค่าอัตราผลตอบแทนน้อยกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้แล้ว เราก็จะบอกว่าการลงทุนนั้นเป็นการลงทุนที่ไม่สมควรลงทุน โดยอัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง -100% และนิรันดร์ (infinity) โดยอัตราผลตอบแทน -100% หมายความว่า เงินลงทุนที่เสียไปนั้นไม่ได้ก่อให้เกิดรายรับและเงินลงทุนที่เสียไปแล้วไม่สามารถเรียกคืนได้ โดยทั่วไปแล้ว อัตราผลตอบแทนยิ่งมากยิ่งดี

#### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้องของ

จากการรวบรวมและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยโดยมีรายละเอียดสรุปได้ดังนี้

M. Gangopadhyay และคณะ (2564) ได้การประเมินการตอบสนองการเจริญเติบโตสำหรับการผลิตปริมาณจำนวนมากของ *Hemidesmus indicus* ที่ใกล้สูญพันธุ์โดยระบบแอร์โพนิก พบว่าระบบแอร์โพนิกส์ที่เหมาะสมได้รับการออกแบบโดยการปรับช่วงของแอร์มิสต์และขนาดหยดให้เหมาะสม ผลการศึกษาเปรียบเทียบระบบปลูกไร้ดินและปลูกด้วยดิน พบว่าการขยายพันธุ์ด้วยระบบแอร์โพนิกส์จะให้อัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าทั้งในส่วนพืชบนและใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญ [50]

ศรัณรัตน์ คงมัน (2564) ได้ศึกษาออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำสารละลายด้วยเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์สำหรับปลูกผักสลัดด้วยวิธี แอร์โพนิกส์โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายต่อระบบการปลูก และวิธีการทดลองใช้ผักสลัด 2 ชนิดคือ กรีนโอ๊ค และเรดโอ๊ค ด้วยวิธีแอร์โพนิกส์ เปรียบเทียบการเจริญเติบโตกับพืชไฮโดรโพนิกส์แบบปรับระดับน้ำ และวิเคราะห์ความแปรปรวนผลการปรับอุณหภูมิน้ำสารละลายต่อการเจริญเติบโต โดยวัดความสูงต้น จำนวนใบ น้ำหนักต้น ความกว้างทรงพุ่ม และความยาวราก ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบการทำน้ำเย็นสามารถลดอุณหภูมิภายในชุดทดลองให้ลดลงประมาณ 7-11 °C เมื่อเทียบจากอุณหภูมิอากาศภายนอก การเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกด้วยระบบน้ำปรับอุณหภูมิมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระบบ การปลูกไฮโดรโพนิกส์แบบปรับระดับน้ำ ส่วนผักสลัดเรดโอ๊คชี้ว่าการปลูกด้วยระบบน้ำปรับอุณหภูมิและน้ำสารละลายอุณหภูมิปกติมี การเจริญเติบโตน้อยเมื่อเทียบกับระบบการปลูกไฮโดรโ

นิกส์แบบปรับระดับน้ำ และค่าพลังงานของวิธีแอร์โพนิกส์มีการใช้พลังงาน ไฟฟ้าอยู่ที่ 0.108 kWh [51]

นภาพร จิตต์ศรัทธา, วัชรวิทย์รัศม (2562) ศึกษาชนิดของวัสดุปลูกที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของเมล่อนสายพันธุ์ Green net T778 และเมล่อนพันธุ์ Pot orange T1957 ในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน โดยวางแผนการทดลองแบบ 2 x 3 Factorial in Completely Randomized Design จำนวน 5 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย คือ สายพันธุ์เมล่อน 2 พันธุ์คือ เมล่อนพันธุ์ Green net T778 และเมล่อนพันธุ์ Pot orange T1957 และวัสดุปลูก 3 ชนิด 1.พีทมอส 2.ขุยมะพร้าว 3.ขี้เถ้าแกลบ ผลศึกษาพบว่า การเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน 2 สายพันธุ์ มีความสูงต้น ความกว้างใบ ความยาวใบ ความเขียวใบ (SPAD) เส้นรอบวงผล ความหนาเนื้อ และ ความหนาแน่น ของผล ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ( $p>0.05$ ) แต่จะมีขนาดลำต้น น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักผล และปริมาณของแข็งที่ ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต พบว่า การปลูกเมล่อนพันธุ์ Green net T778 จะได้กำไร 17,352 บาท/โรงเรือน/รอบการปลูก ซึ่งการปลูกเมล่อนในเชิงการค้าด้วยขุยมะพร้าวสามารถใช้ทดแทนวัสดุปลูกที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีราคาสูง ได้แก่ พีทมอส เนื่องจาก ราคาถูก และส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของพืช [52]

S C. Kerns และ J L Lee (2560) ได้ออกแบบและนำระบบแอร์โพนิกส์อัตโนมัติใหม่มาใช้ โดยใช้อุปกรณ์ระบบ IoT ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก: 1.แอปพลิเคชันมือถือ 2.แพลตฟอร์มบริการ และ 3.อุปกรณ์ IoT ที่มีเซ็นเซอร์ แอปพลิเคชันมือถือให้ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้แบบกราฟิกแก่ผู้ใช้เพื่อตรวจสอบและปรับระบบแอร์โพนิกส์ แพลตฟอร์มบริการเป็นระบบมิดเดิลแวร์ที่ให้ข้อมูลสำหรับแอปพลิเคชันมือถือเพื่อเก็บข้อมูลที่รวบรวมจากอุปกรณ์ IoT โดยใช้เซ็นเซอร์ภายในระบบแอร์โพนิกส์ อุปกรณ์ IoT ใช้เซ็นเซอร์ภายในระบบแอร์โพนิกส์ควบคุมแต่ละปั๊มและเข้าถึงข้อมูล เป็นการใช้งานใหม่ในอุตสาหกรรมเกษตรและคาดว่าจะ เป็นแอปพลิเคชันที่มีแนวโน้มที่จะช่วยให้เกษตรกรเพิ่มผลผลิตในการเกษตรและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง [53]

K Jagesh และคณะ (2020) ได้พัฒนาระบบแอร์โพนิกส์เพื่อศึกษา NUE ในมันฝรั่งโดยใช้จีโนม สรีรวิทยา และวิธีการเพาะพันธุ์ เพื่อศึกษาฟิโนไทป์ที่แม่นยำของพืชมันฝรั่งสองสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน (Kufri Gaurav, N มีประสิทธิภาพ; Kufri Jyoti, N ไม่มีประสิทธิภาพ) ในระบบแอร์โพนิกส์แบบใหม่ พืชปลูกในแอร์โพนิกส์ภายใต้สภาวะควบคุมที่มีระดับ N ( $0.75 \text{ mmol L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ ) ต่ำ และ N สูง ( $7.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ ) ชีวมวลของพืช ลักษณะราก ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และ N ของพืช เพิ่มขึ้นตามปริมาณ NUE ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่พารามิเตอร์ NUE ที่สูงขึ้น ได้แก่ NUE, NUE ทางการเกษตร (AgNUE), N ประสิทธิภาพการดูดซึม (NUpE), ดัชนีการเก็บเกี่ยว (HI) และดัชนีการเก็บเกี่ยว N (NHI) ถูกสังเกตที่ N ต่ำ การหาพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพของ NUE Kufri Gaurav แสดงให้

เห็นน้ำหนักแห้งของหัวที่สูงกว่า ผลผลิตหัวสด จำนวนหัวต่อต้น การเริ่มเก็บเกี่ยวหัวในช่วงต้น ลักษณะราก ลักษณะสโตลอน พารามิเตอร์ NUE และปริมาณกรดอะมิโน (กรดแอสปาร์ติกและแอสพาราจिन) ที่สูงขึ้นที่แหล่งจ่าย N ต่ำ การแสดงออกของไนเตรตรีดักเตส (NR), ไนไตรท์รีดักเตส (NIR) และยีน asparagine synthetase (AS) ที่สูงขึ้นถูกสังเกตพบในเนื้อเยื่อใบของ Kufri Gaurav ที่ N สูง ดังนั้นพีโนไทป์ที่มีความแม่นยำตามแอร์โพนิกส์ช่วยให้สามารถระบุจีโนไทป์ที่มีประสิทธิภาพ NUE ตาม ลักษณะสำคัญและยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุง NUE ในมันฝรั่ง นอกจากนี้ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าศักยภาพของแอร์โพนิกส์สามารถใช้ในการตรวจสอบชีววิทยา N ในมันฝรั่งภายใต้ระบอบการปกครองที่แตกต่างกัน [54]

ธนกร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์ (2557) นำเสนอการออกแบบสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร่ดินแบบการทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำ ร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้ PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุม โดยรับสัญญาณอนาล็อกจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ผ่านอุปกรณ์ รับสัญญาณอนาล็อก เพื่อให้ PLC ประมวลผล และใช้ดิจิทัลโวลท์มิเตอร์แสดงค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนบริเวณหน้าตู้ควบคุม ระบบควบคุมที่ออกแบบสร้างสามารถทำงานได้ ทั้งแบบการควบคุมด้วยมือและแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเริ่มและหยุดการทำงานได้ตามเวลาที่กำหนดไว้ และสามารถสั่งให้ระบบการทำความเย็นด้วยวิธีการ ระเหยของน้ำและระบบสเปรย์ละอองน้ำ ทำงานตามเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดไว้ เพื่อรักษาให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แนะนำสำหรับการปลูกพืชไร่ดินในโรงเรือน โดยอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ย 30.45 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเฉลี่ย 80.54 เปอร์เซ็นต์ระบบสเปรย์ละอองน้ำทำงานเฉลี่ย 10 นาทีต่อวัน ระบบการทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำทำงานเฉลี่ย 6.37 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก เป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า น้ำ และคนงานได้ สามารถนำไปใช้ควบคุมการทำงานของโรงเรือนเพาะปลูกสำหรับบ้านพักอาศัยได้เป็นอย่างดี [55]

ประกาย คำภูศิริ และวรสันต์ บุรณากาญจน์ (2564) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคโนโลยีและออกแบบพื้นที่สำหรับปลูกผักไร้สารพิษให้เหมาะสมกับพื้นที่ในอาคารพาณิชย์หรือทาวน์เฮาส์ และศึกษาผลที่ได้จากการปลูกผักไร้สารพิษทั้งจากแปลงที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์และส่องไฟสว่างตอนกลางคืนกับแปลงที่ไม่ใช่ ประชากรและตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ คือ ต้นผักกรีนโอ๊ค จำนวน 60 ต้น การศึกษานี้พบว่า แปลงผักทั้งสองแปลงถูกออกแบบให้มีปัจจัยในการเจริญเติบโตของพืชครบถ้วน 4 องค์ประกอบ ได้แก่ อากาศ น้ำ ธาตุอาหาร และที่ค้ำจุนลำต้น นอกจากนี้ แปลงผักทั้งสองยังถูกออกแบบให้เป็นการปลูกพืชในน้ำแบบน้ำไหล ซึ่งมีมีม้มน้ำเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำ และยังถูกออกแบบให้มีความสวยงามเพื่อเป็นพื้นที่สีเขียวสำหรับนั่งพักผ่อนหย่อนใจได้อีกด้วย ผลที่ได้จาก

การปลูกผักพบว่า แพลงที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์และส่องไฟสว่างตอนกลางคืนใช้เวลาในการปลูกและพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าแพลงที่ไม่ใช้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [56]

นภัทร วัจนเทพินทร์ และ ไชยยันต์ บุญมี (2560) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคโนโลยี โรงงานผลิตพืช (Plant Factory) เป็นเทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบปิดหรือกึ่งปิด ที่สามารถควบคุม สภาพแวดล้อมต่างๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยนำเอาเทคโนโลยีเข้ามา จัดการด้านการเกษตร โดยใช้แสงแดดเทียมจากหลอด LED จึงสามารถปลูกผักเป็นชั้นได้ โดยที่ไม่ต้อง กังวลว่าผักที่อยู่ชั้นใต้จะไม่ได้รับแสงแดดจากดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นการใช้พื้นที่ให้เกิดประสิทธิภาพ สูงสุด เหมาะสมสำหรับผู้ที่มีพื้นที่จำกัด เทคโนโลยี Plant Factory เหมาะสำหรับการปลูกพืชที่มี มูลค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชในกลุ่มสมุนไพร ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ช่วง คลื่นแสง ความเข้มของแสง ค่าระดับอุณหภูมิ ความชื้น แร่ธาตุต่าง ๆ และปริมาณก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต โดยเลือกใช้หลอดไฟ LED เป็น แหล่งกำเนิดของแสง เนื่องจากให้ความร้อนน้อยกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ ประหยัดไฟมากกว่า และ สามารถเลือกสีของแสงตามความเหมาะสมของต้นพืชได้ [57]

ปรีชา มหาไม้ และคณะ(2557) นำเสนอระบบให้น้ำแบบอัตโนมัติใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ ติดตามดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบให้น้ำแบบอัตโนมัติสำหรับ สวนผลไม้ในพื้นที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลื่อนตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ทั้งแนวอัลติจูดและ แนวอะซิมูทเป็นแหล่งพลังงานให้ระบบ ใช้ลำโพงในการทดสอบจำนวน 20 ต้น ใช้ชุดควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลสัญญาณสั่งให้มอเตอร์กระแสตรง หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 2 แนวแกน ไปยังจุดที่มีความเข้มแสงสูงสุด ระบบให้น้ำจะใช้เทคนิคการวัดความชื้นดินด้วย เซนเซอร์ECHO2-20 ทำการประมวลผล สัญญาณผ่านชุดควบคุมการให้น้ำโดยแสดงผลด้วย คอมพิวเตอร์แบบเวลาจริงพัฒนาด้วยโปรแกรม Visual Basic studio ผลการทดสอบพบว่า แบบที่มี การเคลื่อนที่ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ สามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติด ตั้งอยู่กับที่ คิดเป็นร้อยละ 17.72 และการให้น้ำจุดความชื้นดินที่เหมาะสมของลำไยจะอยู่ที่ร้อยละ 12 และหยุดให้น้ำที่จุดความชื้นดินร้อยละ 25 ส่งผลให้ผู้ดูแลสวนประหยัดเวลาและแรงงาน [58]

ศุภฤกษ์ เชาวลิตรระกูล (2560) นำเสนอระบบปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics Systems) ที่สามารถปลูกผักสลัดในคอนโดหรือห้องเช่าได้ด้วยอุปกรณ์อาδυโน้ โดย การใช้เซนเซอร์วัดแสง รับค่าจากแสงแดดส่งไปยังอาδυโน้แบบเรียลไทม์ เพื่อประมวลผลและสั่งรีเลย์ เปิด-ปิดไฟ LED ทดแทนแสงแดด ใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำรับค่าจากปริมาณน้ำในระบบส่งไปยัง อาδυ โน้แบบเรียลไทม์ เพื่อประมวลผลและสั่งรีเลย์เปิด-ปิดการปล่อยน้ำ ทั้งยังสามารถดูค่าของแสง (ค่า ลักซ์) ค่าระดับน้ำ และสามารถสั่งเปิด-ปิดไฟ LED เปิด-ปิดการปล่อยน้ำเข้าสู่ระบบผ่านทาง แอปพลิเคชัน Blynk ในสมาร์ตโฟนได้แบบเรียลไทม์ ในการทดลองจะเปรียบเทียบค่าแสงกับผักสลัดที่

ปลูกในระบบดังกล่าว และผักสลัดที่ใช้วิธีการปลูกแบบธรรมชาติ ผลการทดลองจริงพบว่าระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์สามารถรักษาช่วงของค่าแสงที่เหมาะสมแก่การปลูกผักสลัดได้อย่างสม่ำเสมอกว่าวิธีการปลูกแบบธรรมชาติ โดยค่าแสงเบี่ยงเบนมาตรฐานของผักสลัดที่ปลูกในระบบคือ 8.83 % ในขณะที่ผักสลัดที่ปลูกด้วยวิธีธรรมชาติได้รับแสงต่ำกว่าค่าแสงที่ผักสลัดต้องการ และไม่สม่ำเสมอ โดยค่าแสงเบี่ยงเบนมาตรฐานของผักสลัดที่ปลูกด้วยวิธีธรรมชาติ คือ 21.66 % ทำให้ผักสลัดที่ปลูกในระบบสามารถเติบโตได้อย่างเต็มที่ และเติบโตได้เร็วกว่าวิธีปลูกแบบธรรมชาติ 10 วัน และมีขนาดใบที่ใหญ่กว่าผักสลัดที่ปลูกด้วยวิธีธรรมชาติ [59]

อรรถพล กัณหา (2550) ได้ทำวิจัย เรื่อง “การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์” ผลการศึกษาพบว่า ปัจจุบัน ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์เป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากได้ผลผลิตที่ดีและมีผลกระทบต่อจากสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติและผลผลิตที่ได้มีระยะเวลาในการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่าแต่ในปัจจุบันการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ยังเป็นลักษณะที่มนุษย์เป็นผู้ควบคุมปัจจัยต่างๆ จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ยากที่จะเป็นไปตามที่กำหนดไว้ และเกิดความยุ่งยากในการดูแล ด้วยเหตุนี้จึงออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อใช้ในการควบคุมค่าความนำไฟฟ้าและค่าความเป็น กรด-ด่าง ของสารละลายที่นำไปเลี้ยงพืช เพื่อควบคุมสภาวะให้เหมาะสมตามที่พืชต้องการในการทดลองนี้จะเก็บผลการเจริญเติบโตของพืชเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้ระบบอัตโนมัติ ซึ่งพบว่าการใช้ระบบอัตโนมัตินั้นทำให้พืชมีการเจริญเติบโตที่เร็วกว่า อีกทั้งในส่วนของ การเก็บข้อมูลการลงทุนนั้นยังให้ผลของระยะเวลาการคืนทุนที่สั้นกว่าอีกด้วย [60]

จารุกิตต์ พิบูลนฤตม (2561) งานวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาระบบหมუნเวียนน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมในการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์แบบเคลื่อนที่ได้ การออกแบบระบบหมუნเวียนน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบหมუნเวียนน้ำ 24 ชั่วโมงและโครงสร้างระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ สามารถปลูกตามพื้นที่จำกัดได้โดยใช้อุปกรณ์และประหยัดพลังงาน จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์แบบเคลื่อนที่ได้ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์พบว่า ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (A) รวม 0.52 A ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้า (V) รวม 13.41 V และค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า (W) รวม 6.80 W โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 50 W ในการผลิตกระแสไฟฟ้า บัมพ์น้ำ DC ขนาด 12V ทำหน้าที่ในการสูบน้ำเพื่อหมუნเวียนน้ำในการหล่อเลี้ยงผักไฮโดรโปนิคส์ โดยกล่องควบคุมประกอบด้วย กล่องควบคุมที่ภายในกล่องประกอบด้วย Charge Controller, Breaker, Battery และดิจิตอล LED มิเตอร์วัตต์เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ ในการควบคุมการชาร์จ การทำงานของระบบไฟฟ้า และใช้สวิทช์กลอยควบคุมระดับน้ำรุ่น ST70-AB ควบคุมระดับน้ำในถังเก็บน้ำ ให้อยู่ในตำแหน่งสูงหรือต่ำตามต้องการ โดยมีแบตเตอรี่ขนาด 50 A กักเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับใช้ในช่วงกระแสไฟไม่เพียงพอ ซึ่งชุดปลูกผักไฮโดรโปนิคส์จำนวน 18 ต้น ที่มี

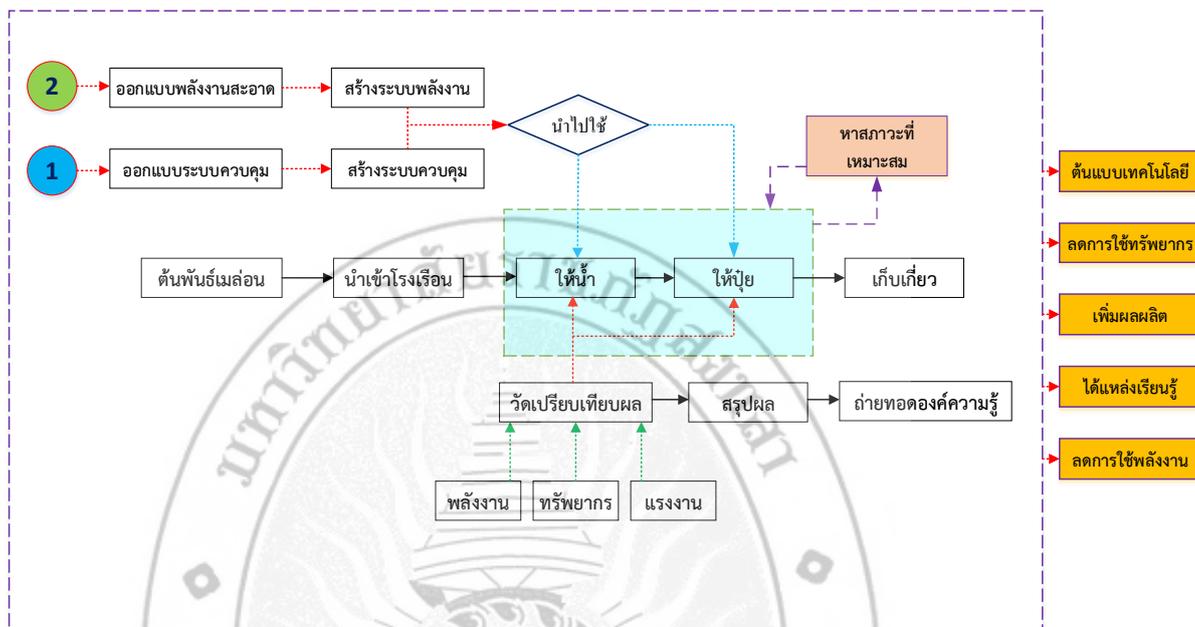
ไหลเวียนน้ำตลอด 24 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่าระบบหมุนเวียนน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ได้สามารถหมุนเวียนน้ำในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ได้ 24 ชั่วโมง/วัน ซึ่งสามารถปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ได้ดี [61]

สุเมธ ตรีศักดิ์ศรี และคณะ (2557) นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบปลูกพืชในสารละลายแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ใช้แบตเตอรี่ในการ หมุนเวียนสารละลาย มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบปลูกพืชในสารละลายโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานทดแทนให้มีต้นทุนต่ำ โดยประกอบด้วย แผงโซลาร์เซลล์ 5 W จำนวน 3 แผง ปั๊มน้ำกระแสตรง (DC) ขนาด 12 V จำนวน 1 เครื่อง โตะปลูกขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 4 เมตร จำนวน 1 โตะทำการ ทดสอบประสิทธิภาพของระบบปลูกโดยทำการปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค เป็นเวลา 43 วัน พบว่าผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกบนระบบปลูกพืชในสารละลายแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ใช้แบตเตอรี่ในการหมุนเวียนสารละลาย มีขนาดของทรงพุ่ม  $21.85 \pm 0.25$  เซนติเมตร มีความยาวราก  $22.05 \pm 0.41$  เซนติเมตร มีน้ำหนักสดของต้น  $25.98 \pm 1.12$  กรัม มี น้ำหนักสดของราก  $13.26 \pm 0.54$  กรัม มีน้ำหนักแห้งของต้น  $1.69 \pm 0.07$  กรัม และ มีน้ำหนักแห้งของราก  $1.06 \pm 0.07$  กรัม มีต้นทุนการผลิต 7,850 บาท และมีระยะเวลาการคืนทุน 1 ปี 8 เดือน [62]

อาทิตย์ยา แน่นแน่น และคณะ (2564) นำเสนอการออกแบบระบบรดน้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาต้นแบบระบบรดน้ำแบบอัตโนมัติสำหรับสวนกระเทียมและในพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าถึงยากโดยใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนและมีระบบสั่งการผ่านสมาร์ทโฟน ระเบียบวิธีในการพัฒนาระบบใช้แบบจำลองแบบน้ำตกในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งผ่านบอร์ด NodeMCU ESP8266 เขียนคำสั่งโปรแกรมเพื่อควบคุมตรวจสอบด้วยซอฟต์แวร์ชื่อ Arduino software 1.8.6 และแอปพลิเคชัน App Blynk เป็นระบบสั่งการผ่านสมาร์ทโฟน นำระบบที่พัฒนาเสร็จสมบูรณ์ให้ผู้ใช้งานทดสอบ ทดลองใช้งานและประเมินผล สรุปผล มีการพื้นที่ปลูกกระเทียมในการทดสอบประมาณ 1 ตารางวาและชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผล สัญญาณหมุนแผงโซลาร์เซลล์ไปในทิศทางของแสงไปยังจุดที่มีความเข้มแสงสูงสุด ระบบให้น้ำจะใช้การประมวลผลการวัด ความชื้นในดินด้วยเซนเซอร์ทำการประมวลผลสัญญาณผ่านชุดควบคุมการให้น้ำเมื่อถึงค่าความชื้นในดินที่เหมาะสมกับต้น กระเทียม และสั่งการผ่านสมาร์ทโฟนด้วยแอปพลิเคชัน App Blynk ผลการทดสอบพบว่า ระบบรดน้ำกระเทียมโดยระบบ ควบคุมช่วยลดต้นทุนในการผลิตและประหยัดเวลา ทำให้เกษตรกรสามารถวางแผนควบคุมการผลิต และเก็บเกี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [63]

## กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยได้วางกรอบแนวคิดเพื่อนำไปสู่การวางแผนดำเนินงานเพื่อให้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของโครงการโดยมีรายละเอียดแสดงดังภาพที่



ภาพที่ 2.20 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

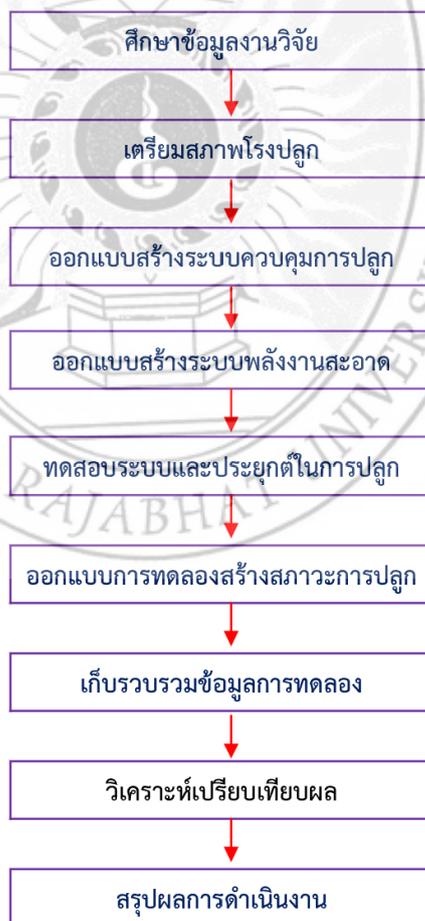
จากกรอบแนวคิดนำมาสู่ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการดำเนินงานวิจัยเพื่อการออกแบบและสร้างระบบการเพาะปลูกให้มีความแม่นยำ เที่ยงตรงผ่านวิธีการควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติที่จะนำมาช่วยในการควบคุมสภาวะของการปลูกให้มีความสมดุลและเกิดความเหมาะสมในการดำเนินงานวิจัย มีส่วนประกอบของทฤษฎีที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจและเรียนรู้มีรายละเอียดตามเนื้อหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปลูกเมลอนด้วยวิธีการรากแขวนโดยใช้พลังงานสะอาด โดยมีพื้นที่ดำเนินการวิจัย ณ วิทยาลัยชุมชนนิคม ตำบลทุ่งหญ้า อำเภอทุ่งหญ้า จังหวัดสตูล กระบวนการวิจัยประกอบด้วย การเตรียมความพร้อมของสถานที่ การออกแบบและสร้างระบบการเพาะปลูกแบบแอโรโพนิกส์ควบคุมกับระบบพลังงานสะอาด การทดสอบระบบ การประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกเมลอน การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ผล และการสรุปผล โดยมีขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3.1

#### ขั้นตอนและแผนดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยได้มีการวางแผนกระบวนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กระบวนการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักดังนี้

1. ออกแบบและสร้างระบบการใช้พลังงานสะอาดเพื่อควบคุมระบบ
2. ทดสอบและประยุกต์ใช้ระบบในการเพาะปลูกเมลอน
3. ออกแบบการทดลองเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก
4. เก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง
5. วิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการปลูกด้วยถุงปลูกและแบบรากแขนง
6. สรุปผลการดำเนินงานและปัญหาที่พบ

### การออกแบบและสร้างระบบการเพาะปลูก

กระบวนการนี้มุ่งเน้นการพัฒนาาระบบที่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร โดยมีขั้นตอนดังนี้  
**การสำรวจและปรับปรุงพื้นที่:** ได้ทำการสำรวจพื้นที่โรงเรือนเดิมซึ่งมีปัญหาน้ำท่วมขังเนื่องจากเป็นพื้นที่ลุ่ม จึงดำเนินการถมดินและปรับสภาพพื้นโรงเรือนให้สูงขึ้นและเรียบ เพื่อป้องกันผลกระทบต่อระบบการปลูก

