



การพัฒนาชุดปลูกระบบปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร

Development of a closed plant production unit for
agricultural environment control

นางสาวณิกานต์ คำลือ

นางสาวทิพวรรณ กระจ่างทอง

นางสาวยุพารัตน์ เหล่าชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2563



ใบรับรองโครงการ

หัวข้อโครงการ : การพัฒนาชุดปลูกกระบะปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร
(Development of a closed plant production unit for
agricultural environment control)

ผู้ดำเนินโครงการ : นางสาวณิชา กานต์ คำลือ รหัสนิต 60361477
นางสาวทิพวรรณ กระจ่ายทอง รหัสนิต 60361712
นางสาวยุพรัตน์ เหล่าชัย รหัสนิต 60363877

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ขวัญชัย ไกรทอง
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ขวัญชัย ไกรทอง)

.....กรรมการ
(รศ.ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี)

.....กรรมการ
(ผศ.ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

.....กรรมการ
(ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์)

หัวข้อโครงการ	: การพัฒนาชุดปลูกกระบอบปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร		
ผู้ดำเนินโครงการ	: นางสาวณิชกานต์ คำลือ รหัสนิต 60361477		
	: นางสาวทิพวรรณ กระจ่างทอง รหัสนิต 60361712		
	: นางสาวยุพารัตน์ เหล่าชัย รหัสนิต 60363877		
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผศ.ดร.ขวัญชัย ไกรทอง		
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	: 2563		

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาชุดปลูกพืชระบบปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตรที่สามารถควบคุมระบบให้สารละลายธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ ปรับสภาวะอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงติดตั้งระบบแสงเทียมที่ใช้หลอด LED แสงสี Day light (6500 K) ผสมกับ แสงสี Warm white (3200 K) ในอัตราส่วน 1:1

ผลการศึกษางานของระบบโดยไม่มีการปลูกพืชซึ่งอ้างอิงลักษณะทางกายภาพและค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค พบว่าชุดปลูกพืชระบบปิดที่พัฒนาขึ้น มีคุณสมบัติที่สามารถให้สารละลายธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ โดยความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB ที่ความเร็วต่ำที่สุดทำให้การผสมสารละลายธาตุอาหารค่า EC จะมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่สม่ำเสมอ ไม่มีการแกว่งขึ้นลงของค่า EC ในการผสม ส่งผลให้การผสมสารละลายธาตุอาหารมีความผิดพลาดของการผสมน้อยที่สุด นอกจากนี้อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในห้อง ระบบปรับสภาวะอากาศภายในชุดปลูกพืชระบบปิดสามารถสร้างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในชั้นปลูกได้เท่ากับ 25.55 °C และสามารถสร้างความชื้นเฉลี่ยของอากาศบริเวณภายในชั้นปลูกให้อยู่ในช่วง 76.88-79.98 % ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืช โดยมีพัดลมดูดอากาศช่วยสร้างการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกที่วางปลูกกระยะชิดกับด้านดูดของพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 0.372 m/s ในระบบแสงเทียมภายในชุดปลูกพืชระบบปิดสามารถสร้างความเข้มแสงให้เพียงพอกับปริมาณความเข้มแสงที่พืชควรได้รับ ซึ่งความเข้มแสงอยู่ในช่วง 208 – 286.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ และพบอัตราการใช้พลังงานของชุดปลูกพืชระบบปิดมีการใช้พลังงาน 32.34 kWh/day โดยระบบที่ใช้พลังงานสูงสุดคือ ระบบการปรับสภาวะอากาศมีการใช้พลังงาน 22.628 kWh/day ซึ่งคิดเป็น 69.97 % ของการใช้พลังงานทั้งหมด การใช้พลังงานรองลงมาคือระบบแสงเทียม และระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ที่มีการใช้พลังงาน 9.072 และ 0.643 kWh/day ตามลำดับ

Project Title : Development of a closed plant production unit for agricultural environment control

Name : Miss Nichakarn Khamlue
Miss Tippawan Krataitong
Miss Yuparat Laochai

Project Advisor : Asst.Prof.Dr. Kwanchai Kraitong

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2020

Abstract

The purpose of this research is to development a closed plant production unit for agricultural environment control that can automatically control the nutrient solution system, adjust the climate having the temperature and humidity suitable for the growth of plants including an artificial light system with a group of LED bulbs consisting of day light (6500 K) bulbs mixing with warm white light (3200 K) bulbs in 1: 1 ratio.

The results of the operating test without plant cultivation which refers to physical characteristics and values affecting the growth of green oak salad vegetables showed that the developed closed plant production unit could provide automatically nutrient solution. The lowest speed of the dosing pump for the nutrients AB suction made the EC value to increase steadily. There is no fluctuation of EC in mixing, resulting in minimal mixing errors. In addition, the temperature of the nutrient solution varied with the room temperature. The air conditioning control system was able to generate an average temperature of 25.55 °C within the planting layer and the average humidity of the air inside the plant ranging from 76.88 % to 79.98 %, which are the appropriate temperature and air humidity value for the plant cultivation. The exhaust fan created air circulation within the plant floor at the plant trough locating 12 cm from the suction side of the exhaust fan with the average air velocity of 0.372 m/s. Moreover, the artificial lighting system could supply the light intensity of sufficient light for the plant needs. The light intensity ranged from 208 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ to 286.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Finally it

was found that the energy consumption rate of the closed system plant was 32.34 kWh/day. A system consuming the highest power was air conditioning system. It was 69.97% of total energy consumption. The second and the third energy consumptions were the artificial lighting and the water and nutrient supply systems with energy consumption of 9.072 and 0.643 kWh/day, respectively.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ระหว่างในการทำโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาจนโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณกรรมการสอบโครงการรองศาสตราจารย์ ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ และดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำโครงการ และขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อำนวยความสะดวกในการทำโครงการ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาวุธ ลภีรัตนากุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องมือกล้องถ่ายภาพความร้อนที่จำเป็นในการทำโครงการและขอขอบคุณพี่ อัคนีรุทธ์ ฝาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน และคอยให้กำลังใจสำคัญจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวณิชานต์ คำลือ

นางสาวทิพวรรณ กระจ่างทอง

นางสาวยุพารัตน์ เหล่าชัย

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญ	
1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.2 ขอบเขตของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 งบประมาณที่ใช้	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วรรณกรรมปริทรรศน์	6
2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 การออกแบบ	
3.1 การออกแบบระบบควบคุม	33
3.2 การออกแบบระบบแสงเทียม	35
3.3 การออกแบบระบบให้น้ำและธาตุอาหาร	37
3.4 การออกแบบโครงสร้าง	41
3.5 การออกแบบระบบปรับสภาวะอากาศ	44
3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของชั้นปลูกแนวตั้ง	47
บทที่ 4 วิธีดำเนินงานวิจัย	
4.1 การทดสอบระบบให้น้ำและธาตุอาหาร	49
4.2 การทดสอบระบบปรับสภาวะอากาศ	51
4.3 การทดสอบระบบแสงเทียม	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การทดสอบการใช้พลังงานของระบบปลุกพีชระบบปิด	55
บทที่ 5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
5.1 ผลการทดสอบ	57
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดสอบ	78
6.2 คุณสมบัติของชุดปลุกพีชระบบปิดแบบอัตโนมัติ	79
6.3 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดลองและการควมหาค่าผลการทดลอง	89
ภาคผนวก ข. ส่วนของตารางเอกสารและข้อมูลการออกแบบ	106



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงสภาพอากาศโลกที่แปรปรวนและผลกระทบต่อผลผลิตภาคเกษตร ไทย	2
รูปที่ 2.1 การติดตั้งพัดลมขนาดเล็กที่ด้านหลังของชั้นวางถาดปลูก	8
รูปที่ 2.2 Green House แบบใช้ดิน	9
รูปที่ 2.3 Digital Farm แบบไม่ใช้ดิน	10
รูปที่ 2.4 โรงงานปลูกพืชระบบปิด บริษัทวังรีเฮลท์แพคตอรี่	10
รูปที่ 2.5 Plant Factory ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ กระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ	11
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของห้องปลูกพืชในโรงงานผลิตพืชแบบใช้แสงเทียม (PFAL)	13
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างแบบชั้นทั่วไปที่ติดตั้ง	13
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบชั้นเคลื่อนที่ที่ติดตั้งใน Singapore Sky Green Farm	14
รูปที่ 2.9 การทดสอบการรับแรงของคานาโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	16
รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์ใบพัดเรือโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	16
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงของรงควัตถุชนิดต่างๆ	18
รูปที่ 2.12 การปลูกพืชในระบบ NFT	20
รูปที่ 2.13 การปลูกพืชในระบบ DFT	21
รูปที่ 2.14 การปลูกพืชระบบ DRFT	22
รูปที่ 2.15 รูปแบบการไหลของอากาศในชุดปลูกระบบปิด	28
รูปที่ 2.16 แผนภาพของด้านข้างของชั้นวางถาดปลูก	28
รูปที่ 2.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno	30
รูปที่ 2.18 รีเลย์ (Relay)	30
รูปที่ 2.19 สวิตช์ลูกลอยฟ้า	31
รูปที่ 2.20 โซลินอยวาล์ว	31
รูปที่ 2.21 สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย	32
รูปที่ 2.22 Module (Step Down)	32
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมระบบควบคุมการเปิด-ปิด ของอุปกรณ์	34
รูปที่ 3.2 ตัวอย่าง Code ในการควบคุมอุปกรณ์ในระบบการปลูกพืชระบบปิด	35
รูปที่ 3.3 ความยาวคลื่นของแสงจากหลอด LED	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการติดตั้งหลอดไฟ LED	36
รูปที่ 3.5 องค์ประกอบระบบน้ำและธาตุอาหาร	37
รูปที่ 3.6 (A) รูปแสดงด้านจ่ายน้ำ (B) แสดงด้านรับน้ำออกจากท้ายราง	38
รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมโมดูลควบคุมระดับน้ำ	38
รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมระบบส่งน้ำมายังถังเก็บน้ำใต้ราง	39
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมระบบส่งน้ำขึ้นไปยังชั้นปลูกในแต่ละชั้น	39
รูปที่ 3.10 Name Plate ของเครื่องสูบน้ำ Makino Model; PS-150BIT	40
รูปที่ 3.11 เครื่องสูบน้ำ DC 12 V	40
รูปที่ 3.12 ปุ่มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร A และ B	41
รูปที่ 3.13 Drawing โครงสร้าง	42
รูปที่ 3.14 ลักษณะและคุณสมบัติของอลูมิเนียมโปรไฟล์แบบ Pipe Frame	43
รูปที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	43
รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความความโค้งตัวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	44
รูปที่ 3.17 ขนาดห้องชุดปลูกพืชระบบปิด	45
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ	45
รูปที่ 4.1 การวัดอุณหภูมิบริเวณที่รวมสารละลายธาตุอาหาร	50
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการวัดความเร็วของลม	51
รูปที่ 4.3 เครื่อง Anemometer รุ่น DT-82	52
รูปที่ 4.4 เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิอากาศ ยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-775-232	53
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและค่าความชื้น	53
รูปที่ 4.6 ระยะเวลาการวัดอุณหภูมิและค่าความชื้น	53
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวัดความเข้มแสง	54
รูปที่ 4.8 ระดับความสูงของการวัดค่าความเข้มแสง	55
รูปที่ 4.9 มัลติมิเตอร์แบบแคมป์มิเตอร์ยี่ห้อ KYORITSU รุ่น KEW SNAP 203	56
รูปที่ 4.10 (A) การวัดกระแสไฟฟ้า (B) การวัดแรงดัน	56
รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) และเวลาที่ใช้ในการผสม	58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

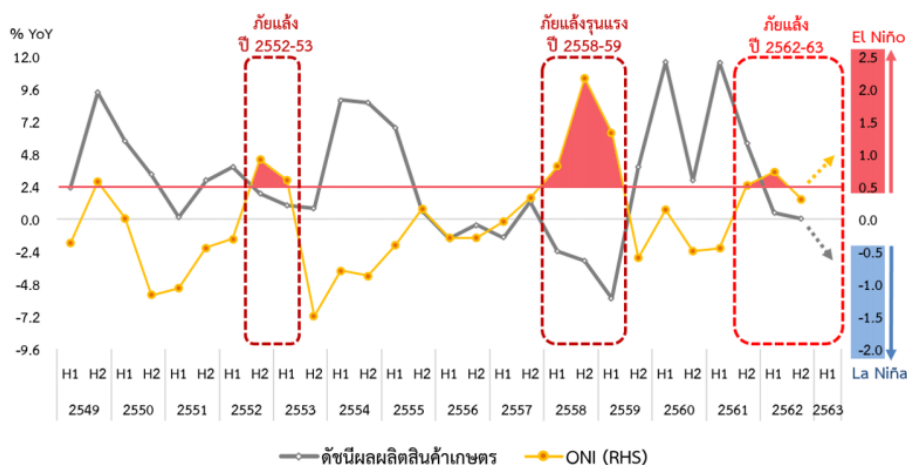
	หน้า
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารที่อุณหภูมิห้องและตำแหน่งต่างๆ	59
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกพืช	60
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิภายในชุดปลูกพืช	61
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบวัดความชื้นในชุดปลูกพืช	62
รูปที่ 5.6 ความเข้มแสงสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของแต่ละตำแหน่งในการวัด	63
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงการวัด	64
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของหลอดไฟ LED และเวลาในการใช้งาน	75
รูปที่ 5.9 แสดงค่าสัดส่วนของการทำงานพลังงานของระบบต่างๆ ในระบบปลูก	77
รูปที่ 1ข. การเริ่มการทำงานของเครื่องผสมปุ๋ย AB แบบอัตโนมัติ	118
รูปที่ 2ข. หน้าจอ menu setting	119
รูปที่ 3ข. หน้าจอ menu setting 06-0 (Lo_oN)	119
รูปที่ 4ข. หน้าจอ menu setting 06-1 เพื่อการกำหนดค่า EC	119
รูปที่ 5ข. หน้าจอ menu setting 15-0 เพื่อจบการทำงาน	119
รูปที่ 6ข. โซโครเมตรชาร์ท	126

บทที่ 1

ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย มีการย้ายถิ่นฐานของผู้คนจากชนบทเข้ามาในเมืองใหญ่มากขึ้นเรื่อยๆ โดยอาศัยอยู่ในบริเวณชานเมือง ทำให้อาณาเขตของเมืองจึงขยายตัวออกไปเรื่อยๆ ส่งผลให้พื้นที่ทำการเกษตรเดิมเพื่อผลิตอาหารเลี้ยงประชากรมีจำนวนลดลง จำเป็นมีการขยายพื้นที่ออกไปมากขึ้นเรื่อยๆ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้ อายุขัยเฉลี่ยของประชากรของแต่ละประเทศก็เริ่มสูงขึ้นรวมทั้งประชากรไทย ได้มีการคาดการณ์จากองค์การนาชาชาติ 3 หน่วยงาน คือ องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO) องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency-IEA) และสถาบันวิจัยนโยบายด้านอาหารนาชาชาติ (International Food Policy Research Institute-IFPRI) ในปี ค.ศ. 2030 ความต้องการด้านอาหาร และพลังงาน จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 และความต้องการน้ำ จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 จึงจะเพียงพอต่อความต้องการของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น [1]

ในขณะเดียวกันสภาพภูมิอากาศโลกเปลี่ยนแปลงรุนแรงขึ้นและบ่อยครั้งขึ้น สะท้อนจากปรากฏการณ์เอลนีโญ (แล้ง) และลานีญา (น้ำท่วม) ที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะปี พ.ศ. 2558-2559 ที่ไทยเกิดภัยแล้งรุนแรง รวมถึงอุณหภูมิพื้นผิวโลกที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเร่งสูงขึ้นมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะช่วงปี พ.ศ. 2558-2561 ซึ่งเป็นช่วงที่ภูมิอากาศโลกร้อนสูงสุดติดต่อกัน 4 ปี สำหรับปี พ.ศ. 2561 เป็นปีที่โลกร้อนที่สุดเป็น อันดับ 4 นับตั้งแต่มีบันทึกอุณหภูมิโลกในปี พ.ศ. 2423 สภาพภูมิอากาศที่ผันผวนรุนแรงส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตทางการเกษตรและรายได้เกษตรกร [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งดัชนี ONI เป็นตัวชี้วัดการเกิดปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา, %YoY คือ เปอร์เซ็นต์ค่าดัชนีผลผลิตสินค้าเกษตร และดัชนี ONI ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า และแนวโน้มของกราฟในปี 2563 เป็นต้นไป จะเกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ (ภัยแล้ง) เพิ่มสูงขึ้น และดัชนีผลผลิตสินค้าทางการเกษตรลดลง



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงสภาพอากาศโลกที่แปรปรวนและผลกระทบต่อผลผลิตภาคเกษตรไทย [3]

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการผลิตพืช จากเดิมที่เป็นการปลูกในแปลงเปิดซึ่งต้องพึ่งพาสภาพแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ และสภาพดิน ไปสู่การผลิตที่สามารถควบคุมปริมาณและคุณภาพของผลผลิตตามที่ต้องการโดยไม่ต้องพึ่งพาสภาพอากาศภายนอก ใช้ทรัพยากรน้ำและพลังงานที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าและเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด เทคโนโลยีการปลูกพืชแบบนี้เรียกว่า เทคโนโลยีการปลูกพืชระบบปิด (Closed plant production system) ซึ่งเป็นวิธีการป้องกันพืชผลจากสภาพแวดล้อมที่รุนแรงกับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง นอกจากการป้องกันจากสภาพอากาศแล้ว ยังสามารถควบคุมและป้องกันแมลง วัชพืช และสิ่งอันตรายอื่นๆ ในช่วงเวลาการปลูกพืชผล [4] ในการปลูกพืชระบบปิดการปลูกพืชสามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่และสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดทั้งปีเนื่องจากไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพดินและสภาพอากาศในท้องถิ่น หรือดวงอาทิตย์ [5] รวมถึงการให้ผลผลิตที่สูงขึ้น ดังเช่น โรงงานปลูกพืชด้วยแสงเทียม (Plant Factory, PFAL) ในประเทศญี่ปุ่นสามารถให้ปริมาณการขายต่อปีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คือประมาณ 100 เท่าของการปลูกพืชแบบดั้งเดิมในแปลงเปิด และยังสามารถสร้างได้ทุกที่และทุกอาคาร เพราะระบบไม่มีความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์หรือดินธรรมชาติ [6] อย่างไรก็ตามการผลิตพืชในระบบปิดมีต้นทุนสูงในด้านพลังงานไฟฟ้าสำหรับสร้างพลังงานแสงสว่างและเพื่อควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อม ดังนั้น จึงต้องมีการเลือกชนิดพืชที่มีมูลค่าสูง เช่น สมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยา สตรอเบอร์รี่ และ ผักสลัดประเภทต่างๆ เป็นต้น และเลือกชนิดของหลอดไฟที่ให้พลังงานแสงและคุณภาพแสงให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชที่ต้องการปลูก

ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมสำหรับชุดปลูกพืชระบบปิดที่สามารถควบคุม ระบบให้น้ำและธาตุอาหารแก่พืชแบบอัตโนมัติ ระบบปรับสภาวะอากาศ และ ระบบแสงเทียม รวมถึงการออกแบบให้มีโครงสร้างสำหรับรองรับระบบปลูกพืชแบบถอด

ประกอบปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้อย่างสะดวก เพื่อนำไปสู่การปลูกพืชมูลค่าสูงแต่ละชนิดได้อย่างหลากหลาย

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อพัฒนาระบบปลูกพืชระบบปิด ที่สามารถควบคุมระบบให้น้ำ ระบบปรับสภาวะอากาศ และระบบแสงเทียม โดยสามารถปลูกพืชมูลค่าสูงได้อย่างหลากหลาย

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1.2.1 การพัฒนาชุดปลูกพืชระบบปิดที่สามารถควบคุมการให้แสงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

1.2.2 การพัฒนาชุดปลูกพืชระบบปิดที่สามารถผสมธาตุอาหารสำหรับพืช และให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืชแบบอัตโนมัติ

1.2.3 โครงสร้างรองรับระบบปลูกพืชที่มีความแข็งแรงสามารถใช้งานในระยะยาวได้ และทำการถอดประกอบปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้อย่างสะดวก

1.2.4 การพัฒนาชุดปลูกพืชระบบปิดที่สามารถรองรับการปลูกพืชแต่ละชนิดได้อย่างหลากหลายรองรับพืชที่มีความสูงมากที่สุด 120 cm สามารถปลูกสตอเบอร์รี่ พืชผักสวนครัว ผักสลัดชนิดต่างๆ และสมุนไพร

1.2.5 ทำการทดสอบการทำงานของชุดปลูกพืชระบบปิดโดยไม่มีการปลูกพืช โดยใช้ค่าอ้างอิงความสูง ความกว้างทรงพุ่ม และค่าสภาวะอากาศที่เหมาะสมของผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยประกอบด้วยการทดสอบ ระบบแสงเทียม ระบบปรับสภาวะอากาศ และระบบการให้สารละลายธาตุอาหาร

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชุดปลูกพืชระบบปิดที่สามารถควบคุมระบบให้น้ำ ระบบปรับสภาวะอากาศและระบบแสงเทียม รวมถึงสามารถปลูกพืชมูลค่าสูงได้อย่างหลากหลาย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	ช่วงระยะเวลาการดำเนินงาน												
	2562	2563							2564				
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎี และวิจัยที่เกี่ยวข้อง													
2. ออกแบบและกำหนด เลือกอุปกรณ์ในการสร้างชุด ปลูก													
3. ดำเนินการสั่งอุปกรณ์ และสร้างชุดปลูก													
4. ทดสอบการทำงานของ ชุดปลูกพีระบบปิด													
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ													
6. สรุปผลการทดสอบ													
7. ทำรายงานและจัดทำ รูปเล่มปริญาานิพนธ์													

1.4.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและทฤษฎีของการปลูกพีระบบปิดสำหรับการควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการทำงานของระบบแสงเทียม ระบบการให้น้ำและธาตุอาหาร และระบบปรับสภาวะอากาศ

1.4.3 ออกแบบและกำหนดเลือกอุปกรณ์ในการสร้างชุดปลูก

1.4.4 ดำเนินการสั่งอุปกรณ์และสร้างชุดปลูก

1.4.5 ทำการทดสอบการทำงานของชุดปลูกพีระบบปิด

- ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร
- ระบบปรับสภาวะอากาศ
- ระบบแสงเทียม

1.4.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการทดสอบ

1.4.7 ทำรายงานและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 งบประมาณที่ใช้

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. โครงสร้าง	
1.1 อลูมิเนียม pipe frame หน้าตัด 28 mm และข้อต่อจับยึด	14,184
1.2 แผ่นอะคริลิกความหนา 3 mm ขนาด 1200x300 mm	1,600
1.3 รางปลุกผักแบบเปิด (บน-ล่าง)	1,260
2. ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร	
2.1 เครื่องผสมปุ๋ย AB อัตโนมัติ	9,500
2.2 เครื่องสูบน้ำ DC	1,900
2.3 ถังน้ำขนาด 200 ลิตร	1,200
2.4 เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ AC	650
2.5 ถังน้ำใต้ราง	225
2.6 ท่อน้ำ ข้อต่อและอุปกรณ์	1,000
3. ระบบปรับสภาวะอากาศ	
3.1 พัดลม DC 12 Volt ขนาด 12x12 cm	1,995
4. ระบบแสงเทียม	
4.1 หลอดไฟ Warm white และ Day light	13,860
5. ระบบควบคุม	
5.1 ตู้ควบคุมชุดปลุกพืช	1,834
รวมงบประมาณ	49,208

*หมายเหตุ: ไม่รวมค่ากันผนังห้อง และเครื่องปรับอากาศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วรรณกรรมปริทรรศน์

โรงงานปลูกพืชด้วยแสงเทียม (Plant Factory with artificial lighting, PFAL) ได้เริ่มถูกนำไปใช้ในประเศญี่ปุ่นเพื่อการปลูกพืชผล [6]

ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยของ Ueno and Kawamitsu [7] ที่เกี่ยวข้องกับระบบปลูกพืชด้วยแสงเทียม เช่น งานวิจัยที่มุ่งเน้นการลดการใช้พลังงานภายในโรงงานปลูกพืช ซึ่งทำการออกแบบและพัฒนาโรงงานปลูกพืชโดยใช้แสงเทียมและแสงดวงอาทิตย์ ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับระบบแสงสว่างและระบบปรับสภาวะอากาศ ในห้องปลูกจะมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน พบว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และใช้หลอดไฟ LED มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงาน สามารถลดการใช้พลังงานได้ 30 %

นอกจากนี้แหล่งกำเนิดแสงเทียมซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการปลูกพืชในระบบปิดได้ถูกทำการศึกษาโดย Xiaoying et al. [8] ผลการศึกษาพบว่าทำให้แสงเพียงสีใดสีหนึ่งแก่พืชสามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตได้ แต่อาจทำให้รูปแบบการเจริญเติบโตแตกต่างไปจากต้นที่เจริญในแสงตามธรรมชาติ เช่น ต้นมะเขือเทศที่ได้รับแสงสีส้ม สีแดง หรือสีเขียวจะมีลักษณะต้นยืดยาวและอ่อนแอ ในขณะที่ต้นมะเขือเทศที่ได้รับแสงผสมระหว่างสีน้ำเงินกับสีแดงหรือแสงสีขาวที่มีส่วนผสมของแสงทุกช่วงความยาวคลื่น ส่งผลให้มีลักษณะต้นใกล้เคียงกับการปลูกในแสงธรรมชาติและแข็งแรงกว่า และ Kim et al. [9] รายงานถึงการให้แสงผสมระหว่างสีน้ำเงินและสีแดงโดยปราศจากแสงสีเขียว อาจทำให้พืชที่มีทรงพุ่มหนาแน่น มีการเจริญเติบโตโดยรวมของทรงพุ่มต่ำกว่าการได้รับแสงที่มีส่วนผสมของแสง สีเขียว เช่น ผักกาดที่ได้รับแสงผสมระหว่างสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง มีน้ำหนักแห้งสูงกว่าต้นที่ได้รับแสงผสมระหว่างสีน้ำเงินและสีแดง เนื่องจาก Terashima et al. [10] ได้กล่าวว่าแสงสีน้ำเงินและสีแดงจะถูกใบด้านนอกของทรงพุ่มดูดกลืนไว้เกือบทั้งหมดส่งผลให้ใบที่อยู่ด้านในทรงพุ่มได้รับพลังงานแสงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แสงสีเขียวจะทะลุผ่านใบด้านนอกของทรงพุ่มเข้าไปด้านในได้ดีกว่าแสงสีน้ำเงินและแดง ส่งผลให้ใบในทรงพุ่มมีการสังเคราะห์แสงและมีการเจริญเติบโตโดยรวมทั้งทรงพุ่มที่ดีกว่าการได้รับแสงผสมระหว่างสีแดง และน้ำเงินเท่านั้น นอกจากนี้

แสงสีต่างๆแล้ว พบงานวิจัยของ ทิวา จามะรีและคณะ [11] ที่นำแสงสีขาวซึ่งเป็นแสงรวมจากหลอด LED ซึ่งมีแสงสีขาวที่ให้หลายอุณหภูมิสี แสงสีขาวไม่ใช่แสงสีขาวบริสุทธิ์แต่จะถูกผสมด้วยเฉดสีอื่นๆ เพียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดเป็นแสงสีขาวที่แตกต่างกัน ผลของแสงจากหลอดไฟ LED ต่อการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple ภายใต้ระบบปลูกพืชระบบปิด โดยใช้แสงไฟที่มีอุณหภูมิสีและสัดส่วนของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่แตกต่างกัน หลังจากปลูกเป็นเวลา 30 วันพบว่า แสง Day light (6500 K) ผสมกับ แสงสี Warm white (3000 K) ที่ความเข้ม $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ส่งผลให้ต้นพิทูเนียมีลักษณะแข็งแรงและสมบูรณ์ที่สุด ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าแสงขาวจากหลอด LED มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการชักนำให้เกิดการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple ในระบบกึ่งปิด สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่าง (Lux) กับค่า PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีการวิจัยจาก Thimijan [12] โดยการแปลงหน่วยค่า lux เป็นค่า $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ สำหรับแสงอาทิตย์มีตัวคูณคือ 0.019 หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมทัลฮาไลด์ตัวคูณคือ 0.014 หลอดโซเดียมความดันสูงตัวคูณคือ 0.012 และในงานวิจัยของกรวิทย์ กระจ่างพันธ์และคณะ [13] พบว่าสำหรับหลอดแอลอีดีแสงสว่างมีค่าเท่ากับ $0.018 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ต่อ Lux

ในส่วนของระบบปรับสภาวะอากาศได้มีงานวิจัยการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศในโรงงานปลูกพืชด้วยแสงเทียมที่มีทางเข้าและออกต่างกัน โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ผลการวิจัยโดย Tae and Yong. [14] พบว่า เมื่อทางเข้าของอากาศอยู่ที่กึ่งกลางกำแพงด้านข้าง ความเร็วลมเฉลี่ยในโรงงานจะเพิ่มขึ้น แต่ความสม่ำเสมอของอากาศจะลดลง ในทางตรงข้ามถ้าช่องทางเข้าตั้งอยู่บนเพดานกระแสความเร็วลมจะลดลงแต่ความสม่ำเสมอจะเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่ารูปแบบการไหลของอากาศในโรงงานที่ขึ้นปลูกแบบหลายชั้นได้รับผลกระทบอย่างมากจากที่ตั้งของทางเข้าและทางออกของอากาศ อีกทั้งยังมีการวิจัยที่รายงานผลโดย Toru et al. [15] เกี่ยวกับผลของการไหลของอากาศเพื่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในโรงงานด้วยเครื่องเล่นแผ่นเสียง โดยการควบคุมการไหลของอากาศในโรงงาน และใช้เครื่องเล่นแผ่นเสียงหมุนผักกาดหอมเพื่อลดการไหลเวียนของอากาศที่ไม่เป็นอิสระ ทำการทดสอบโดยตั้งค่าความแรงของการหมุนให้มีการไหลของอากาศในเงื่อนไข 3 อย่าง คือ ลมแรง ลมอ่อน ลมสงบ ที่ความเร็วลมประมาณ 1.8 0.9 และ 0.1 m/s ตามลำดับ โดยมีการหมุนเวียนของอากาศ และเงื่อนไขที่ 4 คือ ไม่มีการหมุนหรือการไหลของอากาศ ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมการไหลของอากาศและกลไกการหมุนของเครื่องเล่นแผ่นเสียงมีผลส่งเสริมการเติบโตประมาณ 20% โดยเฉพาะเงื่อนไขที่ 2 การหมุนแบบเบาที่ความเร็วลมประมาณ 0.9 m/s เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในเรื่องนี้ นอกจากนี้งานวิจัยใน [16] ได้ทำการพัฒนาระบบเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมการหมุนเวียนอากาศที่ดีสำหรับพืช โดยทำการติดตั้งพัดลมขนาดเล็กที่ด้านหลังของชั้นวาง ดังรูปที่ 2.1 และพบงานวิจัยที่ถูกเสนอโดย Ying [17] ซึ่งได้มีการจำลองการคำนวณพลศาสตร์ของไหลแบบสามมิติ (CFD) โดยใช้ท่ออากาศที่มีหัวจ่ายอากาศสามรู ติดตั้งบริเวณชั้นปลูกพืชเพื่อ

ควบคุมสภาพแวดล้อมและรักษาความสม่ำเสมอของสภาพอากาศ ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดรอยไหม้ในการผลิตผักกาดหอม ทำการจำลองทั้งหมด 4 กรณีโดยใช้จำนวนท่ออากาศ 1 ท่อ, 2 ท่อแบบอากาศไหลไปทางเดียวกัน, 2 ท่อแบบอากาศไหลในทิศทางตรงกันข้าม และ 4 ท่อตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่ากรณีที่มีท่ออากาศสองท่อที่อากาศไหลไปทางเดียวกันสามารถให้ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 0.42 m/s ซึ่งแนะนำให้ใช้ในการออกแบบระบบไหลเวียนอากาศที่ดีที่สุดใน 4 กรณี



รูปที่ 2.1 การติดตั้งพัดลมขนาดเล็กที่ด้านหลังของชั้นวางถาดปลูก [16]

นอกจากนี้จากการทบทวนเอกสารพบข้อมูลของแนวคิดการปลูกพืชแนวตั้ง (Vertical Farming) และการนำแนวคิดของการปลูกพืชแนวตั้งมาใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยการปลูกพืชแบบแนวตั้งหมายถึงการปลูกพืชเป็นชั้นๆ มีการให้น้ำ อาหาร และแสงโดยการควบคุมจากมนุษย์ ปลูกในโรงเรือนที่มีหลังคาหรือในอาคารที่มีตาข่ายป้องกันแมลงเข้ามากัดกินผลผลิต ปลูกพืชได้โดยไม่จำกัดฤดูกาล และสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ตัวอย่างเช่น

