

เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต
ELECTROSTATIC AIR CLEANER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต
ELECTROSTATIC AIR CLEANER

โดย

นางสาวกัลยรัตน์ กรมกอง 63010065

นายธนพล เหมะชัย 63010415

นางสาวสุพิชฌาย์ ตะโหนด 63011006

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต

ELECTROSTATIC AIR CLEANER

ผู้จัดทำ

- | | | |
|--------------------|---------|----------|
| 1. นางสาวกัลยรัตน์ | กรมกอง | 63010065 |
| 2. นายธนพล | เหมะชัย | 63010415 |
| 3. นางสาวสุพิชฌาย์ | ตะโหนด | 63011006 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศ. ดร.ชuwong พงศ์เจริญพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้าวิจัยให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ประจำวิชาภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือทางด้านสถานที่ และอุปกรณ์ในระหว่างจัดทำโครงการ จนกระทั่งปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และเป็นกำลังใจที่สำคัญเสมอมาและที่สำคัญคือสนับสนุนให้โอกาสทางด้านการศึกษาอันมีค่ายิ่งแก่ผู้จัดทำ ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอน้อมรับคำแนะนำ ตลอดจนคำติชมเพื่อนำไปเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนาปริญญานิพนธ์ต่อไป

นางสาวกัลยรัตน์	กรมกอง
นายธนพล	เหมะชัย
นางสาวสุพิชฌาย์	ตะโหนด
	ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต
ELECTROSTATIC AIR CLEANER

โดย	นางสาวกัลยรัตน์	กรมกอง	63010065
	นายธนพล	เหมะชัย	63010415
	นางสาวสุพิชฌาย์	ตะโหนด	63011006

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

ปัญหาภาวะฝุ่น PM 2.5 และปัญหาด้านฝุ่นละอองในอากาศ ทำให้เกิดความต้องการใช้เครื่องกรองอากาศเป็นจำนวนมาก แต่ในปัจจุบันเครื่องกรองอากาศที่ใช้ในครัวเรือนมักใช้การกรองอากาศผ่านแผ่นกรองอากาศ ซึ่งเมื่อใช้เครื่องกรองอากาศไปในระยะเวลาหนึ่ง ต้องทำการเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศ เพราะแผ่นกรองอากาศดักจับฝุ่นต้องเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศในเครื่องกรองอากาศซึ่งควรเปลี่ยนทุก 3 ถึง 6 เดือน อีกทั้งยังไม่ควรใช้แผ่นกรองอากาศแผ่นเดิมนานเกิน 1 ถึง 2 ปี และจากการเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศในเครื่องกรองอากาศบ่อย ส่งผลให้มีรายจ่ายที่เพิ่มขึ้น และสร้างขยะมากยิ่งขึ้น ปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้จัดทำกรออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องฟอกอากาศโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นละอองในอากาศ โดยเครื่องกรองประกอบด้วยตัวตกตะกอนอนุภาคไฟฟ้าสถิต แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และระบบควบคุมการไหลของอากาศ ระบบนี้พัดลมจะดึงอากาศเข้าสู่ระบบตัวเก็บอนุภาคไฟฟ้าสถิต สำหรับการอัดประจุและการตกตะกอนเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศให้สะอาด ทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคด้วยวิธีการวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศ โดยทำในห้องจำลองขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร จากนั้นนำค่าปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศก่อนและหลังการกรองอากาศไปหาประสิทธิภาพการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

The issue of PM 2.5 pollution and airborne particulate matter has led to a significant demand for air filtration systems. Currently, household air filtration systems often rely on filter sheets. Over time, these filters must be periodically replaced ideally every 3 to 6 months to maintain their efficacy. Using the same filter for more than 1 to 2 years can compromise its performance. Frequent replacements, however, lead to increased expenses and a significant rise in waste generation. To address these challenges, this thesis undertook the design, development, and testing of an air purifier employing electrostatic principles to eliminate airborne particulate matter. This system comprises electrostatically charged particle-trapping units, high-voltage direct current power sources, and airflow control mechanisms. The design incorporates a fan to draw air into the electrostatic particle-trapping system for charge compression and particle capture, aiming to enhance air quality. The effectiveness of particle capture was tested by measuring the particulate density before and after filtration in a 2 cubic meter laboratory setting.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XV
บทที่ 1	บทนำ
	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1
1.2	วัตถุประสงค์
	2
1.3	ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์
	2
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง
	3
2.1	หลักการ Pulse Width Modulation สำหรับควบคุมมอเตอร์
	3
2.2	หลักการ Pulse Width Modulation บน Arduino ESP32 และ ESP8266
	4
2.2.1	หลักการ Pulse Width Modulation บน Arduino
	4
2.2.2	หลักการ Pulse Width Modulation บน ESP8266
	5
2.2.1	หลักการ Pulse Width Modulation บน ESP32
	6
2.3	หลักการขยายสัญญาณ Pulse Width Modulation ด้วย Operational amplifier
	7
2.3.1	Operational amplifier
	7
2.4	หลักการของโปรแกรม โปรโตคอลและภาษาที่ใช้ในการออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชัน
	10
2.4.1	Node-RED
	10
2.4.2	Ngrok
	10
2.4.3	Arduino IDE
	11
2.4.4	MATLAB
	11
2.4.5	MongoDB
	12
2.4.6	JavaScript
	12
2.4.7	ภาษาซี
	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.8 HTML	13
2.4.9 ESP-NOW	14
2.5 หลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	16
2.6 สนามไฟฟ้าและการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ	16
2.7 การอัดประจุอนุภาค	17
2.8 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	22
2.9 การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค	22
2.10 ฝุ่น	23
2.11 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต	24
2.11.1 ESP32-WROOM-32	24
2.11.2 Laser Dust Sensor PMS3003 Arduino	25
2.11.3 IC Voltage Regulator L7815	26
2.11.4 IC CMOS 4049	27
2.11.5 IC TL494	28
2.11.6 IRFP460	29
2.11.7 Optocoupler H11L1	30
2.11.8 ตัวต้านทาน	31
2.11.9 ตัวเก็บประจุ	32
2.11.10 Terminal	33
2.11.11 Diode	33
2.11.12 IC LF351	37
2.11.13 Flyback Transformer	38
2.11.14 หม้อแปลงไฟฟ้า 220V AC / 12 VDC	39
บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำโครงงาน	40
3.1 การออกแบบ	40
3.1.1 การออกแบบภาพรวมการทำงานของระบบ	40
3.1.2 การออกแบบวงจรของเครื่องวัดฝุ่นละออง PM2.5	41
3.1.3 การออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชัน	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 การออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32	43
3.1.5 การออกแบบการเก็บข้อมูล	48
3.1.6 หลักการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	50
3.1.7 หลักการออกแบบสร้างสัญญาณแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม	52
3.1.8 หลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	52
3.1.9 หลักการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	55
3.1.9.1 การออกแบบแหล่งจากไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์	55
3.1.9.2 การออกแบบวงจรภาคควบคุมสัญญาณพัลส์	56
3.1.9.3 การออกแบบภาควงจรขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)	60
3.1.9.4 การออกแบบวงจรภาคควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	60
3.1.10 การออกแบบทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น	63
3.1.11 การออกแบบชั้นกรองอากาศ	67
3.1.11.1 โครงสร้างชั้นกรองอากาศที่ได้ทำการออกแบบ	68
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	71
3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์	71
3.2.2 เซนเซอร์วัดฝุ่น PM3003	71
3.2.3 สร้างสัญญาณ PWM	71
3.2.4 Operational Amplifier (Op Amp)	71
3.2.5 Optocoupler H11L1	71
3.2.6 CMOS 4049	71
3.2.7 Power MOSFET	72
3.2.8 Flyback Transformer	72
3.2.9 IC Voltage Regulator	72
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	72
3.3.1 การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์	72
3.3.2 การทดสอบการทำงานของวงจรส่งข้อมูลระหว่าง ESP32	72
3.3.3 การทดสอบการทำงานการส่งค่าแสดงบนเว็บแอปพลิเคชัน	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.3.4 การทดสอบการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM)	73
	3.3.5 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Operational Amplifier (Op Amp)	73
	3.3.6 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Optocoupler H11L1	73
	3.3.7 การทดสอบการทำงานของวงจรถักกำลังมอสเฟต (Power MOSFET)	73
	3.3.8 การทดสอบการทำงานของวงจรกระแสตรงแรงดันสูง (DC High Voltage)	73
	3.3.9 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมคำนวณจำนวนชั้นกรองอากาศและระยะห่าง	74
	3.3.10 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศ	74
บทที่ 4	ผลการทดลอง	75
	4.1 ผลการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดค่าฝุ่นด้วยเลเซอร์	75
	4.2 ผลการทดสอบการทำงานของارس่งข้อมูลระหว่าง ESP32	76
	4.3 ผลการทดสอบการทำงานของارس่งค่าแสดงบนเว็บแอปพลิเคชัน	77
	4.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM)	79
	4.5 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Operational Amplifier (Op Amp)	79
	4.6 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Optocoupler H11L1	80
	4.7 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรถักกำลังมอสเฟต (Power MOSFET)	81
	4.8 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกระแสตรงแรงดันสูง (DC High Voltage)	82
	4.9 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณชั้นกรองอากาศและระยะห่าง	86
	4.10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศ	88
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	95
	5.1 สรุปผล	95
	5.2 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม		97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก คำสั่งการควบคุมเว็บแอปพลิเคชันสำหรับเครื่องฟอกอากาศ	103
ภาคผนวก ข คำสั่งการวัดค่าฝุ่นและการรับค่าควบคุมเปิด-ปิดระบบ ของ ESP32 ทั้งฝั่งส่ง-ฝั่งรับ	116
ภาคผนวก ค คำสั่งการประมวลประสิทธิภาพเครื่องฟอกอากาศ และ หาคณสมบัติของเครื่องฟอกอากาศ	124



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	3
ลักษณะพัลส์ของสัญญาณที่ใช้ควบคุมและทิศทางการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์	
2.2	4
ลักษณะสัญญาณพัลส์แบบแคบและกว้าง	
2.3	5
แสดงขาที่สามารถใช้งาน PWM	
2.4	5
ขาการใช้งานของ ESP8266	
2.5	6
ขาการใช้งานของ ESP32	
2.6	7
โครงสร้างคุณสมบัติของออปแอมป์	
2.7	7
สัญลักษณ์ของออปแอมป์	
2.8	8
วงจรขยายแบบกลับเฟส	
2.9	8
วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	
2.10	9
วงจรขยายผลต่างสัญญาณ	
2.11	9
วงจรบวกสัญญาณ	
2.12	10
Node-RED	
2.13	10
โปรแกรม Ngrok	
2.14	11
Arduino IDE	
2.15	11
MATLAB	
2.16	12
MongoDB	
2.17	12
โครงสร้างภาษาซี	
2.18	14
โครงสร้างไฟล์ HTML	
2.19	15
ESP-NOW	
2.20	15
ส่งและรับข้อมูลทิศทางเดียว (one-way)	
2.21	15
ส่งและรับข้อมูลสองทิศทาง (two-way)	
2.22	16
หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต	
2.23	18
กลไกการอัดประจุของอนุภาค	
2.24	18
การอัดประจุโดยการแพร่	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.25	การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า	19
2.26	การเคลื่อนย้ายของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอน	21
2.27	ขนาดของฝุ่นละออง	23
2.28	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 WROOM-32	24
2.29	ขาการเชื่อมต่อของ ESP32 WROOM-32	25
2.30	PM2.5 Laser Dust Sensor (PMS3003)	25
2.31	IC Voltage Regulator L7815	26
2.32	ขาการใช้งานของ IC Voltage Regulator	26
2.33	CMOS 4049	27
2.34	ขาการเชื่อมต่อของ CMOS 4049	27
2.35	IC TL494	28
2.36	ขาการเชื่อมต่อของ IC TL494	28
2.37	IRFP460	29
2.38	ขาการเชื่อมต่อของ IRFP460	29
2.39	OPTO H11L1	30
2.40	ขาการเชื่อมต่อของ OPTO H11L1	30
2.41	Trim Potentiometer	31
2.42	Ceramic Capacitor	32
2.43	Electrolytic Capacitor	32
2.44	Mylar Capacitor	32
2.45	Terminal Block แบบ 3 ขา	33
2.46	คุณลักษณะไดโอด	34
2.47	ไดโอดเปล่งแสงแอลอีดี	34
2.48	สัญลักษณ์ไดโอดเปล่งแสงแอลอีดี	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.49	โฟโตไดโอด	35
2.50	สัญลักษณ์โฟโตไดโอด	35
2.51	ไดโอดกำลัง	35
2.52	สัญลักษณ์ไดโอดกำลัง	35
2.53	กราฟลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด	36
2.54	กราฟคุณลักษณะของการพังทลาย	36
2.55	IC LF351	37
2.56	โครงสร้างภายใน LF351	37
2.57	Flyback Transformer	38
2.58	หม้อแปลงไฟฟ้า 220VAC / 12 VDC	39
3.1	บล็อกไดอะแกรมภาพรวมของระบบ	40
3.2	การเชื่อมต่อ PM3003 เข้ากับ ESP32	41
3.3	ออกแบบเว็บแอปพลิเคชันให้สามารถแสดงค่าฝุ่นและสามารถควบคุมการเปิด-ปิดของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง	41
3.4	หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงหน้าล็อกอิน	42
3.5	หน้าเว็บแอปพลิเคชันลงทะเบียนสมัครสมาชิก	42
3.6	หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงค่าฝุ่นและปุ่มควบคุมการเปิด-ปิดวงจร	43
3.7	ออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ฝั่งส่ง	45
3.8	ผลการทดสอบการทำงานแบบ Peer to Peer ของ ESP ฝั่งส่ง	46
3.9	ออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ฝั่งรับ	47
3.10	ผลการทดสอบการทำงานแบบ Peer to Peer ของ ESP ฝั่งรับ	48
3.11	บล็อกโปรแกรม Node-RED ของเว็บแอปพลิเคชัน	49
3.12	หน้าเว็บ MongoDB สำหรับเก็บข้อมูล	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	50
3.14 ลักษณะกระแสและแรงดันในวงจรขณะทำงาน	51
3.15 กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันด้านออกเมื่อแรงดัน V_C ที่ออกจาก วงจรขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชยมีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณรูปสามเหลี่ยม	52
3.16 พื้นที่ของ A_C และ A_W สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่าง ๆ	53
3.17 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	53
(ก) วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	53
(ข) สัญญาณของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	54
3.18 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบพัลส์	55
3.19 ขั้นตอนการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบพัลส์	56
3.20 โครงสร้างภายในและขาใช้งานของไอซีเบอร์ TL494	57
3.21 สัญญาณลักษณะการทำงานของไอซีเบอร์ TL494	58
3.22 ลักษณะการเลือกใช้อาต์พุตของไอซี TL494	59
3.23 ไดอะแกรมภาคควบคุมสัญญาณพัลส์	59
3.24 ไดอะแกรมภาคควบคุมขาเกตของมอสเฟตกำลัง	60
3.25 ไดอะแกรมการทำงานของมอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP460	61
3.26 ไดอะแกรมวงจรทดสอบสมรรถนะหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบค	62
3.27 โครงสร้างของขาใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบค TBE รุ่น TLF14689F1	62
3.28 ไดอะแกรมวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบค TBE รุ่น TLF14689F1	63
3.29 รายละเอียดการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน ส่วนที่ 1	65
3.30 รายละเอียดการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน ส่วนที่ 2	66
3.31 ชั้นกรองอากาศที่ได้ออกแบบเป็นชิ้นงาน 3 มิติ	67
3.32 ชั้นกรองอากาศที่ได้ออกแบบเป็นชิ้นงานจริง	67
3.33 รางใส่แผ่นตกตะกอนของเครื่องกรองอากาศ	68
3.34 ข้อต่ออุปกรณ์รูปตัวแอลเพื่อใช้ในการเชื่อมขั้วดิซชาร์จกับโครงชั้นกรองอากาศ	69