1. การสร้างแปลงปลูก:

ระบบแอโรโพนิคส์: ออกแบบและสร้างโครงสร้างรองรับแปลงปลูกโดยใช้วัสดุที่ทนทานเช่น PVC หรือเหล็ก สามารถรองรับการแขวนรากพืชและระบบพ่นละอองสารอาหารได้ มีการวางระบบท่อส่งน้ำและติดตั้งหัวพ่นหมอก (Fogger) เพื่อให้สารอาหารแก่รากพืชอย่างสม่ำเสมอ

ระบบดั้งเดิม: จัดเตรียมแปลงปลูกในถุงเพาะชำควบคู่กันไปโรงเรือนเดียวกันเพื่อใช้เป็นกลุ่มควบคุมในการเปรียบเทียบ

การเตรียมพันธุ์พืช: เลือกใช้เมลอนพันธุ์คิมจิ (Kimoji) ซึ่งเป็นที่นิยมและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศภาคใต้ของไทย โดยเริ่มจากการเพาะเมล็ดและอนุบาลต้นกล้าเป็นเวลา 7 วันเพื่อให้มีความแข็งแรงก่อนย้ายลงแปลงปลูกทั้งสองระบบ

การจัดการสารอาหาร: ใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร AB โดยมีการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.5 เพื่อให้พืชดูดซึมธาตุอาหารได้อย่างเหมาะสม

### การออกแบบและสร้างระบบควบคุมและพลังงานสะอาด

1. สถาปัตยกรรมระบบควบคุม:

พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อตรวจสอบและจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือนจากระยะไกล สถาปัตยกรรมประกอบด้วย :

หน่วยเซนเซอร์: ใช้เซนเซอร์ SHT30 และ DHT22 ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน

หน่วยควบคุมหลัก: ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง รับข้อมูลจากเซนเซอร์และสั่งการอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์สั่งการ (Actuators): ประกอบด้วยปั้มน้ำ, หัวพ่นหมอก, และพัดลมระบายอากาศ

ระบบสื่อสารและแสดงผล: ข้อมูลถูกส่งผ่าน Wi-Fi ไปยังเซิร์ฟเวอร์ IoT (ติดตั้งบน Raspberry Pi) และผู้ใช้สามารถตรวจสอบข้อมูลและควบคุมระบบผ่านเว็บแอปพลิเคชัน พร้อมรับการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify

การสร้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์: เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากภายนอกและสนับสนุนการทำเกษตรในพื้นที่ห่างไกล ได้ออกแบบและติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ โดยมีรายละเอียดดังนี้ :

การประเมินความต้องการพลังงาน: คำนวณภาระโหลดรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดในโรงเรือนได้ประมาณ 1,434 วัตต์-ชั่วโมงต่อวัน

2. ส่วนประกอบของระบบ:

แผงโซลาร์เซลล์: ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ กำลังผลิตรวมไม่น้อยกว่า 500 วัตต์

ตัวควบคุมการชาร์จ: แบบ MPPT ขนาด 50 แอมป์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดึงพลังงาน

แบตเตอรี่: ชนิด Deep Cycle ขนาด 12V 200Ah สำหรับเก็บพลังงานสำรอง

อินเวอร์เตอร์: ชนิด Pure Sine Wave ขนาด 800 วัตต์ สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

การติดตั้ง: ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ท่ามุม 30 องศาไปทางทิศตะวันออกเพื่อการรับแสงสูงสุด

### การออกแบบการทดลอง

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกเมลอน ได้วางแผนการทดลองโดยเปรียบเทียบ 2 รูปแบบการปลูก และใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (Design of Experiments: DOE) สำหรับระบบแอโรโพนิกส์ :

การปลูกแบบดั้งเดิม (กลุ่มควบคุม): ปลูกเมลอนจำนวน 21 ต้นในถุงเพาะชำ ให้น้ำและปุ๋ยด้วยระบบอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนดไว้ (6 ครั้งต่อวัน) ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติของเกษตรกรในพื้นที่

การปลูกแบบแอโรโพนิกส์ (กลุ่มทดลอง): จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงเวลาการให้น้ำที่เหมาะสม ได้นำข้อมูลมาออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้เทคนิค Central Composite Design (CCD) ซึ่งได้รูปแบบการทดลองทั้งหมด 13 รูปแบบ แต่ละรูปแบบมีการกำหนดช่วงเวลาการพ่น (Spray) และหยุดพ่น (Stop) สารละลายธาตุอาหารที่แตกต่างกันตลอดทั้งวัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวต่อการเจริญเติบโตของเมลอน โดยแต่ละรูปแบบการทดลองมีการปลูกซ้ำจำนวน 3 ต้น รวมเป็น 39 ต้น

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (ประมาณ 90 วัน) โดยมีรายละเอียดดังนี้ :

**ข้อมูลการเจริญเติบโต:** วัดและบันทึกข้อมูลทางกายภาพของต้นเมลอนเป็นประจำทุกสัปดาห์ ได้แก่ ความสูงของต้น, เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น, ขนาดของใบ (ความกว้างและความสูง), และขนาดผล (เส้นรอบวงและความสูง)

**ข้อมูลผลผลิต:** เมื่อครบอายุการเก็บเกี่ยว (80-90 วัน) จะทำการชั่งน้ำหนักผลและวัดค่าความหวาน (Brix)

**ข้อมูลการใช้ทรัพยากร:** บันทึกปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh) และปริมาณการใช้น้ำและปุ๋ย (ลิตร) ของทั้งสองระบบตลอดรอบการปลูก

**เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล:** เวอร์เนียร์คาลิเปอร์, สายวัด, ตลับเมตร, เครื่องชั่งน้ำหนัก, และเครื่องวัดค่าความหวาน (Brix test)

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่รวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติและเศรษฐศาสตร์เพื่อสรุปผลการวิจัย :

**การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ:** เปรียบเทียบข้อมูลการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิต (น้ำหนัก, ความหวาน) ระหว่างกลุ่มควบคุม (การปลูกในถาด) และกลุ่มทดลอง (การปลูกแบบแอโรโพนิคส์)

**การวิเคราะห์ทางสถิติ:** นำข้อมูลจากการทดลองแบบแอโรโพนิคส์ทั้ง 13 รูปแบบมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อค้นหาปัจจัย (ช่วงเวลาการพ่นและหยุดพ่น) ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ และเพื่อหาสมการความสัมพันธ์และสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition)

**การวิเคราะห์ต้นทุน:** เปรียบเทียบต้นทุนด้านทรัพยากรที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณการใช้น้ำ, ปุ๋ย, และพลังงานไฟฟ้า ระหว่างสองระบบการปลูก เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

วิธีการดำเนินงานนำไปสู่กระบวนการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการโดยมีรายละเอียดนำเสนอต่อบทต่อไป

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่วางแผนไว้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยเริ่มจากการเตรียมโรงเรือนและสร้างแปลงปลูก จากนั้นจึงพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสนับสนุนการทำงานของระบบ นำระบบที่สร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกเมล่อน โดยมีการออกแบบการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโต ในระหว่างการเพาะปลูกได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลการเจริญเติบโตและปัจจัยแวดล้อม และนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ด้านต้นทุนและคุณภาพของผลผลิตระหว่างสองระบบการปลูก ซึ่งรายละเอียดของผลการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนจะถูกนำเสนอในบทนี้

### ออกแบบสร้างระบบการปลูกด้วยระบบรากแขวนในอากาศ

การสร้างระบบปลูกเพื่อรองรับการปลูกแบบรากแขวนในอากาศจะต้องมีการเตรียมรายละเอียดต่างๆ ของโรงเรือนและส่วนประกอบสำหรับนำมาควบคุมกระบวนการปลูกให้เป็นไปตามลักษณะการปลูก พร้อมเตรียมระบบปลูกในรูปแบบเดิมอยู่ในโรงเรือนเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลอง โดยเริ่มนำปัจจัยที่มีอยู่แล้วมาเป็นตัวตั้งและพัฒนาเพิ่มเติมให้ได้โรงเรือนที่มีความสามารถรองรับการปลูกตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย เพื่อสร้างสภาวะการปลูกให้เหมาะสมและเตรียมสถานที่ปลูกให้ตอบสนองการปลูกในรูปแบบการปลูกแบบรากแขวนและเหมาะสมกับสภาพโรงเรือนที่มีอยู่เป็นไปตามแนวทางในการทดลองโดยมีกระบวนการปรับปรุงเพื่อเตรียมสภาพโรงเรือนและแปลงปลูกมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. การสำรวจพื้นที่บริเวณแปลงปลูก

ก่อนดำเนินการปลูกเมล่อนตามแผนงานวิจัย ได้ลงสำรวจพื้นที่และบริเวณแปลงปลูก เพื่อนำไปวางแผนการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมสำหรับปลูกเมล่อน โดยวางระบบการทำงานให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแผนการดำเนินงานวิจัย แสดงลักษณะพื้นที่โรงเรือนก่อนดำเนินงานดังผิพลาต! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง และได้เก็บข้อมูลลักษณะโรงเรือนนำไปวางแผนการดำเนินการปรับปรุงโรงเรือน แสดงดังผิพลาต! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



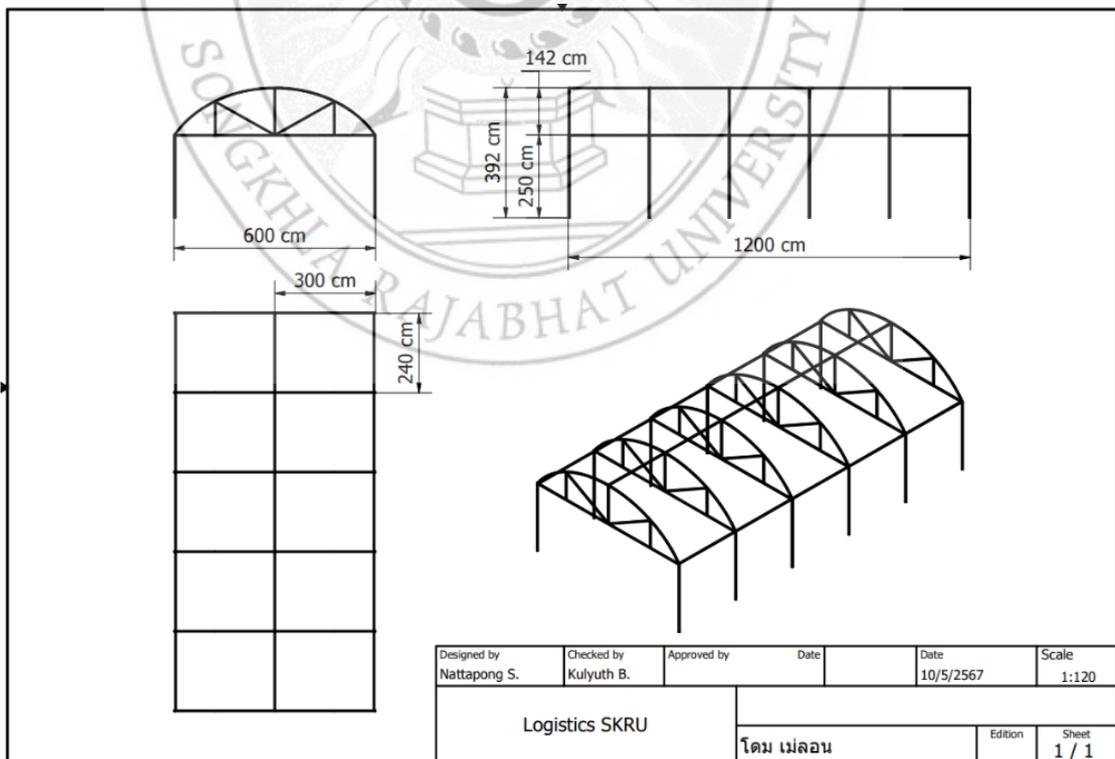
ภาพที่ 4.1 ลักษณะโรงเรือนก่อนดำเนินงาน



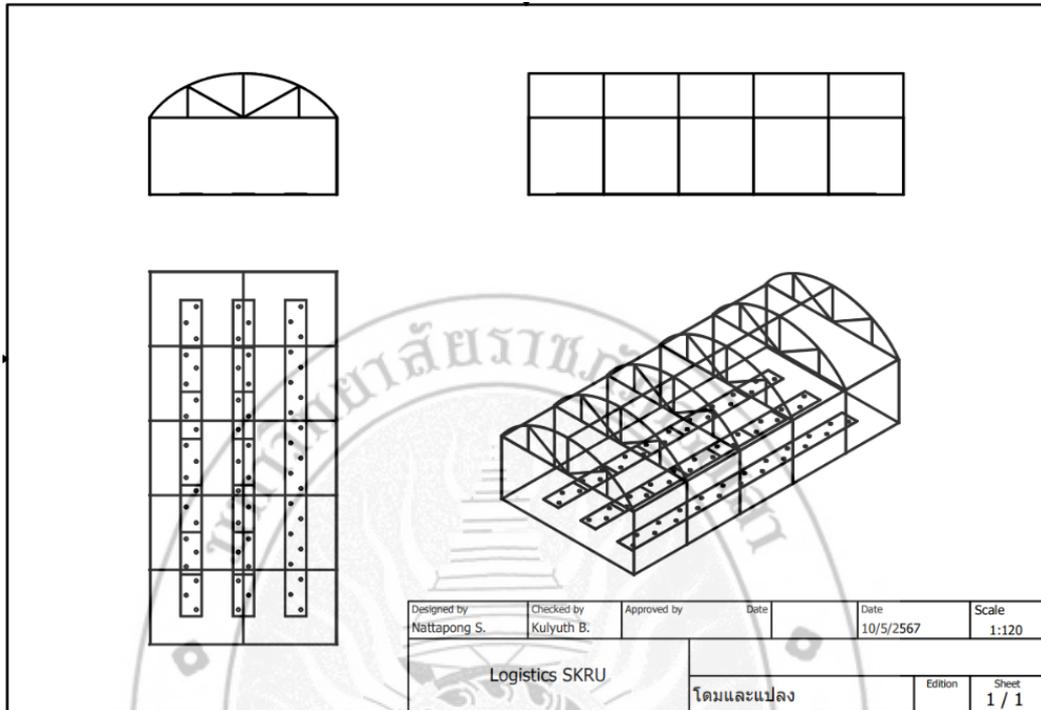
ภาพที่ 4.2 สำรวจและวางแผนการปรับปรุงโรงเรือน

เมื่อลงพื้นที่เข้าสำรวจสภาพโรงเรือนปัจจุบันที่มีอยู่เก็บข้อมูลรายละเอียดขนาดสัดส่วนของโรงเรือนนำมาสร้างแบบจำลองลักษณะโรงเรือนแสดงดัง ออกแบบการวางแนวการปลูกสำหรับการทดลองทั้งสองระบบให้อยู่ในโรงเรือนเดียวกัน โดยมีลักษณะแถวปลูกแสดงดัง

ภาพที่ 4.4 ลักษณะแบบโรงเรือนและแปลงปลูกในการทดลอง จะนำไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมและสามารถดำเนินการปลูกเมล็ดอ่อนได้ตามแผนงานที่วางไว้ นำไปสู่การปรับสภาพโรงเรือนเพื่อสร้างแปลงปลูกให้มีความพร้อมและเหมาะสมต่อการทดลองในลำดับต่อไป



ภาพที่ 4.3 แบบแสดงลักษณะและขนาดโรงเรือน



ภาพที่ 4.4 ลักษณะแบบโรงเรือนและแปลงปลูกในการทดลอง

## 2. เตรียมปรับสภาพโรงเรือนและสร้างแปลงปลูก

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนมีโรงเรือนโครงเหล็กตาข่ายอยู่แล้วบางส่วน แต่ภายในไม่ได้ใช้ทำการปลูก เพราะมีน้ำท่วมขังเนื่องจากเป็นพื้นที่ต่ำ ก่อนดำเนินงานวิจัยจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงโรงเรือนให้มีสภาพที่เหมาะสมในการทดลองปลูก ช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับการทดลอง จึงดำเนินการถมดินและปรับสภาพบริเวณโดยรอบให้เป็นพื้นเรียบป้องกันไม่ให้น้ำท่วมขัง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบการปลูกเมล่อน มีลำดับการดำเนินงานและรายละเอียดต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

### 2.1 การปรับปรุงโรงเรือน

การปรับโรงเรือนปลูกจะถมดินปรับสภาพพื้นโรงเรือนเพราะเป็นที่ลุ่มจะส่งผลให้เกิดน้ำท่วมจึงจำเป็นต้องปรับให้เป็นพื้นที่เรียบสูงกว่าระดับน้ำที่ขังอยู่ จะช่วยลดโอกาสที่จะส่งผลกระทบในการปลูก แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



## ภาพที่ 4.5 ถมดินปรับสภาพพื้นโรงเรือน

### 2.2 การสร้างระบบการปลูก

ก่อนสร้างระบบปลูกได้ออกแบบและทดลองวางตำแหน่งระบบน้ำ โครงสร้างตำแหน่งวางหลุมปลูกในโรงเรือน เพื่อความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพในการทำงาน รองรับการสร้างระบบการควบคุมการจ่ายน้ำและสารละลายปุ๋ยให้กับต้นเมล็ดอ่อนโดยมีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

- 1) กำหนดตำแหน่งวางถังเก็บน้ำและการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบปลูกแสดงดังภาพที่ 4.6-4.7



ภาพที่ 4.6 กำหนดตำแหน่งวางถังเก็บและจ่ายน้ำเข้าแปลงปลูก



ภาพที่ 4.7 วางถังใส่น้ำระบบการปลูก

- 2) ออกแบบและวางร่างตำแหน่งแปลงปลูก แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ออกแบบและวางร่างตำแหน่งแปลงปลูก

3) สร้างโครงรองรับแปลงปลูกระบบรากแขวนแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 สร้างโครงรองรับแปลงปลูกระบบรากแขวน

4) วางท่อระบบน้ำในการจ่ายเลี้ยงต้นในการปลูกแสดงดังภาพที่ 4.10



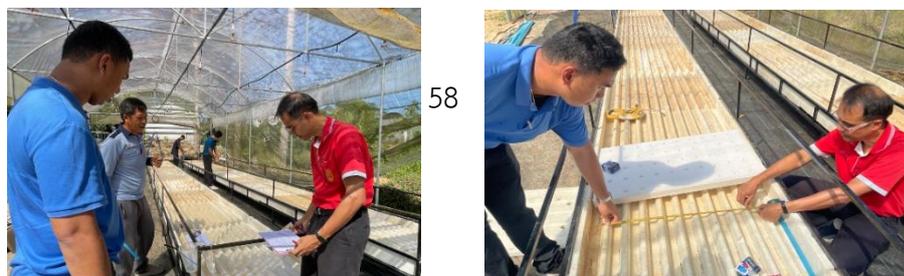
ภาพที่ 4.10 วางระบบท่อส่งน้ำเข้าแปลงปลูก

5) ออกแบบสร้างแปลงปลูกในระบบรากแขวนแสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 วางหลุมปลูกและปูแผ่นพลาสติกในตำแหน่งพื้นของแปลงปลูก

6) ออกแบบการวางหลุมปลูกและสร้างแปลงปลูกระบบรากแขวนแสดงดังภาพที่ 4.12-4.13

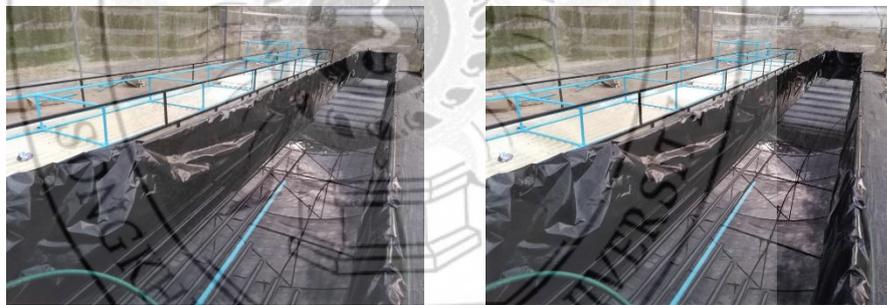


ภาพที่ 4.12 ออกแบบการวางหลุมปลูกในระบบรากแขวน



ภาพที่ 4.13 สร้างแปลงปลูกของระบบรากแขวน

7) สร้างส่วนประกอบแปลงปลูกจ่ายน้ำให้ระบบรากแขวนแสดงดังผิตพลาต! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง-4.15

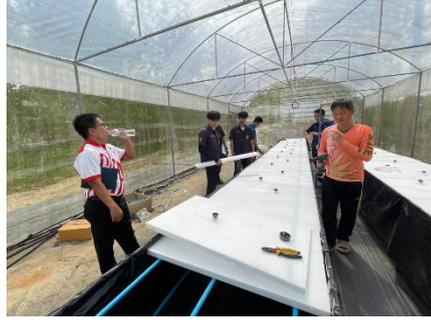
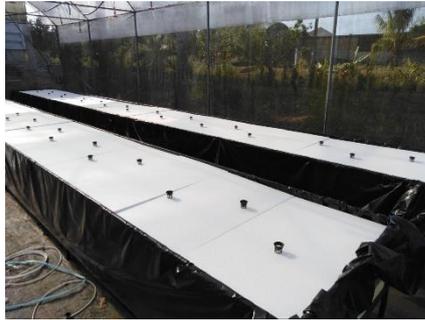


ภาพที่ 4.14 สร้างส่วนประกอบตัวปิดระบบส่วนบนของแปลงปลูก



ภาพที่ 4.15 สร้างระบบปิดหลุมปลูก

8) กำหนดตำแหน่งการวางหลุมปลูกแสดงดังผิตพลาต! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.16 กำหนดตำแหน่งหลุมปลูก

9) ผูกเชือกสำหรับโยงประคองต้นเมล็ดอ่อนในบริเวณหลุมปลูกแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.17 เตรียมตัวรับประคองลำต้นเมล็ดอ่อน

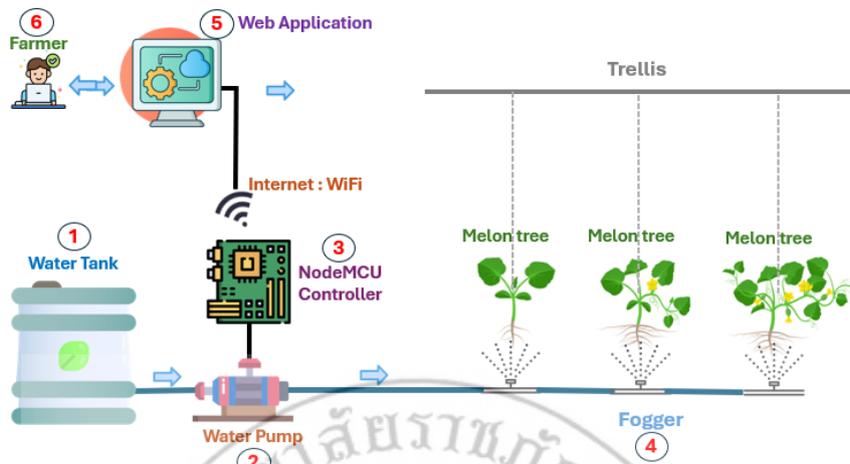
เมื่อออกแบบและสร้างแปลงปลูกเพื่อรองรับการปลูกแบบระบบรากแขวนและการปลูกดั้งเดิมแล้ว นำข้อมูลไปวางแผนการปลูกให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การทดลองในการดำเนินงานวิจัยเพื่อกำหนดรูปแบบการปลูกซึ่งมีรายละเอียดในลำดับต่อไป

### 3. ศึกษาแนวคิดและหลักการการทำงานเพื่อสร้างระบบควบคุมการปลูกแบบรากแขวน

กระบวนการดำเนินการสร้างระบบปลูกจะเริ่มจากออกแบบระบบการทำงานในส่วนต่างๆ วางแผนการดำเนินการใช้อุปกรณ์เพื่อนำมาสร้างระบบการทำงานให้มีความสามารถตอบสนองการปลูกตามรูปแบบที่ได้ออกแบบนำมาใช้โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 3.1 ออกแบบกรอบแนวคิดการทำงานระบบปลูกแบบระบบรากแขวน

ก่อนดำเนินการสร้างระบบดูแลการปลูกได้วางกรอบแนวคิดในการทำงานของระบบรากแขวนเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาสร้างระบบมีรายละเอียดการทำงานแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.18 กรอบแนวคิดการทำงานของระบบควบคุม

ภาพที่ 4.18 ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง แสดงกรอบการทำงานของระบบการปลูกเมล่อนแบบรากแขวนมีรายละเอียดของแต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้

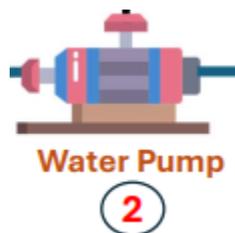
หมายเลข 1: Water Tank แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง



ภาพที่ 4.19 ภาชนะเก็บน้ำ

Water tank เป็นภาชนะเก็บน้ำ ใช้เป็นภาชนะเก็บน้ำสำหรับกักเก็บน้ำเพื่อนำไปใช้รดให้กับต้นเมล่อน โดยน้ำจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน และมีการผสมปุ๋ยน้ำสูตร AB ลงในน้ำสำหรับเป็นสารอาหารให้กับต้นเมล่อน

หมายเลข 2: Water Pump แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง



ภาพที่ 4.20 อุปกรณ์ดึงน้ำเข้าสู่ระบบ

Water Tank อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สำหรับดึงน้ำ จากภาชนะเก็บน้ำเพื่อจ่ายไปยังโรงเรือนปลูก เมล่อนการทำงานของ Water Pump จะไม่ทำงานตลอดเวลาแต่จะขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่ตั้งค่าไว้ในตัวควบคุม (หมายเลข 3) เท่านั้น

หมายเลข 3: NodeMCU Controller แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.21 อุปกรณ์สมองกลฝังตัว

Node MCU Controller เป็นอุปกรณ์สมองกลฝังตัวทำหน้าที่สำหรับประมวลผลข้อมูลและสั่งการการทำงานของ Water Pump ให้ทำงานตามคำสั่งที่ได้โปรแกรมเอาไว้ โดยในโปรแกรมจะตั้งค่าเวลาการทำงานของ Water Pump เพื่อให้ดึงน้ำจาก Water Tank สำหรับนำไปรดให้กับต้นเมล่อนหมายเลข 4: Fogger แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง

ภาพที่ 4.22 อุปกรณ์พ่นละอองหมอก

Fogger เป็นอุปกรณ์ที่ต่อโดยตรงกับท่อน้ำ ซึ่งทำหน้าที่สำหรับพ่นละอองหมอกแบบไอน้ำให้กับรากของ ต้นเมล่อน เพื่อให้รากสามารถดูดซับเอาน้ำและปริมาณของปุ๋ยและธาตุต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสำหรับการเติบโตของต้นเมล่อน

หมายเลข 5: Web Application แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.23 โปรแกรมประยุกต์

Web Application เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ทำงานผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะนำข้อมูลการปลูก เมล่อน เช่น สถานการณ์ทำงานของปั๊มน้ำ อุณหภูมิและความชื้นในบริเวณของราก และอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนมาแสดงผลให้ผู้ใช้งานได้ทราบสถานะการทำงานภายในโรงเรือน

หมายเลข 6: Farmer แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง

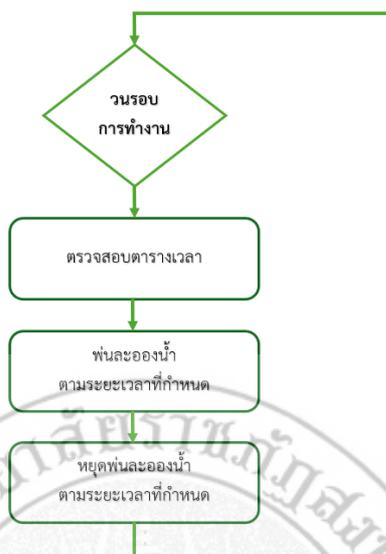


ภาพที่ 4.24 ผู้ใช้งาน หรือเจ้าของฟาร์มที่ปลูกเมล่อน

Farmer คือผู้ใช้งานหรือเจ้าของฟาร์มที่ปลูกเมล่อน ซึ่งเป็นผู้ใช้งานโดยตรงของระบบทำหน้าที่ยอดติดตามสถานะการทำงานของระบบการปลูกเมล่อนผ่าน Web Application ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานสามารถใช้งานได้ทุกที่ ทุกเวลา และทุกอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมโยงกับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

### 3.2 หลักการทำงานของระบบควบคุมการปลูกเมล่อนแบบรากแขวน

การทำงานของระบบควบคุมการปลูกเมล่อนแบบรากแขวนนั้น จะใช้อุปกรณ์สมองกลฝังตัว (หมายเลข 3) ทำหน้าที่ตรวจสอบช่วงเวลาที่กำหนดตามการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด หากพบว่าตรงกับช่วงเวลาการทำงานในรูปแบบใด ก็จะสั่งให้ปั๊มน้ำ (หมายเลข 2) ทำงานโดยดึงน้ำจากถังเก็บน้ำ (หมายเลข 1) ส่งน้ำไปยังตัวพ่นน้ำ (หมายเลข 4) เพื่อพ่นละอองน้ำให้กับรากของต้นเมล่อน สำหรับการพ่นหรือหยุดพ่นจะทำงานสลับกันไปตามจำนวนเวลาที่กำหนดไว้จากรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นต้นเมล่อนจะได้รับน้ำและสารอาหารด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำตามตารางเวลาที่กำหนดไว้ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแสดงในรูปแบบแผนภูมิการไหล (Flow chart) ดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.25 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม

