

การควบคุมแสงเทียมสำหรับการเพาะปลูกพืช

ARTIFICIAL LIGHT AUTOMATIC CONTROL FOR PLANT  
CULTIVATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ARTIFICIAL LIGHT AUTOMATIC CONTROL FOR PLANT CULTIVATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การควบคุมแสงเทียมสำหรับการเพาะปลูกพืช

Artificial Light Automatic Control for Plant Cultivation

ชื่อนักศึกษา

นายภาวิธ เทียนใส

รหัสนักศึกษา 58051122

นายเลิศสิริ รงค์สวัสดิ์

รหัสนักศึกษา 58051132

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา ประธานกรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การควบคุมแสงเทียมสำหรับการเพาะปลูกพืช	
ชื่อนักศึกษา	นายภาวิช เทียนไสว	รหัสนักศึกษา 58051122
	นายเลิศสิริ รงค์สวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 58051132
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมแสงเทียมสำหรับการเพาะปลูกพืช เพื่อใช้สำหรับในงานวิจัยแสงเทียมที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยโครงการพิเศษนี้มีการสร้างวงจรควบคุมแสงเทียมให้มีรูปแบบการหรี่แสงที่ออกมามีรูปคลื่นต่าง ๆ ได้แก่ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ทั้งสองสัญญาณนี้ถูกควบคุมโดย Programmable Waveform Generator ส่วนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และมีความถี่ของแสงเทียมที่แตกต่างกัน โดยการสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับแสงเทียม รวมถึงวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นหลังจากให้สัญญาณที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบนี้ โดยการวัดค่าความเข้มของแสงแต่ละรูปแบบ ในการหรี่แสงและรูปแบบการหรี่ของแสงเทียมส่งผลต่ออุณหภูมิภายในกล่อง ผลการศึกษาพบว่าในการหรี่แสงแต่ละรูปแบบคลื่นที่มีค่ากระแสไฟเฉลี่ยกำลังสอง ที่จ่ายให้กับแอลอีดีมีค่าเท่ากับค่าของความเข้มแสงจะมีปริมาณเท่ากัน รวมถึงค่าอุณหภูมิด้วย

**คำสำคัญ :** PWM, Light Emitting Diode, PPF, PAR, Lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Artificial Light Automatic Control For Plant Cultivation
<b>Students</b>	Mr. Pawat Thensawai Student ID 58051122 Mr. Lerdsiri Rongsawat Student ID 58051132
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Dr. Bhanupol Klongratog

### Abstract

This special project is intended to study the control of artificial light for cultivated plants, to be used in the research about the effects of artificial light on the plant growth. In this project, a control circuit was designed to create light source with waveform dimming patterns, including, sinusoidal, triangular, and rectangular waveforms, of different frequencies. The first two signal were created by a programmable waveform generator, and the last by a microcontroller. DC voltage is supplied to the artificial light. The resulted light intensity and temperature were measured after these 4 different signals were applied. It is found that the artificial light affects the temperature inside the box. In addition, the light intensities, as well as the temperatures, are equal, for every cases where the dimming pattern has the same rms-current supplying the LED.

**Keywords:** PWM, Light Emitting Diode, PPFD, PAR, Lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษศึกษาดุสิตบัณฑิตสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความเมตตาของอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก ขอขอบคุณความกรุณารับเป็นที่ปรึกษาตั้งแต่เริ่มโครงการพิเศษศึกษา รวมทั้งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับหัวข้อโครงการ แนวทางในการเขียนโครงการ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ให้ข้อคิดแนะนำรูปแบบการเขียนโครงการ ตลอดจนคำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนเป็นกำลังใจสำคัญ เป็นแรงผลักดัน รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่น ที่ไม่ได้กล่าวถึง ผู้จัดทำโครงการพิเศษศึกษาขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ภาวิช เทียนไสว  
เลิศสิริ รงค์สวัสดิ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและปัญหาสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ .....	1
1.3 ขอบเขตของงานโครงการพิเศษ.....	2
1.4 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ระยะเวลาดำเนินงานโครงการพิเศษ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 หลอดแอลอีดี .....	3
2.2 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน.....	5
2.3 ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ .....	7
2.3.1 วงจรขยายแรงดันแบบกลับขั้วสัญญาณ .....	7
2.3.2 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ .....	7
2.3.3 วงจรขยายรวมสัญญาณ.....	8
2.4 Pulse Width Modulation .....	9
2.5 หน่วยวัดแสงสำหรับพืช.....	11
2.5.1 การรับรู้แสงของพืช .....	11
2.5.2 การกระจายแสง .....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด 13 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

### หน้า

2.7.1	งานวิจัยเรื่อง “Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation”	13
2.7.2	วิจัยเรื่อง “Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation”	14
2.7.3	งานวิจัยเรื่อง “การออกแบบแสงด้วยหลอดแอลอีดีส่องสว่างสำหรับปลูกพืชในอาคาร โดยอ้างอิงปริมาณแสงรวมต่อวัน”	15
2.7.4	งานวิจัยเรื่อง “Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs”	16
2.7.5	งานวิจัยเรื่อง “The research on LED supplementary lighting system for plants”	17
2.7.6	งานวิจัยเรื่อง “Tomato seedling physiological responses under different percentages of blue and red photon flux ratios using LEDs and cool white fluorescent lamps”	18
2.7.7	งานวิจัยเรื่อง “Spectral quality of supplemental LED grow light permanently alters stomatal functioning and chilling tolerance in basil”	19
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>21</b>
3.1	ออกแบบการทดลอง	21
3.2	อุปกรณ์การทดลอง	21
3.2.1	Arduino Mega	21
3.2.2	ตัวสร้างสัญญาณ AD9833	22
3.2.3	วงจรขยายสัญญาณ	22
3.2.3.1	วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	23
3.2.3.2	วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	23
3.2.3.3	วงจรรวมผลรวมของสัญญาณ	24
3.2.4	รีเลย์แบบหน้าสัมผัส	24
3.2.5	Digital Potentiometer	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.6 วงจรขับกระแส .....	26
3.2.7 แอลอีดี .....	27
3.2.8 เซนเซอร์วัดความเข้มแสง .....	28
3.2.9 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ .....	29
3.2.10 มอสเฟต IRF540N .....	30
3.2.11 พัดลม 12 V DC .....	30
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	31
3.3.1 การสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับแอลอีดีโดยสัญญาณต่าง ๆ.....	31
3.3.1.1 ภาคควบคุมสัญญาณ .....	31
3.3.1.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟ .....	31
3.3.2 ขั้นตอนการควบคุม.....	33
3.3.3 การวัดแสง.....	34
3.3.4 ระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	35
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>37</b>
4.1 การวัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่.....	37
4.2 การวัดความเข้มแสง.....	44
4.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>58</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตาราง 1.1 แสดงระยะเวลาดำเนินงานโครงการพิเศษ.....	2
ตาราง 2.1 ลักษณะทั่วไปของแอลอีดี.....	4
ตาราง 4.1 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร .....	38
ตาราง 4.2 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร .....	39
ตาราง 4.3 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร .....	40
ตาราง 4.4 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร...	41
ตาราง 4.5 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร...	42
ตาราง 4.6 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร...	43
ตาราง 4.7 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณแบบเชิงเส้น .....	44
ตาราง 4.8 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปไซน์ .....	45
ตาราง 4.9 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปสามเหลี่ยม .....	46
ตาราง 4.10 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม .....	47
ตาราง 4.11 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณแบบเชิงเส้น .....	48
ตาราง 4.12 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปไซน์ .....	49
ตาราง 4.13 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปสามเหลี่ยม .....	50
ตาราง 4.14 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม .....	51
ตาราง 4.15 วัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณแบบเชิงเส้น .....	52
ตาราง 4.16 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณรูปไซน์ .....	53
ตาราง 4.17 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณรูปสามเหลี่ยม .....	54
ตาราง 4.18 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม .....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพี-เอ็นกับการจ่ายกระแสและไม่จ่ายกระแส.....	3
รูปที่ 2.2 ช่วงสำหรับความยาวคลื่นสูงสุดของ LED ที่ใช้ .....	4
รูปที่ 2.3 การดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ชนิด A และชนิด B .....	5
รูปที่ 2.4 ทรานซิสเตอร์ .....	5
รูปที่ 2.5 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตัน .....	6
รูปที่ 2.6 วงจรขยายแรงดันแบบกลับขั้วสัญญาณ.....	7
รูปที่ 2.7 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ.....	8
รูปที่ 2.8 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ.....	9
รูปที่ 2.9 Pulse Width Modulation.....	10
รูปที่ 2.10 เทคนิคในการทำสัญญาณ PWM .....	10
รูปที่ 2.11 การรับรู้แสงระหว่างมนุษย์และพืช .....	11
รูปที่ 2.12 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของ PPFD.....	12
รูปที่ 2.13 หน่วยการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับหลอดแอลอีดีที่โหมดการทำงานต่างกัน .....	14
รูปที่ 2.14 หน่วยการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับแอลอีดี .....	15
รูปที่ 2.15 การตอบสนองโดยเฉลี่ยของพืชต่อการแผ่รังสีที่ใช้แสงสังเคราะห์.....	16
รูปที่ 2.16 ผลของคุณภาพแสง (การเพิ่มขึ้นของโฟตอนฟลักซ์) ต่อการตอบสนองทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยาและอัตราการเจริญเติบโตของกล้าไม้แดงกวาง.....	17
รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบสถานการณ์การเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศของทั้งสองกลุ่มหลังจาก สามสัปดาห์ .....	18
รูปที่ 2.18 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตสำหรับการรักษาด้วยแสงที่แตกต่างกัน.....	19
รูปที่ 2.19 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตสำหรับการรักษาด้วยแสงที่แตกต่างกัน.....	20
รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานทั้งหมด.....	21
รูปที่ 3.2 Arduino Mega .....	22
รูปที่ 3.3 ตัวสร้างสัญญาณ AD9833.....	22
รูปที่ 3.4 ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ OP07A.....	23
รูปที่ 3.5 รีเลย์แบบหน้าสัมผัส .....	25
รูปที่ 3.6 Digital Potentiometer .....	26
รูปที่ 3.7 ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการขับกระแส.....	27
รูปที่ 3.8 แอลอีดี 3 W.....	27
รูปที่ 3.9 การต่อแอลอีดีแต่ละสี.....	28
รูปที่ 3.10 เซนเซอร์วัดแสง TSL2561 .....	28

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.11 ลักซ์มิเตอร์ดิจิตอล UT382 .....	29
รูปที่ 3.12 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 .....	29
รูปที่ 3.13 มอสเฟต .....	30
รูปที่ 3.14 พัดลม 12 V DC .....	30
รูปที่ 3.15 วงจรขยายสัญญาณ .....	31
รูปที่ 3.16 วงจรขับกระแส .....	32
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Docklight .....	34
รูปที่ 3.18 การวัดความเข้มแสง .....	35
รูปที่ 3.19 ตำแหน่งในการติดตั้งพัดลม .....	36
รูปที่ 3.20 วงกลมสีแสงแสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง.....	36
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร) .....	38
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร) .....	39
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร) .....	40
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร) .....	41
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร) .....	42
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร) .....	43
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นไซน์เมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที.....	56
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นสามเหลี่ยมเมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที .....	56
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
LED	Light Emitting Diode - แอลอีดี
PWM	Pulse Width Modulation
Vrms	Voltage root mean square - แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย
Irms	Current root mean square - กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
PAR	Photosynthetically Active Radiation – ค่าของแสงในช่วง 400 นาโนเมตรถึง 700 นาโนเมตร
PPF	Photosynthetic Photon Flux - การวัดค่าแสง
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density - ค่าของแสงที่พืชรับได้จริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและปัญหาสำคัญ

โดยทั่วไปแสงมีสองประเภทคือแสงจากธรรมชาติคือดวงอาทิตย์และแสงเทียม เช่นหลอดกลม หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดฮาโลเจน ไดโอดเปล่งแสง (LED) โดยที่เราสนใจไดโอดเปล่งแสง เนื่องจากว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่กินกำลังไฟต่ำ มีความร้อนที่ต่ำกว่าแสงเทียมชนิดอื่น เนื่องจากพืชต้องอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่พอดี เหมาะกับพืชต่าง ๆ ที่เพาะปลูก ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อุณหภูมิของอากาศ มีผลต่อการหายใจของพืช หากอุณหภูมิสูงเกินไป พืชจะหายใจเร็วและเติบโตช้าลงหรืออาจตายได้ และเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืช เนื่องจากพืชสามารถสังเคราะห์แสงได้ดีในช่วงแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน แต่อย่างไรก็ตามการนำ ไดโอดเปล่งแสง มาเพาะปลูกพืชมีการใช้ระยะเวลาในการเปิดใช้งานนานซึ่งเป็นผลทำให้ ไดโอดเปล่งแสงมีความร้อนสะสม เป็นผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านไม่คงที่ ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของไดโอดเปล่งแสง การสังเคราะห์แสงของพืชในช่วงระยะเวลาการเติบโตนั้นพืชมีความต้องการ ปริมาณความเข้มของแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินที่ไม่เท่ากันจึงต้องมีการควบคุมปริมาณความเข้มของแสงโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสไฟตรง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและทำการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Constant-Current) โดยสร้างจากวงจรทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน การควบคุมด้วยสัญญาณทั้งหมด 4 แบบ คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมหรือความกว้างของพัลส์ (PWM) โดยสามสัญญาณนี้ถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนอีกหนึ่งสัญญาณคือสัญญาณเชิงเส้นถูกควบคุมโดยแหล่งจ่ายภายนอก โดยสัญญาณทั้งหมดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไดโอดเปล่งแสงสีแดงกับสีน้ำเงิน การปิดไฟในเวลากลางคืนและพื้นที่การรับแสงของพืช

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1) ศึกษาการควบคุมและแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega
- 2) ศึกษาการทำงานและควบคุมสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณ
- 3) ศึกษาการทำงานและควบคุมของวงจรรขยายสัญญาณ

- 4) ศึกษาหลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอกหรือแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานโครงการพิเศษ

- 1) สร้างระบบจ่ายไฟแบบโปรแกรมได้เพื่อใช้ควบคุมแสงเทียมสำหรับการเพาะปลูก

### 1.4 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงการทำงานและการควบคุมสัญญาณผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์
- 2) ทำให้ทราบถึงการทำงานและการควบคุมวงจรขยายสัญญาณ
- 3) ทำให้ทราบถึงวิธีการออกแบบ การสร้างและหลักการทำงานแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

### 1.5 ระยะเวลาดำเนินงานโครงการพิเศษ

ตาราง 1.1 แสดงระยะเวลาดำเนินงานโครงการพิเศษ

รายละเอียด/ระยะเวลา	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย
1.ศึกษาข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง						
2.ศึกษาการทำงานและการควบคุมแบบสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณแบบเชิงเส้น						
3.ศึกษาการทำงานและการควบคุมของวงจรขยายสัญญาณ						
4.ศึกษาการค้นคว้าทฤษฎีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจากวงจรทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน						
5.วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปและอภิปรายผล						
6.การนำเสนองาน						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

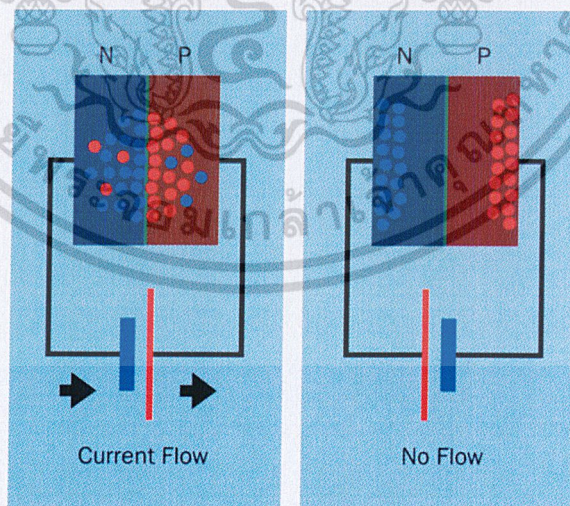
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันนิยมนำแสงเทียมมาใช้ในการเพาะปลูกพืชกันมากขึ้นเนื่องจากพืชที่ทางการเกษตรลดน้อยลงและสภาวะอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยซึ่งหลอดแอลอีดี เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ถูกนำมาใช้เนื่องจากใช้พลังงานน้อย ความร้อนต่ำเมื่อเปิดใช้งานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและยังสามารถเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการได้อีก

### 2.1 หลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED)

หลอดแอลอีดีหรือไดโอดเปล่งแสง จัดอยู่ในจำพวกไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงได้ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เมื่อจ่ายไฟฟ้าในลักษณะไบอัสตรงเข้าไปถึงจุดที่เพียงพอที่จะบังคับอิเล็กตรอนในบริเวณ n-type และโฮลที่ p-type เคลื่อนที่รวมเข้าด้วยกัน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่รวมกันทำให้พลังงานถูกปลดปล่อยออกมา พลังงานที่ปลดปล่อยในรูปโฟตอนหรือแสงออกมา ดังรูป 2.1 ปริมาณพลังงานที่ปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับช่องว่างของแถบ (band gap) ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ ช่องว่างของแถบเป็นพลังงานที่เล็กที่สุดที่สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นของแสงและสี ช่องว่างของแถบยังกำหนดแรงดันไฟฟ้าของแอลอีดี ด้วยเหตุนี้ไฟแอลอีดี ที่มีสีต่างกันจึงมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน [1]



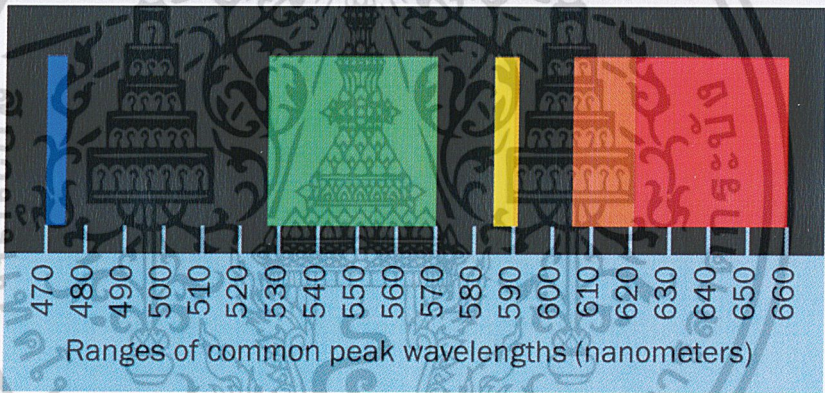
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพี-เอ็น กับการจ่ายกระแสและไม่จ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.1 ลักษณะทั่วไปของแอลอีดี

วัสดุเซมิคอนดักเตอร์	สีของแอลอีดี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าแรงดันฟอร์เวิร์ด (โวลต์)
GaAsP	สีแดง	621-700	1.6-2.1
GaAsP	สีส้ม	605-620	1.9-2.1
GaAsP:N	สีเหลือง	585-590	2.0-2.4
AlGaP	สีเขียว	527-570	2.4-3.4
SiC	สีน้ำเงิน	470-475	3.2-3.4

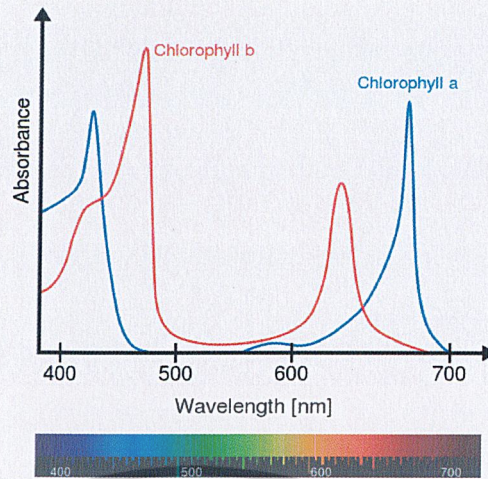
ความยาวคลื่นของแสงถูกวัดในหน่วยนาโนเมตร (nm) ซึ่งนาโนเมตรอยู่ที่ 1 พันล้านส่วนของเมตร สเปกตรัมที่มองเห็นนั้นอยู่ในช่วงประมาณ 470 nm ถึง 660 nm ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงสำหรับความยาวคลื่นสูงสุดของ LED ที่ใช้ [2]