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่		
3.35	ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมขั้วดิสซาร์จกับขั้วดิสซาร์จ	69
3.36	ขั้วดิสซาร์จที่มีลักษณะเป็นพื้นเรียบ	69
3.37	แผ่นตกตะกอนของเครื่องกรองอากาศ	70
4.1	การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ด ESP32	75
4.2	ค่าการวัดฝุ่นที่แสดงบนจอ Serial Monitor	75
4.3	ค่าฝุ่นที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละอองในอากาศ PM2.5 (SNDWAY รุ่น SW-825)	76
4.4	การส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ทั้ง 2 ตัวระหว่างฝั่งรับกับฝั่งส่ง	77
4.5	ผลลัพธ์การส่งค่าระหว่าง ESP32 ทั้ง 2 ตัวระหว่างฝั่งส่งกับฝั่งรับ	77
4.6	เว็บแอปพลิเคชันแสดงหน้าล็อกอิน	78
4.7	หน้าเว็บแอปพลิเคชันลงทะเบียนสมัครสมาชิก	78
4.8	หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงผลค่าฝุ่น	78
4.9	การคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอดและความถี่ที่ใช้ในการทำงาน	79
4.10	สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ LF351	80
4.11	สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ H11L1	81
4.12	สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ IRFP460	82
4.13	วงจรโวลต์เตจดีไวเดอร์	83
4.14	รอบการทำงานที่ 25%	84
4.15	รอบการทำงานที่ 50%	84
4.16	รอบการทำงานที่ 75%	84
4.17	วงจรโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้าง	85
4.18	วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	85
4.19	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น	86
4.20	การวิเคราะห์จำนวนประจุที่อนุภาคฝุ่นจะได้รับ	86
4.21	คุณสมบัติของเครื่องกรองอากาศที่ได้จากหลักการไฟฟ้าสถิต	87
4.22	ชิ้นงานจริงที่ได้จัดทำขึ้น	87
4.23	ห้องจำลองขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	ห้องจำลองจะมีเครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐานกับเครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด	88
4.25	กราฟค่าเฉลี่ยของการกรองอากาศของฝุ่น PM2.5	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	แสดงค่า Value และ ค่า Duty of cycle	4
2.2	ขบวนการใช้งานของ Arduino UNO ที่สร้าง PWM และความถี่ที่ได้	5
2.3	องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของ ESP32 WROOM-32	24
2.4	องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของ PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003)	25
2.5	ขบวนการเชื่อมต่อของ PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003)	26
2.6	ข้อมูลจำเพาะของ CMOS 4049	27
2.7	การเชื่อมต่อขบวนการทำงานของ IC TL494	28
2.8	ข้อมูลจำเพาะของ IRFP460	30
2.9	ข้อมูลจำเพาะของ OPTO H11L1	31
2.10	ข้อมูลจำเพาะของ Terminal Block	33
2.11	คุณสมบัติของซีเนอริโคโอด	37
2.12	ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ LF351	37
2.13	ขบวนการใช้งานของอุปกรณ์ LF351	38
3.1	คุณสมบัติของไอซีเบอร์ TL494	56
3.2	คุณสมบัติสารกึ่งตัวนำมอสเฟตกำลัง เบอร์ IRFP460	60
3.3	องค์ประกอบเพื่อการพิจารณาในเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	61
4.1	ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 1	89
4.2	ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 2	90
4.3	ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 3	91
4.4	ค่าเฉลี่ยของฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต	92
4.5	ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศ ไตสัน ดีพีศูนย์สี่	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงปัญหาหมอกพิษอากาศ เช่นควันหมอกหรือฝุ่น PM2.5 การใช้เครื่องฟอกอากาศภายในอาคาร (Indoor air cleaner) เป็นสิ่งที่สำคัญและเมื่อมองในมุมมองของสุขภาพกับความเหมาะสม โดยเฉพาะในสถานที่ทำงาน เช่น โรงพยาบาล และที่พักอาศัย โดยเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารจะเป็นผู้ช่วยที่สำคัญในการแก้ปัญหาเรื่องฝุ่น PM2.5 โรคมะเร็งปอด และโรคหอบหืด รวมถึงภาวะที่มีการเผาเพื่อกำจัดขยะที่สามารถก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ในปัจจุบันเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารยังไม่ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในส่วนสำนักงาน โรงพยาบาล และที่พักอาศัยมากนัก เนื่องจากราคาของเครื่องฟอกอากาศค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและบริการจากตัวแทนจำหน่ายที่สูง เพราะฉะนั้นเราจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องฟอกอากาศเพื่อให้ความเหมาะสมทั้งในราคาและมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบัน เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารมีมากมายตามแบบที่เหมาะสมกับความต้องการทางอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม มีความแตกต่างในโครงสร้าง ทฤษฎีการทำงาน และราคา กันอย่างชัดเจน เครื่องฟอกอากาศที่ใช้งานในประเทศส่วนใหญ่มักใช้เทคนิคการกรองอากาศด้วยแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง (High-efficiency particulate air, HEPA) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกรองฝุ่นสูงถึง 99.97% สำหรับอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองนี้ยังมีค่าใช้จ่ายสูงในการบำรุงรักษารายปี โดยปกติ อยู่ในช่วง 3,000-6,000 บาทต่อปี เพื่อการเปลี่ยนแผ่นกรอง 1-2 ครั้งต่อปี นอกจากนี้ เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองอากาศยังส่งผลให้เกิดขยะจากแผ่นกรองที่เสื่อมสภาพ หรือขยะที่ติดเชื้อหากใช้ในสถานที่ที่มีมลพิษในอากาศสูงขึ้นไปที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และต้องถูกกำจัดด้วยการเผา ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ ดังนั้นเครื่องฟอกอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic air cleaner) เป็นทางเลือกที่มีความโดดเด่นเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคสูงเทียบเท่ากับแผ่นกรอง HEPA และสามารถถอดล้างทำความสะอาดได้ ช่วยประหยัดวัสดุสิ้นเปลือง ลดค่าใช้จ่าย และลดปัญหาขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพ และไม่ต้องให้เกิดขยะมลพิษทางอากาศด้วยการเผา

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาหลักการและทฤษฎีของไฟฟ้าสถิต
- 2) เพื่อศึกษาหลักการทำงานและการเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าแรงดันเริ่มต้นการเกิดโคโรนา ดิสชาร์จ (Corona discharge)
- 3) เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (DC high voltage)
- 4) เพื่อศึกษาการสร้างเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต
- 5) เพื่อออกแบบและสร้างระบบเครื่องฟอกอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

โครงการนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การวัดค่าฝุ่นขนาดต่าง ๆ และการกรองฝุ่นโดยได้ออกแบบให้การทำงานของแต่ละอุปกรณ์มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ มีขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์มีความเหมาะสม สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกแก่ผู้ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

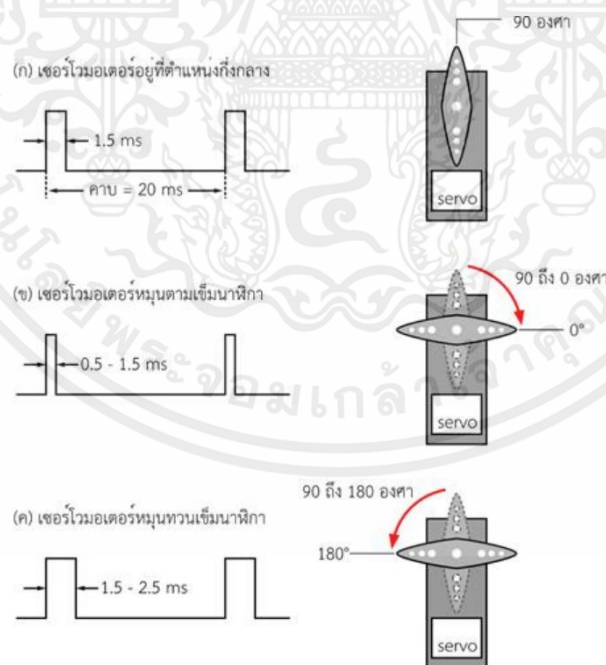
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง “เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต” ได้จัดทำเพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถกรองฝุ่นเพื่อฟอกอากาศให้บริสุทธิ์และวัดค่าฝุ่นได้ ซึ่งมีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 หลักการ Pulse Width Modulation สำหรับควบคุมมอเตอร์

การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์โดยการสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนให้กับวงจรควบคุมภายในเซอร์โวมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 โดยเริ่มจากการสร้างพัลส์คาบเวลา 20 มิลลิวินาที จากนั้นทำการปรับความกว้างของพัลส์ให้เท่ากับ 1.5 มิลลิวินาที จะพบว่าแกนของเซอร์โวมอเตอร์อยู่ตรงกึ่งกลาง 90 องศา ดังรูปที่ 2.1 (ก) การหมุนในช่วงมุม 0 ถึง 90 องศา จะใช้พัลส์กว้างประมาณ 0.5 ถึง 1.5 มิลลิวินาที แกนมอเตอร์จะหมุนไปทางด้านขวามือตามเข็มนาฬิกา 90 องศา ดังรูปที่ 2.1 (ข) และถ้าทำการส่งพัลส์กว้างประมาณ 1.5 ถึง 2.5 มิลลิวินาที แกนมอเตอร์จะหมุนไปด้านซ้ายมือ ดังรูปที่ 2.1 (ค) [1]

สำหรับการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนเซอร์โวมอเตอร์ ทำได้โดยการกำหนดขนาดของพัลส์และใช้การหน่วงเวลาประกอบ

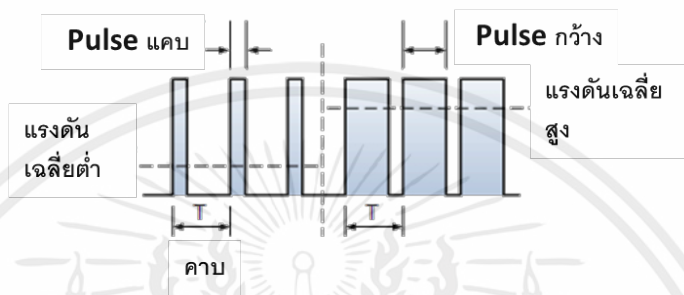


รูปที่ 2.1 ลักษณะพัลส์ของสัญญาณที่ใช้ควบคุมและทิศทางการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการ Pulse Width Modulation บน Arduino ESP32 และ ESP8266

PWM (Pulse Width modulation) ซึ่งเป็นการปล่อยสัญญาณดิจิทัล เปิดและปิด เร็ว ๆ ให้แรงดันเฉลี่ยใกล้เคียงกับแรงดันที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่ง PWM (Pulse Width modulation) ถูกกำหนดโดยความถี่ (Frequency) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการอัตราส่วน (T) กลับของความถี่ และความกว้างของการสัญญาณ (Pulse width) ความกว้างของสัญญาณยิ่งกว้างจะยิ่งมีแรงดันเฉลี่ยสูง หากยิ่งแคบจะมีแรงดันเฉลี่ยที่น้อย [2]



รูปที่ 2.2 ลักษณะสัญญาณพัลส์แบบแคบและกว้าง [2]

คาบ T (Period) คือ อัตราส่วนกลับของความถี่มีหน่วยเป็นวินาที (s)

$$T = \frac{1}{f}$$

โดย f (Frequency) คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

2.2.1 Pulse Width Modulation บน Arduino [2]

ในโปรแกรม Arduino มี library ในการสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) จากฟังก์ชัน `analogWrite(PIN, VALUE)`; โดย PIN คือขาสัญญาณที่ต้องการปล่อย PWM และ Value คือค่า Duty of cycle ขนาด 8 bit มีค่าระหว่าง (0 ถึง 255) โดยคำนวณจาก

$$VALUE = 255 \times \frac{(\text{duty of cycle})}{100}$$

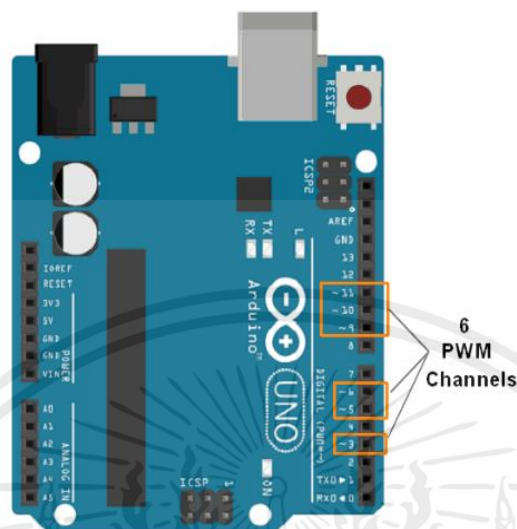
ค่า Value Duty of cycle สามารถดูได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Value และ ค่า Duty of cycle

ค่า Value	ค่า Duty of cycle
0	0%
63	25%
128	50%
191	75%
255	100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขา (PIN) ของ Arduino UNO สามารถดูได้ดังตารางที่ 2.2 จะมีขา PWM 6 ขาด้วยกัน ใช้สัญลักษณ์ ~ นำหน้าเลข PIN เพื่อระบุว่าขาเหล่านี้สามารถปล่อย PWM ได้ แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยทุกขาจะมีความถี่ 490 เฮิร์ตซ์ ยกเว้นขา 5 และ 6 จะมีความถี่ 980 เฮิร์ตซ์



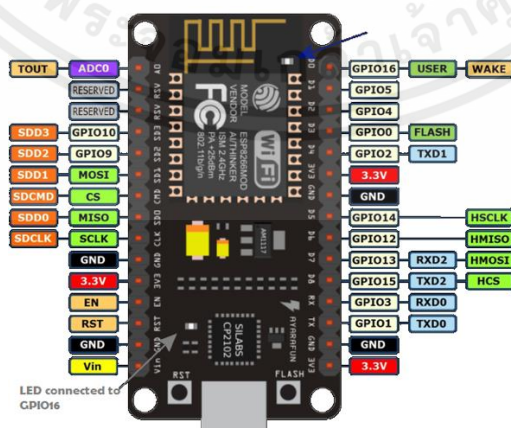
รูปที่ 2.3 แสดงขาที่สามารถใช้งาน PWM [2]