ภาพที่ 4.25 แสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุม โดยโปรแกรมจะทำงานแบบวนรอบไปเรื่อย ๆ ในแต่ละวงรอบการทำงาน จะทำการตรวจสอบตารางเวลาว่าตรงกับเวลาใดจากรูปแบบการทดลอง เพื่อได้ค่าระยะเวลาสำหรับการพ่นและระยะเวลาสำหรับหยุดพ่นละอองน้ำ จากนั้นโปรแกรมจะสั่งให้ระบบทำการพ่นละอองน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด และเมื่อพ่นเสร็จจะสั่งให้หยุดพ่นละอองน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อทำงานเสร็จโปรแกรมจะทำการวนรอบการทำงานครั้งต่อไป โดยจะวนรอบการทำงานไปเรื่อย ๆ เพื่อควบคุมการปลูกเมล็ดอินให้เป็นไปตามปัจจัยการทดลอง

#### 4. การออกแบบและพัฒนาสร้างระบบควบคุมโรงเรือน

เพื่อความเหมาะสมและโอกาสของความเป็นไปได้ตามวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานวิจัยจึงต้องมีการศึกษาข้อมูลและแนวทางที่สามารถตอบสนองต่อการดำเนินงานนำมาสู่การแสวงหาส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ นำไปใช้ในการสร้างระบบเพื่อควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามความคาดหวังในการดำเนินงานวิจัยซึ่งมีส่วนประกอบและรายละเอียดเพื่อการสร้างระบบควบคุมกระบวนการปลูกดังนี้

##### 4.1 สถาปัตยกรรมระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบตามที่แสดงดังภาพที่ 4.26 ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ หน่วยควบคุม (Controller), เซนเซอร์, แอคชูเอเตอร์ (Actuator) และอุปกรณ์ที่ถูกควบคุม นอกจากนี้ ยังรวมถึงโมดูลสื่อสาร, โมดูลแสดงผล และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็น ซึ่งทั้งหมดนี้ทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ เพื่อให้สามารถควบคุมและจัดการสภาพแวดล้อมได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ออกแบบมาเพื่อเป็นแนวทางที่มีต้นทุนต่ำในการตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมบริเวณรากของเมล็ดอ่อนและภายในโรงเรือน โดยสามารถดำเนินการควบคุมได้จากระยะไกลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทั้งในรูปแบบอัตโนมัติและแบบแมนนวล เพื่อรองรับการใช้งานในสถานการณ์ที่หลากหลาย



ภาพที่ 4.26 สถาปัตยกรรมของระบบควบคุมโรงเรือน

ภาพที่ 4.26 แสดงถึงสถาปัตยกรรมระบบควบคุมและตรวจสอบสภาพแวดล้อมในโรงเรือนปลูกเมล็ดอ่อนแบบแอโรโพนิกส์ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างแม่นยำ โดยมีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมการผลิตทางการเกษตรในพื้นที่จำกัด และรองรับแนวคิดฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farming) ระบบประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังต่อไปนี้:

#### 4.1.1 หน่วยเซนเซอร์ (Sensors)

ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งติดตั้งภายในโรงเรือนและบริเวณรากของพืชเมล็ดอ่อน เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งผ่านการสื่อสารแบบความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) ไปยังหน่วยควบคุมหลัก

#### 4.1.2 หน่วยควบคุมหลัก (ESP32 Controller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ แล้วประมวลผลเพื่อตัดสินใจควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แอกชูเอเตอร์ เช่น พัดลมและหัวพ่นหมอก โดยสามารถทำงานได้ทั้งแบบอัตโนมัติ (Automated Control) และแมนนวล (Manual Override) การควบคุมแบบอัตโนมัติจะเกิดขึ้นเมื่อค่าพารามิเตอร์เกินช่วงค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

#### 4.1.3 อุปกรณ์ปฏิบัติการ (Actuators)

ได้แก่ พัดลมระบายอากาศ และหัวพ่นหมอก (Mist Nozzle) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุม อุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชเมล็ดอ่อน ระบบจะส่งงานอุปกรณ์เหล่านี้ ผ่านสัญญาณ RF จาก ESP32

#### 4.1.4 ระบบสื่อสารผ่าน Wi-Fi และ IoT Server

ESP32 เชื่อมต่อกับ เราเตอร์ (Router) ผ่าน Wi-Fi และส่งข้อมูลขึ้นไปยัง เซิร์ฟเวอร์ IoT ซึ่งติดตั้งบนอุปกรณ์ Raspberry Pi โดยทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลบน เครือข่าย สามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตได้อย่างปลอดภัย

#### 4.1.5 การเข้าถึงระยะไกลโดยผู้ใช้งาน (Farmer Remote Access)

เกษตรกรหรือผู้ดูแลระบบสามารถเข้าถึงข้อมูลและควบคุมระบบจากระยะไกลผ่าน อุปกรณ์พกพา เช่น คอมพิวเตอร์หรือสมาร์ตโฟน ผ่านเว็บแอปพลิเคชันที่เชื่อมต่อกับ IoT Server ข้อมูลที่แสดงได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ความชื้น สถานะการทำงานของพัดลมและหัวพ่นหมอก รวมถึงการ แจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ผ่าน LINE Notify

สถาปัตยกรรมระบบที่นำเสนอในภาพนี้มุ่งเน้นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่น ประหยัดพลังงาน และสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในบริบทของเกษตรกรรมเมือง (Urban Agriculture) หรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร โดยเป็นแนวทางที่ช่วยลดการพึ่งพาแรงงาน และเพิ่ม ประสิทธิภาพการเพาะปลูกผ่านระบบอัตโนมัติและการติดตามผลแบบต่อเนื่อง

### 4.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ก่อนดำเนินการติดตั้งระบบฮาร์ดแวร์ ผู้วิจัยได้เชื่อมต่อเซนเซอร์ SHT30 และ DHT22 เข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว โดยทำการบันทึกค่าที่ได้จาก เซนเซอร์ทั้งสองในห้องปฏิบัติการ (LAB) และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน จากนั้นได้คำนวณค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อน (%Error) เพื่อประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้มั่นใจว่าเซนเซอร์ที่เลือกใช้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ผลการทดสอบจะแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) ของเซนเซอร์ SHT30 และ DHT22 เปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน

เวลา	ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error)			
	เซนเซอร์ SHT30		เซนเซอร์ DHT22	
	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์
06.00	0.67	1.31	0.69	1.32
07.00	0.62	1.19	0.66	1.21

08.00	0.65	1.28	0.64	1.30
09.00	0.67	1.28	0.70	1.25
10.00	0.68	1.40	0.68	1.48
11.00	0.63	1.13	0.69	1.21
12.00	0.62	1.23	0.74	1.29
13.00	0.65	1.35	0.65	1.45
14.00	0.58	1.37	0.62	1.35
15.00	0.61	1.23	0.60	1.29
16.00	0.65	1.32	0.78	1.30
17.00	0.57	1.35	0.65	1.41
18.00	0.67	0.67	0.71	0.65
ค่าเฉลี่ย	0.64	1.24	0.68	1.27

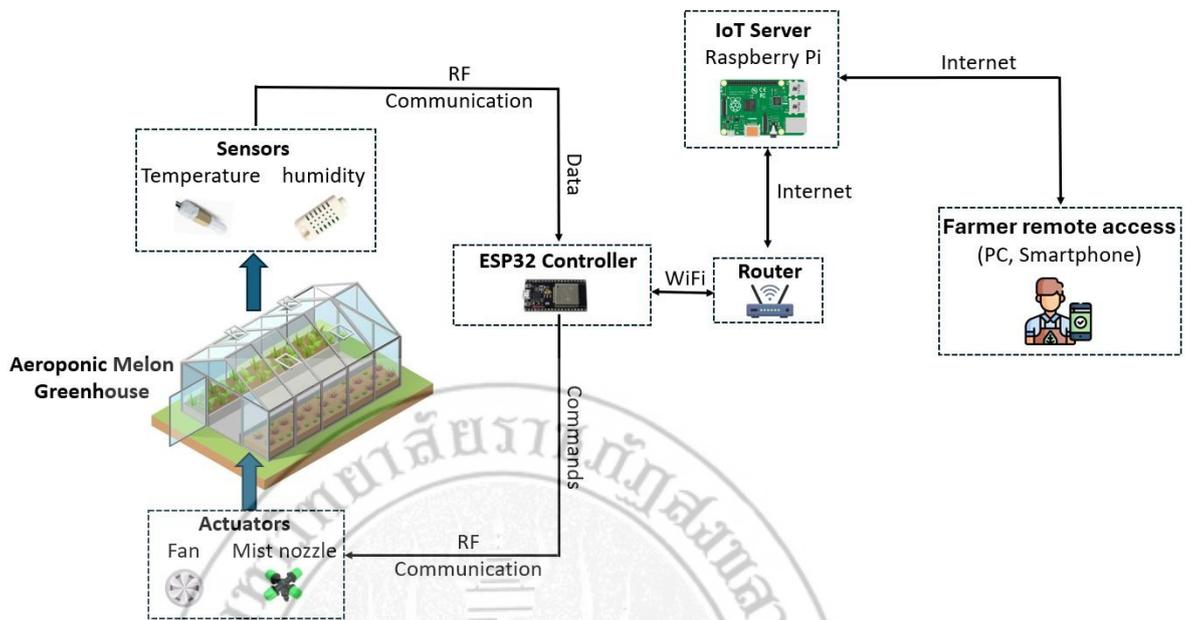
จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าเซนเซอร์ SHT30 และ DHT22 มีค่าร้อยละ ความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานใน ระดับต่ำ โดยค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสำหรับเซนเซอร์ SHT30 เท่ากับ 0.64% สำหรับอุณหภูมิ และ 1.24% สำหรับความชื้น ในขณะที่เซนเซอร์ DHT22 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.68% และ 1.27% ตามลำดับ

ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ทั้งสองชนิดมีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำมาใช้งานจริงในการตรวจวัดสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คุณลักษณะสำคัญของต้นแบบระบบที่พัฒนาขึ้นอยู่ที่ส่วนของฮาร์ดแวร์ ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบหลักที่จำเป็นต่อการดำเนินงานตามแนวคิดของระบบควบคุมอัจฉริยะภาพที่ 4.27 แสดง แผนภาพการเชื่อมต่อของระบบฮาร์ดแวร์ โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่เป็นหน่วย ประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) ที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์และอุปกรณ์กระทำ (Actuators)

เซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์จากภายในโรงเรือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณรากของพืชเมล่อน ซึ่งรวมถึงการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นทั้งในระดับเฉพาะจุดและ โดยรวมภายในโรงเรือน ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อนำไปใช้ในการตัดสินใจ

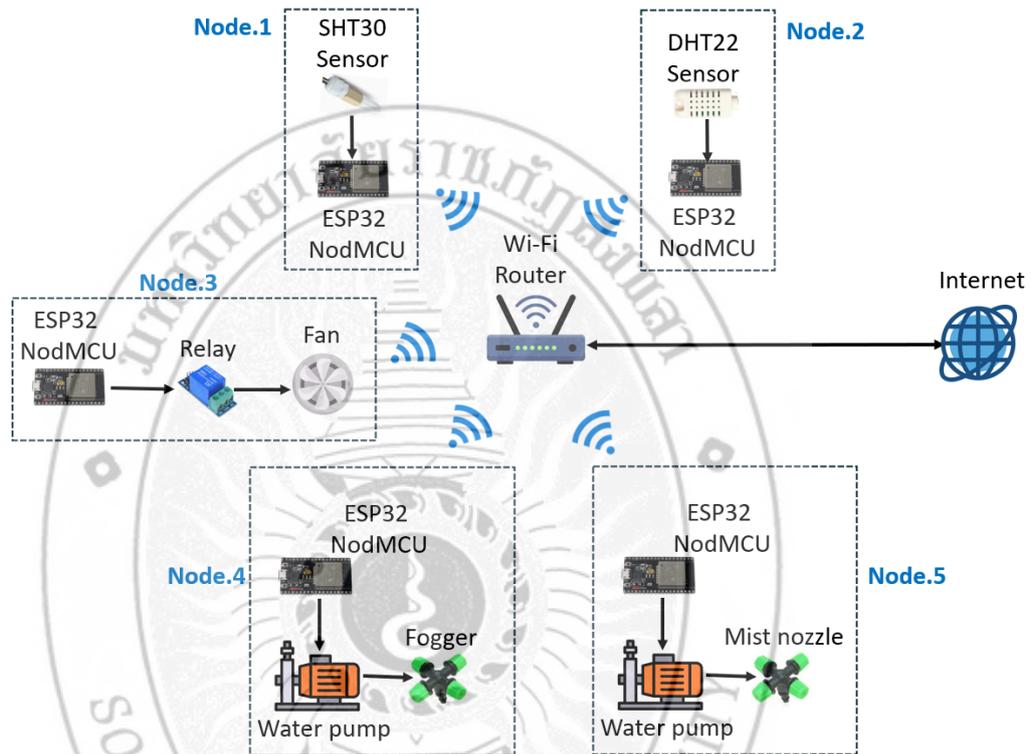
ในส่วนของอุปกรณ์กระทำ (Actuators) จะทำหน้าที่ปรับค่าพารามิเตอร์สิ่งแวดล้อมโดย อัตโนมัติ เมื่อค่าที่ตรวจวัดได้เบี่ยงเบนออกจากช่วงค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อให้คงไว้ซึ่ง สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.27 แผนภาพแสดงลำดับการเชื่อมต่อของระบบฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุมโรงเรือน

### 4.3 การออกแบบเครือข่าย

สำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) ภายในงานวิจัยนี้ เซนเซอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะเชื่อมต่อกันผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยโครงสร้างการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์แต่ละหน่วยจะแสดงดังภาพที่ 4.28 ซึ่งแสดงลำดับการเชื่อมโยงของโหนด (Node) ต่าง ๆ ในระบบอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.28 โครงสร้างเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายของระบบควบคุมโรงเรือนที่พัฒนาขึ้น

แต่ละโหนดภายในระบบจะเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางรับส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์และอุปกรณ์กระทำ (Actuators) ข้อมูลที่ตรวจวัดได้ เช่น อุณหภูมิและความชื้น จะถูกส่งผ่านการเชื่อมต่อแบบไร้สายผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังเซิร์ฟเวอร์กลาง (IoT Server) ซึ่งรับผิดชอบในการรวบรวม จัดเก็บ และประมวลผลข้อมูลในรูปแบบเรียลไทม์

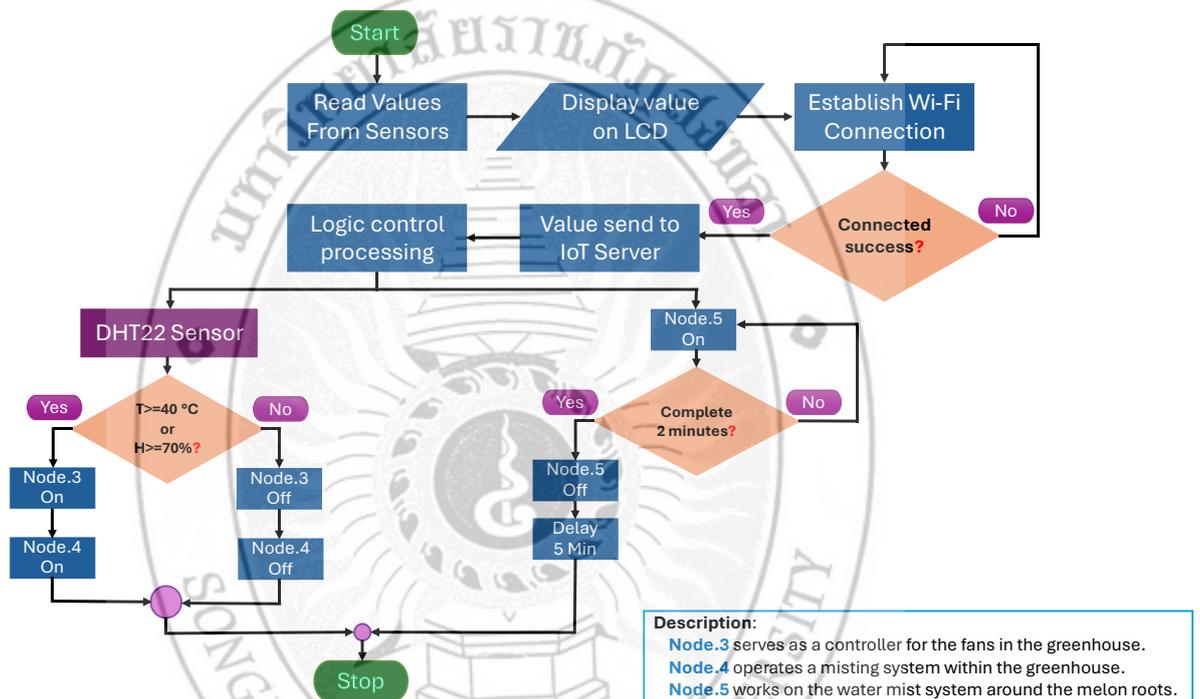
ข้อมูลที่ถูกประมวลผลสามารถเข้าถึงได้ผ่านแอปพลิเคชันบนเว็บเบราว์เซอร์ ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะของระบบ รวมถึงควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จากระยะไกลได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ

ระบบเครือข่ายที่ออกแบบในลักษณะนี้มีจุดเด่นด้านความยืดหยุ่น สามารถขยายจำนวนโหนดเพิ่มเติมได้ตามความต้องการ รองรับการทำงานแบบแยกส่วน (Modular Design) และ

เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานเกษตรอัจฉริยะ โดยเฉพาะในบริษัทที่ต้องการระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมที่แม่นยำและปรับตัวได้ตามสภาวะการใช้งานจริง

#### 4.4 การควบคุมด้วยตรรกะ

ตรรกะการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กระทำ (Actuators) ทั้งสามส่วน ประกอบด้วย พัฒลระบายอากาศภายในโรงเรือน ระบบพ่นหมอกภายในโรงเรือน และระบบพ่นหมอกบริเวณรากเมล่อน ได้รับการออกแบบและแสดงไว้ในภาพที่ 4.29 ซึ่งนำเสนอกรอบแนวคิดเชิงตรรกะของกลไกการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 4.29 แผนภาพแสดงตรรกะการควบคุมการทำงานของระบบควบคุมโรงเรือนแบบอัตโนมัติ

ในระบบควบคุมนี้ ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์อ้างอิงที่เหมาะสมของเซนเซอร์ต่าง ๆ ล่วงหน้า และโปรแกรมเข้าสู่หน่วยควบคุมกลาง (ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32) โดยลำดับการทำงาน เริ่มต้นจากการอ่านค่าข้อมูลจากเซนเซอร์ เช่น อุณหภูมิและความชื้น จากนั้นจะแสดงค่าดังกล่าวผ่านหน้าจอ LCD ภายในระบบ ต่อมาไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเชื่อมต่อเข้าสู่เครือข่าย Wi-Fi และเมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ ข้อมูลเซนเซอร์จะถูกส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ IoT เพื่อดำเนินการจัดเก็บและประมวลผลตามตรรกะที่กำหนด

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดสินใจหลัก คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งได้จากเซนเซอร์ DHT22 โดยระบบจะทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังนี้:

- หากอุณหภูมิเท่ากับหรือมากกว่า 40 องศาเซลเซียส หรือความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 70% ระบบจะสั่งการให้เปิดพัดลมระบายอากาศและระบบพ่นหมอกภายในโรงเรือนโดยอัตโนมัติ

- หากค่าที่ตรวจวัดได้ไม่เกินค่าที่กำหนด ระบบจะหยุดการทำงานของพัดลมและระบบพ่นหมอกโดยอัตโนมัติ

นอกจากนี้ ระบบยังมีฟังก์ชันเสริมในการควบคุมการพ่นหมอกบริเวณรากเมล็ดอ่อน โดยตั้งโปรแกรมให้ทำการพ่นละอองน้ำตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในการทดลอง

#### 5. การสร้างระบบการทำงานเพื่อควบคุมการการปลูก

5.1 จากต้นแบบระบบการทำงานที่ออกแบบไว้นำมาใช้ในการวางแผน เตรียม จัดหาวัสดุ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างระบบให้มีความพร้อมในการทำงานตามวัตถุประสงค์ในการทดลองบางส่วนแสดงดังภาพที่ 4.30



ภาพที่ 4.30 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างระบบการทำงาน

5.2 ศึกษารายละเอียดการทำงานส่วนประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนนำมาประกอบรวม ทดสอบและนำไปใช้งานแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



ภาพที่ 4.31 ศึกษาอธิบายรายละเอียดการทำงานส่วนประกอบของอุปกรณ์

5.3 ออกแบบ สร้าง ตัวยึดตำแหน่งมอเตอร์ปั้มน้ำและกล่องควบคุมการทำงาน บริเวณ โรงเรือนให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการทำงานแสดงดังผิตพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.32



ภาพที่ 4.32 สร้างและกำหนดตำแหน่งตัวยึดมอเตอร์ปั้มน้ำเข้าระบบ

5.4 ติดตั้งมอเตอร์ปั้มน้ำบนแผงยึด ก่อนนำไปติดตั้งบริเวณโรงเรือนแสดงดังผิตพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.33



ภาพที่ 4.33 ติดตั้งมอเตอร์ปั้มน้ำบนแผงยึด

5.5 ประกอบแผงวงจรและอุปกรณ์ควบคุมลงบนบอร์ดแสดงดังผิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.34 และแผงวงจรที่ประกอบแล้วเสร็จก่อนนำไปทดสอบการทำงานแสดงดังผิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.35

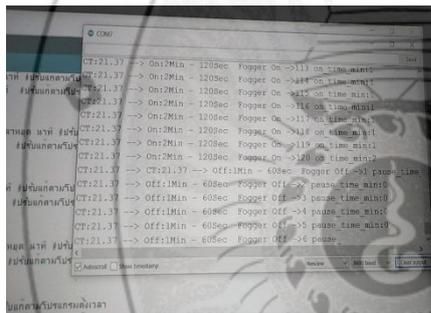


ภาพที่ 4.34 ประกอบแผงวงจรควบคุม



ภาพที่ 4.35 แผงวงจรควบคุมที่ประกอบบนบอร์ด

5.6 เขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ ให้ควบคุมการทำงานของระบบ และยกตัวอย่างรหัสโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานด้านล่างผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.36



ภาพที่ 4.36 เขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบ

5.7 ทดสอบการทำงานของวงจรการตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น พร้อมทวนสอบความถูกต้องตามเงื่อนไขการทำงานของบอร์ดวงจรการทำงานที่ออกแบบไว้แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.37-4.38 และทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการจ่ายพ่นน้ำตามเงื่อนไขการทดลองแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.39



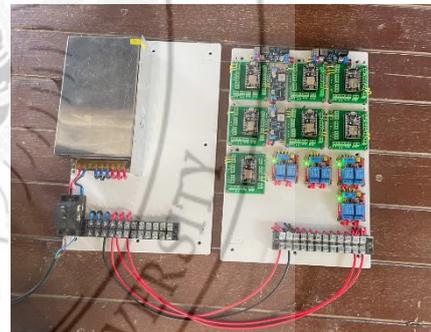
ภาพที่ 4.37 ต้องงจรและทดสอบการทำงาน

ตัวอย่างรหัสโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบการปลูกรากเขวน

```
#include "DFRobot_SHT20.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
const char* ssid = "Chimmelon"; //แก้ไข SSID --->
const char* password = "THU26092019"; // แก้ไข Password --->

int timezone = 7 * 3600; //ตั้งค่า TimeZone ตามเวลาประเทศไทย
int dst = 0; //กำหนดค่า Date Swing Time

#define RELAY D5 //ขาสำหรับสั่ง Relay
#define LED D0 // ขาหลอดไฟออนบอร์ดของ Nodemcu v2 ใช้ D0 , Nodemcu v3 ใช้ D4 --->
```



ภาพที่ 4.38 ทดสอบการทำงานของบอร์ดวงจรการทำงาน



ภาพที่ 4.39 ทดสอบการทำงานโปรแกรมควบคุมต่อกับอุปกรณ์การทำงาน

5.8 หลังทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และโปรแกรมควบคุมได้ผลเป็นไปตามข้อกำหนดต่างๆ ที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว ทำการติดตั้งกล่องใส่บอร์ดควบคุมในโรงเรือนเพื่อป้องกันแสงแดดและฝนแสดงดังฉีดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.40

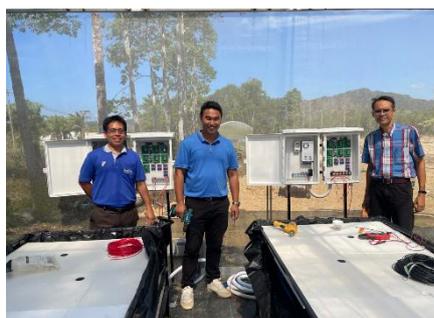


ภาพที่ 4.40 ติดตั้งกล่องใส่แผ่นควบคุมในโรงเรือน

5.9 นำแผงวงจรที่ประกอบลงบนบอร์ดแล้วมาติดตั้งในกล่องที่อยู่ในโรงเรือนพร้อมต่อสายควบคุมระบบไฟฟ้าและสัญญาณการทำงานของระบบปลูกแบบรากแขวน ต่อชุดปั้มน้ำเข้าระบบควบคุม เตรียมความพร้อมก่อนเริ่มการทดลองปลูก แสดงดัง4.41-4.45 และทดสอบการทำงานของระบบปั้มน้ำแสดงดังฉีดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.41-4.46



ภาพที่ 4.41 นำบอร์ดติดตั้งลงกล่องควบคุมในแปลงปลูก



ภาพที่ 4.42 เชื่อมต่อระบบในการควบคุมแปลงปลุกในโรงเรือน



ภาพที่ 4.43 ต่อไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบควบคุมการทำงานของระบบรากแขนง



ภาพที่ 4.44 ติดตั้งระบบไฟฟ้าจ่ายปั้มน้ำ



ภาพที่ 4.45 เชื่อมระบบปั้มน้ำเข้ากับบอร์ดควบคุม



ภาพที่ 4.46 ทดสอบการทำงานของระบบปั้มน้ำ

5.10 ทดสอบระบบการพ่นน้ำบริเวณช่องปลูกที่รากต้นเมล่อน เพื่อระบุให้ตรงตำแหน่ง หลุมปลูกของต้นเมล่อนในระบบรากแขวนแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง และตรวจสอบ ความเรียบร้อยพร้อมติดตั้งกันสาดป้องกันแดด ฝน สัมผัสกับปั้มควบคุมแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบ แหล่งการอ้างอิง4.48



ภาพที่ 4.47 ทดสอบการทำงานของระบบหัวพ่นน้ำ



ภาพที่ 4.48 ตรวจสอบความเรียบร้อยพร้อมติดตั้งการกันฝนสาด

5.11 ติดตั้งและทดสอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ เพื่อช่วยสร้างระบบไหลเวียน ถ่ายเทอากาศภายในโรงเรือนแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.49



ภาพที่ 4.49 ติดตั้งและทดสอบการทำงานของพัดลมระบายอากาศ

5.12 ติดตั้งกล้องเพื่อคุณภาพภายในโรงเรือน สังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของต้นเมล่อน ควบคุมและติดตามเพื่อคุณภาพผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น สำหรับเตือนได้เข้าแก้ปัญหาได้ทันเวลา ไม่ให้เกิดผลกระทบในระหว่างการทดลองแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.50



ภาพที่ 4.50 ติดตั้งกล้องสังเกตการณ์ในโรงเรือน

5.13 ติดตั้งมิเตอร์วัดปริมาณการใช้น้ำของแต่ละแปลงปลูกในระบบ เพื่อดูปริมาณการใช้น้ำและสัดส่วนปริมาณสารอาหารที่ในการทดลองแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง4.51



ภาพที่ 4.51 ติดตั้งมิเตอร์วัดปริมาณการจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปลูก

5.14 ติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบปริมาณการใช้ไฟในการทดลองแสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง



#### ภาพที่ 4.52 มิเตอร์ตรวจวัดการใช้ไฟฟ้า

หลังสร้างระบบเตรียมความพร้อมที่สามารถรองรับการปลูกในระบบรากแขวนพร้อมกับการปลูกแบบดั้งเดิมด้วยวัสดุปลูกนำไปสู่กระบวนการเตรียมพันธุ์เมล่อนนำเข้าแปลงปลูกทดลองตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ในลำดับต่อไป