Singapore Sky Green Farm [18] เป็นนวัตกรรมของบริษัท Sky Urban Solution ที่มีการดำเนินการฟาร์มปลูกผักแนวตั้งในเชิงพาณิชย์แห่งแรกของโลก ก่อตั้งโดย Jack Ng ซึ่งริเริ่มแนวคิดการทำสวนผักแนวตั้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2493 และได้พัฒนาจนกระทั่งประสบความสำเร็จในปี พ.ศ. 2552 ในการออกแบบเกษตรกรรมแนวตั้ง สกายกรีนฟาร์ม (จดสิทธิบัตร) เพื่อให้เป็นฟาร์มที่ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อเพาะปลูกพืชในอาคารอย่างเต็มรูปแบบ ด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) โดยสร้างเป็นโครงสร้างอลูมิเนียมแนวตั้ง ความสูง 9 m จำนวน 120 หลัง ในแต่ละชั้นจะมีรางสำหรับปลูกพืชที่สามารถหมุนรอบโครงสร้างอลูมิเนียม การออกแบบระบบการให้น้ำและการควบคุมพลังงานโดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ดึงน้ำฝนที่เก็บไว้ในอ่างเก็บน้ำใต้ดินมาเป็นพลังงานในการหมุนรางปลูกผักให้ได้รับแสงแดดโดยรอบและสม่ำเสมอ ในส่วนของระบบให้น้ำมีการออกแบบชุดจ่ายน้ำเป็นรูปตัว A ทำให้ควบคุมปริมาณน้ำและอัตราการไหลของน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการน้ำของพืชแต่ละชนิดได้

โดยการให้น้ำทุก 8 ชั่วโมง ด้วยระบบดังกล่าวการปลูกผัก 38 ชั้น จึงใช้น้ำจำกัดเพียง 0.5 L นอกจากนั้น ปริมาณน้ำส่วนเกินจะไหลผ่านระบบกรองและนำกลับมาใช้ใหม่ภายในโรงเรือน ระบบดังกล่าวใช้พลังงานต่ำเทียบเท่าพลังงานของหลอดไฟขนาด 60 W เท่านั้น และเป็นการทำฟาร์มคาร์บอนต่ำ

Green House แบบใช้ดินของบริษัท Kok Fah Technology Farm (KFTF) [19] เป็นฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีการทำเกษตรแบบผสมผสานระหว่างระบบแบบดั้งเดิมและระบบอัตโนมัติในเรือนกระจก หรือ Green House โดยการใช้ดินและได้มีการนำเทคโนโลยีหลากหลายชนิดเข้ามาใช้ในการทำเกษตรแบบดั้งเดิม เช่น เครื่องคำนวณการใส่ดินให้พอดีกับภาชนะปลูก (Bale Dosage Bunker) และเครื่องมือฝังเมล็ดพืชผลอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจาก Agri-Food & Veterinary Authority of Singapore (AVA) ในการพัฒนาและนำระบบอัตโนมัติต่างๆ มาใช้กับกระบวนการปลูกพืชแบบดั้งเดิมในแปลงเปิด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Green House แบบใช้ดิน [19]

Digital Farm แบบไม่ใช้ดินของบริษัท Sustenir Agriculture Singapore Pte Ltd [19] เป็นการทำการเกษตรแนวตั้ง ที่ใช้ระบบการควบคุมสภาพแวดล้อมด้วยคอมพิวเตอร์ หรือ Controlled-environment agriculture จนถึงสารอาหารของพืช เป็นการปลูกพืชในอาคาร (In door) เพื่อป้องกันมลพิษทางอากาศและแมลงศัตรูพืช โดยมีการควบคุมอุณหภูมิและแสงเพื่อการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงนี้จะผ่านแสงจากหลอดไฟ LED ที่มีการควบคุมความเข้มของแสง คลื่นความถี่และระยะเวลาของแสง เพื่อให้มีความคล้ายคลึงกับการสังเคราะห์แสงจากดวงอาทิตย์และยังมีการควบคุมความชื้นในอากาศ มีระบบการรดน้ำอัตโนมัติที่มีการควบคุมสารอาหารและระบบการควบคุมสารอาหารของพืชผ่านการทดสอบเพื่อหาสารเคมีที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชชนิดแต่ละชนิด ทั้งนี้ การใช้แสง LED จะช่วยลดระยะเวลาการปลูกลงได้ครึ่งหนึ่งของ

ระยะเวลาการเติบโต ในปัจจุบันฟาร์ม Sustenir เป็นเพียงรายเดียวในสิงคโปร์ที่สามารถปลูกต้นสตรอเบอร์รี่ได้ ดังรูปที่ 2.3



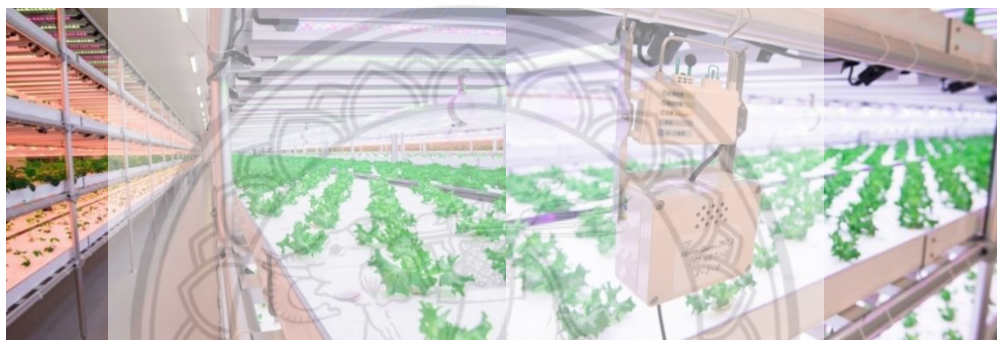
รูปที่ 2.3 Digital Farm แบบไม่ใช้ดิน [19]

บริษัท วังรี เฮลท์ แฟคตอรี จำกัดมีการทำการเกษตรแบบโรงงานปลูกพืชระบบปิด ดังรูปที่ 2.4 แบบปลอดเชื้อ โดยมีการควบคุมเต็มรูปแบบ เช่น ระบบควบคุมคุณภาพแสง ความชื้น อุณหภูมิ และแร่ธาตุด้วยระบบเซนเซอร์ โดยระบบน้ำและธาตุอาหารใช้น้ำที่ผ่านการกรองเป็นเกรดน้ำดื่มทั้งหมดโดยมีการใช้น้ำน้อยกว่าปกติมากคือแค่ 1 เปอร์เซ็นต์ของการปลูกแบบดั้งเดิมในแปลงเปิด โดยปราศจากการใช้สารเคมี รวมไปถึงการกระตุ้น ให้พืชหลังสารเคมีบางอย่างที่ต้องการ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้เป็นไปตามที่ต้องการและควบคุมกระบวนการทั้งระบบ และมีการนำเทคโนโลยี BIG DATA เข้ามาจัดเก็บข้อมูลต่างๆ อาทิ ข้อมูลผู้บริโภค เมล็ดพันธุ์ ผลผลิต เพื่อการพัฒนาสินค้าและการบริการอย่างมีประสิทธิภาพ [20]



รูปที่ 2.4 โรงงานปลูกพืชระบบปิด บริษัทวังรีเฮลท์แฟคตอรี [20]

Plant Factory ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ กระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ โดย สวทช. ดังรูปที่ 2.5 ตั้งโรงงานผลิตพืช หรือ Plant Factory ที่อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จังหวัดปทุมธานี โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีโรงงานผลิตพืชด้วยแสงเทียม หรือ Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) จากมหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น โดยแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้แทนแสงอาทิตย์จากธรรมชาติ คือแสงจากหลอดไฟ LED ซึ่งให้ความร้อนน้อยกว่าและประหยัดไฟมากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่สำคัญคือเลือกสี ความยาวคลื่นแสง ตามความเหมาะสมของชนิดพืชและระยะการเจริญเติบโตได้ ซึ่งจะช่วยให้พืชที่ปลูกให้ผลผลิตสูงและผลิตสารสำคัญตามต้องการ โดยจะเริ่มทดสอบปลูกพืชสมุนไพร เช่น ใบบัวบก ฟักทะลายโจร รวมถึงพืชมูลค่าสูงชนิดอื่นๆ [21]



รูปที่ 2.5 Plant Factory ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ กระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ [21]

และจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยของ Kozai [22] กล่าวถึงประสิทธิภาพและราคาในเชิงพาณิชย์ของ Plant Factory ที่ซึ่งปัจจุบัน Plant factory ในญี่ปุ่นมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในปี 2555 มี Plant factory เชิงพาณิชย์ มากกว่า 120 บริษัท สำหรับโรงงานผลิตพืชที่ใหญ่ที่สุดในญี่ปุ่น คือ บริษัท Spread จำกัด สามารถผลิตผักสลัดได้มากถึง 25,000 หัวต่อวันหรือ 9 ล้านหัวต่อปี ซึ่งคิดเป็นกำไร 20% สำหรับค่าใช้จ่ายคิดเป็นค่าเสื่อมราคา 30% ค่าแรง 25% และค่าไฟฟ้า 20% ของค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด โดยในปี 2555 ค่าใช้จ่ายในการผลิตผักสลัดต่อหัวซึ่งรวมค่าเสื่อมราคาคิดเป็นประมาณ 22 บาทต่อหัว ขณะที่ราคาขายอยู่ที่ประมาณ 26-30 บาทต่อหัว

สำหรับค่าใช้จ่ายในการสร้าง Plant factory ส่วนใหญ่เป็นค่าใช้จ่ายในการจัดทำโครงสร้างและระบบ และอีกครึ่งหนึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายใน สำหรับการลงทุนครั้งแรกรวมรางปลูกผักที่มี 10 ชั้น ราคาประมาณ 148,000 บาท/ตรม. ซึ่งจะคืนทุนในระยะเวลา 5-7 ปี โดยรางปลูกผักจำนวน 10 ชั้นสามารถผลิตผักสลัดได้มากถึง 90-117 เท่า เมื่อเทียบกับการปลูกผักสลัดในแปลงปลูกทั่วไป

จากงานวิจัยต่างๆ สามารถกล่าวได้ว่าการปลูกพืชในระบบปิดสามารถเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมในแปลงเปิด แต่เนื่องจากต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการทำเกษตร

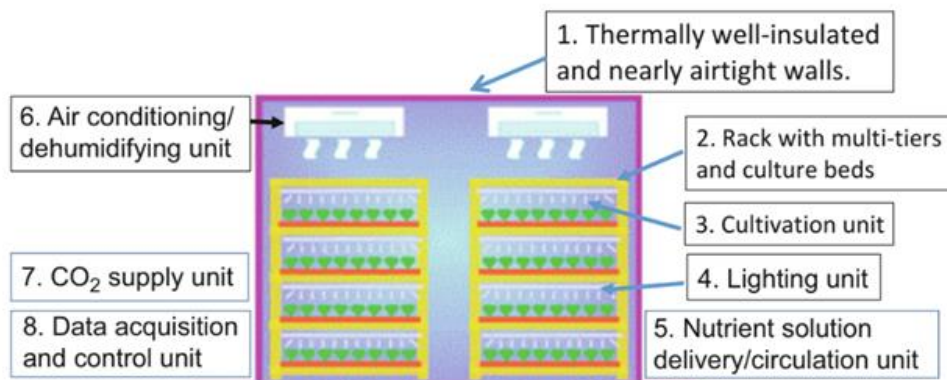
ระบบปิดสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าการลงทุนระบบต่างๆ และจากการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ และระบบให้แสงเทียม จึงพบการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในระบบต่างๆ เพื่อให้สามารถทำงานเหมาะสมในการปลูกพืชแบบต่างๆ การพัฒนาระบบปลูกพืชระบบปิดจึงควรเป็นระบบที่สามารถใช้งานกับพืชได้หลากหลายชนิด การออกแบบระบบจึงควรพิจารณาถึงเรื่องนี้เพื่อให้สามารถใช้งานระบบได้อย่างคุ้มค่า

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 โรงผลิตพืชโดยใช้แสงเทียม (Plant factory with artificial lighting, PFAL)

การปลูกพืชในระบบปิด (Closed plant production system, CPPS) ที่ใช้แสงเทียม หรือ โรงผลิตพืชโดยใช้แสงเทียม (Plant factory with artificial lighting, PFAL) เป็นเทคโนโลยีที่ควบคุมการเพาะปลูกในระบบปิดแบบแม่นยำ ที่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ อาทิ แสง น้ำ อากาศ ความชื้น แร่ธาตุ จากระบบเซ็นเซอร์ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายต่างๆ โดยเฉพาะการประหยัดน้ำและธาตุอาหาร ไม่ใช้สารเคมีในการกำจัดป้องกันศัตรูพืช โรคพืช ทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีความแน่นอนในแต่ละรอบการปลูกสูงถึงร้อยละ 95 [5] และโดยทั่วไปการปลูกพืชแบบใช้แสงเทียมมีส่วนประกอบหลัก 8 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [23] ดังนี้

- 1) ห้องสำหรับปลูก ผนังที่บดบังแสงที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อน ป้องกันการไหลผ่านของอากาศทั้งภายในและภายนอก
- 2) โครงสร้างชั้นวางถาดปลูก
- 3) ชุดปลูกในแต่ละชั้น
- 4) ระบบแสงเทียม โดยติดตั้งอุปกรณ์ให้แสงเทียม เช่น หลอด LED หรือหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เรียงเป็นชั้นไว้เหนือชุดถาดปลูก
- 5) ระบบให้น้ำและธาตุอาหารพืช
- 6) เครื่องปรับสภาวะอากาศและพัดลมหมุนเวียนอากาศ เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิของอากาศภายใน
- 7) ระบบให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 8) ชุดควบคุมและรวบรวมข้อมูลสภาวะแวดล้อม



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของห้องปลูกพืชในโรงงานผลิตพืชแบบใช้แสงเทียม (PFAL) [5]

2.2.2 โครงสร้างชั้นวางถาดปลูก

ก) ลักษณะชั้นวางถาดปลูก

ลักษณะของชั้นวางปลูกในการปลูกพืชระบบปิด เป็นการปลูกแบบเกษตรแนวตั้ง (Vertical farming) คือ มีการปลูกพืชในถาดหรือรางที่วางบนชั้นวางแต่ละชั้น ทำให้สามารถใช้พื้นที่ในแนวตั้งในการปลูกพืชได้ จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบรูปแบบโครงสร้างของชั้นวางถาดปลูกมีหลากหลายแบบ อย่างไรก็ตามอาจสามารถแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ตามระบบการเคลื่อนที่ดังนี้

1) แบบชั้นยึดแน่น

ชั้นวางประเภทนี้เป็นแบบทั่วไปที่โครงสร้างในแต่ละชั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และยึดติดกับโครงสร้างหลักด้วยตัวยึดหรือการเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างแบบชั้นทั่วไปที่ติดแน่น [5]

2) แบบชั้นเคลื่อนที่



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแบบชั้นเคลื่อนที่ที่ติดตั้งใน Singapore Sky Green Farm [18]

ชั้นวางประเภทนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถวางระบบปลูกแบบแนวตั้งชั้นแบบหลายชั้นในระดับสูง ระบบขับเคลื่อนจะถูกออกแบบและติดตั้งเพื่อให้ถาดปลูกสามารถเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ข) การกำหนดความสูงระหว่างชั้นปลูกและระยะห่างระหว่างรูปปลูกพืช

สำหรับหลักการในการกำหนดระยะของชั้นปลูกพืชได้มีการนำเสนอโดย Kozai และคณะ [5] ว่าพืชที่เหมาะสมสำหรับ PFALS นั้นมีความสูง 30 cm หรือสั้นกว่า เช่น ผักใบและพืชสมุนไพรเนื่องจากระยะห่างระหว่างชั้นแนวตั้งโดยทั่วไปประมาณ 40 cm ซึ่งเป็นระยะความสูงระหว่างชั้นปลูกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และอาจจะยังอ้างอิงตามลักษณะทางกายภาพของพืชต่างๆ เช่น ความสูงของพืช และในการกำหนดระยะห่างระหว่างรูปปลูกพิจารณาจากความกว้างของทรงพุ่มของผักสลัดและระยะห่างการปลูกที่เหมาะสมของผักแต่ละชนิดในการปลูกพืชแบบดั้งเดิมในแปลงเปิด ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยลักษณะทางกายภาพและระยะการปลูกที่เหมาะสมของพืชผักสวนครัว ผักสลัด และสมุนไพร [24-29]

กลุ่มพืช	ชนิดของพืช	ความสูงต้น (cm)	ความกว้างทรงพุ่ม / ระยะห่างการปลูกที่เหมาะสม (cm)
พืชผักสวนครัว	ผักกาดเขียววางตุ้ง	43 – 54	20-25
	คะน้า	33.40	20
	ผักบุ้งจีน	33.12	10 - 15
	ผักชี	30	10 - 20
	โหระพา	40-60	20
	ผักขึ้นฉ่ายฝรั่ง	40-60	15-20
ผักสลัด	กรีนโอ๊ค (Green Oak)	14.62	29.10
	เรดโอ๊ค (Red Oak)	13.35	14.58
	ผักกาดหอม	23.70	30
สมุนไพร	ฟ้าทะลายโจร	30-60	60
	กัญชา	200-300	50 - 75
พืชมูลค่าสูง	สตอเบอร์รี่	15-20	24.80
	มะเขือเทศราชินี	80-85	85-90

ค) การออกแบบโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

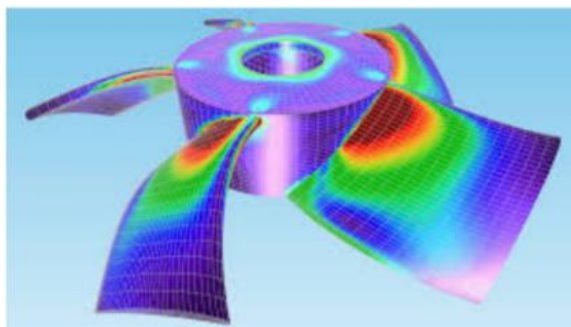
การวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างของวัสดุอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการวิเคราะห์ความแข็งแรงในทุกส่วนของโครงสร้าง จึงทำให้สามารถออกแบบขนาดของวัสดุที่รองรับภาระตามที่กำหนดได้อย่างเหมาะสม ที่ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการและรายละเอียดดังนี้

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวางซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งเช่นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนเครื่องจักร (Stress-Strain) โครงสร้างเครื่องบินโครงสร้างอาคารสะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่มีความสลับซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น

(Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้วยังสามารถจะใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการสั่นสะเทือนของโครงสร้างรวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการถ่ายเทมวล เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไปไม่ซับซ้อน สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของไหลอย่างฉับพลันหรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้นจึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) จากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรกลจะถูกวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 [30]

รูปที่ 2.9 การทดสอบการรับแรงของคานโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [30]



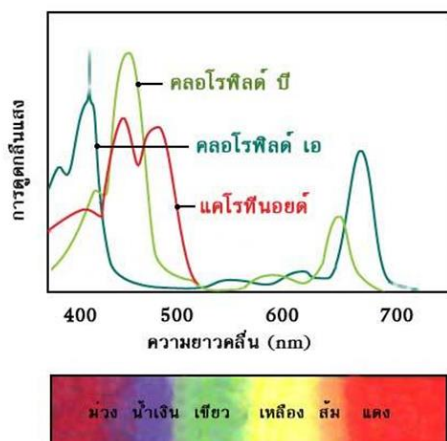
รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์ใบพัดเรือโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [30]

ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมีหลากหลายซอฟต์แวร์ Solidworks เป็นซอฟต์แวร์หนึ่งสำหรับออกแบบที่มีโมดูลของการวิเคราะห์ความแข็งแรงและเป็นที่ยอมรับจากผู้ออกแบบ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อสร้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำลองในคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะสร้างผลิตภัณฑ์กันแบบจริงโดยตัวซอฟต์แวร์จะจัดอยู่ในตระกูล CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานจำลองในรูปแบบ 3 มิติ เป็นแบบงานแยกชิ้น (Part) และแบบงานประกอบ (Assembly) เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบพื้นฐานทางวิศวกรรม 2 มิติ เรียกว่า CADD (Computer Aided Design and Drafting) โปรแกรม SolidWorks สามารถเพิ่มฟังก์ชัน Add-in เพื่อให้มีความสามารถอย่างอื่นนอกเหนือจากการวาดโมเดล 3 มิติ ฟังก์ชัน Simulation เป็นหนึ่งในฟังก์ชัน Add-in ที่มีอยู่มากมาย ซึ่ง Solidworks Simulation สามารถทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโมเดล 3 มิติ (Strength Analysis) โดยใช้วิธี Finite Element Analysis (FEA) ในการคำนวณหาความแข็งแรง ซึ่งจะมีโมดูลย่อยๆอีกหลายชนิดเพื่อให้ตอบโจทย์ความเสียหายที่มีได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติ การวิเคราะห์ความเสียหายแบบโก่งเดาะ (Buckling) การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การวิเคราะห์ความล้าหรืออายุการใช้งานของชิ้นงาน การวิเคราะห์การตกกระแทก การวิเคราะห์ถึงความดัน การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ความแข็งแรงแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น [31]

.2.3 ระบบแสงเทียม (Artificial light system)

ก) การสังเคราะห์ด้วยแสง

เป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้พืช สาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิดได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ สิ่งมีชีวิตแทบทั้งหมดล้วนอาศัยพลังงานที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อการเจริญเติบโตทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ยังมีการผลิตออกซิเจน ด้วยสิ่งมีชีวิตที่สร้างพลังงานจากกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ เรียกว่า "Phototrophs" โดยโมเลกุลที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่มีอยู่ในพืชและสิ่งมีชีวิตนี้คือ รงควัตถุ (Pigment) [29] ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง คลอโรพลาสต์เป็น ออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่นี้จะต้องมีรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยรงควัตถุที่พบในพืชทุกชนิดนั้นคือ คลอโรฟิลล์ a และ b คลอโรฟิลล์ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงของความยาวคลื่น โดยเฉพาะในช่วงแถบสีม่วงและสีน้ำเงิน คลอโรฟิลล์ดูดพลังงานแสงได้ดีที่สุด ช่วงคลื่นที่ดูดพลังงานแสงได้รองลงมาคือ แถบแสงสีแดง ส่วนแถบแสงสีเขียวดูดได้น้อยที่สุดดังรูปที่ 2.11 จึงสะท้อนแสงสีเขียวออกมาทำให้มองเห็นคลอโรฟิลล์มีสีเขียว [32]



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงของรงควัตถุชนิดต่างๆ [33]

ข) แสงกับการเจริญเติบโตของพืช

ปัจจัยหลักที่สำคัญของการเจริญเติบโตและพัฒนาของพืช คือ แสง ส่วนใหญ่จะพึ่งพาแสงจากดวงอาทิตย์เป็นหลัก แต่เนื่องจากสภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมและความต้องการบริโภคพืชผักที่เริ่มสูงขึ้น ทำให้มีการเสริมแสงเทียม เข้ามาช่วยในการเพาะเลี้ยง และแหล่งกำเนิดแสงสว่างที่สามารถให้ช่วงความยาวคลื่นได้ตามความต้องการของพืช คือ หลอด light-emitting diode (LED) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสีต่างๆ ได้ตามโครงสร้างของตัวมัน ทำให้สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นได้ตามช่วงความยาวคลื่นพืชที่ต้องการ [32]

1) ช่วงคลื่นแสงสีแดง

พืชมีความไวต่อสีแดงในสเปกตรัมของแสง ความไวที่เกิดขึ้นนั้นมาจากพืชที่มีสิ่งที่ถูกเรียกว่า เซลล์รับแสงสีแดง (Red light photoreceptor) แสงสีแดงส่งผลกระทบต่อพืชในหลายๆ ด้าน พืชที่ปลูกในที่ที่มีแสงสีแดงมักมีขนาดใหญ่ แต่โดยทั่วไปจะให้การเจริญเติบโตด้านความสูงกับกิ่งก้านมากมาย ถ้า Photoreceptor รับแสงสีแดงเป็นปริมาณมาก การผลิตฮอร์โมน (Metatopolin) จะเพิ่มขึ้น ฮอร์โมนนี้ช่วยป้องกันไม่ให้คลอโรฟิลล์ในพืชถูกทำลายลง เพราะพืชต้องการคลอโรฟิลล์เพื่อแปลงพลังงานของแสงเป็นน้ำตาล [34]

2) ช่วงคลื่นแสงสีเขียว

ไม่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสง แต่เป็นส่วนประกอบสำคัญของ แหล่งกำเนิดแสงบางชนิด จากการตรวจสอบรายละเอียดของการดูดกลืนแสง ภายในใบให้การดูดกลืนสูงกว่าความจุของการสังเคราะห์ด้วยแสง ในแสงที่เป็น strong white ดังนั้น Quantum yield ของการสังเคราะห์

ด้วยแสงจะ ลดลงในคลอโรพลาสต์ที่อยู่ใกล้กับพื้นที่การส่องสว่างมากกว่าในคลอโรพลาสต์ที่อยู่ต่ำกว่า เนื่องจากแสงสีเขียวสามารถทะลุเข้าไปในใบได้ดีกว่าแสงสีแดง หรือสีน้ำเงิน แสงสีเขียวที่ถูกดูดซับโดยคลอโรพลาสต์ที่อยู่ต่ำจะทำให้การสังเคราะห์ด้วยแสงของใบเป็นไปอย่างมีนัยสำคัญกว่าแสงสีแดงหรือสีน้ำเงิน ในแสงสีขาวปานกลางถึง strong white แสงสีเขียวสามารถยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแสงสีแดง [35]

3) ช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน

พืชจะใช้ตัวรับแสงที่เรียกว่า Cryptochrome ถ้ามีแสงสีน้ำเงินมาก เช่นแสงในธรรมชาติในฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว ตัวรับนี้จะรองรับการทำงานของฮอร์โมนพืช ที่เรียกว่า Auxin ฮอร์โมนนี้มีบทบาทในการเจริญเติบโตของลำต้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์การข่มตายอดต่อตาข้าง (Apical dominance) เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตทางด้านส่วนสูงมากกว่าการแตกกิ่งก้าน นอกจากนี้พืชยังใช้ปริมาณของแสงสีน้ำเงิน กำหนดการเปิดของปากใบและเพิ่มจำนวนของคลอโรพลาสต์ แสงสีน้ำเงินที่มากขึ้นจะทำให้ปากใบเปิด เพื่อเร่งการเผาผลาญ ระดับแสงสีน้ำเงินที่สูงขึ้น จะส่งเสริมการเผาผลาญอาหารที่เพิ่มขึ้นและขยายการเจริญเติบโตและพัฒนาในพืช [36]

ปริมาณที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชคือความหนาแน่นของปริมาณแสงช่วงเวลาที่พืชได้รับสำหรับการสังเคราะห์แสงเรียกว่า Photosynthetic Flux Density (PPFD) หน่วยเป็น $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ และค่าปริมาณแสงที่พืชได้รับต่อวันหรือ DLI (Daily light intergral) มีหน่วยเป็น $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ โดยค่า DLI สำหรับผักกาดหอมและพืชใบ 12-17 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ต้นกล้าผัก 13 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ [5]

2.2.4 ระบบให้น้ำและธาตุอาหารพืช

ระบบให้น้ำและธาตุอาหารพืชเป็นระบบที่มีความสำคัญมากในการปลูกพืชในระบบปิด ซึ่งจะประกอบด้วยระบบให้ธาตุอาหารแก่พืช และระบบส่งสารละลายธาตุอาหารไปยังรางปลูกพืชในแต่ละชั้น

ก) ระบบให้ธาตุอาหาร [37]

ระบบให้ธาตุอาหารแก่พืชในระบบปิดจะใช้เทคโนโลยีการปลูกพืชไม่ใช้ดินหรือการปลูกพืชไร้ดิน (Soilless culture) ซึ่งจะมีทั้งการปลูกพืชบนน้ำที่มีสารละลายธาตุอาหารพืชและการปลูกพืชในวัสดุที่ไม่ใช่ดิน ในปัจจุบันการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินสามารถแบ่งออกตามลักษณะและวิธีการปลูกได้แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1) Water Culture system คือการปลูกพืชในระบบรากแช่อยู่ในน้ำที่มีธาตุอาหารละลายอยู่ แบ่งย่อยออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้

1.1) ระบบสารละลายธาตุอาหารไหลเป็นฟิล์มบาง (Nutrient Film Technique, NFT) เป็นระบบการปลูกพืชลงในน้ำโดยการปล่อยสารละลายธาตุอาหารให้ไหลเป็นแผ่นบางๆ หนาประมาณ 2-3 mm ไหลผ่านรากพืชที่ปลูกอยู่บนรางปลูกที่ทำจากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ สารละลาย เช่น พลาสติก โดยมีอัตราการไหล 1-4 ลิตร/นาที่/ราง เป็นต้น ระบบนี้ไม่ต้องมีการเติมอากาศให้กับสารละลายธาตุอาหารโดยตรง แต่อาศัยการที่สารละลายธาตุอาหารจะต้องมีการเคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ในระบบโดยใช้เครื่องสูบน้ำ DC ส่งสารละลาย เมื่อไหลกลับมาตักสู่ถังพักจะทำให้เกิดฟองอากาศแทรกเข้าไปในสารละลายโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ข้อดี

ใช้น้ำน้อยที่สุด

ใช้วัสดุแทนรางได้หลายชนิด

ประหยัดปุ๋ย

ข้อเสีย

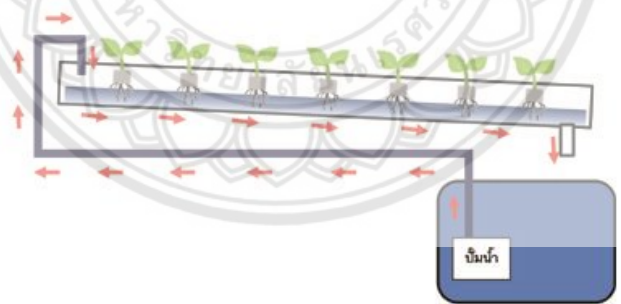
ราคาในการติดตั้งครั้งแรกค่อนข้างสูง

สารละลายมีการสะสมความร้อนสูงเนื่องจาก

ปริมาณน้ำในรางน้อย

ระบบน้ำต้องวนตลอด หากเกิดไฟดับจะทำให้

พืชบนรางแห้งตายได้



ระบบ NFT

รูปที่ 2.12 การปลูกพืชในระบบ NFT [35]

1.2) ระบบรากลอยในสารละลายธาตุอาหารลึก (Deep Floating Technique, DFT) เป็นการปลูกโดยให้รากพืชแช่อยู่ในภาชนะบรรจุสารละลายธาตุอาหารลึกประมาณ 15-20 cm โดยอัตราการไหลของน้ำในระบบ 4 ลิตร/นาที่/ราง ภาชนะดังกล่าวทำหน้าที่ทั้ง ภาชนะปลูกและ ภาชนะใส่สารละลายไปด้วย ทำให้วิธีการนี้ไม่ต้องใส่สารละลายแยกต่างหาก การปลูกพืชในกระถางเล็กๆ ซึ่งวางอยู่ในรูแผ่นโฟม หรือวัสดุลอยน้ำอย่างอื่นแล้วปล่อยให้ลอยบนสารละลาย วิธีนี้ต้องมีการ

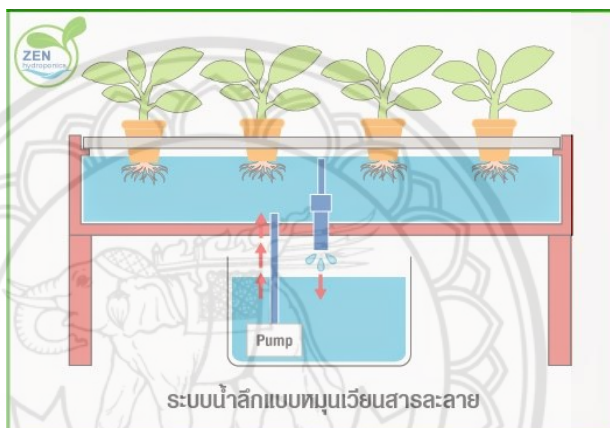
เติมอากาศลงในสารละลาย โดยการใช้เครื่องสูบน้ำ DC อากาศหรือการใช้เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก หมุนเวียนน้ำในชุดปลูก ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ข้อดี

วัสดุหาง่าย ทำเองได้
ปลูกในปริมาณน้อยได้
ระบบเข้าใจง่าย

ข้อเสีย

ใช้น้ำและปุ๋ยปริมาณมาก
จำเป็นต้องมีระบบเติมอากาศ



รูปที่ 2.13 การปลูกพืชในระบบ DFT [38]