ตารางที่ 2.2 ขาการใช้งานของ Arduino UNO ที่สร้าง PWM และความถี่ที่ได้

ขา (PIN)	ความถี่
3,9,10,11	490 Hz
5,6	980 Hz

2.2.2 Pulse Width Modulation บน ESP8266 [2]

โดย ESP8266 จะสร้าง PWM ได้ทุกขา (PIN) โดยใช้คำสั่ง analogWrite ยังสามารถใช้ได้ แต่จะใช้ค่า VALUE ที่ความละเอียด 10 bit คือ 0 - 1023 โดยขาส่วนใหญ่ใน ESP8266 จะให้ความถี่ 1000 Hz แสดงดังรูปที่ 2.4

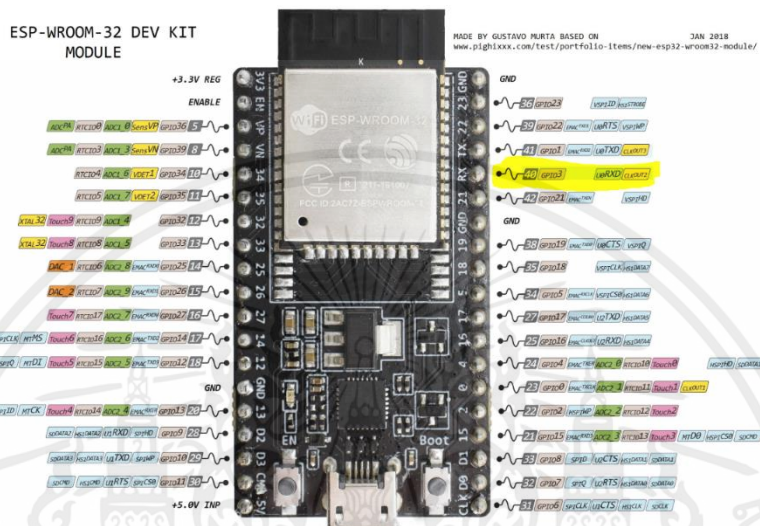


รูปที่ 2.4 ขาการใช้งานของ ESP8266 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 Pulse Width Modulation บน ESP32 [2]

บน ESP32 ในการควบคุม PWM แตกต่างไปจาก Arduino และ ESP8266 โดย ESP32 จะมีฟังก์ชันชื่อว่า ledc ซึ่งเราสามารถกำหนดความถี่ขาได้อิสระ โดยแสดงการใช้งานดังรูปที่ 2.5 จาก ledcWrite(1, VALUE); โดย VALUE เป็นค่า duty cycle ที่ขึ้นกับความละเอียดที่กำหนดในฟังก์ชัน ledcSetup



รูปที่ 2.5 ขาการใช้งานของ ESP32 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการขยายสัญญาณ Pulse Width Modulation ด้วย Operational amplifier

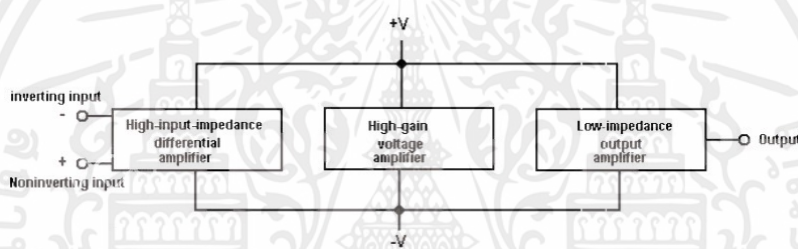
2.3.1 Operational amplifier

Operational amplifier หรือ ออปแอมป์ (Op-amp) ออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น วงจรเสียง วงจรเรกูเรเตอร์ วงจรเครื่องมือวัด วงจรบวกลบแรงดัน วงจรขยายสัญญาณ และเป็นวงจรที่มีความสามารถในการขยายสัญญาณที่มีอัตราการขยายสัญญาณสูงมากจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในทั้งวงจรที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยปัจจุบันมีการพัฒนาสร้างอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรเล็ก ๆ ในรูปแบบของวงจรรวม (IC) จึงทำให้ออปแอมป์มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและสะดวกต่อการใช้งาน [3]

คุณสมบัติที่สำคัญของออปแอมป์ มีดังนี้

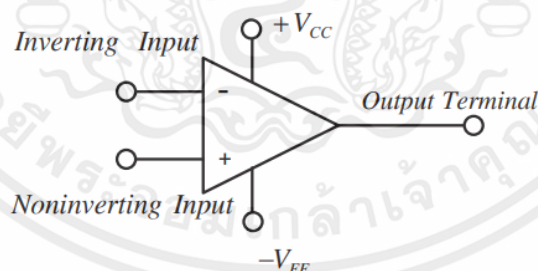
- 1.) มีอัตราการขยายสูง (Gain)
- 2.) อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูง ทำให้กระแสอินพุตมีค่าต่ำ
- 3.) เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำไม่มีผลต่อโหลดของวงจร

โครงสร้างคุณสมบัติของออปแอมป์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างคุณสมบัติของออปแอมป์ [3]

สัญลักษณ์ของออปแอมป์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



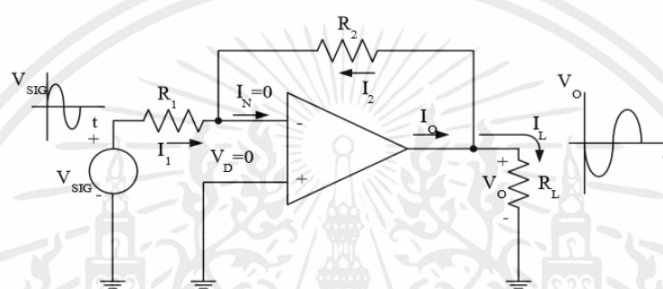
รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์ประกอบด้วยอินพุต 2 ขั้ว และเอาต์พุต 1 ขั้ว โดยขั้วอินพุตจะประกอบไปด้วย inverting input และ Non-inverting input เมื่อป้อนสัญญาณไฟตรงหรือไฟสลับให้กับขั้ว inverting input โดยอินพุตอีกขั้วหนึ่งจะต่อกับจุดอ้างอิงอีกจุดหนึ่ง สัญญาณที่ได้ออกมาจะกลับเฟส 180 องศา กับสัญญาณขั้วอินพุต ส่วนของ Non-inverting input สัญญาณที่ออกมาได้จะเฟสเดียวกับสัญญาณอินพุต โดยเราสามารถนำออปแอมป์มาใช้งานได้ 4 รูปแบบดังนี้ [5]

1.) วงจรขยายกลับเฟส (Inverting amplifier)

เป็นวงจรที่ขยายอินพุตให้มีปริมาณสูงขึ้นมากกว่าเดิม โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะกลับเฟส 180 องศา จากรูปที่ 2.8 จะทำการป้อนอินพุตเข้าที่ขั้วลบของออปแอมป์และสัญญาณเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับมาที่อินพุตโดยผ่านตัวต้านทาน R_2



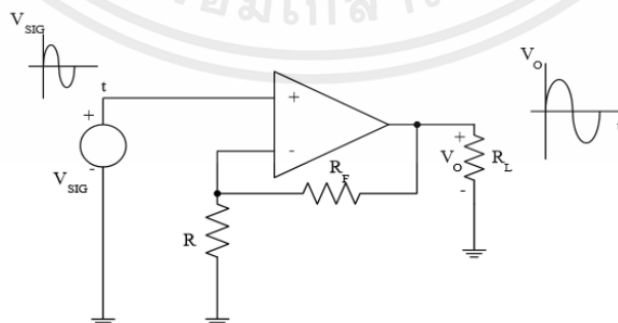
รูปที่ 2.8 วงจรขยายแบบกลับเฟส [5]

จะมีอัตราการขยาย คือ

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

2.) วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier)

เป็นวงจรที่ขยายอินพุตให้มีปริมาณสูงขึ้นกว่าเดิม แต่ไม่กลับเฟสจะเป็นเฟสเดียวกับอินพุตที่เข้ามา จากรูปที่ 2.9 จะทำการป้อนอินพุตเข้าขั้วบวก และสัญญาณเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับมาที่อินพุตโดยผ่านตัวต้านทาน R_f



รูปที่ 2.9 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส [5]

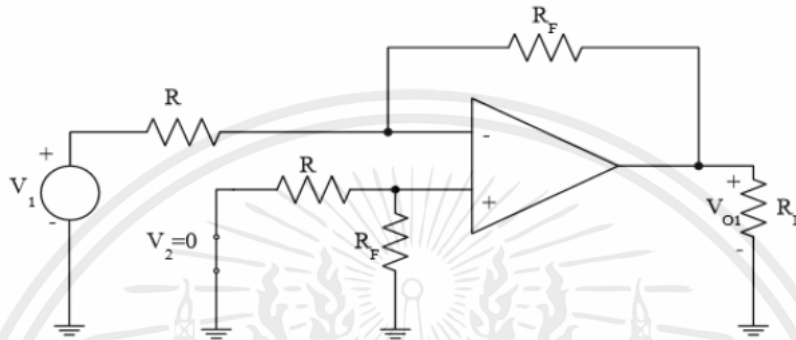
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีอัตราขยาย คือ

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R}$$

3.) วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Difference amplifier)

วงจรขยายสัญญาณผลต่างดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นวงจรที่สัญญาณเอาต์พุตเป็นผลลบจากการลบกันของสัญญาณอินพุตทั้งสอง



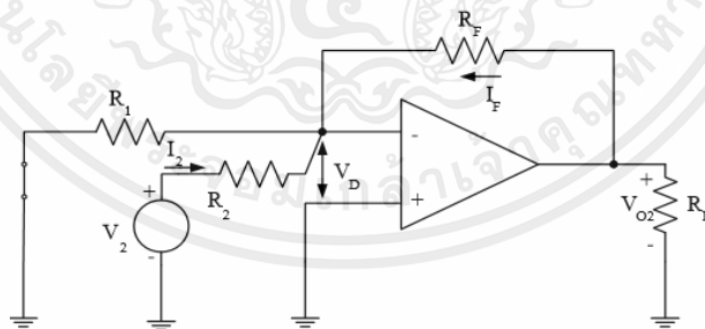
รูปที่ 2.10 วงจรขยายผลต่างสัญญาณ [5]

จะมีอัตราขยาย คือ

$$A_v = V_1 - V_2 = \frac{R_f}{R} = \frac{R}{R_f}$$

4.) วงจรบวกสัญญาณ (Summing amplifier)

วงจรวกสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นวงจรที่บวกสัญญาณอินพุตที่รับมาหลาย ๆ อินพุตรวมกันเป็นเอาต์พุตเดียว



รูปที่ 2.11 วงจรวกสัญญาณ [5]

ดังนั้น

$$V_o = \frac{R_f}{R} (V_1 - V_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการของโปรแกรม โปรโตคอลและภาษาที่ใช้ในการออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชัน

2.4.1 Node-RED

Node-RED ดังรูปที่ 2.12 เป็นเครื่องมือสำหรับนักพัฒนาโปรแกรมในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์เข้ากับ API (Application Programming Interfaces) เป็นโปรแกรมที่เขียนโปรแกรมตามกระบวนการที่มีหน้า UI ให้นักพัฒนาใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ทำให้ข้อมูลเส้นทางการเชื่อมต่อ Flow-Based เป็นเรื่องง่าย เนื่องจาก Node-RED เป็นการเขียนโปรแกรมตามกระบวนการ เพียงเลือกโหนด (Node) ที่จะวางและเชื่อมต่อกับโหนดนั้นเพื่อควบคุม I/O Node-RED มีโหนดหลากหลายให้เลือก สามารถสร้างฟังก์ชัน JavaScript โดยใช้โปรแกรมแก้ไขข้อความที่ให้ไว้ใน Node-RED อีกทั้งยังสามารถบันทึกฟังก์ชัน เทมเพลต และกระบวนการเพื่อใช้ในงานอื่นได้ Node-RED ทำงานบน Node.js ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานกับ Raspberry Pi เนื่องจากใช้ทรัพยากรน้อยมากขนาดไฟล์ไม่ใหญ่และ Node.js ยังทำหน้าที่เป็นสื่อกลางสำหรับ Raspberry Pi ในการสื่อสารกับเว็บเบราว์เซอร์และอุปกรณ์อื่น ๆ [6]



รูปที่ 2.12 Node-RED [7]

2.4.2 Ngrok

Ngrok โปรแกรมที่แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นบริการส่งต่อพอร์ตข้อมูลสำหรับเปิด URL จาก localhost ไปยัง public กล่าวคือเป็นการทำให้เว็บไซต์ที่คิดค้นสามารถเข้าถึงได้ผ่านทางอินเทอร์เน็ต โดยสามารถใช้คุณสมบัตินี้เพื่อทดสอบเว็บไซต์ได้ และยังสามารถเรียกใช้หน้าเว็บบน localhost แทนได้และสำหรับการพัฒนาระบบที่ต้องเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ต อาจจะเป็น API หรือ อินเทอร์เน็ต แต่เมื่อเขียนโค้ดจะเขียนลงในคอมพิวเตอร์ของตนเอง และเมื่อทำการทดสอบระบบก็สามารถทำได้บนเครื่องของตนเอง แต่เมื่อพยายามเรียกใช้จากคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นจะเชื่อมต่อได้ยาก หากอยู่ในเครือข่ายเดียวกันการดำเนินการนี้อาจไม่ใช่เรื่องยาก แต่ถ้าอยู่ในเครือข่ายแตกต่างกันการเชื่อมต่อจะเริ่มยากขึ้น โดยจะให้ผู้อื่นใช้ระบบที่ทำงานบน localhost ของผู้พัฒนาได้อย่างไร ดังนั้นการเลือกใช้โปรแกรม Ngrok จึงเป็นการช่วยเหลือผู้พัฒนาระบบ [8]



รูปที่ 2.13 โปรแกรม Ngrok [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 Arduino IDE

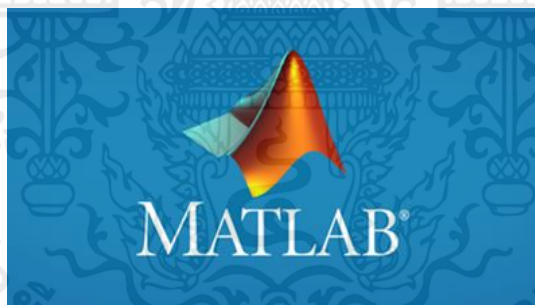
Arduino IDE ย่อมาจาก (Integrated Development Environment) ดังรูปที่ 2.14 เป็นส่วนเสริมของระบบการพัฒนา หรือตัวช่วยที่จะช่วยเหลือนักพัฒนาหรือบุคคลที่จะพัฒนาแอปพลิเคชัน เพื่อเสริมให้เกิดความรวดเร็ว และจะใช้งานในลักษณะโอเพ่นซอร์ส ซึ่งจะทำหน้าที่ติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด Arduino ซึ่งโปรแกรมจะออกแบบให้ง่ายต่อการเขียนโค้ดและอัปโหลดโปรแกรมสู่บอร์ด Arduino [10]