#### 6. เตรียมต้นอ่อนเมล่อนและนำลงแปลงปลูก

เมล่อนที่ใช้ในการปลูกเลือกเป็นพันธุ์คิโมจิ (Kimoji) เป็นหนึ่งในสายพันธุ์เมล่อนที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษในด้านรสชาติและคุณภาพของผล ผลของเมล่อนพันธุ์คิโมจิมีลักษณะเนื้อกรอบ หวาน หอม และมีสีสวย ทำให้เป็นที่ต้องการของตลาด การปลูกเมล่อนพันธุ์คิโมจิในภาคใต้ของประเทศไทยสามารถทำได้ดี และสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการปลูก ดังนั้นจึงเลือกสายพันธุ์นำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากนำเมล็ดมาบ่มเพาะโดยนำเมล็ดพันธุ์เมล่อนแช่ในน้ำสะอาด แล้วนำมาหุ้มด้วยกระดาษทิชชูวางไว้หนึ่งคืน จะเกิดการแตงงอกราก จึงนำมาเพาะต้นกล้าโดยนำลงฟองน้ำ รดน้ำให้ชุ่ม อนุบาลไว้ 7 วัน ก่อนนำลงปลูกลงในระบบแสดงดัง ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง53-4.55



ภาพที่ 4.53 การเตรียมเพาะพันธุ์ต้นกล้าเมล่อนก่อนนำลงแปลงปลูก



ภาพที่ 4.54 ต้นเมล่อนที่บ่มเพาะก่อนนำลงปลูกในแปลง



ภาพที่ 4.55 การอนุบาลต้นกล้าให้มีความแข็งแรงก่อนนำลงปลูกในระบบรากแขวน

เมื่อเตรียมเพาะต้นเมล่อนแล้วก็ได้จัดเตรียมวัสดุปลูกนำมาบรรจุลงในแปลงปลูกพร้อมผสมธาตุอาหารเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบการปลูกทั้งสองระบบแสดงดังผิวดภาพ! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง56ผิวดภาพ! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง62



ภาพที่ 4.56 การเตรียมส่วนประกอบในการปลูกแบบถุงปลูก



ภาพที่ 4.57 ติดตั้งวางระบบน้ำในการปลูกด้วยถุง



ภาพที่ 4.58 การปลูกในถาดและระบบให้น้ำ



ภาพที่ 4.59 นำต้นเมล็ด่อนลงปลูกในระบบรากแขวน



ภาพที่ 4.60 วัดขนาดความยาวของรากก่อนนำลงแปลงปลูกระบบรากแขวน



ภาพที่ 4.61 ต้นเมล็ด่อนหลังปลูกในระบบรากแขวน



ภาพที่ 4.62 ผสมปุ๋ยและตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายในถังเก็บน้ำ

การปลูกจะเริ่มต้นจากเพาะเมล็ดพันธุ์ แสดงดังภาพที่ 4.52 เมื่อเมล็ดแตกต้นใบอ่อนออกมา นำมาอนุบาลในแปลงเพาะชำเล็กดังภาพที่ 4.53 เพื่อเลี้ยงให้ต้นมีความแข็งแรงก่อนนำลงปลูกในแปลงทั้งสองระบบแสดงดังภาพที่ 4.58-4.62 พร้อมสังเกตเก็บข้อมูลรายละเอียดของการเจริญเติบโตและความสามารถในการปลูกรูปแบบรากแขวนมีรายละเอียดการดำเนินงานในลำดับต่อไป

#### ออกแบบสร้างระบบการใช้พลังงานสะอาดในการควบคุมระบบ

การออกแบบและสร้างระบบพลังงานสะอาดจะพิจารณาเลือกพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ (Solar cell) เพราะมีแสงแดดอยู่โดยทั่วไปและสามารถแปลงเป็นพลังงานนำมาใช้ในกระบวนการทดลองได้ โดยมีการออกแบบตัวรับพลังงานนำไปสู่กระบวนการจัดเก็บเพื่อใช้ป้อนเข้าระบบมีตัวควบคุมการใช้งานตามสภาพที่กำหนด โดยเริ่มต้นศึกษาหลักการการทำงานนำมาใช้ในงานวิจัย โดยพิจารณาสังเกตการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปลูกมากำหนดปริมาณความต้องการหน่วยไฟฟ้าสูงสุดเป็นตัวตั้งต้น นำมาออกแบบเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์ ให้มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อพลังงานที่จะนำมาใช้งานในระบบมีรายละเอียดการดำเนินงานอธิบายได้ดังนี้

1. การออกแบบและพัฒนาระบบ Solar Cell เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับโรงเรือน

การออกแบบนำไปสู่การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power System) เพื่อจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทั้งหมดภายในโรงเรือนปลูกเมล่อนแบบ รากแขวนมีเป้าหมายเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากภายนอก และเพิ่มความสามารถในการดำเนินงานในพื้นที่ห่างไกล ระบบดังกล่าวได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับโหลตรวมที่ใช้งานต่อวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.1 การประมาณค่าการใช้พลังงานของระบบมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายการอุปกรณ์หลักที่ใช้งานภายในโรงเรือน พร้อมระยะเวลาการใช้งานและการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ต่อวัน

อุปกรณ์	กำลังไฟ (W)	ชั่วโมงใช้งาน	จำนวน	พลังงานที่ใช้ (Wh/วัน)
ESP32 + Sensor	3 W	24 ชม.	2	$3 \times 24 \times 2 = 144$

อุปกรณ์	กำลังไฟ (W)	ชั่วโมงใช้งาน	จำนวน	พลังงานที่ใช้ (Wh/วัน)
ปั้มน้ำ AC (ตัวที่ 1)	30 W	24 ชม.	1	$30 \times 24 \times 1 = 720$
ปั้มน้ำ AC (ตัวที่ 2)	30 W	5 ชม.	1	$30 \times 5 \times 1 = 150$
พัดลม DC	15 W	10 ชม.	2	$15 \times 10 \times 2 = 300$
Wi-Fi Router	5 W	24 ชม.	1	$5 \times 24 \times 1 = 120$
<b>รวมทั้งหมด</b>				<b>1,434 Wh/วัน</b>

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าโหลดรวมที่ระบบพลังงานต้องรองรับมีค่าประมาณ 1,434 Wh ต่อวัน ซึ่งใช้เป็นฐานในการออกแบบระบบผลิตและกักเก็บพลังงานนำไปใช้ในการวางแผนและจัดหาแหล่งเก็บพลังงานมาใช้ในการดำเนินการต่อไป

## 2. องค์ประกอบของระบบ Solar Cell

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการจ่ายพลังงานให้กับโรงเรือนปลูกเมล่อนอัจฉริยะที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมผ่านระบบ IoT โดยพิจารณาจากความต้องการใช้พลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ติดตั้งภายในโรงเรือน ซึ่งมีภาระโหลดรวมประมาณ 1,434 Wh ต่อวัน ดังนั้น จึงได้ออกแบบระบบผลิต กักเก็บ และจ่ายพลังงานให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โดยองค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย:

### 2.1 แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Panel)

ระบบใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาดรวมไม่น้อยกว่า 500 วัตต์ เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ยประมาณ 2,000 Wh ต่อวัน ซึ่งมากพอที่จะรองรับภาระโหลดของระบบ และเผื่อการสูญเสียที่อาจเกิดจากประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การสูญเสียจากสายไฟ อินเวอร์เตอร์ และแบตเตอรี่ แผงโซลาร์เซลล์ที่เลือกใช้เป็นชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและสามารถผลิตไฟฟ้าได้ดีในสภาวะแสงน้อย เหมาะกับการใช้งานในภูมิอากาศเขตร้อนชื้นเช่นในภาคใต้ของประเทศไทย

### 2.2 ตัวควบคุมการชาร์จแบบ MPPT (Maximum Power Point Tracking)

ตัวควบคุมการชาร์จแบบ MPPT เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์เข้าสู่แบตเตอรี่ โดยอุปกรณ์จะทำการปรับค่าความต้านทานไฟฟ้าเพื่อให้แผงทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point) ตลอดเวลา ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้สูงขึ้นประมาณ 20-30% เมื่อเทียบกับระบบแบบ PWM (Pulse Width Modulation) ระบบนี้ใช้ MPPT Charge Controller ขนาด 50 แอมแปร์ เพื่อให้สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ที่มีกำลังสูงถึง 500 วัตต์ได้อย่างเพียงพอ

### 2.3 แบตเตอรี่ Deep Cycle ขนาด 12V 200Ah

แบตเตอรี่ที่เลือกใช้เป็นชนิด Deep Cycle แบบตะกั่วกรด (Lead-Acid) ขนาด 12 โวลต์ ความจุ 200 แอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งเหมาะสำหรับการจ่ายไฟต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานและสามารถชาร์จ/ดีสชาร์จได้บ่อยครั้ง โดยแบตเตอรี่จะทำหน้าที่เก็บพลังงานที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงกลางวันเพื่อนำมาใช้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดด เช่น เวลากลางคืนหรือวันที่มีฝนตก โดยพิจารณาให้ใช้งานได้อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 1 วัน ภายใต้การจำกัดการคายประจุ (Depth of Discharge; DOD) ที่ประมาณ 70% เพื่อรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

### 2.4 อินเวอร์เตอร์ (Pure Sine Wave Inverter) ขนาด 800W

อินเวอร์เตอร์มีหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า AC สามารถใช้งานได้ โดยเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด Pure Sine Wave ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งให้คลื่นไฟฟ้าที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับไฟฟ้าจากระบบการไฟฟ้า เหมาะสมกับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนและมีโหลดแบบมอเตอร์ เช่น ปั๊มน้ำแบบ AC ที่มีแรงกระชากขณะเริ่มต้นทำงานสูงกว่าปกติ (Surge Load)

### 2.5 อุปกรณ์ปลายทาง (Load Devices)

อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากระบบโซลาร์เซลล์ประกอบด้วย:

- ESP32 + Sensor: ทำหน้าที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงเรือน
- พัดลม DC: สำหรับการระบายอากาศภายในโรงเรือน เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเมล็ดอ่อน
- ปั๊มน้ำ AC: สำหรับให้น้ำแก่พืชหรือระบบราก โดยอาจเป็นระบบหมุนเวียนน้ำหรือระบบพ่นหมอก
- Wi-Fi Router: สำหรับส่งข้อมูลขึ้นระบบคลาวด์หรือเชื่อมต่อกับระบบ Dashboard ภายนอก

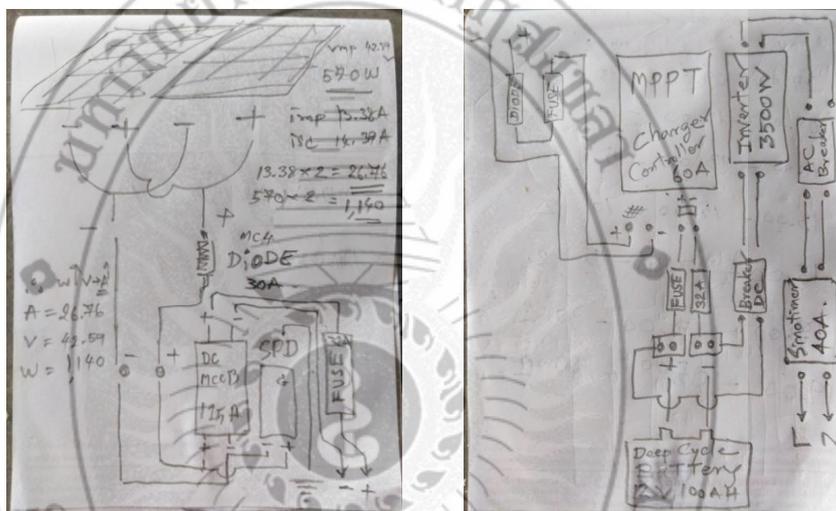
ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานแบบอัตโนมัติและรองรับการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในโรงเรือนอัจฉริยะเพื่อเกษตรกรรมยุคใหม่

## 3. ออกแบบวงจรการทำงาน

โดยเริ่มจากการศึกษารายละเอียดการสร้างระบบการทำงานเกี่ยวกับโซลาร์เซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.63 และนำมาออกแบบวงจรระบบเบื้องต้นดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง 4.64 เพื่อดำเนินการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ การติดตั้ง ให้เป็นไปตามรูปแบบที่มีความสามารถในการนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานตามรูปแบบการทดลอง

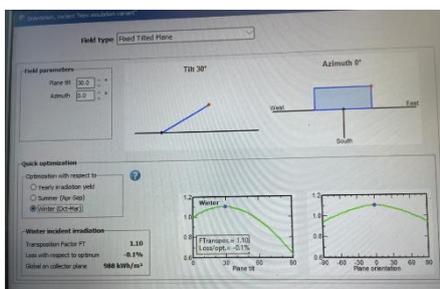


ภาพที่ 4.63 แบบวงจรการทำงานต้นแบบในการเรียนรู้



ภาพที่ 4.64 แนวคิดวงจรระบบโซลาร์เซลล์

4. คำนวณหาตำแหน่งการวางมุมแผงรับแสงอาทิตย์ของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อให้ความสามารถในการรับแสงอาทิตย์มากที่สุด จึงใช้โปรแกรมคำนวณหามุมเอียงในการวางแผงโซลาร์เซลล์พบว่ามุมที่มีความเหมาะสมคือ 30 องศา ไปทางทิศตะวันออกแสดงดังภาพที่ 4.65



ภาพที่ 4.65 แสดงการหาค่ามุมตกกระทบของแสงกับแผงโซลาร์เซลล์

## 5. ดำเนินการติดตั้งระบบแผงโซลาร์เซลล์

ในการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์จะเริ่มจากการสร้างฐานวางแผงรับ โครงรับกล่องเก็บพลังงาน สำรอง ติดตั้งและต่อระบบการทำงานเพื่อนำพลังงานที่ได้ไปจัดเก็บในแบตเตอรี่โดยมีลักษณะการดำเนินงานแสดงดังนี้

5.1 สร้างฐานรองรับการวางแผงโซลาร์เซลล์และตัวจัดเก็บพลังงาน แสดงดังภาพที่ 4.66-4.67



ภาพที่ 4.66 สร้างฐานรองรับแผงโซลาร์เซลล์



ภาพที่ 4.67 สร้างฐานรองรับแผงโซลาร์เซลล์และกล่องพลังงาน

5.2 ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์กับฐานรองรับแสดงดังภาพที่ 4.68



ภาพที่ 4.68 ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์

### 5.3 ติดตั้งกล่องเก็บพลังงาน และระบบแปลงไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 4.69



ภาพที่ 4.69 ติดตั้งกล่องเก็บพลังงาน และระบบแปลงไฟฟ้า

### 5.4 ต่อระบบโซลาร์เซลล์จากแผงรับไปยังกล่องเก็บพลังงานแสดงดังภาพที่ 4.70-4.71



ภาพที่ 4.70 ต่อระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับกล่องเก็บพลังงาน



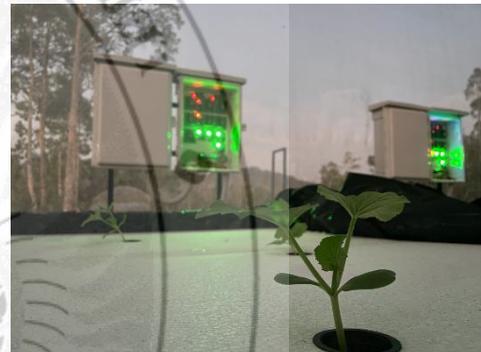
ภาพที่ 4.71 ติดตั้งระบบแปลงไฟและตัวเก็บพลังงาน

หลังติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์เสร็จสมบูรณ์ ก็นำพวกต่อรวมเข้ากับระบบควบคุมการปลูก เพื่อใช้ทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่นำมาจากกรไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และพิจารณาความสามารถในการดำเนินงาน เก็บรวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์ผลความสามารถในการใช้งาน ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่อไป

**ทดสอบระบบนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกเมล่อน**

หลังติดตั้งระบบแล้วเสร็จทดลองปลูกลงและใช้ระบบควบคุมการทำงานตามที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น ควบคุมการทดลองโดยทดสอบระบบนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกเมลอนเพื่อดำเนินงานวิจัยในกระบวนการปลูกมีรายละเอียดดังนี้

เพื่อให้เห็นภาพรวมในการดำเนินงานจากที่ได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานในแต่ละส่วนขอแนะนำรายละเอียดแสดงลักษณะของชุดควบคุมการปลูกตั้งผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง4.72 โรงเรือนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนและแบบถ่วงปลูกตั้งผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง3 พร้อมตรวจสอบตำแหน่งการพ่นน้ำในส่วนรากของการปลูกด้วยระบบรากแขวนดังภาพที่ 4.74 และแสดงลักษณะต้นเมลอนที่ปลูกในโรงเรือนทั้งสองระบบหลังปลูกและภายในของระบบรากแขวนตั้งผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง 4.75-4.79



ภาพที่ 4.72 ทดสอบระบบควบคุมการสเปรย์น้ำและสารละลายในแปลงปลูกแบบรากแขวน



ภาพที่ 4.73 สภาพโรงเรือนหลังนำต้นเมลอนลงปลูก



ภาพที่ 4.74 ตรวจสอบตำแหน่งการพ่นน้ำในส่วนรากของการปลูกด้วยระบบรากแขวน



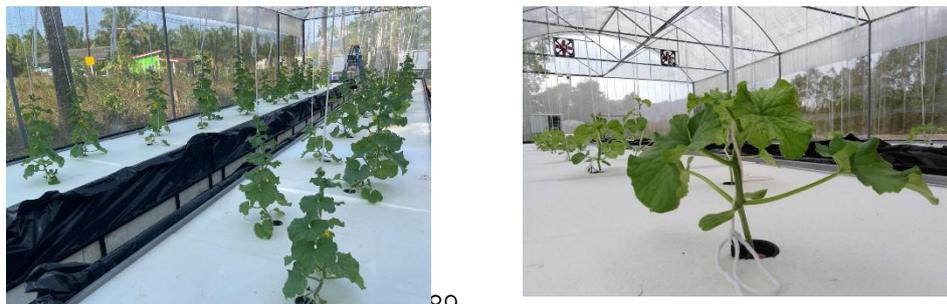
ภาพที่ 4.75 ลักษณะต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกในโรงเรือนทั้งสองระบบหลังปลูก 21 วัน



ภาพที่ 4.76 ลักษณะรากและต้นที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนหลังปลูก 28 วัน



ภาพที่ 4.77 ลักษณะต้นที่ปลูกด้วยถุงปลูก (รูปซ้ายมือ) และปลูกด้วยระบบรากแขวนหลังปลูก 28 วัน



ภาพที่ 4.78 ลักษณะต้นที่ปลูกด้วยระบบรากแขวน 28 วัน



ภาพที่ 4.79 บริเวณภายในโรงเรือนหลังการปลูก 28 วัน



## 2. ระบบแสดงรายละเอียดการควบคุมในช่วงการปลูก

ในช่วงของการประกอบติดตั้งระบบควบคุม มีการดำเนินการสร้างระบบแสดงรายละเอียดสถานการณ์การทำงานของแต่ละรูปแบบตามการทดลองในแต่ละช่วงเวลา พร้อมบันทึกข้อมูลการปลูกด้วยระบบกราฟิก มีลักษณะหน้าแสดงข้อมูลและรายละเอียดต่างๆ แสดงดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง0

Aeroponic Melon GreenHouse							
อุณหภูมิ				ความชื้น			
38.10°C				54.90%RH			
Program No.	current time	working status	Count time (Secs)	Set stop time (minutes)	Set spray time (minutes)	Temperature (°C)	Humidity (%RH)
1	9.54	#1 (Spraying)	36	3 (180 Secs)	1 (60 Secs)	998	998
2	9.54	#0 (Stop)	609	17 (1020 Secs)	1 (60 Secs)	998	998
3	9.54	#1 (Spraying)	71	3 (180 Secs)	3 (180 Secs)	998	998
4	9.54	#0 (Stop)	217	17 (1020 Secs)	3 (180 Secs)	998	998
5	9.54	#1 (Spraying)	75	1 (60 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
6	9.54	#0 (Stop)	226	20 (1200 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
7	9.54	#0 (Stop)	360	10 (600 Secs)	1 (60 Secs)	998	998
8	9.54	#0 (Stop)	207	10 (600 Secs)	4 (240 Secs)	31.15	102
9	9.54	#1 (Spraying)	36	10 (600 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
10	9.54	#1 (Spraying)	71	10 (600 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
11	9.54	#0 (Stop)	12	10 (600 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
12	9.54	#0 (Stop)	345	10 (600 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
13	9.54	#0 (Stop)	26	1 (60 Secs)	2 (120 Secs)	998	998
14		#0 (Stop)		(0 Secs)	(0 Secs)	0	0
15		#0 (Stop)		(0 Secs)	(0 Secs)	0	0

ภาพที่ 4.80 หน้าแสดงข้อมูลการทำงานของระบบพ่นน้ำในระบบรากแขวน

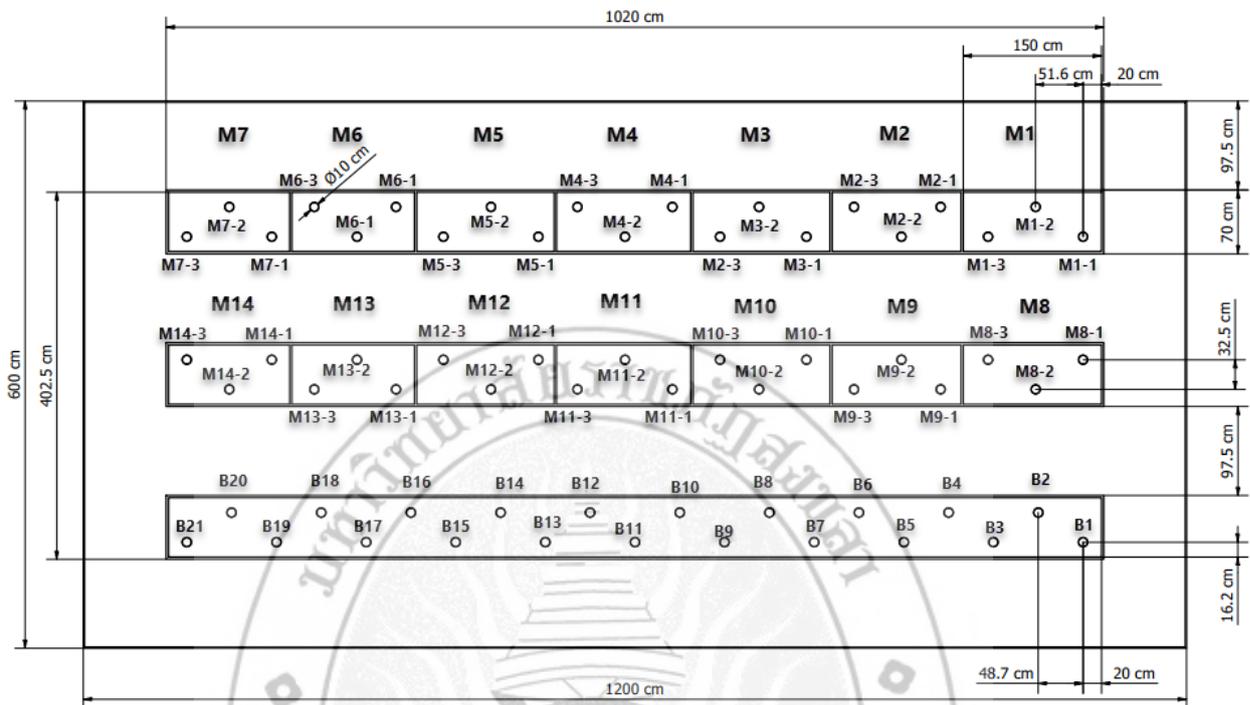
รายละเอียดการควบคุมการทำงานของระบบที่จ่ายป้อนให้กับการทดลองแต่ละรูปแบบจะแสดงการทำงานของระบบในแต่ละช่วงเวลาเป็นไปตามรูปแบบการทดลองที่กำหนดไว้ตั้งแต่ต้นให้ เป็นไปตามสภาวะที่การทดลองเพื่อหาคำตอบในการปลูกที่ดีต่อไป

### ออกแบบการทดลองเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก

ในการดำเนินงานวิจัยจะพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลูกในรูปแบบที่ดำเนินการอยู่มาเป็น ฐานของการปลูกและออกแบบการปลูกด้วยระบบรากแขวนในปัจจุบันต่างๆ เพื่อทราบโอกาสความ เป็นไปได้ในการปลูกและหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการปลูกโดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. รูปแบบการปลูกเมล็ดอ่อน

วิธีการปลูกเมล็ดอ่อนในการทดลองจะมีอยู่ 2 ระบบ คือ การปลูกแบบรากแขวน และการปลูก ในถุงปลูก ทั้งสองรูปแบบจะปลูกอยู่ในโรงเรือนเดียวกัน เพื่อกำหนดให้ปัจจัยต่างๆ ถูกควบคุมใน ลักษณะที่มีสภาวะไม่แตกต่างกัน แต่ควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยที่แตกต่างกันเป็นไปตามรูปแบบการ ทดลองที่ออกแบบมา โดยมีตำแหน่งของการปลูกแบบรากแขวนและการปลูกแบบดั้งเดิม (ปลูกในถุง ปลูก) มีรายละเอียดการวางตำแหน่งของการปลูกแสดงดังภาพที่ 4.81



ภาพที่ 4.81 รูปแบบตำแหน่งการปลูกทั้งสองระบบในแปลงปลูก

## 2. ออกแบบการทดลองปลูก

การออกแบบการทดลองจะดำเนินการ 2 ส่วนคือ 1 การปลูกแบบดั้งเดิมตามรูปแบบที่ดำเนินการอยู่ปัจจุบัน และการปลูกแบบระบบรากแขวน มีรายละเอียดในการออกแบบสำหรับการทดลองดังนี้

2.1 การปลูกแบบดั้งเดิม คือ การปลูกในถุงปลูก โดยให้น้ำและปุ๋ยด้วยระบบอัตโนมัติตามช่วงเวลาที่กำหนด ตามสูตรสารประกอบที่กำหนดธาตุอาหารจำนวน 6 ครั้งต่อวัน ในช่วงเวลาการปลูกตั้งแต่เริ่มต้นปลูกวันที่ 1-30 ส่วนช่วงวันที่ 30 ถึงวันเก็บเกี่ยวจะปรับระยะเวลาการให้น้ำผสมปุ๋ยเพิ่มมากขึ้น โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งรูปแบบการปลูกด้วยถุงปลูกจะกำหนดปลูกทั้งหมด 21 ถูต่อหนึ่งรอบการปลูก ด้วยเหตุผลในการกำหนดจำนวนถู เป็นไปตามข้อจำกัดตามความยาวของโรงเรือน และเป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดลองการปลูกแบบถูปลูก เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองนำไปเปรียบเทียบผลปลูกด้วยระบบรากแขวน เพื่อความเข้าใจตรงกันในการทดลอง จึงได้กำหนดรหัสของการปลูกแต่ละต้นเป็นตัวอักษร B และตามด้วยหมายเลขถูปลูก คือ B1, B2,...B21 ตามลำดับการปลูกเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลลักษณะการเจริญเติบโตของต้นสำหรับนำไปใช้ในการเปรียบเทียบผลการปลูกในระบบรากแขวน

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดการให้น้ำในการปลูกเมล่อนแบบถ่วงปลูก

ช่วงเวลา	การให้น้ำช่วงปลูกวันที่ 1-30 วัน (นาทิต)	การให้น้ำช่วงปลูกวันที่ 30-90 (นาทิต)
08.00	2	3
10.00	1	2
11.00	1	2
12.00	1	2
13.00	1	2
15.00	2	3

2.2 ในกระบวนการปลูกแบบระบบรากแขวน ก่อนดำเนินงานวิจัยผู้วิจัยทำการทดสอบโอกาสความเป็นไปได้ในการปลูกเมล่อนในสภาวะรากแขวนก่อนเบื้องต้น เพื่อหาสภาวะที่สามารถปลูกเมล่อนให้เจริญเติบโตได้ตามช่วงเวลาในการปลูกของแต่ละวัน ตามสภาวะอากาศที่จะส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของต้น เพื่อยืนยันโอกาสที่จะดำเนินงานให้บรรลุผลสำเร็จตามเป้าประสงค์ เป็นจุดเริ่มต้นนำไปสู่การดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างกระบวนการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการปลูก มีรายละเอียดของสภาวะการปลูกในรอบหนึ่งวันเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สภาวะการทดลองปลูกด้วยระบบรากแขวนเบื้องต้น

ช่วงเวลา	เวลาหยุด (นาทิต)	เวลาสเปร์ย์(นาทิต)
19.00 - 05.00 น.	60	2
05.00- 07.00 น.	30	2
07.00- 09.00 น.	15	2
09.00- 11.00 น.	10	2
11.00- 13.00 น.	5	2
13.00- 15.00 น.	10	2
15.00- 17.00 น.	15	2
17.00- 19.00 น.	30	2