เหตุผลที่ต้องใช้แอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงิน เนื่องจากคลอโรฟิลล์ของพืชนั้นสามารถดูดกลืนได้ดีในช่วงแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินแต่สามารถดูดกลืนช่วงคลื่นแสงสีเหลืองและแสงสีเขียวได้น้อย อย่างไรก็ตามที่ทราบว่าเป็นสีเขียวเนื่องจากการสะท้อนคลอโรฟิลล์ในใบไม้ ซึ่งคลอโรฟิลล์จะสามารถดูดกลืนแสงสีแดงได้ดีที่สุดและคลอโรฟิลล์บีสามารถดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้ดีที่สุด ซึ่งแสงในช่วงสีแดงจะช่วยสังเคราะห์แสง เป็นสีที่พืชดูดซับมากที่สุด ส่งเสริมการงอกของเมล็ดพืชหรือยับยั้งการงอกของเมล็ดพืชบางชนิดและยังส่งผลต่อการออกดอกของพืชและแสงสีน้ำเงินช่วยสังเคราะห์แสง ช่วยการตอบสนองของพืชต่อแสงในเรื่องการเบนหรือโค้งงอเข้าหาแสงของพืช ดังรูป 2.3

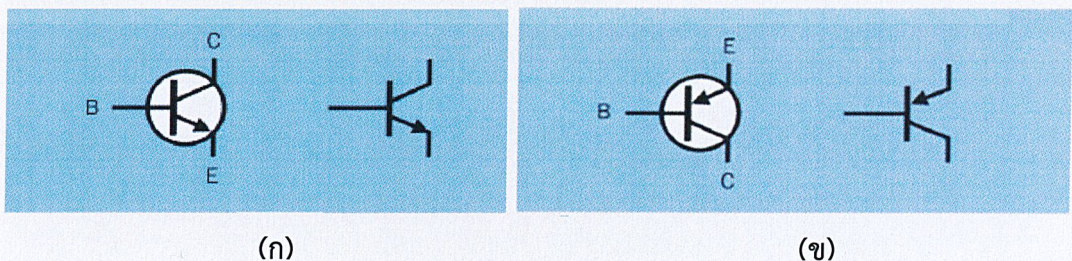
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ชนิด A และชนิด B

## 2.2 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน (Darlington Transistor)

ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อพาหะคู่ (Bipolar transistor) มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีต่อกัน ทำให้ทรานซิสเตอร์มี 2 ชนิด คือทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี และทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น ทรานซิสเตอร์มีหน้าที่หลักคือขยายกระแสหรือใช้เพื่อเป็นสวิตช์เปิดและปิดกระแส ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น ดังรูป 2.4ก. มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่ ที่ขาคอลเลคเตอร์และขาอิมิตเตอร์ถูกโด๊ปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังนั้นกระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นจึงเกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มากกว่าโฮล ทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีเอ็น ดังรูป 2.4ข. มีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่ ที่ขาคอลเลคเตอร์และขาอิมิตเตอร์ถูกโด๊ปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีเอ็น จึงเกิดจากโฮลเคลื่อนที่มากกว่าอิเล็กตรอนและเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทรานซิสเตอร์ไม่สามารถขยายกระแสไฟฟ้าได้อีก จนถึงจุดอิ่มตัวซึ่งเป็นจุดที่ความต้านทานภายในลดลงแต่ถ้าหากความต่างศักย์ที่ใช้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ลดลงถึงจุดที่มีค่าน้อยกว่า 0.6 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน



รูปที่ 2.4 ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (ข) ทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตันเป็นการนำทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันสองตัวมาเชื่อมต่อกัน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะถูกขยายขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ตัวแรกและขยายอีกครั้งหนึ่งที่ทรานซิสเตอร์ตัวที่สองซึ่งจะทำให้มีอัตราการขยายของกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราการขยายของทรานซิสเตอร์หรือค่าเบต้า ( $\beta$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1  $\beta = I_c$

$$(\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\beta$  คือ อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์

$\Delta I_c$  คือ อัตราการขยายขาคอลเลคเตอร์

$\Delta I_b$  คือ อัตราการขยายที่ขาเบส

ซึ่งอัตราการขยายของกระแสไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าเบต้าของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว ดังรูปที่ 2.5 สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

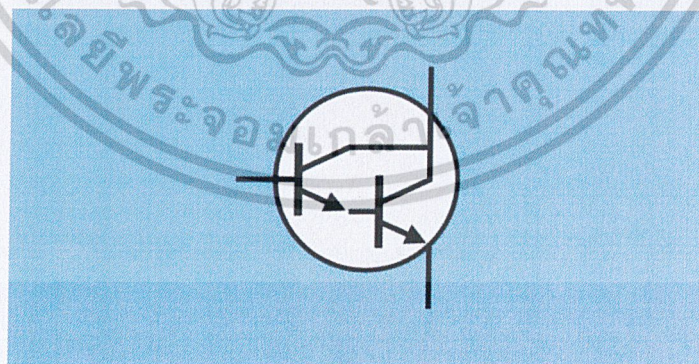
$$(\beta = \beta_1 * \beta_2) \quad (2.2)$$

เมื่อ

$\beta$  คือ อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์ทั้งหมด

$\beta_1$  คือ อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์ตัวที่หนึ่ง

$\beta_2$  คือ อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง



รูปที่ 2.5 ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier)

ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการหรือ OP-AMP เป็นตัวขยายสัญญาณซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์หลายตัวที่บรรจุอยู่ในชิปวงจรรวม

### 2.3.1 วงจรขยายแรงดันแบบกลับขั้วสัญญาณ (Inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.6 สัญญาณที่ออกจากวงจรมีอัตราขยายที่ติดลบคือเมื่อป้อนสัญญาณทางอินพุตเป็นบวกสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจะมีค่าเป็นลบ ในทางกลับกันป้อนสัญญาณทางอินพุตเป็นลบสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจะมีค่าเป็นบวก โดยอัตราขยายจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของ  $R_1$  และ  $R_2$  โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$V_{out} = -\frac{R_1}{R_2} V_{in} \quad (2.3)$$

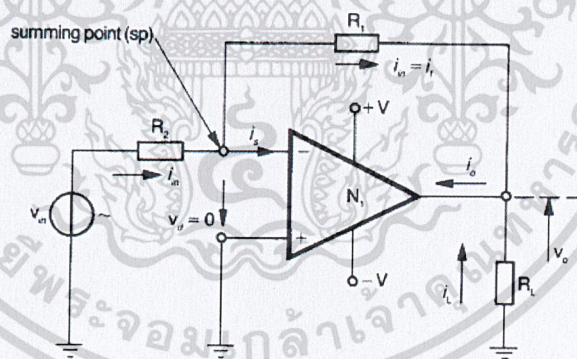
เมื่อ

$V_{out}$  คือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจขยาย

$R_1$  คือ ตัวต้านทานตัวป้อนกลับ

$R_2$  คือ ตัวต้านทานตัวอินพุต

$V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตก่อนเข้าวงจขยาย



รูปที่ 2.6 วงจรขยายแรงดันแบบกลับขั้วสัญญาณ

### 2.3.2 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ ( Non-Inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.7 สัญญาณที่ออกจากวงจรมีอัตราขยายที่เป็นบวกคือเมื่อป้อนสัญญาณทางอินพุตเป็นบวก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจะมีค่าเป็นบวก ในทางกลับกันป้อนสัญญาณทางอินพุตเป็นลบสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจะมีค่าเป็นลบ โดยอัตราขยายจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของ  $R_1$  และ  $R_2$  โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = 1 + \frac{R_1}{R_2} V_{in} \quad (2.4)$$

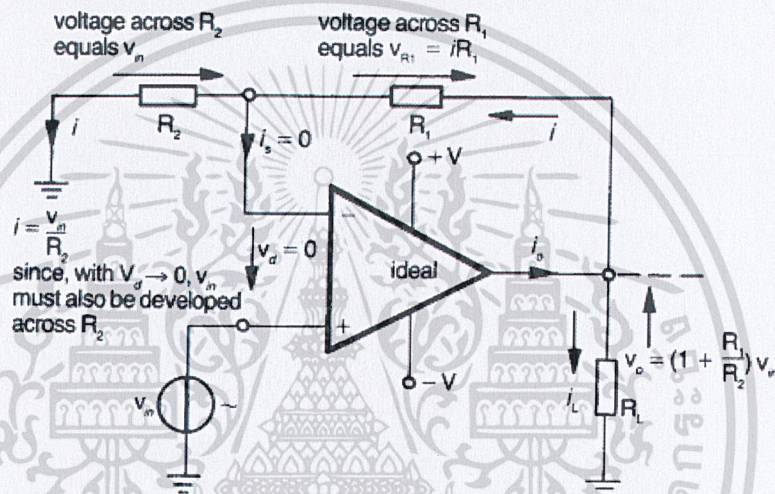
เมื่อ

$V_{out}$  คือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรขยาย

$R_1$  คือ ตัวต้านทานตัวป้อนกลับ

$R_2$  คือ ตัวต้านทานตัวอินพุต

$V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตก่อนเข้าวงจรขยาย



รูปที่ 2.7 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ

### 2.3.3 วงจรขยายรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

จากรูป 2.8 วงจรขยายรวมสัญญาณ คือการนำสัญญาณจากวงจรขยายอื่น ๆ มารวมกันซึ่งสามารถให้เป็นการรวมแบบบวกหรือลบได้ขึ้นอยู่กับการทำงานของวงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณหรือไม่กลับขั้วสัญญาณ [4] โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}R_4}{R_1} + \frac{V_{in}R_4}{R_2} + \frac{V_{in}R_4}{R_3}\right) \quad (2.5)$$

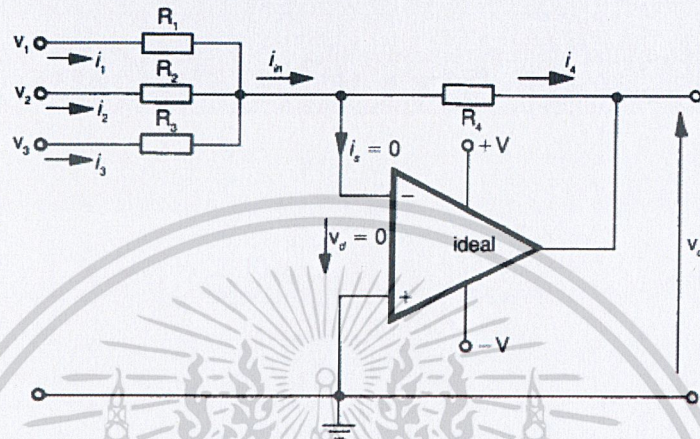
เมื่อ

$V_{out}$  คือ แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรขยาย

$R_1$  คือ ตัวต้านทานตัวอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $R_2$  คือ ตัวต้านทานตัวอินพุต  
 $R_3$  คือ ตัวต้านทานตัวอินพุต  
 $R_4$  คือ ตัวต้านทานตัวป้อนกลับ  
 $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตก่อนเข้าวงจรขยาย



รูปที่ 2.8 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

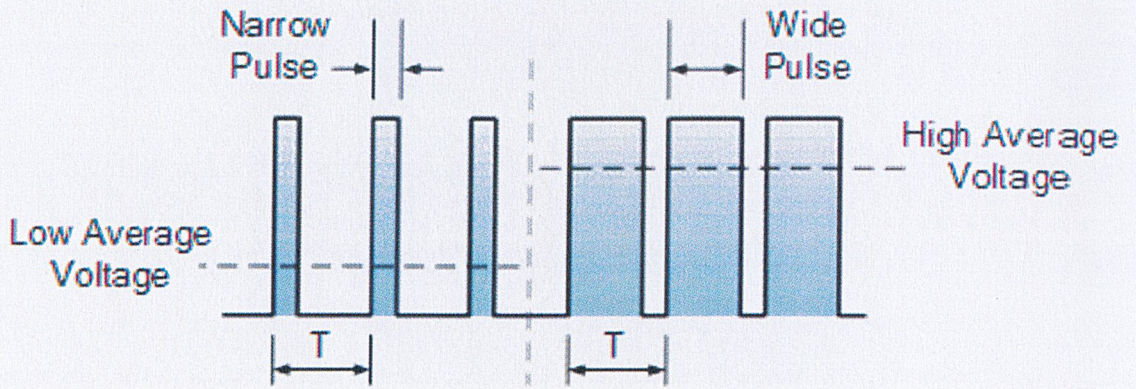
## 2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

เป็นกระบวนการปรับหรือเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมอนาล็อก (Analog) ด้วยสัญญาณดิจิทัล (Digital) ใช้สำหรับควบคุมความกว้างของสัญญาณดิจิทัล เพื่อควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ เช่น การเพิ่มและลดแสงแอลอีดีหรือควบคุมทิศทางของเซอร์โวมอเตอร์ สัญญาณดิจิทัลที่ออกมาคือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะสัญญาณสลับกันระหว่างเปิด (HIGH) กับปิด (LOW) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งช่วงเวลาที่เป็นสัญญาณเปิดนั้นเมื่อเทียบกับเวลาที่สัญญาณออกมา เรียกว่าความกว้างของสัญญาณ (Duty Cycle) เช่น

- 50% Duty cycle หมายความว่า คาบเวลาที่เป็น High 50% และ คาบเวลาที่เป็น Low 50%
- 25% Duty cycle หมายความว่า คาบเวลาที่เป็น High 25% และ คาบเวลาที่เป็น Low 75%
- 90% Duty cycle หมายความว่า คาบเวลาที่เป็น High 90% และ คาบเวลาที่เป็น Low 10%

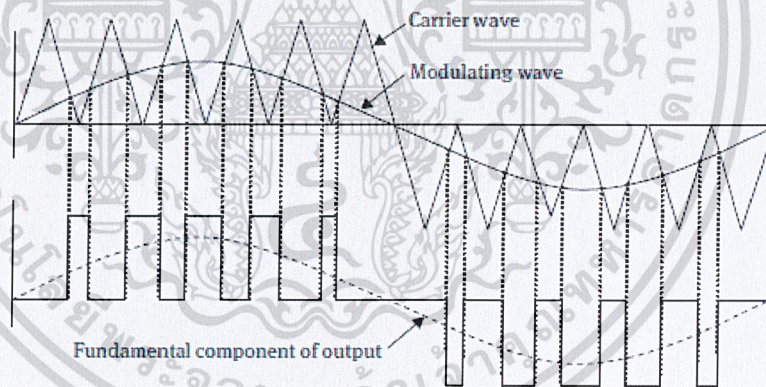
การทำงานของดิวิต์ไซเคิลมี 2 แบบ คือการทำงานแบบ Active Low และ Active High จากรูปที่ 2.9 ถ้าเป็นการทำงานแบบ Active High หมายถึงสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจะเป็นสัดส่วนกับแหล่งจ่ายไฟคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดิวิต์ไซเคิลและที่ 0 เปอร์เซ็นต์ดิวิต์ไซเคิลสัญญาณเอาต์พุตจะเป็น 0 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Pulse Width Modulation

เทคนิคในการทำสัญญาณ PWM คือการนำสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างของพัลส์มาเปรียบเทียบกัน ตัวอย่างเช่น ถ้านำสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะได้ความกว้างของพัลส์คงที่และความกว้างของพัลส์นั้นจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงดังรูป 2.10 [5]

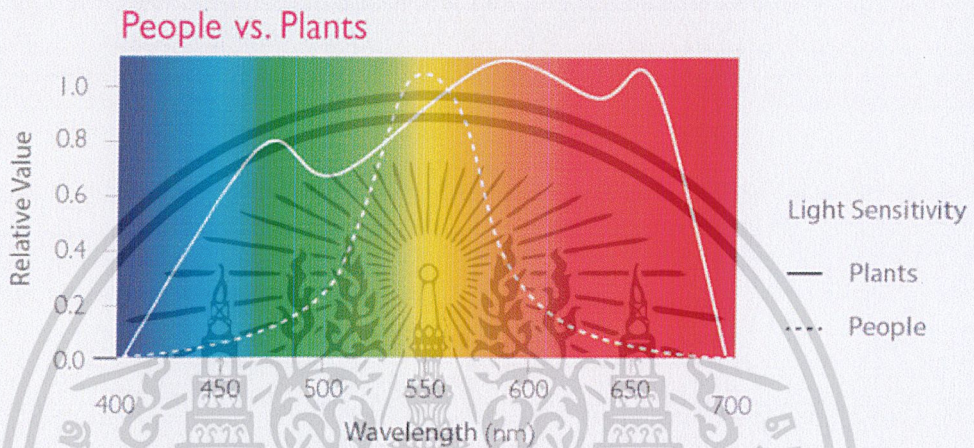


รูปที่ 2.10 เทคนิคในการทำสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หน่วยวัดแสงสำหรับพืช

ดวงตาของมนุษย์มีตัวรับแสงที่แตกต่างจากพืช ดังนั้นมนุษย์จึงเห็นแสงแตกต่างจากพืช ดวงตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงสีเหลืองและสีเขียว เห็นแสงสีแดงและสีน้ำเงินดีที่สุด แต่ไม่สามารถรับรู้แสงอินฟราเรดและรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในทางตรงกันข้ามพืชเห็นคลื่นที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิงกว่ามนุษย์ ตัวรับแสงของพืชนั้นสามารถรับรู้แสงสีน้ำเงินและสีแดงได้ดีและสามารถตรวจจับสเปกตรัมของแสงอื่น ๆ อีกมากมายรวมถึงแสงอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรด ดังรูปที่ 2.11

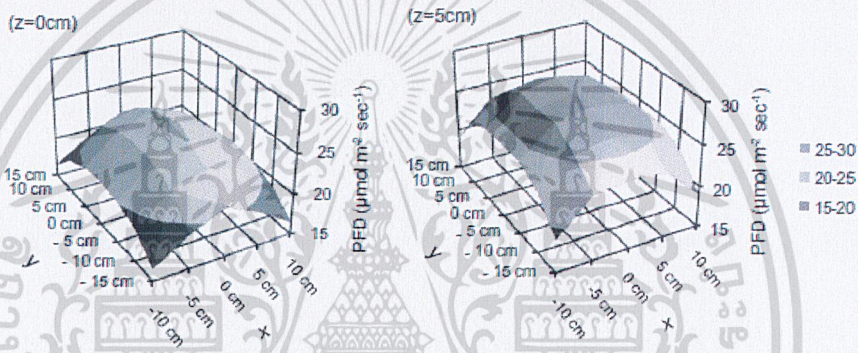


รูปที่ 2.11 การรับรู้แสงระหว่างมนุษย์และพืช

**2.5.1 การรับรู้แสงของพืช** พืชใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเรียกว่า การฉายรังสีที่ใช้งานด้วยแสงสังเคราะห์ (Photosynthetically Active Radiation) หรือ PAR คือค่าของแสงในช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตรถึง 700 นาโนเมตร เป็นช่วงแสงที่มีประโยชน์ต่อการสังเคราะห์แสงของพืช นอกเหนือจากช่วงสเปกตรัมของ PAR นอกจากนี้พืชสามารถตรวจจับความยาวคลื่นของแสงนอกช่วงนี้รวมถึงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรด ส่วนค่าลูเมน (Lumen) เป็นปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดซึ่งมองเห็นได้ด้วยตามนุษย์ สำหรับพืชเราใช้ค่าที่เรียกว่า โฟตอนในการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Photon Flux) หรือ PPF หมายถึง ปริมาณ PAR ที่ผลิตโดยแหล่งกำเนิดต่อวินาที การวัดนี้แสดงเป็นไมโครเมตรต่อวินาที ( $\mu\text{mol} / \text{s}$ ) PAR เป็นพารามิเตอร์ควอนตัมที่สำคัญเมื่อพิจารณาการให้แสงสว่างกับพืช แต่ที่สำคัญกว่านั้นคือ ความหนาแน่นโฟตอนการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Photon Flux Density) หรือ PPFD ซึ่งหมายถึงปริมาณของแสงที่พืชรับได้จริง มีหน่วยเป็นไมโครโฟตอนของช่วง PAR ที่ส่งไปยังพื้นผิวหนึ่งตารางเมตรต่อวินาที ( $\mu\text{mol} / \text{s} / \text{m}^2$  หรือ  $\mu\text{mol} \times \text{m}^2 / \text{s}^{-1}$ ) และเป็นค่าที่สำคัญที่สุดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเปรียบเทียบแสง การวัด PPFD วัดในความสูงที่กำหนดเนื่องจาก PPFD จะลดลงเมื่อเคลื่อนที่ห่างจากแหล่งกำเนิดแสงมากขึ้น เนื่องจากแสงส่วนใหญ่สว่างที่สุดใต้แหล่งกำเนิดแสงโดยตรง และความเข้มลดลงเมื่อคุณเคลื่อนไปไกลกว่า [7]