รูปที่ 2.14 Arduino IDE [10]

2.4.4 MATLAB

MATLAB ย่อมาจาก Matrix Laboratory ดังรูปที่ 2.15 เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อจัดการกับข้อมูลที่เป็นเมทริกซ์ เหมาะสำหรับพัฒนาอัลกอริทึม โปรแกรมมีคุณสมบัติของการคำนวณ การแสดงข้อมูลด้านกราฟิกแบบวิซวลไลเซชัน (Visualization) และการจำลอง (Simulations) การทำงานของระบบต่าง ๆ โดยเฉพาะการวิเคราะห์ข้อมูล [11]



รูปที่ 2.15 MATLAB [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 MongoDB

MongoDB ดังรูปที่ 2.16 เป็นระบบจัดการฐานข้อมูลแบบโอเพ่นซอร์สที่ยืดหยุ่นสำหรับการจัดเก็บและจัดการข้อมูลจำนวนมากในแอปพลิเคชันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลสมัยใหม่ โมเดลข้อมูลตามเอกสารและสถาปัตยกรรมแบบกระจายทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานหลายกรณี ตั้งแต่การวิเคราะห์แบบเรียลไทม์และการจัดการเนื้อหาไปจนถึง IoT และแอปพลิเคชัน [13]



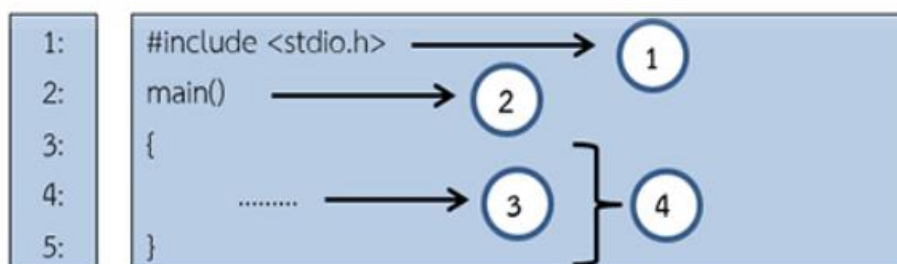
รูปที่ 2.16 MongoDB [13]

2.4.6 JavaScript

JavaScript ภาษาโปรแกรมที่นักพัฒนาใช้ในการสร้างเว็บไซต์แบบอินเทอร์แอคทีฟ ตั้งแต่การรีเฟรชพีดีเอชไอซีเอสไปจนถึงการแสดงผลเคลื่อนไหว ลักษณะการเขียนโปรแกรมคำสั่งของ JavaScript ต้องเขียนร่วมกับภาษา HTML โดยแทรกอยู่ภายใต้ระหว่างคำสั่ง <Head> กับ </Head> หรือจะเขียนหลังจากคำสั่ง <Body> ก็ได้เช่นกัน [14][15]

2.4.7 ภาษาซี

ภาษาซีเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ถูกออกแบบมาในการเขียนโปรแกรมระบบ ซึ่งมีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการออกแบบโปรแกรมสูง ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมได้ทั้งแบบออฟเจ็ค และการเขียนแบบปกติทั่วไป และยังมีเครื่องมืออำนวยความสะดวกในการจัดการและเข้าถึงระดับหน่วยความจำ ถูกนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมแบบต่างๆ เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ระบบฝังตัว (Embedded) เว็บเซิร์ฟเวอร์ และแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพอย่างสูง โดยโครงสร้างภาษาซี ประกอบไปด้วย 4 ส่วน ดังรูปที่ 2.17 ดังนี้ [16]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างภาษาซี [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การประกาศส่วนหัวของโปรแกรม

เรียกอีกอย่างว่า เฮดเดอร์ไฟล์ (Header File) เป็นไฟล์ที่ใช้รวบรวมฟังก์ชันต่างๆ ที่สามารถเรียกได้ เช่น `stdio.h` ภายในไฟล์ header จะเป็นไฟล์ header ที่รวบรวมฟังก์ชันต่างๆ ฟังก์ชันมาตรฐานใช้ในการรับข้อมูล (Input) และแสดงข้อมูล (Output) เช่น ฟังก์ชัน `printf ()` เป็นฟังก์ชันแสดงข้อมูล มักรวมอยู่ในไฟล์ `stdio.h` เป็นต้น

2) ส่วนของฟังก์ชันหลัก

โดยฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นมาชื่อฟังก์ชัน `main()` โดยทุกโปรแกรมจะต้องมีฟังก์ชัน `main()` ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันหลักในการทำงานของการประมวลผลโปรแกรมทุกครั้ง โปรแกรมจะทำการประมวลผลที่ฟังก์ชัน `main()` เป็นฟังก์ชันแรก

3) ส่วนรายละเอียดของโปรแกรม

ส่วนนี้เป็นส่วนในการเขียนคำสั่งต่าง ๆ เพื่อสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำงาน ในการเขียนคำสั่งจะเขียนภายในเครื่องหมายปีกกาเปิด { และเครื่องหมายปีกกาปิด } โดยปกติส่วนของการเขียนโปรแกรมจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ

1) ส่วนของการประกาศตัวแปร คือ ส่วนที่ใช้ในการกำหนดตัวแปรที่จะใช้งานในการเขียนโปรแกรม

2) ส่วนของคำสั่งหรือฟังก์ชันต่าง ๆ คือ ส่วนที่ใช้สำหรับในการพิมพ์คำสั่งและฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งหลังจากพิมพ์ฟังก์ชันเสร็จแล้วจะต้องปิดท้ายด้วยเครื่องหมายเซมิโคลอน ; เสมอ

4) ส่วนของการเปิดโปรแกรมและปิดโปรแกรม

ตามโครงสร้างของภาษาซี จะต้องมีการกำหนดจุดเริ่มต้นและจบโปรแกรม โดยในที่นี้ใช้เครื่องหมายปีกกาเปิด { ในการระบุตำแหน่งการเริ่มต้นโปรแกรม และ ใช้เครื่องหมายปีกกาปิด } ในการระบุตำแหน่งการจบโปรแกรม

2.4.8 HTML

HTML ย่อมาจาก (Hyper Text Markup Language) เป็นภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมข้อมูลในการสร้างไฟล์เว็บเพจ ถูกกำหนดมาตรฐานโดยองค์กร World Wide Web Consortium (W3C) และจากการพัฒนาทางด้าน Software ของ Microsoft สามารถทำโดยใช้โปรแกรม Text Editor ต่าง ๆ เช่น Notepad, Edit plus หรือจะอาศัยโปรแกรมที่เป็นเครื่องมือช่วยสร้างเว็บเพจ เช่น Microsoft FrontPage, Dream Weaver ซึ่งอำนวยความสะดวกในการสร้างหน้า HTML ส่วนการเรียกใช้งานหรือทดสอบการทำงานของเอกสาร HTML จะใช้โปรแกรม web browser เช่น (IE), Mozilla Firefox, Safari, Opera, และ Netscape Navigator [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟล์ HTML เป็นไฟล์รหัส (ASCII) ถูกบันทึกไว้ในรูปแบบเอกสาร (Text File) ที่สามารถถูกสร้างจากโปรแกรม Notepad หรือ Word Processing ทั่ว ๆ ไป ซึ่งลักษณะไฟล์ของ HTML ประกอบไปด้วยแท็ก (Tag) ต่าง ๆ ที่เป็นคำสั่งของ HTML ซึ่งแท็ก (Tag) จะอยู่ภายใต้เครื่องหมาย < และ > โดย แท็ก (Tag) ใน HTML แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ [18]

- 1) คอนเทนเนอร์แท็ก (Container Tag) ซึ่งประกอบไปด้วย แท็กเปิด และ แท็กปิด โดยที่แท็กเปิดจะมีเครื่องหมาย / นำหน้า เช่น <H1>...</H1>
- 2) แท็กเปล่า (Empty Tag) จะประกอบไปด้วยแท็กเปิดอย่างเดียว เช่น <HR> ซึ่งแท็กจะถูกเขียนด้วยตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ หรือพิมพ์เล็กก็ได้ จะไม่มีผลต่อการแสดงผลของเว็บ

ส่วนโครงสร้างไฟล์ HTML จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวเรื่อง (Head Section) และ ส่วนเนื้อหา (Body Section) โดยจะมีแท็ก <HTML> และ </HTML> เป็นตัวกำหนดขอบเขตไฟล์ ซึ่งส่วนหัวเรื่องจะมีไว้สำหรับกำหนดข้อมูลเฉพาะของหน้าเว็บ และสำหรับส่วนเนื้อหามีไว้กำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ที่ต้องการแสดงบนหน้าเว็บ โดยจะอยู่ภายใต้แท็ก <BODY> และ </BODY> แสดงดังรูปที่ 2.18

```

<HTML>
  <HEAD>
    <TITLE> ใส่ชื่อเรื่อง </TITLE>
  </HEAD>
  <BODY>
    ใส่เนื้อหาที่ต้องการแสดงบนหน้าเว็บ
  </BODY>
</HTML>

```

รูปที่ 2.18 โครงสร้างไฟล์ HTML[18]

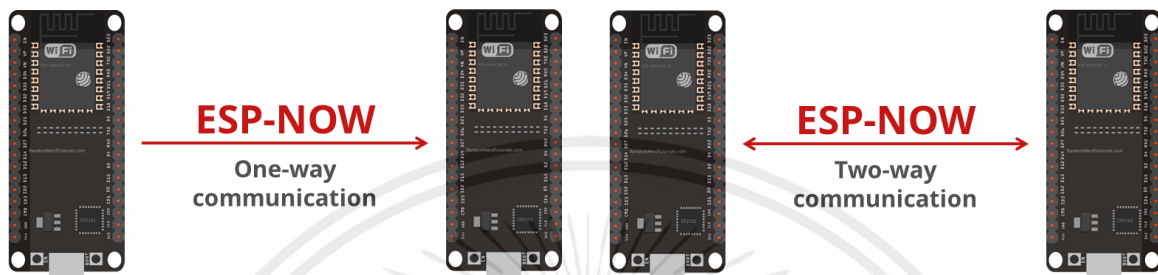
2.4.9 ESP-NOW

ESP-NOW ดังรูปที่ 2.19 ประโยชน์ของการใช้คือเพื่อถ่ายโอนข้อมูลระหว่างชิป ESP โดยใช้ Wi-Fi ในการส่งข้อมูลแต่ไม่ต้องการการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายใด ๆ หรือที่เรียกว่าโพรโตคอลการสื่อสาร Wi-Fi ไร้การเชื่อมต่อ บริษัท Espressif กำหนดชื่อว่า ESP-NOW ซึ่งเป็นบริษัทที่สร้างชิป ESP และเนื่องจาก ESP-NOW ได้รับการออกแบบให้เป็นโพรโตคอลไร้การเชื่อมต่อโดยใช้ Wi-Fi เป็นสื่อในการสื่อสารข้อมูลจึงสามารถส่งและรับได้ในทิศทางเดียว (one-way) และสองทิศทาง (two-way) แสดงดังรูปที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESP NOW

รูปที่ 2.19 ESP-NOW [19]



รูปที่ 2.20 ส่งและรับข้อมูลทิศทางเดียว (one-way)

[19]

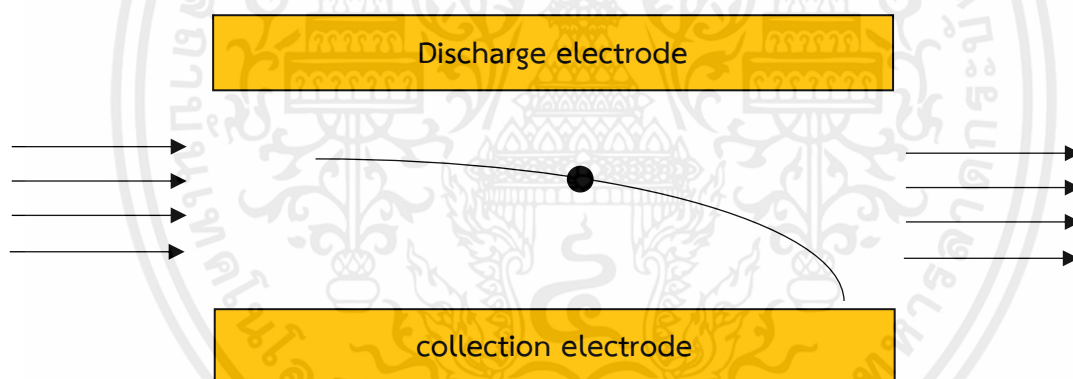
รูปที่ 2.21 ส่งและรับข้อมูลสองทิศทาง (two-way)

[19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

แนวคิดหลักในการทำงานของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคือการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองจากกระบวนการไหลของแก๊สในอากาศ โดยใช้แรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นใต้สนามไฟฟ้า กระบวนการนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือขั้วดิสชาร์จ (Discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (Collection electrode) เมื่อให้ไฟฟ้าแรงดันสูงกับขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอนทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) รอบ ๆ ขั้วดิสชาร์จ ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons) ถูกสร้างขึ้นที่จุดโคโรนาและส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่ออากาศที่มีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้ จะทำให้เกิดการชนระหว่างอนุภาคกับไอออน (Ion to particle collisions) ซึ่งจะทำให้ไอออนเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นและทำให้อนุภาคได้รับประจุ (Particle charging) อนุภาคที่มีประจุ (Charged particle) จะถูกดูดดึงให้เคลื่อนที่ไปตกสะสมอยู่บนขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต จากนั้นอนุภาคที่ตกตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนด้วยวิธีการเคาะที่ขั้วตกตะกอน ประสิทธิภาพการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Collection efficiency) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุที่อนุภาคได้รับความเข้มข้นไฟฟ้าและความเร็วของการไหลของอากาศภายในตัวตกตะกอน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.22 [20]



รูปที่ 2.22 หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต [20]

2.6 สนามไฟฟ้าและการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) $E(r)$ ที่ระยะรัศมีใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [20]

$$E(r) = \frac{v}{r_0 \ln(d/r_0)} \quad (1)$$

เมื่อ $E(r)$ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/m

v คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับดิสชาร์จจิลเล็กโทรด มีหน่วยเป็น V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_0 คือ รัศมีของขั้วดิสชาร์จอิเล็กทรอนิกส์ มีหน่วยเป็น cm

d คือ รัศมีทรงกระบอกสมมูล (equivalent cylindrical radius)