ผลการทดลองปลูกเบื้องต้นเพื่อนำมาใช้เป็นตัวกำหนดตั้งต้นในการออกแบบการทดลอง เพื่อนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงาน โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (Design of Experiment : DOE) ในรูปแบบ Central Composite Design of Experiment: CCD จากการนำข้อมูลการปลูกเบื้องต้นดังตารางที่ 4.4 มาใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมมินิ

เทป (Minitab) ได้รูปแบบการทดลองสำหรับนำมาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขควบคุมการทำงานด้วยระบบสมองกลฝังตัวเพื่อสร้างระบบการทำงาน แสดงรายละเอียดผลการออกแบบดังตารางที่ 4.5 มีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง และในแต่ละรูปแบบจะมีค่าการพ่นและหยุดการทำงานของตัวควบคุมการสเปรย์ ตามลักษณะของช่วงเวลาในแต่ละวันที่มีกำหนดปัจจัยจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ซึ่งกระบวนการสร้างอาหารของพืชสีเขียว โดยมีคลอโรฟิลล์ทำหน้าที่ดูดพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนสารวัตถุดิบ คือ น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เป็น น้ำตาลกลูโคส น้ำ และ แก๊สออกซิเจน เป็นปัจจัยในการพิจารณาที่จะส่งผลให้ต้นเมล่อนเกิดการเจริญเติบโตได้สมบูรณ์ตามสภาพการออกแบบที่ได้กำหนด

ตารางที่ 4.5 รูปแบบการทดลองเพื่อใช้ในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขนลอย

การทดลองที่	ช่วงเวลา															
	5.00-7.00		7.00-9.00		9.00-11.00		11.00-13.00		13.00-15.00		15.00-17.00		17.00-19.00		19.00-05.00	
	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น	ว่าง	พ่น
หน่วยเวลา (นาที)																
1	9	1	5	1	3	1	2	1	3	1	5	1	9	1	20	1
2	51	1	25	1	17	1	8	1	17	1	25	1	51	1	100	1
3	9	3	5	3	3	3	2	3	3	3	5	3	9	3	20	3
4	51	3	25	3	17	3	8	3	17	3	25	3	51	3	100	3
5	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	4	2
6	60	2	30	2	20	2	9	2	20	2	20	2	60	2	117	2
7	30	1	15	1	10	1	5	1	10	1	15	1	30	1	60	1
8	30	4	15	4	10	4	5	4	10	4	15	4	30	4	60	4
9	30	2	15	2	10	2	5	2	10	2	15	2	30	2	60	2
10	30	2	15	2	10	2	5	2	10	2	15	2	30	2	60	2
11	30	2	15	2	10	2	5	2	10	2	15	2	30	2	60	2
12	30	2	15	2	10	2	5	2	10	2	15	2	30	2	60	2
13	30	2	15	2	10	2	5	2	10	2	15	2	30	2	60	2

**หมายเหตุ** ว่าง คือ ไม่มีการพ่นน้ำ, พ่น คือ การพ่นน้ำให้กับรากต้นเมล่อน

รูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมทางสถิตินำมาสร้างระบบการปลูก หนึ่งในรูปแบบการทดลองจะปลูกเมล่อน 3 หลุม เพื่อเป็นตัวแทนของการทดลอง และสังเกตลักษณะการเจริญเติบโตของต้นเพื่อยืนยันผลการทดลองในสภาวะเดียวกัน ในหนึ่งแถวมีการปลูกได้ 7 การทดลอง

ปลูก 2 แถว ได้ทั้งหมด 14 การทดลอง หรือ 42 หลุมปลูก เพียงพอตามรูปแบบการทดลองที่ได้ ออกแบบมาซึ่งมีทั้งหมด 13 การทดลอง และได้กำหนดสัญลักษณ์การทดลองแต่ละรูปแบบด้วย ตัวอักษร M และตามด้วยหมายเลข เช่น M1 หมายถึงการทดลองที่ 1 โดยแต่ละการทดลองจะมีการ ทำ 3 ซ้ำ ก็จะกำหนดรหัสย่อในกลุ่มเป็น M1-1, M1-2, M1-3 เพื่อแสดงตำแหน่งในการทดลองและ บันทึกเก็บข้อมูลนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

### เก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง

เมื่อสร้างระบบและทดลองความสามารถในการทำงานที่ตอบสนองและรองรับกับการปลูกทั้งสองรูปแบบที่สามารถเป็นไปตามแผนการดำเนินงาน ก็จะสังเกตและเก็บข้อมูลที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปสรุปวิเคราะห์ผลการดำเนินงานในลำดับต่อไปซึ่งมีรายละเอียดและผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. สังเกตและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล็ดอ่อน

ผลการดำเนินงานที่เกิดขึ้นในการปลูกเมล็ดอ่อนจะสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงพร้อมเก็บข้อมูลที่เกิดขึ้นในการปลูกทั้งสองรูปแบบ ด้านลักษณะการเจริญเติบโต ขนาดใบ ความสูงของต้น และลักษณะความโตของลูก เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามรูปแบบการทดลองที่ออกแบบไว้ เก็บรวบรวมข้อมูลนำไปใช้วิเคราะห์ผลพิจารณาหาสภาวะความเหมาะสมต่อการปลูก เป็นข้อมูลใช้เปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับการปลูกแบบถุงปลูก โดยมีลักษณะการปลูกในวันที่ 1 และวันที่ 10 ของการปลูกแสดงดังภาพที่ 4.82-4.83 รายละเอียดข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนและระบบถุงปลูก และแสดงลักษณะตัวอย่างทางกายภาพของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกทั้งสองรูปแบบแสดงดังภาพที่ 4.84-4.88 ลักษณะผลของเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกทั้งสองรูปแบบแสดงดังภาพที่ 4.89-4.90 เมื่อครบกำหนดอายุการปลูกในช่วงเวลา 80-90 วัน โดยเฉลี่ยตามวงจรการปลูกเมล็ดอ่อนก็จะเก็บผลผลิตเพื่อนำมาจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นผลผลิตอื่นๆ ตามความต้องการต่อไปแสดงดังภาพที่ 4.91



ภาพที่ 4.82 ต้นเมล็ดอ่อนหลังปลูกในระบบรากแขวน 1 วัน



ภาพที่ 4.83 หลังนำปลูกลงในระบบบรากแฉวน 10 วัน



ภาพที่ 4.84 หลังนำปลูกลงในระบบ 10 วัน ของการปลูกแบบบรากแฉวนและถุงปลูก



ภาพที่ 4.85 ลักษณะต้นเมล็ดอ่อนหลังปลูกด้วยระบบบรากแฉวน 6 สัปดาห์



ภาพที่ 4.86 ลักษณะต้นเมล็ดอ่อนหลังปลูกด้วยระบบบรากแฉวน 9 สัปดาห์



ภาพที่ 4.87 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยระบบรากแฉวน 12 สัปดาห์



ภาพที่ 4.88 ลักษณะต้นเมล่อนหลังปลูกด้วยถุงปลูก 12 สัปดาห์



ภาพที่ 4.89 ลักษณะผลเมล่อนที่ปลูกด้วยถุงปลูก



ภาพที่ 4.90 ลักษณะผลเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแฉวนลอย



ภาพที่ 4.91 แสดงการเก็บผลผลิตเมล่อนเมื่อครบอายุการปลูก

ในช่วงของการปลูกประสบปัญหาการเข้าทำลายของเชื้อรา และศัตรูพืช เช่น ราน้ำค้าง ราขาว หรือแมลงกระตักแมลงศัตรูพืช เป็นปัจจัยส่งผลต่อคุณภาพของผลผลิตเมล่อนเกิดความไม่สมบูรณ์ส่งผลกระทบได้ผลไม่เป็นไปตามรูปแบบหรือกระบวนการปลูกที่ควรจะเป็น แสดงดังภาพที่ 4.92 ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องหาวิธีการป้องกันและแก้ปัญหาต่อไป



ภาพที่ 4.92 ต้นเมล่อนที่ได้รับความเสียหายก่อนกำหนดเก็บผลที่ปลูกแบบรากแขวนลอย

## 2. เก็บข้อมูลรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต้นเมล่อน

รายละเอียดของต้นเมล่อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยส่วนหนึ่งน่าจะเกิดมาจากรูปแบบการทดลอง จึงได้เก็บข้อมูลขนาด ต้น ราก และผล ที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลของความต่าง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อรูปแบบการปลูกที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ แสดงลักษณะการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงจากการปลูกเมล่อนดั้งเดิมพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง-4.95



ภาพที่ 4.93 การตรวจสอบลักษณะต้นและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต



ภาพที่ 4.94 ตรวจสอบวัดขนาดความสูงและรายละเอียดของการเจริญเติบโตต้นเมล่อน



ภาพที่ 4.95 ตรวจสอบขนาดความโตของผลเมล่อน

### 3. ข้อมูลการเจริญเติบโตในการปลูก

ผลจากการตรวจวัดขนาดความสูงและส่วนประกอบอื่นๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนในการทดลองปลูกทั้งระบบรากแขวนและระบบถุงปลูก มีรายละเอียดแสดงตัวอย่างข้อมูลดังตารางที่ 4.6-4.7

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนของการปลูกสัปดาห์ที่ 10

หมายเลข	ความสูง ของต้น (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ลำต้น (ซม.)	ขนาดของใบ (ซม.)		ความกว้าง ระหว่างก้าน สูงสุด (ซม.)	ขนาดผล (ซม.)	
			ความ กว้าง	ความ สูง		ความยาว รอบผล	ความสูง
M1-1	108.5	10.94	16.4	16	60.28	22.4	72.31
M1-2	56	8.05	16.3	15.5	65.27	NA	NA
M1-3	76	11.19	14.5	14.5	44.30	NA	NA
M2-1	81	11.81	13.6	13.6	45.58	14.4	52.70
M2-2	165.1	11.80	12.8	12.2	44.34	14.3	49.25
M2-3	68	10.35	12.4	11.2	41.45	17.3	55.36
M3-1	121	10.04	17	16	70.30	24.8	85.60
M3-2	122	12.29	19	15.5	68.28	22.1	74.43
M3-3	122	10.32	16	14	70.29	20.6	67.63
M4-1	137	13.65	21	19.2	71.35	27.6	89.07
M4-2	100	10.43	16.9	15.6	56.05	20.4	71.27
M4-3	100	10.84	18	16.5	65.27	26.5	80.05
M5-1	130	10.63	18.5	17.3	63.11	26.2	87.01
M5-2	116	11.04	17.5	16.3	63.70	22.3	72.8
M5-3	128	11.38	17.5	17	61.84	22.5	77.45
M6-1	78	6.44	13.6	12.5	58.99	21.4	61.65
M6-2	71.5	9.18	12.6	11.3	44.39	8.5	34.12
M6-3	72.5	7.08	11.3	11.3	71.41	20.1	57.04
M7-1	82	9.75	12.4	12	46.52	17.4	59.71
M7-2	85	9.84	15	13.6	50.45	16.5	57.58
M7-3	85.5	10.84	13.5	11.9	48.97	14.8	55.63
M8-1	94	9.10	14.6	11.5	50.32	20.2	56.86
M8-2	69	10.50	13.5	11.5	43.17	NA	NA
M8-3	65.5	10.67	12.5	12.5	40.45	17.5	58.89

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนของการปลูกสัปดาห์ที่ 10

หมายเลข	ความสูง ของต้น (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ลำต้น (ซม.)	ขนาดของใบ (ซม.)		ความกว้าง ระหว่างก้าน สูงสุด (ซม.)	ขนาดผล (ซม.)	
			ความ กว้าง	ความ สูง		ความยาว รอบผล	ความ สูง
M9-1	79	10.28	14.6	14	15.61	NA	NA
M9-2	89	10.00	13.5	12.7	49.89	15.6	59.65
M9-3	83	10.10	13.7	12.2	47.90	19.7	66.19
M10-1	99.5	97.79	15.2	15.4	55.48	24.2	78.59
M10-2	106	9.91	15.3	14.9	50.48	24.1	72.17
M10-3	100	9.69	16.4	13.2	52.18	14	53.85
M11-1	67.5	8.63	14.3	14.6	41.93	18.7	63.96
M11-2	129	10.72	18	18	66.62	25.1	78.17
M11-3	103	10.58	15.5	15.7	61.25	21.4	67.14
M12-1	97	10.14	16.5	14	58.83	19.9	69.06
M12-2	118.5	11.50	19	17	63.58	23.5	83.76
M12-3	106	9.87	15.6	15.4	55.43	19.8	69.76
M13-1	104.5	9.44	14.7	13.4	48.58	22.7	74.33
M13-2	85	9.28	15.3	13.5	43.24	13.7	53.55

ตารางที่ 4.7 ผลข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบปลูกการปลูกสัปดาห์ที่ 10

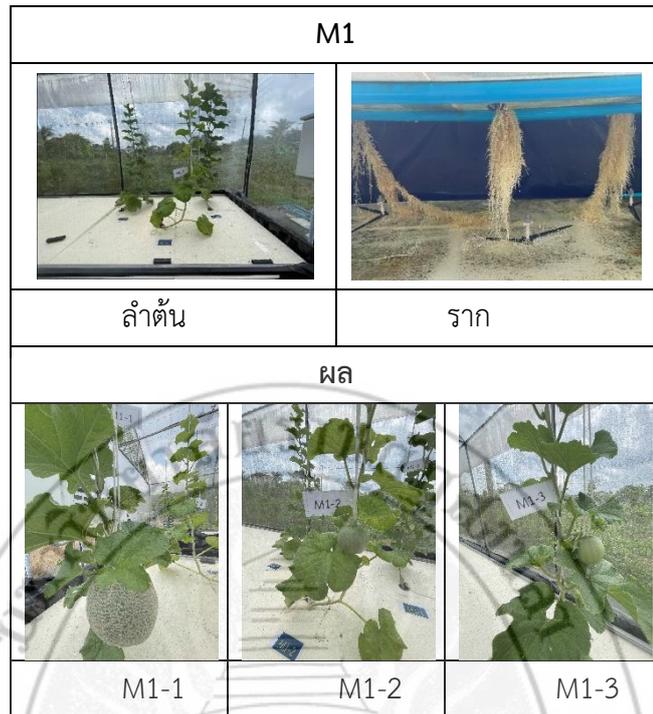
หมายเลข	ความสูง ของต้น (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ลำต้น(ซม.)	ขนาดของใบ(ซม.)		ความกว้าง ระหว่างก้าน สูงสุด (ซม.)	ขนาดผล (ซม.)	
			ความ กว้าง	ความสูง		ความยาว รอบผล	ความ สูง
B-1	131	12.54	19.5	18	66.60	34.1	109.60
B-2	98	10.99	17.5	17	56.62	18.8	63.48
B-3	103	13.30	19.5	17.8	60.83	29.2	102.30
B-4	119	13.33	19.1	17.7	52.54	30.9	102.96
B-5	116.5	11.82	17.4	15.2	60.10	30.5	92.95
B-6	118.5	12.36	17.6	15.4	54.17	31.8	90.40

ตารางที่ 4.7 ผลข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกด้วยระบบถุงปลูกการปลูกสัปดาห์ที่ 10

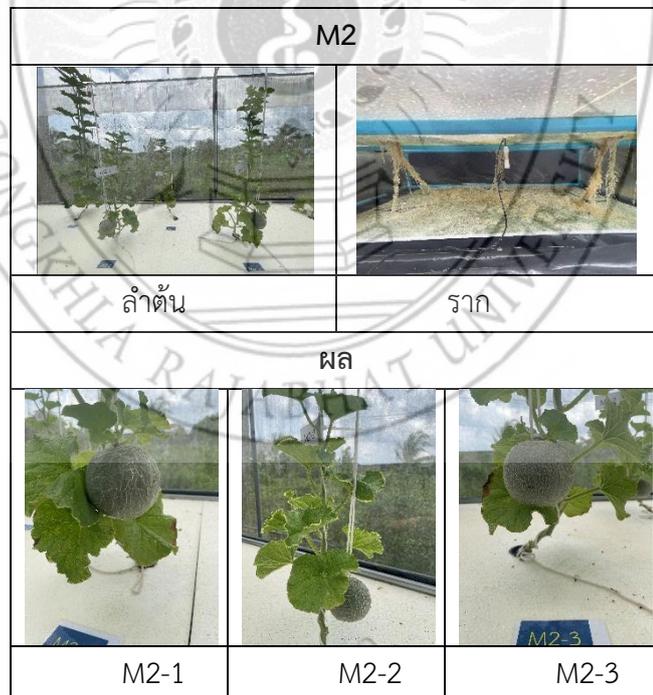
หมายเลข	ความสูง ของต้น (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ลำต้น(ซม.)	ขนาดของใบ(ซม.)		ความกว้าง ระหว่างก้าน สูงสุด (ซม.)	ขนาดผล (ซม.)	
			ความ กว้าง	ความสูง		ความยาว รอบผล	ความ สูง
B-7	87	14.45	19.8	19.3	57.82	22.2	78.62
B-8	98	11.56	16.2	117.4	60.22	29.1	87.16
B-9	107.5	12.88	16.5	16.2	56.28	31.7	95.45
B-10	86	10.44	16	15.5	45.42	27.3	80.29
B-11	121	11.65	17.2	15.4	70.11	30.6	90.35
B-12	79	11.10	17.2	16.9	55.27	28.2	84.25
B-13	95	12.31	17.4	16.8	61.46	25.6	75.39
B-14	93.5	11.14	17.5	15.6	48.93	28.9	81.95
B-15	114.5	11.22	19.8	18	63.95	33.5	103.03
B-16	133.2	12.57	20	18.7	68.01	33.1	95.71
B-17	126.5	12.41	20.2	19.8	66.10	32.2	96.31
B-18	96	11.11	18	13.6	54.24	38.9	85.71
B-19	114.5	10.33	17.5	16.8	64.12	31.8	90.7
B-20	115.5	10.46	17.5	16.6	56.98	27.7	76.71
B-21	94	11.63	20.5	18.5	60.35	30	95.96

4. ลักษณะทางกายภาพของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูก

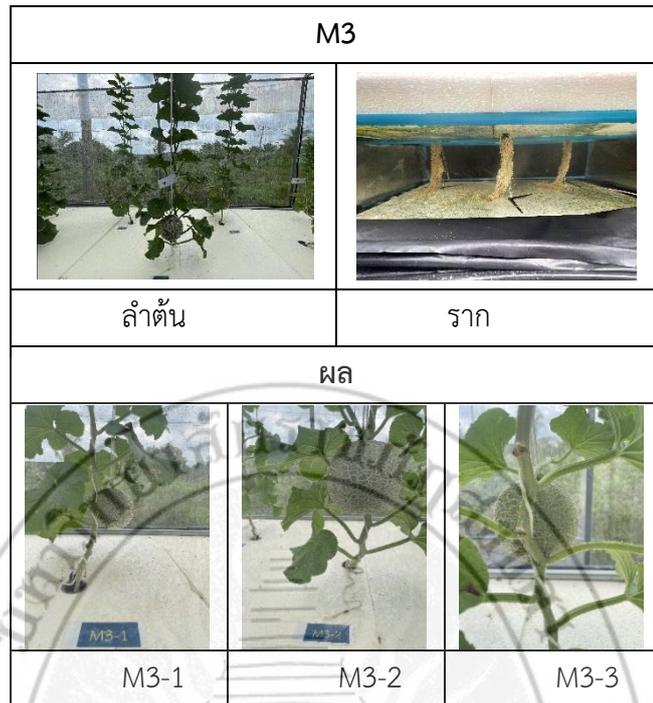
ลักษณะทางกายภาพของต้นเมล็ดอ่อนที่เปลี่ยนแปลงมีรายละเอียดข้อมูลของขนาดส่วนต่างๆ ได้แก่ ลำต้น ราก และผลเมล็ดอ่อน ในการปลูกแต่ละรูปแบบจากปัจจัยการทดลองทั้ง 13 รูปแบบ แสดงรายละเอียดข้อมูลหลังการปลูกวันที่ 63 มีลักษณะแต่ละรูปแบบของการปลูกที่เกิดการเจริญเติบโตด้วยการปลูกแบบรากแขวนลอยแสดงดังชนิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง 4.96-4.108 แสดงลักษณะภาพรวมของแปลงปลูกที่มีการเจริญเติบโตของต้นเมล็ดอ่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนลอยแสดงดังภาพที่ 4.109 และแบบถุงปลูกที่มีรูปแบบเดียวที่ใช้ในการดูแลให้น้ำและปุ๋ยแสดงดังภาพที่ 4.110 ทั้ง 2 รูปแบบการปลูกในแปลงปลูกเดียวกัน



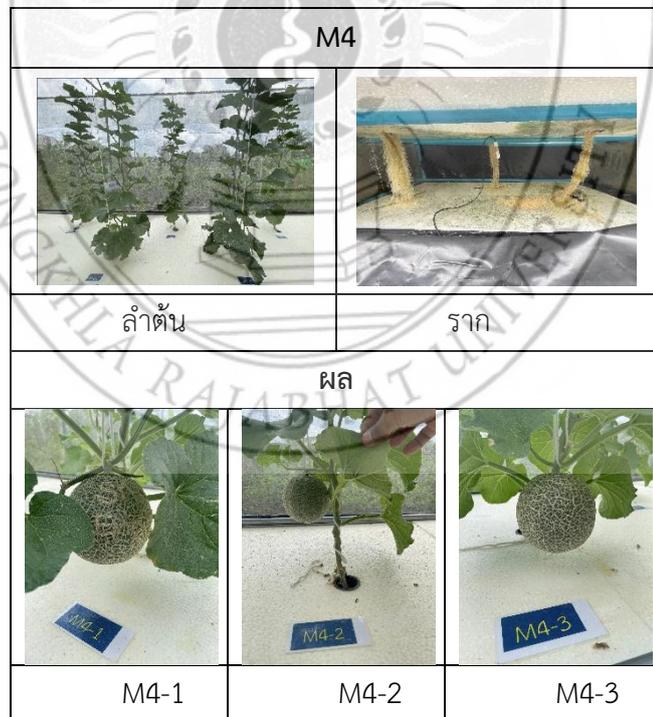
ภาพที่ 4.96 การทดลองที่ 1 (M1)



ภาพที่ 4.97 การทดลองที่ 2 (M2)



ภาพที่ 4.98 การทดลองที่ 3 (M3)



ภาพที่ 4.99 การทดลองที่ 4 (M4)

<b>M5</b>		
		
ลำต้น	ราก	
<b>ผล</b>		
		
M5-1	M5-2	M5-3

ภาพที่ 4.100 การทดลองที่ 5 (M5)

<b>M6</b>		
		
ลำต้น	ราก	
<b>ผล</b>		
		
M6-1	M6-2	M6-3

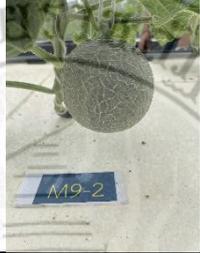
ภาพที่ 4.101 การทดลองที่ 6 (M6)

M7		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M7-1	M7-2	M7-3

ภาพที่ 4.102 การทดลองที่ 7 (M7)

M8		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M8-1	M8-2	M8-3

ภาพที่ 4.103 การทดลองที่ 8 (M8)

M9		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M9-1	M9-2	M9-3

ภาพที่ 4.104 การทดลองที่ 9 (M9)

M10		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M10-1	M10-2	M10-3

ภาพที่ 4.105 การทดลองที่ 10 (M10)

M11		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M11-1	M11-2	M11-3

ภาพที่ 4.106 การทดลองที่ 11 (M11)

M12		
		
ลำต้น	ราก	
ผล		
		
M12-1	M12-2	M12-3

ภาพที่ 4.107 การทดลองที่ 12 (M12)

M13		
		
ลำต้น		ราก
ผล		
		
M13-1	M13-2	M13-3

ภาพที่ 4.108 การทดลองที่ 13 (M13)



ภาพที่ 4.109 แสดงลักษณะภาพรวมของแปลงปลูกแบบรากแขวนลอย



ภาพที่ 4.110 แสดงลักษณะภาพรวมของแปลงปลูกด้วยถุงปลูก

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของต้นเมล่อนและผลที่ปลูกในการทดลอง พบว่าการปลูกด้วยระบบรากแขวนสามารถปลูกเมล่อนได้ผลเมล่อนตามเป้าหมายการปลูก ส่วนลักษณะของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนตามรูปแบบการทดลองทั้ง 13 แบบ มีความแตกต่างกันเห็นได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงผลของการทดลองตามความแตกต่างตามสภาวะต่างๆ ที่เกิดจากปัจจัยการทดลองของแต่ละรูปแบบ แต่ในบางส่วนอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างด้วยปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทางผู้วิจัยได้เก็บประเด็นปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงแก้ไขป้องกันปัญหาไม่ให้เกิดขึ้นอีก ซึ่งจะช่วยลดความแปรปรวนในการทดลองในการปลูก เป็นประเด็นที่พบในการดำเนินงานวิจัย เป็นข้อเสนอสำหรับการปลูกต่อไปและคาดหวังให้ได้ผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยมากที่สุด ได้สภาวะที่ดีในการปลูกเมล่อนแบบระบบรากแขวนตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่อไป

#### 5. ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก

ผลที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานวิจัยในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวน พบว่ากระบวนการที่ใช้ในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวนสามารถปลูกเมล่อนให้ผลผลิตได้ มีลักษณะผลผลิตเมล่อนที่ได้จากการปลูกดังภาพที่ 4.111 ผลผลิตที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่แตกต่างจากการปลูกด้วยระบบปลูกซึ่งเป็นวิธีการปลูกด้วยถุงปลูกแสดงดังภาพที่ 4.112



ภาพที่ 4.111 ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก



ก.ผลที่ได้จากการปลูกรากแขวนลอย

ข.ผลที่ได้จากปลูกจากถุงปลูก

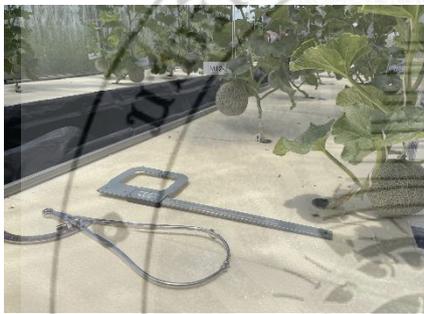
ภาพที่ 4.112 ผลเมล่อนที่ได้จากการปลูก (ก.แบบรากแขวนลอย ข.แบบถุงปลูก)

## 6. วิธีการ เครื่องมือ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ผลที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานวิจัยในการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวนลอยและการปลูกแบบดั้งเดิม ในช่วงการเจริญเติบโตจะเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการปลูกที่ต่างกััน ซึ่งจะเก็บขนาดการเจริญเติบโตของต้น ใบ และขนาดผลตั้งแต่เริ่มให้ผลไปถึงหลังเก็บเกี่ยว โดยใช้เครื่องมือในการเก็บข้อมูล ได้แก่ เวอร์เนียคาลิเปอร์ สายวัดความยาว ตลับเมตร และเกจวัดค่าความหวาน (Brix meter) โดยมีรายละเอียดลักษณะการเก็บข้อมูล และผลที่ได้ดังนี้

### 6.1 เครื่องมือ วิธีการเก็บข้อมูล และผลผลิตที่ได้จากการทดลอง

#### 1) ลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลที่เกิดขึ้นจากการปลูก



ภาพที่ 4.113 เครื่องมือวัดที่ใช้เก็บข้อมูล



ภาพที่ 4.114 วัดความสูงต้นเมล่อน



ภาพที่ 4.115 วัดขนาดความโตของใบเมล่อน



ภาพที่ 4.116 ลักษณะการวัดความโตผลเมล่อน

## 6.2 ตรวจสอบน้ำหนักผลเมล่อนที่เก็บเกี่ยวหลักการปลูก



ภาพที่ 4.117 ชั่งน้ำหนักผลหลังเก็บเกี่ยว

## 6.3 ลักษณะความเสียหายของผลเมล่อนที่เกิดในขณะการปลูก



ภาพที่ 4.118 ลักษณะผลที่ผิดปกติจากการโดยทำลายจากศัตรูพืช



ภาพที่ 4.119 ลักษณะผลและเนื้อเมล่อนที่ปลูกด้วยระบบรากแขวนลอย

## วิเคราะห์เปรียบเทียบผลด้านต้นทุนการปลูกด้วยถุงปลูกและแบบรากแขวนลอย

ผลการดำเนินการปลูกเมล็ดอ่อนด้วยระบบรากแขวนลอยกับการปลูกด้วยถุงปลูก มีรายละเอียดที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานเก็บข้อมูลนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อชี้ประเด็นที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาต้นทุนด้านพลังงานที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการดูแลระบบพร้อมปุ๋ยที่ใส่ควบคู่กันมีรายละเอียดดังนี้

### 1. พลังงานที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการจ่ายน้ำให้ต้นเมล็ดอ่อน

เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้จากการทดลองการปลูกจะใช้มอเตอร์ 2 ขนาดที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน เพื่อควบคุมการจ่ายน้ำไปเลี้ยงต้นเมล็ดอ่อนทั้งสองแบบ โดยมีรายละเอียดการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าดังนี้

1.1 การคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อเดือน เพื่อนำไปประเมินค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการดูแลระบบการปลูก โดยกำหนดสมมุติฐานเรื่องระยะเวลาการใช้งานต่อวัน เช่น: กรณีที่ใช้งาน วันละ 6 ชั่วโมง มีวิธีการคำนวณดังนี้

การคำนวณการใช้ไฟฟ้าเบื้องต้น (มาตรฐานการไฟฟ้า) สูตรการคำนวณหน่วยไฟฟ้า (kWh)

พลังงานไฟฟ้า (kWh) = กำลังไฟฟ้า (kW) × เวลาใช้งาน (ชม.)