1.3) ระบบรากแช่ในสารละลายธาตุอาหารส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งลอยในอากาศ (Dynamic Root Floating Technique, DRFT) เป็นระบบ DFT ที่ดัดแปลงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมีรางปลูกที่กว้าง และมีร่องน้ำอยู่บริเวณกลางรางหลายๆร่อง เพื่อบังคับให้สารละลายธาตุอาหารไหลอย่างมีทิศทาง คือ ผ่านร่องจากหัวรางไปยังปลายรางก่อนที่จะล้นลงสู่ถังพักใต้รางปลูก ก่อนที่จะถูกเครื่องสูบน้ำดูดกลับขึ้นมาไหลวนอย่างต่อเนื่อง ระดับของสารละลายในรางจะสูงไม่ท่วมเกินรากของพืช ด้านบนปิดด้วยแผ่นโฟมที่เจาะเป็นช่องเพื่อสอดต้นกล้าพืชที่เพาะอยู่ในก้อนฟองน้ำ รากพืชจะได้รับแร่ธาตุอาหารและออกซิเจนจากสารละลายที่ไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นและรากเริ่มยาว ก็จะมีการลดระดับของน้ำลง เมื่อระดับน้ำลดลงจะเกิดช่องว่างระหว่างระดับน้ำกับพื้นโฟม เรียกว่า Air gap ที่ช่วยให้พืชได้หายใจและสามารถอยู่ในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ข้อดี

ปลูกพืชได้หลากหลายชนิดเนื่องจากปรับระดับ
น้ำได้

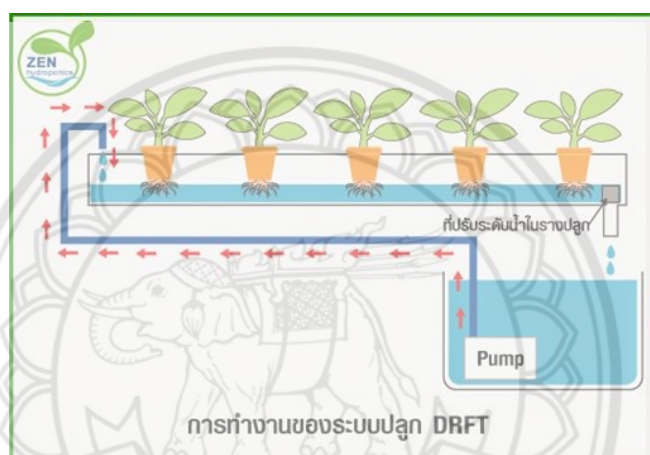
มีน้ำขังในรางปลูกตลอดพืชจะไม่ขาดน้ำเวลา
ไฟดับ

พืชสามารถอยู่ในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี
ขึ้น

ข้อเสีย

ใช้น้ำและปุ๋ยปริมาณมาก

วัสดุรองรับต้องแข็งแรงเนื่องจากน้ำหนักของน้ำ
ที่อยู่ในรางปลูก



รูปที่ 2.14 การปลูกพืชระบบ DRFT [38]

ในการปลูกพืชแบบ Water Culture system ทั้ง 3 ระบบจะมีการวัดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารในรูปของค่า EC ซึ่งย่อมาจากคำว่า (Electric Conductivity) หมายถึง ค่าเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าในของเหลว หรือปริมาณแร่ธาตุทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยปกติแล้วน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าความนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ แต่เมื่อนำธาตุอาหารละลายในน้ำ เกลือของธาตุอาหารเหล่านี้จะแตกตัวเป็นประจุบวก และประจุลบ ซึ่งจะเป็นตัวนำไฟฟ้า ทำให้มีค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งค่านำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเกลือของธาตุอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้น จึงใช้การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (ค่า EC) เพื่อเป็นตัวบอกปริมาณความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร โดยทั่วไปค่า EC ที่เหมาะสมสำหรับ ผักสลัดอยู่ที่ 1,400 – 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และ ผักไทย 2,000-2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

2) การปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate Culture)

หมายถึง การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หรือการปลูกพืชลงในวัสดุอื่นๆ ทั้งที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น ขุยมะพร้าว ขี้เลื่อย แกลบ ถ่านแกลบ เปลือกไม้ เปลือกถั่ว ชานอ้อย และที่เป็นอนินทรีย์

สาร เช่นกรวด (Gravel) ทราย (Sand) เม็ดดินเผา (Expanded clay) โยหิน (Rock wool) หินภูเขาไฟ (Pumice) เพอร์ไรท์ (Perlite) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) การปลูกพืชลงในวัสดุปลูกแบบนี้เป็นการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินที่มีลักษณะ ใกล้เคียงกับการปลูกพืชในดินที่เป็นการปลูกพืชลงในกระถาง หรือในภาชนะโดยใช้น้ำหยด แตกต่างกันตรงที่ถ้าปลูกลงในดิน พืชจะได้รับอาหารที่มีอยู่ในดิน หรือจากปุ๋ยที่ใส่ให้แต่ละครั้ง และได้รับน้ำจากการให้น้ำแบบน้ำหยด ส่วนการปลูกแบบใช้วัสดุปลูกนี้ พืชจะได้รับธาตุอาหารไปพร้อมๆ กับการให้น้ำหยด เพราะน้ำที่ให้เป็นน้ำสารละลายธาตุอาหาร หัวใจสำคัญของวิธีการปลูกพืชในวัสดุปลูกนี้คือการให้สารละลาย ธาตุอาหารในปริมาณและความถี่ที่พอเหมาะกับความต้องการของพืช ในแต่ละช่วงอายุการเจริญเติบโต และยังต้องมีวิธีการวางระบบระบายน้ำส่วนเกินออกจากวัสดุปลูกด้วย

ข้อดี

ประหยัดธาตุอาหารและน้ำ

คุณสมบัติที่ร่วนโปร่งและเบาของวัสดุปลูกจึงมี

อากาศแทรกอยู่เพียงพอต่อความต้องการของราก

พืช

ข้อเสีย

วัสดุปลูกบางชนิดต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

จึงทำให้มีราคาแพง

3) ระบบปลูกพืชให้รากลอยอยู่ในอากาศ (Aeroponics)

คือ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในลักษณะรากพืชไม่ได้แช่อยู่ในน้ำหรืออยู่ในวัสดุปลูกใดๆ แต่ปล่อยให้รากเปลือยอยู่ในอากาศ ไม่สัมผัสกับสิ่งใดเลย ดังนั้นจึงต้องมีการจับยึดส่วนโคนของลำต้นพืชให้ตั้งตรงและรากลอยอยู่ในอากาศได้ จากนั้นจะมีการฉีดพ่นสารละลายธาตุอาหารในรูปของละอองน้ำไปที่รากพืชโดยตรงเป็นระยะ และต้องมีการทำให้รากไม่ได้รับแสง จึงมัก สร้างเป็นภาชนะรูปทรงต่างๆ โดยรากและระบบพ่นละอองสารละลายจะอยู่ในภาชนะปลูก

ข้อดี

ประหยัดธาตุอาหารและน้ำ

พืชได้รับธาตุอาหารโดยตรงจากการฉีดพ่นธาตุ

อาหารไปที่รากของพืช

ข้อเสีย

การติดตั้งระบบมีความยุ่งยาก

ยากในการควบคุมการระบายอากาศจึงทำให้มี

ความเสี่ยงที่รากพืชจะเกิดราได้

ข) ระบบส่งน้ำ

ในระบบให้น้ำและธาตุอาหารนอกเหนือจากระบบให้ธาตุอาหารแล้ว ยังต้องมีระบบส่งน้ำที่ทำหน้าที่ส่งสารละลายธาตุอาหารจากถังผสมได้รางไปยังรางปลูกพืชในแต่ละชั้นโดยจะใช้เครื่องสูบน้ำกระแสตรงเป็นตัวส่งน้ำ และใช้เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติเป็นตัวส่งน้ำจากถังเก็บน้ำมายังถังผสมสารละลายธาตุอาหาร เครื่องสูบน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานจากแหล่งต้นกำเนิดไปยังของเหลว เพื่อให้ของเหลวนั้นเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งเครื่องสูบน้ำทั้ง 2 ประเภทนั้น มีรายละเอียดดังนี้

1) เครื่องสูบน้ำกระแสตรง เป็นเครื่องสูบน้ำที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เป็นเครื่องสูบน้ำที่เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้ เพราะมีเทคโนโลยีแผงโซล่าเซลล์ โดยนำแผงโซล่าเซลล์มาต่อเข้ากับตัวเครื่องสูบน้ำกระแสตรง และไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสตรงโดยการใช้งานในรูปแบบนี้จะเป็นการใช้สูบน้ำในเวลาตอนกลางวันที่มีแสงอาทิตย์ ข้อดีของเครื่องสูบน้ำนี้คือสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้ [39] แต่ข้อจำกัดของการทำงานของเครื่องสูบน้ำชนิดนี้คือตัวเครื่องสูบน้ำไม่ได้ออกแบบมาให้ใช้งานหนักดังนั้นควรเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีความสอดคล้องกับระบบที่ออกแบบไว้ให้มีความสอดคล้องกับการนำไปใช้งาน [40]

2) เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ เป็นเครื่องสูบน้ำที่ใช้กันโดยทั่วไปตามบ้านเรือน ที่พักอาศัย ทำงานโดยการเปิด-ปิดอัตโนมัติตามการเปิดใช้งานของอุปกรณ์ สามารถส่งน้ำไปตามจุดต่างๆ ภายในบ้านได้ดี เช่น ทันทีที่เปิดก๊อกเครื่องสูบน้ำจะทำงาน พอเลิกใช้ก็หยุดทำงาน เป็นต้น เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติจะมีอยู่ 2 แบบ คือ [41]

- เครื่องสูบน้ำมีถังแรงดันอากาศ โดยมีหลักการทำงานของเครื่องสูบน้ำอัตโนมัติถึงแรงดัน คือ เครื่องสูบน้ำจะทำการดูดน้ำเข้าไปในถังความดันเพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในถังความดัน เมื่อน้ำและอากาศอัดอยู่ด้วยกัน เวลาเปิดก๊อกน้ำ น้ำก็จะถูกปล่อยออกมาไปยังจุดใช้น้ำต่างๆ ในบ้านหรืออาคารต่างๆ ด้วยความแรง สาเหตุเพราะน้ำที่เข้าไปอยู่ในถังความดันจะถูกอากาศที่อยู่ด้านบนของถัง บีบอัดต่อลงมาให้น้ำไหลออกแรงมากยิ่งขึ้น

- เครื่องสูบน้ำแรงดันคงที่ โดยมีหลักการทำงานจะคล้ายๆ กับเครื่องสูบน้ำอัตโนมัติถึงแรงดัน แต่เครื่องสูบน้ำแรงดันคงที่ที่ไม่มีถังความดันด้านล่าง แต่ว่าความดันจะเกิดจากการใช้ถังโลหะ ขนาดเล็กๆ ที่ข้างในบรรจุก๊าซไนโตรเจน (N_2) เรียกว่า แท็งค์ไนโตรเจน (Nitrogen Tank) หรือเบลลเดอร์แท็งค์ (Bladder Tank) ซึ่งก๊าซไนโตรเจนนั้นมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนได้สูงและแรงดันจะเสถียรมากกว่า อากาศธรรมดาโดยภายในแท็งค์ไนโตรเจนจะประกอบไปด้วย ก๊าซไนโตรเจนที่ถูกอัดอยู่ในถังอย่างถาวร โดยจะมียางไดอะแฟรม (Diaphragm) ที่ป้องกันการเกิดสนิมถูกคั่นกลางเอาไว้

ระหว่างน้ำกับก๊าซไนโตรเจนที่อัดเอาไว้อยู่ด้านบนของตัวถัง และแรงดันจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Pressure Stabilized Unit) ที่จะคอยสร้างแรงดันอย่างต่อเนื่อง

ในการออกแบบเพื่อกำหนดขนาดของเครื่องสูบน้ำนั้น จะต้องคำนวณเพื่อหาเฮดรวมที่เครื่องสูบน้ำต้องสามารถทำได้ โดยผ่านสมการพลังงานของของไหลซึ่งประกอบด้วยพลังงานสามส่วนคือ พลังงานเนื่องจากความดันของของไหล พลังงานจลน์เนื่องจากความเร็วของของไหล และพลังงานศักย์เนื่องจากความสูง พลังงานทั้งสามส่วนนี้จะมีหน่วยในการคำนวณเป็นหน่วยจูล (J) เมื่อนำพลังงานของไหลมาคำนวณเทียบกับน้ำหนักของของไหล จะมีหน่วยเป็นความสูงของของไหลและเรียกว่าเฮดรวม มีหน่วยเป็นเมตร (m) เฮดรวมของระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบเครื่องสูบน้ำหรือ Total Dynamic Head (TDH) ประกอบด้วยพลังงานสามส่วนของของไหลของไหลที่กล่าวมาข้างต้นและพลังงานที่สูญเสียไปในระหว่างการไหล กล่าวคือเฮดความดัน เฮดความเร็ว เฮดความสูง และเฮดความฝืด โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาเฮดรวมของระบบ หรือ Total Dynamic Head (TDH) ประกอบด้วย

สมการการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_s = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{loss} \quad (2.1)$$

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการการไหลต่อเนื่อง $Q=Av$

โดย p = ความดันเกจ, N/m^2
 v = ความเร็ว, m/s
 z = ความสูงจากระดับอ้างอิง, m
 H_s = เฮดรวมของระบบ
 h_{loss} = เฮดที่สูญเสียในระบบ

เฮดที่สูญเสียในระบบมีสองส่วนคือ

(1) ความสูญเสียหลัก

$$h_L = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (2.2)$$

เมื่อ f = แฟคเตอร์ของความเสียดทาน
 l = ความยาวท่อ
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ
 v = ความเร็วของของเหลวภายในท่อ

(2) ความสูญเสียรอง

$$h_{\text{minor}} = \frac{Kv^2}{2g} \quad \text{หรือ} \quad \Delta p = \frac{K\rho v^2}{2g} \quad (2.3)$$

K = แฟคเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

ในความสูญเสียหลัก $h_L = f \frac{l v^2}{d 2g}$

แฟคเตอร์ของความเสียดทาน, f ขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์และความขรุขระสัมพัทธ์

$$f = F\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right) \quad (2.4)$$

Re = เรย์โนลด์นัมเบอร์

ε/d = ความขรุขระสัมพัทธ์

โดย

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.5)$$

เมื่อ

μ = ความหนืดสมบูรณ์

v = ความเร็วของของเหลวภายในท่อ

d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางท่อ

ϵ = ความขรุขระของผิวท่อ

ในกรณีการไหลแบบลามินาร์, $Re < 2300$ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์ส์นัม

เบอร์เท่านั้น, $f = F(Re)$ หาค่า f ได้จากสมการ $f = \frac{64}{Re}$

ในกรณีการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์, $Re > 2300$ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทาน $f = F\left(Re, \frac{\epsilon}{d}\right)$ หา

ค่าของ f ได้จากสมการ Haaland ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (2.6)$$

ในกรณีท่อที่ไม่ใช่ท่อกลม หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกได้ดังนี้

$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (2.7)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของของไหลภายในท่อ

P = เส้นรอบรูปที่เปียกของเหลว (Wetted Perimeter)

พิจารณาของไหลไหลเต็มท่อ ดังนั้นความสูญเสียหลัก

$$h_L = f \frac{l}{d_h} \frac{v^2}{2g} \quad (2.8)$$

สำหรับความสูญเสียรอง ค่าแฟคเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ (K) และค่าความขรุขระของผิวท่อ (ϵ) แสดงไว้ในตารางที่ 1ข. และตารางที่ 2ข. ตามลำดับ

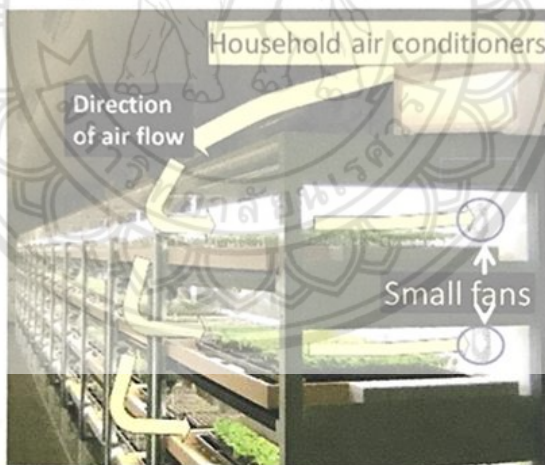
ในการวางแผนการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ สิ่งที่ต้องทราบซึ่งเป็นหลักสำคัญคือ

- (1) แนวทางการเดินท่อ
- (2) อัตราการไหลที่ต้องการ

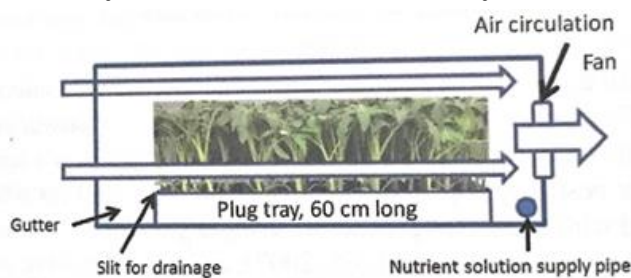
ค่าประมาณสำหรับความเร็วของการไหลในท่อดูดและด้านทางออกของเครื่องสูบน้ำ ความเร็วในท่อทางดูด, $v = 1$ ถึง 2 m/s เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางเข้าต้องไม่เล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางทางเข้าของเครื่องสูบน้ำ ความเร็วในท่อทางออกของเครื่องสูบน้ำ, $v = 1.5$ ถึง 3 m/s [42]

2.2.5 ระบบปรับสภาวะอากาศ

ในการปลูกพืชในระบบปิดจะต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศผ่านเครื่องปรับอากาศและชุดพัดลมที่สร้างการไหลเวียนในช่องของชั้นปลูกเพื่อสร้างระบบหมุนเวียนอากาศ เมื่อมีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศและพัดลมจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลของอากาศดังรูปที่ 2.15 ด้วยการจัดเรียงพัดลมและเครื่องปรับอากาศรูปแบบนี้ จะเกิดกระแสลมที่สม่ำเสมอเหนือถาดปลูก ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการใช้พัดลมดูดอากาศขนาดเล็กภายในชั้นวางและเครื่องปรับอากาศ โดยพัดลมที่เหมาะสมควรมีอัตราการไหลเวียนของอากาศ 2.9 m³/min ความเร็วของกระแสลมเหนือยอดพืชจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 m/s และ 1 m/s ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดใบไหม้ของพืชและช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างพืชและอากาศโดยรอบ กระแสลมแนวอนที่ค่อนข้างเรียบจะเกิดขึ้นเหนือถาดปลูกและผ่านบริเวณเหนือยอดของพืชในแต่ละชั้น [5] ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 รูปแบบการไหลของอากาศในชุดปลูกระบบปิด [5]



รูปที่ 2.16 แผนภาพของด้านข้างของชั้นวางถาดปลูก [5]

โดยการกำหนดขนาดของเรื่องปรับอากาศนั้น ปกติจะออกแบบให้มีขนาดการทำความเย็นพอเหมาะกับขนาดของห้องนั้น ดังแสดงการเลือกขนาดการทำความเย็นที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่และรูปแบบการทำงานของพื้นที่ในตารางที่ 2.2 [43] อย่างไรก็ตามเนื่องจากในระบบการปลูกระบบปิดมีภาระการทำความเย็นสูงกว่าการใช้งานทั่วไป จึงอาจจำเป็นที่จำต้องกำหนดขนาดการทำความเย็นมากกว่าการออกแบบปกติ

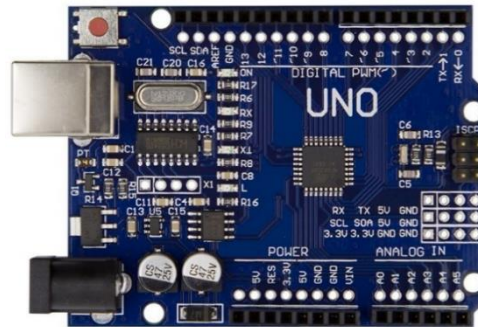
ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกขนาดการทำความเย็นที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่และรูปแบบการทำงานของพื้นที่ [43]

ขนาดแอร์ (มีทียู) BTU/ Hr TeddyAir	ขนาดห้อง (ตารางเมตร)					
	ห้องนอน		ห้องทำงาน		ร้านอาหาร	
	(ปกติ)	(โบนแดด)	(ปกติ)	(โบนแดด)	(ปกติ)	(โบนแดด)
5,000 BTU	5-9 ตร.ม.	4-8 ตร.ม.	4-8 ตร.ม.	4-8 ตร.ม.	3-7 ตร.ม.	3-7 ตร.ม.
9,000 BTU	10-14 ตร.ม.	9-13 ตร.ม.	9-13 ตร.ม.	8-12 ตร.ม.	7-11 ตร.ม.	7-11 ตร.ม.
12,000 BTU	14-18 ตร.ม.	13-17 ตร.ม.	12-16 ตร.ม.	11-15 ตร.ม.	11-15 ตร.ม.	10-14 ตร.ม.
15,000 BTU	18-22 ตร.ม.	17-21 ตร.ม.	16-20 ตร.ม.	15-19 ตร.ม.	14-18 ตร.ม.	13-17 ตร.ม.
18,000 BTU	22-26 ตร.ม.	20-24 ตร.ม.	19-23 ตร.ม.	18-22 ตร.ม.	17-21 ตร.ม.	16-20 ตร.ม.
20,000 BTU	25-29 ตร.ม.	23-27 ตร.ม.	22-26 ตร.ม.	20-24 ตร.ม.	19-23 ตร.ม.	18-22 ตร.ม.
22,000 BTU	27-31 ตร.ม.	25-29 ตร.ม.	24-28 ตร.ม.	22-26 ตร.ม.	21-25 ตร.ม.	20-24 ตร.ม.
24,000 BTU	30-34 ตร.ม.	28-32 ตร.ม.	26-30 ตร.ม.	25-29 ตร.ม.	23-27 ตร.ม.	21-26 ตร.ม.
30,000 BTU	38-42 ตร.ม.	35-39 ตร.ม.	33-37 ตร.ม.	31-35 ตร.ม.	30-34 ตร.ม.	28-32 ตร.ม.
36,000 BTU	46-50 ตร.ม.	44-47 ตร.ม.	40-44 ตร.ม.	38-42 ตร.ม.	36-40 ตร.ม.	34-38 ตร.ม.
40,000 BTU	51-55 ตร.ม.	48-52 ตร.ม.	45-49 ตร.ม.	41-46 ตร.ม.	40-44 ตร.ม.	38-42 ตร.ม.
40,000 ขึ้นไป	ควรคำนวณตัวแปรต่างๆโดยละเอียด เพื่อมีทียูที่เหมาะสม					

2.2.6 ระบบควบคุม

1) บอร์ดควบคุม

การควบคุมระบบต่างๆ รวมถึงการวัดผลจะถูกทำผ่านบอร์ดควบคุม ซึ่งบอร์ดที่เป็นที่นิยมและง่ายต่อการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานให้ได้ตามที่ต้องการ มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐานไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการพัฒนา คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno ดังรูปที่ 2.17 เป็นบอร์ดที่นำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่างๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ใช้พลังงานจากพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ หรือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกซึ่งใช้ได้ทั้งแบบไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรงจาก adapter แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าควรมีค่าอยู่ในช่วง 7-12 V ถ้าใช้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 12 V ส่งผลให้ไอซีควบคุมมีแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป ทำให้เกิดความร้อน เกิดความเสียหายต่อบอร์ดได้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Arduino ในชีวิตประจำวัน เช่น การควบคุมเปิด-ปิดไฟในบ้านแบบอัตโนมัติ ควบคุมการรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ เป็นต้น



รูปที่ 2.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno [44]

2.2.7 อุปกรณ์ควบคุม

1) รีเลย์ (Relay) [45] เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ไฟ ตัด-ต่อวงจรโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.18 เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัส (Contact) ให้เปลี่ยนสถานะ รีเลย์จะทำงานโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำรีเลย์ไปประยุกต์ใช้ ในการควบคุมวงจรต่างๆ ส่วนประกอบหลักสำคัญมี 2 ส่วนคือ

1.1) ขดลวด (Coil) ทำหน้าที่รับแรงดันจากวงจรที่ต้องการมาควบคุม เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แกนโลหะไปกระตุ้นให้หน้าสัมผัสต่อกัน ค่าแรงดันไฟฟารีเลย์ Coil AC เป็น 220-240 V และ Coil DC เป็น 24 V

1.2) หน้าสัมผัส (Contact) ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการ



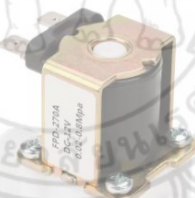
รูปที่ 2.18 รีเลย์ (Relay) [45]

2) สวิตช์ลูกลอยไฟฟ้า [46] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำในถังหรือบ่อน้ำ ดังรูปที่ 2.19 เพื่อนำไปใช้สั่งให้อุปกรณ์ต่างๆ หรือเก็บไว้ใช้เป็นข้อมูล ตัวอุปกรณ์ทำงานโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็ก โดยมีสวิตช์แม่เหล็กอยู่ที่ตัวก้าน และตัวหุ่นฝังแม่เหล็กไว้ข้างใน



รูปที่ 2.19 สวิตช์ลูกลอยฟ้า [46]

3) โซลินอยวาล์ว [47] พลาสติก ชนิด N/C (Normally Closed) คือ ระบบวาล์วที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการควบคุมการเปิดปิดวาล์ว ดังรูปที่ 2.20 โดยใช้พลังงานไฟฟ้าส่งเข้าไปที่ขดลวดเพื่อบังคับควบคุมแท่งเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นลิ้นวาล์วในการเปิดหรือปิดเพื่อให้ น้ำไหลผ่าน



รูปที่ 2.20 โซลินอยวาล์ว [47]

4) สวิตซ์ิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย [48] (Switching Power Supply) เป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง เช่น 220 VAC เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 2.21 ทำงานลักษณะเหมือนกับหม้อแปลงแรงดันทั่วไป มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและมีขนาดเล็กกว่า ส่วนประกอบของ Switching Power Supply มีดังนี้

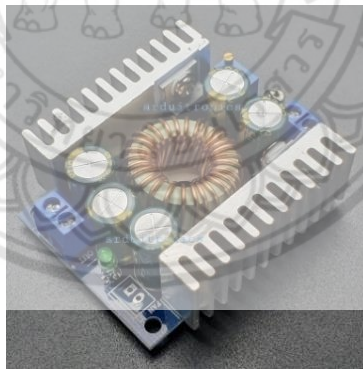
4.1) เรคตีไฟเตอร์ (Rectifier) ทำหน้าที่ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4.2) คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ทำหน้าที่ แปลงความถี่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าสลับที่มีความถี่สูงและแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.21 สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย [48]

5) Module (Step Down) [49] เป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันสูงให้มีค่าต่ำลง เช่น แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12V เป็น 5V ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Module (Step Down) [49]

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การออกแบบระบบควบคุม

จะอธิบายถึงการกำหนดอุปกรณ์ใช้งานในระบบควบคุม การออกแบบวงจรในระบบรวมถึง การเดินสายสัญญาณที่จะสื่อสารเพื่อควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit, MCU) และการออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อสั่งการทำงานของอุปกรณ์ภายในชุดปลูก โดยในการ เลือกใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ มาใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในชุดปลูกเพื่อ รองรับต่อการพัฒนาให้สามารถควบคุมการทำงานในระบบออนไลน์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

3.1.1 การกำหนดอุปกรณ์ใช้งานในระบบควบคุม

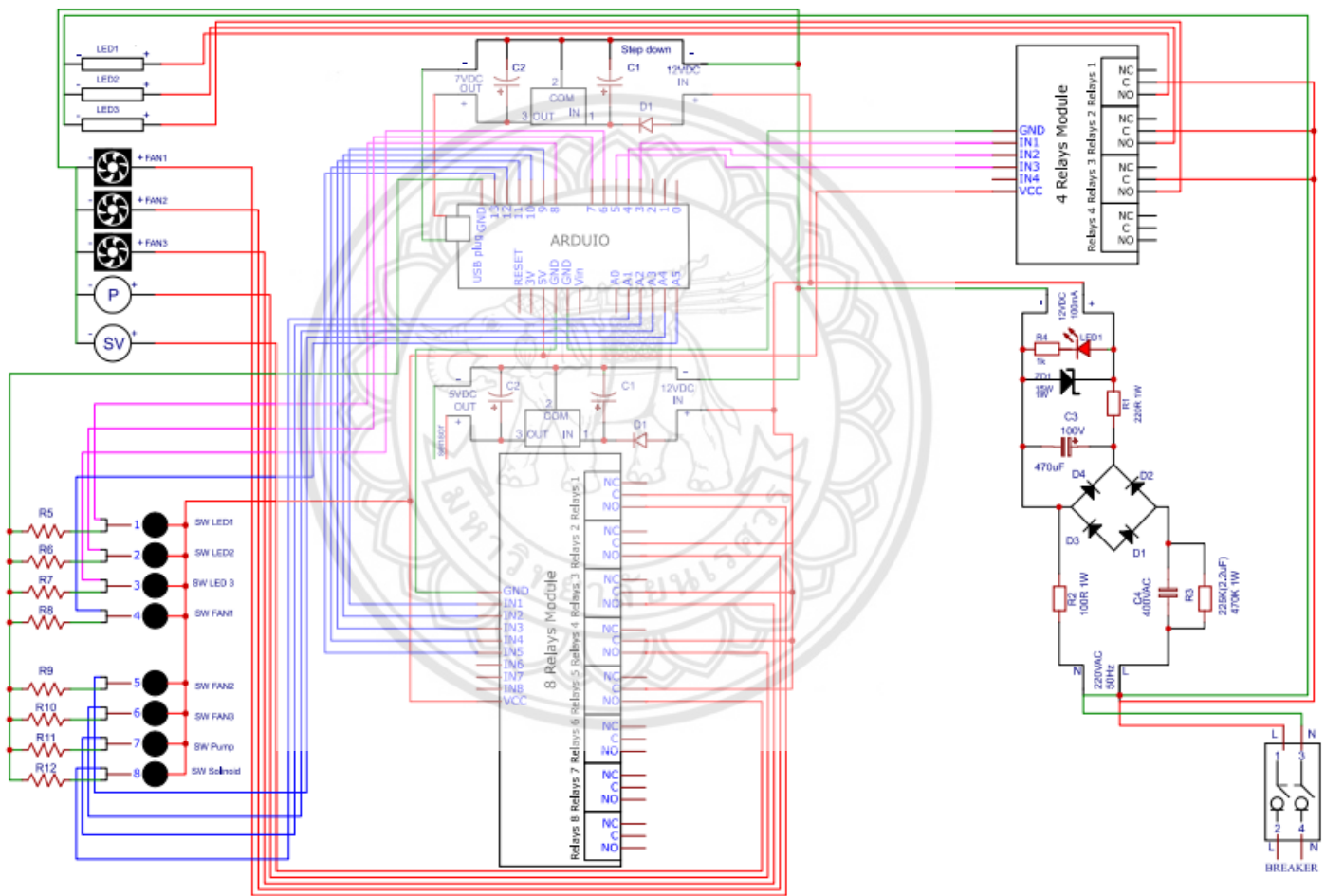
ในระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในชั้นปลูกจะใช้อุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Uno R3 โดยมีหน้าที่รับค่ามาจากการกดปุ่ม สวิตช์เพื่อควบคุมการสั่งงานรีเลย์
2. สวิตช์ปุ่มกด เพื่อสั่งงานเปิดปิดอุปกรณ์ภายในชั้นปลูก
3. สวิตช์ชิงเพาเวอร์สวิตช์พหลาย เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบควบคุม
4. Module (Step Down) สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันสูงให้มีค่า ต่ำลง
5. โมดูลสวิตช์รีเลย์ 4 ช่องสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดของหลอดไฟ Led ในแต่ละชั้น
6. โมดูลสวิตช์รีเลย์ 8 ช่อง สำหรับควบคุมการเปิด-ปิด ของเครื่องสูบน้ำ DC สารละลายธาตุอาหาร, โซลินอยด์วาล์ว และพัดลมดูดอากาศในแต่ละชั้น

3.1.2 การออกแบบวงจรในระบบ

การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในชั้นปลูก จะมีการออกแบบ การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ เดินสายไฟและสายสัญญาณภายในตู้ควบคุมดังรูปที่ 3.1 โดยจะมีสวิตช์ชิง เพาเวอร์สวิตช์พหลายเป็นตัวแปลงไฟกระแสสลับ 220 V เป็นไฟกระแสตรง 12 V เพื่อจ่ายไฟให้แก่ Module