2.5.2 การกระจายแสง ในพื้นที่การปลูกนั้นพืชทุกชนิดมีการตอบสนองต่อแสงที่ใกล้เคียงกัน เป็นสิ่งสำคัญที่การกระจายแสงควรมีความสม่ำเสมอที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ตลอดพื้นที่ปลูก การกระจายแสงจะอธิบายทิศทางและความเข้มของแสงที่เปล่งแสง รูปแบบการกระจายจะถูกกำหนดโดยความสูงของแหล่งกำเนิดและมุมของแสง เมื่อความสูงของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้นจากความสูงของท้องฟ้าความเข้มของแสงจะลดลงในขณะที่มุมการกระจายแสงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.12 เป็นวัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของ PPFD แกน X คือความกว้าง แกน Y คือ ความยาวและแกน Z คือค่า PPFD [8]



รูปที่ 2.12 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของ PPFD

### 2.6 หลักการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ

การวัดค่าของแรงดันกระแสสลับจะมีการแปลงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากศูนย์ไปถึงยอดทางบวก กลับลงมายังศูนย์และไปยังยอดลบแล้วก็กลับขึ้นมายังศูนย์อีกครั้งโดยเวลาส่วนมากจะน้อยกว่าแรงดันยอด ทำให้การวัดจากผลที่แท้จริงไม่ตีจึงต้องใช้ค่าแรงดันค่าเฉลี่ยกำลังสอง ( $V_{rms}$ ) ค่าเฉลี่ยกำลังสองคือค่าไฟกระแสสลับที่เทียบเท่าไฟกระแสตรง การหาค่าเฉลี่ยกำลังสองหรือ square root mean square (RMS) สามารถหาได้ 2 วิธีด้วยกันคือจากการคำนวณและการวัดด้วยออสซิลออสโคป สมการคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองของคลื่นรูปไซน์ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของคลื่นรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในสมการที่ 2.7 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของคลื่นรูปพัลส์ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

$$V_{rms} = V_p \sqrt{D} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$V_{rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง

$V_p$  คือ แรงดันยอด

$D$  คือ ดิวตี้ไซเคิล

ในการหาค่า  $I_{rms}$  สามารถหาได้ 2 วิธีด้วยกันคือหาจากการคำนวณจากสมการที่ 2.9 และวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$I_{rms}$  คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง

$V_{rms}$  คือ แรงดันเฉลี่ยกำลังสอง

$R$  คือ ค่าความต้านทาน

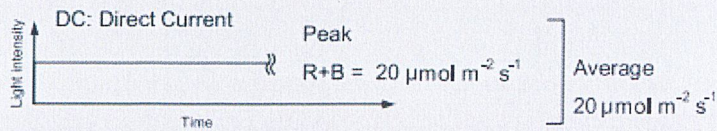
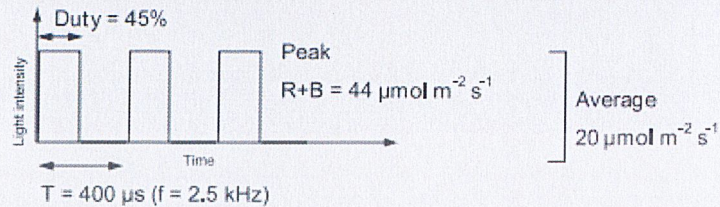
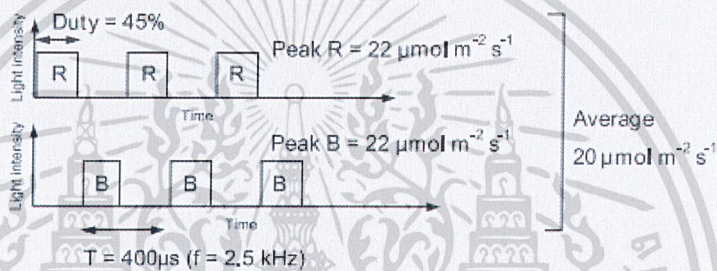
## 2.7 ทบทวนวรรณกรรม

2.7.1 งานวิจัยเรื่อง “Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation”

ออกแบบและสร้างระบบลดแสงความกว้างพัลส์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีน้ำเงิน เปรียบเทียบการเพาะปลูกของพืช *Arabidopsis thaliana* ภายใต้รูปแบบคลื่นแสงสลัวต่าง ๆ ตรวจสอบการควบคุมจังหวะของพัลส์ (เฟสของรูปแบบคลื่น) ระหว่างแสงสีแดงและสีน้ำเงินในการหรี่แสง PWM การเจริญเติบโตของพืชแตกต่างกันโดยการเปลี่ยนเฟสของพัลส์สีแดงและสีน้ำเงิน การควบคุมจังหวะเวลาของแสงสลัว PWM สำหรับการเพาะปลูกพืชมีศักยภาพที่จะทำหน้าที่เป็นวิธีในการตรวจสอบการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังรูป 2.13 [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (1) DC (R,B)

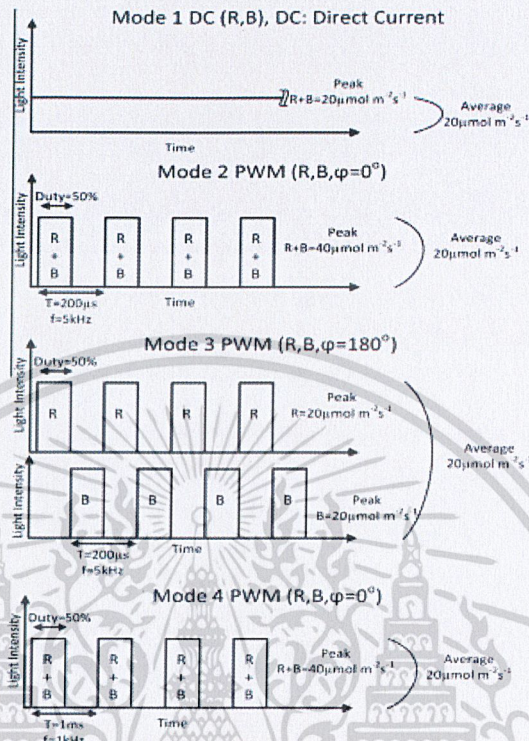
(2) PWM (R,B,  $\phi = 0^\circ$ )(3) PWM (R,B,  $\phi = 180^\circ$ )

รูปที่ 2.13 หน่วยการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับหลอดแอลอีดีที่โหมดการทำงานต่างกัน

### 2.7.2 วิจัยเรื่อง “Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation”

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษากลของการเจริญเติบโตของคาร์เนชั่นโดยใช้หลอดแอลอีดีในโหมดการทำงานต่าง ๆ ต่อการทำงานในสภาพแวดล้อมเรือนกระจกแบบอัตโนมัติ หน่วยการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับหลอดแอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (Mod1, Mod2, Mod3, Mod4) ถูกป้อนในโหมดที่แตกต่างกันและผลกระทบที่มีต่อดอกคาร์เนชั่นเมื่อเปรียบเทียบกับควบคุม ดังนั้นการทำงานจะทำงานด้วยโหมดการทำงานที่แตกต่างกันสี่โหมด การควบคุมจังหวะของพัลส์ (เฟสของรูปแบบคลื่น) ระหว่างแสงสีแดงและสีน้ำเงินในการหรีแสง PWM ได้รับการตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาในการพัฒนาดอกคาร์เนชั่นการเจริญเติบโตและระยะบานได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ ในการใช้แสงที่แตกต่างกันมีการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองปากใบพื้นที่ใบเนื้อหาคลอรอฟิลล์และดอกไม้ในดอกคาร์เนชั่นเมื่อเปรียบเทียบกับควบคุม ได้รับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mod 2 ในขณะที่เราได้รับผลลัพธ์ที่ค่อนข้างแย่กว่าในการนำ Mod 3 ไปใช้งานมากกว่าการใช้งานควบคุม ดังรูป 2.14 [9]

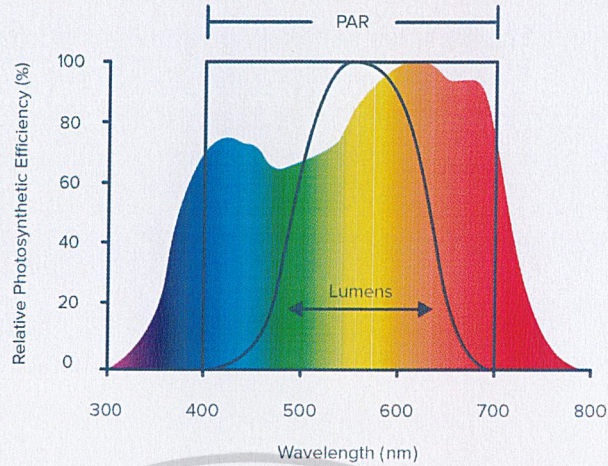


รูปที่ 2.14 หน่วยการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับแอลอีดี

### 2.7.3 งานวิจัยเรื่อง “การออกแบบแสงด้วยหลอดแอลอีดีสองสว่างสำหรับปลูกพืชในอาคารโดยอ้างอิงปริมาณแสงรวมต่อวัน”

การเพาะปลูกพืชในอาคารช่วยทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสูงตลอดทั้งปี โดยการควบคุมแสงเทียมเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง อัตราการสังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านคุณภาพ ปริมาณและระยะเวลาของแสง ปริมาณแสงของพืชเรียกว่า ส่วนปริมาณโฟตอนที่ตกลงบนพื้นผิว PAR เรียกว่า PPFD โดยผลรวมของค่า PAR ที่ได้รับต่อวันหรือค่า DLI เป็นตัวแปรสำคัญในการเพาะปลูกพืชในอาคาร บทความนี้แสดงให้เห็นถึงการว่าค่าประกอบจากค่าโฟตอนเป็นค่าความสว่างของแอลอีดี ดังรูปที่ 2.15 [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

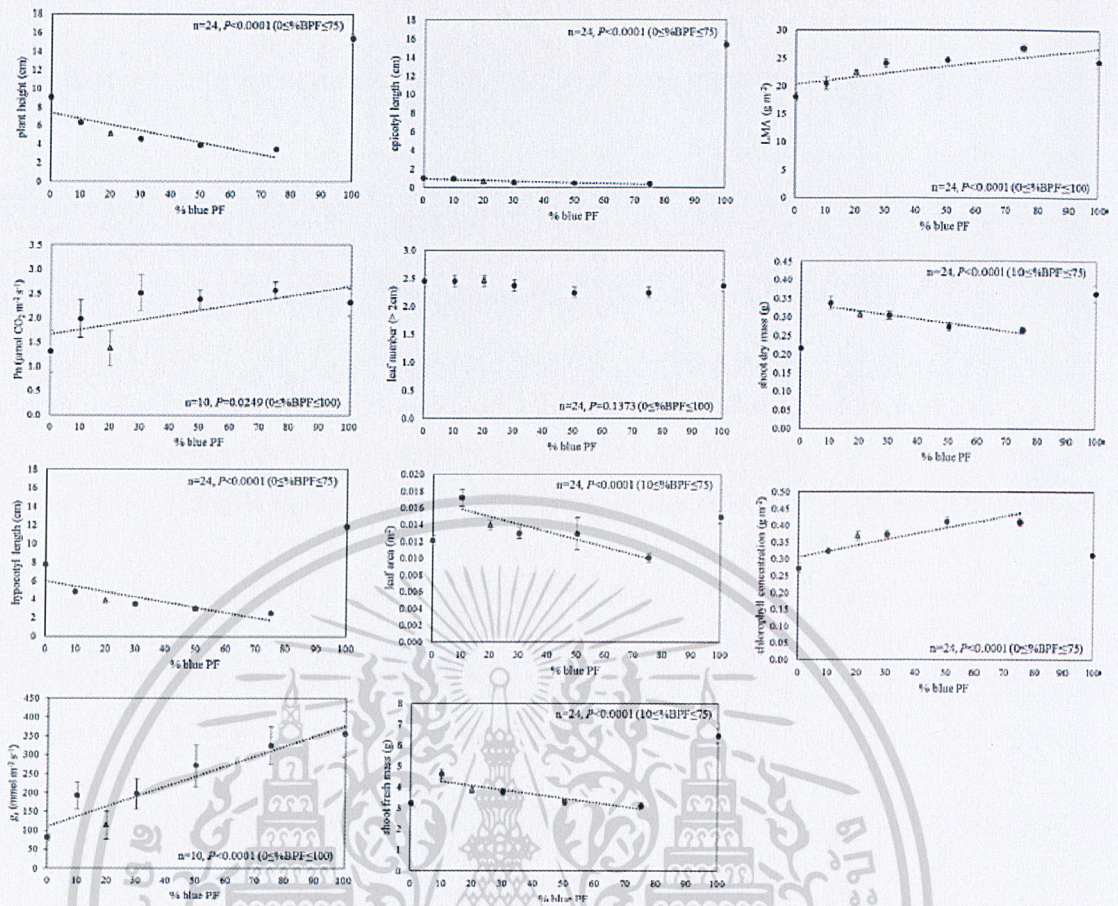


รูปที่ 2.15 การตอบสนองโดยเฉลี่ยของพืชต่อการแผ่รังสีที่ใช้แสงสังเคราะห์

#### 2.7.4 งานวิจัยเรื่อง “Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs”

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินต้นกล้าแตงกวา (*Cucumis sativus*) การตอบสนองทางสรีรวิทยาต่ออัตราส่วนโฟตอนฟลักซ์ (PF) สีน้ำเงิน (B) และสีแดง (R) ที่แตกต่างกันโดยใช้ไฟ LED ต้นกล้าแตงกวา (cv. Cumlaude) ถูกปลูกให้เจริญเติบโตจนกระทั่งระยะใบไม่อยู่ช่วงที่สอง (17 วัน) ด้วยหลอดแอลอีดีเป็นเวลา 18 ชั่วโมงต่อวัน โดยใช้อัตราส่วนของสีแอลอีดีคือ OB: 100R%, 10B: 90R%, 30B: 70R%, 50B: 50R%, 75B: 25R%, 100B: 0R% และมีการเพิ่มแอลอีดีของสีเขียว (G) ในอัตราส่วน 20B: 28G: 52R% ในการใช้แอลอีดีแบบ B: G: R ความยาวลำต้นใต้ใบเลี้ยงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของสีน้ำเงิน ความยาวลำต้นใต้ใบเลี้ยงโดยใช้แอลอีดีแบบ OB: 100R% สูงกว่าการใช้แอลอีดีแบบ 75B: 25R ถึง 164% พืชที่อยู่ภายใต้การใช้แอลอีดีแบบ 100B: 0R% มีความสูงของพืชที่สูงกว่า ลำต้นใต้ใบเลี้ยงและความยาวเอพิคอติลมากกว่าพืชที่อยู่ภายใต้การใช้แอลอีดีแบบอื่น ๆ ทั้งหมด ตัวอย่างเช่นความยาวของลำต้นใต้ใบเลี้ยงภายใต้ 100B: 0R% สูงกว่า 69% ในการใช้แอลอีดีแบบ OB: 100R และสูงกว่าในการรักษา 75B: 25R% ถึง 346% ดังรูป 2.16 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ผลของคุณภาพแสง (การเพิ่มขึ้นของไฟตอนฟลักซ์) ต่อการตอบสนองทางสัณฐานวิทยาของกล้าไม้แดงกวาง

### 2.7.5 งานวิจัยเรื่อง “The research on LED supplementary lighting system for plants”

แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสามารถนำมาใช้เพื่อทำให้ผักโตเร็วขึ้นในระบบการผลิตพืชแบบปิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่ความเข้มของแสงไม่เพียงพอ เพื่อศึกษาการปรับปรุงอัตราการเติบโตของมะเขือเทศเชอร์รี่โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงแอลอีดีเราได้ออกแบบระบบไฟ แอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงิน (การกระจายสเปกตรัมสัมพันธ์) ในอัตราส่วนที่แน่นอนและดำเนินการผลิตระบบแสงเสริมแอลอีดีเราดำเนินการติดตามสถานการณ์การเติบโตของมะเขือเทศเชอร์รี่กลุ่มหนึ่งภายใต้ระบบแอลอีดีและกลุ่มอื่น ๆ ของมะเขือเทศเชอร์รี่ที่ไม่มีระบบไฟเสริมแอลอีดีสังเกตและเปรียบเทียบกับอัตราการเติบโตของมะเขือเทศสองกลุ่มในช่วงเวลาที่ต่างกัน ในการทดลองของใช้ระบบเสริมแสงกับแอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นสูงสุดคือ 650 นาโนเมตรและ 460

นาโนเมตรตามลำดับและอัตราส่วนการกระจายสเปกตรัมสัมพันธ์คือ 4 : 1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการมีไฟสีน้ำเงิน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าระบบไฟส่องสว่างเสริมแอลอีดีช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของมะเขือเทศอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างของความยาวคลื่นระหว่างขั้นตอนการเจริญเติบโตของใบและการเจริญเติบโตของใบและช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโตของผลไม้บานบทความนี้แสดงสวิตช์ตัวเลือกสัดส่วนแสงสีแดงและสีน้ำเงินที่สามารถนำไปใช้กับระบบไฟเสริมแอลอีดี ดังรูปที่ 2.17 [12]



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบสถานการณ์การเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศของทั้งสองกลุ่ม หลังจากสามสัปดาห์

### 2.7.6 งานวิจัยเรื่อง “Tomato seedling physiological responses under different percentages of blue and red photon flux ratios using LEDs and cool white fluorescent lamps”

การปรับแต่งสเปกตรัมของหลอดไฟสามารถทำให้ได้ลักษณะพืชที่ต้องการเมื่อปลูกโดยใช้แสงไฟฟ้าจากแหล่งเดียว การปลูกพืชผักสามารถปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดภายใต้ระบบการผลิตในร่มพร้อมแสงไฟฟ้า แม้ว่าแสงเฉพาะที่ได้รับการพัฒนาเพื่อปรับปรุงการเติบโตของพืช การพัฒนาและสัญญาณวิทยาเช่นเดียวกับการลดการใช้ไฟฟ้า การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเจริญเติบโตและสัญญาณวิทยาของสารสกัดจากต้นมะเขือเทศกับอัตราส่วนโฟตอนฟลักซ์ (PF) สีน้ำเงินและสีแดง (B: R) โฟตอนฟลูออเรสเซนต์ภายใต้หลอดแอลอีดีและหลอดฟลูออเรสเซนต์สีขาว ต้นมะเขือเทศถูกปลูกในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ใช้ไฟแอลอีดีเจ็ตรูปแบบแสงที่มีอัตราส่วนสีฟ้า (B) สีเขียว (G) และสีแดง (R) คือ 100R, 10B: 90R, 20B: 28G: 52R, 30B: 70R, 50B: 50R, 75B: 25R และ 100B ความยาวของลำต้นใต้ใบเลี้ยงลดลงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสูงถึง 75% พื้นที่ของใบพืชเพิ่มขึ้น 64–72% ภายใต้การรักษาที่ปล่อยทั้งสีน้ำเงินและสีแดงมากกว่าในเอกสาร 100B และ 100R ในทำนองเดียวกันมวลมะเขือเทศสด จำนวนปากใบและความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอโรฟิลล์เทียบได้กับการอัตราส่วนของสีน้ำเงินและสีแดงสูงกว่าใน 100B and 100R อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของพืชในอัตราส่วน 30B: 70R มากกว่า 42% ในอัตราส่วน 10B: 90R ความเข้มข้นของแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสูงถึง 75% นอกจากนี้พืชใน 30B: 70R และ 50B: 50R มีมวลมากกว่า 39% และ 36% มากกว่าใน CWF นอกจากนี้ไฟแอลอีดี 30B: 70R และ 50B: 50R มีประสิทธิภาพในการเติบโต 172% มากกว่า หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเพิ่มของแสงสีเขียวไม่มีผลต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาของมะเขือเทศลักษณะทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของพืช ดังรูปที่ 2.18 [13]

Physiological parameter	Control	100R	10B:90R	20B:28G:52R	30B:70R	50B:50R	75B:25R	100B
Hypocotyl length (cm)	CWF	+53%	+45%	+28%	+24%	+22%	+16%	+48%
Stem diameter (mm)	CWF	-14%	+19%	+15%	+15%	+21%	-	-
Leaf area (m <sup>2</sup> )	CWF	-41%	-	-	-	-	-	-39%
Leaf number	CWF	-	-	+13%	-	-	-	-
Fresh mass	CWF	-	+38%	+31%	+33%	+40%	-	-
Dry mass	CWF	-	-	-	+39%	+36%	-	-
Chlorophyll per leaf area (g m <sup>-2</sup> )	CWF	-	-	-	-	-	-	-34%
Anthocyanin (mg g <sup>-1</sup> )	CWF	-78%	-	-	-	-	-	-57%
Leaf Pn (μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	CWF	-	-	-	-	-	-	-
g <sub>s</sub> (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	CWF	-	-	-	-	-	-	-
Plant compactness (g cm <sup>-1</sup> )	CWF	-57%	-	-	-	-	-	-56%

รูปที่ 2.18 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตสำหรับการรักษาด้วยแสงที่แตกต่างกัน