เมื่อ E_0 คือ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$E_0 = E_s \left(\delta + A\sqrt{\delta / r_1} \right) \quad (2)$$

$$E_s = 5.075 \left(\frac{259}{T} \times \frac{P}{1.0125} \right)^{1.48} + 0.063RH \left(\frac{298}{T} \times \frac{P}{1.0135} \right) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{T_r}{T} \frac{P}{P_r} \quad (4)$$

เมื่อ E_s คือ สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown field) ในอากาศที่สภาวะปกติ

(3.126×10^6 V/m สำหรับความดันบรรยากาศที่ 20 C)

A คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $0.0266 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาชนิดขั้วบวก

δ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่มีความดันบรรยากาศ ถ้าตัวตกตะกอนเป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันและไม่ได้ผลของประจุค้าง (space charge effect)

r_1 คือ ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วดิสชาร์จ

r_2 คือ ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน

T_r คือ อุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

T คือ อุณหภูมิห้องของอากาศขณะทำงาน

P_r คือ ความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน

P คือ ความดันบรรยากาศขณะทำงาน

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์

การประมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอก ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิด

โคโรนา V_0 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$V_0 = E_0 \ln(r_2 / r_1) \quad (5)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

ดิสชาร์จและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 z_i v (v - v_0)}{r_2^2 \ln(r_2 / r_1)} \quad (6)$$

เมื่อ Z_i คือ ค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน

(Electrical mobility of ions) มีค่าเท่ากับ $1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ [58]

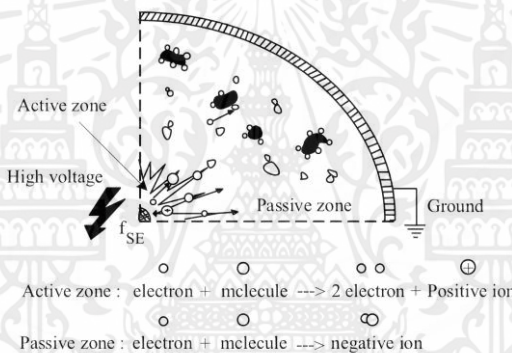
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_0 คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ของสุญญากาศหรือที่ว่าง (free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

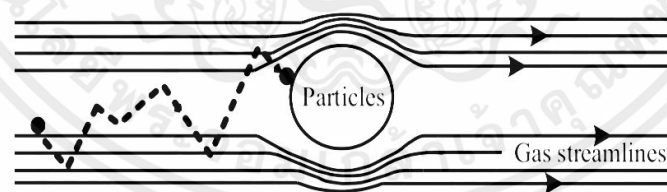
2.7 การอัดประจุอนุภาค

การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคเป็นกลไกหรือแรงที่กระทำต่ออนุภาคเพื่อแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซ (Gas stream) หรือกระแสอากาศ ซึ่งมีกลไกการใช้ดักจับอนุภาคดังนี้ [20]

1. การอัดประจุโดยการแพร่ (Diffusion charging) เป็นวิธีการอัดประจุที่อนุภาคได้รับประจุผ่านการสัมผัสและเกาะติดกับไอออนที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (Brownian random motion) วิธีการนี้เป็นวิธีการอัดประจุที่สำคัญในกรณีของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้า เนื่องจากการเคลื่อนไหวของไอออนขึ้นอยู่กับทั้งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตและแรงการแพร่กระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 กลไกการอัดประจุของอนุภาค [20]

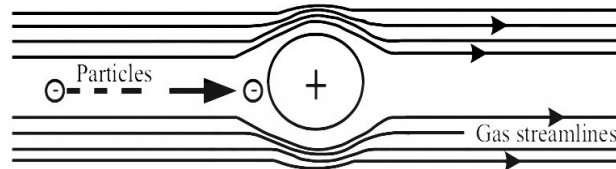


รูปที่ 2.24 การอัดประจุโดยการแพร่ [20]

2. การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า (Field charging) นอกจากกระบวนการใส่ประจุโดยการแพร่ อนุภาคยังสามารถรับประจุจากสนามไฟฟ้าได้ด้วย อนุภาคที่รับประจุจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Local deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาคไอออน [56] ซึ่งจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นของสนามไฟฟ้าแล้วกระทบกับอนุภาคและถูกยึดจับโดยแรงของ ประจุจินตภาพ (Image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคเพิ่มขึ้น จำนวนประจุบนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะถิ่นที่เกิดจากประจุบนอนุภาคก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนเส้นเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป เมื่อสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีกและจะไม่เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุบนอนุภาคอีก วิธีนี้เรียกว่าการอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า (Field charging) ซึ่งการอัดประจุวิธีนี้มีความสำคัญสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า [20]

อนุภาคที่ลอยในอากาศถูกประจุด้วยการสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ ซึ่งนำไปสู่เคลื่อนที่ของไอออนตามสนามไฟฟ้าและการแพร่กระจาย โดยจำนวนประจุบนอนุภาค (Number of charge per particles) สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 7 ถึงสมการที่ 9 [56]

$$n_p = n_{diff} + n_{field} \quad (7)$$

$$n_{diff} = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2KT} \right) \quad (8)$$

$$n_{field} = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(1 + \frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (9)$$

เมื่อ n_{diff} คือ จำนวนประจุบนอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุแบบแพร่กระจาย (Diffusion charging)

n_{field} คือ จำนวนประจุบนอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุแบบสนาม (Field charging)

k คือ ค่าคงที่ของโบลท์มานน์ (Boltzmann's constant) หน่วย (kg)

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หน่วย (μ m)

\bar{c}_i คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากผลของอุณหภูมิของไอออน

(Mean thermal speed of ion) มีค่า เท่ากับ 240 หน่วย (m/s)

ε คือ ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric constant of particle)

K_E คือ ค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์เท่ากับ 9×10^9 หน่วย (Nm²/C²)

โดยสามารถหาค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน ($N_i t$) หาได้จากสมการที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_i t = \frac{I(r_2^2 - r_1^2)}{2rZ_p eEQ} \quad (10)$$

เมื่อ N_i คือ ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion number concentration)
หน่วย (kg/m^3)

t คือ เวลาในการอัดประจุ (Charging time) หน่วย (s)

r_1 คือ รัศมีของขั้วดิสชาร์จ หน่วย (cm)

r_2 คือ รัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก หน่วย (cm)

E คือ สนามไฟฟ้า หน่วย (N/C)

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซ หน่วย (L/s)

กฎของสโตกส์เป็นวิธีการเจาะจงของสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) โดยสมมุติให้แรงเนื่องจากความเฉื่อยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเนื่องจากความหนืด ซึ่งมีค่าตัวเลขเรย์นอลด์ของอนุภาคน้อยกว่า 1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นของแข็ง ไม่มีความยืดหยุ่น ไม่มีผนังกั้นหรืออนุภาคอื่น ๆ ใกล้เคียงที่เป็นของไหล ที่ไม่อัดตัว และความเร็วของของไหลเป็นศูนย์ที่พื้นผิวของอนุภาค เมื่ออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของก๊าซ (Gas mean free path) ประมาณ 0.06 ไมโครเมตร แรงต้านทานของก๊าซจะกระทำต่ออนุภาคอย่างไม่ต่อเนื่องและอนุภาคจะลื่นไถลที่พื้นผิวระหว่างโมเลกุลของก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham slip correction factor) C_c กับสมการของสโตกส์เพื่ออธิบายความเร็วที่อนุภาคตกเร็วขึ้น คำนวณหาการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาคที่นำตัวชดเชยของคันทิงแฮมมาพิจารณาโดยคำนวณหาค่าตามลำดับสมการที่ 11 ถึง 13 [20]

$$Z_p = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (11)$$

เมื่อ
$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left(2.154 + 0.8 \exp\left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda}\right) \right) \quad (12)$$

และ
$$\lambda = \lambda_r \left(\frac{101.3}{P} \right) \left(\frac{T}{293.15} \right) \left(\frac{1 + 110/293.15}{1 + 110/T} \right) \quad (13)$$

เมื่อ Z_p คือ การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค หน่วย (A)

λ คือ ค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของก๊าซ หน่วย (μm)

λ_r คือ ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่อิสระของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.0665 ไมโครเมตร หน่วย (μm)

p คือ ความดันของของไหลขณะทำงาน แรงทางไฟฟ้าจะเร่งให้อนุภาคถูกเคลื่อนที่ไปยังแผนตกตะกอนด้วยความเร็ว หน่วย (N/m^2)

u_e คือ ความเร็วบั้นปลาย (Terminal electrostatic velocity) หน่วย (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็วนี้แรง F_e และ F_d มีค่าเท่ากันสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า หน่วย (N) คือ

$$m \frac{du_p}{dt} = qE - 3\pi\mu d_p u_p \quad (14)$$

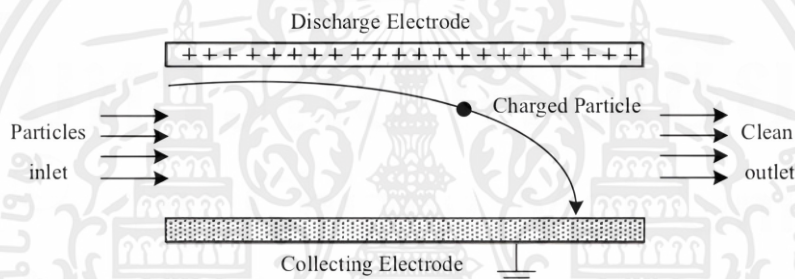
เมื่อ m คือ มวลของอนุภาค หน่วย (g)

u_p คือ ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค หน่วย (m/s)

ทำการหาค่าอินทิเกรตจะได้ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$u_e = \frac{neEC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (15)$$

โดยการเคลื่อนย้ายของอนุภาคในสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนที่มีลักษณะของการเคลื่อนที่แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเคลื่อนย้ายของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอน [20]

ในสมการที่ 16 จะไม่คิดผลของมวลอนุภาค เนื่องจากเมื่ออนุภาคเคลื่อนภายใต้สนามไฟฟ้าแล้วแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับแรงทางไฟฟ้าในกรณีที่อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคจะได้รับการอัดประจุโดยสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ดังนั้น ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคที่มีประจุมัธยจะปฏิบัติตามสมการดังนี้

$$u_e = \left(\frac{eC_c}{3\pi\mu} \right) \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{E^2 d_p}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (16)$$

สำหรับอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร ในกรณีนี้สมการที่ 18 จะใช้ไม่ได้เพราะการอัดประจุเกิดจากกลไกการแพร่ด้วย ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคที่มีประจุจะเป็นตามสมการที่

17

$$u_e = \left(\frac{eEC_c}{3\pi\mu} \right) \left(\frac{KT}{2K_E e^2} \right) \ln \left(1 + \frac{\pi K_e \bar{c}_i e^2 N_i t}{2KT} \right) \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

สำหรับประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค (Collection efficiency) η ภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก สามารถคำนวณได้จากสมการ [21]

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi r_2 L Z_p E}{Q}\right) \quad (18)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต หน่วย (cm)

Q คือ อัตราการไหลของอนุภาค หน่วย (L/s)

ทั้งนี้สามารถคำนวณหาค่าได้โดยการทดสอบตรวจวัดหรือสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคทั้งหมดในแก๊สไอเสียก่อนผ่านและหลังผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอก ซ้อนกันแล้วจึงนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนรวม (Overall collection efficiency) ได้จากสมการที่ 19 [21]

$$\eta = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \quad (19)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นขนาน

m_{out} คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคหลังผ่านระบบกำจัดอนุภาคจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต หน่วย (kg/m^3)

m_{in} คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคก่อนเข้าระบบกำจัด อนุภาคจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต หน่วย (kg/m^3)

2.9 การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค

เมื่ออนุภาคที่มีประจุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงอนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) F_e ที่กระทำต่ออนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20 [22]

$$F_e = qE = neE \quad (20)$$

เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอนุภาค หน่วย (C)

n คือ จำนวนประจุที่อยู่บนอนุภาค

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ (1.6×10^{-19}) หน่วย (C)

E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสุทธิ (Net velocity) สัมพันธ์กับก๊าซที่อนุภาคแขวนลอยอยู่โดยอนุภาคจะอยู่ภายใต้แรงเสียดลากเชิงอากาศ พลศาสตร์ (Aerodynamic drag force) หน่วย (N/C)

F_d คือ แรงเสียดลาก สามารถหาได้จากสมการที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_d = 3\pi\mu_p d_p \quad (21)$$

เมื่อ u_p คือ ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค หน่วย (m/s)

μ คือ ค่าความหนืดของก๊าซ หน่วย (N·s/m²)

2.10 ฝุ่น

ฝุ่นละออง คือ อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ล่องลอยอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.39 เกิดจากวัตถุกระทบกันจนแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ โดยจำแนกเป็น 2 ส่วน คือ ฝุ่นขนาดใหญ่ และ ฝุ่นขนาดเล็ก และจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ ฝุ่นละอองรวม ฝุ่นหยาบ ฝุ่นละเอียด โดยขนาดของฝุ่นละอองสามารถดูได้ดังแสดงในรูปที่ 2.27 [23]

1 ฝุ่นละอองรวม (Total Suspended Particulate : TSP)

เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน ฟืน แกลบ จะมีสารพิษที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารเป็นส่วนประกอบ ฝุ่นชนิดนี้มีอนุภาคขนาดเล็ก มักพบเจอภายในและภายนอกอาคาร

2 ฝุ่นหยาบ (Particular Matter : PM10)

มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน เช่น ฝุ่นที่เกิดจากถนนที่ไม่ได้ลาดยางหรือโรงงานบดหิน

3 ฝุ่นละเอียด (Particulate Matter : PM2.5)

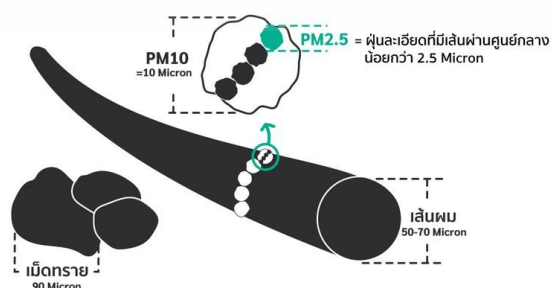
มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน เกิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

เป็นฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน เกิดจากการเผาไหม้ ทั้งจากยานพาหนะ การเผาวัสดุ การเกษตร ไฟป่า และกระบวนการอุตสาหกรรม สามารถเข้าไปถึงถุงลมปอดได้เป็นผลทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ และโรคปอดต่างๆ หากได้รับในปริมาณที่มากหรือเป็นเวลานานจะสะสมในเนื้อเยื่อปอด ทำให้การทำงานของปอดเสื่อมประสิทธิภาพลง ทำให้หลอดลมอักเสบ มีอาการหอบหืด

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10)

เป็นฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาในที่โล่ง กระบวนการอุตสาหกรรม การบด การม่ หรือการทำให้เป็นผงจากการก่อสร้าง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเนื่องจากเมื่อหายใจเข้าไปสะสมในระบบทางเดินหายใจ [23]