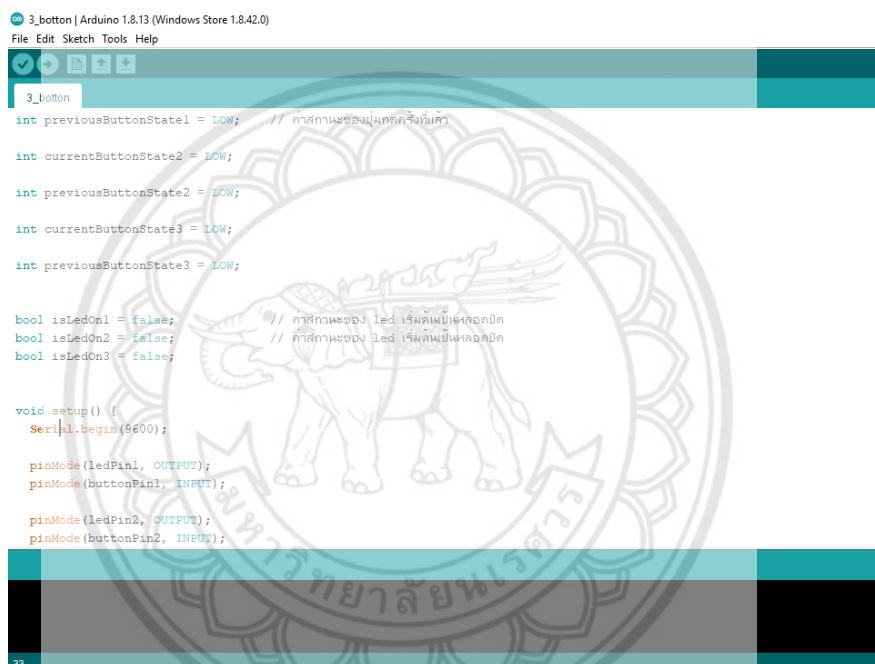
(Step Down) ทั้ง 2 ตัว ตัวแรกจะแปลงแรงดันไฟฟ้า 12 V ให้เหลือ 7 V เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Uno R3 อีกตัวจะแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เหลือ 5 V เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในชั้นปลุกพีซ ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Uno R3 จะทำหน้าที่รับค่ามาจากสวิตช์ปุ่มกดของแต่ละอุปกรณ์ และสั่งการให้รีเลย์ควบคุมการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ต่างๆ ตามที่ได้รับค่ามา



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมระบบควบคุมการเปิด-ปิด ของอุปกรณ์

3.1.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

โปรแกรมควบคุมถูกทำผ่านบอร์ด Arduino เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบการปลูกพืชระบบปิด ซึ่งประกอบด้วย ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ระบบปรับสภาวะอากาศ และระบบแสงเทียม โดยเป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งเปิด-ปิดการทำงานของอุปกรณ์ในระบบการปลูกพืชระบบปิด ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ระบบปรับสภาวะอากาศ และระบบแสงเทียม



```

3_bottom | Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.42.0)
File Edit Sketch Tools Help

3_bottom
int previousButtonState1 = LOW; // ค่าสถานะของปุ่มกดครั้งแรก
int currentButtonState2 = LOW;
int previousButtonState2 = LOW;
int currentButtonState3 = LOW;
int previousButtonState3 = LOW;

bool isLedOn1 = false; // ค่าสถานะของ led เริ่มต้นเป็นหลอดปิด
bool isLedOn2 = false; // ค่าสถานะของ led เริ่มต้นเป็นหลอดปิด
bool isLedOn3 = false;

void setup () {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(ledPin1, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin1, INPUT);

  pinMode(ledPin2, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin2, INPUT);
}

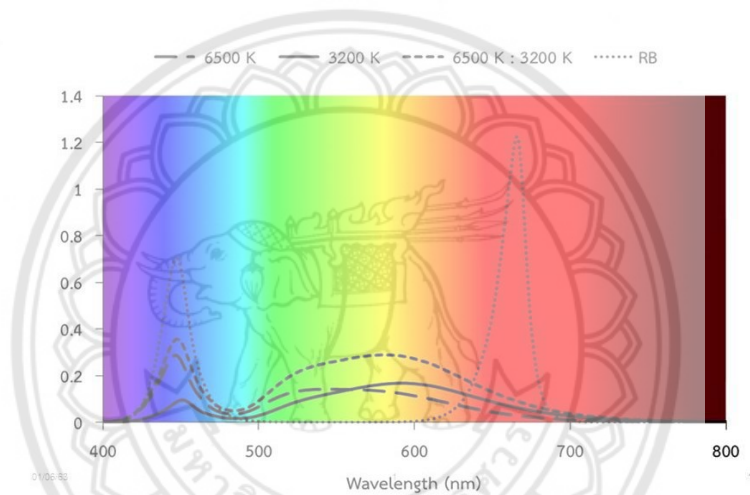
```

รูปที่ 3.2 ตัวอย่าง Code ในการควบคุมอุปกรณ์ในระบบการปลูกพืชระบบปิด

3.2 การออกแบบระบบแสงเทียม

การออกแบบจะพิจารณาถึงการให้แสงในช่วงกว้างความสามารถในการปรับเปลี่ยนชุดหลอด LED ที่สามารถติดตั้งรวมไปถึงการถอดซ่อมบำรุงได้อย่างง่าย และออกแบบให้สามารถปรับความเข้มแสงแยกในแต่ละชั้นปลูกได้ เพื่อรองรับการปลูกพืชแต่ละชนิดที่ต้องการความเข้มแสงต่างกัน โดยลักษณะหลอดไฟ LED มีหลายแบบ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก แบบเส้น แบบยาว เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบระบบแสงเทียมผู้ดำเนินงานจะใช้หลอดไฟแบบยาวที่มีความยาว 120 cm ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยในเรื่องแสงจากหลอด LED ที่เกี่ยวข้อง พบว่าแสงสีขาวมีส่วนผสมของแสงทุกช่วง

ความยาวคลื่นที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นสีแดงและสีน้ำเงิน (400-700 nm) ช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียว (500-600 nm) เมื่อให้แสงสีขาวแก่พืชส่งผลให้พืชมีลักษณะใกล้เคียงกับการปลูกพืชในแสงธรรมชาติและมีความแข็งแรงกว่าการใช้แค่แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงเลือกใช้หลอด LED แสงสีขาว Daylight (6500K) ที่มีความยาวคลื่นเน้นไปทางแสงสีน้ำเงิน และ Warm white (3200K) ที่มีความยาวคลื่นเน้นไปทางแสงสีแดง ในอัตราส่วน 1:1 เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่เน้นแสงสีน้ำเงินและสีแดงโดยที่มีความยาวคลื่นของแสงสีเขียวผสมอยู่ด้วย ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งหลอดไฟ LED ทำการติดบริเวณใต้รางปลูกของแต่ละชั้นโดยจะติดไฟ LED แสงสีขาว Daylight และแสง Warm white สลับกัน จำนวน 12 ชุดต่อชั้น ดังรูปที่ 3.4



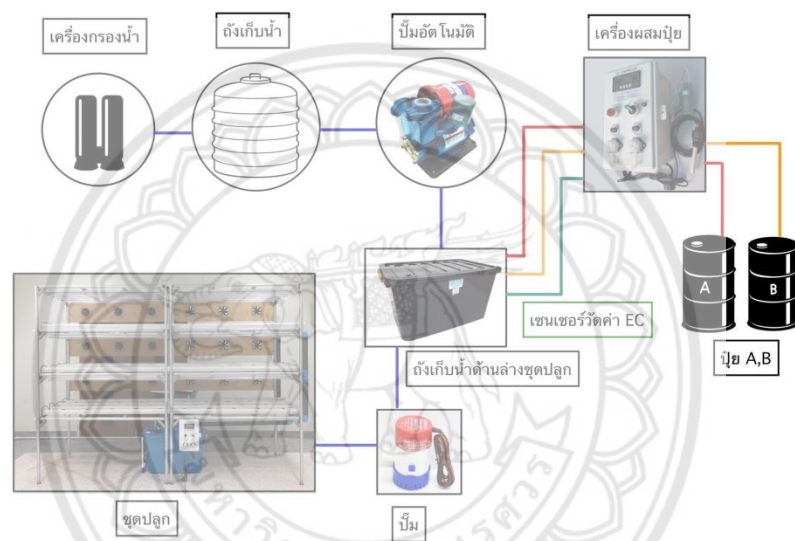
รูปที่ 3.3 ความยาวคลื่นของแสงจากหลอด LED



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการติดหลอดไฟ LED

3.3 การออกแบบระบบให้น้ำและธาตุอาหาร

เป็นระบบที่ส่งน้ำพร้อมธาตุอาหารไปยังชุดปลูกโดยผ่านเครื่องสูบน้ำและชุดผสมธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ ผู้ดำเนินงานจะใช้ระบบปลูกแบบ NFT เนื่องจากระบบในการปลูกที่เป็นแบบระบบปิดมีการปรับอุณหภูมิภายในห้องปลูกทำให้ตัดข้อเสียของระบบ NFT ที่ว่าสารละลายจะมีการสะสมความร้อนสูงเนื่องจากน้ำไหลเป็นฟิล์มบางออกไปได้ และเป็นระบบที่ใช้น้ำและธาตุอาหารในปริมาณที่น้อยทำให้ประหยัดทรัพยากรน้ำและธาตุอาหาร โดยองค์ประกอบระบบน้ำและธาตุอาหารในชุดปลูกระบบปิดขนาดเล็กแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.5 องค์ประกอบระบบน้ำและธาตุอาหาร

โดยลักษณะการส่งน้ำพร้อมธาตุอาหารจะเป็นแบบระบบน้ำวนดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจะส่งน้ำพร้อมธาตุอาหารไปยังรางปลูกแต่ละชั้นดังรูปที่ (A) และให้ไหลกลับลงมายังถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูกดังรูปที่ (B) ภายในถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูก มีการติดตั้งระบบควบคุมระดับน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำภายในถังในระบบจะประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมระดับน้ำ สวิตช์ลูกลอยไฟฟ้าและโซลีนอยด์วาล์ว โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในลักษณะดังรูปที่ 3.7 เมื่อระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าสวิตช์ลูกลอยตัวล่าง โซลีนอยด์วาล์วจะถูกสั่งให้ทำงาน (โซลีนอยด์วาล์วเปิด) ด้วยรีเลย์บนบอร์ดส่งผลให้เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติทำงานส่งน้ำมายังถังเก็บน้ำด้านล่างชุดปลูก จนกระทั่งระดับน้ำอยู่สูงกว่าสวิตช์ลูกลอยตัวบนโซลีนอยด์วาล์วจะถูกตัดการทำงาน (โซลีนอยด์วาล์วปิด) ทำให้เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติหยุดทำงาน โดยน้ำที่ถูกเติมมายังถังเก็บน้ำด้านล่างชุดปลูก ทำให้สารละลายธาตุอาหาร

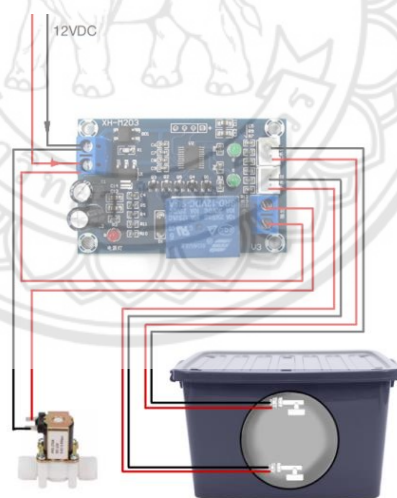
ภายในถังเจือจางลงเมื่อหัวโพรวัดค่า EC ที่ต่ำลงได้ จะสั่งการเครื่องผสมปุ๋ยอัตโนมัติให้ดูดธาตุอาหารมาผสมภายในถังให้ได้ค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารตามที่ต้องการ



(A) รูปแสดงด้านจ่ายน้ำ

(B) แสดงด้านรับน้ำออกจากท้ายราง

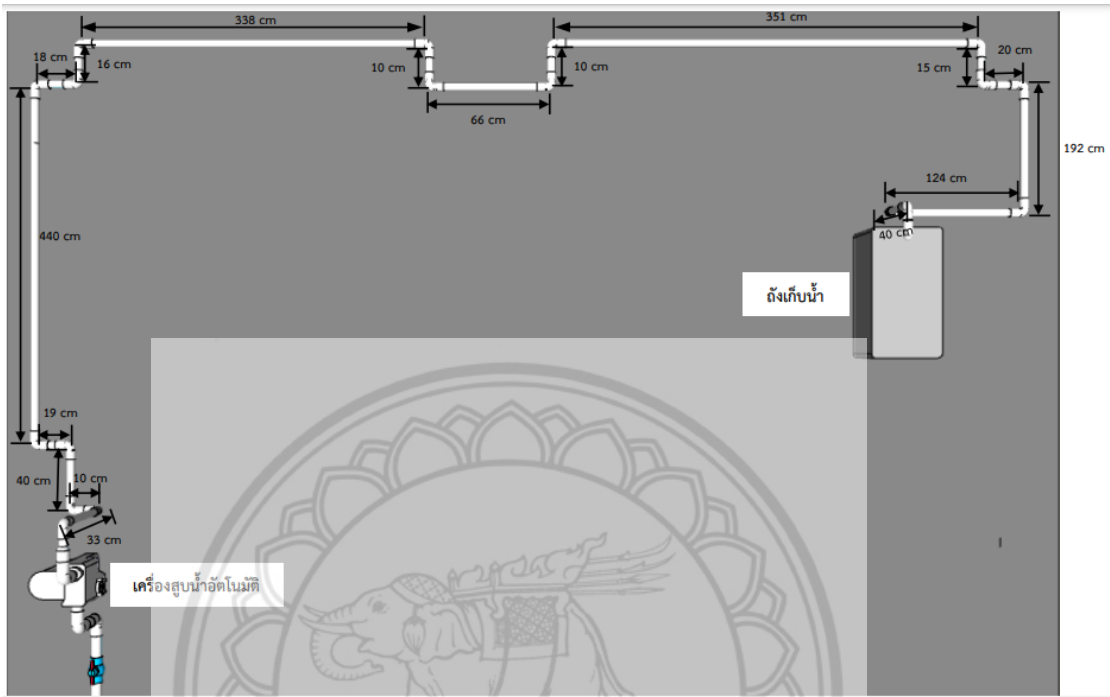
รูปที่ 3.6 (A) รูปแสดงด้านจ่ายน้ำ (B) แสดงด้านรับน้ำออกจากท้ายราง



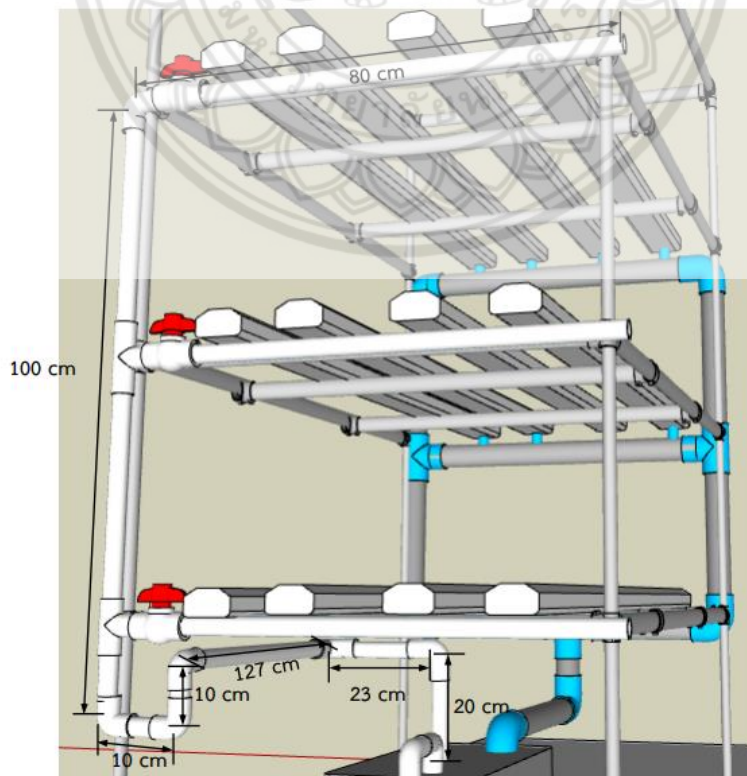
รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมโมดูลควบคุมระดับน้ำ

ในการเลือกใช้เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติที่ทำหน้าส่งน้ำจากถังเก็บน้ำ 200 L มายังถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูก และเครื่องสูบน้ำ DC ที่ทำหน้าที่ส่งน้ำจากถังเก็บน้ำด้านล่างขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้น โดยมีไดอะแกรมระบบท่อดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะต้องพิจารณาถึงเฮดรวมของระบบที่เกิดขึ้น โดยเฮดรวมที่คำนวณได้ในระบบส่งน้ำมายังถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูกและระบบส่ง

น้ำขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้นจะได้เท่ากับ 16.25 m และ 2.2 m ตามลำดับ โดยแสดงรายละเอียดการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข1.

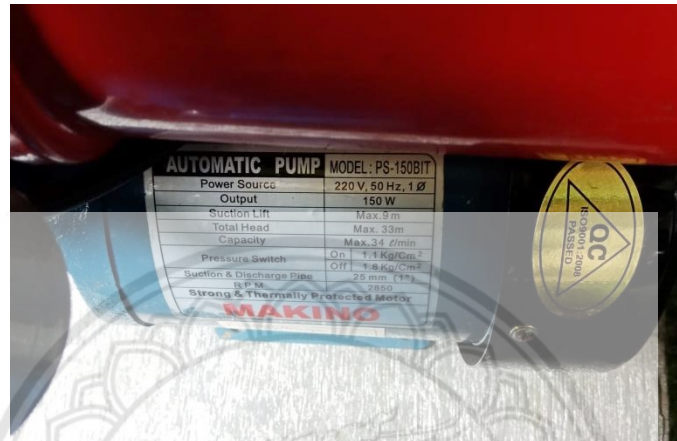


รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมระบบส่งน้ำมายังถังเก็บน้ำได้ราง



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมระบบส่งน้ำขึ้นไปยังชั้นปลูกในแต่ละชั้น

ดังนั้นผู้ดำเนินงานจึงเลือกใช้เครื่องสูบน้ำ Makino Model; PS-150BIT มี Name Plate ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเฮดรวมสูงสุดที่เครื่องสูบน้ำสามารถทำได้คือ 33 m ซึ่งมากกว่าเฮดรวมในระบบที่คำนวณได้เพียง 16.25 m



รูปที่ 3.10 Name Plate ของเครื่องสูบน้ำ Makino Model; PS-150BIT

และเลือกใช้เครื่องสูบน้ำกระแสดรงขนาด 12 Volt แบบจุ่ม ดังรูปที่ 3.11 ที่สามารถสูบน้ำได้สูงสุดถึง 4 m ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งาน เนื่องจากเฮดรวมที่เกิดขึ้นในระบบส่งน้ำขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้นที่ได้จากการคำนวณเกิดขึ้นเพียง 2.2 m รวมถึงสามารถรองรับอัตราการไหลของน้ำในรางปลูกทั้งระบบ



รูปที่ 3.11 เครื่องสูบน้ำ DC 12 V

ในส่วนของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติมีหลักการทำงานดังนี้

เครื่องผสมปุ๋ย AB จะมีทำงานแบบอัตโนมัติ และสามารถควบคุมค่า EC สูงสุดได้ถึง 20mS (20,000 μ S) โดยการควบคุมการเติมธาตุอาหาร A และธาตุอาหาร B จะมีปั๊มโดสซึ่งเป็นตัวดูดธาตุอาหาร AB มายังถังผสมสารละลายธาตุอาหารจนภายในถังมีค่า EC ตามที่กำหนดไว้ ปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหารจะหยุดทำงาน และเมื่อค่า EC ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะเกิดการการทำงานของปั๊มโดสซึ่ง โดยปั๊มโดสซึ่งจะมีการติดตั้งที่บริเวณเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหารซึ่งจะแบ่งออกเป็น ปั๊มโดสซึ่งธาตุอาหาร A และธาตุอาหาร B ดังรูปที่ 3.12 สามารถเติมธาตุอาหารได้พร้อมกันทั้ง 2 ชนิด โดยวิธีการใช้งานเครื่องจะกล่าวไว้ในภาคผนวก ข.



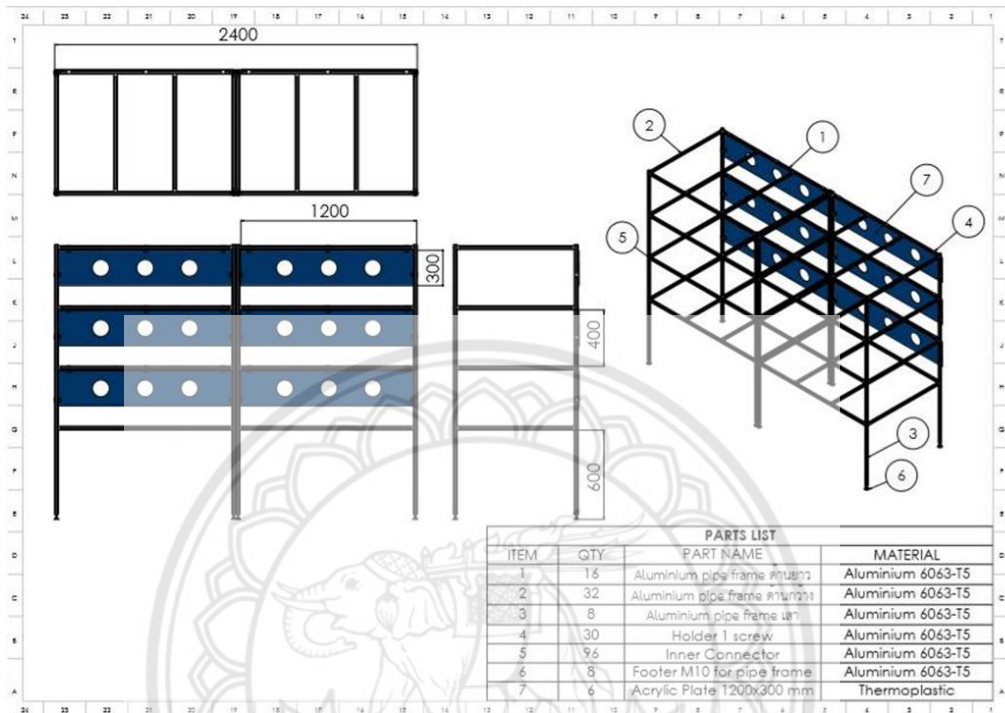
รูปที่ 3.12 ปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร A และ B

3.4 การออกแบบโครงสร้าง

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะออกแบบระบบการปลูกพืชระบบปิดขนาดเล็ก (Micro-PFAL) โดยกำหนดขนาดของชุดปลูกมีความกว้าง 0.8 m ความยาว 2.4 m และระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นปลูก 0.4 m ส่วนระยะจากพื้นถึงชั้นปลูกชั้นแรกจะมีระยะ 0.6 m เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับวางถังน้ำและธาตุอาหาร มีพื้นที่วางรางปลูกจำนวน 3 ชั้น ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยและสำหรับการปลูกพืชในอาคารรวมไปถึงในครัวเรือน และติดตั้งแผ่นอะคริลิกเพื่อเป็นโครงจับยึดให้แก่พัดลมดูดอากาศในแต่ละชั้นโดยจะมีความสูง 0.3 m เพื่อเว้นที่ให้อากาศมีการไหลเวียน

โดยพืชที่เหมาะสมสำหรับปลูกควรเป็นพืชที่มีความสูงประมาณ 30 cm หรือต่ำกว่านี้ เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างชั้นแนวตั้ง 40 cm ตัวอย่าง เช่น ผักสลัด ผักกาดหอม ผักชี ผักประเภทผักกินใบ และสมุนไพร เป็นต้น ถ้าพืชที่ปลูกมีขนาดความสูงเกินกว่าที่ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบชั้น

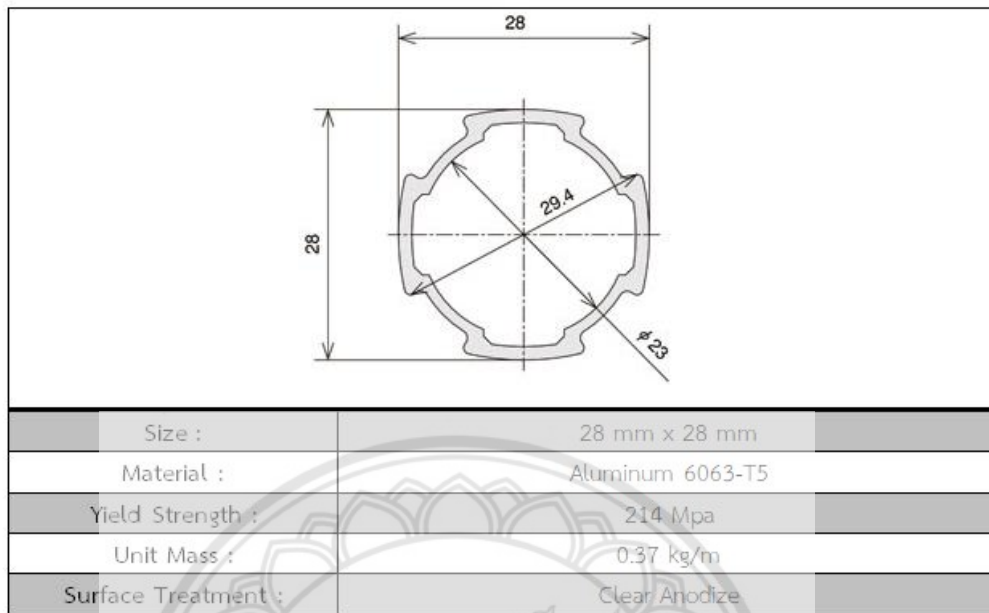
ปลูกได้เพื่อให้เหมาะสมกับความสูงของพืชชนิดนั้นๆ โดยโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ที่ออกแบบจะแสดงดังรูปที่ 3.13



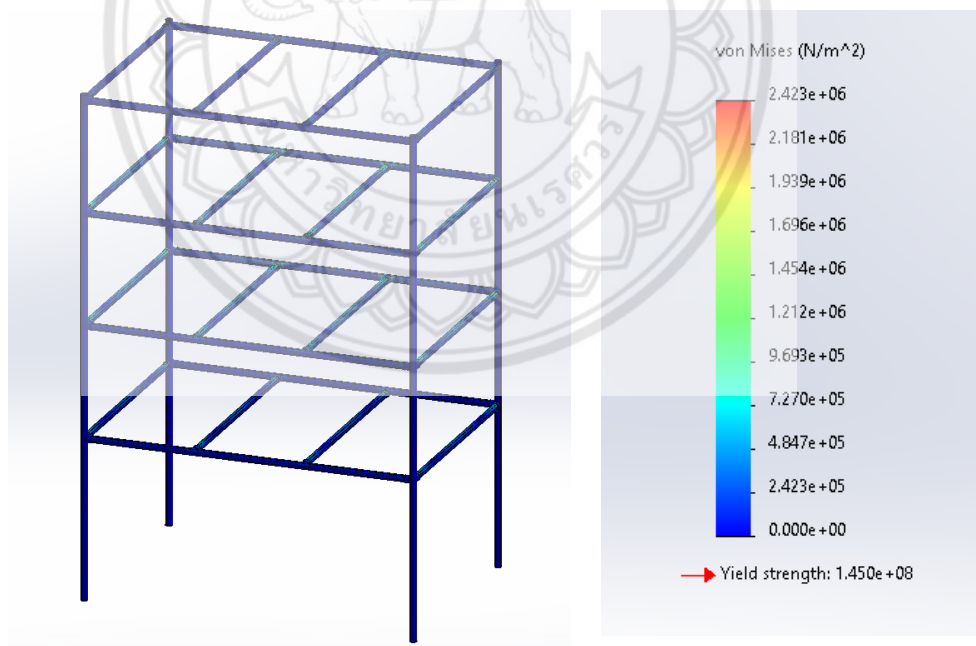
รูปที่ 3.13 Drawing โครงสร้าง

ในส่วนของโครงสร้างเลือกพิจารณาวัสดุที่มีการยึดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างที่สามารถทำให้เกิดปรับเปลี่ยนรูปแบบ และสามารถถอดประกอบได้อย่างสะดวก เช่น ระยะเวลาสูงของแต่ละชั้นปลูก เป็นต้น และวัสดุในการทำโครงสร้างที่สามารถตอบโจทย์กับความต้องการ คือ อลูมิเนียมโปรไฟล์ ซึ่งมีน้ำหนักเบา การยึดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างปรับเปลี่ยนได้ง่าย โดยอลูมิเนียมโปรไฟล์ที่เลือกใช้ คือ ชนิด pipe frame เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด 28 mm ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังแสดงในรูปที่ 3.14 เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าอลูมิเนียมโปรไฟล์ชนิดอื่นๆ ในท้องตลาด และมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานโดย วิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยใช้โปรแกรม Solid works โดยให้ภาระแรงที่คำนวณจากน้ำหนักของรางและน้ำภายในราง รวมไปถึงน้ำหนักของหลอดไฟ LED แผ่นอะคริลิก และพัดลมดูดอากาศ ซึ่งพบว่าค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ $2.423 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง (Yield strength) และการโก่งตัวมีค่าเท่ากับ $2.433 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

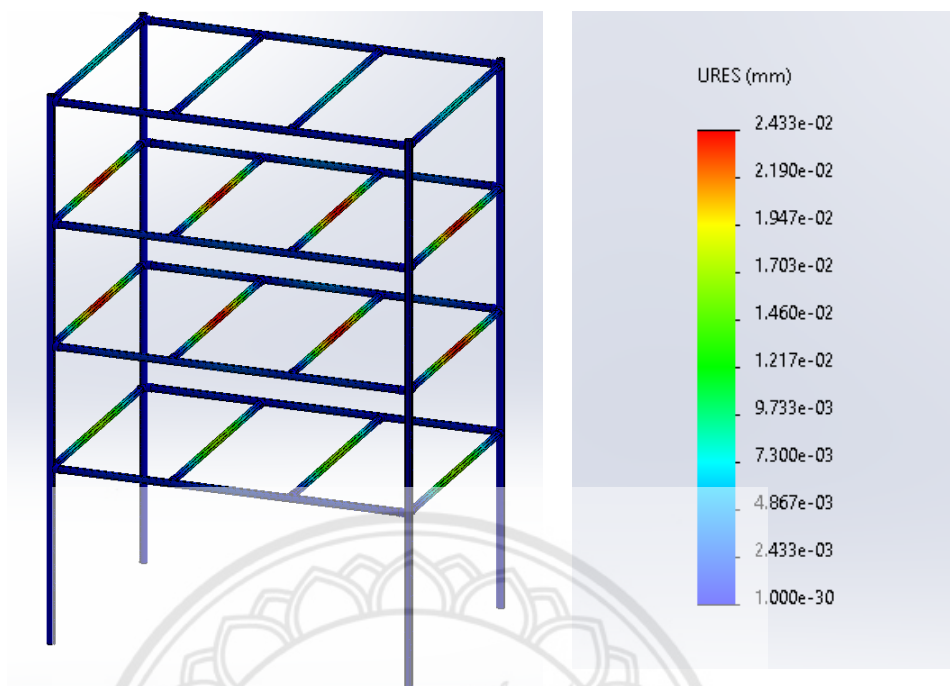
Specification



รูปที่ 3.14 ลักษณะและคุณสมบัติของอลูมิเนียมโปรไฟล์แบบ Pipe Frame



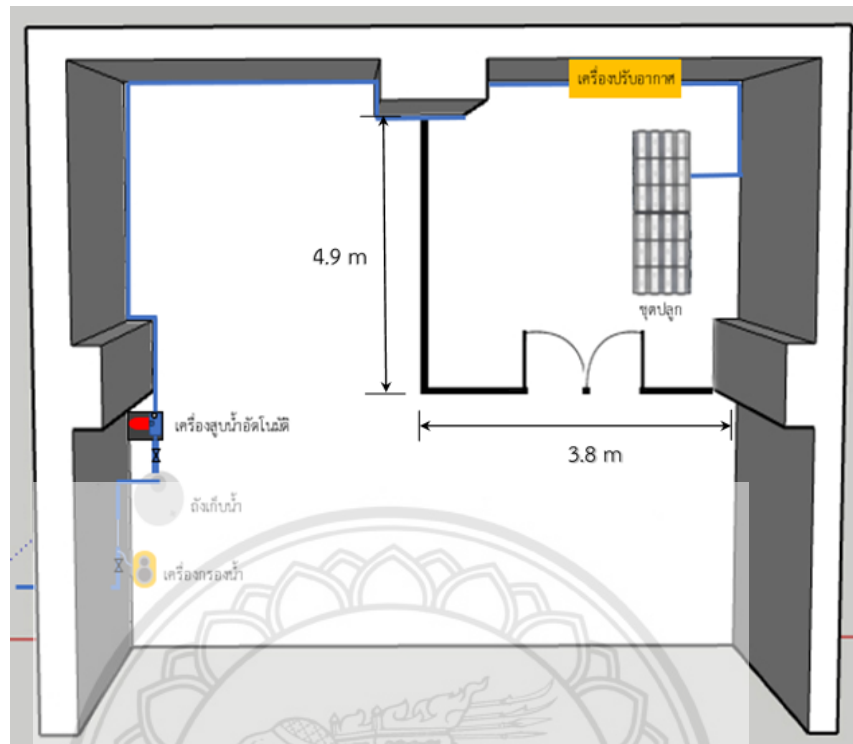
รูปที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์



รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความความโก่งตัวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

3.5 การออกแบบระบบปรับสภาวะอากาศ

โดยระบบปรับสภาวะอากาศและหมุนเวียนอากาศที่ทำการออกแบบ จะเป็นชุดส่งลมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศผ่านเครื่องปรับอากาศ 1 เครื่อง โดยติดตั้งเครื่องปรับอากาศในห้องปลูกที่มีพื้นที่ $4.9 \times 3.8 \text{ m}^2$ ดังรูปที่ 3.17 และติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาดเล็กบริเวณด้านหลังของชั้นปลูกในลักษณะดังรูปที่ 2.1 โดยเลือกใช้พัดลม DC 12 Volt ขนาด $12 \times 12 \text{ cm}$ ชั้นละ 6 ตัว ดังรูปที่ 3.18 พัดลม 1 ตัวสามารถดูดอากาศให้มีการไหลเวียนได้ 102.5 CFM หรือ $2.902 \text{ m}^3/\text{min}$ เพื่อช่วยในการไหลเวียนของอากาศในช่องของชั้นปลูกให้มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องเพาะปลูกมีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 3.17 ขนาดห้องชุดปลูกพืชระบบปิด



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ

การคำนวณภาระการทำความเย็น (Cooling load) ภายในห้องปลูกพืชระบบปิดเป็นการคำนวณโดยกำหนดภาระความเย็นจากชุดปลูก 2 ชุด ที่ซึ่งประกอบไปด้วยความร้อนที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิภายนอกห้องปลูกที่ไม่มีการปรับอากาศ ผ่านผนังห้อง กระจก และภาระความร้อนที่เกิดจากแสงสว่างจากหลอด LED และการทำงานของพัดลมดูดอากาศ ความร้อนจากการ

คายน้ำของพืช ความร้อนจากการระเหยจากผิวน้ำในรางปลูก ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนอากาศภายนอก ซึ่งสามารถสรุปผลการทำความเย็นดังตารางที่ 3.1 และแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข.