### 2.7.7 งานวิจัยเรื่อง “Spectral quality of supplemental LED grow light permanently alters stomatal functioning and chilling tolerance in basil”

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าการดัดแปลงสเปกตรัมของหลอดไฟแอลอีดีในห้องเรือนกระจกซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนประสิทธิภาพหลังการเพาะปลูกของโหระพาซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดอาการอาการสะท้อนหนาว (CI) ในการทดลองปลูกโหระพาภายใต้เรือนกระจกโดยใช้ไฟหลอดแอลอีดีสีแบบการทดลอง การทดลองแรกคือสีแดง 80% สีฟ้า 20% สีฟ้า การทดลองที่สองคือ สีแดง 80% สีฟ้า 20% และ UV-A การทดลองที่สามคือ สีแดง 40% สีฟ้า 60% และการทดลองที่สี่คือสีแดง 80% และสีเขียว ตามด้วยการจำลองอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวรวมถึงการรักษาความเย็น สมบัติทางกายวิภาคของช่องปากและระดับของฮอร์โมนควบคุม, abscisic acid (ABA) และ ABA glucosylester (ABA-GE) พร้อมกับน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ กรดไขมันและ lipoxigenase (LOX) ถูกกำหนดเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเจริญเติบโต การรักษาด้วยแสงแสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบต่อความทนทานต่อความเย็นและอายุการเก็บรักษาโดยอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของแสงสีฟ้าที่มีผลกระทบต่อด้านลบและแสงสีเขียวที่มีผลในเชิงบวกต่อความทนทานต่อการแช่เย็น ความแตกต่างของอายุการเก็บรักษานั้นดูเหมือนจะใกล้เคียงโดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของปากใบเท่านั้น ความหนาแน่นปากใบ (จำนวนปากใบต่อพื้นที่ใบ SD) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของแสงสีฟ้าในขณะที่แสงสีเขียวแสดงให้เห็นว่า SD ลดลง [ABA] และ [ABA-GE] แสดงความสัมพันธ์เชิงบวกกับ SD

ไม่ว่ากรรมใดๆ พงสน อภทงหามมเหตดแปลงเนื้อหาและต้องอ งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการมาใช้

ในขณะที่อัตราส่วนของ [ABA-GE] / [ABA] มีความสัมพันธ์ทางลบกับ SD ที่เพิ่มขึ้น จึงแนะนำให้มีความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างการกักเก็บน้ำของใบกับการทนต่อการถูกทำลายในใบโพธิ์ป่า ดังรูปที่ 2.19 [14]

	R80/B20	R40/B60	R80/B20 + UVA	R80/G20
Plant fresh weight (g)	42.4 ± 2.1	40.9 ± 2.0	38.9 ± 1.3	39.3 ± 1.8
Plant dry weight (g)	3.6 ± 0.2	3.7 ± 0.2	3.2 ± 0.1	3.2 ± 0.2
Leaf fresh weight (g)	30.2 ± 1.2	29.3 ± 1.2	28.0 ± 0.9	28.7 ± 1.3
Leaf area (cm <sup>2</sup> )	919 ± 37	890 ± 32	816 ± 31	879 ± 29
Height (cm)	17.2 ± 1.0	16.6 ± 0.5	15.4 ± 0.3	15.5 ± 0.4
LMA (g m <sup>-2</sup> )	30.2 ± 0.6 ab	32.3 ± 1.0 a	30.7 ± 0.4 ab	28.4 ± 0.7 b
SLA (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	332.1 ± 6.6 ab	311.6 ± 9.6 b	326.6 ± 4.2 ab	353.6 ± 9.4 a
Leaf DW% (g g <sup>-1</sup> )	9.2 ± 0.2 ab	9.8 ± 0.3 a	8.9 ± 0.1 b	8.7 ± 0.1 b
LeafDW/Stem DW (g g <sup>-1</sup> )	3.4 ± 0.2	3.5 ± 0.2	3.6 ± 0.1	3.5 ± 0.1

รูปที่ 2.19 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตสำหรับการรักษาด้วยแสงที่แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

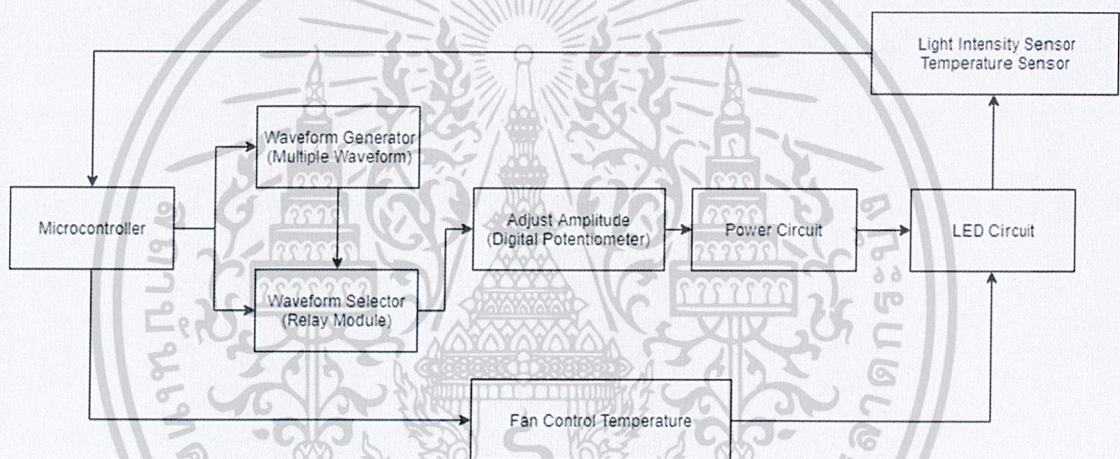
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 ออกแบบการทดลอง

โครงการพิเศษครั้งนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงโดยมีสัญญาณขาเข้ารูปแบบสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ดังรูป 3.1

ในการออกแบบการทดลอง ต้องศึกษากระบวนการทั้งหมดที่เกี่ยวข้องแล้วทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อพีซ จากนั้นทำการสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สัญญาณต่างกัน และทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับพีซ



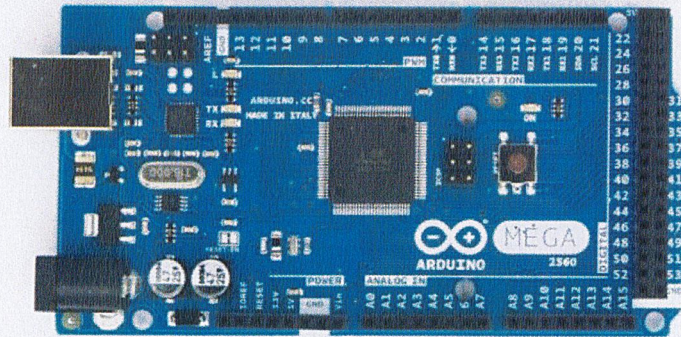
รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานทั้งหมด

#### 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

##### 3.2.1 Arduino Mega

Arduino Mega เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูป 3.2 ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดโดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการสื่อสารแบบพอร์ตอนุกรม (RS232) ได้แก่ควบคุมการหรี่ของแสงไฟแอลอีดี ควบคุมความเข้มของแสงสว่าง ควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องการทดลอง ผ่านชุดคำสั่งที่กำหนดไว้

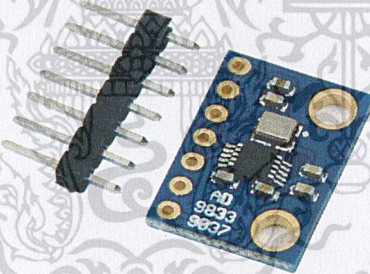
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 Arduino Mega

### 3.2.2 ตัวสร้างสัญญาณ AD9833

เป็นวงจรรำเนิดสัญญาณรูปคลื่นพลังงานต่ำ สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณสามเหลี่ยม อีกทั้งยังควบคุมความถี่และเฟส ทั้งหมดนี้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถควบคุมจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเตอร์เฟส SPI ความถี่ที่ออกมาจาก AD9833 ได้สูงสุดถึง 12.5 MHz ใช้สัญญาณนาฬิกา (Clock) 25 MHz ความละเอียดอยู่ที่ 0.1 โดยสัญญาณนาฬิกา 25 MHz เอาต์พุตของสัญญาณสูงสุด (Vp-p) คือ 600 มิลลิโวลต์ (mV) ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวสร้างสัญญาณ AD9833

### 3.2.3 วงจรขยายสัญญาณ

เนื่องจาก Module AD9833 มีแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาเพียง 600 มิลลิโวลต์ ซึ่งในการขับแรงดันให้แอลอีดีต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 0 ถึง 2 โวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการหรือ OP-AMP ดังรูป 3.4 เป็นตัวขยายสัญญาณโดยการต่อวงจขยายแรงดันไฟฟ้าก็วงจรแบ่งแรงดัน สำหรับเพิ่มโวลต์และปรับออฟเซต ซึ่งในการทดลองใช้ตัวขยายสัญญาณ เบอร์ OP07A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ออมแอมป์จะรับสัญญาณเอาต์พุตจาก AD9833 เพื่อขยายสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าเป็น 6 เท่า ซึ่งอัตราการขยายนี้ขึ้นอยู่กับตัวต้านทานภายนอก 2 ตัว ในการสร้างวงจรนี้ใช้ตัวต้านทานค่า 1 กิโลโอห์ม (K $\Omega$ ) และ 5 กิโลโอห์ม (K $\Omega$ ) ดังนั้นเอาต์พุตสูงสุดที่ออกมาคือ 6 โวลต์ ตามการคำนวณดังนี้

$$V_{out} = 1 + \frac{R_1}{R_2} V_{in} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = 1 + \frac{5K\Omega}{1K\Omega} V_{in} \quad (3.2)$$

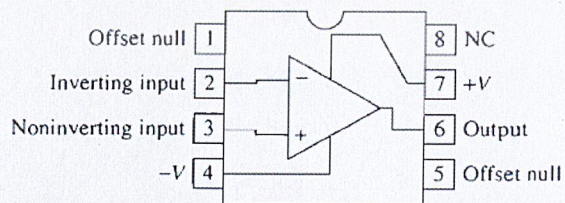
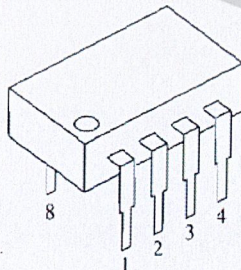
$$V_{out} = 6V_{in} \quad (3.3)$$

3.2.3.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสนี้อัตราการขยายเท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการการกลับเฟสจากแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ผลของวงจรมีใช้สำหรับปรับออฟเซตให้สัญญาณ ตามการคำนวณดังนี้

$$V_{out} = -\frac{R_1}{R_2} V_{in} \quad (3.4)$$

$$V_{out} = -\frac{1K\Omega}{1K\Omega} V_{in} \quad (3.5)$$

$$V_{out} = -V_{in} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.4 ตัวขยายสัญญาณ OP07A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 วงจรรวมผลรวมของสัญญาณ จะนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสและวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสรวมกัน ซึ่งจะได้เอาต์พุตออกมามีค่า 6 โวลต์ ที่ระดับเหนือกราว ส่วนเอาต์พุตที่ต้องการคือ 2 โวลต์ ที่ระดับเหนือกราวด์ จึงต่อตัวต้านทานและตัวต้านทานปรับค่าได้ให้เป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า สำหรับให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ตามการคำนวณดังนี้

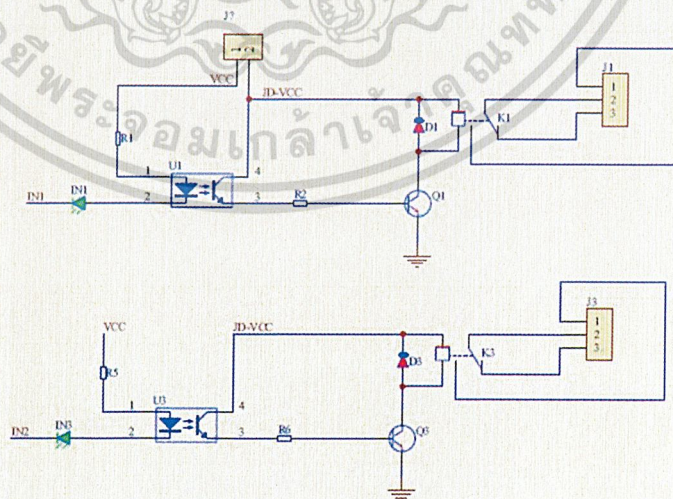
$$V_{out} = \left( \frac{V_{in}R_3}{R_1} + \frac{V_{in}R_3}{R_2} \right) \quad (3.7)$$

$$V_{out} = \left( \frac{V_{in}(1K\Omega)}{1K\Omega} + \frac{V_{in}(1K\Omega)}{1K\Omega} \right) \quad (3.8)$$

$$V_{out} = V_{in} \quad (3.9)$$

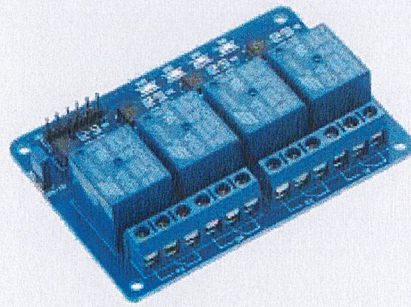
### 3.2.4 รีเลย์แบบหน้าสัมผัส

เนื่องจากสัญญาณรูปแบบคลื่นที่กำเนิดจากโมดูลกำเนิดสัญญาณและไมโครคอนโทรลเลอร์มีการกำเนิดออกมาพร้อม ๆ กันเป็นผลทำให้ต้องมีการเลือกเพียงสัญญาณเดียวที่จะให้ออกไปสู่วงจรภาคกำลัง โดยวิธีการเลือกสัญญาณนั้นได้มีการนำรีเลย์แบบหน้าสัมผัส ดังรูปที่ 3.5ข. และรูปที่ 3.5ก. เป็นแผนผังของรีเลย์แบบหน้าสัมผัส เพื่อใช้ในการเลือกสัญญาณ โดยการนำสัญญาณจากโมดูลกำเนิดสัญญาณและไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ารีเลย์และเพื่อที่จะให้มีสัญญาณออกเพียงทางเดียว ได้มีการควบคุมการเปิดปิดของรีเลย์ในแต่ละตัวเพื่อเป็นการเลือกสัญญาณทางขาออก



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



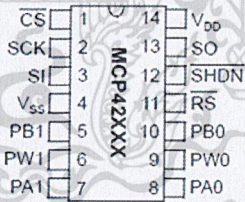
(ข)

รูปที่ 3.5 รีเลย์แบบหน้าสัมผัส

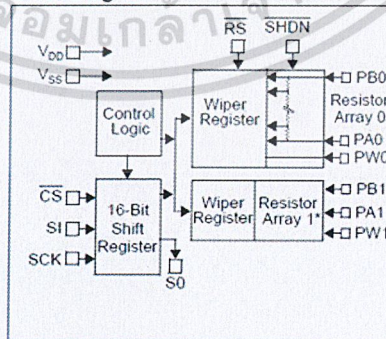
(ก) Relay Module Schematic Diagram (ข) โมดูลรีเลย์แบบหน้าสัมผัส

3.2.5 Digital Potentiometer (MCP42010)

จากรูป 3.6ข. Digital Potentiometer หรือตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล ทำหน้าที่ในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ออกมาจากรีเลย์ ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 โวลต์ โดยการปรับค่าความต้านทานที่ 0 ถึง 10 กิโลโอห์ม และจากรูป 3.6ก. เป็นแผนผังของ Digital Potentiometer

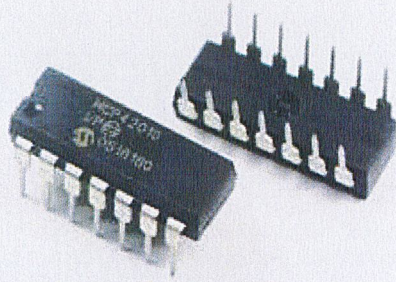


Block Diagram



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

## รูปที่ 3.6 Digital Potentiometer

(ก) Digital Potentiometer Schematic Diagram

(ข) Digital Potentiometer (MCP42010)

## 3.2.6 วงจรขับกระแส

วงจรขับกระแสเป็นการต่อวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current Source) ร่วมกับวงจรทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตัน ดังรูปที่ 3.5 สัญญาณเอาต์พุตจาก Digital Potentiometer จะเข้าอินพุตบวกของออปแอมป์เพื่อเปรียบเทียบแรงดัน ตัวต้านทาน 0.1 โอห์มจะต่อกับอินพุตลบของออปแอมป์เพื่อกำหนดเอาต์พุตของกระแสโดยคำนวณจากกฎของโอห์มดังสมการที่ 3.10

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$I$  คือ เอาต์พุตของกระแส

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

$R$  คือ ตัวต้านทาน

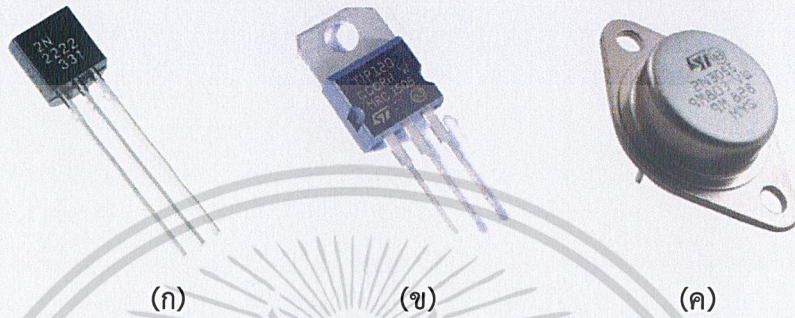
$$I = \frac{1V}{0.1\Omega} \quad (3.11)$$

$$I = 10 A \quad (3.12)$$

ดังนั้นเอาต์พุตของกระแสสูงสุดอยู่ที่ 10 แอมแปร์ ส่วนเอาต์พุตของออปแอมป์จะต่อกับตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อจำกัดกระแสเบส และป้องกันทรานซิสเตอร์เสียหาย ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN 3 ตัว คือ 2N2222 TIP120 2N3055 ดังรูปที่ 3.7ก. 3.7ข. 3.7ค.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ซึ่งเอาต์พุตของออปแอมป์จะต่อกับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N2222 เพื่อขยายกระแสไฟฟ้าครั้งแรก ส่วนขาอิมิตเตอร์ของ 2N2222 จะต่อกับขาเบสของทรานซิสเตอร์ TIP120 กระแสไฟฟ้าจะขยายเพิ่มอีกครั้งหนึ่ง ส่วนขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ TIP120 ต่อกับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N3055 กระแสไฟฟ้าจะขยายเพิ่มเป็นครั้งสุดท้าย กระแสไฟฟ้าที่ได้ออกมามีค่าสูงสุด 9.6 แอมป์เพื่อขับกระแสไฟฟ้าให้แอลอีดี



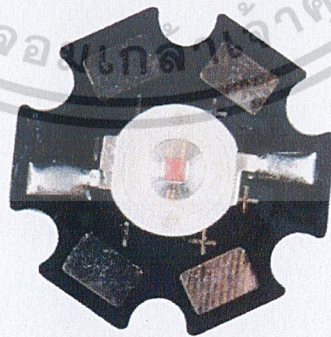
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.7 ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการขับกระแส

(ก) ทรานซิสเตอร์ 2N2222 (ข) ทรานซิสเตอร์ TIP120 (ค) ทรานซิสเตอร์ 2N3055

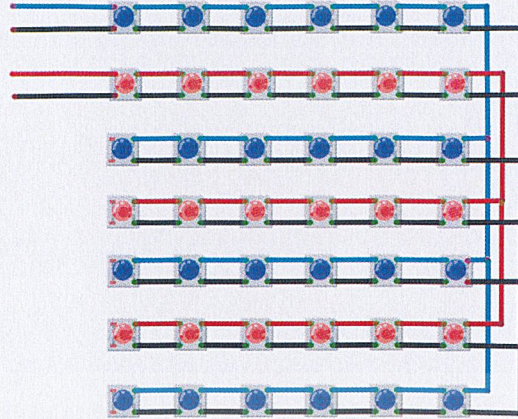
### 3.2.7 แอลอีดี

ในการทดลองใช้แอลอีดี High Power 3 W ดังรูป 3.8 ใช้แอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงิน อย่างละ 24 ดวงทั้งหมด 48 ดวงต่อขนานกันดังรูป 3.9 โดยแอลอีดีแต่ละดวงใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ดวงละ 400 มิลลิแอมป์แอมป์ จะทำกระแสไฟฟ้ารวมอยู่ที่ 9.6 แอมป์แอมป์ ของแต่ละสี