รูปที่ 2.27 ขนาดของฝุ่นละออง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต

2.11.1 ESP32-WROOM-32

ESP32-WROOM-32 แสดงในรูปที่ 2.28 ใช้ชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ ESP-32S ซึ่งเป็นบอร์ดที่พัฒนาขึ้นจาก ESP8266 โดย ESP32 ได้รองรับการเชื่อมต่อทั้ง Wi-Fi และ Bluetooth ในอุปกรณ์เดียวกัน นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเพิ่มเติมของ ESP8266 เช่น เซนเซอร์สัมผัสและเซนเซอร์อุณหภูมิในตัว ความละเอียดในการแปลงข้อมูล ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ที่มากขึ้นและมีหน่วยความจำมากขึ้น หมายความว่าไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ลดการเชื่อมต่ออุปกรณ์อย่างอื่นลง ดังนั้นจึงเหมาะเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อวงจรหรืออุปกรณ์ภายนอกเนื่องจากใช้งานง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.29 มีขาการเชื่อมต่อให้เลือกทั้งหมด 38 ขา รองรับการเขียนโปรแกรมโดยใช้ Arduino IDE รองรับไลบรารี Arduino ส่วนใหญ่ มีช่วงแรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 2.7 ถึง 3.6 โวลต์ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของ ESP32 WROOM-32 แสดงดังตารางที่ 2.3 [25]

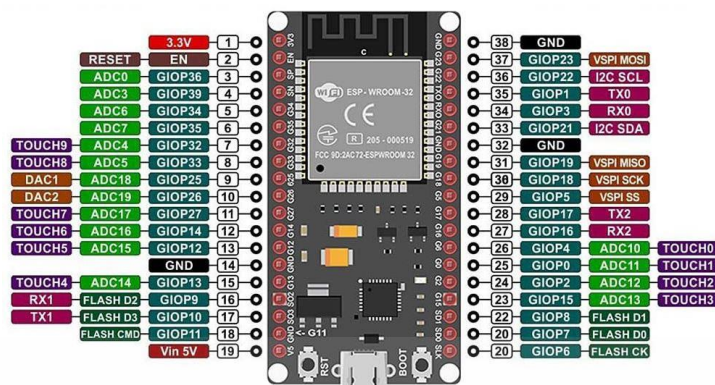


รูปที่ 2.28 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 WROOM-32 [26]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของ ESP32 WROOM-32 [26]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
หน่วยประมวลผล	สองแกน มีโปรเซสเซอร์ 2 ตัวทำงานได้พร้อมกัน
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	2.7 ถึง 3.6 โวลต์
Wi-Fi	802.11 b/g/n (HT40)
Bluetooth	บลูทูธพลังงานต่ำ
แรม (RAM)	512 กิโลไบต์
ขาที่ใช้งานได้	38 ขา
หน่วยความจำข้อมูลหรือแรม	512 กิโลไบต์
ความเร็วสัญญาณนาฬิกา	240 เมกะเฮิร์ตซ์
ขนาด	กว้าง 18 ยาว 45 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ขาการเชื่อมต่อของ ESP32 WROOM-32 [27]

2.11.2 Laser Dust Sensor PMS3003 Arduino

PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003) คือเซนเซอร์ตรวจจับฝุ่น PM2.5 ที่นำทฤษฎีการกระเจิงด้วยเลเซอร์มาใช้ สามารถตรวจจับอนุภาคแขวนลอยในอากาศได้ตั้งแต่ 0.3 ถึง 10 ไมครอน โดยที่เซนเซอร์ใช้พัดลมดูดอากาศเข้าไปในตัวเซนเซอร์ จากนั้นจะทำการตรวจจับฝุ่นด้วยแสงเลเซอร์ดังรูปที่ 2.30 มีองค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะ ขาเชื่อมต่อการทำงานดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 ตามลำดับ [28]



รูปที่ 2.30 PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003) [29]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของ PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003) [29]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเฉพาะ
เวลาในการตอบสนอง	น้อยกว่า 10 วินาที
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	5 โวลต์
กระแสไฟฟ้าในการทำงาน	100 มิลลิแอมป์
กระแสไฟฟ้าสำรอง	200 ไมโครแอมป์
อุณหภูมิที่สามารถทำงานได้	-10 ถึง +60 องศาเซลเซียส
ขาที่ใช้งานได้	8 ขา
ขนาด	กว้าง 65 ยาว 42 สูง 23 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ขาการเชื่อมต่อของ PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003) [29]

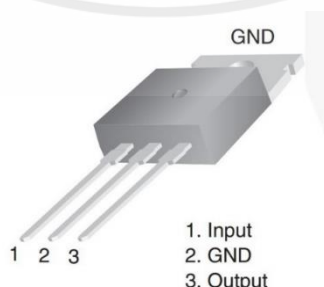
ชื่อพอร์ต	เลขพอร์ตการเชื่อมต่อ
VCC	ขา 1
GND	ขา 2
Set	ขา 3
RX , TX	ขา 4 และขา 5 ตามลำดับ
Reset	ขา 6

2.11.3 IC Voltage Regulator L7815

IC Voltage Regulator L7815 ดังแสดงในรูปที่ 2.31 คือแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไอซีที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยข้อดีของแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นนั้นคือ มีความทนทานต่อกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่ง IC 78xx เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นแบบคงที่และไม่สามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ มีตัวควบคุมเชิงเส้นบางตัวที่สามารถเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ เช่น LM317 แต่ละรุ่นในชุดอุปกรณ์ 78xx จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่แตกต่างกัน โดยดูที่ชื่อไอซี 2 หลักสุดท้าย เช่น 7815 จะมีแรงดันไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 15 โวลต์ สามารถดูการใช้งานได้ดังรูปที่ 2.32 [30]



รูปที่ 2.31 IC Voltage Regulator L7815 [30]



รูปที่ 2.32 ขาการใช้งานของ IC Voltage Regulator [31]

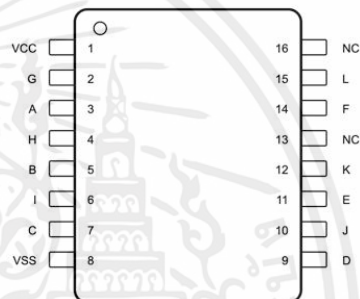
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.4 IC CMOS 4049

อุปกรณ์ CMOS 4049 ดังรูปที่ 2.33 คืออุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานเป็นบัฟเฟอร์ หมายถึงมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นที่สามารถใช้ในการขับตัวต้านทานแบบสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และบัฟเฟอร์ยังมีความสามารถในการแยกการทำงานของวงจรหนึ่งกับอีกวงจรหนึ่งได้ เพื่อป้องกันความเสียหายในกรณีเกิดการลัดวงจร และอุปกรณ์ CMOS 4049 ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ฐานสืบทอดแบบกลับและไม่กลับด้าน ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียวสำหรับการแปลงระดับลอจิก เมื่อใช้อุปกรณ์เหล่านี้สำหรับการแปลงระดับลอจิก สัญญาณขาเข้าระดับสูง (Input-signal high level: VIH) อาจเกินแรงดันแหล่งจ่ายไฟ อุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการออกแบบให้เป็นตัวแปลง CMOS เป็น DTL หรือ TTL ซึ่งสามารถขับเคลื่อนโหลด DTL หรือ TTL สองตัวได้โดยตรง ขาการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.34 โดยมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ 2.6 [32]



รูปที่ 2.33 CMOS 4049 [32]



รูปที่ 2.34 ขาการเชื่อมต่อของ CMOS 4049 [33]

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลจำเพาะของ CMOS 4049 [34]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
จำนวนสายขาเข้า	6 สาย
จำนวนสายขาออก	6 สาย
วิธีการทำงาน	inverting
กระแสไฟฟ้าในการใช้งาน	30 ไมโครแอมป์
การจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	3 ถึง 18 โวลต์
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน	-55 ถึง +125 องศาเซลเซียส
ขาการเชื่อมต่อทั้งหมด	16 ขา

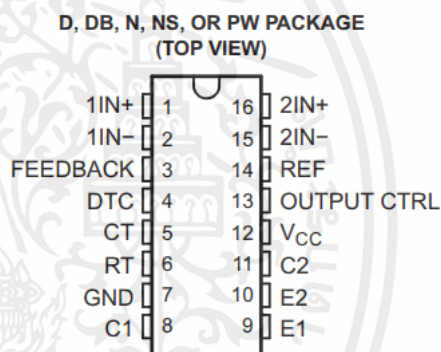
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.5 IC TL494

อุปกรณ์ IC TL494 ดังรูปที่ 2.35 ได้รับการออกแบบในลักษณะที่ไม่เพียงแต่ประกอบด้วยวงจรสำคัญที่จำเป็นในการควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิ่งเท่านั้น แต่ยังช่วยแก้ปัญหาพื้นฐานหลายประการอีกด้วย TL494 เป็นวงจรควบคุมการปรับความกว้างพัลส์ความถี่คงที่ (PWM) ซึ่งมีพัลส์สัญญาณขาออกถูกมอดูเลตเป็นฟังก์ชัน เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อออสซิลเลเตอร์ภายในเปรียบเทียบกับรูปคลื่นฟันเลื่อยบนตัวเก็บประจุไทม์มิ่ง (CT) กับสัญญาณควบคุมสองคู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของฟันเลื่อยสูงกว่าสัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าแสดงเอาต์พุตจะสลับไป เมื่อสัญญาณควบคุมเพิ่มขึ้น สัญญาณขาเข้าของฟันเลื่อยจะสูงขึ้นเป็นเวลานานขึ้น ดังนั้นความยาวของพัลส์สัญญาณขาออกจึงลดลง ฟลิปฟลอปที่ควบคุมด้วยพัลส์จะกำหนดทิศทางพัลส์มอดูเลตไปยังทรานซิสเตอร์เอาต์พุตแต่ละตัวสลับกัน ตัวควบคุมอ้างอิง 5 โวลต์ TL494 สร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 5 โวลต์ ภายในที่ป้อนเข้ากับขา REF แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงภายในนี้ช่วยสร้างค่าอ้างอิงที่เสถียรและคงที่ มันทำหน้าที่เหมือนตัวควบคุมล่งหน้าเพื่อให้แน่ใจว่าการจ่ายไฟมีเสถียรภาพ มีขาการทำงานทั้งหมด 16 ขา และขาการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.36 โดยมีการเชื่อมต่อขาการทำงานดังตารางที่ 2.7 [35]



รูปที่ 2.35 IC TL494 [35]



รูปที่ 2.36 ขาการเชื่อมต่อของ IC TL494 [36]

ตารางที่ 2.7 การเชื่อมต่อขาการทำงานของ IC TL494 [37]

ชื่อพอร์ต	หมายเลขขา	ข้อมูลการเชื่อมต่อ
1IN+	1	สัญญาณขาเข้าบวกที่ 1
1IN-	2	สัญญาณขาเข้าลบที่ 1
2IN+	16	สัญญาณขาเข้าบวกที่ 2
2IN-	15	สัญญาณขาเข้าลบที่ 2
C1	8	ขา C สัญญาณออกที่ 1
C2	11	ขา C สัญญาณออกที่ 2
CT	5	ขา C กำหนดความถี่
DTC	4	สัญญาณขาเข้าตัวเปรียบเทียบ
E1	9	ขา E สัญญาณออกที่ 1

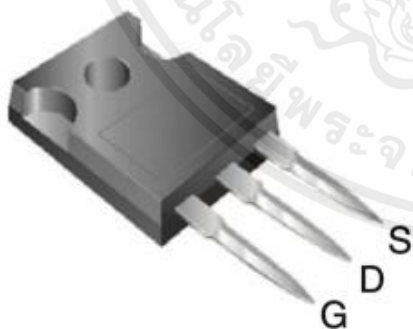
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 การเชื่อมต่อขาการทำงานของ IC TL494 (ต่อ)

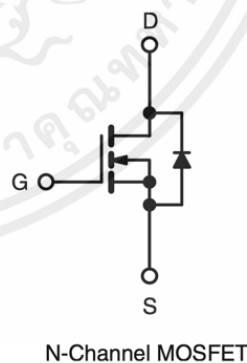
ชื่อพอร์ต	หมายเลขขา	ข้อมูลการเชื่อมต่อ
E2	10	ขา E สัญญาณออกที่ 2
Feedback	3	ขาป้อนสัญญาณกลับของอุปกรณ์ OPAMP
GND	7	กราวนด์
VCC	12	ไฟเลี้ยงตัวอุปกรณ์
REF	14	ไฟเลี้ยงคงที่ที่ 5 โวลต์
RT	6	ขั้วตัวต้านทานที่ใช้สำหรับตั้งค่าความถี่เครื่อง Oscillator
Output Ctrl	13	เลือกรูปแบบพัลส์

2.11.6 IRFP460

อุปกรณ์ IRFP460 ดังรูปที่ 2.37 ทรานซิสเตอร์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมการทำงานหรืออุปกรณ์ IRFP460 คือ Power MOSFET นั้นเองโดยโครงสร้างตัว MOSFET ประกอบไปด้วยสามส่วนคือ G (Gate) เป็นส่วนที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าและออก เป็นการออกไซด์ของโลหะสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า D (Dain) เป็นส่วนของสัญญาณเข้าออก และ S (Source) เป็นส่วนของสัญญาณขาเข้า โดยประเภทของ MOSFET สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด nMOSFET ใช้ตัวทรานซิสเตอร์แบบ NPN โดยมีความต่างศักย์เป็นบวกส่งผลให้ได้สนามไฟฟ้าที่มีกำลังแรง และชนิด pMOSFET ใช้ตัวทรานซิสเตอร์แบบ PNP โดยมีความต่างศักย์เป็นลบส่งผลให้ได้สนามไฟฟ้าที่มีกำลังอ่อน สำหรับอุปกรณ์ IRFP460 ที่เลือกใช้นั้นเป็น MOSFET ชนิด nMOSFET ขาการเชื่อมต่อการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.38 และข้อมูลจำเพาะของ IRFP460 แสดงดังตารางที่ 2.8 [38]



รูปที่ 2.37 IRFP460 [39]



รูปที่ 2.38 ขาการเชื่อมต่อของ IRFP460 [39]

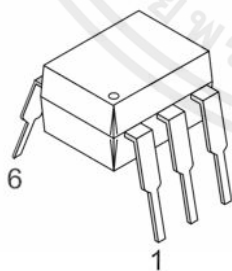
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลจำเพาะของ IRFP460 [40]

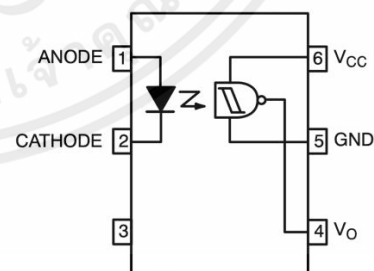
องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
ขีดการทำงานของทรานซิสเตอร์	N
แรงดันไฟฟ้าระหว่างขา D และ S	500 โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน D ต่อเนื่อง	20 แอมป์
ความต้านทานเมื่อ D และ S ทำงาน	220 มิลลิโอห์ม
กำลังงานสูญเสีย	220 วัตต์
แรงดันไฟฟ้าระหว่างขา G และ S	-20, +20 โวลต์
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน	-65 ถึง +150 องศาเซลเซียส