จากตาราง 3.1 พบว่าภาระการทำความเย็นรวมมีค่าเท่ากับ 14315.91 Btu/hr อย่างไรก็ตาม การเลือกขนาดของเครื่องปรับอากาศใช้การพิจารณาตามการทำความเย็นที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ และ รูปแบบการทำงานตามตาราง 2.2 โดยพิจารณาร่วมกับภาระการทำความเย็นจากการคำนวณดังตาราง 3.1 สำหรับการปลูกพืชระบบปิด มีภาระโหลดมากกว่าห้องปกติเนื่องจาก ความร้อนของหลอดไฟที่ส่องสว่างที่ซึ่งทำงาน 16 ชั่วโมง ความร้อนของการทำงานของพัดลมดูดอากาศที่ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ความร้อนจากอุณหภูมิอากาศภายนอกห้อง และการคายความชื้นจากพืชรวมถึง ความชื้นจากระบบน้ำและธาตุอาหาร รวมถึงรองรับลักษณะการใช้งานในการปลูกพืชที่หลากหลายซึ่งมีความต้องการสภาวะอากาศที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะทำให้ค่าความร้อนถ่ายเทผ่านผนังห้อง พื้น เพดาน มีค่ามากขึ้น

ดังนั้นขนาดของเครื่องปรับอากาศจึงถูกกำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ โดยกำหนดขนาดเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 24000 BTU/h เพื่อรองรับชุดปลูกในปัจจุบันและชุดปลูกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต และการใช้งานในการปลูกพืชที่หลากหลายซึ่งมีความต้องการสภาวะอากาศที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 3.1 ภาระการทำความเย็นภายในห้องปลูกพืชระบบปิด

ตำแหน่ง	Q, Cooling load (Btu/hr)
ความร้อนถ่ายเทผ่านผนังห้อง	1496.887
ความร้อนถ่ายเทผ่านเพดานห้อง	174.4295
ความร้อนถ่ายเทผ่านพื้นห้อง	1186.526
ความร้อนถ่ายเทผ่านกระจก	2994.338
ความร้อนถ่ายเทผ่านแสงสว่างจากหลอด LED	2948
ความร้อนจากพัดลมดูดอากาศ	560
ความร้อนจากการคายน้ำของพืช	2330.72
ความร้อนจากการระเหยจากผิวน้ำในรางปลูก	2599.28
ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนอากาศภายนอก	25.73
Q _{total} (Btu/hr)	14315.9105

3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของชั้นปลุกแนวตั้ง

- โครงสร้าง

Aluminium pipe frame, Diameter 28 mm,

วัสดุ : Aluminium 6063-T5

การชุบผิว : Clear Anodize

ความสูง: 180 cm

ความกว้าง: 80 cm

ความยาว: 240 cm

- ระบบควบคุม

Switching Power Supply Input: 100-240 VAC

Switching Power Supply Output: 12VDC/29A

Arduino Uno R3 Input Voltage: 7-12 V

- ระบบแสงเทียม : 220VAC/ 0.23A

หลอด LED : Daylight (6500K) จำนวน 18 หลอด และ Warm white (3200K)

จำนวน 18 หลอด

- ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร

โซลีนอยวาล์ว : 12 VDC/0.3A

เครื่องสูบน้ำแบบแช่น้ำ: 12 VDC/3A

เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ: 220 VAC/0.76A,150W

เครื่องผสมปุ๋ย AB แบบอัตโนมัติ : 110-220 VAC/0.05A

อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติ Xh-m203: 12 VDC

- ระบบหมุนเวียนอากาศ

พัดลม: 12 VDC/0.48A จำนวน 18 ตัว

- เซนเซอร์

เซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำในถังใต้ราง

เซนเซอร์ตรวจวัดค่า Electric conductivity, EC



บทที่ 4

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบการทำงานของระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ระบบปรับสภาวะอากาศ และระบบแสงเทียม อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้เป็นเพียงการทดสอบระบบและอุปกรณ์ของชุดปลูกพืชโดยยังไม่มีมีการปลูกพืช มีการใส่รูปพืชประกอบเพื่อบอกตำแหน่ง และระยะต่างๆ ในการทดสอบให้มีความชัดเจน โดยใช้ข้อมูลความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม และค่าสภาวะต่างๆ อ้างอิงจากผักสลัดชนิดกรีนโอ๊ค

4.1 การทดสอบระบบให้น้ำและธาตุอาหาร

4.1.1 การทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB ที่ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB และค่าของ EC สูงสุด (ค่า Lo_off) ต่างกันเพื่อสังเกตการทำงานของเครื่องผสมธาตุอาหาร AB ที่สภาวะการตั้งค่าต่างกัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการเริ่มต้นการทำงานชุดปลูกพืช
2. กดเปิดสวิตช์ Power ที่เครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB
3. หมุนสวิตช์ไปที่โหมด Auto
4. หมุนสวิตช์ปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่ง ให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด
5. บันทึกค่า EC เริ่มต้นของน้ำในถังที่ยังไม่มีธาตุอาหาร AB ผสมอยู่
6. ตั้งค่าเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB ให้มีค่า EC ไม่ต่ำกว่า 1.4 mS/cm (ค่า Lo_on) ซึ่งอ้างอิงจากค่า EC ที่พืชควรได้รับ และตั้งค่า Lo_off ซึ่งเป็นค่าที่ผู้ใช้กำหนดให้เป็นค่าสูงสุดของค่า EC ซึ่งตั้งค่าให้เท่ากับ 2 mS/cm
7. สังเกตการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ โดยบันทึกค่า EC ที่อ่านได้จากหน้าจอของเครื่องทุกๆ 5 วินาที ปั๊มโดสซึ่งจะดูธาตุอาหาร AB จนสารละลายธาตุอาหารในถังมีค่าเท่ากับค่า Lo_off เครื่องผสมสารละลายธาตุอาหารจะหยุดการทำงาน

8. ทำการทดสอบซ้ำ โดยตั้งค่า ค่า Lo_off เป็น 2.5 mS/cm สังเกตการทำงาน และบันทึกผลดังข้อที่ 7
9. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 4-8 โดยปรับค่าความเร็วของปั๊มโดสซึ่งให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง, ตำแหน่งสูงสุด ตามลำดับ
10. บันทึกผลการทดสอบลงในตารางที่ 1ก.

4.1.2 การทดสอบการหาค่าอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร

การทดสอบนี้เป็นการหาค่าอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร ก่อนและหลังจากมีการส่งขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้น เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารซึ่งมีผลปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายธาตุอาหาร โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เริ่มต้นการทำงานของชุดปลูกพืช
2. ปรับอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ให้มีอุณหภูมิห้องเท่ากับ 24 °c
3. นำหัวโพรบวัดอุณหภูมิ มาติดตั้งภายในถังเก็บสารละลายธาตุอาหาร ทำการอ่านค่าอุณหภูมิน้ำภายในถังเริ่มต้น และบริเวณที่รวบรวมสารละลายธาตุอาหารกลับมายังถังเก็บสารละลายธาตุอาหาร ดังรูปที่ 4.1
4. และอ่านค่าซ้ำในทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
5. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-4 โดยปรับอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ให้มีอุณหภูมิห้องเท่ากับ 25 °c และ 26 °c ตามลำดับ
6. เมื่อได้ข้อมูลจากการวัดครบบันทึกข้อมูลที่ได้ลงในตารางที่ 2ก.



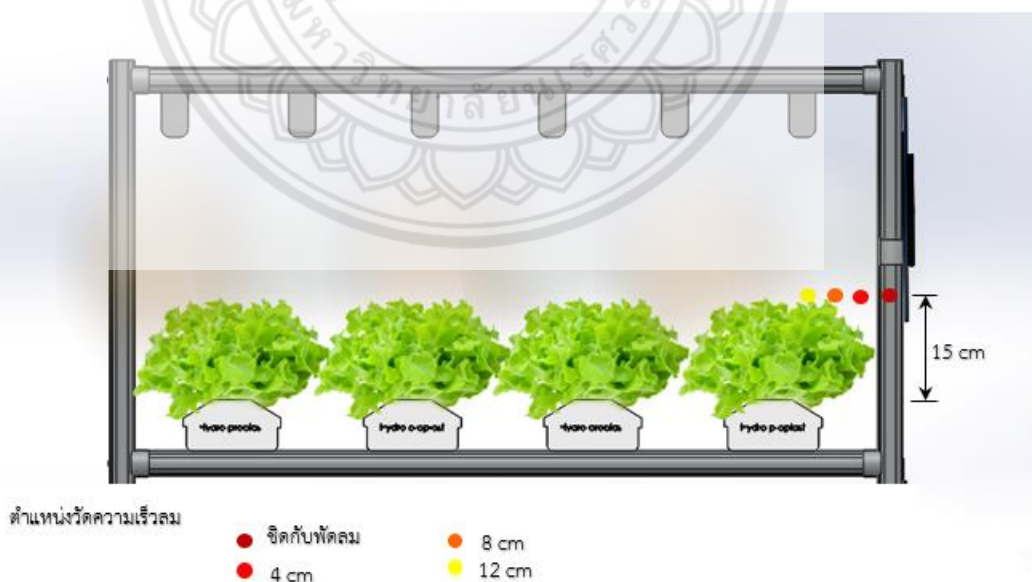
รูปที่ 4.1 การวัดอุณหภูมิบริเวณที่รวบรวมสารละลายธาตุอาหาร

4.2 การทดสอบระบบปรับสภาวะอากาศ

4.2.1 การทดสอบความเร็วของอากาศภายในชั้นปลูกพืช

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าความเร็วของอากาศที่ไหลเวียนภายในชั้นปลูกพืชแต่ละชั้น เพื่อตรวจสอบว่าพัดลมดูดอากาศที่เลือกใช้มีความเหมาะสมกับระบบปลูกพืชแบบอัตโนมัติ และสามารถสร้างการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกพืชได้ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เริ่มต้นการทำงานของระบบปรับสภาวะอากาศของชุดปลูกพืช
2. ทำการวัดความเร็วลมภายในชั้นปลูกบริเวณเหนือพุ่มของพืช ดังรูปที่ 4.2 ที่ระยะ 12 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งของรางปลูก รวมทั้งหมด 9 ตัว โดยใช้เครื่อง Anemometer รุ่น DT-82 ดังรูปที่ 4.3
3. ทำการวัดความเร็วลมดังข้อที่ 2 โดยการปรับค่าระยะห่างจากพัดลมเป็นระยะ 0, 4, 8 ตามลำดับ บันทึกข้อมูลลงในตารางที่ 3ก. นำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยแล้วเลือกใช้ข้อมูลที่เป็นค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการวัดความเร็วของลม



รูปที่ 4.3 เครื่อง Anemometer รุ่น DT-82

4.2.2 การทดสอบหาค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของอากาศภายในชั้นปลุกพีช

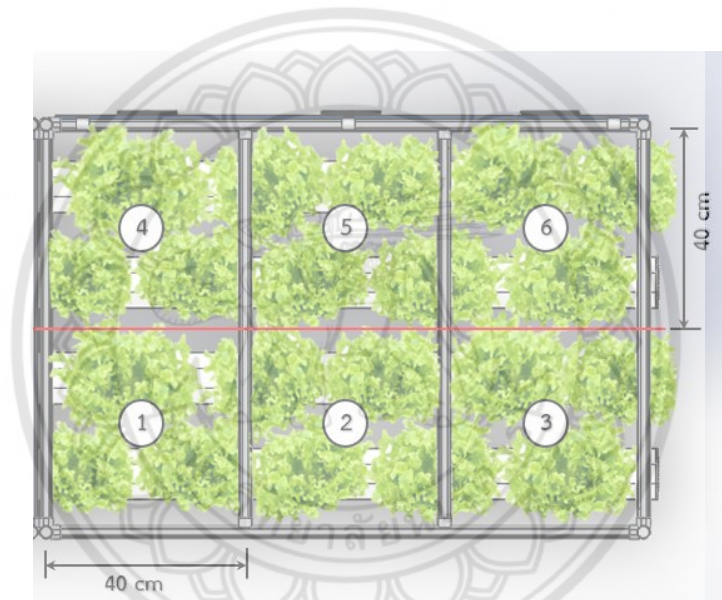
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าอุณหภูมิและความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในชั้นปลุกพีช โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิอากาศ (Humidity/Temperature Meter) ยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-775-232 ดังรูปที่ 4.4 ในการวัดค่าอุณหภูมิ และความชื้น เพื่อทดสอบค่าอุณหภูมิ และความชื้นภายในชุดปลุกพีชระบบปิด ว่ามีความเหมาะสมกับพีชทดสอบหรือไม่ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดสวิตช์จ่ายไฟเพื่อเริ่มการทำงานของชุดปลุกพีชอัตโนมัติ กดสวิตช์ผู้ควบคุมการทำงานทุกระบบของชุดปลุกพีชอัตโนมัติ
2. ทำการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิบริเวณช่องส่งลมของเครื่องปรับอากาศ ตำแหน่งหน้าชั้นปลุก และตำแหน่งในชั้นปลุกแต่ละชั้นดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 นำค่าที่ได้บันทึกข้อมูลลงในตารางที่ 4ก.
3. ทำการทดสอบวัดค่าความชื้นตามตำแหน่งที่วัดค่าอุณหภูมิในข้อที่ 2 นำค่าที่ได้บันทึกข้อมูลลงในตารางที่ 5ก.
4. ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ในข้อที่ 2 และ 3 ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นที่ได้ในแต่ละตำแหน่งมาวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิอากาศ ยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-775-232



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและค่าความชื้น



รูปที่ 4.6 ระยะเวลาการวัดอุณหภูมิและค่าความชื้น

4.3 การทดสอบระบบแสงเทียม

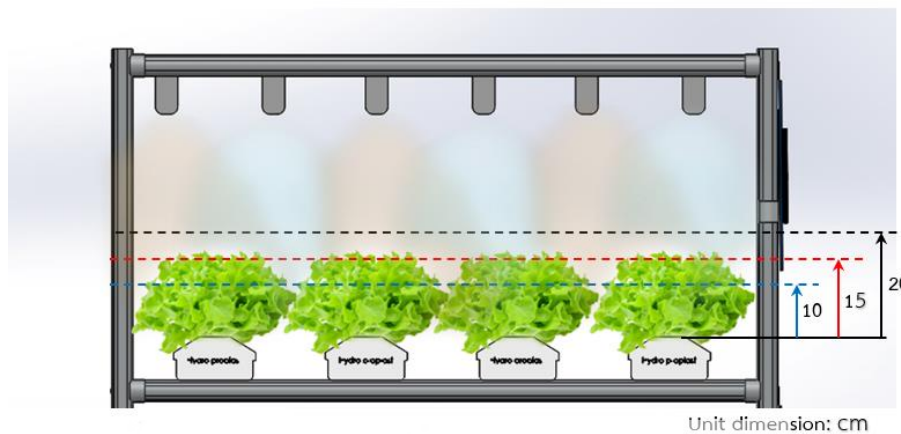
4.3.1 การทดสอบการทำงานของระบบแสงเทียม

การทดสอบนี้เป็นการหาค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของแสงภายในบริเวณต่างๆ ตามระยะของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อปริมาณความเข้มแสงในแต่ละชั้นปลูก และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน เพื่อทดสอบค่าความเข้มแสงภายในชุดปลูกพืชแบบปิดว่าเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดสวิตช์จ่ายไฟเพื่อเริ่มการทำงานของชุดปลูกพืชอัตโนมัติ กดสวิตช์หลอดไฟ LED ที่ตัวควบคุม เพื่อเปิดการทำงานของหลอดไฟ LED
2. ทดสอบความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของแสงภายในบริเวณต่างๆ และระยะของหลอดไฟ LED ที่มีผลต่อความเข้มแสง นำอุปกรณ์วัดความเข้มแสงไปวางไว้ตำแหน่งและระยะในแต่ละจุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ในทุกชั้นปลูก ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง บันทึกข้อมูลที่วัดได้ลงในตารางที่ 6ก.
3. ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน โดยจะทำการวัดอุณหภูมิบริเวณใต้หลอดไฟ LED ที่เวลาเมื่อเริ่มต้นการใช้งานชุดปลูกพืช โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ FLIR ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทุกๆ 2 ชั่วโมงหลังจากเริ่มต้นการใช้งาน นำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ ณ เวลาต่างๆ บันทึกลงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการความเข้มแสง



รูปที่ 4.8 ระดับความสูงของการวัดค่าความเข้มแสง

4.4 การทดสอบการใช้พลังงานของระบบปลูกพืชระบบปิด

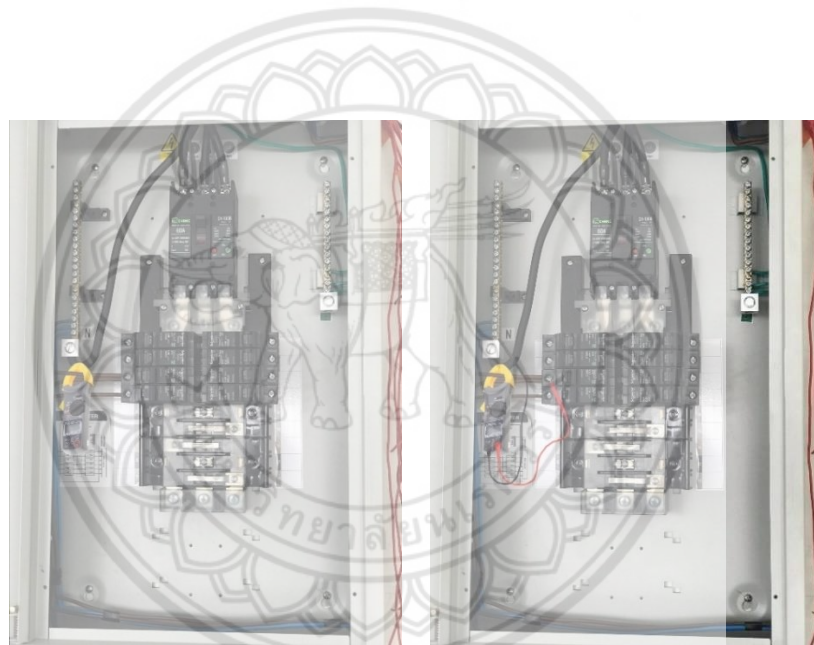
4.4.1 การหาค่าการใช้พลังงานของระบบปลูกพืชระบบปิด

การทดสอบนี้เป็นการหาปริมาณการใช้ไฟฟ้าในระบบ โดยเก็บข้อมูลการใช้พลังงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด โดยเป็นการเก็บค่ากระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบ และระยะเวลาในการทำงานของอุปกรณ์เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยการใช้พลังงาน ระยะเวลาการใช้งานเฉลี่ยของอุปกรณ์ภายในระบบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบปลูกพืช ซึ่งประกอบด้วย ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ระบบแสงเทียม และระบบปรับสภาวะอากาศ โดยใช้มัลติมิเตอร์แบบแคมป์มิเตอร์ยี่ห้อ KYORITSU รุ่น KEW SNAP 203 ดังรูปที่ 4.9
2. ทำการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ในแต่ละระบบ โดยวัดกระแสไฟฟ้าแบบตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณรอบสายไฟฟ้า และวัดขนานกันกับเครื่องมัลติมิเตอร์เพื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์ดังรูปที่ 4.10 พร้อมจับเวลาการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด
3. ให้ทำการทดสอบในข้อที่ 2 ซ้ำ 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย แล้วเลือกใช้ข้อมูลที่เป็นค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ข้อมูล
4. เมื่อได้ข้อมูลจากการวัดครบแล้ว นำข้อมูลที่ได้จัดบันทึกลงในตารางที่ 8ก.



รูปที่ 4.9 มัลติมิเตอร์แบบแอมป์มิเตอร์ร็หือ KYORITSU รุ่น KEW SNAP 203



(A)

(B)

รูปที่ 4.10 (A) การวัดกระแสไฟฟ้า (B) การวัดแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากการทดสอบการทำงานของชุดปลูกในระบบปิด อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้เป็นเพียงการทดสอบระบบและอุปกรณ์ของชุดปลูกพืชโดยยังไม่มีมีการปลูกพืช

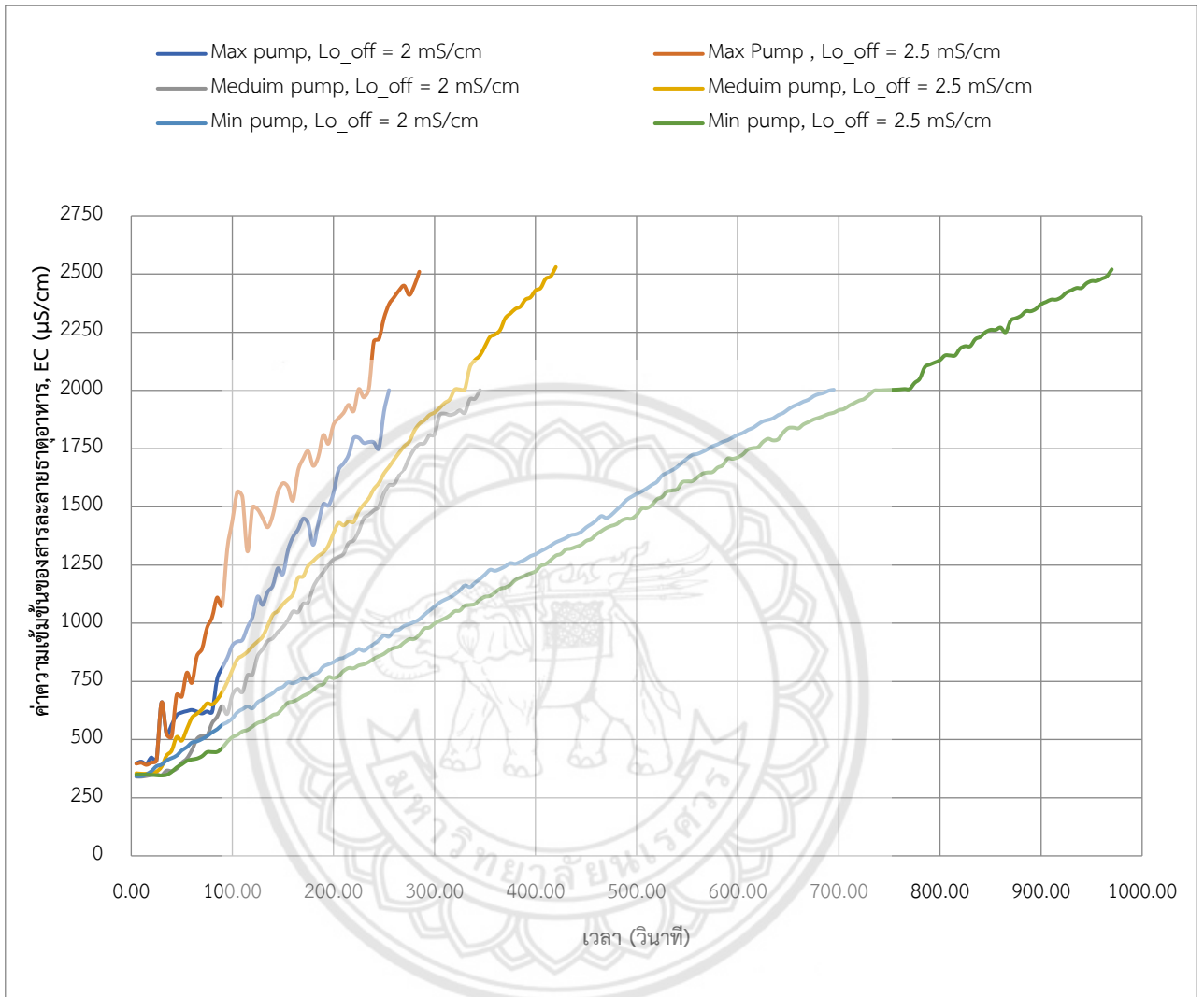
5.1 ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ โดยทำการตั้งค่าให้มีการทำงานทั้งหมด 6 สภาวะ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร และเวลา ได้ดังรูปที่ 5.1

5.1.1 ผลการทดสอบระบบให้น้ำและธาตุอาหาร

จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร และเวลา ได้ดังรูปที่ 5.1

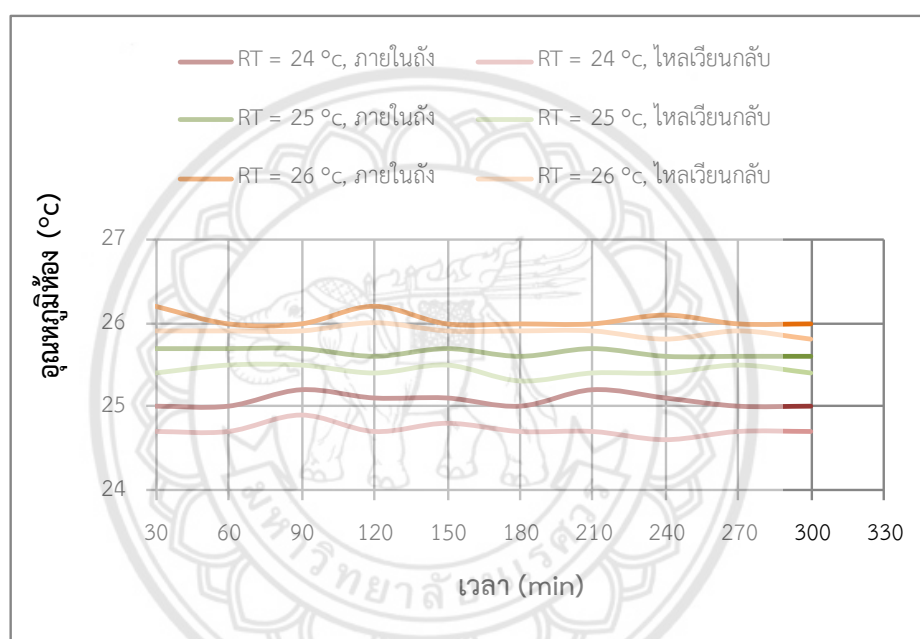
จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อตั้งค่าเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหารให้มีค่า EC ต่ำสุด (Lo_on) = 1.4 mS/cm และค่า EC สูงสุด (Lo_off) = 2 mS/cm ปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB อยู่ในตำแหน่งสูงสุด กึ่งกลาง และต่ำสุด จะใช้เวลาในการผสมสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 255, 345, 695 วินาที ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนให้ค่า EC สูงสุด (Lo_off) = 2.5 mS/cm ปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB อยู่ในตำแหน่งสูงสุด กึ่งกลาง และต่ำสุด จะใช้เวลาในการผสมสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 285, 420, 970 วินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าการตั้งค่า ให้ค่า EC สูงสุด (Lo_off) สูงขึ้นเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหารจะใช้เวลาในการผสมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) และเวลาที่ใช้ในการผสม

และจากรูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) และเวลา พบว่าในการปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB ให้อยู่ในตำแหน่งสูงที่สุด ส่งผลให้ค่า EC มีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่คงที่ แกว่งขึ้นลง และเมื่อปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งให้อยู่ในตำแหน่ง กึ่งกลาง และต่ำสุด จะส่งผลให้ค่า EC เพิ่มขึ้นอย่างคงที่มากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB ด้วยความเร็วที่มาก ส่งผลให้ปั๊มกวาดธาตุอาหารและน้ำภายในถังทำการผสมได้ไม่ทันกับธาตุอาหาร AB ที่ถูกดูดเข้ามาอย่างรวดเร็ว จึงทำให้หัวโพรบวัดค่า EC ภายในถังวัดค่าออกมาในลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับไปมา ซึ่งในการใช้งานจริงอาจจะทำให้เกิดการวัดค่า EC ในช่วงที่ปั๊มกวาดภายในถังยังผสมสารละลายธาตุอาหารไม่เข้ากันดี ส่งผลให้การผสมสารละลายธาตุ

อาหารเกิดความผิดพลาดและมีผลต่อพืชได้ จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด ค่า EC จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่มากที่สุด ส่งผลให้การผสมสารละลายธาตุอาหารมีความผิดพลาดของการผสมน้อยที่สุด แต่ในด้านของเวลาในการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร จะใช้เวลาในการผสมสารละลายธาตุอาหารที่สูงกว่าการปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งให้อยู่ในตำแหน่ง กึ่งกลาง และสูงสุด ซึ่งเวลาการผสมไม่มีผลต่อพืชเพราะสารละลายธาตุอาหารยังมีการไหลเวียนแก่พืชตลอดเวลาของการผสมสารละลายธาตุอาหาร ไม่ได้มีการตัดระบบหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหารเมื่อเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหารเริ่มการทำงาน



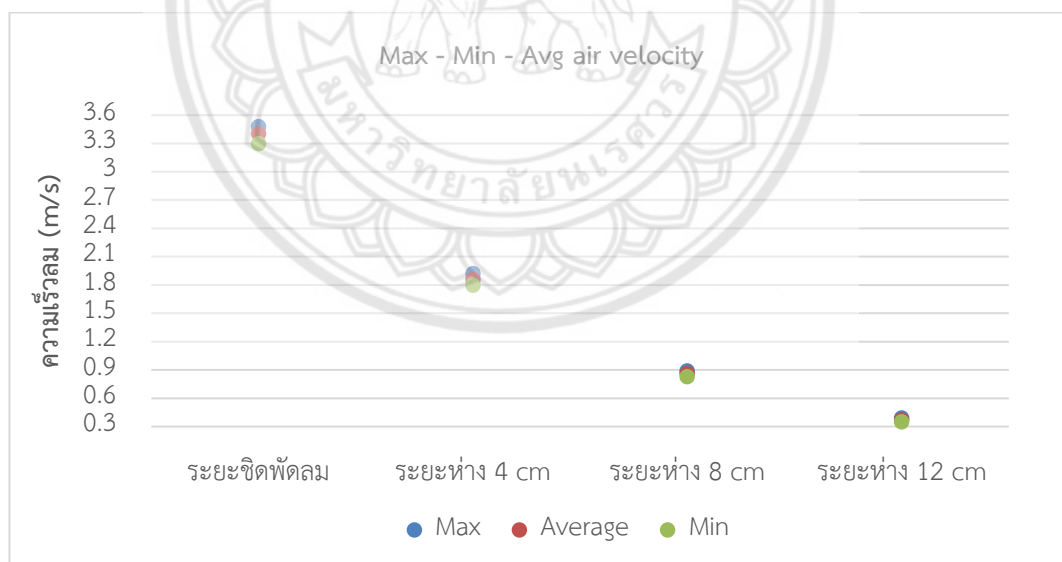
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารที่อุณหภูมิห้องและตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารพบว่า เวลาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร แต่เมื่อปรับอุณหภูมิภายในห้องปลูกพืชระบบปิด จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารมีการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารที่ไหลเวียนกลับมาจากชั้นปลูกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารภายในถัง โดยอาจจะเกิดจากการที่สารละลายธาตุอาหารมีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิตามอุณหภูมิห้อง ณ ขณะนั้นๆ ซึ่งแตกต่างจากการปลูกพืชในระบบไฮโดรโปนิกส์ที่ไม่มีการควบคุมสภาวะอากาศ (ปลูกในระบบเปิด) ที่อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการไหลเวียนขึ้นไปยังรางปลูก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในสารละลายธาตุอาหารมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายธาตุอาหารลดลง เนื่องจาก