รูปที่ 3.8 แอลอีดี 3 W

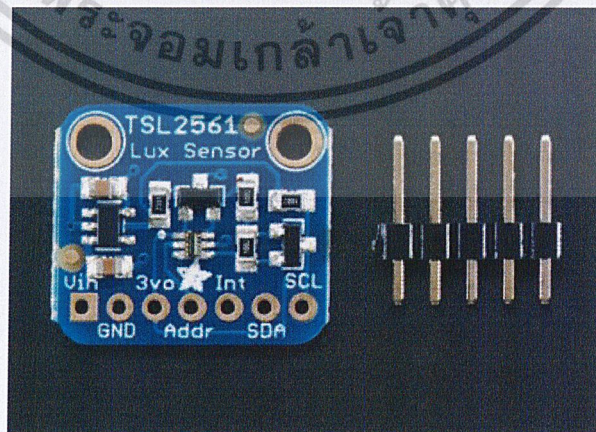
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การต่อแอลอีดีแต่ละสี

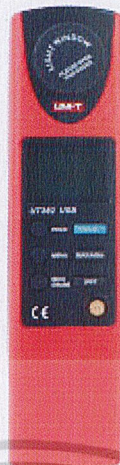
### 3.2.8 เซนเซอร์วัดความเข้มแสง

ในระบบควบคุมแสงเทียมมีการควบคุมความเข้มของแสงแอลอีดีโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรแอลอีดีโดยงานวิจัยนี้มีการวัดค่าความเข้มของแสงของแอลอีดีโดยใช้เซนเซอร์ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดความเข้มของแสงคือ TSL2561 ดังรูป 3.10 เป็นเซนเซอร์ที่แปลงความเข้มแสงเป็นค่าดิจิทัลช่วงในการตรวจจับแสง สามารถตรวจจับแสงได้ตั้งแต่ 0.1 ลักซ์ถึง 40,000 ลักซ์ซึ่งเซนเซอร์ชนิดนี้สามารถจับแสงอินฟราเรดได้ไปจนถึงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้และมีอินเทอร์เฟซแบบดิจิตัล (I2C) และใช้ลักซ์มิเตอร์ดิจิตัล UT382 ดังรูป 3.11 เป็นตัวเปรียบเทียบในการวัดความเข้มแสงระหว่างค่าที่อ่านได้จาก TSL2561 กับลักซ์มิเตอร์ดิจิตัลและใช้ในการวัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องการทดลองโดยการวัดแต่ละจุดภายในกล่อง



รูปที่ 3.10 เซนเซอร์วัดแสง TSL2561

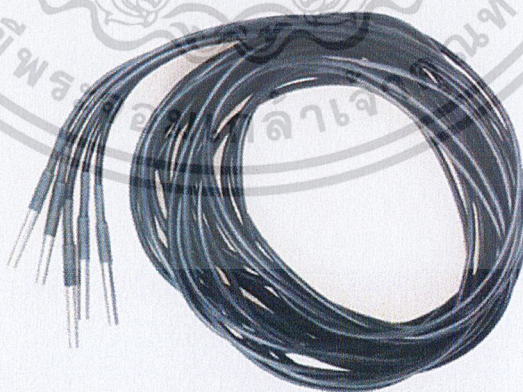
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาคนี้ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ลักซ์มิเตอร์ดิจิทัล UT382

### 3.2.9 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในการเพาะปลูกพืชอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมนั้นเป็นสิ่งสำคัญจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมของต้นพืชโดยงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องการทดลองโดยการวัดค่าอุณหภูมินั้น เซนเซอร์ที่ใช้คือ DS18B20 ดังรูป 3.12 ในการวัดอุณหภูมิ โดยเซนเซอร์ตัวนี้วัดได้ในช่วงอุณหภูมิ -55 องศาเซลเซียสถึง 125 องศาเซลเซียส ซึ่งเซนเซอร์ตัวนี้มีจุดเด่นในการรับส่งข้อมูลที่เรียกว่า 1-Wire (OneWire) หรือการรับส่งข้อมูลเพียงสายเส้นเดียวและยังสามารถนำเซนเซอร์มาต่อหลายๆตัวเป็นแบบบัส (Bus) ได้อีกด้วย

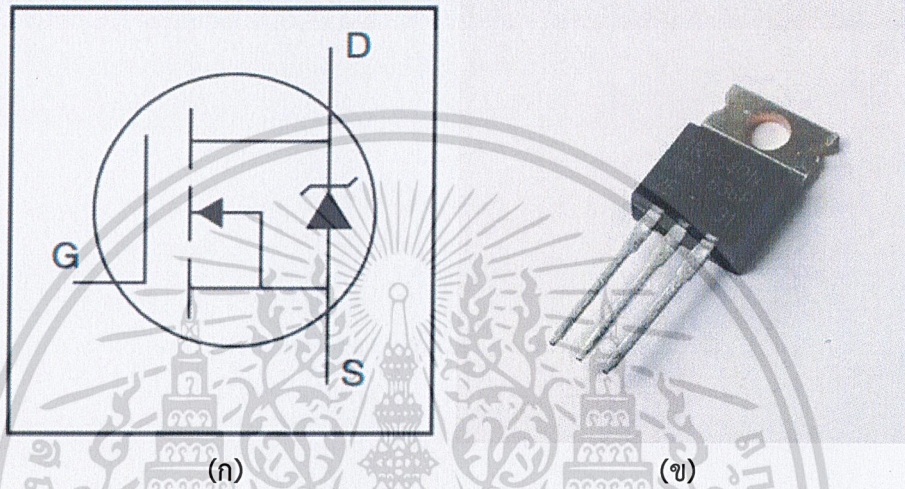


รูปที่ 3.12 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.10 มอสเฟต IRF540N

ดังรูป 3.13ก. 3.13ข. คือมอสเฟต IRF540N ซึ่งเป็นมอสเฟตชนิด n-channel ใช้ขับกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมพัลลวมแบบ PWM โดยสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 100 โวลต์ โดยหลักการทำงานของมอสเฟตชนิดนี้คือการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาเกต เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกตสูงกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านมากถ้าแรงดันไฟฟ้าขาเกตต่ำกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านน้อย

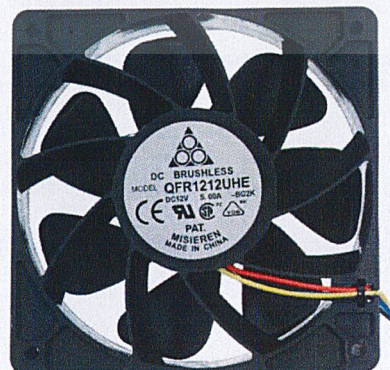


รูปที่ 3.13 มอสเฟต

(ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟต IRF540N (ข) มอสเฟต IRF540N

### 3.2.11 พัดลม 12 V DC

ในการควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องการทดลองใช้พัดลม 12 โวลต์ ดังรูป 3.14 ในการระบายความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยหลักการทำงานนั้นใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายในกล่องเมื่ออุณหภูมิที่วัดได้มีค่าสูงเกินที่กำหนดไว้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการควบคุมมอสเฟตแบบ PWM เพื่อนำไปขับพัดลมให้ทำงาน



รูปที่ 3.14 พัดลม 12 V DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

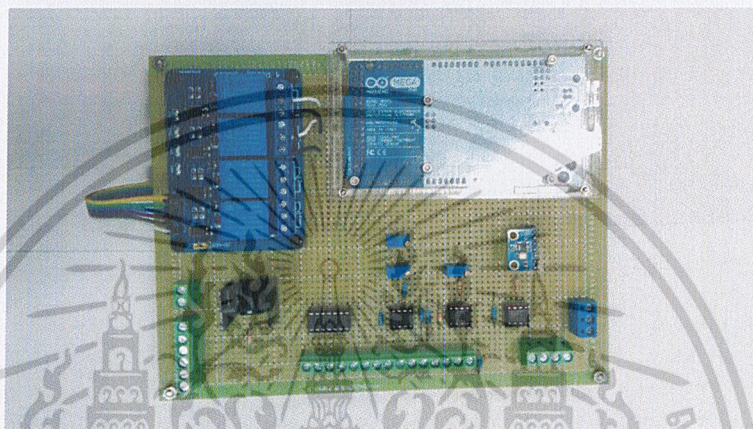
### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 การสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับแอลอีดีโดยสัญญาณต่าง ๆ

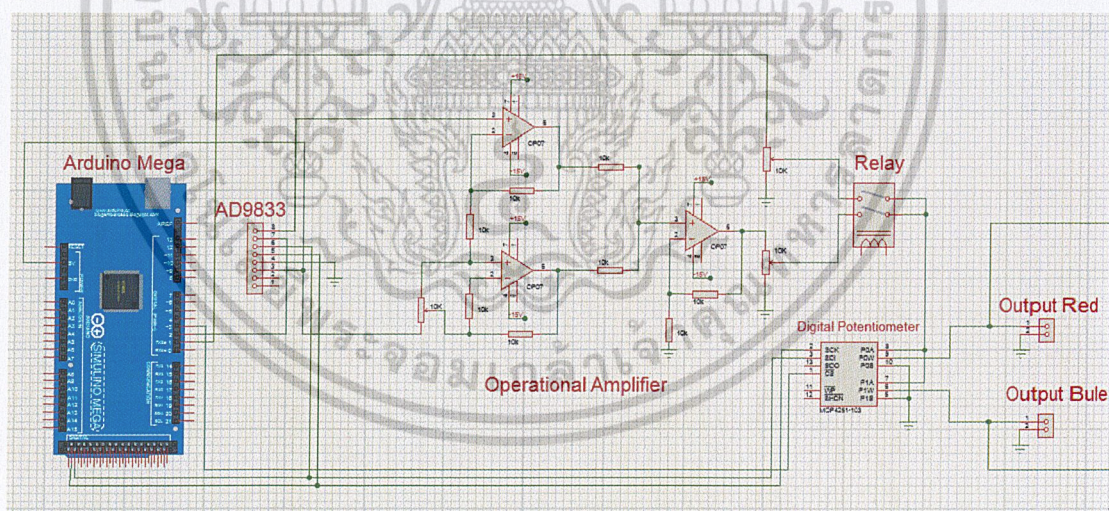
โดยจะแบ่งเป็นภาคควบคุมสัญญาณและภาคแหล่งจ่ายไฟ

##### 3.3.1.1 ภาคควบคุมสัญญาณ

Arduino Mega เป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวสร้างสัญญาณรีเลย์และ Digital Potentiometer โดยมีวงจรขยายแรงดันต่อร่วม ดังรูป 3.15ก. และ Schematic Diagram ของวงจรขยายสัญญาณ ดังรูป 3.15ข.



(ก)



(ข)

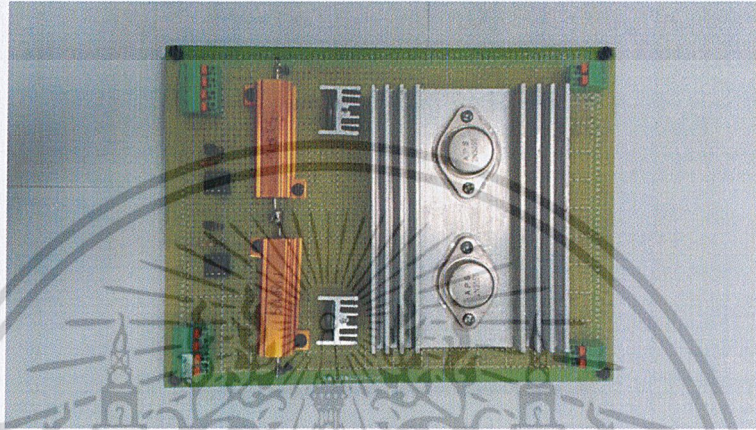
รูปที่ 3.15 วงจรขยายสัญญาณ

(ก) ภาพวงจรจริง (ข) Schematic Diagram

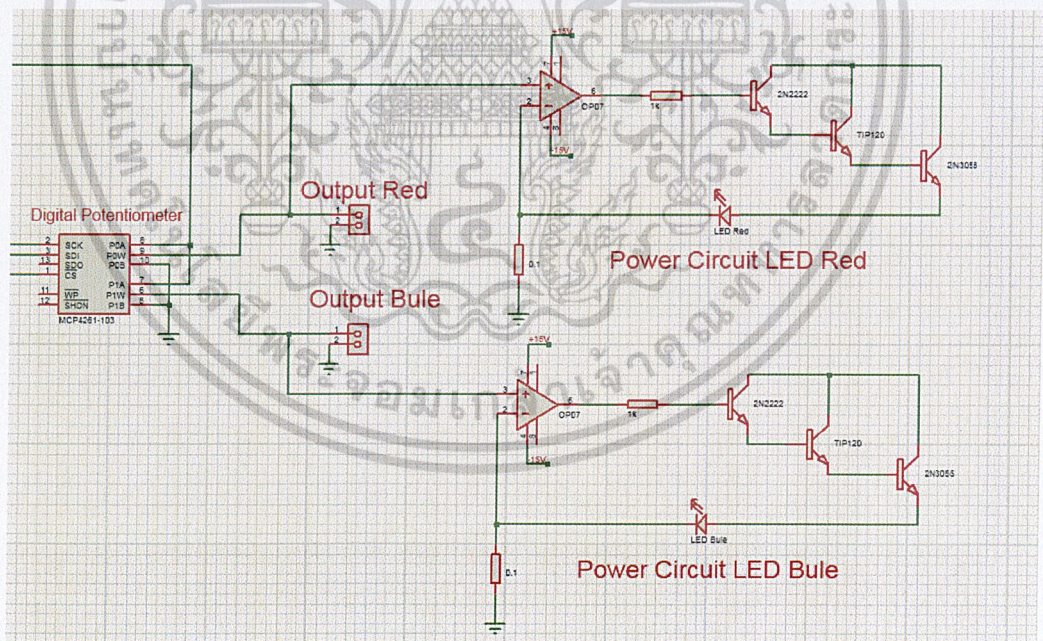
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟ

จากรูป 3.15ข. วงจรขยายสัญญาณถูกนำมาต่อร่วมกับวงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าต่อร่วมกับวงจรทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตันดังรูป 3.16ก. และรูป 3.16ข. คือ Schematic Diagram ของวงจรขับกระแส



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 วงจรขับกระแส

(ก) ภาพวงจรจริง (ข) Schematic Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ขั้นตอนการควบคุม

ระบบควบคุมการทำงานทั้งหมดถูกควบคุมโดยโปรแกรม Docklight ซึ่งตัวโปรแกรมจะเป็นตัวสั่งการทำงานของ Arduino Mega ในหน้าของโปรแกรมสามารถควบคุมรูปแบบคลื่นความถี่ ดิวตี้ไซเคิล แอมพลิจูดของสัญญาณและสามารถรับค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิ ในหน้าโปรแกรมฝั่งซ้ายจะเป็นส่วน Display Control ส่วนฝั่งขวาจะเป็นส่วน Display Monitor ดังรูป 3.17

ความหมายของคำสั่งที่ใช้ในการควบคุม

- SINE\_WAVE

หมายถึง การกำหนดสัญญาณเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นไซน์

- TRIANGLE\_WAVE

หมายถึง การกำหนดสัญญาณเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม

- SQUARE\_WAVE

หมายถึง การกำหนดสัญญาณเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

- Frequency\_SINE TRIANGLE\_SQUARE (Hz)

หมายถึง การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

- Duty\_SQUARE (%)

หมายถึง การกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

- RED\_Amplitude\_Waveform (mV) (MAX= 2000 mV, MIN= 0 mV)

หมายถึง การกำหนดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mV) ของแสงสีแดง

- RED\_Amplitude\_UP

หมายถึง คำสั่งนี้จะเป็นการเพิ่มแอมพลิจูดขึ้นตามที่กำหนดของแสงสีแดง

- RED\_Amplitude\_DOWN

หมายถึง คำสั่งนี้จะเป็นการลดแอมพลิจูดลงตามที่กำหนดของแสงสีแดง

- RED\_LUX\_Control (LUX)

หมายถึง การกำหนดค่าความเข้มแสงสีแดงในหน่วยลักซ์ (LUX)

- BLUE\_Amplitude\_Waveform (mA) (MAX= 2000 mV, MIN= 0mV)

หมายถึง การกำหนดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mV) ของแสงสีน้ำเงิน

- BLUE\_Amplitude\_UP

หมายถึง คำสั่งนี้จะเป็นการเพิ่มแอมพลิจูดขึ้นตามที่กำหนดของแสงสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. การวัดความเข้มแสง ทำการวัดความเข้มแสงโดยใช้เซนเซอร์ TSL2561 และลักซ์มิเตอร์ดิจิทัล UT382 ณ จุดที่มีการกระจายแสงสูงสุด โดยสัญญาณที่ให้กับแอลอีดีเป็นรูปแบบสัญญาณที่ต่างกัน คือสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณแบบเชิงเส้นที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Vin) ตั้งแต่ 0 โวลต์ถึง 2 โวลต์ โดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า 20 ครั้งครั้งละ 100 มิลลิโวลต์ ทำการทดลองนี้กับแอลอีดีสีแดงและแอลอีดีสีน้ำเงิน อีกทั้งทำการวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Vin) แรงดันไฟฟ้าขาออก (Vout) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวโหลด (Vload) กระแสไฟฟ้าหลังแอลอีดี (Iout) ตัวอย่างในการวัดแสง ดังรูป 3.18



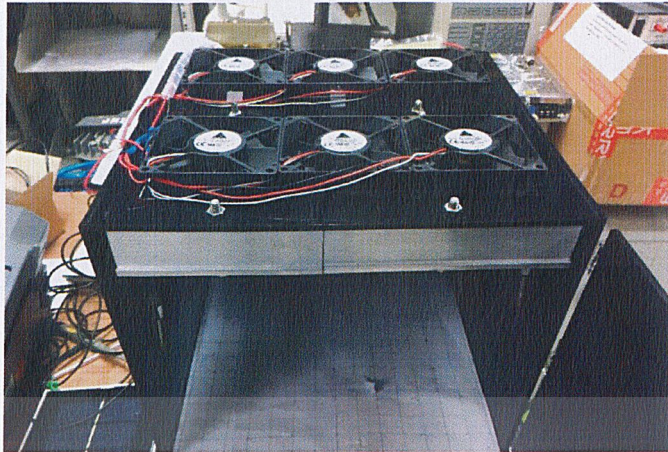
รูปที่ 3.18 การวัดความเข้มแสง

### 3.3.4 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

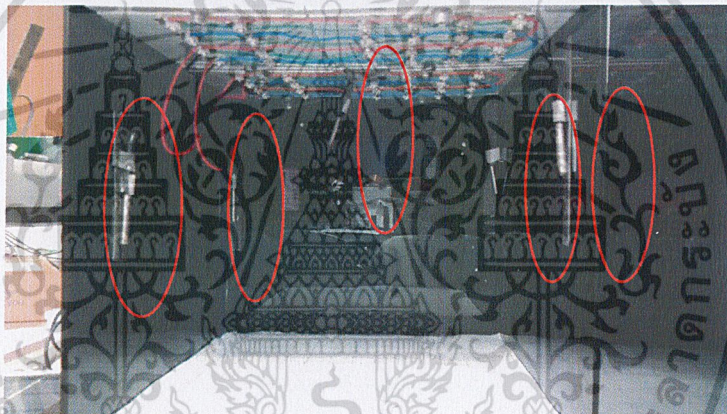
ภายในกล่องเกิดความร้อนเกิดขึ้นจากการสูญเสียพลังงานของแอลอีดี ซึ่งส่งผลเสียต่อต้นไม้ที่เพาะปลูกได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับพืช อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ มีพัดลม 12 โวลต์ติดอยู่บนกล่องเพื่อระบายอากาศภายในกล่อง ดังรูปที่ 3.19 มอสเฟสใช้สำหรับขับกระแสควบคุม PWM ให้พัดลมและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 ซึ่งติดภายในกล่อง 5 จุด ดังรูป 3.20 เพื่อหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิภายในกล่อง โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการควบคุมอุณหภูมินี้ถูกตั้งค่าไว้ คือที่อุณหภูมิมากกว่า 26 องศาเซลเซียส

พัดลมจะทำงาน แต่ถ้าเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียสพัดลมจะหยุดทำงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งในการติดตั้งพัดลม



รูปที่ 3.20 วงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

บทนี้ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองโดยทำการวัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ วัดความเข้มแสงและวัดอุณหภูมิ โดยในการทดลองจะแสดงข้อมูลในรูปแบบของกราฟ ตาราง รูปภาพ

**การทดลองที่ 1** วัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดงและแอลอีดีสีน้ำเงินโดยการวัดจะเป็นการวัดแบบตาราง ที่จุดตรงกลางของกล่องการทดลองจุด (X,Y) มีค่า (0,0) ดังรูป 3.18 โดยการวัดจะมีการเลื่อนตำแหน่งของการวัดที่ละ 4 เซนติเมตรจากจุด (0,0) ไปในแต่ละแนวแกนจนสิ้นสุดที่ 12 เซนติเมตร ในแต่ละแนวแกนการทดลอง