2.11.7 Optocoupler H11L1

อุปกรณ์ OPTO H11L1 ดังรูปที่ 2.39 คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงานคือขาด้านหนึ่งจะปล่อยแสงอินฟราเรดจากหลอด LED ภายในตัวอุปกรณ์ออกมาและอีกด้านหนึ่งจะมีตัวรับแสงอินฟราเรดกลับเข้าไปโดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเลือกเพื่อแยกวงจรทั้งสองออกจากกัน เช่นมีแผงวงจรที่มีวงจร A และวงจร B วงจร A จะเชื่อมต่อขา 1 กับขา 2 และวงจร B จะเชื่อมต่อขา 3 และขา 4 แม้ว่าอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถทำงานร่วมกับวงจรอื่น ๆ ได้ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อทั้งสองวงจรไม่ได้เชื่อมต่อกัน อุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานอย่างอิสระโดยสมบูรณ์แต่ทำงานร่วมกันข้อดีของมันคือหากวงจรใดทำงานผิดปกติ ชัดข้อง หรือลัดวงจรจะไม่ส่งผลกระทบต่อใด ๆ ให้เกิดความเสียหายต่อวงจรอื่นได้ และด้วยวิธีการเชื่อมต่อนี้ จึงสามารถอนุญาตให้วงจรหนึ่งควบคุมวงจรอื่นได้โดยอัตโนมัติ โดยตั้งอุปกรณ์ OPTO H11L1 จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลไปแค่เพียงทิศทางเดียวดังนั้นหากทำการป้อนไฟให้อุปกรณ์ OPTO H11L1 ผิดอุปกรณ์จะไม่ทำงาน โดยขบวนการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.40 และมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ 2.9 [41]



รูปที่ 2.39 OPTO H11L1 [42]



รูปที่ 2.40 ขบวนการเชื่อมต่อของ OPTO H11L1 [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลจำเพาะของ OPTO H11L1 [43]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
ประเภทสัญญาณขาเข้า	กระแสตรง
กระแสไฟฟ้าสูงสุดขาออกต่อเนื่อง	50 มิลลิแอมป์
แรงดันไฟฟ้าทางตรง	1.2 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ	6 โวลต์
กำลังงานสูญเสีย	150 มิลลิวัตต์
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน	-55 ถึง +100 องศาเซลเซียส
อัตราการส่งข้อมูล	1 เมกะเฮิร์ต

2.11.8 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน (Resistor) ทำหน้าที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านให้มีค่าคงที่ วัสดุที่นิยมใช้มาทำตัวต้านทานในปัจจุบันนิยมใช้อยู่ 2 ชนิดคือ ใช้วัสดุประเภทโลหะและประเภทโลหะ โดยตัวต้านทานที่ทำมาจากวัสดุประเภทโลหะ ส่วนใหญ่ทำมาจากคาร์บอนหรือผงกราฟิคนำมารวมขึ้นรูปออกมาเป็นแท่ง โดยตัวต้านทานประเภทนี้จะมีค่าต้านทานที่สูงและมีขนาดเล็ก แต่มีความคลาดเคลื่อนมากและความทนต่อกำลังไฟฟ้าไม่สูง ส่วนตัวต้านทานประเภทโลหะส่วนใหญ่จะทำมาจากเส้นลวดขนาดเล็กพันรอบตัวแกนกลางของตัวต้านทาน ขนาดของตัวต้านทานใหญ่แต่ทนต่อกำลังไฟฟ้าสูงอีกทั้งยังมีค่าที่แม่นยำ ตัวต้านทานนั้นสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามความเหมาะสมในการเลือกใช้งาน ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้ตัวต้านทานแบบชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistor) โดยสามารถใช้ไขควงขนาดเล็กในการปรับค่าตัวต้านทานบนอุปกรณ์ เรียกตัวต้านทานประเภทนี้ว่า trim potentiometer ดังรูปที่ 2.41 โดยมีขาการทำงานคือขาที่ 1 แรงดันเข้าตัวอุปกรณ์ ขาที่ 2 สัญญาณขาออกและขาที่ 3 ทำหน้าที่เป็นกราวด์ให้แก่อุปกรณ์ [44]



รูปที่ 2.41 Trim Potentiometer [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.9 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) มีหน้าที่ในการเก็บพลังงานโดยเก็บในรูปแบบสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากระหว่างชั้นคู่ฉนวนที่มีประจุชนิดตรงข้ามกันแต่มีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่พบเจอได้ในทุกวงจรเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้งานกันโดยทั่วไป นิยมนำมาใช้ในวงจรกรองกระแสเนื่องจากตัวเก็บประจุนั้นมีคุณสมบัติตรงข้ามกับตัวเหนี่ยวนำที่จะหักล้างกันไป โดยประเภทของตัวเก็บประจุนั้นมีหลายประเภทตามความเหมาะสมในการเลือกใช้สำหรับงาน ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ 3 ประเภทคือ ตัวเก็บประจุประเภทเซรามิก (Ceramic Capacitor) ดังรูปที่ 2.42 คือตัวเก็บประจุที่ทำมาจากวัสดุเซรามิกนำมาทำเป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีขั้วทางไฟฟ้า โดยจะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ 50 ถึง 100 โวลต์ ตัวเก็บประจุประเภทอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Capacitor) ดังรูปที่ 2.43 คือตัวเก็บประจุที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากมีค่าความจุของกระแสไฟฟ้าที่เยอะ โดยเป็นตัวเก็บประจุที่มีขั้วบวกและลบดังนั้นเมื่อใช้งานจะต้องเชื่อมต่อให้ถูกขั้วการทำงาน และยังนิยมใช้กับงานที่ใช้ไฟกระแสตรงแต่ตัวเก็บประจุประเภทนี้มีความคลาดเคลื่อนสูง และตัวเก็บประจุประเภทสุดท้ายที่เลือกใช้คือ ตัวเก็บประจุประเภทไมลา (Mylar Capacitor) ดังแสดงรูปที่ 2.44 เหมาะกับงานวงจรที่ใช้กรองความถี่สูงเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสที่น้อยอีกทั้งยังให้ค่าที่แม่นยำ มีเสถียรภาพสูงและไม่มีขั้วบวกและลบดังนั้นเวลาใช้งานจึงเป็นที่นิยมใช้ [46]



รูปที่ 2.42 Ceramic Capacitor [46]



รูปที่ 2.43 Electrolytic Capacitor [46]



รูปที่ 2.44 Mylar Capacitor [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.10 Terminal

อุปกรณ์ Terminal หรือ Terminal Block คืออุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเชื่อมต่อสายไฟเส้นหนึ่งเข้ากับสายไฟอีกเส้นหนึ่งหรือใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟเข้าไปยังวงจร เรียกว่าเป็นจุดพักสายไฟการใช้ Terminal Block นั้นจะทำให้แก้ไขหรือเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ ซ่อมบำรุงจุดที่มีปัญหาได้ง่ายสามารถแก้ไขได้ทันทีเนื่องจากสามารถไขออกได้โดยที่ไม่กระทบสายไฟอื่น อีกทั้งการใช้ Terminal Block ทำให้สายไฟที่เชื่อมต่อในวงจรเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น โดยอุปกรณ์ Terminal Block มีให้เลือกหลายแบบตามความเหมาะสมในการใช้งานนั้น เช่น Terminal Block แบบ 3 ขาดังรูปที่ 2.45 และแบบ 2 ขาเป็นต้น ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะของ Terminal Block แสดงดังตารางที่ 2.10 [47]



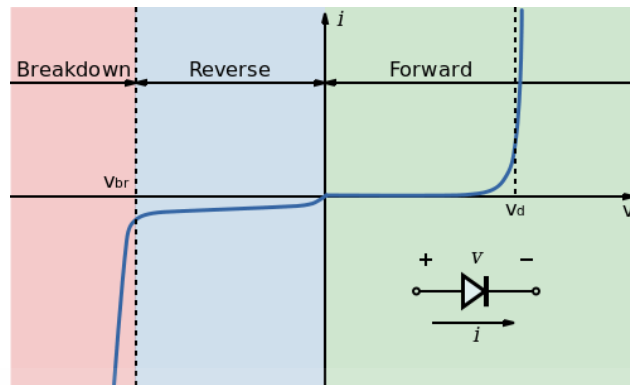
รูปที่ 2.45 Terminal Block แบบ 3 ขา [47]

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลจำเพาะของ Terminal Block [48]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
แรงดันไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้	300 โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้	16 แอมป์
เชื่อมต่อตัวต้านทานมากที่สุดที่ใช้งานได้	5 เมกะโอห์ม
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน	-30 ถึง +120 องศาเซลเซียส

2.11.11 Diode

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ มี 2 ขั้วคือ P (P-type Semiconductor) และขั้ว N (N-type Semiconductor) ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้ายอมให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกัน และป้องกันกระแสการไหลกลับทิศทางเดิม นำมาใช้ประโยชน์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรบริดจ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ หรือป้องกันการสลับขั้วให้แก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีกราฟคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.46 [49]



รูปที่ 2.46 คุณลักษณะไดโอด [49]

สามารถแบ่งประเภทของไดโอดชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดี (LED) เป็นไดโอดที่ใช้สารประเภทแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟต์ (Gallium Arsenide Phosphide) หรือสารแกลเลียมฟอสไฟต์ มาเป็นสารกึ่งตัวนำ สารเหล่านี้มีคุณสมบัติ เมื่อได้รับไบอัสตรง จะเกิดแสงที่ตัวไดโอด LED เป็นหลักสีตามชนิดของสารที่ใช้ในการผลิต LED และลักษณะการทำงานของไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.47 และรูปที่ 2.48 ตามลำดับ



รูปที่ 2.47 ไดโอดเปล่งแสงแอลอีดี [50]



รูปที่ 2.48 สัญลักษณ์ไดโอดเปล่งแสงแอลอีดี [50]

- 2) โฟโตไดโอด (Photo Diode) ดังรูปที่ 2.49 เป็นไดโอดที่อาศัยแสงจากภายนอก การต่อโฟโตไดโอดเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ เมื่อมีแสงตกลงมากกระทบที่รอยต่อ พี-เอ็น โฟโตไดโอดจะเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโตไดโอดด้วยปริมาณที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงที่ตกลงมากระทบลักษณะการทำงานของไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.50

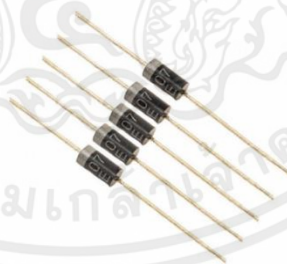


รูปที่ 2.49 โฟโตไดโอด [51]

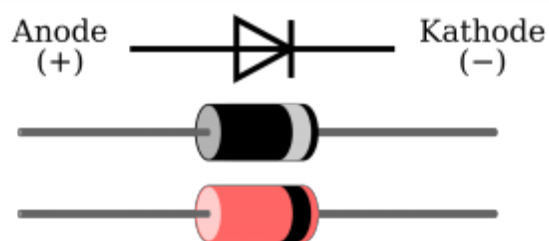


รูปที่ 2.50 สัญลักษณ์โฟโตไดโอด [52]

- 3) ไดโอดกำลัง (Power Diode) ดังรูปที่ 2.51 นำมาใช้กับงานที่กำลังไฟฟ้าสูง กระแสสูง ๆ ได้
 3) ไดโอดกำลัง (Power Diode) ดังรูปที่ 2.51 นำมาใช้กับงานที่กำลังไฟฟ้าสูง กระแสสูง ๆ ได้
 อย่างดี นิยมนำมาใช้ประกอบเป็นวงจรเรียงกระแส rectifier Circuit วงจรแยกแรงดัน
 วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบ Switching ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำหน้าที่คล้ายสวิตช์ที่
 สามารถนำกระแสได้ทางเดียวเมื่อจ่ายแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias) และจะหยุด
 นำกระแสทันทีเมื่อจ่ายแรงดันไบอัสกลับ (Reverse Bias) และสัญลักษณ์ไดโอดกำลังแสดง
 ดังรูปที่ 2.52



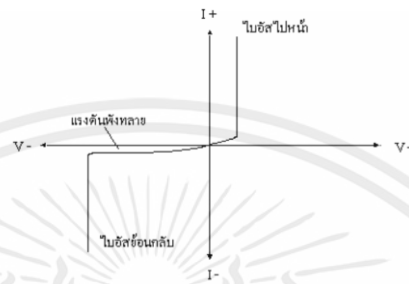
รูปที่ 2.51 ไดโอดกำลัง [53]



รูปที่ 2.52 สัญลักษณ์ไดโอดกำลัง [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

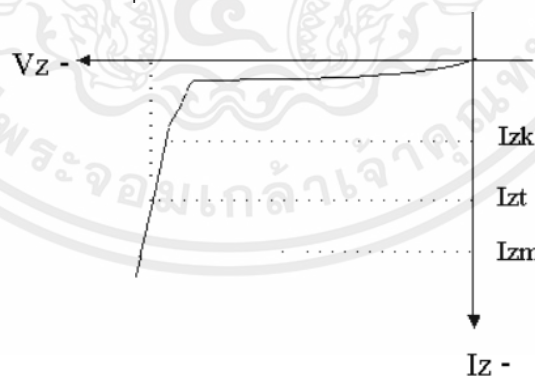
- 4) ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำวิธีการต่อจะต่อแบบไบอัสกลับ และเป็นไดโอดชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเหมือนไดโอด คือประกอบขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำ 2 ตอน ชนิด P และ N โดยซีเนอร์ไดโอดจะนำไปใช้งานในช่วงไบอัสกลับที่ค่าเบรคดาวน์ ที่เรียกว่า ซีเนอร์เบรคดาวน์ (Zener Breakdown) ซึ่งมักจะเรียกว่าแรงดันซีเนอร์เบรคดาวน์ (Zener Breakdown Voltage) เป็นค่าแรงดันที่ตัว ซีเนอร์ไดโอดทำการควบคุมให้คงที่ตลอดเวลา โดยแสดงกราฟลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.53 [55]



รูปที่ 2.53 กราฟลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด [56]

การพังทลายของซีเนอร์ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 2.54 สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) การพังทลายแบบอะวาเลนซ์ (Avalanche) เมื่อไดโอดได้รับไบอัสกลับแรงดันสูงสุดจนทำให้มีกระแสไหลย้อนกลับผ่านไดโอดจำนวนมาก จะทำให้รอยต่อของไดโอดทะลุและใช้งานไม่ได้
- 2) การพังทลายแบบซีเนอร์ เป็นการพังทลายที่เกิดขึ้นกับแรงดันไบอัสกลับค่าต่ำ ๆ ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดจำนวนหนึ่ง ต้องจำกัดไม่ให้เกินค่าพิกัดสูงสุดและจะเกิดสถานะที่แรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดมีค่าคงที่เรียกว่า แรงดันซีเนอร์ คุณสมบัติข้อนี้สามารถนำซีเนอร์ไดโอดไปเป็นวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงให้คงที่ได้