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายธาตุอาหารแปรผกผันกับอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ถ้ารากพืชได้รับออกซิเจนน้อยจะทำให้การดูดธาตุอาหารลดลง [50]

5.1.2 ผลการทดสอบระบบปรับสภาวะอากาศ

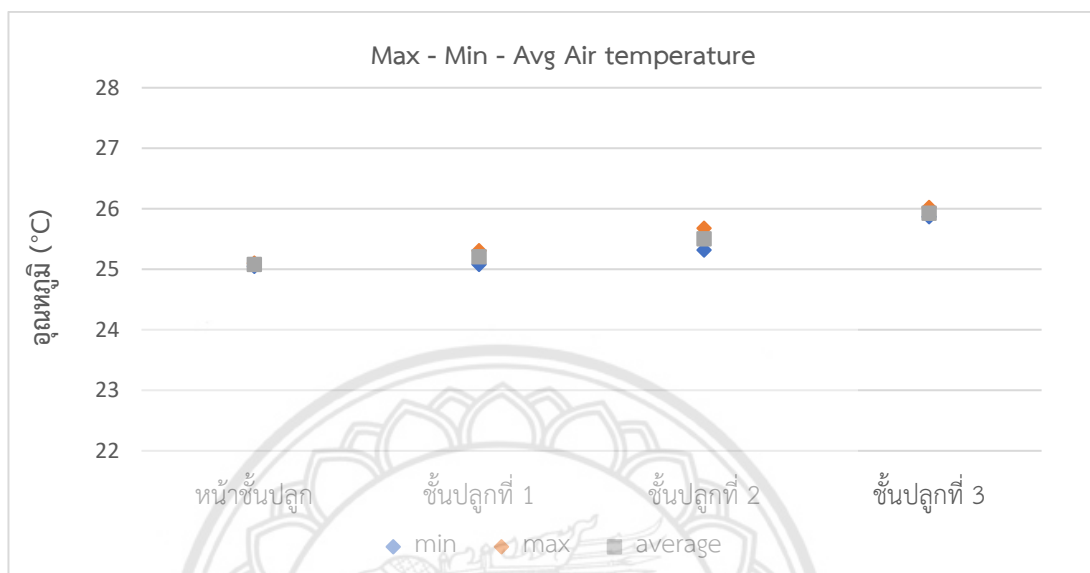
ผลการทดลองการศึกษาการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกพืช โดยทำการวัดที่ระยะชิดกับด้านดาดของพัดลมดูดอากาศ (0 cm) และระยะห่าง 4 cm 8 cm และ 12 cm พบว่าค่าความเร็วลม แต่ละระยะมีค่าต่างกัน ซึ่งค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ ระยะชิดพัดลมดูดอากาศ และระยะห่างจากพัดลมดูดอากาศ 4 cm, 8 cm และ 12 cm เท่ากับ 3.402, 1.860, 0.863 และ 0.372 m/s ตามลำดับ นำข้อมูลจากตารางที่ 3ก. มาเขียนกราฟแสดงค่าความเร็วลมสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของแต่ละระยะในการวัดได้ดังรูปที่ 5.3 โดยความเร็วลมที่ระยะ 12 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งของรางปลูกที่ 1 มีความเร็วลมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการปลูกพืช แต่ในตำแหน่งของรางปลูกที่ 2 3 และ 4 ไม่สามารถวัดค่าความเร็วลมได้ อาจจะต้องมีการปรับแก้โดยการเพิ่มขนาดของพัดลมดูดอากาศ หรือจะต้องมีการเดินท่อลมเข้าไปในบริเวณนั้นๆ เพื่อสร้างการไหลเวียนอากาศ



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกพืช

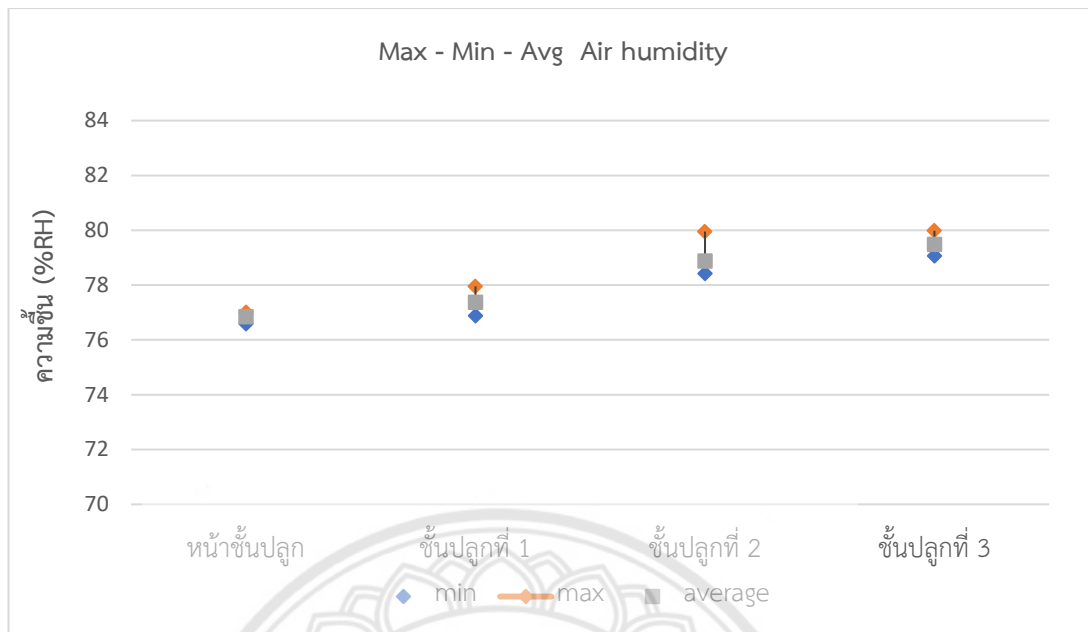
จากรูปที่ 5.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิภายในชุดปลูกพืชระบบปิด ในตารางที่ 4 ก. พบว่าในแต่ละชั้นปลูก ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ที่อยู่บริเวณนอกสุดของชั้นปลูก จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า ตำแหน่งที่ 4 5 6 ที่อยู่ด้านในถัดไป ตำแหน่งดังรูปที่ 4.3 และอุณหภูมิบริเวณด้านหน้าของชุดปลูกจะต่ำกว่าอุณหภูมิภายในชั้นปลูกโดยอาจจะเกิดจากความร้อนจากหลอดไฟ LED ภายในชั้นปลูก จากผล

การทดสอบนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.4 และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในชั้นปลุกจะเท่ากับ 25.55 °c ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช [51]



รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิภายในชุดปลุกพืช

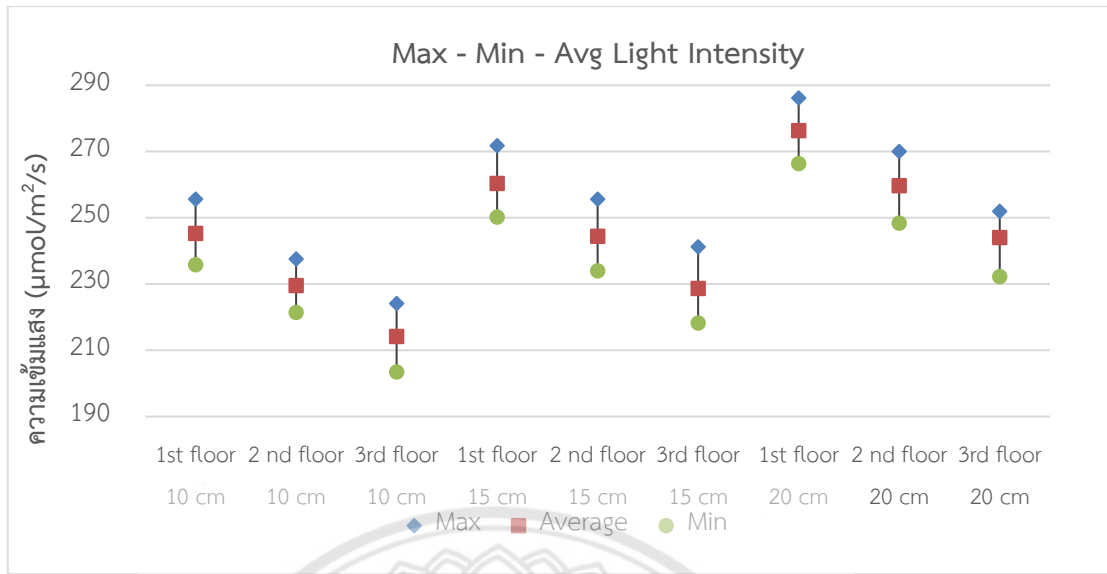
จากผลการทดสอบวัดความชื้นในชุดปลุกพืช ในตารางที่ 5ก. ความชื้นเฉลี่ยบริเวณช่องส่งลมของเครื่องปรับอากาศ และในตำแหน่งหน้าชั้นปลุกเท่ากับ 92.61 % และ 76.85% ทำการวัดความชื้นในตำแหน่งต่างๆของชั้นปลุกดังรูปที่ 4.3 จากผลการทดสอบนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.5 พบว่าความชื้นภายในชั้นปลุกแต่ละชั้น จะมีความชื้นภายในอากาศสูงกว่าบริเวณด้านหน้าของชั้นปลุก เนื่องจากภายในชั้นปลุกพืชจะมีความชื้นจากสารละลายธาตุอาหารที่ไหลเวียนภายในรางปลุก จากผลการทดสอบ ความชื้นเฉลี่ยของอากาศบริเวณภายในชั้นปลุกจะอยู่ในช่วง 76.88-79.98 % ซึ่งเป็นค่าความชื้นของอากาศที่เหมาะสมในการเพาะปลุกพืชในระบบปิดที่ต้องควบคุมให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 60-80 % [51]



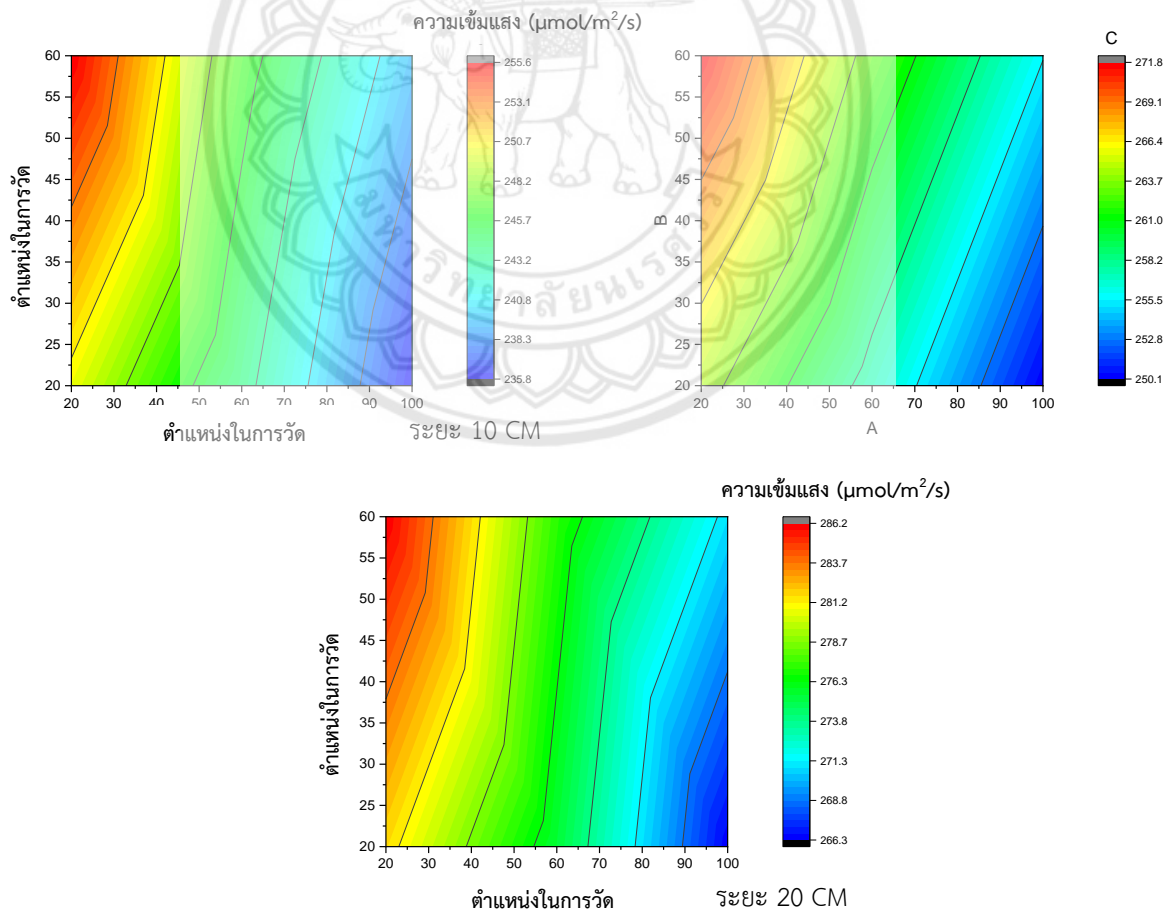
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบวัดความชื้นในชุดปลูกพืช

5.1.3 ผลการศึกษาการทำงานของระบบแสงเทียม

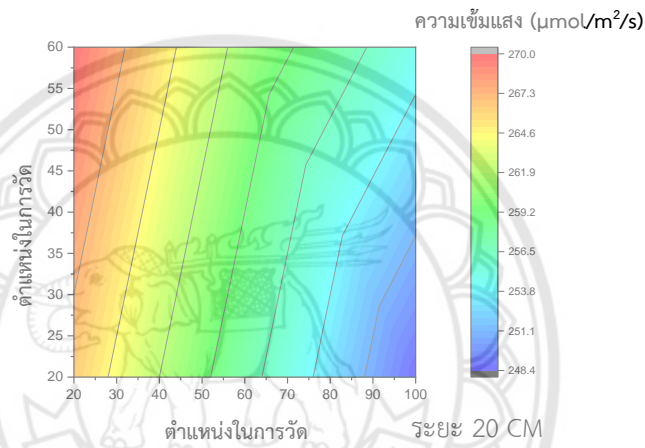
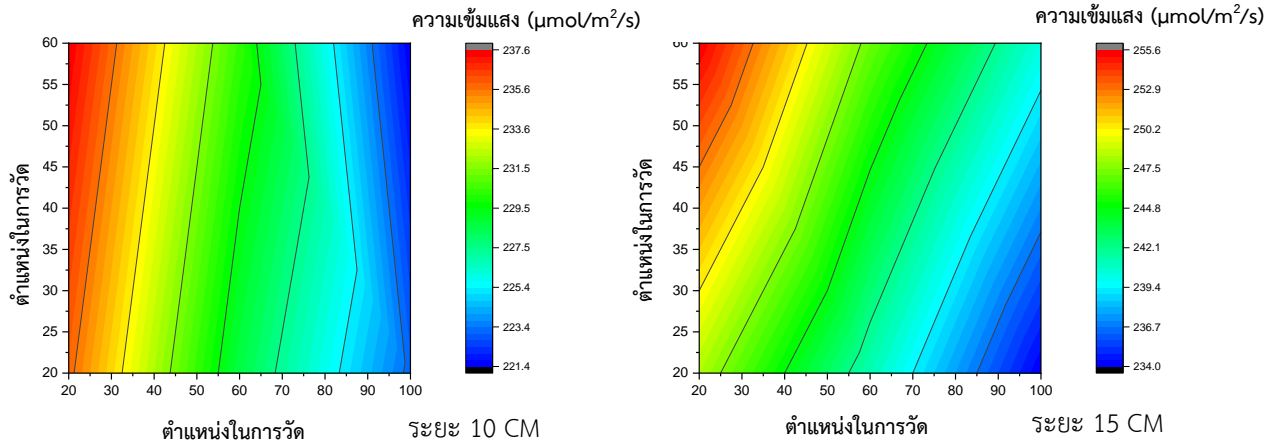
จากผลการทดสอบในตารางที่ 6ก. วัดความเข้มแสงที่ตำแหน่งและระยะต่างๆ ภายในชั้นปลูกพืช โดยใช้ Lux meter นำค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในหน่วย Lux มาหาค่าความหนาแน่นของปริมาณแสงช่วงเวลาที่พืชได้รับสำหรับการสังเคราะห์แสง (PPFD) โดยใช้ความสัมพันธ์ในงานวิจัยของกรวิทย์ กระจำพันธ์และคณะ [13] ที่พบว่าหลอดแอลอีดีแสงสว่างมีค่าเท่ากับ $0.018 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ต่อ Lux โดยค่าปริมาณความเข้มแสงที่พืชควรได้รับต่อวัน (DLI) มีการแนะนำว่าต้องอยู่ในช่วง 12-17 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ [5] ในการปลูกพืชระบบปิดจะมีการให้แสงแก่พืช 16 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นค่า PPFD ที่เพียงพอสำหรับพืชต้องอยู่ในช่วง 208.3 - 295 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ผลการคำนวณพบว่าความเข้มแสงทุกตำแหน่งในแต่ละชั้นปลูกเพียงพอกับปริมาณความเข้มแสงที่พืชควรได้รับต่อวัน (DLI) และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระยะการวัดความเข้มแสง 10 cm จากรางปลูก จะมีค่าความเข้มแสงต่ำกว่าระยะวัด 15 และ 20 cm ตามลำดับ และในชั้นปลูกที่ 1 จะมีความเข้มแสงสูงกว่าชั้นที่ 2 และ 3 ตามลำดับ เนื่องจากได้รับแสงที่ลอดผ่านชั้นปลูกลงมาจากชั้นที่อยู่ด้านบนดังรูปที่ 5.6 และความสัมพันธ์ของความเข้มแสง กับตำแหน่งในการวัดเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ในแต่ละชั้นปลูกได้ดังรูปที่ 5.7



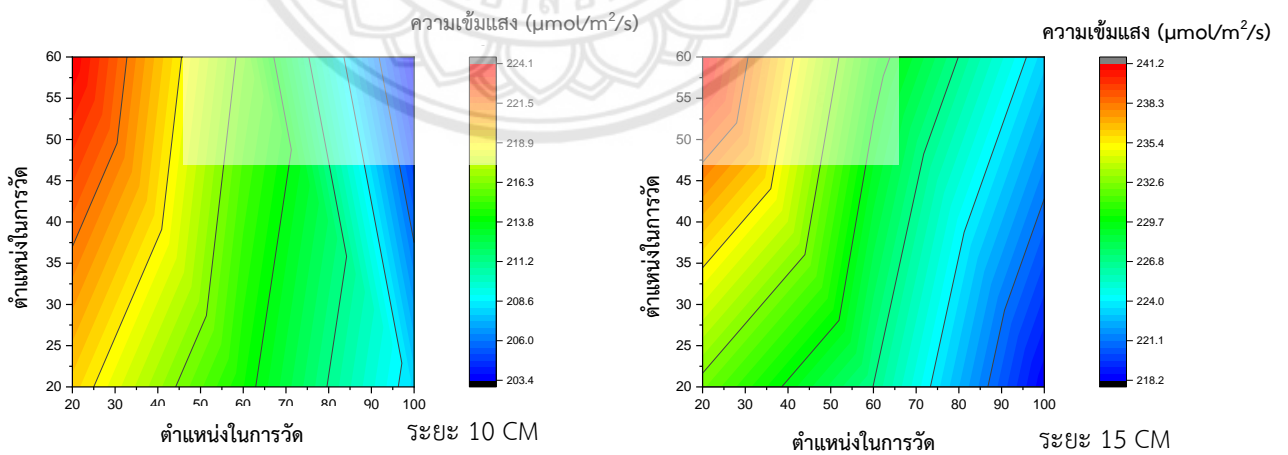
รูปที่ 5.6 ความเข้มแสงสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของแต่ละตำแหน่งในการวัด



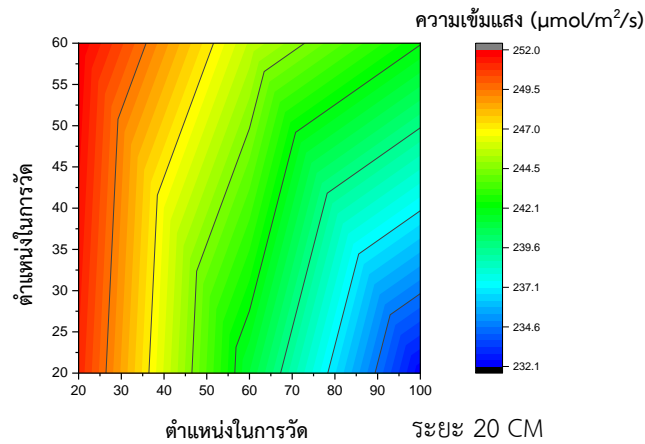
รูปที่ 5.7 (A) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งการวัดของชั้นปลูกที่ 1 (ต่อ)



รูปที่ 5.7 (B) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งการวัดของชั้นปลุกที่ 2



รูปที่ 5.7 (C) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งการวัดของชั้นปลุกที่ 3



รูปที่ 5.7 (C) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งการวัดของชั้นปลุกที่ 3 (ต่อ)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับตำแหน่งในการวัด โดยอ้างอิงตำแหน่งในการวัดจากรูปที่ 4.5 พบว่า ตำแหน่งที่ 1 และ 2 จะมีความเข้มแสงน้อยกว่าตำแหน่งที่ 3 และ 4 และในตำแหน่งที่ 5 และ 6 จะมีความเข้มแสงสูงที่สุด เนื่องจากในตำแหน่งนี้จะอยู่บริเวณที่ติดกับชุดปลุกด้านข้าง แสงจากชุดปลุกด้านข้างจึงกระจายเข้ามาส่งผลให้มีความเข้มแสงสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และเมื่อวัดความเข้มแสงที่ระยะห่างจากรางปลุกเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มแสงจะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
เริ่มต้นการ ใช้งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
2 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
4 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
6 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
8 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
10 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
12 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

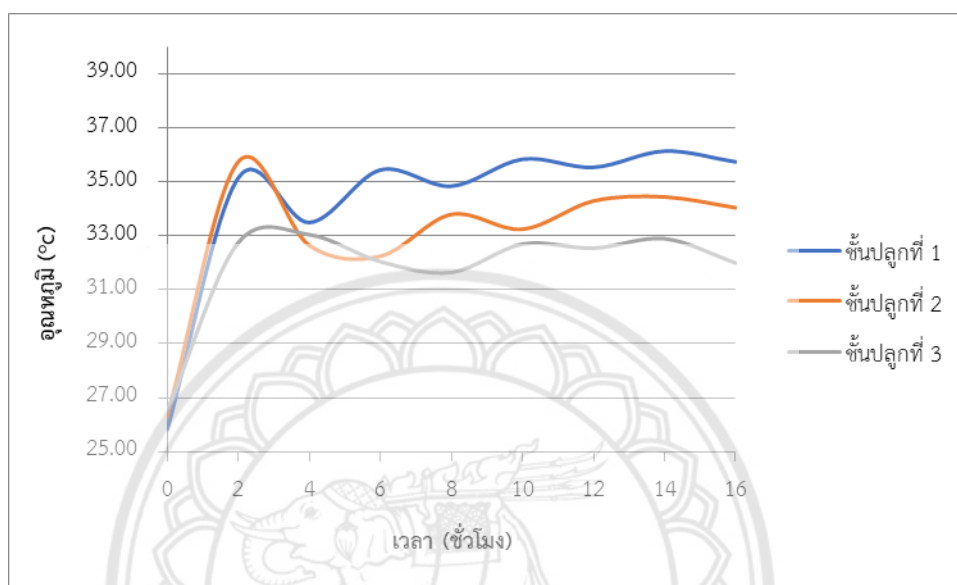
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
14 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งาน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ภาพถ่ายความร้อนจากกล้อง FLIR	
16 ชั่วโมง หลังจากใช้ งาน		
	ชั้นปลุกที่ 1	
	ชั้นปลุกที่ 2	
	ชั้นปลุกที่ 3	

จากตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของหลอดไฟ LED เมื่อมีการใช้งานและหลังการใช้งานที่ 16 ชั่วโมง และสามารถนำค่าอุณหภูมิสูงสุดของหลอดไฟในแต่ละเวลาการใช้งานและตำแหน่งมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของหลอดไฟ LED และเวลาในการใช้งาน

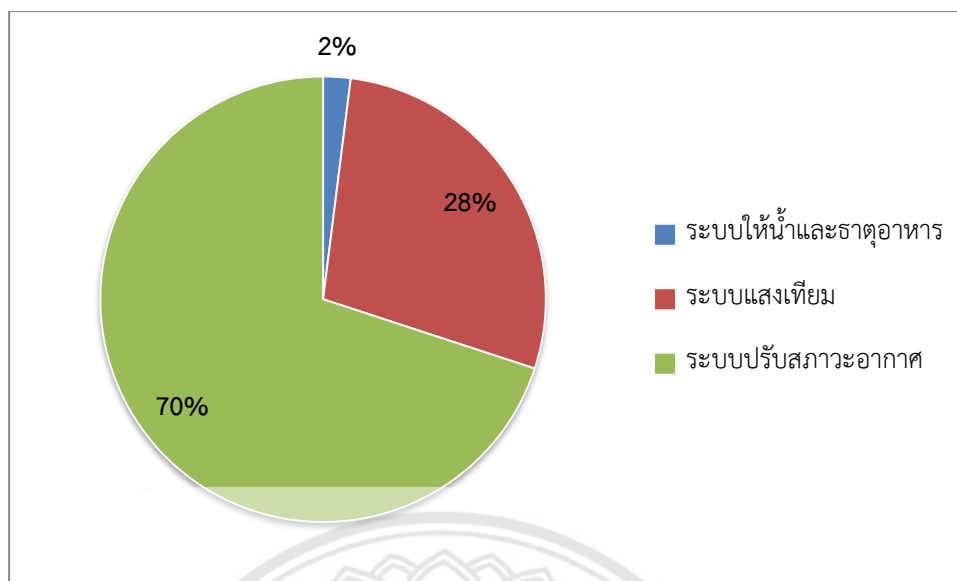
จากรูป 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของหลอดไฟ LED และเวลาในการใช้งาน จะเห็นได้ว่าในแต่ละชั้นปลุก จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหลอดไฟในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากการเริ่มต้นการใช้งาน หลังจากนั้นอุณหภูมิของหลอดไฟ LED ในแต่ละชั้นปลุกจะลดลงและเพิ่มขึ้นไปมาอย่างไม่มีคงที่ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดไฟ LED หลังจากเริ่มต้นการใช้งานไปจนถึง 16 ชั่วโมงจะอยู่ในช่วง 32-36.15 °C ซึ่งอุณหภูมิของหลอดไฟที่เพิ่มขึ้นสูงสุด 36.15 °C คิดเป็น 37.97 % ของอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ย

5.1.4 ผลการทดสอบการใช้พลังงานของระบบปลุกพืช

ระบบต่างๆ ในชุดปลุกพืชระบบปิดสามารถหาค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าในระบบได้ โดยเก็บข้อมูลการใช้พลังงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด ซึ่งเป็นการเก็บค่ากระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบ และระยะเวลาในการทำงานของอุปกรณ์เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยการใช้พลังงาน ระยะเวลาการใช้งานเฉลี่ยของอุปกรณ์ภายในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และสามารถแสดงค่าสัดส่วนของการใช้พลังงานของระบบต่างๆ ในรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้า เวลาในการทำงานของระบบ และปริมาณการใช้พลังงานต่อวัน

ระบบ	อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลาใช้งาน ชั่วโมงต่อวัน (hr/day)	หน่วย (kWh/day)	
ระบบให้น้ำและ ธาตุอาหาร	โซลินอยด์วาล์ว	3.016	0.053	0.00016	
	เครื่องสูบน้ำ DC 12 V	14.98	24	0.359	
	เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ	175.408	0.053	0.009	
	เครื่องผสมปุ๋ย AB อัตโนมัติ	11.425	24	0.274	
ระบบแสง เทียม	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 1	189.01	16	3.024	
	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 2	189.01	16	3.024	
	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 3	189.01	16	3.024	
ระบบปรับ สภาวะ อากาศ	เครื่องปรับอากาศ	คอมเพรสเซอร์ ไม่ทำงาน	58.76	12.37	0.726
		คอมเพรสเซอร์ ทำงาน	1762.8	11.63	20.497
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 1	19.292	24	0.463	
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 2	19.504	24	0.468	
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 3	19.716	24	0.473	
	รวม				32.34



รูปที่ 5.9 แสดงค่าสัดส่วนของการใช้พลังงานของระบบต่างๆ ในระบบปลูก

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.9 พบว่าระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้มากที่สุด คือในระบบปรับสภาวะอากาศ ที่เปิดใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อวันมี การใช้พลังงานโดยรวมต่อวันเท่ากับ 22.628 kWh/day คิดเป็น 69.97 % ของการใช้พลังงานทั้งหมด เนื่องจากเครื่องปรับอากาศมีอัตราการใช้กระแสไฟในช่วงที่คอมเพรสเซอร์ทำงานสูง เนื่องจากมีการวัดการค่ากระแสไฟในช่วงเวลาที่มีแสงแดดเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ได้วัดในช่วงเวลากลางคืนด้วย อาจจะทำให้มีค่าการใช้พลังงานสูงกว่าความเป็นจริงได้ และเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในโครงการนี้เป็นเครื่องปรับอากาศที่มีอายุการใช้งานหลายปี ซึ่งควรมีการเปลี่ยนไปใช้เครื่องปรับอากาศที่ไม่ผ่านการใช้งานและมีเทคโนโลยีใหม่ เช่น เครื่องปรับอากาศระบบอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นเครื่องปรับอากาศที่เลือกใช้มีขนาดใหญ่ซึ่งถูกออกแบบไว้เพื่อรองรับชุดปลูก 2 ชุด แต่ในการใช้งาน ณ ปัจจุบันมีเพียงชุดเดียว ปริมาณการใช้พลังงานรองลงมาเป็นระบบแสงเทียม มีการเปิดใช้งานหลอด LED ของทุกชั้นปลูกเป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน การใช้พลังงานโดยรวมของระบบแสงเทียมเท่ากับ 9.072 kWh/day และระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด คือระบบให้น้ำและธาตุอาหาร ในการทดสอบเวลาการใช้งานต่อวันของเครื่องสูบน้ำอัตโนมัติและโซลินอยด์วาล์ว ทดสอบจากการเริ่มต้นการทำงานของชุดปลูกพีช โดยปกติเครื่องสูบน้ำอัตโนมัติและโซลินอยด์วาล์วจะมีความทำงานก็ต่อเมื่อน้ำภายในถังสารละลายธาตุอาหารอยู่ในระดับต่ำ ระบบให้น้ำและธาตุอาหารมีการใช้พลังงานโดยรวม 0.643 kWh/day และการใช้พลังงานโดยรวมของระบบปลูกพีชระบบปิดเท่ากับ 32.34 kWh/day

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดสอบ

1. ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปรับความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูดธาตุอาหาร AB ให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด ค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ไม่แกว่งขึ้นลง ส่งผลให้การผสมสารละลายธาตุอาหารมีความแม่นยำในการผสมมากที่สุด
2. อุณหภูมิภายในห้องปลูกพืชระบบปิดมีผลต่ออุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในห้อง
3. พัดลมดูดอากาศสามารถสร้างการไหลเวียนภายในชั้นปลูกพบว่าที่ระยะเหนือต้นผัก (15 เซนติเมตรจากรางปลูก) มีความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งรางปลูก ระยะห่างจากพัดลมดูดอากาศ 12 cm เท่ากับ 0.372 m/s
4. ระบบปรับสภาวะอากาศภายในชุดปลูกพืชระบบปิด สามารถสร้างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในชั้นปลูกได้เท่ากับ 25.55 °C ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช
5. ระบบปรับสภาวะอากาศภายในชุดปลูกพืชระบบปิด สามารถสร้างความชื้นเฉลี่ยของอากาศบริเวณภายในชั้นปลูกให้อยู่ในช่วง 76.88-79.98 % ซึ่งเป็นค่าความชื้นของอากาศที่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืชระบบปิดที่จะต้องควบคุมให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 60-80 %
6. ระบบแสงเทียมภายในชุดปลูกพืชระบบปิด สามารถสร้างความเข้มแสงให้เพียงพอกับปริมาณความเข้มแสงที่พืชควรได้รับ ซึ่งความเข้มแสงอยู่ในช่วง 208 – 286.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
7. อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดไฟ LED หลังจากเริ่มต้นการใช้งานไปจนถึง 16 ชั่วโมงจะอยู่ในช่วง 32-36.15 °C ซึ่งอุณหภูมิของหลอดไฟที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 36.15 °C คิดเป็น 37.97 % ของอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ย