**การทดลองที่ 2** วัดความเข้มแสงที่จุดที่มีการกระจายแสงเชิงพื้นที่สูงสุดในรูปแบบต่าง ๆ ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่างกันและทำการวัดแรงดันไฟฟ้าขาออก แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวโหลด กระแสไฟฟ้าหลังแอลอีดี ความเข้มแสงจากเซนเซอร์ TSL2651 และความเข้มแสงจากลักซ์มิเตอร์ ดิจิทัล UT382

**การทดลองที่ 3** ควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องที่เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียพลังงานของแอลอีดี

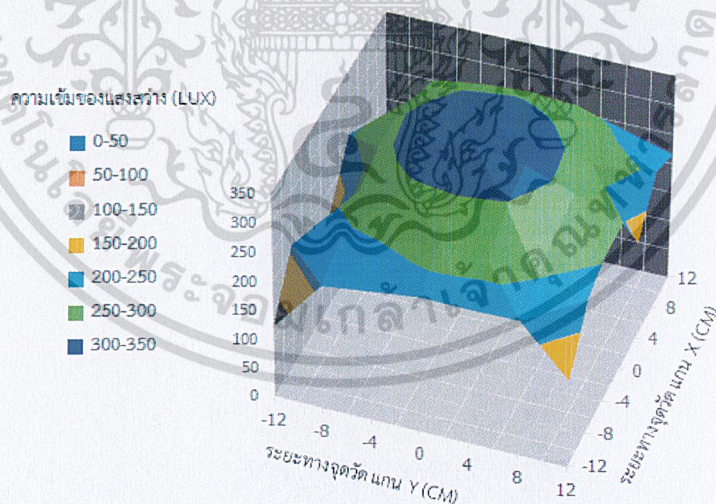
#### 4.1 การวัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่

**4.1.1** วัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง กำหนดความสูงของเซนเซอร์ห่างจากพื้น 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร 6 เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และทำการวัดในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งค่าความเข้มแสงที่วัดมีหน่วยเป็นลักซ์ (LUX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 2 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	122.0	213.0	223.0	233.0	232.0	233.0	150.0
-8	209.0	239.0	253.0	267.0	262.0	250.0	233.0
-4	144.2	269.0	296.0	301.0	297.0	271.0	254.0
0	160.0	289.0	325.0	329.0	316.0	287.0	256.0
4	241.0	293.0	328.0	330.0	313.0	285.0	169.0
8	132.0	273.0	302.0	308.0	293.0	260.0	239.0
12	123.7	251.0	263.0	268.0	262.0	238.0	216.0

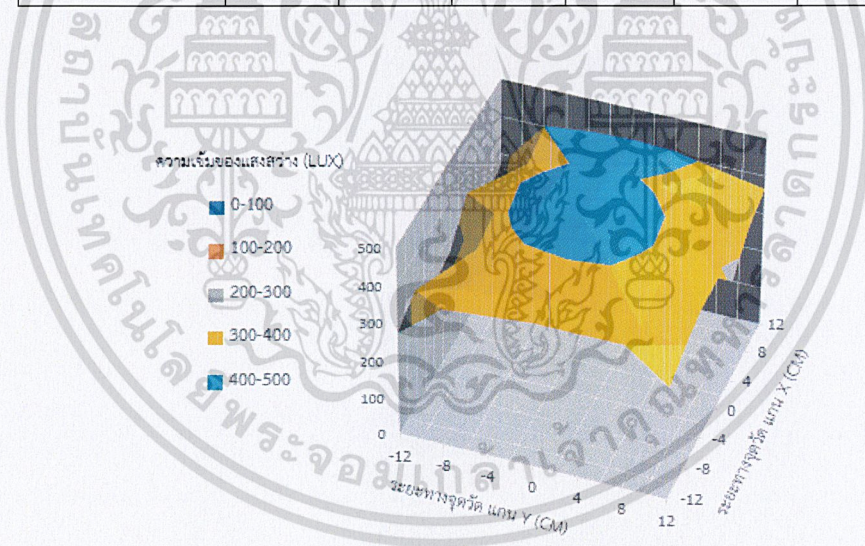


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 4 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	272.0	363.0	373.0	383.0	382.0	383.0	300.0
-8	309.0	339.0	353.0	367.0	362.0	350.0	333.0
-4	244.2	369.0	396.0	401.0	397.0	371.0	354.0
0	260.0	389.0	425.0	429.0	416.0	387.0	356.0
4	341.0	393.0	428.0	430.0	413.0	385.0	269.0
8	232.0	373.0	402.0	408.0	393.0	360.0	339.0
12	273.7	401.0	413.0	418.0	412.0	388.0	366.0



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร)

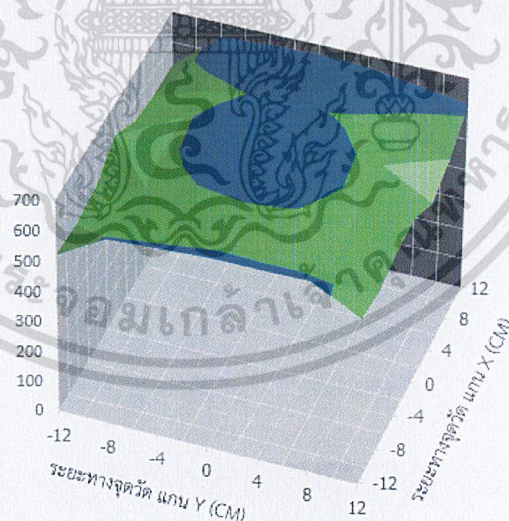
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.3 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีแดง ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 6 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	522.0	613.0	623.0	633.0	632.0	633.0	550.0
-8	514.0	539.0	553.0	567.0	562.0	550.0	533.0
-4	534.0	569.0	596.0	601.0	597.0	571.0	554.0
0	598.0	589.0	625.0	629.0	616.0	587.0	556.0
4	541.0	593.0	628.0	630.0	613.0	585.0	497.0
8	523.0	573.0	602.0	608.0	593.0	560.0	539.0
12	523.7	651.0	663.0	668.0	662.0	638.0	616.0

ความเข้มของแสงสว่าง (LUX)

- 0-100
- 100-200
- 200-300
- 300-400
- 400-500
- 500-600
- 600-700



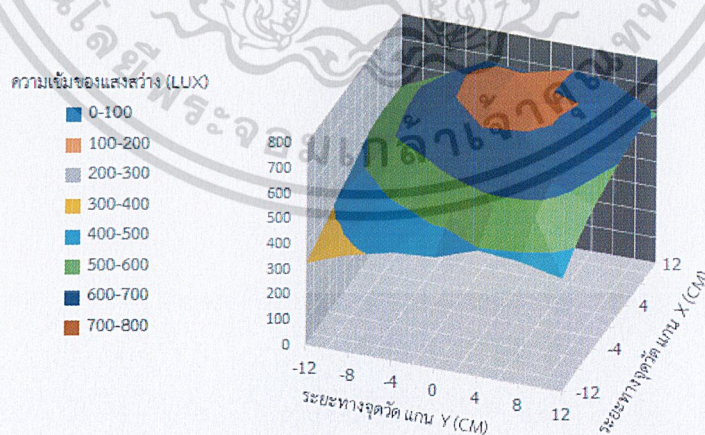
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีแดง (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วัดการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน กำหนดความสูงของเซนเซอร์ห่างจากพื้น 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร 6 เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 4.4 ตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีดังรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 และทำการวัดในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งค่าความเข้มแสงที่วัดมีหน่วยเป็นลักซ์ (LUX)

ตาราง 4.4 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 2 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	322.0	384.0	425.0	437.0	495.0	481.0	446.0
-8	366.0	443.0	493.0	538.0	582.0	576.0	515.0
-4	412.0	510.0	581.0	635.0	644.0	628.0	561.0
0	455.0	604.0	650.0	702.0	695.0	650.0	587.0
4	506.0	623.0	700.0	742.0	735.0	656.0	612.0
8	519.0	630.0	710.0	740.0	698.0	682.0	625.0
12	513.0	591.0	674.0	661.0	701.0	675.0	585.0



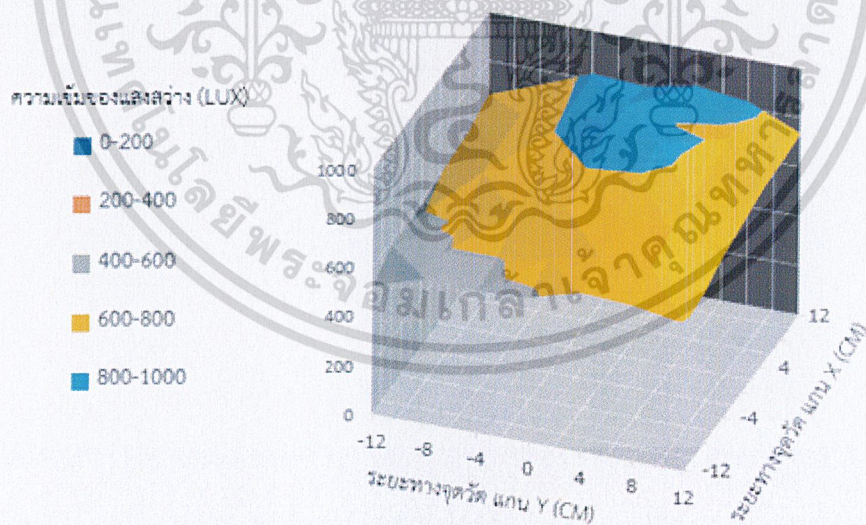
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 2 เซนติเมตร)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.5 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 4 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	520.0	586.0	575.0	587.0	645.0	631.0	596.0
-8	579.0	590.0	593.0	638.0	682.0	676.0	615.0
-4	574.0	610.0	681.0	735.0	744.0	728.0	661.0
0	590.0	704.0	750.0	802.0	795.0	750.0	687.0
4	606.0	723.0	800.0	842.0	835.0	756.0	712.0
8	619.0	730.0	810.0	840.0	798.0	782.0	725.0
12	663.0	741.0	824.0	811.0	851.0	825.0	735.0

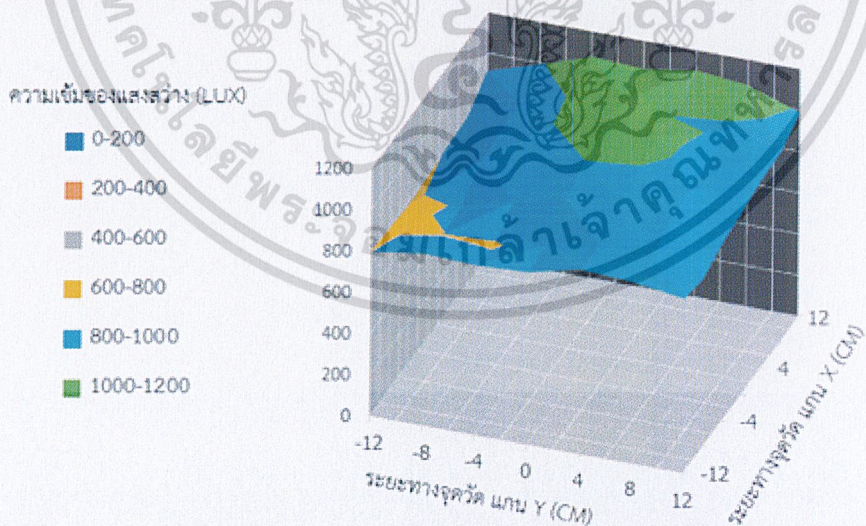


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน (ความสูงของจุดวัดจากพื้น 4 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.6 การกระจายแสงเชิงพื้นที่ของแอลอีดีสีน้ำเงิน ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร

ความสูงของจุดวัดจากพื้น แกน Z 6 เซนติเมตร							
ระยะทางจุดวัด แกน Y (เซนติเมตร)	ระยะทางจุดวัด แกน X (เซนติเมตร)						
	-12	-8	-4	0	4	8	12
-12	799.0	836.0	825.0	837.0	895.0	881.0	846.0
-8	786.0	799.0	793.0	838.0	882.0	876.0	815.0
-4	774.0	810.0	881.0	935.0	944.0	928.0	861.0
0	790.0	904.0	950.0	1002.0	995.0	950.0	887.0
4	806.0	923.0	1000.0	1042.0	1035.0	956.0	912.0
8	819.0	930.0	1010.0	1040.0	998.0	982.0	925.0
12	913.0	991.0	1074.0	1061.0	1101.0	1075.0	985.0



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการกระจายของแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิดของแอลอีดีสีน้ำเงิน

(ความสูงของจุดวัดจากพื้น 6 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวัดความเข้มแสง

### 4.2.1 วัดความเข้มแสงที่จุดที่มีการกระจายแสงเชิงพื้นที่สูงสุด มีโหนดคือตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม

โดยผลการทดลองวัดค่า  $V_{max}$  และ  $V_{rms}$  ของสัญญาณโดยใช้เครื่องออสซิลอสโคป วัด  $I_{rms}$  ด้วยวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์

ตาราง 4.7 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณแบบเชิงเส้น

$V_{in} (V_{max})$	$V_{load} (V_{rms})$	$I_{out} (A_{rms})$
0.05	0.055	0.63
0.10	0.107	1.10
0.15	0.159	1.56
0.20	0.208	2.04
0.25	0.251	2.54
0.30	0.303	3.02
0.35	0.355	3.50
0.40	0.405	3.95
0.45	0.453	4.42
0.50	0.513	4.92
0.55	0.561	5.36
0.60	0.611	5.83
0.65	0.661	6.27
0.70	0.713	6.61
0.75	0.762	7.01
0.80	0.805	7.41
0.85	0.857	7.83
0.90	0.914	8.21
0.95	0.960	8.62
1.00	1.014	9.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.8 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปไซน์

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)
0.108	0.063	0.05	0.430
0.208	0.131	0.11	0.882
0.308	0.189	0.16	1.330
0.408	0.212	0.22	1.778
0.508	0.301	0.27	2.217
0.608	0.403	0.32	2.622
0.708	0.450	0.38	3.056
0.808	0.515	0.43	3.485
0.908	0.575	0.48	3.904
1.008	0.630	0.53	4.315
1.108	0.679	0.58	4.690
1.208	0.739	0.62	5.023
1.308	0.795	0.66	5.304
1.408	0.845	0.70	5.706
1.508	0.902	0.74	5.931
1.608	0.954	0.76	6.215
1.708	1.040	0.79	6.402
1.808	1.090	0.82	6.570
1.908	1.140	0.85	6.910
2.000	1.200	0.87	7.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.9 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปสามเหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)
0.108	0.059	0.05	0.426
0.208	0.122	0.11	0.868
0.308	0.180	0.16	1.312
0.408	0.251	0.22	1.760
0.508	0.314	0.27	2.201
0.608	0.367	0.32	2.607
0.708	0.425	0.37	3.044
0.808	0.489	0.43	3.474
0.908	0.551	0.48	3.898
1.008	0.613	0.53	4.321
1.108	0.679	0.58	4.703
1.208	0.723	0.63	5.145
1.308	0.782	0.68	5.512
1.408	0.842	0.72	5.901
1.508	0.909	0.77	6.263
1.608	0.956	0.80	6.553
1.708	0.956	0.84	6.850
1.808	1.070	0.87	7.110
1.908	1.120	0.90	7.350
2.000	1.190	0.92	7.540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.10 การวัดความเข้มแสงของตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)
0.108	0.090	0.05	0.388
0.208	0.144	0.10	0.781
0.308	0.212	0.14	1.174
0.408	0.281	0.19	1.569
0.508	0.360	0.24	1.956
0.608	0.426	0.28	2.327
0.708	0.492	0.34	2.760
0.808	0.570	0.39	3.169
0.908	0.639	0.44	3.559
1.008	0.700	0.49	3.945
1.108	0.763	0.53	4.299
1.208	0.823	0.57	4.653
1.308	0.901	0.61	4.975
1.408	0.960	0.65	5.258
1.508	0.961	0.66	5.365
1.608	1.080	0.66	5.356
1.708	1.150	0.65	5.312
1.808	1.200	0.65	5.293
1.908	1.260	0.65	5.272
2.000	1.310	0.65	5.281

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 วัดความเข้มแสงที่จุดที่มีการกระจายแสงเชิงพื้นที่สูงสุด มีโหนดคือแอลอีดีสี่ดวง

โดยผลการทดลองวัดค่า  $V_{max}$  และ  $V_{rms}$  ของสัญญาณโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป วัด  $I_{rms}$  ด้วยวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์และวัดค่าลักซ์ด้วยมิสเตอร์ UNIT-T รุ่น UT382 USB กับ เซนเซอร์ TSL2561

ตาราง 4.11 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสี่ดวง สัญญาณแบบเชิงเส้น

Vin (Vmax)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.05	1.841	0.39	28	408
0.10	1.968	0.79	55	827
0.15	2.089	1.20	86	1,250
0.20	2.193	1.62	116	1,676
0.25	2.291	2.00	143	2,058
0.30	2.392	2.41	172	2,459
0.35	2.491	2.82	199	2,858
0.40	2.590	3.22	226	3,236
0.45	2.688	3.62	251	3,595
0.50	2.785	4.02	275	3,824
0.55	2.904	4.40	296	3,725
0.60	2.974	4.78	316	3,636
0.65	3.062	5.16	338	3,534
0.70	3.143	5.54	359	3,432
0.75	3.221	5.92	380	3,325
0.80	3.226	5.99	385	3,303
0.85	3.235	6.09	390	3,263
0.90	3.246	6.12	391	3,255
0.95	3.254	6.17	395	3,233
1.00	3.258	6.17	395	3,243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.12 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปไข่

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.003	1.637	0.02	1.6	19
0.12	0.055	1.859	0.44	30	455
0.24	0.107	1.997	0.86	57	892
0.34	0.158	2.124	1.27	86	1,329
0.42	0.210	2.239	1.69	116	1,752
0.52	0.262	2.345	2.11	142	2,164
0.64	0.318	2.431	2.55	170	2,579
0.74	0.370	2.514	2.95	196	2,821
0.82	0.421	2.591	3.37	220	2,987
0.94	0.473	2.658	3.67	241	3,089
1.02	0.525	2.707	3.90	254	3,172
1.12	0.580	2.751	4.09	266	3,254
1.22	0.633	2.781	4.24	276	3,307
1.32	0.685	2.810	4.38	285	3,361
1.42	0.737	2.837	4.50	292	3,451
1.52	0.789	2.862	4.59	298	3,455
1.62	0.845	2.880	4.68	306	3,490
1.72	0.896	2.894	4.76	314	3,521
1.84	0.947	2.920	4.80	318	3,550
1.92	0.997	2.939	4.85	320	3,584

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.13 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปสามเหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.003	1.625	0.02	1.2	18
0.12	0.480	1.854	0.43	30	452
0.24	0.107	1.989	0.85	57	885
0.34	0.159	2.112	1.27	88	1,325
0.42	0.210	2.238	1.68	117	1,747
0.52	0.262	2.340	2.10	146	2,169
0.64	0.318	2.451	2.54	178	2,601
0.74	0.370	2.544	2.95	204	2,924
0.82	0.421	2.641	3.36	229	3,110
0.94	0.473	2.722	3.72	252	3,269
1.02	0.525	2.783	4.00	268	3,349
1.12	0.581	2.831	4.23	282	3,441
1.22	0.633	2.879	4.41	294	3,504
1.32	0.685	2.906	4.56	302	3,561
1.42	0.737	2.931	4.75	312	3,595
1.52	0.789	2.960	4.82	318	3,620
1.62	0.845	2.982	4.95	322	3,585
1.72	0.897	3.002	5.03	328	3,563
1.84	0.949	3.026	5.12	335	3,548
1.92	1.000	3.032	5.18	338	3,530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.14 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีแดง สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.003	1.621	0.02	1	17
0.12	0.047	1.781	0.36	25	382
0.24	0.098	1.903	0.76	52	792
0.34	0.145	1.998	1.09	75	1,123
0.42	0.192	2.078	1.42	98	1,458
0.52	0.240	2.156	1.76	121	1,813
0.64	0.291	2.234	2.09	144	2,066
0.74	0.339	2.295	2.37	162	2,226
0.82	0.389	2.382	2.72	184	2,367
0.94	0.433	2.499	3.22	216	2,583
1.02	0.480	2.501	3.22	216	2,618
1.12	0.528	2.485	3.18	210	2,585
1.22	0.567	2.477	3.14	209	2,547
1.32	0.610	2.457	3.12	208	2,515
1.42	0.647	2.442	3.09	202	2,510
1.52	0.683	2.430	3.03	200	2,478
1.62	0.718	2.435	3.08	200	2,477
1.72	0.753	2.418	3.02	199	2,455
1.84	0.788	2.400	2.96	196	2,425
1.92	0.820	2.386	2.90	193	2,380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 วัดความเข้มแสงที่จุดที่มีการกระจายแสงเชิงพื้นที่สูงสุด มีโหนดคือแอลอีดีสีน้ำเงิน