อ้างอิงจาก:

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA). (2564). คู่มือการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ. สืบค้นจาก <https://www.pea.co.th>

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.). (2563). การคิดหน่วยพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

IEEE Standard 141™-1993 (Red Book): Electric Power Distribution for Industrial Plants – ให้แนวคิดการประเมินโหลดและกำลังไฟฟ้าในระบบอุตสาหกรรม

จึงนำมาใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

1. กำลังไฟฟ้า: 66 วัตต์ หรือ 0.066 กิโลวัตต์

2. ระยะเวลาใช้งานต่อวัน: 6 ชั่วโมง

3. จำนวนวันต่อเดือน: 30 วัน

4. หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (kWh):

$0.066 \times 6 \times 30 = 11.88$  หน่วย

1. ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (โดยประมาณ): 4.20 บาท/หน่วย

2. ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าต่อเดือน:

$11.88 \times 4.20 = 49.90$  บาทต่อเดือน (โดยประมาณ)

1.2 การปลูกในถุงปลูกจะใช้ตัวควบคุมการทำงานโดย Timer control ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมการปลูก เนื่องจากการปลูกแบบนี้จะใช้มอเตอร์หนึ่งตัวควบคุมการจ่ายน้ำให้ 10 ถุงปลูก ซึ่งจะมีการปลูก 30 ถุง ใช้มอเตอร์ 3 ตัว เพื่อควบคุมการจ่ายน้ำไปเลี้ยงต้นของเมล็ดอ่อนและจ่ายพร้อมกันตามช่วงเวลาที่กำหนดตามรูปแบบดังตารางที่ 4.2 จึงเลือกใช้มอเตอร์ที่มีขนาดแรงดันสูงแสดงดังภาพที่ 4.120



ภาพที่ 4.120 มอเตอร์ควบคุมการปลูกแบบถุง

คุณสมบัติของมอเตอร์เป็นปั้มน้ำแรงดันสูง รุ่น ChinaJayas มีคุณสมบัติดังนี้ (ตามฉลากบนตัวปั้มน้ำ): แรงดันไฟฟ้า: 12V DC กระแสไฟฟ้า: 4.5–6.0 A แรงดันสูงสุด: 150 PSI (10.3 bar) นำมาคำนวณกำลังไฟฟ้า

คำนวณกำลังไฟฟ้า ใช้ค่ากระแสไฟเฉลี่ย:

$$\text{กระแสเฉลี่ย} = \frac{4.5 + 6.02}{2} = 5.25 \text{ A}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้า} = 12\text{V} \times 5.25\text{A} = 63 \text{ วัตต์} = 0.063 \text{ kW}$$

1.3 มอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการระบบรากแขวนลอย



ภาพที่ 4.121 มอเตอร์ควบคุมการปลูกแบบระบบรากแขวนลอย

คุณสมบัติของมอเตอร์เป็นปั้มน้ำแรงดันสูง GAMMA รุ่น 12V DC ซึ่งมีข้อมูลระบุไว้บนฉลาก นำมาคำนวณกำลังไฟฟ้า

คำนวณกำลังไฟฟ้า ใช้ค่ากระแสไฟเฉลี่ย:

แรงดันไฟฟ้า: 12V DC

กระแสไฟฟ้า: 5.5A

กำลังไฟฟ้า (P) =  $V \times I = 12V \times 5.5A = 66$  วัตต์

## 2. พลังงานที่ใช้ในการจ่ายน้ำเลี้ยงต้นเมล่อนทั้งสองระบบ

การออกแบบการทดลองในการจ่ายน้ำเพื่อดูแลระบบการปลูกจะแตกต่างกันโดยการปลูกเมล่อนแบบถ่วงปลูกจะใช้ Timer ควบคุมการให้น้ำตามรอบเวลาที่กำหนดใช้มอเตอร์ 1 ตัว ควบคุมการจ่ายให้ต้นเมล่อน 10 ต้น พลังงานในการออกแบบการทดลองจะกำหนดให้ มอเตอร์หนึ่งตัว ควบคุมการจ่ายน้ำให้กับต้นเมล่อน 3 ต้น เป็นรูปแบบการทดลองที่เหมือนกัน ซึ่งมี 13 การทดลองใช้มอเตอร์ 13 ตัว เมื่อคิดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการทำงานจริงของมอเตอร์ตามรอบการทดลองที่ออกแบบไว้โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1 การปลูกแบบถ่วงปลูก

พลังงานที่ใช้ในการปลูกแบบถ่วงเพื่อพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการออกแบบการควบคุมการจ่ายน้ำเลี้ยงต้นเมล่อนที่ปลูกแบบถ่วงปลูกดังตารางที่ 4.2 นำมาคำนวณอัตราการใช้ไฟตลอดการปลูกดังนี้

ในช่วงวันที่ 1-30 ของการปลูกใช้เวลาต่อวันอยู่ที่ 8 นาที หรือ 0.133 ชั่วโมง ดังนั้นจำนวนไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (kWh) =  $0.066 \times 0.133 \times 30 = 0.264$  หน่วย ใช้มอเตอร์จำนวน 3 ตัว มีอัตราการใช้ไฟต่อเดือนอยู่ที่ 0.8 หน่วย

ในช่วงวันที่ 30-90 ของการปลูกใช้เวลาต่อวันอยู่ที่ 14 นาที หรือ 0.233 ชั่วโมง ดังนั้นจำนวนไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (kWh) =  $0.066 \times 0.233 \times 30 = 0.462$  หน่วย ใช้มอเตอร์จำนวน 3 ตัว มีอัตราการใช้ไฟต่อเดือนอยู่ที่ 1.386 หน่วย

### 2.2 การปลูกแบบรากแขวนลอย

พลังงานที่ใช้ในการปลูกแบบรากแขวนลอยโดยพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการออกแบบควบคุมการจ่ายน้ำเลี้ยงต้นเมล่อนที่ปลูกแบบถ่วงปลูกดังตารางที่ 4.4 นำมาคำนวณหาอัตราการใช้ไฟตลอดการปลูกได้ดังนี้

คำนวณการใช้พลังงานในการควบคุมการจ่ายน้ำเพื่อเลี้ยงต้นเมล่อนตามรูปแบบการทดลองในแต่ละวันทั้ง 13 แบบการทดลอง

1) นำรอบช่วงเวลาการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละแบบการทดลอง (ตารางที่ 4.4) มาคำนวณเวลาใช้งานของมอเตอร์ ได้รายละเอียดดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การคำนวณเวลาการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละการทดลอง

Model	5.00- 7.00	7.00- 9.00	9.00- 11.00	11.00- 13.00	13.00- 15.00	15.00- 17.00	17.00- 19.00	19.00- 05.00	เวลาการพ่น/ วัน (นาที)
1	12	20	30	40	30	20	12	28.57	192.57
2	2.31	4.62	6.67	13.33	6.67	4.62	2.31	5.94	46.47
3	30	45	60	72	60	45	30	78.26	420.26
4	6.67	12.86	18	32.73	18	12.86	6.67	17.48	125.27
5	80	80	80	80	80	80	80	200	760
6	3.87	7.5	10.91	21.82	10.91	10.91	3.87	10.08	79.87
7	3.87	7.5	10.91	20	10.91	7.5	3.87	9.84	74.4
8	14.12	25.26	34.29	53.33	34.29	25.26	14.12	37.5	238.17
9	7.5	14.12	20	34.29	20	14.12	7.5	19.35	136.88
10	7.5	14.12	20	34.29	20	14.12	7.5	19.35	136.88
11	7.5	14.12	20	34.29	20	14.12	7.5	19.35	136.88
12	7.5	14.12	20	34.29	20	14.12	7.5	19.35	136.88
13	7.5	14.12	20	34.29	20	14.12	7.5	19.35	136.88

ได้รอบเวลาแล้วนำมาคำนวณการใช้พลังงานในการทำงานของแต่ละแบบการทดลอง นำค่าเวลาที่ใช้ต่อวันมาคูณด้วยค่าพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ ด้วยสูตรพลังงานไฟฟ้า (kWh) = กำลังไฟฟ้า (kW)×เวลาใช้งาน (ชม.) ตัวอย่าง Model ที่ 1 กำลังไฟฟ้า (kW) คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้หัวข้อที่ 1.3 กำลังไฟฟ้า (P) =  $V \times I = 12V \times 5.5A = 66$  วัตต์) นำมาคูณกับเวลาการพ่น/วัน (อยู่ที่ 192.57) จะได้พลังงานที่ใช้ในการทดลอง Model ที่ 1 = 0.2022 kWh นำไปคูณจำนวนวัน/เดือน ได้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (kWh) และคูณจำนวนวันตลอดการปลูกหนึ่งรอบ (90 วัน) ได้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการปลูก (kWh) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละแบบการทดลอง

Model	เวลาการพ่น/ วัน (นาท)	พลังงานไฟฟ้าที่ ใช้ต่อวัน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ต่อเดือน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อ รอบการปลูก (kWh)
1	192.57	0.2022	6.066	18.198
2	46.47	0.0488	1.464	4.392
3	420.26	0.4413	13.239	39.717
4	125.27	0.1315	3.945	11.835
5	760	0.798	23.94	71.82
6	79.87	0.0839	2.517	7.551
7	74.4	0.0781	2.343	7.029
8	238.17	0.2501	7.503	22.509
9	136.88	0.1437	4.311	12.933
10	136.88	0.1437	4.311	12.933
11	136.88	0.1437	4.311	12.933
12	136.88	0.1437	4.311	12.933
13	136.88	0.1437	4.311	12.933

ผลจากการใช้พลังงานในการออกแบบการทดลองทั้งหมดพบว่ารูปแบบการทดลองที่ 4 มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด และรูปแบบการทดลองที่ 5 จะใช้พลังงานมากที่สุดเพื่อควบคุมการปลูกให้บรรลุผลการทดลอง จากข้อมูลที่ได้จะนำไปพิจารณากับผลการทดลองด้านอื่นๆ เพื่อสรุปผลการดำเนินงานในการวิจัยต่อไป

### 3. ปริมาณน้ำและปุ๋ยที่ใช้ในการดูแลระบบ

จากผลการดำเนินการต่อรอบปลูก พบว่าการใช้น้ำในการปลูกแบบถุงปลูกต่อรอบตั้งแต่เพาะเมล็ดจนเก็บเกี่ยวผลผลิตจะใช้น้ำอยู่ที่ 30.5 ลูกบาศก์เมตร และการปลูกแบบรากแขวนลอยจะใช้น้ำตลอดการปลูกอยู่ที่ 10 ลูกบาศก์เมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการใช้น้ำพบว่าการปลูกด้วยระบบรากแขวนลอยจะใช้น้ำน้อยกว่าการปลูกแบบถึงปลูกถึง 3 เท่า จากมิเตอร์ที่ได้ติดตั้งเก็บข้อมูลการใช้น้ำในระบบการจ่ายเลี้ยงต้นเมล็ดนอน แฉวที่ 1 เป็นการปลูกแบบถุงปลูก แฉวที่ 2 และ 3 เป็นการปลูกแบบระบบรากแขวนลอย แสดงดังภาพที่ 4.121



ภาพที่ 4.122 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกหนึ่งรอบ

### 3.1 ปริมาณการใช้น้ำและปุ๋ยของการปลูกแบบถุงปลูก

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกเมล็ดแบบถุงปลูกทั้งหมด 30 ถุงปลูก โดยให้น้ำตามรูปแบบการปลูกดังตารางที่ 4.2 ตามช่วงเวลาที่กำหนดพบว่าตลอดระยะเวลาการปลูกตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงเก็บเกี่ยวจะใช้น้ำโดยรวมอยู่ที่ 35 ลูกบาศก์เมตร หรือ 35,000 ลิตร คิดเฉลี่ยต่อถุงปลูกใช้น้ำ 1666.67 ลิตร โดยมีลักษณะการให้น้ำและปุ๋ยตามช่วงเวลาโดยกำหนดเปิดปิดมอเตอร์ในการทำงานให้แก่ต้นเมล็ดที่ปลูกแสดงดังภาพที่ 4.123



ภาพที่ 4.123 ลักษณะการให้น้ำที่เมล็ดแบบถุงปลูก

จากปริมาณการใช้น้ำเพื่อเลี้ยงต้นเมล็ดซึ่ง จะใส่ปุ๋ยสูตร AB ผสมด้วยต่อสัดส่วนของน้ำในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต โดยวัดค่า EC ของน้ำเพื่อปรับค่าความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ตอบสนองต่อความต้องการของต้นเมล็ดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาเก็บเกี่ยวมีรายละเอียดการใช้ปุ๋ยและนำมาคำนวณเป็นตัวเงินที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปริมาณการใส่ปุ๋ยในการปลูกแบบถุงปลูก

วันที่	ใส่ปุ๋ย/วัน (ม.ล.)	จำนวนปุ๋ยรวม(ม.ล.)	มูลค่า(บาท)
1-20	600	12,000	300
21-30	750	9,000	225
31-90	900	54,000	1,350

การพิจารณาเป็นอัตรากาการใช้ปุ๋ยต่อจำนวนเงินที่ใช้ จากการผสมปุ๋ยในแต่ละครั้ง โดยนำปริมาณปุ๋ยที่ใช้นำมาคำนวณต้นทุนโดยเฉลี่ยราคาปุ๋ยต่อลิตรมีราคาประมาณ 25 บาท นำไปคูณกับปริมาณการใช้น้ำในการดูแลต้นเมล็ดในระยะเวลาปลูก ในการปลูกแบบถุงปลูกพบว่าเป็นต้นทุนของปุ๋ยที่ใช้เป็นเงินอยู่ที่ 1,875 บาท เมื่อคิดอัตรากาต้นทุนปุ๋ยต่อต้นอยู่ที่ 62.5 บาท

### 3.2 ปริมาณการใช้น้ำและปุ๋ยของการปลูกแบบรากแขวนลอย

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกเมล็ดแบบรากแขวนลอยทั้ง 13 การทดลอง โดยแต่ละการทดลองจะมี 3 หลุมปลูกที่มีรูปแบบเหมือนกัน รวมหลุมปลูกทั้งหมด 39 หลุม ในการปลูกแบบรากแขวนลอยจะมีการออกแบบโดยใช้จำนวนกลับมารวมในถังพักหลังจากการพ่นสเปรย์น้ำให้แก่รากของต้นเมล็ด แสดงลักษณะการให้น้ำและปุ๋ยของการปลูกแบบรากแขวนลอยดังภาพที่ 4.124



ภาพที่ 4.124 ลักษณะการให้น้ำและปุ๋ยรูปแบบการปลูกระบบรากแขวนลอย

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ในระบบการปลูกตลอด 1 รอบ พบว่าใช้น้ำอยู่ที่ 10.5 ลูกบาศก์เมตร หรือ 10,500 ลิตร (ในการพิจารณาการใช้น้ำส่วนนี้ไม่สามารถสร้างระบบแยกแต่ละการทดลองได้เนื่องจากจะต้องใช้ต้นทุนสูงมาก ซึ่งเกินกว่าที่จะดำเนินการในโครงการวิจัยนี้ได้ จึงออกแบบวางแผนการทดลองโดยใช้ภาพรวมนำมาพิจารณาหาอัตราเฉลี่ยของการใช้น้ำจากการทดลองทั้ง 13 แบบ) ต่อการปลูก 39 หลุมปลูก ตลอดระยะเวลาการปลูกใช้น้ำต่อต้นเฉลี่ยต่อต้นอยู่ที่ 256.41 ลิตร เมื่อพิจารณาอัตรากาใช้น้ำโดยเฉลี่ยต่อต้น คำนวณจากการใช้น้ำรวมกันเนื่องจากการสร้างระบบการจ่ายน้ำแยกตามแต่ละรูปแบบการทดลองจะมีต้นทุนในการดำเนินการที่สูงมาก ซึ่งไม่สามารถดำเนินการได้ เมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากอัตรากาใช้น้ำอาจจะได้ค่าที่มีความแปรปรวนอยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงขอสรุปภาพรวมการใช้น้ำโดยเฉลี่ยในการรายงานผลในงานวิจัยครั้งนี้ จากปริมาณการใช้น้ำเพื่อเลี้ยงต้นเมล็ดจะใส่ปุ๋ยสูตร AB ผสมต่อสัดส่วนน้ำในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต โดยวัดค่า EC ของน้ำเพื่อปรับค่าความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ตอบสนองต่อความต้องการของต้นเมล็ดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาเก็บเกี่ยว มีรายละเอียดกาใช้ปุ๋ย นำมาคำนวณเป็นตัวเงินที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกแบบรากแขวนลอย

วันที่	ใช้น้ำ/วัน (ม.ล.)	จำนวนปุ๋ยรวม(ม.ล.)	มูลค่า(บาท)
1-20	200	4000	100
21-30	250	2500	62.5
31-90	320	19200	480

การพิจารณาเป็นอัตราการใช้น้ำต่อจำนวนเงินที่ใช้ จากการผสมปุ๋ยในแต่ละครั้งจะนำปริมาณปุ๋ยที่ใช้นำมาคำนวณต้นทุนโดยเฉลี่ยราคาปุ๋ยต่อลิตรมีราคาประมาณ 25 บาท นำไปคูณกับปริมาณการใช้น้ำในการดูแลต้นเมล็ดจนตลอดระยะเวลาปลูก ในการปลูกแบบรากแขวนลอยพบว่าเป็นต้นทุนของปุ๋ยที่ใช้เป็นเงินอยู่ที่ 642.5บาท เมื่อคิดอัตราต้นทุนปุ๋ยต่อต้นอยู่ที่ 16.47บาท

#### 4. น้ำหนักและค่าความหวานของผลเมล็ดอ่อน

รูปแบบการปลูกที่ต่างกันทั้งสองแบบซึ่งได้ผลผลิตที่เกิดจากการทดลองโดยพิจารณา น้ำหนักของผลที่เกิดจากการปลูกได้แก่ ขนาดความโตและค่าความหวานของผลเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกนำมาวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับการปลูกทั้งสองรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

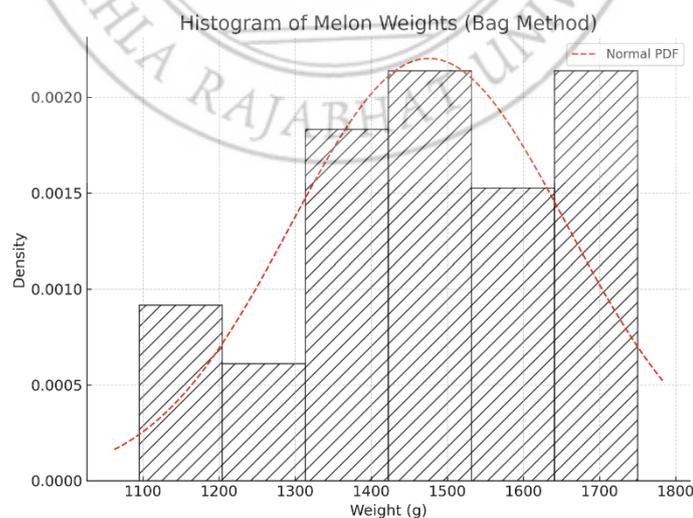
##### 4.1 น้ำหนักผลเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกเมล็ดอ่อนด้วยถุงปลูก

การปลูกเมล็ดอ่อนด้วยถุงปลูกจากการทดลองจำนวน 30 ถุงปลูก ได้ผลของน้ำหนักการปลูก แสดงรายละเอียดดังภาพผนวก ก. ตารางที่ ก-1 นำข้อมูลมาพิจารณาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีน้ำหนักอยู่ที่ 1475.67 กรัม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 181.13 เมื่อพิจารณาตรวจสอบกลุ่มขนาดจำแนกออกได้ 3 กลุ่ม คือ เล็ก  $\leq 1.30$  กิโลกรัม 5 ผล (17 %) กลาง 1.31–1.60 กิโลกรัม 16 ผล (53 %) และ ใหญ่  $> 1.60$  กิโลกรัม 9 ผล (30 %) สรุปได้ว่าผลผลิตมากกว่า 83 % อยู่ในช่วงกลาง-ใหญ่ จึงถือว่าค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.12

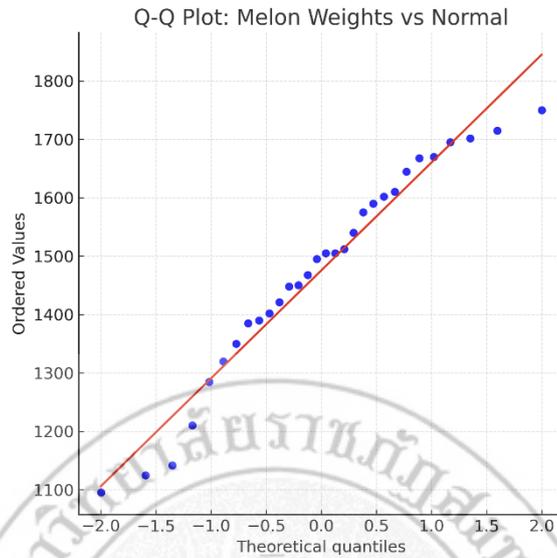
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของน้ำหนักเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก

Statistic	Value
n	30
Mean (g)	1475.67
Median (g)	1500
SD (g)	181.13
Variance (g <sup>2</sup> )	32807.75
Min (g)	1095
Max (g)	1750
Range (g)	655
CV (%)	12.27
95% CI lower	1408.03
95% CI upper	1543.3

เมื่อนำน้ำหนักของผลเมล่อนที่ได้จากการปลูกแบบถุงปลูกมาวิเคราะห์ความเป็นปกติของข้อมูลพบว่าการกระจายตัวของน้ำหนักมีการแจกแจงแบบปกติ แสดงดังภาพที่ 4.125 นำมาพล็อตกราฟการกระจายตัวของน้ำหนักผลเมล่อนพบว่าการกระจายตัวอย่างใกล้เคียงค่าเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่และมีส่วนน้อยที่กระจายตัวออกจากค่ากลางแสดงดังภาพที่ 4.126

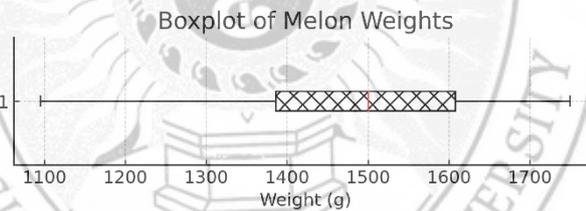


ภาพที่ 4.125 ผลการทดสอบความปกติของน้ำหนักผลเมล่อนจากปลูกแบบถุงปลูก



ภาพที่ 4.126 การกระจายตัวของน้ำหนักผลเมล่อนปลูกแบบถุงปลูก

ภาพที่ 4.125 นำเสนอภาพในรูปแบบ Histogram แสดงการปลูกแบบถุงให้ผลน้ำหนักกระจุกตัวที่ 1.4–1.7 kg จากชุดข้อมูลโดยรวม “ค่อนข้างปกติ” แต่ยังคงมีความแปรปรวนระดับกลาง (CV 12 %) ซึ่งส่งผลให้เพียง ~60 % เข้าเกณฑ์เกรดของน้ำหนักอยู่ในระดับมาก และนำมาแสดงลักษณะการรายงานผลแบบ Boxplot ช่วงระยะของน้ำหนักทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4.127



ภาพที่ 4.127 รายงานโดยรวมค่าน้ำหนักผลเมล่อนในรูปแบบ Boxplot

จากผลที่ได้จากการปลูกเมล่อนแบบถุงปลูกเมื่อพิจารณาน้ำหนักของผลที่ได้จากการปลูกพบว่าให้ค่าน้ำหนักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงได้ว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการมีน้อย การควบคุมดูแลในสภาวะเดียวกันไม่แตกต่างกันถือเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่เป็นไปในรูปแบบการปลูกด้วยถุงปลูกซึ่งเป็นวิธีการปลูกแบบดั้งเดิม ผลที่ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การปลูกแบบรากแขวนลอย แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำหนักผลเมล่อนในรูปแบบการปลูกแบบถุงปลูก ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำหนักผลเมล็ดอ่อนในรูปแบบการปลูกแบบถุงปลูก

รายการ	ค่า
ขนาดตัวอย่าง (n)	30 ผล
ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง	<b>1 475.67 g</b>
SD ตัวอย่าง	181.13 g
ค่าเป้าหมาย ( $\mu_0$ )	1 500 g
t-statistic	-0.736
df	29
p-value (สองทาง)	0.468
95 % CI ของ $\mu$	1 405.21 – 1 546.14 g

#### 4.2 น้ำหนักผลเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกเมล็ดอ่อนแบบรากแขวนลอย

ผลค่าน้ำหนักเกิดจากการปลูกเมล็ดอ่อนแบบรากแขวนลอยในการทดลอง 13 แบบ มีรายละเอียดแสดงข้อมูลดังภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-2 นำข้อมูลค่าน้ำหนักมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในแต่ละกลุ่มการทดลอง ค่าความสม่ำเสมอ (CV) และค่าความแม่นยำของค่าเฉลี่ย (CI) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักการปลูกแต่ละรูปแบบการทดลอง

สูตร	Mean (g)	SD	CV (%)	95 % CI ( $\pm$ g)
M4	1 019	53	5.2	$\pm$ 131
M1	934	42	4.5	$\pm$ 104
M9	938	31	3.3	$\pm$ 77
M8	907	71	7.8	$\pm$ 177
M10	892	24	2.7	$\pm$ 59
M3	887	58	6.5	$\pm$ 144
M5	872	61	7.0	$\pm$ 152
M11	872	55	6.3	$\pm$ 137

สูตร	Mean (g)	SD	CV (%)	95 % CI ( $\pm$ g)
M12	875	51	5.8	$\pm$ 128
M13	923	94	10.2	$\pm$ 234
M6	664	424	63.8	$\pm$ 1 053
M2	539	381	70.7	$\pm$ 947
M7	236	90	38.0	$\pm$ 222

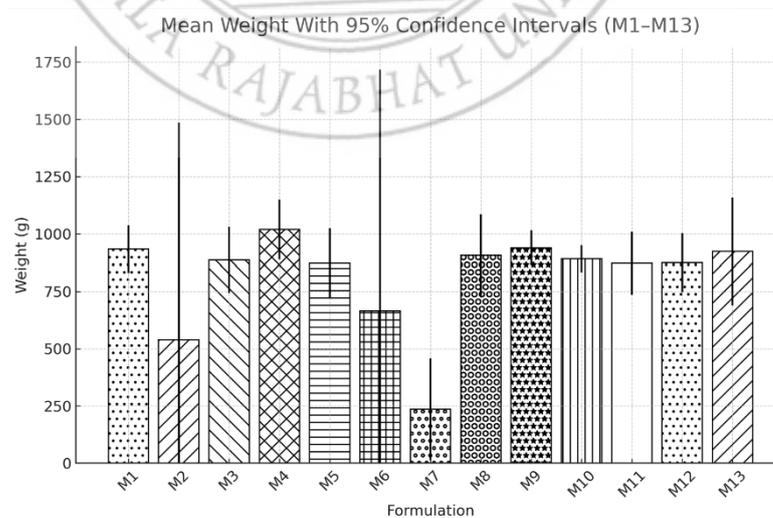
ช่วงความเชื่อมั่น 95 % ( $\pm$  CI) ของค่าเฉลี่ยเพื่อสื่อให้เห็นสัดส่วนจริงของความแตกต่างระหว่างสูตรได้ชัดเจน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

M4 ให้ผลเฉลี่ยสูงสุด ( $\sim$ 1 020 g) และอยู่ในช่วง CI ค่อนข้างแคบ จึงเหมาะเป็นสูตรนำร่องสำหรับการปลูกเพื่อได้น้ำหนักที่ดีในการทดลอง

สูตร M1, M9 และ M13 มีน้ำหนักเฉลี่ยใกล้เคียงกัน 1 kg พร้อม CI สั้น แสดงถึงความสม่ำเสมอภายในสูตรที่ดี