8. ชุดปลุกพีชระบบปิดมีการใช้พลังงาน 32.34 kWh/day โดยระบบที่ใช้พลังงานสูงสุดคือ ระบบการปรับสภาวะอากาศซึ่งคิดเป็น 69.97 % ของการใช้พลังงานทั้งหมด รองลงมาเป็นระบบแสงเทียม และระบบให้น้ำและธาตุอาหารตามลำดับ

6.2 คุณสมบัติของชุดปลุกพีชระบบปิดแบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติและข้อมูลเทคนิคของชุดปลุกพีชระบบปิดแบบอัตโนมัติ

ระบบ	การทำงาน	ข้อมูลเทคนิค
ระบบควบคุม	ควบคุมการทำงานเปิด-ปิด อุปกรณ์ต่างๆ ภายในชุดปลุกพีช	<ul style="list-style-type: none"> ● Switching Power Supply Input: 100-240 VAC ● Switching Power Supply Output: 12VDC/29A ● Arduino Uno R3 Input Voltage: 7-12 V
ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร	แจ้งเตือนระดับค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารต่ำกว่าที่กำหนด	<ul style="list-style-type: none"> ● โซลีนอยวาล์ว : 12 VDC/0.3A ● เครื่องสูบน้ำแบบแช่น้ำ: 12 VDC/3A
	ควบคุมระดับน้ำในถังสารละลายธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ	<ul style="list-style-type: none"> ● เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ: 220 VAC/0.76A,150W
	ควบคุมระดับค่า ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC)	<ul style="list-style-type: none"> ● เครื่องผสมปุ๋ย AB แบบอัตโนมัติ : 110-220 VAC/0.05A

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติและข้อมูลเทคนิคของชุดปลูกพืชระบบปิดแบบอัตโนมัติ (ต่อ)

ระบบให้น้ำและธาตุอาหาร	แสดงผลค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) และอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหาร	<ul style="list-style-type: none"> ● อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติ Xh-m203: 12 VDC ● เซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำในถังใต้ราง ● เซนเซอร์ตรวจวัดค่า Electric conductivity, EC
ระบบแสงเทียม	ความเข้มแสงในช่วง 11500-15900 Lux หรือ 208-286.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	หลอดไฟ LED: 220VAC/ 0.23A Daylight (6500K) จำนวน 18 หลอด และ Warm white (3200K) จำนวน 18 หลอด
ระบบปรับสภาวะอากาศ	ปรับสภาวะอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช	พัดลม: 12 VDC/0.48A จำนวน 18 ตัว
ระบบโครงสร้าง	ชั้นปลูกที่แข็งแรง และปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานได้อย่างสะดวก	Aluminium pipe frame, Diameter 28 mm, วัสดุ : Aluminium 6063-T5 การชุบผิว : Clear Anodize ความสูง: 180 cm ความกว้าง: 80 cm ความยาว: 240 cm

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ในการทดสอบระบบควรมีการนำพีชมาใช้ในการทดสอบด้วย เนื่องจากอาจจะมีผลต่อค่าต่างๆ ในการทดสอบ เช่น ความเร็วของลม อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

6.3.2 ควรพัฒนาให้พัดลมดูดอากาศปรับความเร็วลมได้หรือพัฒนาพัดลมดูดอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น และมีการเดินท่อลมเข้าไปในบริเวณที่ยังไม่สามารถวัดค่าความเร็วลมได้เพื่อสร้างการไหลเวียนของอากาศ

6.3.3 ควรทำให้นั่งของห้องปลูกพืชทั้งหมดเป็นผนังที่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน

6.3.4 ควรมีการพัฒนาให้สามารถปรับความเข้มแสงได้

6.3.5 ควรมีการเพิ่มระบบสำรองไฟ ในกรณีที่ไฟดับ ให้ระบบส่งสารละลายธาตุอาหารแก่พืชยังมีการทำงานเพื่อป้องกันการขาดน้ำของพืช และพัดลมดูดอากาศเพื่อสร้างอากาศให้มีการไหลเวียนในช่วงเวลาที่ไฟดับ

6.3.6 ควรมีการติดตั้งผนังด้านหลังของชุดปลูกที่ใช้เป็นโครงจับยึดของพัดลมให้ปิดสนิท และปิดพื้นของชั้นปลูกในแต่ละชั้น



บรรณานุกรม

- [1] กมล เลิศรัตน์. (2555). เทคโนโลยีการผลิตพืชแห่งศตวรรษที่ 21. **แก่นเกษตร 40(4)**, 1-8.
- [2] วิโรไท สันติประภาพ, เมธี สุภาพงษ์, ไพบุลย์ กิตติศรีกังวาน, เศรษฐพุมิ สุทธิวาทนฤพุมิ, คณิศ แสงสุพรรณ, สุภัค ศิวะรักษ์, & สมชัย จิตสุชน. (2562). รายงานนโยบายการเงินเดือนมิถุนายน. กรุงเทพมหานคร: ธนาคารแห่งประเทศไทย.
- [3] ดร.มณฑลที กปิลกาญจน์, และ นางสาว นันทินิตย์ ทองศรี. (2563). **ปรับสู่แสงเปลี่ยนแปลงยั่งยืน**. กรุงเทพมหานคร: ธนาคารแห่งประเทศไทย
- [4] Xydis, G., Liaros, S., & Botsis, K. (2017). Energy demand analysis via small scale hydroponic systems in suburban areas - An integrated energy-food nexus solution. *Science of The Total Environment*, 593-594, 610-617.
- [5] Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2016). **PLANT FACTORY An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production**. United States of America: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- [6] Kozai, T. (2013). Plant Factory in Japan - Current situation and perspectives. *Chronica horticultrae*, 53, 8-11.
- [7] Ueno, M., & Kawamitsu, Y. (2017). Engineering and Applied Science Research. **Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand**, 44(3), 182-188.
- [8] Xiaoying, L., Shirong, G., Taotao, C., Zhigang, X., & Tezuka, T. (2012). Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes. *African Journal of Biotechnology*, 11(22), 6169-6177.
- [9] Kim, H., Goins, G., Wheeler, R., & Sager, J. (2005). Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. **HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science**, 39(7), 1617-1622.
- [10] Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W.S., & Oguchi, R., (2009). Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light:

- revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol*, 50, 684–697.
- [11] ทิวา จามะรี, ปารวี กาญจนประโชติ, สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ และ สรวิวัฒน์ สาครวาสี. (2557). อิทธิพลของแสงไฟแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชมะเขือเทศ Purple ภายใต้ระบบการปลูกพืชแบบกึ่งปิด. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [12] Thimijan, R.W., Heins, R.D., (1983). Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of [14] procedures for interconversion. *HortScience*, 18, pp.818–822.
- [13] กรวิทย์ กระจ่างพันธ์, ธีระวรรณ สืบชนะวงษ์ และ สุขสันต์ หวังสถิตย์วงษ์. (2561). การออกแบบแสงด้วยหลอดแอลอีดีส่องสว่างสำหรับปลูกพืชในอาคารโดยอ้างอิงปริมาณแสงรวมต่อวัน. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [14] Tae, G., & Yong, H. (2014). Analysis of Airflow Pattern in Plant Factory with Different Inlet and Outlet Locations using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Biosystems Engineering*, 310-317.
- [15] Toru, N., Hirokazu, F., & Haruhiko, M. (2013). Effects of Airflow for Lettuce Growth in the Plant Factory with an Electric Turntable. *IFAC Proceedings Volumes*, 270-273.
- [16] Quan, Q., & Zhang, X. (2018). Design and Implementation of a Closed-Loop Plant Factory. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 353-358.
- [17] Ying, Z., Murat, K., & Lingling, A. (2016). A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering*, 147, 193-205.
- [18] เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม. (2561). เรื่อนำรู้ : การทำเกษตรกรรมแนวตั้ง (Vertical Farming). *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 22(1), 56-63.
- [19] สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงสิงคโปร์. (2561). *ฟาร์มดิจิทัล (Digital Farming) ในสิงคโปร์*. กรุงเทพมหานคร: กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์.
- [20] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) (16 มีนาคม 2563). สวทช. ตั้ง 'โรงงานผลิตพืช' เพื่อขับเคลื่อนการเพิ่มมูลค่าสมุนไพรไทย. เรียกใช้เมื่อ 16 มีนาคม 2563 จาก <https://www.nstda.or.th/th/news/12462-20190325-plant-factory>

- [21] WangreeFresh. (16 มีนาคม 2563). **First Commercial and Largest Plant Factory in Thailand**. เรียกใช้เมื่อ 16 มีนาคม 2563 จาก http://www.wangreefresh.com/Wangree_Fresh/Wangree_Fresh.html
- [22] Kozai, T. (2018). Plant factory in Japan -Current situation and perspectives. **CHRDNICA HORTICLURAE**, 53, 8-11
- [23] Kozai, T. (2018). **Smart Plant Factory The Next Generation Indoor Vertical Farms**. Kashiwa, Chiba, Japan: Springer.
- [24] สุนิสา ประไพตร. (2551). **คู่มือนักวิชาการการส่งเสริมการเกษตร**. กรุงเทพฯ : สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร.
- [25] สุนทร เรื่องเกษม. (2540). **ผักกินใบ**. กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.
- [26] เหนียวติดมือ. (18 กุมภาพันธ์ 2562). **วิธีปลูกกัญชา ตอนที่3 ดินและ สูตรปุ๋ยกัญชาการผสม**. เรียกใช้เมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2563 จาก <https://cannabe420.blogspot.com/2019/01/3.html>
- [27] ภาวนา อัคระประภา. (2543). **คู่มือการปลูกพืชสมุนไพร**. กรุงเทพมหานคร: กรมส่งเสริมการเกษตร.
- [28] คงเอก ศิริงาม, ปราณีต จิระสุทัศน์, และ วิภาภรณ์ แสงวงมี. (2558). ผลของวิธีการปลูกต่อการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุของผักกาดหอมใบพันธุ์กรีนโอ๊ค. **วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร**, 10(1), 82-95.
- [29] zen hydroponics . (3 มีนาคม 2559). **สลัด เรดโอ๊ค (Red Oak Lettuce)**. เรียกใช้เมื่อ 19 กุมภาพันธ์ 2563 จาก <http://zen-hydroponics.blogspot.com/2014/12/red-oak-lettuce.html>
- [30] ณัฐพงษ์ โภคทรัพย์. (2559). **การเปรียบเทียบโครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติแบบต่างด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยสยาม
- [31] SimAdviser. (21 ตุลาคม 2557). **ทำความเข้าใจกับ SolidWorks Simulation**. เรียกใช้เมื่อ 27 มกราคม 2564 จาก <http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>
- [32] นรินทร์ ปิ่นแก้ว, ชวโรจน์ ใจสิน, & สุรศักดิ์ กุยม. (2560). **การพัฒนาระบบให้แสงเลี้ยงสาหร่ายแบบแอลอีดีหลายย่านโดยใช้ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าร่วม**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้

- [33] แพรอรุ่ง ชันแปง. (23 กุมภาพันธ์ 2563). **กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง รงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง**. เรียกใช้เมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2563 จาก <https://sanookpuppui.wordpress.com/>
- [34] Kroeze, D. (2020, February 23). **The influence of colours on plants**. Retrieved February 23, 2020, from http://www.canna-uk.com/influence_of_colours
- [35] Fujita, T., Inoue, T., Chow, W., & Oguchi, R. (2019). Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green. **Plant and Cell Physiology**, **50**, 684-697.
- [36] Myers, E. (2019). **This article is part of a series written**. Retrieved February 23, 2020, from <https://www.htgsupply.com/informationcenter/ask-the-doc/gardening-articles/light-and-plant-growth/>
- [37] ธรรมศักดิ์ ทองเกต. (2562). **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless Culture)**. นครปฐม: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรกำแพงแสน.
- [38] zen hydroponics. (2547 พฤษภาคม 2). **การปลูกพืชในระบบรากแช่ (Liquid Culture)**. เรียกใช้เมื่อ 2553 กุมภาพันธ์ 23 จาก <http://zen-hydroponics.blogspot.com/2014/11/blog-post.html>
- [39] Solar Smile Knowledge. (2016). **โพลด์และเครื่องสูบน้ำ**. เรียกใช้เมื่อ 23 กุมภาพันธ์ 2563 จาก https://solarsmileknowledge.com/2013/06/25/โพลด์เครื่องสูบน้ำ/?fbclid=IwAR1dBqThdFGICNP6UbrsJ725LTetI83fBb9_bk6onI6iIO5x-3llgCBO8Kg
- [40] กรุงเทพธุรกิจ. (26 กุมภาพันธ์ 2563). **เครื่องสูบน้ำสูบน้ำพลังแสงอาทิตย์**. เรียกใช้เมื่อ 26 กุมภาพันธ์ 2563 จาก https://www.bangkokbiznews.com/news/detail/572412?fbclid=IwAR3EVx_ndWxWQi96iXAdw6wfYNo3REKuSNSuXjkcEnm5vntt4BkOf84TSdw
- [41] WONGTOOLS.COM. (27 มกราคม 2564). **4 ประเภทของปั้มน้ำ ความรู้เบื้องต้นของปั้มน้ำแต่ละประเภท**. เรียกใช้เมื่อ 27 มกราคม 2564 จาก <https://www.wongtools.com/content/18143/-4-ประเภทของปั้มน้ำ-ความรู้เบื้องต้นของปั้มน้ำแต่ละประเภท>
- [42] คู่มือปั้ม. (2554). **คู่มือปั้ม**. กรุงเทพฯ: ท้อป

- [43] TeddyAir ร้านค้าแอร์ออนไลน์. (6 มีนาคม 2563). **วิธีคำนวณ BTU แอร์ ให้พอดีกับห้อง.** เรียกใช้เมื่อ 6 มีนาคม 2563 จาก <https://teddyaircond.com/th/articles/31466-btu>
- [44] สุรียา ศรีวิเศษ.(18 ธันวาคม 2561). **บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก <https://sites.google.com/site/mikhorkhxnthorllexr1/bxrd-mikhor-khxnthorllexr-arduino-uno-r3>
- [45] Factomart. (27 มกราคม 2564). **โครงสร้างและการทำงานของ General Relay.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก <https://mall.factomart.com/structure-and-principle-of-general-relay/>
- [46] LNWSHOP. (24 มกราคม 2564). **ลูกลอยไฟฟ้า 52 mm PP Liquid Water Level Sensor.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก <https://www.ioxhop.com/product/617/ลูกลอยไฟฟ้า-52mm-pp-liquid-water-level-sensor?fbclid=IwAR28UMoL-AFJdSBzJpjtCBBALUzh5QnZyaLQ1di9dIFZgb9onJXSfvkbyEA>
- [47] LNWSHOP. (2560). **กลไกโซลินอยวาล์ว (Solenoid Valve) ในเครื่องตั้งเวลารดน้ำ แบบใช้ถ่าน.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก <https://www.watertimerreview.com/article/42/กลไก-โซลินอยวาล์ว-solenoid-valve-ในเครื่องตั้งเวลารดน้ำ-แบบใช้ถ่าน>
- [48] ศูนย์รวมเครื่องมือวัดและควบคุมทางด้านไฟฟ้าอุตสาหกรรม. (19 พฤษภาคม 2563). **Switching Power Supply คืออะไรและมีหลักการทำงานอย่างไร.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก https://www.pm.co.th/รายละเอียด/Switching_Und_Power_Und_Supply_Und_คืออะไร_Und_และมีหลักการทำงานอย่างไร_Que_
- [49] ThaiConverter. (27 มกราคม 2564). **DC Step-Down.** เรียกใช้ 27 มกราคม 2564 จาก <https://www.thaicconverter.com/category/2/dc-step-down>
- [50] มนูญ ศิริบุษย์ (2544). **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน** คู่มือปฏิบัติในประเทศไทย. ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [51] ดิเรก ทองอร่าม. (2550). **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หลักการจัดการการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจ ในประเทศไทย** (ฉบับปรับปรุงใหม่พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดีการพิมพ์.
- [52] ผศ.ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์ (2563). **เอกสารประกอบการสอน วิศวกรรมการปรับอากาศและการระบายอากาศ.** พิษณุโลก: ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร.

- [53] นายปรเมศร์ อมาตยกุล และนายเทวินทร์ โจมทา (2556). **อุตุนิยมวิทยานำรู้เพื่อจัดการเกษตรจังหวัดพิษณุโลก**. กรุงเทพฯ: กรมอุตุนิยมวิทยา
- [54] Byung-Lip Ahn, Ji-Woo Park, Seunghwan Yoo, Jonghun kim, Seung-Bok Leigh & Cheol-Yong Jang (2015). **Saving in Cooling Energy with a Thermal Management System for LED Lighting in Office Buildings**. *energies*, 8, 6658 - 6671.
- [55] Massay ODA and Kenkoh TSUJI (1992) **Monitoring Fresh Weight of Leaf Lettuce**. *JARQ*, 26, 19-25.
- [56] ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (25 เมษายน 2564). ตัวอย่างการคำนวณภาระจากอากาศภายนอก (Calculating the Air Change Load). เรียกใช้ 25 เมษายน 2564 จาก https://www.mte.kmutt.ac.th/elearning/Refrigeration/Website/unit5_5.htm?fbclid=IwAR1VkaI8WUxBNuoDJ6CXxlw-17ESmo_2p84MMpmEC9vaCLNjjjXhHRQwjPE







ภาคผนวก ก.

ตารางบันทึกผลการทดลองและการคำนวณหาค่าผลการทดลอง

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด		กึ่งกลาง		สูงสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
5	342	349	340	355	398	396
10	342	349	340	353	405	400
15	350	349	343	353	395	391
20	364	348	347	357	423	401
25	385	346	350	362	410	410
30	392	345	346	383	659	659
35	410	348	366	431	523	523
40	420	361	364	452	563	513
45	431	380	375	511	604	692
50	453	393	400	495	616	684
55	467	408	418	545	622	787
60	487	414	454	593	627	744
65	492	418	502	611	620	858
70	502	428	516	629	612	889
75	514	446	516	655	621	980
80	531	446	570	650	618	1025
85	544	447	598	671	760	1110
90	563	463	644	704	808	1076
95	574	490	610	747	850	1317
100	591	510	691	799	904	1439
105	617	520	718	845	921	1565
110	630	535	704	860	928	1542
115	642	541	776	877	982	1308

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
120	634	556	779	901	1027	1498
125	660	571	858	921	1114	1489
130	672	578	888	942	1078	1452
135	686	589	923	988	1134	1412
140	699	605	935	1036	1160	1463
75	514	446	516	655	621	980
80	531	446	570	650	618	1025
85	544	447	598	671	760	1110
90	563	463	644	704	808	1076
95	574	490	610	747	850	1317
100	591	510	691	799	904	1439
105	617	520	718	845	921	1565
110	630	535	704	860	928	1542
115	642	541	776	877	982	1308
120	634	556	779	901	1027	1498
125	660	571	858	921	1114	1489
130	672	578	888	942	1078	1452
135	686	589	923	988	1134	1412
140	699	605	935	1036	1160	1463
145	718	612	962	1052	1235	1561
150	726	636	983	1081	1210	1601
155	745	658	1013	1102	1312	1585
160	742	663	1050	1124	1370	1527

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
165	750	673	1047	1195	1402	1655
170	764	687	1083	1200	1449	1706
175	762	697	1089	1246	1430	1739
180	779	713	1154	1267	1336	1676
185	788	731	1192	1288	1428	1714
190	813	738	1219	1304	1511	1808
195	823	768	1250	1333	1505	1771
200	832	764	1273	1386	1558	1852
205	846	772	1284	1430	1658	1880
210	851	794	1298	1420	1686	1903
215	864	807	1344	1437	1722	1938
220	872	806	1355	1435	1795	1911
225	889	818	1395	1481	1796	2005
230	881	823	1450	1510	1774	1970
235	896	833	1465	1536	1778	2005
240	910	847	1485	1576	1777	2210
245	927	858	1500	1602	1751	2220
250	947	868	1559	1643	1908	2310
255	942	884	1592	1671	2001	2370
260	966	893	1596	1703		2400
265	972	899	1635	1732		2430
270	988	917	1661	1760		2450
275	996	931	1711	1780		2410

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
280	1005	932	1748	1826		2450
285	1016	950	1769	1856		2510
290	1036	977	1773	1872		
295	1054	981	1807	1894		
300	1071	998	1810	1905		
305	1088	1010	1894	1924		
310	1100	1020	1900	1946		
315	1110	1033	1894	1961		
320	1123	1051	1900	2003		
325	1141	1054	1914	2004		
330	1162	1075	1904	2005		
335	1155	1078	1962	2100		
340	1173	1082	1964	2130		
345	1190	1101	2001	2150		
350	1209	1113		2190		
355	1229	1117		2230		
360	1225	1132		2240		
365	1233	1148		2260		
370	1244	1153		2310		
375	1258	1165		2330		
380	1255	1185		2350		
385	1264	1196		2360		
390	1274	1205		2390		

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
395	1288	1214		2400		
400	1296	1223		2430		
405	1309	1246		2440		
410	1320	1254		2480		
415	1333	1271		2490		
420	1347	1290		2530		
425	1356	1297				
430	1366	1316				
435	1378	1320				
440	1382	1328				
445	1392	1336				
450	1411	1353				
455	1425	1361				
460	1441	1381				
465	1460	1395				
470	1452	1409				
485	1506	1441				
490	1529	1449				
495	1543	1449				
500	1555	1465				
505	1566	1492				
510	1579	1494				
515	1594	1507				

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
520	1607	1532				
525	1634	1542				
530	1646	1565				
535	1657	1570				
540	1671	1575				
545	1690	1605				
550	1707	1609				
555	1723	1610				
560	1727	1626				
565	1736	1642				
570	1747	1647				
575	1760	1649				
580	1768	1668				
585	1779	1678				
590	1786	1707				
595	1798	1706				
600	1809	1712				
605	1817	1725				
610	1830	1746				
615	1839	1752				
620	1854	1756				
625	1867	1779				
630	1873	1792				

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
635	1880	1785				
640	1894	1790				
645	1903	1819				
650	1919	1838				
655	1932	1840				
660	1941	1837				
665	1952	1854				
670	1960	1864				
675	1975	1875				
680	1984	1882				
685	1989	1890				
690	1999	1899				
695	2003	1904				
700		1915				
705		1920				
710		1934				
715		1945				
720		1956				
725		1963				
730		1981				
735		1999				
740		2000				
745		2001				

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
750		2002				
755		2003				
760		2004				
765		2006				
770		2006				
775		2032				
780		2050				
785		2100				
790		2111				
795		2120				
800		2130				
805		2150				
810		2150				
815		2150				
820		2180				
825		2190				
830		2190				
835		2220				
840		2230				
845		2250				
850		2260				
855		2260				
860		2270				

ตารางที่ 1ก. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผสมสารละลายธาตุอาหาร AB แบบอัตโนมัติ (ต่อ)

เวลา (s)	ค่า Electric Conductivity, EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)					
	ความเร็วของปั๊มโดสซึ่งดูธาตุอาหาร AB					
	ต่ำสุด				ต่ำสุด	
	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5	Lo_off = 2	Lo_off = 2.5
865		2250				
870		2300				
875		2310				
880		2320				
885		2340				
890		2340				
895		2350				
900		2370				
905		2380				
910		2390				
915		2390				
920		2400				
925		2420				
930		2430				
935		2440				
940		2440				
945		2460				
950		2470				
955		2470				
960		2480				
965		2490				
970		2520				

ตารางที่ 2ก. ผลการทดสอบอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารที่อุณหภูมิห้องและตำแหน่งต่างๆ

อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิสารละลาย ธาตุอาหาร (°C)	เวลา (นาที)									
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
24	ภายในถัง	25	25	25.2	25.1	25.1	25	25.2	25.1	25	25
	ไหลเวียนกลับมาจาก ชั้นปลูก	24.7	24.7	24.9	24.7	24.8	24.7	24.7	24.6	24.7	24.7
25	ภายในถัง	25.7	25.7	25.7	25.6	25.7	25.6	25.7	25.6	25.6	25.6
	ไหลเวียนกลับมาจาก ชั้นปลูก	25.4	25.5	25.5	25.4	25.5	25.3	25.4	25.4	25.5	25.4
26	ภายในถัง	26.2	26	26	26.2	26	26	26	26.1	26	26
	ไหลเวียนกลับมาจาก ชั้นปลูก	25.9	25.9	25.9	26	25.9	25.9	25.9	25.8	25.9	25.8

ตารางที่ 3ก. ผลการทดลองการไหลเวียนของอากาศภายในชั้นปลูกพืช

พัดลม	ความเร็วลมระยะชิด	ความเร็วลมระยะห่าง	ความเร็วลมระยะห่าง	ความเร็วลมระยะห่าง
	พัดลมดูดอากาศ (m/s)	4 cm (m/s)	8 cm (m/s)	12 cm (m/s)
1	3.48	1.89	0.88	0.38
2	3.30	1.80	0.84	0.35
3	3.33	1.80	0.83	0.36
4	3.44	1.92	0.89	0.38
5	3.42	1.86	0.87	0.37
6	3.37	1.84	0.85	0.37
7	3.45	1.88	0.88	0.38
8	3.44	1.86	0.86	0.37
9	3.39	1.89	0.87	0.39
เฉลี่ย	3.402	1.860	0.863	0.372

ตารางที่ 4ก. ผลการทดสอบอุณหภูมิภายในชุดปลูกพืช

ชั้นปลูก	ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C) ครั้งที่ 1	อุณหภูมิ (°C) ครั้งที่ 2	อุณหภูมิ (°C) ครั้งที่ 3	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
	ช่องส่งลม	15.62	15.58	15.61	15.64
หน้าชั้นปลูก	25.05	25.10	25.08	25.08	
ชั้นปลูกที่ 1	1	25.08	25.08	25.09	25.08
	2	25.09	25.08	25.09	25.09
	3	25.17	25.18	25.14	25.16
	4	25.30	25.33	25.29	25.31
	5	25.31	25.26	25.34	25.30
	6	25.31	25.29	25.27	25.29
ชั้นปลูกที่ 2	1	25.33	25.27	25.37	25.32
	2	25.40	25.39	25.41	25.40
	3	25.42	25.41	25.42	25.41
	4	25.60	25.63	25.61	25.61
	5	25.60	25.60	25.62	25.61
	6	25.68	25.69	25.68	25.68
ชั้นปลูกที่ 3	1	25.88	25.88	25.90	25.89
	2	25.89	25.91	25.92	25.93
	3	25.92	25.95	25.93	25.93
	4	25.93	25.94	25.93	25.93
	5	26.00	26.01	26.05	26.02
	6	26.00	26.03	25.59	25.87

ตารางที่ 5ก. ผลการทดสอบวัดความชื้นในชุดปลูกพืช

ชั้นปลูก	ตำแหน่ง	ความชื้น (%RH) ครั้งที่ 1	ความชื้น (%RH) ครั้งที่ 2	ความชื้น (%RH) ครั้งที่ 3	ความชื้นเฉลี่ย (%RH)
		ช่องส่งลม	92.88	91.89	93.05
	หน้าชั้นปลูก	76.96	76.59	77.01	76.85
ชั้นปลูกที่ 1	1	77.84	77.56	78.45	77.95
	2	76.39	77.82	76.42	76.88
	3	76.87	76.92	77.2	77.00
	4	77.39	77.87	78.04	77.77
	5	77.46	76.84	77.37	77.22
	6	77.45	77.49	77.34	77.43
ชั้นปลูกที่ 2	1	78.11	79.13	78.67	78.64
	2	78.25	78.36	78.92	78.51
	3	78.64	78.75	78.17	78.52
	4	78.86	78.62	77.77	78.42
	5	79.04	79.42	79.33	79.26
	6	79.99	80	79.86	79.95
ชั้นปลูกที่ 3	1	79.51	79.64	79.72	79.62
	2	79.9	79.98	79.91	79.93
	3	80.08	79.99	79.87	79.98
	4	79.98	78.88	78.92	79.26
	5	79.93	78.3	78.96	79.06
	6	78.96	79.13	79.15	79.08

ตารางที่ 6ก. ผลการทดสอบความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของแสงภายในบริเวณต่างๆ และระยะที่มีผลต่อความเข้มแสง

ตำแหน่งที่		ระยะการวัดความเข้มแสง 10 cm		ระยะการวัดความเข้มแสง 15 cm		ระยะการวัดความเข้มแสง 20 cm	
		ความเข้ม แสง (lux)	ความเข้มแสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	ความเข้ม แสง (lux)	ความเข้มแสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	ความเข้ม แสง (lux)	ความเข้มแสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
ชั้นปลูกที่ 1	1	13100	235.8	13900	250.2	14800	266.4
	2	13300	239.4	14200	255.6	15050	270.9
	3	13550	243.9	14300	257.4	15300	275.4
	4	13700	246.6	14600	262.8	15400	277.2
	5	13900	250.2	14700	264.6	15650	281.7
	6	14200	255.6	15100	271.8	15900	286.2
ชั้นปลูกที่ 2	1	12400	223.2	13000	234	13800	248.4
	2	12300	221.4	13350	240.3	14150	254.7
	3	12700	228.6	13400	241.2	14300	257.4
	4	12800	230.4	13725	247.05	14500	261
	5	13100	235.8	13800	248.4	14800	266.4
	6	13200	237.6	14200	255.6	15000	270
ชั้นปลูกที่ 3	1	11555	208	12125	218.25	12900	232.2
	2	11300	203.4	12400	223.2	13450	242.1
	3	11900	214.2	12600	226.8	13400	241.2
	4	12000	216	12800	230.4	13650	245.7
	5	12200	219.6	12900	232.2	13950	251.1
	6	12450	224.1	13400	241.2	14000	252

ตารางที่ 7ก. ผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของหลอดไฟ LED

ตำแหน่ง	เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิหลอดไฟ LED (°C)		
		ชุดปลุกที่ 1	ชุดปลุกที่ 1	เฉลี่ย
ชั้นปลุกที่ 1	เริ่มต้น	26.7	25.7	26.2
	2	37.2	33.1	35.15
	4	34.8	32.2	33.5
	6	35.1	35.8	35.45
	8	36.2	33.5	34.85
	10	37.0	34.7	35.85
	12	36.5	34.6	35.55
	14	37.7	34.6	36.15
	16	37.3	34.2	35.75
ชั้นปลุกที่ 2	เริ่มต้น	27.0	26.5	26.75
	2	33.2	38.3	35.75
	4	31.5	33.8	32.65
	6	29.9	34.6	32.25
	8	31.3	36.3	33.8
	10	31.7	34.8	33.25
	12	32.1	36.5	34.3
	14	32.0	36.9	34.45
	16	33.0	35.1	34.05
ชั้นปลุกที่ 3	เริ่มต้น	26.9	27.0	26.95
	2	31.8	33.7	32.75
	4	31.8	34.3	33.05
	6	30.4	33.7	32.05
	8	30.5	32.8	31.65
	10	31.7	33.7	32.7
	12	31.8	33.3	32.55
	14	31.3	34.5	32.9
	16	31.5	32.5	32

ตารางที่ 8ก. ผลการทดสอบการใช้กระแสและแรงดันไฟฟ้าในการทำงานของชุดปลูกพืชระบบปิดแบบอัตโนมัติ

ระบบ	อุปกรณ์	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	เวลาใช้งาน (min)	
ระบบให้น้ำ และธาตุ อาหาร	โซลีนอยด์วาล์ว	0.29	10.40	3.16	
	เครื่องสูบน้ำ DC 12 V	1.40	10.70	1440	
	เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ	0.76	230.80	3.17	
	เครื่องผสมปุ๋ย AB อัตโนมัติ	0.05	228.5	1440	
ระบบแสง เทียม	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 1	0.82	230.50	960	
	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 2	0.82	230.50	960	
	หลอดไฟ LED ชั้นที่ 3	0.82	230.50	960	
ระบบปรับ สภาวะอากาศ	เครื่องปรับอากาศ	คอมเพรสเซอร์ หยุดทำงาน	0.26	226	2.66
		คอมเพรสเซอร์ ทำงาน	7.80	226	2.5
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 1	1.82	10.60	1,440	
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 2	1.84	10.60	1,440	
	พัดลมดูดอากาศชั้นที่ 3	1.86	10.60	1,440	

ตารางที่ 9ก. ผลการทดสอบเวลาการทำงานของเครื่องปรับอากาศ

	เวลา (min)										เวลาเฉลี่ย (min)
คอมเพรสเซอร์ หยุดทำงาน	2.55	2.57	2.59	2.57	2.57	2.58	2.57	2.58	3.00	3.00	2.66
คอมเพรสเซอร์ ทำงาน	3.21	2.41	2.39	2.46	2.49	2.35	2.49	2.51	2.38	2.40	2.5

จากข้อมูลตารางที่ 9ก. เวลาการทำงานของเครื่องปรับอากาศ คำนวณหาค่าแฟกเตอร์การทำงานของเครื่องปรับอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\text{เครื่องปรับอากาศที่ไม่มีการทำงานของคอมเพรสเซอร์} &&= \frac{2.66}{5.66} \\
 &\text{ในเวลา 24 ชั่วโมง} &&= 24 \times \frac{2.66}{5.66} \\
 &&&= 12.37 \text{ hr/day}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{เครื่องปรับอากาศที่มีการทำงานของคอมเพรสเซอร์} &&= \frac{2.5}{5.66} \\
 &\text{ในเวลา 24 ชั่วโมง} &&= 24 \times \frac{2.5}{5.66} \\
 &&&= 11.628 \text{ hr/day}
 \end{aligned}$$

จะได้ค่าใช้งานชั่วโมงต่อวันของเครื่องปรับอากาศดังตารางที่ 5.2





ภาคผนวก ข.