โดยผลการทดลองวัดค่า  $V_{max}$  และ  $V_{rms}$  ของสัญญาณโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป วัด  $I_{rms}$  ด้วยวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์และวัดค่าลักซ์ด้วยมิสเตอร์ UNIT-T รุ่น UT382 USB กับ เซนเซอร์ TSL2561

ตาราง 4.15 วัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณแบบเชิงเส้น

$V_{in}$ ( $V_{max}$ )	$V_{load}$ ( $V_{rms}$ )	$I_{out}$ ( $A_{rms}$ )	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.05	2.689	0.39	660	595
0.10	2.825	0.79	1,329	1,215
0.15	2.947	1.20	1,982	1,826
0.20	3.062	1.62	2,640	2,434
0.25	3.161	2.00	3,210	2,924
0.30	3.267	2.41	3,810	3,535
0.35	3.369	2.83	4,370	4,076
0.40	3.465	3.23	4,910	4,590
0.45	3.560	3.63	5,420	4,874
0.50	3.650	4.00	5,900	4,868
0.55	3.745	4.41	6,400	4,859
0.60	3.835	4.79	6,860	4,843
0.65	3.923	5.18	7,310	4,798
0.70	3.962	5.38	7,510	4,757
0.75	3.962	5.34	7,480	4,750
0.80	3.940	5.26	7,340	4,789
0.85	3.921	5.17	7,260	4,799
0.90	3.912	5.16	7,280	4,804
0.95	3.909	5.11	7,150	4,794
1.00	3.906	5.12	7,240	4,807

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.16 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัณฐานรูปไข่

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.010	2.428	0.01	12	13
0.12	0.052	2.715	0.41	670	630
0.24	0.103	2.870	0.81	1,320	1,223
0.34	0.153	3.001	1.21	1,682	1,771
0.42	0.203	3.124	1.62	2,450	2,288
0.52	0.254	3.240	2.02	2,970	2,769
0.64	0.308	3.358	2.44	3,500	3,217
0.74	0.359	3.462	2.83	3,951	3,482
0.82	0.409	3.542	3.16	4,330	3,684
0.94	0.460	3.589	3.37	4,590	3,803
1.02	0.510	3.627	3.53	4,780	3,910
1.12	0.564	3.670	3.66	4,940	4,020
1.22	0.615	3.698	3.77	5,070	4,090
1.32	0.665	3.722	3.86	5,180	4,150
1.42	0.716	3.744	3.94	5,290	4,186
1.52	0.766	3.761	3.98	5,340	4,247
1.62	0.821	3.780	4.05	5,420	4,296
1.72	0.871	3.796	4.11	5,500	4,341
1.84	0.922	3.810	4.17	5,580	4,374
1.92	0.973	3.822	4.21	5,620	4,421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.17 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณรูปสามเหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.010	0.050	0.01	24	27
0.12	0.052	2.727	0.41	680	603
0.24	0.103	2.881	0.81	1,310	1,156
0.34	0.153	3.013	1.21	1,900	1,687
0.42	0.203	3.136	1.62	2,480	2,172
0.52	0.254	3.252	2.02	3,010	2,652
0.64	0.308	3.371	2.44	3,550	3,116
0.74	0.359	3.477	2.83	4,030	3,506
0.82	0.409	3.575	3.20	4,470	3,766
0.94	0.460	3.645	3.48	4,800	3,957
1.02	0.510	3.707	3.69	5,050	4,098
1.12	0.564	3.755	3.87	5,260	4,210
1.22	0.615	3.794	4.02	5,430	4,305
1.32	0.665	3.830	4.15	5,590	4,389
1.42	0.716	3.857	4.26	5,710	4,470
1.52	0.766	3.882	4.35	5,820	4,523
1.62	0.821	3.903	4.43	5,910	4,583
1.72	0.871	3.922	4.50	6,000	4,626
1.84	0.922	3.932	4.58	6,090	4,671
1.92	0.973	3.946	4.63	6,150	4,704

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

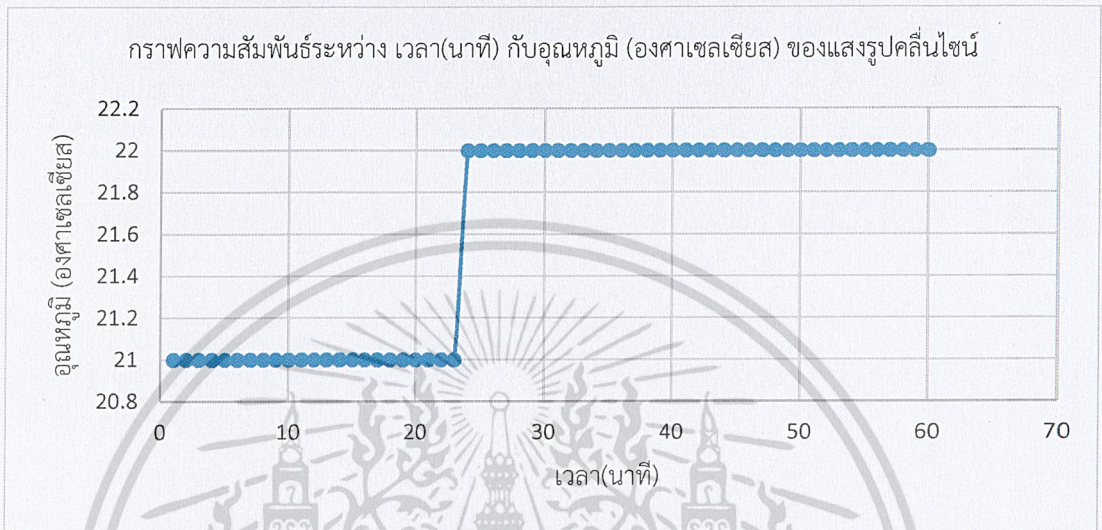
ตาราง 4.18 การวัดความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงิน สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

Vin (Vmax)	Vin (Vrms)	Vload (Vrms)	Iout (Arms)	Illuminance (LUX)	TSL2561 (LUX)
0.04	0.003	2.457	0.02	29.2	26
0.12	0.060	2.663	0.49	809	741
0.24	0.117	2.791	0.90	1,491	1,384
0.34	0.174	2.900	1.31	2,100	1,931
0.42	0.231	3.004	1.72	2,670	2,493
0.52	0.289	3.097	2.10	3,170	2,859
0.64	0.350	3.215	2.57	3,770	3,188
0.74	0.407	3.285	2.82	4,100	3,441
0.82	0.464	3.268	2.85	4,130	3,446
0.94	0.519	3.247	2.82	4,070	3,438
1.02	0.571	3.230	2.79	4,030	3,365
1.12	0.623	3.235	2.72	3,910	3,268
1.22	0.668	3.211	2.67	3,780	3,245
1.32	0.710	3.187	2.58	3,760	3,230
1.42	0.746	3.184	2.60	3,720	3,239
1.52	0.776	3.166	2.52	3,660	3,121
1.62	0.802	3.148	2.47	3,590	3,144
1.72	0.826	3.135	2.44	3,550	3,046
1.84	0.852	3.117	2.38	3,470	3,028
1.92	0.883	3.112	2.36	3,440	2,947

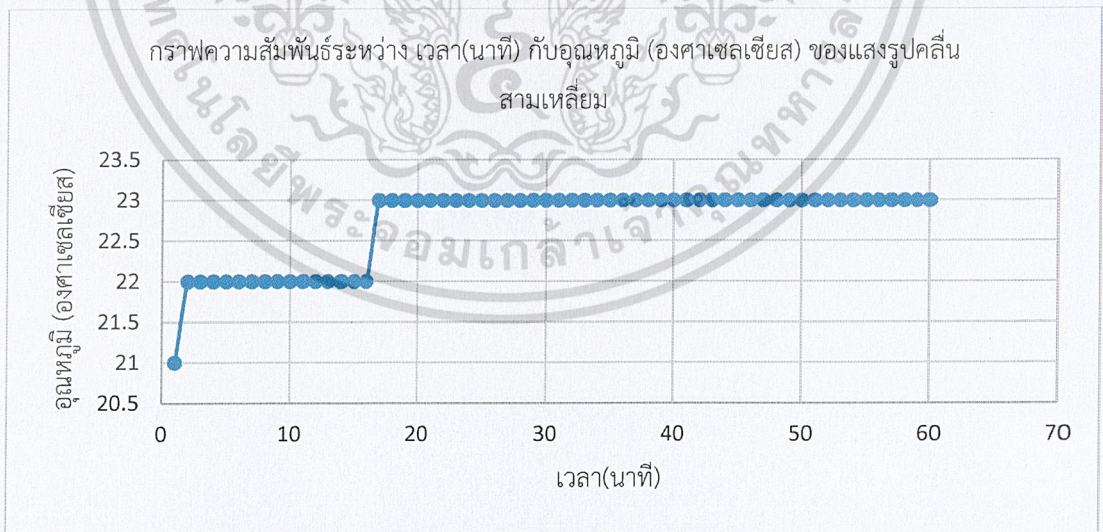
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

การทดลองวัดอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ DS18B20 โดยการวัดขณะเริ่มเปิดไฟเป็นระยะเวลา 60 นาทีในแต่ละรูปแบบคลื่น ผลอุณหภูมิรูปคลื่นไซน์ดังรูป 4.7 ผลอุณหภูมิรูปคลื่นสามเหลี่ยมดังรูป 4.8 ผลอุณหภูมิรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูป 4.9

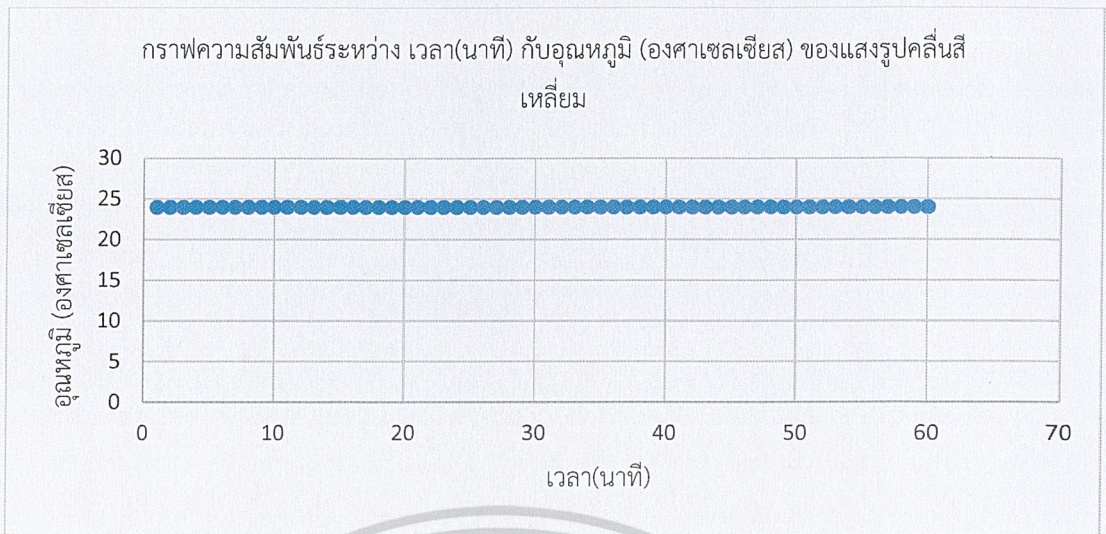


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นไซน์เมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นสามเหลี่ยมเมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของแสงรูปคลื่นสีเหลืองเมื่อเปิดไฟเป็นเวลา 60 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและสร้างระบบควบคุมแสงเทียมที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกพืช ผลปรากฏว่าระบบสามารถควบคุมรูปแบบการหรีของแสงแอลอีดีในแต่ละรูปแบบคลื่นได้รวมถึงการปรับความถี่และความเข้มของแสงสว่าง ระหว่างแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินของหลอดแอลอีดี โดยระบบสามารถควบคุมการทำงานทั้งหมดผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยงานวิจัยมีการทดลองวัดค่าความเข้มของแสงสว่างของแต่ละรูปแบบการหรีแสง ผลปรากฏว่า ที่กระแสไฟค่าเฉลี่ยกำลังสองที่มีค่าเท่ากันของแต่ละรูปแบบคลื่น ค่าความเข้มของแสงสว่างจะมีค่าเท่ากัน ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในกล่องแต่ละรูปแบบการหรีแสงมีค่าเท่ากันและจากการวัดค่าการกระจายแสงเชิงพื้นที่ภายในกล่องปิด ทำให้ทราบว่าพื้นที่ภายในกล่องแต่ละจุดจะมีค่าความเข้มของแสงสว่างที่ไม่เท่ากันส่งผลถึงการเจริญเติบโตของต้นพืชที่จะมีการเติบโตที่ไม่เท่ากัน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.การต่อหลอดแอลอีดีควรเป็นแบบอนุกรมเพื่อที่จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านหลอดแอลอีดีมีค่าคงที่เพื่อที่ค่าความสว่างของแต่ละหลอดแอลอีดีมีค่าเท่ากัน
- 2.การวัดค่าความเข้มของแสงสว่างควรใช้เซนเซอร์ที่สามารถวัดค่าของแต่ละความยาวคลื่นของแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Charles Platt. 2012. **Encyclopedia of Electronic Components Volume 1**. United States of America. O'Reilly Media.
- [2] Charles Platt. and Fredrik Jansson. 2012. **Encyclopedia of Electronic Components Volume 2**. United States of America. Maker Media.
- [3] Coughlin, Robert F. 2001. **Operational amplifiers and linear integrated circuits**.
- [4] Brian Moore. and John Donaghy. 2001. **OPERATIONAL AMPLIFIER CIRCUITS**. London. Pitman Publishing Pty Ltd.
- [5] Satish Kumar Peddapelli. 2017. **Pulse Width Modulation**. Germany. Walter de Gruyter GmbH.
- [6] {Salvador Pinillos Gimenez. 2019. **Microcontrollers**. Brazil. FEI University Center.
- [7] Nielsen, V. 2018. **What Effect does Blue Light have on Plants?**
- [8] Aoi Shimada. and Yoshio Taniguchi. 2011. "Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation". Ph.D. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology
- [9] Ramazan Senol. And Semra Kilic. Kubilay Tasdelen. "Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation". Ph.D. Computers and Electronics in Agriculture
- [10] กรวิทย์ กระจ่างพันธ์ ธีระวรรณ สืบชนะวงษ์และ สุขสันต์ หวังสถิตวงษ์. 2561. "การออกแบบแสงด้วยหลอดแอลอีดีส่องสว่างสำหรับปลูกพืชในอาคารโดยอ้างอิงปริมาณแสงรวมต่อวัน". วิทยานิพนธ์ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [11] R. Hernández. and C. Kubota. "Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs". Ph.D. Environmental and Experimental Botany
- [12] Yingchao Xu. Yongxiao Chang. Guanyu Chen. and Hongyi Lin. "The research on LED supplementary lighting system for plants". Ph.D. Optik
- [13] Ricardo Hernández, Tomomi Eguchi, Murat Deveci, and Chieri Kubota. "Tomato seedling physiological responses under different percentages of blue and red photon flux ratios using LEDs and cool white fluorescent lamps". Ph.D. Scientia Horticulturae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Nikolaj Bjerring Jensen, Morten Rahr Clausen, and Katrine Heinsvig Kjaer. "Spectral quality of supplemental LED grow light permanently alters stomatal functioning and chilling tolerance in basil". Ph.D. Scientia Horticulturae



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

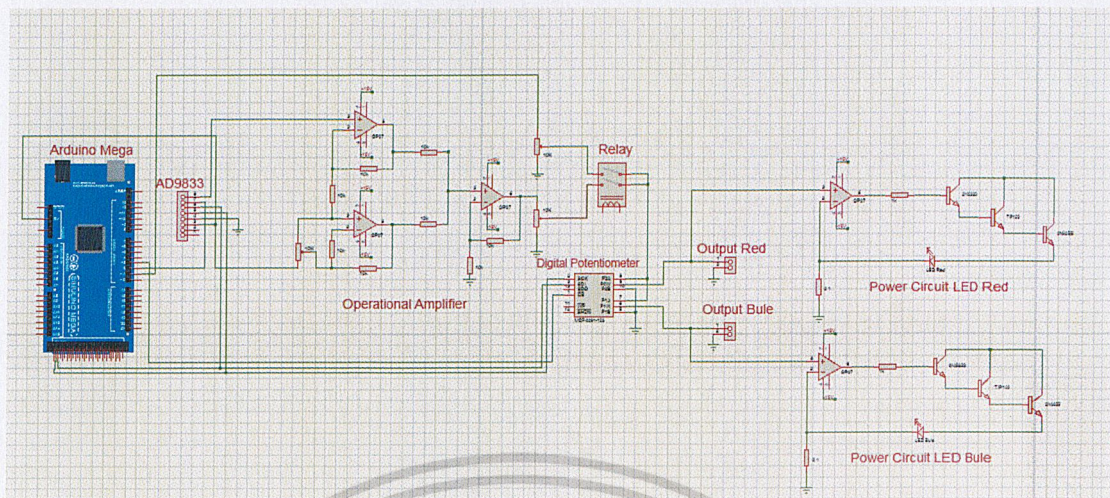


## ภาคผนวก

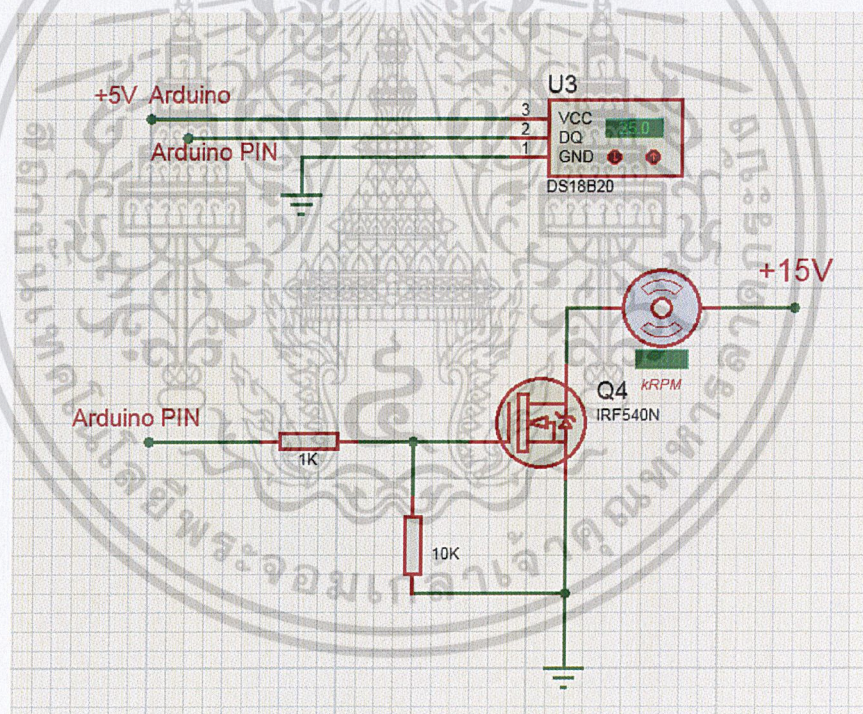
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนผังไดอะแกรมของวงจรทั้งหมด



แผนผังไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// include the library code:
#include <AD9833.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h >
#include <PWM.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "TSL2561.h"
// #include <PID_v1.h>
/* Function generator constants */
#define FNC_PIN      8

/* Digital potentiometer constants */
#define CMD_WRITE    (0b00010000)
#define CMD_RED      (0b01)
#define CMD_BLUE     (0b10)
#define POT_LIMIT    (0xFF)
#define DIGIPOT_SS_PIN (5)

/* PWM_SQUARE_WAVE constants */
#define PWM_PIN      12

// -Resolution can be optimized in this way for 2 pins on the Uno (9 and 10), and 11 pins on the Mega (2, 3, 5, 6, 7,
// 8, 11, 12, 44, 45, and 46)

/*RELAY_OutputState constants */
#define RELAY_SINE_TRIANGLE 6
#define RELAY_SQUARE        7

/*TEMPERATURE constants */
#define ONE_WIRE_BUS_PIN    10
#define TEMPERATURE_PRECISION 9
#define FAN_CONTROL_PIN    11
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress tempDeviceAddress;