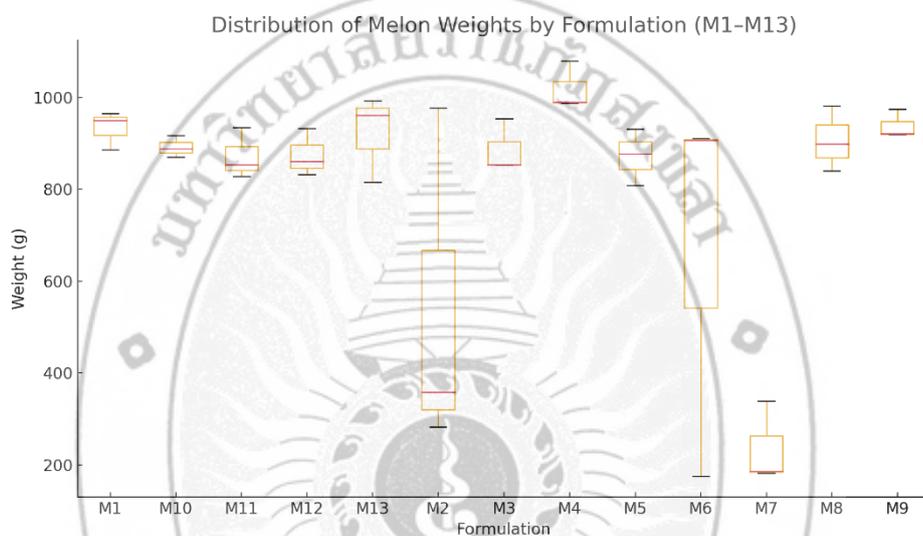
สูตร M2, M6 และ M7 มีน้ำหนักเฉลี่ยต่ำ ( $\leq$  700 g) และ CI ยาว บ่งชี้ความแปรปรวนสูง ควรปรับสภาวะหรือสูตรปุ๋ยก่อนนำไปใช้งานจริง

เมื่อนำข้อมูลค่าน้ำหนักผลเมล็ดที่ได้จากการปลูกเมล็ดแบบบรอกแววนลอย มาแสดงในรูปแบบกราฟแท่ง แสดงถึงน้ำหนักผลเมล็ดเฉลี่ยของแต่ละสูตรการปลูก (M1–M13) โดยคำนวณจากตัวอย่างสูตรละ 3 ผล แกน x แสดงสูตรของการปลูก แกน y แสดงค่าน้ำหนักเฉลี่ยของผลเมล็ดที่ได้ ได้ผลค่าเฉลี่ยน้ำหนักเมล็ดที่ปลูกแบบบรอกแววนลอยในรูปแบบภูมิแท่งแสดงดังภาพที่ 4.128



ภาพที่ 4.128 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลเมล็ดที่ปลูกแบบบรอกแววนลอย

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลเมล่อนที่ปลูกแบบรากแขวนลอยเมื่อพิจารณาความสูงและช่วง CI สันนิษฐานว่ากระบวนการปลูกให้ผลผลิตได้ ทั้ง ปริมาณและความสม่ำเสมอที่ดีกว่า ขณะที่แห้งเดี่ยว หรือช่วง CI กว้างสะท้อนความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากการปลูก และควรปรับปรุงกระบวนการ เพื่อให้ได้ผลที่ดีกว่า หรือรูปแบบการปลูกนี้ไม่เหมาะสมเพราะให้ค่าที่ไม่ดีจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการปลูกอื่นๆ จากผลการทดลองในแต่ละรูปแบบนำมาพิจารณาการกระจายตัวของน้ำหนักผลเมล่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง พบว่าแม้แต่รูปแบบการทดลองที่เหมือนกันก็ยังมีมีความแตกต่างของน้ำหนักผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.129



ภาพที่ 4.129 การกระจายตัวของข้อมูลค่าน้ำหนักผลเมล่อน

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของผลเมล่อนที่ได้จากการทดลอง นำมาหาค่าเฉลี่ยพบว่า เมล่อนโดยส่วนใหญ่มีน้ำหนักอยู่ในระดับใกล้เคียงกับ 1 กิโลกรัม แต่บางรูปแบบการทดลองมีน้ำหนักผลค่อนข้างน้อยอยู่ที่ครึ่งกิโลกรัม ได้แก่การทดลอง M2 และน้อยกว่าครึ่งกิโลกรัมในแบบการทดลองที่ M7 เมื่อพิจารณาน้ำหนักของผลเมล่อนที่ได้จากการปลูกทั้ง 13 รูปแบบการทดลอง นำมาหาความแตกต่างของข้อมูลพบว่ามีขนาดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.15 ที่ค่า  $p < 0.001$  แสดงได้ว่าน้ำหนักผลเมล่อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสูตรทั้ง 13 การทดลอง ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) น้ำหนักแม่ล่อน

แหล่งความแปรปรวน	df	SS	MS	F	p
ระหว่างสูตร (Treatment)	12	3 627 066	302 255	<b>4.86</b>	<b>0.0004</b>
ภายในสูตร (Error)	26	731 511	28 135		
รวม	38	4 358 577			

#### 4.3 ค่าความหวานผลเมล่อนที่ได้จากการปลูกเมล่อนด้วยถุงปลูก

ผลที่เกิดจากการปลูกเมล่อนด้วยถุงปลูกในการทดลองจำนวน 30 ถุง หลังเก็บเกี่ยวนำผลผลิตมาตรวจวัดค่าความหวานของผลที่ได้จากการปลูกมีรายละเอียดแสดงเยียดดังภาพผนวก ก. ตารางที่ ก-3 นำข้อมูลมาพิจารณาค่าความหวานพบว่าอยู่ระหว่าง 5-15.2 Brix ซึ่งค่าความหวานที่มีความแตกต่างจากกลุ่ม เนื่องจากเป็นผลที่เกิดการเข้าทำลายของเชื้อไวรัสส่งผลให้ต้นเมล่อนเกิดการเจริญเติบโตแตกต่างจากกลุ่ม เมื่อนำค่าความหวานทั้งหมดมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.16

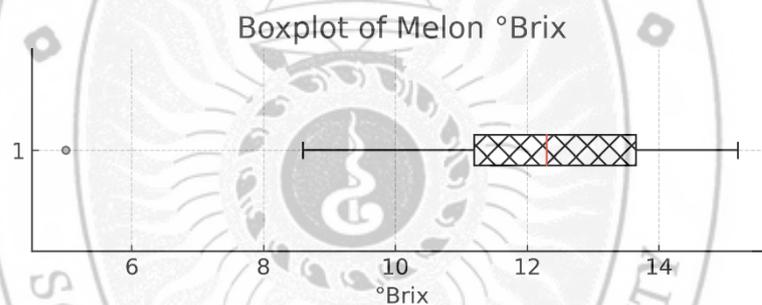
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ค่าความหวานผลเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก

Metric	Value
Sample size (n)	30
Mean (°Bx)	12.08
SD (°Bx)	2.16
CV (%)	17.9
Min-Max (°Bx)	5.0 -15.2
Range (°Bx)	10.2
Q1-Q3 (°Bx)	11.2-13.7
95% CI of mean (°Bx)	11.28-12.89
95% CI of SD (°Bx)	1.72-2.91

ข้อมูลค่าความหวานของผลเมล่อนที่ปลูกแบบถุงปลูกนำมาวิเคราะห์ความเป็นปกติของข้อมูลพบว่าการกระจายตัวของค่าความหวานแบบปกติ เมื่อพล็อตกราฟการกระจายตัวของค่าความหวานผลเมล่อนพบว่าการกระจายตัวอย่างใกล้เคียงโดยส่วนใหญ่และมีส่วนน้อยที่กระจายตัวออกจากค่ากลางซึ่งความหวานกระจุกที่  $\approx 12-14$  °Bx และมีหางซ้ายเล็กน้อยที่ค่าความหวานน้อย (5 °Bx) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเข้าทำลายของศัตรูพืช และเชื้อไวรัสในขณะปลูกจึงส่งผลให้ได้เมล่อนที่ไม่สมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 4.130 และนำมาแสดงลักษณะการรายงานผลแบบ Boxplot ช่วงระยะของค่าความหวานทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4.131

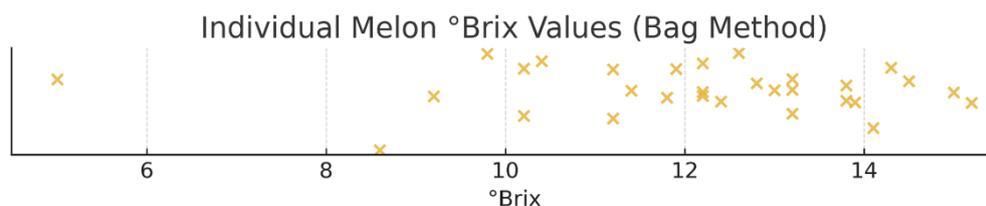


ภาพที่ 4.130 ผลการทดสอบความปกติของค่าความหวานผลเมล่อนจากปลุกแบบถุงปลูก



ภาพที่ 4.131 ค่าความหวานผลเมล่อนเฉลี่ยแต่ละรูปแบบการทดลอง

เมื่อนำค่าความหวานผลเมล่อนจากปลุกแบบถุงปลูกมาแสดงตำแหน่งในกราฟเพื่อดูการกระจายตัวพบว่ามีค่าความหวานอยู่ในกลุ่มที่ใกล้เคียงกันตามผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 4.16 และนำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของค่าความหวานทั้งหมดที่ได้จากการทดลองปลุกแบบถุงปลูกพบว่า มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงได้ถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของค่าความหวานผลเมล่อนที่ปลุกแบบถุงปลูก แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.17



ภาพที่ 4.132 การกระจายตัวของค่าความหวานผลเมล่อนจากปลุกแบบถุงปลูก

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนความหวานของเมล็ดอ่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก

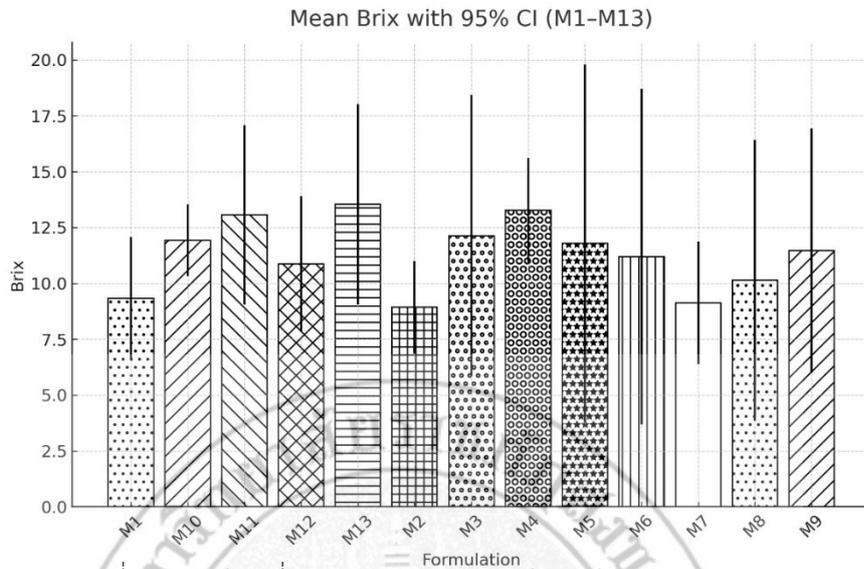
รายการ (Metric)	ค่า (Value)	หมายเหตุ / ตีความ
ขนาดตัวอย่าง (n)	30	จำนวนผลเมล็ดอ่อนที่วัด °Brix
ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง ( $\bar{x}$ )	12.08 °Bx	เฉลี่ยความหวานจริงที่วัดได้
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	2.16 °Bx	ความกระจายภายในกลุ่ม
ช่วงความเชื่อมั่น 95 % ของค่าเฉลี่ย	11.28 – 12.89 °Bx	ครอบคลุม 12 °Bx (เกณฑ์)
ค่าเกณฑ์เปรียบเทียบ ( $\mu_0$ )	12.00 °Bx	ความหวานเป้าหมาย/มาตรฐาน
สถิติ t (สองด้าน)	0.211	
องศาอิสระ (df)	29	n – 1
ค่า p (two-tailed)	0.834	>0.05 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
ขนาดผล (Cohen's d)	0.04	ผลกระทบเชิงปฏิบัติ “เล็กน้อยมาก”

#### 4.4 ค่าความหวานผลเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกเมล็ดอ่อนแบบรากแขวนลอย

ค่าความหวานของผลเมล็ดอ่อนที่ได้จากการปลูกแบบรากแขวนลอยนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าและค่าอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.18 มีรายละเอียดแสดงผลจากการทดลองดังภาพที่ 4.127

ตารางที่ 4.18 รายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าความหวานผลเมล็ดอ่อนปลูกแบบรากแขวนลอย

Model	mean	std	count	cv_%	sem	ci95
1	9.33	1.1	3	11.8	0.64	2.74
2	8.93	0.83	3	9.32	0.48	2.07
3	12.13	2.53	3	20.87	1.46	6.29
4	13.27	0.95	3	7.12	0.55	2.35
5	11.8	3.22	3	27.28	1.86	8
6	11.2	3.02	3	26.96	1.74	7.5
7	9.13	1.1	3	12.06	0.64	2.74
8	10.13	2.53	3	24.99	1.46	6.29
9	11.47	2.2	3	19.21	1.27	5.47
10	11.93	0.64	3	5.39	0.37	1.6
11	13.07	1.62	3	12.37	0.93	4.02
12	10.87	1.22	3	11.25	0.71	3.04
13	13.53	1.8	3	13.33	1.04	4.48



ภาพที่ 4.133 ค่าเฉลี่ยความหวานผลผลไม้อ่อนแต่ละรูปแบบการทดลอง

เมื่อนำค่าความหวานของการทดลองแต่ละรูปแบบมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ One-way ANOVA : ค่าความหวาน ( $^{\circ}$ Brix) 13 สูตร (M1–M13) พบว่าค่า p Value มีค่ามากกว่า 0.05 แปลความได้ว่าความหวานที่ได้จากการทดลองปลูกผลไม้อ่อนแบบรากแขวนลอยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.19 แต่ภายใต้ตัวอย่างชุดข้อมูลนี้ยังมีขนาดเล็กยังไม่พบความแตกต่างค่าความหวาน 13 สูตรอย่างชัดเจน ดังนั้นหากมีการทดลองขยายกลุ่มตัวอย่างและควบคุมปัจจัยภายในเพื่อยกระดับความเชื่อมั่นของผลการทดลอง จะได้ค่าที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นในการทดลองสำหรับอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนความหวานของเมล่อนที่ปลูกแบบรากแขวนลอย

แหล่งความแปรปรวน	df	SS	MS	F	p
ระหว่างสูตร	12	174.58	14.55	1.93	0.078
ภายในสูตร	26	97.89	3.77		
รวม	38	272.47			

##### 5. วิเคราะห์ผลที่เกิดจากการนำระบบโซล่าเซลล์มาใช้ในการปลูกเมล่อน

แนวคิดในการนำระบบโซล่าเซลล์มาใช้ในการปลูกเมล่อนเพื่อช่วยรณรงค์การปล่อยก๊าซคาร์บอนให้กับโลกดมลภาวะเรือนกระจก ถือเป็นส่วนหนึ่งสำหรับแนวความคิดสำหรับนำมาประยุกต์ในงานวิจัยเป็นที่มาของการดำเนินงาน เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนที่ใช้ในการสร้างระบบสำหรับนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาโอกาสความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ต่อไปในอนาคตมี

รายละเอียดจากกระบวนการดำเนินงานพบว่าสามารถนำระบบไฟฟ้าจากพลังงาน โซลาร์เซลล์มาใช้ เพื่อป้อนจ่ายระบบควบคุมการทำงานสำหรับดูแลให้น้ำและปุ๋ยแก่ต้นเมล่อนได้

### ข้อเสนอแนะและประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดำเนินงาน

ผลที่เกิดจากการดำเนินงานพบประเด็นที่เกิดขึ้นสามารถสรุปปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆ ในกระบวนการทดลองได้ประสกับปัญหาต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ตามแผนการทดลองซึ่งเป็นผลกระทบที่ส่งต่อการทดลองมีรายละเอียดต่างๆ เพื่อนำเสนอให้เป็นแนวทางในการป้องกันและแก้ปัญหาสำหรับผู้ที่มีความสนใจและจะการดำเนินงานต่อไปในอนาคตโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หัวพ่นสเปรย์น้ำมีการอุดตันทำให้ไม่สามารถส่งน้ำไปเลี้ยงต้นเมล่อนได้ ต้นเมล่อนเกิดการเหี่ยวเฉาและหากขาดการตรวจสอบในระยะเวลาอันสั้นก็จะส่งต่อการรอดของต้นเมล่อนแสดงลักษณะของต้นที่ที่เกิดการขาดน้ำและปุ๋ยอันเนื่องมาจากชุดพ่นสเปรย์มีการอุดตัน

2. การเข้าทำลายของโรคและศัตรูพืชส่งผลให้ต้นเมล่อนหยุดการเจริญเติบโตและเกิดความเสียหายไม่สามารถให้ผลผลิตได้ตามรอบการปลูกเกิดเป็นความสูญเสีย แสดงลักษณะต้นเมล่อนที่ถูกทำลายจากโรคและศัตรูพืชดังภาพที่ 4.134



ภาพที่ 4.134 ต้นเมล่อนที่ถูกทำลายจากศัตรูพืช

3. ในพื้นที่อำเภอทุ่งหว้ามีปริมาณฝนตกเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้อากาศภายในโรงเรือนไม่หมุนเวียนเกิดเป็นจุดอับเนื่องจากมีค่าความชื้นสูงนำไปสู่การเกิดรา เป็นปัจจัยต่อการเจริญเติบโตของต้นและผลเมล่อน



ภาพที่ 4.135 ลักษณะใบต้นเมล่อนถูกราน้ำค้างเข้าทำลาย

4. ลักษณะบริเวณพื้นที่ปลูกแบบถุงปลูกจะมีการสิ้นเปลืองปริมาณน้ำและปุ๋ยที่ล้นออกจากถุงปลูกเป็นจำนวนมากถือเป็นความสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้น สังเกตได้จากบริเวณรอบถุงปลูกจะมีน้ำเปียกออกมารอบๆ และมากๆ ก็กลายเป็นตะไคร่น้ำสังเกตได้จากภาพที่ 4.136



ภาพที่ 4.136 บริเวณรอบถุงปลูกเกิดตะไคร่น้ำ

5. การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยวิธีการนำระบบพลังงานโซลาร์เซลล์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานต้นกำเนิดเพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายไปควบคุมการกระบวนกรปลูกเมล็ดในพื้น ที่ อ.ทุ่งหว้า จ.สตูล พบว่าพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการจัดเก็บเนื่องจากบริเวณพื้นที่นี้มีฝนตกบ่อยมาก จึงมีแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการจัดเก็บนำไปใช้เป็นพลังงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นแบบ Hybrid คือใช้พลังงานควบคู่กับพลังงานจากการไฟฟ้าเข้ามาในระบบด้วยเพื่อปรับเปลี่ยนแหล่งที่มาของพลังงานให้เพียงพอและสามารถดำเนินการปลูกได้ตามวัตถุประสงค์โดยไม่ให้เกิดผลกระทบต่อเมล็ดที่ปลูก

6. มอเตอร์ที่ใช้ในพ่นน้ำแก้ต้นเมล็ดในการทดลองเกิดความเสียหายในช่วงการดำเนินงานวิจัยเพราะมีการทำงานตลอดเวลาที่กำหนดให้สเปรย์น้ำ ดังนั้นในการดำเนินงานจะต้องสังเกตเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้น เมื่อขาดการให้น้ำและปุ๋ย เป็นปัจจัยที่ต้องตรวจสอบและดูแลอย่างใกล้ชิดในการทดลอง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาและประเมิน “ระบบปลูกเมล่อนรากแขวนลอย (แอโรโพนิกส์) พลังงานสะอาด” เปรียบเทียบกับการปลูกในถาดดั้งเดิมภายใต้โรงเรือนเดียวกัน โดยผสมผสานการออกแบบการทดลองเชิงปัจจัย (Central Composite Design) 13 สูตรรอบ “พ่น-หยุดพ่น” เพื่อค้นหาสภาวะเหมาะสม และติดตามตัวชี้วัดด้านผลผลิต คุณภาพผล น้ำ-ปุ๋ย-พลังงาน และต้นทุนตลอดรอบปลูก 90 วัน ผลการทดลองยืนยันว่าการปลูกแบบระบบรากแขวนลอยสามารถผลิตเมล่อนคุณภาพสูงได้จริง แม้น้ำหนักเฉลี่ยต่อผลประมาณ 1.0 กิโลกรัม ต่ำกว่าถาดปลูกเล็กน้อยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักประมาณ 1.48 กิโลกรัม แต่ให้ความหวาน 13–15 °Bx ซึ่งมีความสม่ำเสมออย่างชัดเจน ส่วนค่า Coefficient of Variation (CV) ของน้ำหนักและความหวานลดลงกว่าครึ่ง (5–7 % เทียบโดยประมาณที่ 12 %) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการทดลองที่ดีที่สุด (M4) กับถาดปลูก ซึ่งให้เห็นผลเชิงบวกของรากที่ได้รับออกซิเจนสูงและละอองธาตุอาหารทั่วถึง ซึ่งได้สูตรที่ควรนำไปใช้ในการพัฒนาหาความสมบูรณ์และขยายผลไปสู่การปลูกในเชิงพาณิชย์ต่อไป

ด้านประสิทธิภาพทรัพยากร ระบบรากแขวนลอยลดการใช้ปุ๋ยและน้ำ 60–70 % เนื่องจากสารละลายหมุนเวียนกลับได้ทั้งหมด ในขณะที่ปั๊มและหัวพ่นกินไฟเพียง  $\approx 0.13$  kWh ต่อวัน จึงสามารถใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 500–1 kW จ่ายกระแสไฟแทบทั้งหมด ลดต้นทุนพลังงานและคาร์บอนฟุตพริ้นท์กว่า 80 % เมื่อเทียบกับการใช้ไฟฟ้ากริด จุดนี้สอดคล้องกับข้อมูลจาก NASA Spinoff และงานศึกษาชั้นนำที่รายงานว่าแอโรโพนิกส์เป็นระบบที่ใช้ปุ๋ยและพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในกลุ่มไฮโดรโพนิกส์

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่พบได้แก่การอุดตันของหัวพ่นและการสึกหรอของมอเตอร์เนื่องจากรอบการทำงานถี่ หากระบบหยุดพ่นเกิน 30 นาทีจะกระทบการเจริญเติบโตทันที จำเป็นต้องกำหนดตารางบำรุงรักษาเชิงป้องกัน รวมถึงสำรองแบตเตอรี่กรณีไฟดับเพื่อให้รากไม่ขาดละอองสารอาหาร

ในภาพรวมการปลูกเมล่อนด้วยระบบรากแขวนลอยพลังงานสะอาด เกิดผลที่เป็นข้อได้เปรียบเชิงคุณภาพ (°Bx สูง, CV ต่ำ) และความยั่งยืน (ประหยัดน้ำ-ปุ๋ย-พลังงาน, ลดคาร์บอน) แม้ยังต้องพัฒนาให้ได้น้ำหนักผลเทียบเท่าถาดปลูก การขยายสเกลเชิงพาณิชย์ควรใช้สูตรพ่น M4 และติดตั้งแผง PV  $\geq 1$  kW, และเพิ่มระบบเซนเซอร์ IoT เพื่อปรับรอบพ่นอัตโนมัติ ขณะเดียวกันควรศึกษาต้นทุน-ผลตอบแทน (IRR) และทำ Life Cycle Assessment (LCA) เชิงลึกเพื่อยืนยันศักยภาพด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ในระยะ 3–5 ปีข้างหน้า งานวิจัยนี้จึงวางรากฐานให้เกิด “ฟาร์มอัจฉริยะสีเขียว” ที่ตอบโจทย์เกษตรกรคาร์บอนต่ำและตลาดผลไม้พรีเมียมในอนาคต.

## อภิปรายผล

ผลการดำเนินงานที่ได้จากงานวิจัยนำมาอภิปรายผลด้าน ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร: น้ำ-ปุ๋ย-พลังงาน ด้านคุณภาพผลผลิต: น้ำหนัก-ความหวานและความสม่ำเสมอ ความทนทานของระบบ และการบำรุงรักษา และนัยเชิงอุตสาหกรรมและความยั่งยืน มีรายละเอียดดังนี้

### 1. ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร น้ำ-ปุ๋ย-พลังงาน

1.1 ผลทดลองบ่งชี้ว่าการปลูกเมล็ดพันธุ์ระบบรากแขวนลอยจะใช้น้ำและปุ๋ยน้อยกว่าการปลูกแบบถุงปลูกประมาณ 60-70 % แต่ให้คุณภาพผลผลิตที่ใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ NASA Spinoff ซึ่งรายงานว่าการใช้ระบบแอร์โรโพนิกส์ (Aeroponic) ลดการใช้น้ำ 98 % และปุ๋ย 60 % เมื่อพิจารณากับการปลูกด้วยระบบดั้งเดิม และรายงานของ Regmi และคณะ[64] ได้สรุปว่าระบบการปลูกแบบแอร์โรโพนิกส์มีการใช้น้ำได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเทคนิคไฮโดรโพนิกส์ที่ให้รากพืชสัมผัสสารละลายธาตุอาหารเป็นฟิล์มบางต่อเนื่อง (NFT) และระบบไฮโดรโพนิกส์อื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

1.2 ด้านพลังงาน ปีม-มอเตอร์ของเราต้องการไฟฟ้าเพียง 0.13 kWh ต่อวัน และเมื่อนำมาใช้กับแผงโซลาร์เซลล์ขนาด PV 500 W มีความเพียงพอไม่ต้องดึงไฟจากกริด ซึ่งความเป็นไปได้นี้ยืนยันโดย Brandon [65] ซึ่งคำนวณพลังงานพบว่าระบบแอร์โรโพนิกส์ใช้ไฟ ~6-11 kWh ต่อวันทั้งระบบ และลดได้อีกเมื่อเพิ่มอุปกรณ์ประหยัดพลังงานเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ LettUs Grow LCA [66] รายงานว่าการจ่ายไฟจากโซลาร์หรือลมช่วยลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ของฟาร์มคอนเทนเนอร์แอร์โรโพนิกส์ได้สูงถึง 80 % ซึ่งสนับสนุนแนวคิดที่เป็นข้อเสนอที่จะติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ PV ≥ 1 kW เพื่อยกระดับความยั่งยืนในการควบคุมระบบการทำงานในการปลูกด้วยระบบรากแขวนลอย

### 2. คุณภาพผลผลิตด้าน น้ำหนัก-ความหวานและความสม่ำเสมอ

แม้ว่าน้ำหนักเฉลี่ยระบบการปลูกแบบรากแขวนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.0 กิโลกรัม ซึ่งจะมีค่าน้ำหนักต่ำกว่าการปลูกแบบถุงปลูกซึ่งมีค่าน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 1.48 กิโลกรัม แต่ค่าความหวานมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 13-15 °Brix และ coefficient of variation ต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง จุดแข็งนี้อธิบายได้ด้วย “ออกซิเจนรากสูง-รากแห้งไว” ซึ่งเพิ่มเมแทบอลิซึมน้ำ-แป้งต่อเนื่องกับหลักฐานของ Li และคณะ [67] พบการเติมอากาศหลังน้ำซึมผ่านในมะเขือเทศทำให้สารละลายของแข็งส่งผลใ้ค่าความหวาน (°Brix) สูงขึ้น 10-23 % และเพิ่มน้ำหนักผลอย่างมีนัยสำคัญ

ในพืชสกุลเมล็ดอ่อน งานของ Gao และคณะ[68] ระบุว่าการยกระดับ CO<sub>2</sub>/ออกซิเจน ณ โชนรากกระตุ้นยีนการสังเคราะห์น้ำตาลและแป้ง ส่งผลให้รากเมล็ดอ่อนสะสมคาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ขณะที่การศึกษาระบบ DFT ของ Phankaen และคณะ[69] รายงานว่าการควบคุมสภาพโรงเรือนแบบปิดสามารถสร้างเมล็ดอ่อนที่มีความหวานได้สูงถึง 15.55 °Bx แม้ในสภาพการปลูกด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์ซึ่งสอดคล้องกับงานในการทดลองบางสูตร (M5, M13) ในงานวิจัยที่ดำเนินการ

### 3. ความทนทานของระบบและการบำรุงรักษา

จุดอ่อนหลักจากการทดลองคือ “หัวพันอุดตัน-มอเตอร์สึก” หากเลยจะทำให้รากขาด ละอองสารอาหารภายใน 30 นาที บทความใน HortiDaily [70] ให้รายละเอียดว่าแรงดัน-อนุภาคแร่ แขนวลอยเป็นสาเหตุให้หัวพันในระบบแอโรโพนิกส์ตันง่าย ต้องบำรุงรักษาต่อเนื่องและอาจใช้หัวพัน เคลื่อนที่แก้ไข สอดคล้องกับแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน preventive maintenance

### 4. นัยเชิงอุตสาหกรรมและความยั่งยืน

ผลรวมชี้ชัดว่า ระบบรากแขวนพลังงานสะอาด สามารถประหยัดน้ำ  $\geq 60\%$  และปุ๋ย  $\geq 60\%$  ด้วย closed-loop recirculation ลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ตลอดวัฏจักรชีวิตได้สูงถึง 80% เมื่อใช้ พลังงานหมุนเวียน ยกเว้นค่าทางการตลาด (\*Bx สูง + ค่า CV < 7%) ตอบโจทย์ตลาดผลไม้พรีเมียม

### ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้และการพัฒนาต่อ

แนวทางนี้จึงสอดรับยุทธศาสตร์ เกษตรอัจฉริยะ-คาร์บอนต่ำ ทั้งระดับฟาร์มชุมชนและเชิง พาณิชยกรรมกลาง การต่อยอดควรมุ่ง (1) พัฒนา อัลกอริทึมปรับรอบพ่นตามเซนเซอร์ เพื่อลดความ แปรปรวน, (2) ทดสอบ พีชไบและเมล่อนสายหวานสูง เพิ่มความคุ้มค่า และ (3) ศึกษาค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) หรือกระบวนการตลอดวงจรชีวิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ → การผลิต → การใช้งาน → การจัดการของเสีย/รีไซเคิล ด้าน พลังงาน-เศรษฐศาสตร์ เชิงลึก ก่อนขยายสเกลการผลิตที่มีขนาดใหญ่หรือเพื่อดำเนินการธุรกิจ

ในการปลูกด้วยระบบรากแขวนลอยปัญหาหนึ่งที่กระทบต่อกระบวนการปลูกคือการอุดตัน ของหัวพันให้น้ำและปุ๋ย ในการหล่อเลี้ยงรากต้นเมล่อน ซึ่งเป็นปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อ การวิจัย ได้ ค่าไม่เกินไปตามเหตุปัจจัยในการออกแบบการทดลองตามกระบวนการดำเนินงานวิจัย จากปัญหาดังกล่าวควรมีการตรวจสอบหรือหาแนวทางในการป้องกันปัญหา ป้องกันการหยุดเจริญเติบโตหรือ เกิดการขาดน้ำนำไปสู่ความสูญเสียในการทดลอง ดังนั้นหากมีวิธีการที่ช่วยแก้ปัญหการอุดตันของหัว พ่นได้จะช่วยให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปตามแผนการดำเนินการและไม่กระทบต่อผลการทดลอง เพื่อให้ระบบทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและยั่งยืน

## บรรณานุกรม

- [1] N. Alexandratos en J. Bruinsma, “World agriculture towards 2030/ 2030,” *Global perspective Studies*, nr. 12-03, 2012.
- [2] A. Biswas en C. Tortajada, “Water crisis and water wars: myths yths and realities,” *Water Crisis Water Wars: Myths Realities*, vol. 5, nr. 35, p. 727–31, 2019;35(5).
- [3] B. Klarin, E. Garafulic , N. Vucetic en T. Jaksic, “New and smart approach to aeroponic and seafood production,” *J Clean Prod*, nr. 239, p. 117665, 2019.
- [4] K. Rykaczewska, “The potato minituber production from microtubers in aeroponic culture,” *Plant, Soil Environ*, vol. 62, p. 210–4, 2016.
- [5] H. Soffer en D. Burger, „Grinderman,” *J Amer Soc Hort Sci*, nr. 113, p. 218–21, 1988.
- [6] G. Atzori, S. Mancuso en E. Masi, “Seawater potential use in soilless culture: A review,” *Sci Hortic (Amsterdam)*, vol. 249, pp. 199-207, 2019.
- [7] A. Komosa, T. Kleiber en B. Markiewicz, “The effect of nutrient solutions on yield and macronutrient status of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in aeroponic and rockwool culture with or without recirculation of nutrient solution,” *Acta Sci Pol Cultus*, vol. 13, p. 163–177, 2014.
- [8] A. H. Mirzabe, A. Hajiahmad, A. Fadavi en S. Rafiee, “Piezoelectric atomizer in aeroponic systems: A study of some fluid properties and optimization of operational parameters,” *Information Processing in Agriculture*, pp. 1-17, 2022.
- [9] A.L Hayden, “Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops.,” *HortScience*, nr. 44, pp. 536-528, 2006.
- [10] A. L. Hayden, L. A. Brigham en G. A. Giacomelli, “Aeroponic cultivation of ginger (*Zingiber officinale*) rhizomes. In: VII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production,” *Pest Management and Global Competition*, vol. 659, p. 397–402, 2004.
- [11] W. Jeffrey, *Hydroponics: Indoor horticulture* Surrey, England: Puka Press Ltd, 2005.
- [12] S. Nxawe , P. A. Ndakidemi en C. P. Laubscher, “Possible effects of regulating hydroponic water temperature on plant growth, accumulation of nutrients and

- other metabolites,” *African Journal of Biotechnology*, vol. 9, nr. 54, pp. 9128-9134, 2010.
- [13] E. Ritter, B. Angulo, P. Riga, C. Herran en J. Reloso, “Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers,” *Potato Res*, nr. 44, pp. 127-35, 2001.
- [14] I. Farran en A. Mingo-Castel, “Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals,” *Am J Potato Res* , vol. 1, nr. 83, p. 47–53., 2006.
- [15] I. Nir, “Growing plants in aeroponics growth system,” *Symp Substrates Horti Soils Situ*, nr. 126, p. 435–348, 1981.
- [16] N. Spinoff, *Progressive plant growing has business blooming*, *Environ Agric Resour*, 2006.
- [17] M. Brechner en A. Both, *Cornell controlled environment agriculture*, Cornell University, 2014.
- [18] F. Massantini, *The light and dark sides of aeroponics*, 1985.
- [19] G. Giacomelli en S. Smith, “Fog for aeroponic plant production,” *Soil Cult*, vol. 5, p. 13–22, 1989.
- [20] A. Repetto, M. Cadinu en S. Leoni, “The effect of plant position on root development and vegetative growth in aeroponic lettuce,” *Int Symp New Cultiv Syst Greenh*, nr. 361, p. 603–611, 1993.
- [21] M. Lim, “Trials with aeroponics for the cultivation of leafy vegetables,” *Proc the Int Congr Soil Cult*, p. 265–272, 1996.
- [22] J. Demsar, J. Osvald en D. Vodnik, “The effect of light-dependent application of nitrate on the growth of aeroponically grown application of nitrate on the growth of aeroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L),” *J Am Soc Horti Sci* , nr. 129, p. 570–575, 2004.
- [23] C. Christie en M. Nichols, “Aeroponics-a production system and research tool,” *South Pacific Soil Cult Conf*, nr. 648, p. 185–190, 2003.

- [24] A. Hayden, "Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops.," *HortScience*, vol. 3, nr. 41, p. 536–538, 2006.
- [25] C. de Kreij en B. Hoeven, "Effect of humic substances, pH and its control on growth of chrysanthemum in aeroponics," *Ninth Int Congr Soil Cult Jersey, Proc, Wageningen*, p. 207–230, 1997.
- [26] G. Fascella en G. Zizzo, "Preliminary results of aeroponic cultivation of anthurium andreanum for cut flower production.," *VIII Int. Symp Prot Cultiv Mild Winter Clim Adv soil Soil Cultiv*, nr. 747, p. 233–240, 2006.
- [27] H. Soffer en D. Burger, "Studies on plant propagation using the aero-hydroponic method," *Symp High Technol Prot Cultiv*, nr. 230, p. 261–270, 1988.
- [28] P. Barak, J. Smith, A. Krueger en L. Peterson, "Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics," *Plant, Cell Environ*, vol. 2, nr. 19, p. 237–242, 1996.
- [29] F. Martin-Laurent, F.-Y. Tham, S.-K. Lee, J. He en H. Diem, "Field assessment of aeroponically grown and nodulated *Acacia mangium*," *Aust J Bot*, nr. 48, p. 109–114, 2000.
- [30] United States Environmental Protection Agency, "Global Greenhouse Gas Emissions Data," 2019. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. [Accessed 10 August 2022].
- [31] Newbean Capital, "The Rise of Asia's Indoor Agriculture Industry," [Online]. Available: [http://agfundernews.com/wp-content/uploads/2016/01/The-Rise-of-Asias-Indoor-Agriculture-Industry-White-Paper\\_FinalProtected.pdf](http://agfundernews.com/wp-content/uploads/2016/01/The-Rise-of-Asias-Indoor-Agriculture-Industry-White-Paper_FinalProtected.pdf). [Accessed 10 August 2022].
- [32] AVA Vision, "Steering the Future of Farming," [Online]. Available: <https://www.sfa.gov.sg/docs/default-source/publication/ava-vision/ava-vision-issue-1-2018.pdf>. [Accessed 10 August 2022].
- [33] ไกรสร สืบบุญ. (2555) . DHT22–เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ. สืบค้น 9 เมษายน 2565, จาก <https://www.allnewstep.com/product/825/dht22-am2302-module->

- [34] ไกรสร สืบบุญ.(2555). Arduino. สืบค้น 9 เมษายน 2565, จาก [https://www.allnewstep.com/?gclid=CjwKCAiA17P9BRB2EiwAMwwNyCvAIB55RDvpzP-\\_lEhE\\_VASrMX0dt1-y3CTMYKmoPLtLyUsle\\_mfBoCT7sQAvD\\_BwE](https://www.allnewstep.com/?gclid=CjwKCAiA17P9BRB2EiwAMwwNyCvAIB55RDvpzP-_lEhE_VASrMX0dt1-y3CTMYKmoPLtLyUsle_mfBoCT7sQAvD_BwE)
- [35] ไกรสร สืบบุญ.(2555). หน้าจอ LED (Liquid Crystal Display). สืบค้น 9 เมษายน2565, จาก <https://www.ioxhop.com/article/30>
- [36] คำคุณพันธวงศ์ ,และรัฐศิลป์ รานอกภานุวัชร. (2560).โรงเรียนไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติ (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- [37] ชาญชัย ศุภอรธกร. (2552). คู่มือจัดการฐานข้อมูล My SQL. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ธีโรวา จำกัด.
- [38] ชาญชัย ศุภอรธกร. (2552). คู่มือเรียนเขียนเว็บอีคอมเมิร์ซด้วย PHP + My SQL ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ธีโรวา จำกัด.
- [39] ชีรวัฒน์ ประกอบผล. (2552). คู่มือการเขียนโปรแกรม ภาษา C. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ธีโรวา จำกัด.
- [40] พูนศักดิ์ สักกทัตติยกุล. (2558 ). การปลูกพืชไร้ดิน (Soilless Culture). สืบค้น 14 เมษายน2565, จาก <https://sites.google.com/site/wanwikatoey/khwam-hmay-khxng-kar-pluk-phuch-ri-din>
- [41] รัฐศิลป์ รานอกภานุวัชร.(2561). ระบบควบคุมโรงเรือนผักไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี IoT และเครื่องมือการเรียนรู้เชิงลึก สืบค้น 9 เมษายน 2565, จาก [file:///C:/Users/amina/Downloads/156097-Article%20Text%20\(PDF%20File\)-451282-1-10-20181225.pdf](file:///C:/Users/amina/Downloads/156097-Article%20Text%20(PDF%20File)-451282-1-10-20181225.pdf)
- [42] ปารเมศ ชูติมา (2545) .การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [43] I. Vethamoni, "Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops," Chemical Science Review and Letters, vol. 22, nr. 6, pp. 838-849 , 2017.
- [44] วรณัฐ แจ้งสว่าง, พลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซชีวภาพ กังหันลม ถ่านหิน พลังงาน, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- [45] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "แผนอนุรักษ์พลังงาน ปี 2561-2580," กระทรวงพลังงาน, 2561.
- [46] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., "รายงานการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยปี 2556," กระทรวงพลังงาน, 2556.

- [47] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "ศักยภาพฟรังสีรวม," กระทรวงพลังงาน, 2560.
- [48] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "ระบบพลังงานแสงอาทิตย์," กระทรวงพลังงาน, 2558.
- [49] เยาวเรศ ทับพันธุ, การประเมินโครงการตามแนวทางเศรษฐศาสตร์, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [50] M. Gangopadhyay, A. K. Das, R. Sahu, A. Saha, S. Dey en S. Bandyopadhyay, "Evaluation of growth response for mass production and accumulation of 2-hydroxy-4-methoxybenzaldehyde in endangered *Hemidesmus indicus* by an aeroponic system," *Industrial Crops & Products*, p. 114072, 2021.
- [51] ศรีธรัตน์ คงมัน, „การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกทำความเย็นสารละลายปุ๋ยสำหรับปลูกผักสลัดด้วยวิธีแอโรโพนิกส์,” วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, nr. 1, pp. 9-15, 2564.
- [52] นภาพร จิตต์ศรีธธา en วัชรวิทย์ รัศมี, “ผลของชนิดวัสดุปลูกที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน,” *วิจัยไร่ไพพรรณี* , nr. 2, pp. 17-24, 2562.
- [53] S. C. Kerns en J. L. Lee, “Automated Aeroponics System Using IoT for Smart Farming,” in 8th International Scientific Forum, ISF Proceedings, UNCP, USA, 2017.
- [54] K. Jagesh, T. S. DEVI, T. BUCKSETH, N. ALI, K. Rajesh, S. R. Zinta, K. Vijay en D. K. Swarup, “Precision phenotyping of contrasting potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties in a novel aeroponics system for improving nitrogen use efficiency: In search of key traits and genes,” *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 1, nr. 19, p. 51-61, 2020.
- [55] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร่น้ำแบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 8(1), 98-111.
- [56] ประกาย คำภูศิริ และวรศักดิ์ บุรณากาญจน์. (2564). การปลูกผักไร้สารพิษโดยใช้พลังงานทดแทนในพื้นที่จำกัด: การเปรียบเทียบผลการทดลองปลูกผักกรีนโอ๊คระหว่างแปลงที่ใช้และไม่ใช้แผงโซลาร์เซลล์. *สารศาสตร์ ฉบับที่ 4/2564* , 729-739.
- [57] นภัทร วัจนเทพินทร์ และ ไชยยันต์ บุญมี. (2560). ไดโอดเปล่งแสงสีอะไรเหมาะสมกับการปลูกพืช. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* , 25(1), มกราคม-กุมภาพันธ์ 2560.

- [58] ปรีชา มหาไม้, นำพร ปัญญาใหญ่ และ ภาสวรรณ วัชรดำรงศักดิ์. (2557). ระบบให้น้ำแบบอัตโนมัติใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ ติดตามดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน, วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 8(2), 15-26.
- [59] ศุภฤกษ์ เขาวลิตตระกูล. (2560). ระบบปลูกผักสลัดไฮโดรโปนิคส์แบบอัตโนมัติ, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการ, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ. วรรณผล กัณทเวก. (2550). การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์.
- [60] การประชุมทางวิชาการ The 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference : เทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาที่ยั่งยืน ครั้งที่ 2 (TISD 2008).
- [61] จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม. (2561). การพัฒนากระบวนการหมุนเวียนน้ำในการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์แบบระบบกักน้ำพลังงานแสงอาทิตย์, 8-9 มีนาคม 2561 การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5 ประจำปี 2561 , มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- [62] สุเมธ ตรีศักดิ์ศรี วันทนีย์ โชติสกุล พิศณุ คัมฉายา และ อัมฤทธิ์ปุเต็ม. (2557). ระบบปลูกพืชในสารละลายแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ใช้แบตเตอรี่ ในการหมุนเวียนสารละลาย, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53, 439-445.
- [63] อาทิตยา แน่นแน่น, เอกราช พรนราห์สติกุล, ณัฐกิตติ์ จินา และ สัญญา พันธุ์แพง. (2564). ระบบรดน้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน, รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม (มหาวิทยาลัยแม่โจ้) ครั้งที่ 1, 774-781.
- [64] Regmi, A., Rueda-Kunz, D., Liu, H., Trevino, J., Kathi, S., & Simpson, C. (2024). Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems. *Technology in Horticulture*, 4, e005.
- [65] Brandon, J. (2024). Does aeroponics use a lot of electricity? Vertical Farming Planet. [verticalfarmingplanet.com](https://verticalfarmingplanet.com)
- [66] LettUs Grow Ltd. (2023). Aeroponic container farm lifecycle analysis: aeroponics can reduce the impact of fresh produce vs imports. Retrieved from LettUs Grow blog. [lettugrow.com](https://lettugrow.com)
- [67] Li, Y., Jia, Z., Niu, W., Wang, J., & Zhang, M. (2015). Effect of post-infiltration soil aeration at different growth stages on growth and fruit quality of drip-irrigated potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*). *PLOS ONE*, 10(12), e0143322. [journals.plos.org](https://journals.plos.org)

- [68] Gao, L., Wang, W., Xu, C., Han, X., Li, Y., Liu, Y., & Qi, H. (2022). Physiological and transcriptomic analyses reveal the effects of elevated root-zone CO<sub>2</sub> on the metabolism of sugars and starch in the roots of oriental melon seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12537. [pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/)
- [69] Phankaen, P., & Kumpanuch, W. (2025). Yield and fruit quality of four melon varieties cultivated using the deep flow technique hydroponic system. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 28(3), 1-12. [ph02.tci-thaijo.org](https://ph02.tci-thaijo.org)
- [70] HortiDaily. (2024). Examining the problem of nozzle clogging in horticulture. [hortidaily.com](https://hortidaily.com)



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

น้ำหนักผลค่าและความหวานเมล็ดอ่อนจากการทดลอง

ตารางที่ ก-1 คำนวณน้ำหนักผลเมล็ดอ่อนที่ปลูกแบบถุงปลูก

ถุงปลูกที่	น้ำหนักผล (g)
B1	1590
B2	1210
B3	1670
B4	1468
B5	1142
B6	1715
B7	1385
B8	1285
B9	1750
B10	1320
B11	1448
B12	1495
B13	1095
B14	1575
B15	1695
B16	1540
B17	1421
B18	1350
B19	1702
B20	1125
B21	1610
B22	1402
B23	1645

ถุงปลูกที่	น้ำหนักผล (g)
B24	1390
B25	1512
B26	1602
B27	1668
B28	1505
B29	1450
B30	1505
ผลรวม	44270
ค่าเฉลี่ย	1475.67

ตารางที่ ก-2 คำน้ำหนักผลเมล็ดอ่อนที่ปลูกแบบรากแขวนลอย

แบบการปลูก	น้ำหนัก (g)
M1-1	950
M1-2	886
M1-3	965
M2-1	358
M2-2	282
M2-3	977
M3-1	853
M3-2	954
M3-3	854
M4-1	990
M4-2	1080
M4-3	988
M5-1	931

แบบการปลูก	น้ำหนัก (g)
M5-2	809
M5-3	877
M6-1	907
M6-2	175
M6-3	911
M7-1	182
M7-2	339
M7-3	186
M8-1	840
M8-2	899
M8-3	982
M9-1	921
M9-2	920
M9-3	974
M10-1	917
M10-2	888
M10-3	870
M11-1	828
M11-2	854
M11-3	934
M12-1	932
M12-2	861
M12-3	832
M13-1	961

แบบการปลูก	น้ำหนัก (g)
M13-2	993
M13-3	816

ตารางที่ ก-3 ค่าความหวานผลเมล็ดอ่อนที่ปลูกแบบถูงปลูก

ถูงปลูกที่	ค่า ความหวาน (Brix)
B1	12.2
B2	11.4
B3	13.2
B4	9.8
B5	10.4
B6	11.2
B7	5
B8	12.4
B9	13.8
B10	13
B11	12.2
B12	11.2
B13	12.8
B14	9.2
B15	13.2
B16	12.2
B17	10.2
B18	15.2
B19	15
B20	10.2
B21	8.6
B22	13.8
B23	14.5

ถุงปลูกที่	ค่า ความหวาน (Brix)
B24	13.2
B25	12.6
B26	14.1
B27	11.8
B28	13.9
B29	14.3
B30	11.9

ตารางที่ ก-4 ค่าความหวานผลเมล็ดอ่อนที่ปลูกแบบรอกแขวนลอย

รูปแบบการทดลอง	ค่าความหวาน Brix
M1-1	8.2
M1-2	10.4
M1-3	9.4
M2-1	9.2
M2-2	9.6
M2-3	8
M3-1	10.2
M3-2	11.2
M3-3	15
M4-1	13.6
M4-2	14
M4-3	12.2
M5-1	15.4
M5-2	10.8
M5-3	9.2
M6-1	14

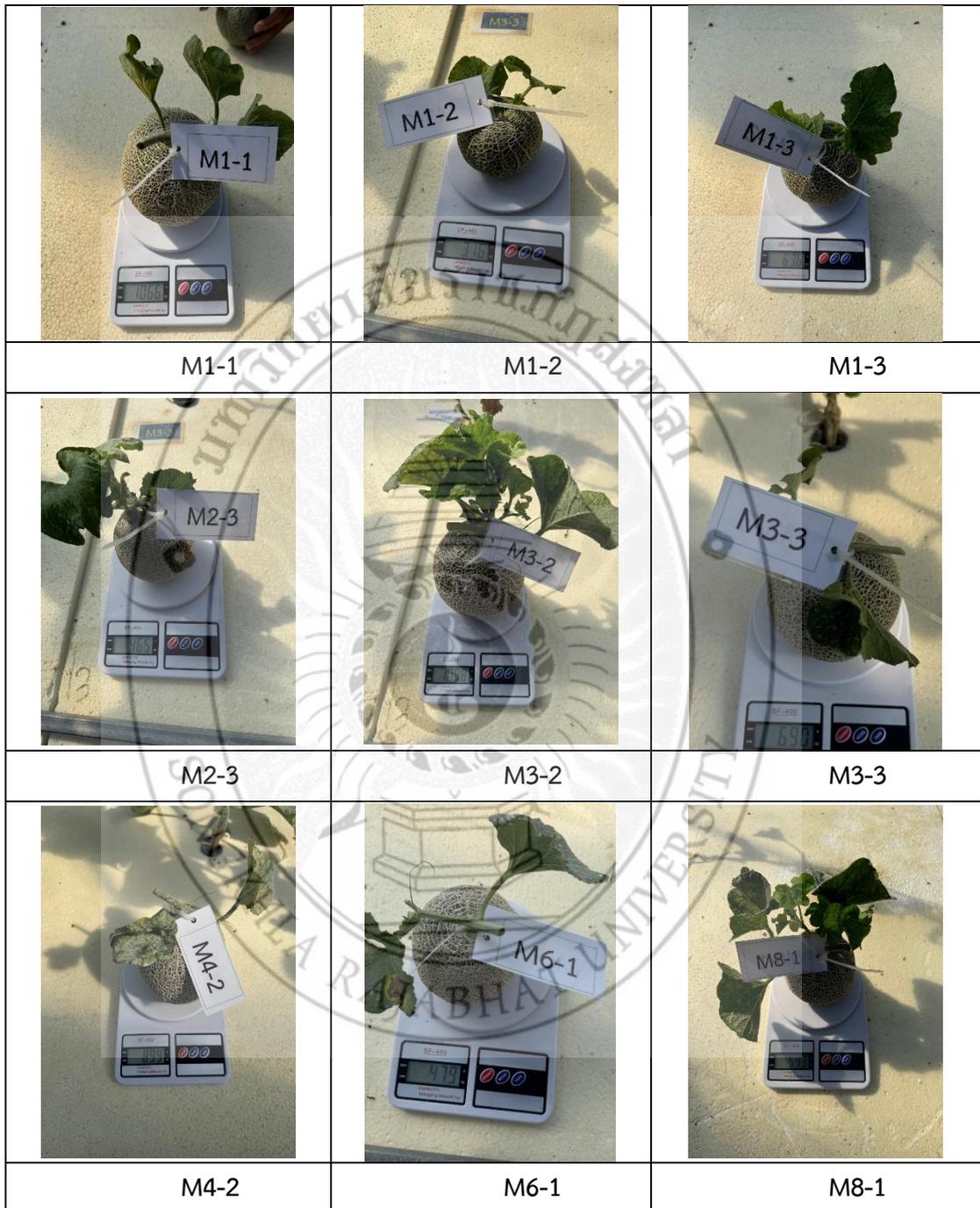
M6-2	8
M6-3	11.6
M7-1	8
M7-2	10.2
M7-3	9.2
M8-1	9.2
M8-2	13
M8-3	8.2
M9-1	10.4
M9-2	10
M9-3	14
M10-1	12.2
M10-2	11.2
M10-3	12.4
M11-1	14
M11-2	14
M11-3	11.2
M12-1	10.6
M12-2	9.8
M12-3	12.2
M13-1	15.4
M13-2	13.4
M13-3	11.8



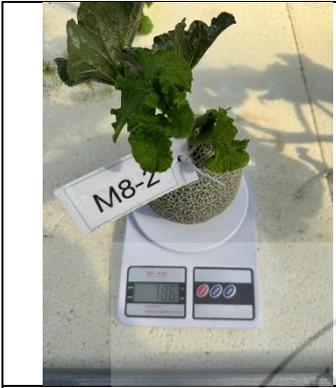
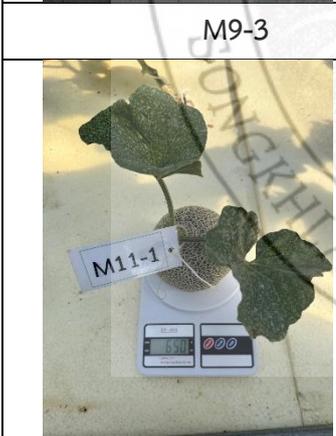
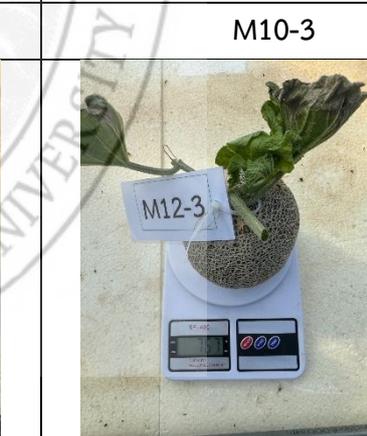
ภาคผนวก ข

ผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการดำเนินงานวิจัย

ภาพที่ ข-1 ผลเมล่อนที่เกิดจากการปลูกแบบรากแขวนลอย



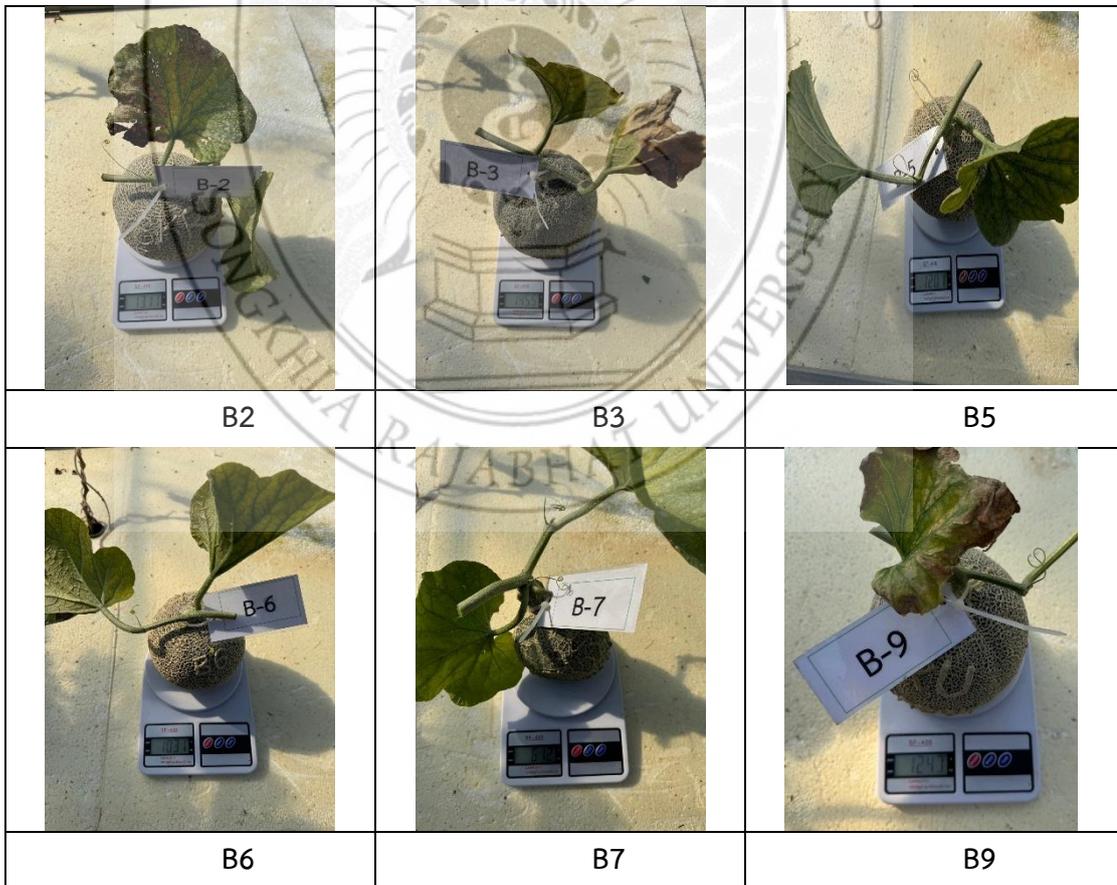
ภาพที่ ข-1 ผลเมล่อนที่เกิดจากการปลูกแบบรากแขวนลอย (ต่อ)

		
M8-2	M8-3	M9-1
		
M9-3	M10-2	M10-3
		
M11-1	M12-1	M12-3

ภาพที่ ข-1 ผลเมล็ดอ่อนที่เกิดจากการปลูกแบบรากแขวนลอย (ต่อ)



ภาพที่ ข.2 ผลเมล็ดอ่อนที่เกิดจากการปลูกแบบถุงปลูก



ภาพที่ ข-2 ผลเมล็ดอ่อนที่เกิดจากการปลูกแบบถุงปลูก (ต่อ)