ส่วนของตารางเอกสารและข้อมูลการออกแบบ

มหาวิทยาลัยพระศวร

ตารางที่ 1ข. สัมประสิทธิ์ความต้านทาน, K สำหรับวาล์วและฟิตติ้ง [42]

Fitting	LD	Nominal Pipe Size												
		1/2	3/4	1	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24	
		K Value												
Angle Valve	55	1.48	1.38	1.27	1.21	1.16	1.05	0.99	0.94	0.83	0.77	0.72	0.66	
Angle Valve	150	4.05	3.75	3.45	3.30	3.15	2.82	2.70	2.55	2.25	2.10	1.95	1.80	
Ball Valve	3	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	
Butterfly Valve							0.86	0.81	0.77	0.68	0.63	0.35	0.30	
Gate Valve	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10	
Globe Valve	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1	
Plug Valve Branch Flow	90	2.43	2.25	2.07	1.98	1.89	1.71	1.62	1.53	1.35	1.26	1.17	1.08	
Plug Valve Straightaway	18	0.48	0.45	0.41	0.40	0.38	0.34	0.32	0.31	0.27	0.25	0.23	0.22	
Plug Valve 3 way Thru-Flow	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.2	0.39	0.36	
Standard Elbow	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.36	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	long radius 90°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
Close Return Bend	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60	
Standard Tee	Thru-Flow	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	Branch-Flow	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72

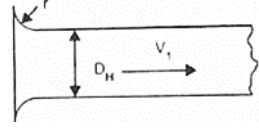
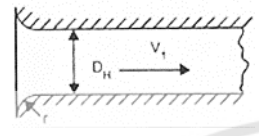
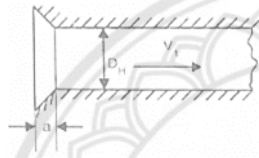

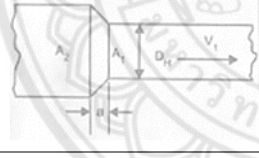

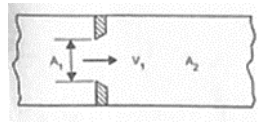
ตารางที่ 1ข. สัมประสิทธิ์ความต้านทาน, K สำหรับวาล์วและฟิตติ้ง(ต่อ) [42]

Fitting		LD	Nominal Pipe Size											
			1/2	3/4	1	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24
			K Value											
90 Bends, Pipe Bends, Flanged Elbow, Butt- Welded Elbows	r/d=1	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	r/d=2	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=3	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=4	14	0.38	0.35	0.32	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.21	0.20	0.18	0.17
	r/d=6	17	0.46	0.43	0.39	0.37	0.36	0.32	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.20
	r/d=8	24	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50	0.46	0.43	0.41	0.36	0.34	0.31	0.29
	r/d=10	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.29
	r/d=12	34	0.92	0.85	0.78	0.75	0.71	0.65	0.61	0.58	0.51	0.48	0.44	0.41
	r/d=14	38	1.03	0.95	0.87	0.84	0.80	0.72	0.68	0.65	0.57	0.53	0.49	0.46
	r/d=16	42	1.13	1.05	0.97	0.92	0.88	0.80	0.76	0.71	0.63	0.59	0.55	0.50
r/d=18	45	1.24	1.15	1.06	1.01	0.97	0.87	0.83	0.78	0.69	0.64	0.60	0.55	
Mitre Bend	a=0°	2	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	a=15°	4	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
	a=30°	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.17	0.15	0.14	0.4	0.12	0.11	0.10	0.10
	a=45°	15	0.41	0.38	0.35	0.33	0.32	0.29	0.27	0.26	0.23	0.21	0.20	0.18
	a=60°	25	0.68	0.63	0.58	0.55	0.53	0.48	0.45	0.43	0.38	0.35	0.33	0.30
	a=75°	40	1.09	1.00	0.92	0.88	0.84	0.76	0.72	0.68	0.60	0.56	0.52	0.48
	a=90°	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72
Note: Fittings are standard with full openings.														

ตารางที่ 2ข. ความขรุขระของผิวท่อในเชิงพาณิชย์ [42]

ค่าของความขรุขระของท่อ, ϵ		
ประเภทของท่อ	ความขรุขระ (mm)	เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอน
เหล็กแผ่น (ใหม่)	0.05	± 60
เหล็กกล้า (ใหม่)	0.002	± 50
เหล็กในทางการค้าทั่วไป (ใหม่)	0.046	± 30
ตะเข็บ	3.0	± 70
เหล็กขึ้นสนิม	2.0	± 50
เหล็กหล่อ (ใหม่)	0.26	± 50
เหล็กพืด (ใหม่)	0.046	± 20
ชุบสังกะสี (ใหม่)	0.15	± 40
เคลือบยางมะตอย	0.12	± 50
ทองเหลือง	0.002	± 50
พลาสติก	0.0015	± 60
คอนกรีต (ผิวเรียบ)	0.04	± 60
คอนกรีต (ผิวหยาบ)	2.0	± 50
ยาง	0.01	± 40

ตารางที่ 3ข. สัมประสิทธิ์ของ Pressure Losses [42]

รูปแบบ		$h_m = \frac{KV^2}{2g}$	$j = \frac{A_1}{A_2}$
การไหลเข้าท่อที่ไม่มี End Wall		$K = e^{-17 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
การไหลเข้าท่อกลมที่มี End Wall		$K = 0.5e^{-14 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
ทางเข้าที่ End Wall เอียงทำมุม 45°		$K = 0.5e^{-4.6 \frac{a}{D_H}}$	$0 \leq \frac{a}{D_H} \leq 0.15$
การลดขนาด		$K = 0.5(1-j)e^{-14 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
การลดขนาดแบบเอียงทำมุม 45°		$K = 0.5(1-j)e^{-4.6 \frac{a}{D_H}}$	$0 \leq \frac{a}{D_H} \leq 0.15$
การขยายตัวแบบทันทีทันใด		$K = (1-j)^2$	
ออริฟิซชนิดบางขอบคม		$K = \{0.7\sqrt{1-j} + 1 - j\}^2$	

ข1.การคำนวณเฮดรวมที่ระบบส่งน้ำมายังถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูกและระบบส่งน้ำขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้น

1. การส่งน้ำจากถังเก็บน้ำ 200 L มายังถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูก จะมีอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

อุปกรณ์	จำนวน
• ท่อ pvc ขนาด 1/2 in (d=18 mm)	17.4 m
• ท่อลดขนาด 1x1/2 in	1 pc
• ข้องอ 90° ขนาด 1 in	1 pc
• ข้องอ 90° ขนาด 1/2 in	19 pc

จากสมการที่ (1) สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_s = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{loss}$$

- เนื่องจากถังเก็บน้ำ 200 L และถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูกอยู่ในความดันบรรยากาศเหมือนกันจึงตัดเทอมของเฮดความดันออกไปได้
- ตัดเทอมของเฮดความเร็วเนื่องจากกำหนดให้ไม่มีความแตกต่างของความเร็วด้านดูดและด้านทางออกของเครื่องสูบน้ำ
- ตัดเทอมของเฮดที่ยกน้ำขึ้นออกได้ เนื่องจากระดับน้ำภายในถังเก็บน้ำ 200 L สูงกว่าระดับน้ำภายในถังเก็บน้ำด้านล่างของชุดปลูก จึงทำให้ไม่เกิดเฮดจากการยกน้ำขึ้น

คำนวณความสูญเสียหลักจากสมการที่ (2.2)

$$h_L = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

คำนวณเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ (2.5) กำหนดให้ $v=3$ m/s เนื่องจากเป็นค่าประมาณของความเร็วในท่อทางออกของปั๊ม

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$= \frac{997 \times 3 \times 0.018}{8.93 \times 10^{-4}}$$

$R_e = 60289 > 2300$ เป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์

กรณีเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทานหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

จากตารางที่ จะได้ค่าความขรุขระของผิวท่อ, $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$ ดังนั้น $\varepsilon/d = \frac{0.0015}{18}$

จะได้ $f = 0.020$

ดังนั้นจะได้ความสูญเสียหลักเท่ากับ

$$h_L = 0.020 \times \frac{17.4}{0.018} \times \frac{3^2}{2 \times 9.81} = 8.869 \text{ m}$$

คำนวณความสูญเสียรองจากสมการที่ (3)

$$h_m = \frac{kv^2}{2g}$$

หาค่า K ของอุปกรณ์จากตารางที่ 3ข.

ท่อลดขนาด 1x1/2 in	$K = 0.5(1-j)e^{-4.6 \frac{a}{D_H}}$ $j = \frac{\frac{\pi}{4} \times 18^2}{\frac{\pi}{4} \times 30^2} = 0.36$ $K = 0.5(1-0.36)e^{-4.6 \left(\frac{0.013}{0.018} \right)}$ $K = 0.01154$
ข้องอ 90° ขนาด 1 in	$K = 0.69$
ข้องอ 90° ขนาด 1/2 in	$K = 0.81 \times 19 = 15.39$
	$K_{\text{total}} = 16.09$

จะได้ความสูญเสียรองเท่ากับ

$$= \frac{16.09 \times 3^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_m = 7.38 \text{ m}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad H_s = h_L + h_m$$

$$= 8.869 + 7.38$$

$$= 16.25 \text{ m}$$

2. ระบบส่งน้ำขึ้นไปยังรางปลูกในแต่ละชั้น

- ความแตกต่างของน้ำในถังกับระยะส่งสูงสุดเท่ากับ 1.2 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาด 1/2" เท่ากับ 18 mm

ช่วงที่ 1

อัตราการไหลในราง NFT = 2 ลิตร/นาที่/ราง

$$\begin{aligned} \text{มีทั้งหมด 12 ราง} &= 2 \times 12 = 24 \text{ L/min} \\ &= 0.4 \text{ L/s} \\ &= 4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

ความยาวท่อรวมในช่วงที่ 1 เท่ากับ 2.1 m

อุปกรณ์

จำนวน

- บอลวาล์ว 1/2" 1 ตัว
- ข้อต่อสามทาง 1/2" (Thru-Flow) 1 ตัว

$$\text{ความเร็วของน้ำ } v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times 10^{-4}}{\frac{12}{4} (0.018)^2} = 1.57 \text{ m/s}$$

คำนวณเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{\rho v d}{\mu} \\ &= \frac{997 \times 1.57 \times 0.018}{8.93 \times 10^{-4}} \end{aligned}$$

$$R_e = 31551.19 > 2300 \text{ เป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์}$$

กรณีเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทานหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

จากตารางที่ จะได้ค่าความขรุขระของผิวท่อ, $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$ ดังนั้น $\varepsilon/d = \frac{0.0015}{18}$

จะได้ $f = 0.0232$

คำนวณความสูญเสียหลักจากสมการที่ (2.2)

$$h_L = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

$$h_L = 0.0232 \times \frac{2.1}{0.018} \times \frac{1.57^2}{2 \times 9.81} = 0.34 \text{ m}$$

คำนวณความสูญเสียรองจากสมการที่ (3)

$$h_m = \frac{K v^2}{2g}$$

หาค่า K ของอุปกรณ์ดังตารางที่ 3ข.

ข้อง 90° ขนาด 1/2"	$K = 0.81 \times 5 = 4.05$
ข้อต่อสามทาง 1/2" (Thru-Flow)	$K = 0.54$
รวม	$K_{\text{รวม}} = 4.59$

จะได้ความสูญเสียรองเท่ากับ

$$= \frac{4.59 \times 1.57^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_m = 0.58 \text{ m}$$

ช่วงที่ 2

อัตราการไหลในราง NFT = 2 ลิตร/นาที/ราง

มีทั้งหมด 8 ราง = $2 \times 8 = 16$ L/min

$$= 0.266 \text{ L/s}$$

$$= 2.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

ความยาวท่อรวมในช่วงที่ 2 เท่ากับ 0.4 m

อุปกรณ์

จำนวน

- ข้อต่อสามทาง 1/2" (Thru-Flow)

1 ตัว

$$\text{ความเร็วของน้ำ } V = \frac{Q}{A} = \frac{2.66 \times 10^{-4}}{\frac{12}{4} (0.018)^2} = 1.045 \text{ m/s}$$

คำนวณเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ (2.5)

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$= \frac{997 \times 1.045 \times 0.018}{8.93 \times 10^{-4}}$$

$$R_e = 21000.64 > 2300 \text{ เป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์}$$

กรณีเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทานหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

จากตารางที่ จะได้ค่าความขรุขระของผิวท่อ, $\varepsilon = 0.0015$ mm ดังนั้น $\varepsilon/d = \frac{0.0015}{18}$

จะได้ $f = 0.0255$

คำนวณความสูญเสียหลักจากสมการที่ (2.2)

$$h_L = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

$$h_L = 0.0255 \times \frac{0.4}{0.018} \times \frac{1.045^2}{2 \times 9.81} = 0.0315 \text{ m}$$

คำนวณความสูญเสียรองจากสมการที่ (3)

$$h_m = \frac{kv^2}{2g}$$

หาค่า K ของอุปกรณ์ดังตารางที่ 3ข.

ข้อต่อสามทาง 1/2" (Thru-Flow)	K = 0.54
รวม	K _{รวม} = 0.54

จะได้ความสูญเสียรองเท่ากับ

$$= \frac{0.54 \times 1.045^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_m = 0.03 \text{ m}$$

ช่วงที่ 3

อัตราการไหลในราง NFT = 2 ลิตร/นาที/ราง

มีทั้งหมด 4 ราง = $2 \times 4 = 8 \text{ L/min}$

$$= 0.133 \text{ L/s}$$

$$= 1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

ความยาวท่อรวมในช่วงที่ 3 เท่ากับ 0.4 m

อุปกรณ์

จำนวน

- ข้อต่อ 90° ขนาด 1/2"

1 ตัว

$$\text{ความเร็วของน้ำ } V = \frac{Q}{A} = \frac{1.33 \times 10^{-4}}{\frac{12}{4} (0.018)^2} = 0.52 \text{ m/s}$$

คำนวณเรย์โนลด์์นัมเบอร์จากสมการที่ (2.5)

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$= \frac{997 \times 0.52 \times 0.018}{8.93 \times 10^{-4}}$$

$$R_e = 10450.07 > 2300 \text{ เป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์}$$

กรณีเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ค่าของแฟคเตอร์ความเสียดทานหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

จากตารางที่ จะได้ค่าความขรุขระของผิวท่อ, $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$ ดังนั้น $\varepsilon/d = \frac{0.0015}{18}$

$$\text{จะได้ } f = 0.0306$$

คำนวณความสูญเสียหลักจากสมการที่ (2.2)

$$h_L = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

$$h_L = 0.0306 \times \frac{0.4}{0.018} \times \frac{0.52^2}{2 \times 9.81} = 0.00937 \text{ m}$$

คำนวณความสูญเสียรองจากสมการที่ (3)

$$h_m = \frac{K v^2}{2g}$$

หาค่า K ของอุปกรณ์ดังตารางที่ 3ข.

ข้อง 90° ขนาด 1/2"	K = 0.81
รวม	K _{รวม} = 0.81

จะได้ความสูญเสียรองเท่ากับ

$$= \frac{0.81 \times 0.52^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_m = 0.011 \text{ m}$$

ดังนั้น รวมทั้ง 3 ช่วง $h_{\text{loss}} = h_L + h_m$

$$h_{\text{loss}} = (0.34 + 0.0315 + 0.00937) + (0.011 + 0.03 + 0.58)$$

$$\therefore H_s = h_{\text{loss}} + 1.2$$

$$= 1 + 1.2$$

$$= 2.2 \text{ m}$$

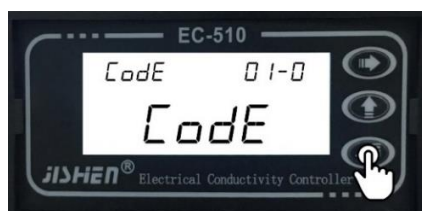
ข2. วิธีการใช้งานเครื่องผสมปุ๋ย AB แบบอัตโนมัติ

1. กดปุ่ม Power เพื่อเริ่มการทำงาน หน้าจอแสดงค่า EC จากนั้นกดปุ่ม Enter เพื่อตั้งค่า กำหนดควบคุมค่า EC ดังรูปที่ 1ข.



รูปที่ 1ข. การเริ่มการทำงานของเครื่องผสมปุ๋ย AB แบบอัตโนมัติ

2. ปรากฏหน้า menu setting เลือกโหมด 01-01 กด enter 2 ครั้ง เพื่อข้ามการตั้งค่าใน โหมด Code แล้วกด Shift Right เพื่อเลือกโหมดกำหนดควบคุมค่า EC ดังรูปที่ 2ข.



รูปที่ 2ข. หน้าจอ menu setting

3. menu setting 06-0 (Lo_oN) โหมดกำหนดควบ EC ควบคุมสารละลายธาตุอาหารต่ำสุด จากนั้นกด Enter เพื่อตั้งค่า ดังรูปที่ 3ข.



รูปที่ 3ข. หน้าจอ menu setting 06-0 (Lo_oN)

4. เข้าโหมด menu setting 06-1 (Lo_oN) กด Shift Right เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งในการใส่ค่า กด Add Key เพื่อเปลี่ยนตัวเลข ในการกำหนดค่า EC ตามที่กำหนด เมื่อได้ค่าที่กำหนดแล้วกด Enter เพื่อเซตค่า ดังรูปที่ 4ข.



รูปที่ 4ข. หน้าจอ menu setting 06-1 เพื่อการกำหนดค่า EC

5. กด Shift Right เพื่อเปลี่ยน menu setting 07_0 (Lo_off) โหมดกำหนดควบ EC ควบคุมสารละลายธาตุอาหารสูงสุดสุด จากนั้นกด Enter เพื่อตั้งค่า ตามข้อที่ 2
6. กด Shift Right เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งในการใส่ค่า กด Add Key เพื่อเปลี่ยนตัวเลข ในการกำหนดค่า EC ตามที่กำหนด เมื่อได้ค่าที่กำหนดแล้วกด Enter เพื่อเซตค่า ตามข้อที่ 4 เมื่อได้ค่าที่กำหนดแล้วกด Enter เพื่อเซตค่า
7. เปลี่ยน menu setting โดยการกด Shift Right ไปจนถึง โหมด End menu setting 15-0 เพื่อจบการทำงาน ดังรูปที่ 5ข.



รูปที่ 5ข. หน้าจอ menu setting 15-0 เพื่อจบการทำงาน

3ข. การคำนวณภาระการทำความเย็นภายในห้องปลุกพืชระบบปิด

ในการคำนวณภาระในการทำความเย็นของห้องปลุกพืชระบบปิดจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังภายใน ฝ้าเพดาน และพื้น รวมถึงอุปกรณ์ภายในห้อง จะใช้ข้อมูลในการคำนวณจากเอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมปรับอากาศและการระบายอากาศ [52]

ผนังที่กั้นขึ้นมามีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนจึงกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังด้านนี้

อุณหภูมิภายในห้อง = $25\text{ }^{\circ}\text{C} = 77\text{ }^{\circ}\text{F}$

อุณหภูมิห้องอ้างอิงจากค่าแนะนำอุณหภูมิห้องไม่ปรับอากาศโดยกำหนดให้ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก $5\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($2.78\text{ }^{\circ}\text{C}$) [52] โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกอ้างอิงจากกรมอุตุนิยมวิทยานำรู้เพื่อการเกษตรจังหวัดพิษณุโลก [53] ที่กล่าวว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $33.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นเท่ากับ $71\%\text{RH}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อุณหภูมิห้อง} &= 33.4 - 2.78 \\ &= 30.62\text{ }^{\circ}\text{C} = 87.12\text{ }^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

ผนังห้อง

ผนังห้องเป็นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว มีค่า $U = 0.585\text{ Btu/hr-ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$

$$\text{พื้นที่ของห้อง} = (4.9 \times 2.7) \times (3.8 \times 2.7) = 10.62 + 13.49\text{ m}^2 = 23.49\text{ m}^2 = 252.844\text{ ft}^2$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } Q &= UA\Delta T \\ &= 0.585 \times 252.844 \times (87.12 - 77) \\ &= 1496.887\text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

เพดานห้อง

ค่า U ของฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด = 0.086 Btu/hr-ft². °F

พื้นที่ของเพดานห้อง = 4.9 × 3.8 = 18.62 m² = 200.42 ft²

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } Q &= UA\Delta T \\ &= 0.086 \times 200.42 \times (87.12-77) \\ &= 174.4295 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

พื้นห้อง

พื้นห้องเป็นคอนกรีต มีค่า U = 0.585 Btu/hr-ft². °F

พื้นที่ของพื้นห้อง = 4.9×3.8 = 18.62 m² = 200.42 ft²

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } Q &= UA\Delta T \\ &= 0.585 \times 200.42 \times (87.12-77) \\ &= 1186.526 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

กระจก

กระจกทำการติดตั้งภายในห้องไม่มีการโดนแสงอาทิตย์โดยตรง จึงไม่ทำการคำนวณแฟกเตอร์ความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ที่แปรผันตามทิศทางของกระจกกับแสงอาทิตย์

พื้นที่กระจก = 3.8×2.7 = 10.26 m² = 110.44 ft²

ความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน

$$\text{จากสมการ } Q = UA \times CLTD_c$$

$$CLTD_c = (CLTD+LM) + (78-t_r) + (T_a-85)$$

CLTD_c ของกระจกสูงสุดที่เวลา 15:00 น. = 14 °F

$$LM = 0$$

$$t_a = t_0 - \frac{DR}{2} ; \text{ประเทศไทย } t_0 = 95 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ และ } DR = 18 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_a = 86 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$CLTD_c = 14 + (78-77) + (86-85) = 16 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\begin{aligned} Q &= 1.10 \times 110.44 \times 16 \\ &= 1943.744 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน

$$Q = A \times SC \times \Delta T$$

กระจกเป็นกระจกชั้นเดียวแบบใสไม่มีม่านปิดค่า SC = 0.94

$$\begin{aligned} Q &= 110.44 \times 0.94 \times (87.12-77) \\ &= 1050.594 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

หลอดไฟ

จะใช้สมการการคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากหลอดไฟ LED จากงานวิจัยของ Byung-Lip Ahn et al. [54]

$$P_{\text{heat}} = 0.781 P_{\text{LED}}$$

หลอด LED มีค่ากำลังไฟฟ้า 18 watt/หลอด

ใช้ทั้งหมด 36 หลอด = $18 \times 36 = 648 \text{ watt}$

กำลังไฟฟ้า 1 Watt = 3.412 หลอดไฟ LED เปิดใช้งาน 16 ชั่วโมงต่อวัน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q &= \frac{16}{24} \times 648 \times 3.412 \\ &= 1474 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

เนื่องจากออกแบบเพื่อรองรับชุดปลูกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตอีก 1 ชุดปลูก

ดังนั้น ภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นของหลอด LED ทั้งหมดเท่ากับ $1474 \times 2 = 2948$ Btu/hr

พัดลมดูดอากาศ

$$Q = 3.142 \times n \times w$$

พัดลมดูดอากาศมีกำลังไฟฟ้า = 4.56 Watt

ใช้พัดลมทั้งหมด 18 ตัว

$$\begin{aligned} Q &= 3.142 \times 18 \times 4.56 \\ &= 280 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

เนื่องจากออกแบบเพื่อรองรับชุดปลูกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตอีก 1 ชุดปลูก

ดังนั้น ภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นของพัดลมดูดอากาศทั้งหมดเท่ากับ $280 \times 2 = 560$ Btu/hr

ภาระการทำความเย็นที่เกิดจากการคายน้ำของพืช

พื้นที่ของใบผักชนิด Green leaf Lettuce เท่ากับ 640 cm^2

อัตราการคายน้ำของผักชนิด Green leaf Lettuce เท่ากับ $0.71 \text{ g/dm}^2/\text{hr}$

จะได้ เท่ากับ $0.0071 \text{ g/cm}^2/\text{hr}$

โดยพื้นที่ของใบผักและอัตราการคายน้ำอ้างอิงจากงานวิจัยของ Massay ODA and Kenkoh TSUJI [55]

$$\text{พื้นที่ใบ} \times \text{อัตราการคายน้ำ} = 640 \times 0.0071$$

$$\text{จะได้น้ำหนักน้ำที่คายต่อต้น} = 4.544 \text{ g/hr}$$

จำนวนต้นทั้งหมด 120 ต้น

$$\text{น้ำหนักน้ำที่คายทั้งหมด} = 120 \times 4.544$$

$$= 545.28 \text{ g/hr}$$

$$= 0.545 \text{ kg/hr}$$

ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ = 2256 kJ/kg

ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่เกิดขึ้นทั้งหมด = 2256 × 0.545

$$= 1229.52 \text{ kJ/s}$$

$$= 1165.36 \text{ Btu/hr}$$

เนื่องจากออกแบบเพื่อรองรับชุดปลูกที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตอีก 1 ชุดปลูก

ดังนั้น ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ $1165.32 \times 2 = 2330.72 \text{ Btu/hr}$

การคำนวณภาระการระเหยจากความชื้นที่เกิดจากการระเหยจากผิวน้ำในรางปลูก

ความเร็วอากาศเหนือผิวน้ำ = 0.5 m/s

$$\Theta = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การระเหย} = (25 + 19v) = 25 + 19(0.5) = 34.5$$

$$A = \text{พื้นที่ผิวน้ำ} = 10.5 \times 240 \text{ cm} = 2520 \text{ cm}^2/\text{ราง} = 0.252 \text{ m}^2/\text{ราง}$$

$$X_5 = \text{อัตราส่วนความชื้นสูงสุดของอากาศอิ่มตัว, } 25 \text{ }^\circ\text{C} = 0.019826 \text{ kg/kg}$$

$$X = \text{อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, } 25 \text{ }^\circ\text{C } 70\% \text{RH} = 0.014 \text{ kg/kg}$$

$$\text{ปริมาณน้ำระเหยจากพื้นผิวของน้ำ} = Q \times A \times (X_5 - X)$$

$$= 34.5 \times 0.252 \times (0.019826 - 0.014)$$

$$= 0.05065 \text{ kg/hr}$$

ชุดปลูกในปัจจุบัน 1 ชุดและชุดปลูกที่จะเพิ่มขึ้นอีก 1 ชุด มีจำนวนรางปลูกทั้งหมด 24 ราง

ดังนั้น ปริมาณน้ำระเหยจากพื้นผิวของน้ำ = $0.05065 \times 24 = 1.2156 \text{ kg/hr}$

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ = 2256 kJ/kg

$$\begin{aligned} \text{ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอทั้งหมด} &= 1.2156 \times 2256 = 2742.39 \text{ kJ/kg} \\ &= 2599.28 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

การคำนวณภาระการทำความเย็นจากการแลกเปลี่ยนอากาศภายนอก

จากหนังสือ Plant factory [5] คำแนะนำสำหรับค่า Air Changes per hour ของห้องปลูกพืชระบบปิดเท่ากับ 0.02 h^{-1}

$$\text{ปริมาตรห้อง} = 3.8 \times 4.9 \times 2.7 = 50.27 \text{ m}^3$$

$$\text{จากปริมาตรห้องจะได้ ค่า Air Change } 0.02 \times 50.27 = 1.0054 \text{ m}^3/\text{hr}$$

อากาศ 1.2929 kg เท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร

$$\text{Air Change} = 1.299 \text{ kg/hr}$$

อากาศภายนอกอุณหภูมิ $30.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 71%RH

อากาศภายในห้องอุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70%RH ซึ่งอ้างอิงจากอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมในการปลูกพืชระบบปิด

จากไซโครเมตริกชาร์ท ดังรูปที่ 6ข. จะได้ $h_o = 81.9 \text{ kJ/kg}$

$$h_i = 61 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{จะใช้ Air Change load} = 1.299 \times (81.9 - 61)$$

$$= 27.15 \text{ kJ/hr}$$

$$= 25.73 \text{ Btu/hr}$$

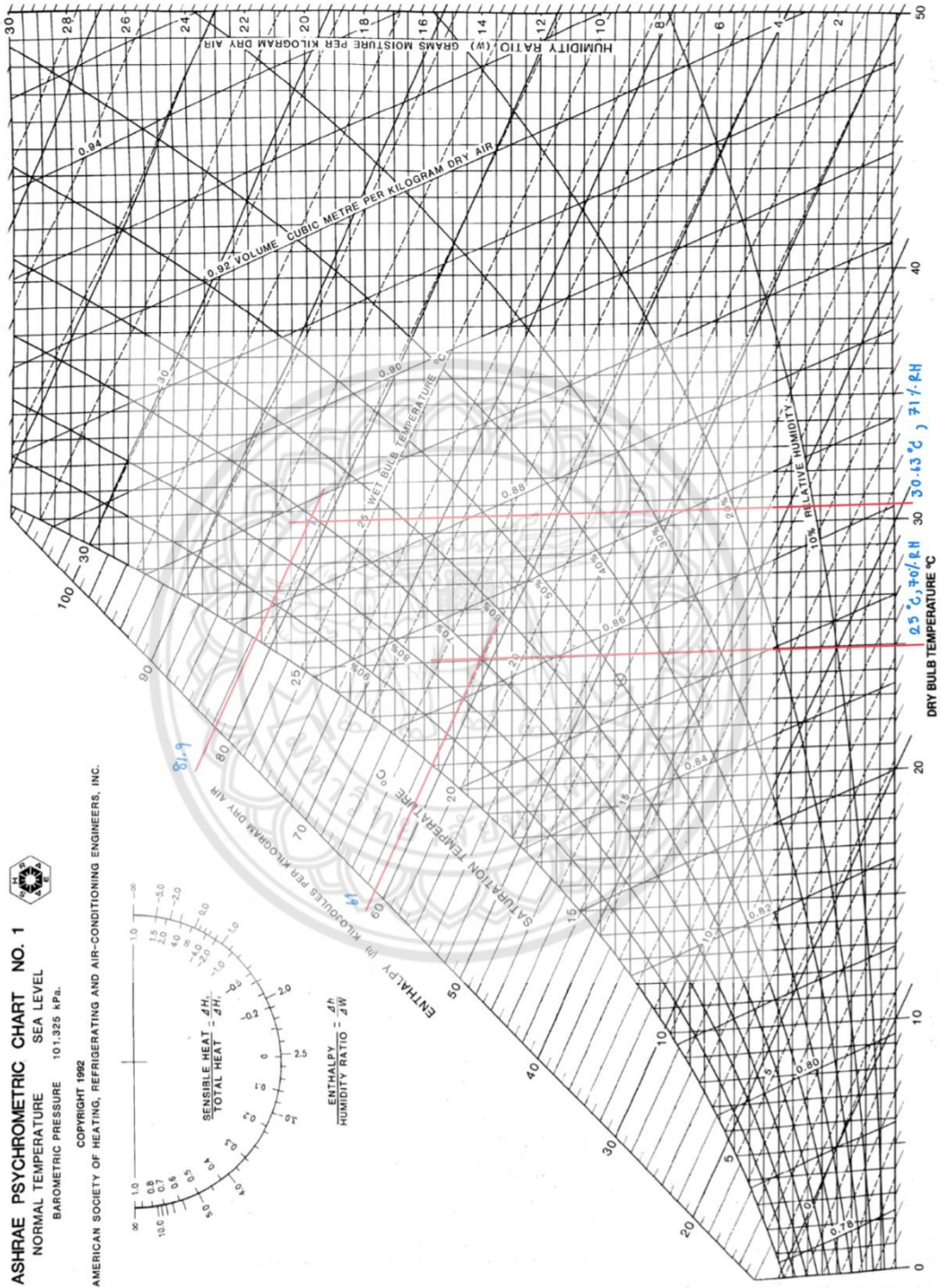


Fig. 1 ASHRAE Psychrometric Chart No. 1

รูปที่ 6ข. ไชโครเมตริกชาร์ท