/* AD9833 & digipotSettings & TSL2561 objects definition */
AD9833 gen_(FNC_PIN);
SPISettings digipotSettings(2000000, MSBFIRST, SPI_MODE0);
TSL2561 tsl(TSL2561_ADDR_FLOAT);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
String COMMAND;
String CMD_WaveFormType;
String CMD_Frequency ;
String CMD_Duty;
String CMD_Amplitude_RED;
String CMD_Amplitude_BLUE;
String CMD_OutputState;
String CMD_LUX_RED;
String CMD_LUX_BLUE;
```

```
String CMD_TEMP;
String CMD_AmplitudeUpDown;
String COLORS;
String UP_DOWN;
bool state = 1 ;
```

```
int intFrequency = 1000;
int intDuty = 127;
```

```
int MAX_intAmplitude_RED = 1940;
int MIN_intAmplitude_RED = 8;
int MAX_intAmplitude_BLUE = 1940;
int MIN_intAmplitude_BLUE = 8;
int intAmplitude_RED;
int intAmplitude_BLUE;
int intAmplitudeUpDown_RED;
int intAmplitudeUpDown_BLUE;
```

```
int MAX_intLux_SINE_RED = 5000;
int MIN_intLux_SINE_RED = 0;
int MAX_intLux_SINE_BLUE = 5000;
int MIN_intLux_SINE_BLUE = 0;
int intLux_SINE_RED;
int intLux_SINE_BLUE;
```

```
int MAX_intLux_TRIANGLE_RED = 5000;
int MIN_intLux_TRIANGLE_RED = 0;
int MAX_intLux_TRIANGLE_BLUE = 5000;
int MIN_intLux_TRIANGLE_BLUE = 0;
int intLux_TRIANGLE_RED;
int intLux_TRIANGLE_BLUE;
```

```
int MAX_intLux_SQUARE_RED = 5000;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการพิมพ์ หรือ การนำออกจำหน่าย หากพบการละเมิดขอสงวนสิทธิ์ในการฟ้องร้องและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int MIN_intLux_SQUARE_RED = 0;
int MAX_intLux_SQUARE_BLUE = 5000;
int MIN_intLux_SQUARE_BLUE = 0;
int intLux_SQUARE_RED;
int intLux_SQUARE_BLUE;

int TEMP_1 = 0 ;
int TEMP_2 = 0 ;
int TEMP_3 = 0 ;
int TEMP_4 = 0 ;
int TEMP_5 = 0 ;
int TEMP_AVG = 0 ;
int numberOfDevices;
unsigned long TIME;
unsigned long PERIOD_FAN = 100000;

void WaveFormType();
void Frequency();
void Duty();
void Amplitude();
void AmplitudeUnDown();
void LUX();
void OutputState();
void setPot();
void printAddress();
void printTemperature();
void forTemperature();

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  gen_ Begin();
  gen_ EnableOutput(true); //AD9833
  SPI.begin(); //Digital pot
  InitTimersSafe(); //PWM
  SetPinFrequencySafe(PWM_PIN, intFrequency); //PWM
  /*RED_PIN_SETTING*/
  pinMode(DIGIPOT_SS_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_SINE_TRIANGLE, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_SQUARE, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, HIGH);
  digitalWrite(RELAY_SQUARE, HIGH);
  /*FAN_CONTROL_SETTING*/
  pinMode(FAN_CONTROL_PIN, OUTPUT);

```

```
digitalWrite(FAN_CONTROL_PIN, LOW);
```

```
/*TEMPERATURE_SETTING*/
```

```
sensors.begin(); //TEMPERATURE.
```

```
numberOfDevices = sensors.getDeviceCount();
```

```
Serial.print("Locating devices...");
```

```
Serial.print("Found ");
```

```
Serial.print(numberOfDevices, DEC);
```

```
Serial.println(" devices.");
```

```
Serial.print("Parasite power is: ");
```

```
if (sensors.isParasitePowerMode()) Serial.println("ON");
```

```
else Serial.println("OFF");
```

```
for (int i = 0; i < numberOfDevices; i++)
```

```
{
```

```
if (sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i))
```

```
{
```

```
Serial.print("Found device ");
```

```
Serial.print(i, DEC);
```

```
Serial.print(" with address: ");
```

```
printAddress(tempDeviceAddress);
```

```
Serial.println();
```

```
//Serial.print("Setting resolution to ");
```

```
//Serial.println(TEMPERATURE_PRECISION, DEC);
```

```
sensors.setResolution(tempDeviceAddress, TEMPERATURE_PRECISION);
```

```
//Serial.print("Resolution actually set to: ");
```

```
//Serial.print(sensors.getResolution(tempDeviceAddress), DEC);
```

```
//Serial.println();
```

```
} else {
```

```
Serial.print("Found ghost device at ");
```

```
Serial.print(i, DEC);
```

```
Serial.print(" but could not detect address. Check power and cabling");
```

```
}
```

```
}
```

```
/*TSL2561_SETTING*/
```

```
if (tsl.begin()) {
```

```
Serial.println("Found sensor");
```

```
} else {
```

```
Serial.println("No sensor?");
```

```
while (1);
```

```
}
```

```
// You can change the gain on the fly, to adapt to brighter/dimmer light situations
```

```
//tsl.setGain(TSL2561_GAIN_0X); // set no gain (for bright situations)
```

```
tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X); // set 16x gain (for dim situations)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการพิมพ์ซ้ำ การเผยแพร่ทางสื่ออิเล็กทรอนิกส์ หรือการนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Changing the integration time gives you a longer time over which to sense light
// longer timelines are slower, but are good in very low light situations!
tsl.setTiming(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS); // shortest integration time (bright light)
//tsl.setTiming(TSL2561_INTEGRATIONTIME_101MS); // medium integration time (medium light)
//tsl.setTiming(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS); // longest integration time (dim light)
}

```

```

void WaveFormType(String CMD_WaveFormType)
{
  if (CMD_WaveFormType == "SINE" )
  { for (int i = 0 ; i <= 5; i++)
    {
      //gen_.SetFrequency(REG0, intFrequency);
      //gen_.SetWaveform(REG0, SINE_WAVE);
      //gen_.SetOutputSource(REG0, REG0);
      gen_.ApplySignal(SINE_WAVE, REG0, intFrequency);
    }
    digitalWrite(RELAY_SQUARE, HIGH);
    digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, LOW);
    state = 1;
    Serial.println("SINE_WAVE");
  }
  else if (CMD_WaveFormType == "TRIANGLE" )
  { for (int i = 0 ; i <= 5; i++)
    { //gen_.SetFrequency(REG0, intFrequency);
      //gen_.SetWaveform(REG0, TRIANGLE_WAVE);
      //gen_.SetOutputSource(REG0, REG0);
      gen_.ApplySignal(TRIANGLE_WAVE, REG0, intFrequency);
    }
    digitalWrite(RELAY_SQUARE, HIGH);
    digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, LOW);
    state = 1;
    Serial.println("TRIANGLE_WAVE");
  }
  else if (CMD_WaveFormType == "SQUARE" )
  {
    SetPinFrequencySafe(PWM_PIN, intFrequency);
    pwmWrite(PWM_PIN, intDuty);
    digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, HIGH);
    digitalWrite(RELAY_SQUARE, LOW);
    state = 1;
    Serial.println("SQUARE_WAVE");
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

void Frequency(String CMD_Frequency)
{
  intFrequency = CMD_Frequency.toInt();
  if (CMD_WaveFormType == "SINE" || CMD_WaveFormType == "TRIANGLE")
  {
    gen_.SetFrequency(REG0, intFrequency);
    gen_.EnableOutput(true);
    Serial.println(CMD_Frequency + " Hz_" + CMD_WaveFormType);
  }
  else if (CMD_WaveFormType == "SQUARE")
  {
    SetPinFrequencySafe(PWM_PIN, intFrequency);
    pwmWrite(PWM_PIN, intDuty);
    Serial.println(CMD_Frequency + " Hz_" + CMD_WaveFormType);
  }
}

void Duty(String CMD_Duty)
{
  intDuty = CMD_Duty.toInt();
  intDuty = map(intDuty, 0, 100, 0, 255);
  if (CMD_WaveFormType == "SQUARE")
  {
    pwmWrite(PWM_PIN, intDuty);
    Serial.println(CMD_Duty + "%" + CMD_WaveFormType);
  }
}

void Amplitude(String CMD_Amplitude, String COLORS)
{
  if (COLORS == "RED")
  {
    intAmplitude_RED = CMD_Amplitude_RED.toInt();
    intAmplitude_RED = map(intAmplitude_RED, MIN_intAmplitude_RED, MAX_intAmplitude_RED, 0, 255);
    setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intAmplitude_RED);
    Serial.println(CMD_Amplitude + " mV_" + CMD_WaveFormType + "_RED");
  }
  else if (COLORS == "BLUE")
  {
    intAmplitude_BLUE = CMD_Amplitude_BLUE.toInt();
    intAmplitude_BLUE = map(intAmplitude_BLUE, MIN_intAmplitude_BLUE, MAX_intAmplitude_BLUE, 0, 255);
    setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intAmplitude_BLUE);
  }
}

```

```

Serial.println(CMD_Amplitude + " mV_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
}

void AmplitudeUpDown(String CMD_AmplitudeUpDown, String COLORS , String UP_DOWN )
{ if (UP_DOWN == "UP")
{
if ( COLORS == "RED")
{
intAmplitudeUpDown_RED = CMD_AmplitudeUpDown.toInt();
intAmplitude_RED = CMD_Amplitude_RED.toInt();
intAmplitude_RED = intAmplitude_RED + intAmplitudeUpDown_RED ;
if (intAmplitude_RED >= MAX_intAmplitude_RED)
{
intAmplitude_RED = MAX_intAmplitude_RED ;
}
CMD_Amplitude_RED = String(intAmplitude_RED);
intAmplitude_RED = map(intAmplitude_RED, MIN_intAmplitude_RED, MAX_intAmplitude_RED, 0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intAmplitude_RED);
Serial.println(CMD_Amplitude_RED + " mV_" + CMD_WaveFormType + " RED");
}
else if ( COLORS == "BLUE")
{
intAmplitudeUpDown_BLUE = CMD_AmplitudeUpDown.toInt();
intAmplitude_BLUE = CMD_Amplitude_BLUE.toInt();
intAmplitude_BLUE = intAmplitude_BLUE + intAmplitudeUpDown_BLUE ;
if (intAmplitude_BLUE >= MAX_intAmplitude_BLUE)
{
intAmplitude_BLUE = MAX_intAmplitude_BLUE ;
}
CMD_Amplitude_BLUE = String(intAmplitude_BLUE);
intAmplitude_BLUE = map(intAmplitude_BLUE, MIN_intAmplitude_BLUE, MAX_intAmplitude_BLUE, 0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intAmplitude_BLUE);
Serial.println(CMD_Amplitude_BLUE + " mV_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
}
else if (UP_DOWN == "DOWN")
{
if ( COLORS == "RED")
{
intAmplitudeUpDown_RED = CMD_AmplitudeUpDown.toInt();
intAmplitude_RED = CMD_Amplitude_RED.toInt();
intAmplitude_RED = intAmplitude_RED - intAmplitudeUpDown_RED ;
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนจะเผยแพร่สู่สาธารณะเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (intAmplitude_RED <= MIN_intAmplitude_RED)
{
    intAmplitude_RED = MIN_intAmplitude_RED ;
}
CMD_Amplitude_RED = String(intAmplitude_RED);
intAmplitude_RED = map(intAmplitude_RED, MIN_intAmplitude_RED, MAX_intAmplitude_RED, 0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intAmplitude_RED);
Serial.println(CMD_Amplitude_RED + " mV_" + CMD_WaveFormType + "_RED");
}
else if ( COLORS == "BLUE")
{
    intAmplitudeUpDown_BLUE = CMD_AmplitudeUpDown.toInt();
    intAmplitude_BLUE = CMD_Amplitude_BLUE.toInt();
    intAmplitude_BLUE = intAmplitude_BLUE - intAmplitudeUpDown_BLUE ;
    if (intAmplitude_BLUE <= MIN_intAmplitude_BLUE)
    {
        intAmplitude_BLUE = MIN_intAmplitude_BLUE ;
    }
    CMD_Amplitude_BLUE = String(intAmplitude_BLUE);
    intAmplitude_BLUE = map(intAmplitude_BLUE, MIN_intAmplitude_BLUE, MAX_intAmplitude_BLUE, 0, 255);
    setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intAmplitude_BLUE);
    Serial.println(CMD_Amplitude_BLUE + " mV_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
}
}
}

```

```

void LUX(String CMD_LUX, String COLORS)

```

```

{
    if (COLORS == "RED")
    {
        if (CMD_WaveFormType == "SINE" )
        {
            intLux_SINE_RED = CMD_LUX_RED.toInt();
            intLux_SINE_RED = map(intLux_SINE_RED , MIN_intLux_SINE_RED, MAX_intLux_SINE_RED, 0, 255);
            setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intLux_SINE_RED);
            Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_RED");
        }
        else if (CMD_WaveFormType == "TRIANGLE" )
        {
            intLux_TRIANGLE_RED = CMD_LUX_RED.toInt();
            intLux_TRIANGLE_RED = map(intLux_TRIANGLE_RED , MIN_intLux_TRIANGLE_RED, MAX_intLux_TRIANGLE_RED, 0,
255);
            setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intLux_TRIANGLE_RED);

```

```

Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_RED");
}
else if (CMD_WaveFormType == "SQUARE" )
{
intLux_SQUARE_RED = CMD_LUX_RED.toInt();
intLux_SQUARE_RED = map(intLux_SINE_RED , MIN_intLux_SQUARE_RED, MAX_intLux_SQUARE_RED, 0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_RED, intLux_SQUARE_RED);
Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_RED");
}
}
else if (COLORS == "BLUE")
{
if (CMD_WaveFormType == "SINE" )
{
intLux_SINE_BLUE = CMD_LUX_BLUE.toInt();
intLux_SINE_BLUE = map(intLux_SINE_BLUE , MIN_intLux_SINE_BLUE, MAX_intLux_SINE_BLUE, 0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intLux_SINE_BLUE );
Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
else if (CMD_WaveFormType == "TRIANGLE" )
{
intLux_TRIANGLE_BLUE = CMD_LUX_BLUE.toInt();
intLux_TRIANGLE_BLUE = map(intLux_SINE_BLUE , MIN_intLux_TRIANGLE_BLUE, MAX_intLux_TRIANGLE_BLUE,
0, 255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intLux_TRIANGLE_BLUE);
Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
else if (CMD_WaveFormType == "SQUARE" )
{
intLux_SQUARE_BLUE = CMD_LUX_BLUE.toInt();
intLux_SQUARE_BLUE = map(intLux_SINE_BLUE , MIN_intLux_SQUARE_BLUE, MAX_intLux_SQUARE_BLUE, 0,
255);
setPot(CMD_WRITE | CMD_BLUE, intLux_SQUARE_BLUE);
Serial.println(CMD_LUX + " LUX_" + CMD_WaveFormType + "_BLUE");
}
}
}
}

```

```
void OutputState(String CMD_OutputState, String COLORS)
```

```
{ state = !state;
```

```
if (state == 1)
```

```
{
```

```
if (CMD_WaveFormType == "SINE" || CMD_WaveFormType == "TRIANGLE")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

digitalWrite(RELAY_SQUARE, HIGH);
digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, LOW);
Serial.println("ON_" + CMD_WaveFormType);
}
else if (CMD_WaveFormType == "SQUARE")
{
digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, HIGH);
digitalWrite(RELAY_SQUARE, LOW);
Serial.println("ON_" + CMD_WaveFormType);
}
}
else if (state == 0)
{
digitalWrite(RELAY_SQUARE, HIGH);
digitalWrite(RELAY_SINE_TRIANGLE, HIGH);
Serial.println("OFF_" + CMD_WaveFormType);
}
}

void setPot(byte command, byte data)
{
SPI.beginTransaction(digipotSettings);
digitalWrite(DIGIPOT_SS_PIN, LOW);
SPI.transfer(command);
SPI.transfer(data);
digitalWrite(DIGIPOT_SS_PIN, HIGH);
SPI.endTransaction();
}

void printAddress(DeviceAddress deviceAddress)
{
for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
{
if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
}
}

void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
{
float tempC = sensors.getTempC(deviceAddress);
// Serial.print("Temp C: ");
// Serial.print(tempC);
// Serial.print(" Temp F: ");

```

```

//Serial.println(DallasTemperature::toFahrenheit(tempC));
TEMP_5 = TEMP_4;
TEMP_4 = TEMP_3;
TEMP_3 = TEMP_2;
TEMP_2 = TEMP_1;
TEMP_1 = tempC;
TEMP_AVG = (TEMP_1 + TEMP_2 + TEMP_3 + TEMP_4 + TEMP_5) / 5;
//Serial.print("Temp C(Average) = ");
// Serial.println(TEMP_AVG);
}
void forTemperature(String CMD_TEMP )
{ sensors.requestTemperatures();
for (int i = 0; i < numberOfDevices; i++)
{
if (sensors.getAddress(tempDeviceAddress, i))
{
printTemperature(tempDeviceAddress);
}
if (TEMP_AVG > 26)
{
digitalWrite(FAN_CONTROL_PIN, HIGH);
}
else if (TEMP_AVG == 24)
{
digitalWrite(FAN_CONTROL_PIN, LOW);
}
}
if (CMD_TEMP == "PERIOD_FAN")
{
Serial.print("Temp C(Average) = ");
Serial.println(TEMP_AVG);
}
if (CMD_TEMP == "TEMP_MEASUREMENT")
{
Serial.print("Temp C(Average) = ");
Serial.println(TEMP_AVG);
}
}
void loop()
{
if (Serial.available() > 0)
{ COMMAND = Serial.readStringUntil(';');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีสิทธิ์เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if ((COMMAND.substring(0, 3) == "1./")
{
    CMD_WaveFormType = COMMAND.substring(3);
    WaveFormType(CMD_WaveFormType);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 3) == "2./")
{
    CMD_Frequency = COMMAND.substring(3);
    Frequency(CMD_Frequency);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 3) == "3./")
{
    CMD_Duty = COMMAND.substring(3);
    Duty(CMD_Duty);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 4) == "4.1/")
{ COLORS = "RED" ;
    CMD_Amplitude_RED = COMMAND.substring(4);
    Amplitude(CMD_Amplitude_RED, COLORS);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 6) == "4.1.1/")
{ COLORS = "RED" ;
    UP_DOWN = "UP";
    CMD_AmplitudeUpDown = COMMAND.substring(6);
    AmplitudeUpDown(CMD_AmplitudeUpDown, COLORS , UP_DOWN);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 6) == "4.1.2/")
{ COLORS = "RED" ;
    UP_DOWN = "DOWN";
    CMD_AmplitudeUpDown = COMMAND.substring(6);
    AmplitudeUpDown(CMD_AmplitudeUpDown, COLORS , UP_DOWN);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 4) == "5.1/")
{ COLORS = "RED" ;
    CMD_LUX_RED = COMMAND.substring(4);
    LUX(CMD_LUX_RED, COLORS);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 4) == "4.2/")
{ String COLORS = "BLUE";
    CMD_Amplitude_BLUE = COMMAND.substring(4);
    Amplitude(CMD_Amplitude_BLUE, COLORS);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 6) == "4.2.1/")
{ COLORS = "BLUE";

```

```

UP_DOWN = "UP";
CMD_AmplitudeUpDown = COMMAND.substring(6);
AmplitudeUpDown(CMD_AmplitudeUpDown, COLORS , UP_DOWN);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 6) == "4.2.2/")
{ COLORS = "BLUE" ;
  UP_DOWN = "DOWN";
  CMD_AmplitudeUpDown = COMMAND.substring(6);
  AmplitudeUpDown(CMD_AmplitudeUpDown, COLORS , UP_DOWN);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 4) == "5.2/")
{ String COLORS = "BLUE";
  CMD_LUX_BLUE = COMMAND.substring(4);
  LUX(CMD_LUX_BLUE, COLORS);
}
else if ((COMMAND.substring(0, 3) == "6./")
{
  CMD_OutputState = COMMAND.substring(3);
  OutputState(CMD_OutputState, COLORS);
}

else if (COMMAND == "LUX_MEASUREMENT")
{
  uint16_t Luminosity = tsl.getLuminosity(TSL2561_VISIBLE);
  Serial.print("Lux: ");
  Serial.println(Luminosity, DEC);
}
else if (COMMAND == "TEMP_MEASUREMENT")
{
  CMD_TEMP = COMMAND;
  forTemperature(CMD_TEMP );
}
}

if (millis() - TIME >= PERIOD_FAN)
{ CMD_TEMP = "PERIOD_FAN";
  forTemperature(CMD_TEMP);
  TIME = millis();

  uint16_t Luminosity = tsl.getLuminosity(TSL2561_VISIBLE);
  Serial.print("Lux: ");
  Serial.println(Luminosity, DEC);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้