รูปที่ 2.54 กราฟคุณลักษณะของการพังทลาย [56]

ดังนั้นการนำซีเนอร์ไดโอดไปใช้งานในการควบคุมให้แรงดันไฟตรงคงที่นั้น จึงต้องออกแบบวงจรควบคุมให้มีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดอยู่ระหว่างค่ากระแสบริเวณเส้นโค้ง I_{zk} ถึงค่ากระแสสูงสุด I_{zm} ที่แสดงดังรูปที่ 2.54 สำหรับกระแส I_{zt} หมายถึง ค่ากระแสทดสอบที่แรงดันซีเนอร์ซึ่งเป็นค่ากระแสตามค่าที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ในตารางคุณสมบัติของซีเนอร์ที่ใช้งานทั่วไป [56] โดยจะแสดงดังตารางที่ 2.11

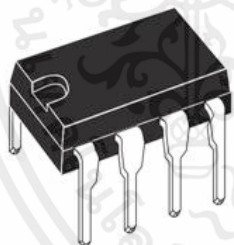
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด [56]

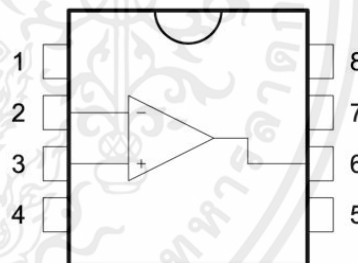
เบอร์	VBR (โวลต์)	IS (มิลลิแอมป์)	VRWM (โวลต์)	IR (แอมป์)	IRMS (มิลลิแอมป์)	VRMS (โวลต์)
1N6267A	6.8	10	5.8	1000	143	10.5
1N6268A	7.5	10	6.4	500	132	11.3
1N6269A	8.2	10	6.02	200	124	12.1
1N6270A	9.1	1	6.78	50	112	13.4
1N6271A	10	1	8.55	10	103	14.5
1N6272A	11	1	9.4	5	96	15.6
1N6273A	12	1	10.2	5	90	16.7
1N6274A	13	1	11.1	5	82	18.2
1N6275A	15	1	12.8	5	71	21.2

2.11.12 IC LF351

อุปกรณ์ LF351 ดังรูปที่ 2.55 และ 2.56 คืออุปกรณ์ Op-Amp ชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการขยายสัญญาณแอมพลิฟายด์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยเหมาะจะใช้งานในความถี่สูง ๆ โดยข้อมูลจำเพาะและขบวนการใช้งานสามารถดูได้ดังตารางที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ [57]



รูปที่ 2.55 IC LF351 [57]



รูปที่ 2.56 โครงสร้างภายใน LF351 [57]

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ LF351 [58]

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
จ่ายแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด	32 โวลต์
จ่ายแรงดันไฟฟ้าน้อยสุด	6 โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายใช้งาน	3.4 มิลลิแอมป์
อุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้	0 ถึง +70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 ขากาใช้งานของอุปกรณ์ LF351 [58]

ขา (PIN)	การใช้งาน
1	Offset null 1
2	สัญญาณขาเข้าแบบกลับเฟส
3	สัญญาณขาเข้าแบบไม่กลับเฟส
4	ไฟเข้าอุปกรณ์ลบ
5	Offset null 2
6	สัญญาณขาออก
7	ไฟเข้าอุปกรณ์บวก
8	NC

2.11.13 Flyback Transformer

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ step-up ดังแสดงในรูปที่ 2.57 มีศักยภาพในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงฟลายแบ็ค สามารถทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำเช่น 12 โวลต์ หรือ 5 โวลต์ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจาก หม้อแปลงทั่วไป การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบ็คในยุคแรกเริ่มต้นด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ใน แนวนอนของลำอิเล็กตรอนในหลอดรังสีแคโทด ด้วยการถือกำเนิดของเทคโนโลยีและอุปกรณ์ในปัจจุบันหม้อ แปลงฟลายแบ็คสามารถเพิ่มพลังงานด้วยพัลส์ DC ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น มอสเฟต (MOSFET) [59]



รูปที่ 2.57 Flyback Transformer [59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.14 หม้อแปลงไฟฟ้า 220V AC / 12 VDC

หม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.58 คุณสมบัติคือมีลักษณะเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้า 220V AC ให้กลายเป็น 12V DC ได้ โดยแต่ละขนาดจะมีค่าของ กระแสไฟฟ้า เป็นหน่วยแอมป์แตกต่างกันไป และหากหม้อแปลงที่มีค่าวัตต์เยอะ ก็จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าในปริมาณมากยิ่งขึ้น [60]



รูปที่ 2.58 หม้อแปลงไฟฟ้า 220VAC / 12 VDC [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

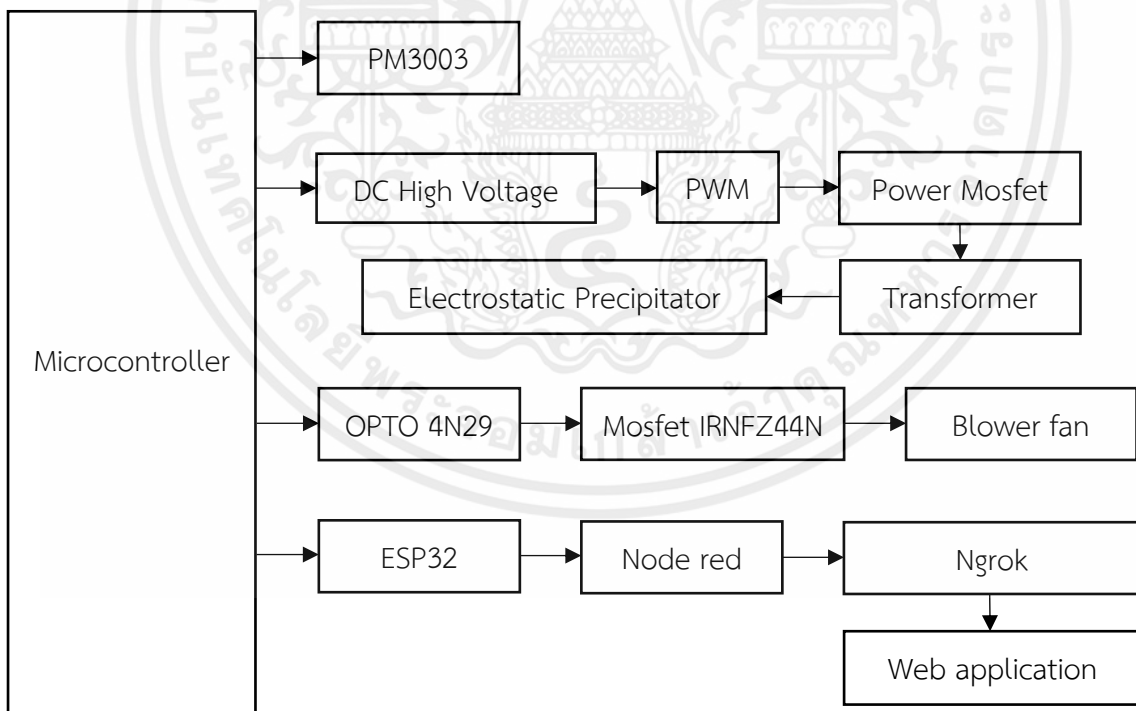
บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

3.1 การออกแบบ

3.1.1 การออกแบบภาพรวมการทำงานของระบบ

ทำการออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องฟอกอากาศโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นละอองในอากาศ โดยการทำงานของเครื่องฟอกอากาศใช้หลักการไฟฟ้าสถิตและการวัดค่าฝุ่นใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งรวมถึงการควบคุมการเปิดและปิดอุปกรณ์ภายในระบบด้วยเช่นกัน เมื่อระบบเปิดขึ้น พัดลมจะทำหน้าที่ดูดอากาศเข้ามาในเครื่องฟอกอากาศ โดยอากาศที่ถูกดูดเข้าจะผ่านชั้นกรองที่มีไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (DC High voltage) สำหรับกรองฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดต่าง ๆ อาศัยหลักการไฟฟ้าสถิตเพื่อกรองฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 ออกจากอากาศ โดยหลังจากกระบวนการกรองนี้จะได้อากาศที่สะอาดและบริสุทธิ์ออกมา การแสดงผลค่าฝุ่นจะถูกนำมาแสดงผลผ่านเว็บไซต์ โดยเซนเซอร์วัดค่าฝุ่นที่เชื่อมต่อกับ ESP32 รับข้อมูลค่าฝุ่นและส่งข้อมูลนั้นไปยัง ESP32 อีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะนำมาแสดงค่าฝุ่นบนเว็บไซต์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าฝุ่นได้ พร้อมทั้งเก็บค่าจากหน้าเว็บแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมการเปิดและปิดของวงจร โดยบล็อกไดอะแกรมภาพรวมของระบบแสดงดังรูปที่ 3.1

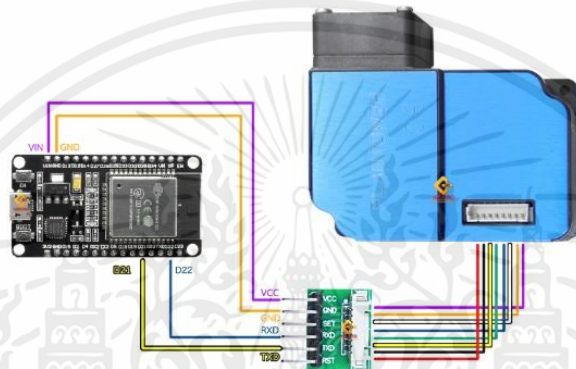


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบวงจรของเครื่องวัดฝุ่นละออง PM2.5

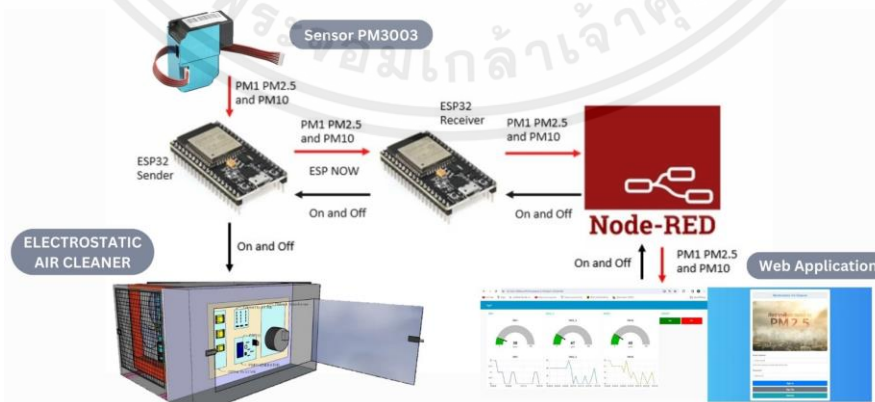
ออกแบบเครื่องวัดฝุ่นละออง PM2.5 โดยการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์ PM3003 เข้ากับ ESP32 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเซนเซอร์วัดฝุ่นละออง ใช้หลักการดูดอากาศเข้ามาในอุปกรณ์โดยใช้พัดลมเพื่อดูดอากาศผ่านตัวเซนเซอร์อากาศที่ถูกดูดเข้ามาจะถูกส่งผ่านระบบคัดแยกอนุภาค เพื่อแยกออกจากกันอนุภาคขนาดต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดต่างกันออกไปเมื่ออนุภาคได้รับการแยกออกจากกันแล้ว เซนเซอร์ PM3003 จะใช้เทคนิคการวัดเพื่อวัดความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศ เช่น การใช้การกระจายแสงหรือการนับจำนวนอนุภาคที่ผ่านไปผ่านช่องกรอง จากนั้นส่งค่าที่ได้ไปประมวลผลที่ ESP32 โดยการใช้การส่งข้อมูลแบบ I2C และจะส่งค่าฝุ่นที่ได้จาก ESP32 ส่งไปยัง ESP32 อีกตัวเพื่อนำค่าไปแสดงบนเว็บไซต์



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อ PM3003 เข้ากับ ESP32

3.1.3 การออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชัน

ออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชันให้สามารถแสดงค่าฝุ่นและสามารถควบคุมการเปิด-ปิดของวงจรเครื่องฟอกอากาศได้ โดยใช้โปรแกรม Node-Red มาช่วยในการส่งข้อมูลไปแสดงบนเว็บแอปพลิเคชัน พร้อมทั้งเก็บค่าจากหน้าเว็บแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของวงจร และใช้หลักการ ESP NOW มารับ-ส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ฝั่งส่งและ ESP32 ฝั่งรับ แสดงดังรูปที่ 3.3



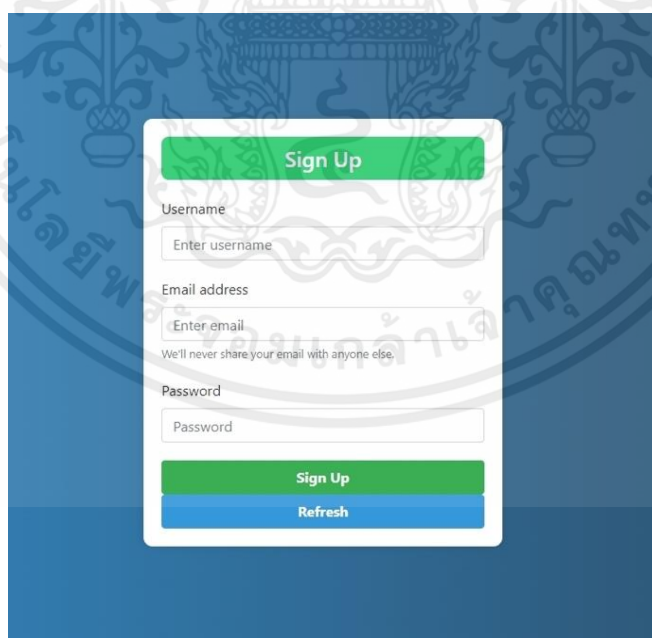
รูปที่ 3.3 ออกแบบเว็บแอปพลิเคชันให้สามารถแสดงค่าฝุ่นและสามารถควบคุมการเปิด-ปิดของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้ทำการออกแบบหน้าเว็บแอปพลิเคชันเพื่อให้เหมาะสม โดยในส่วนของ 1 คือหน้าเว็บแสดงการล็อกอินเข้าสู่เว็บแอปพลิเคชัน ซึ่งจะต้องกรอกอีเมลและพาสเวิร์ด ต่อมาในส่วนที่ 2 เป็นหน้าเว็บการสมัครสมาชิกผู้ใช้งานและในส่วนที่ 3 คือหน้าเว็บที่แสดงค่าฝุ่นที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยเลเซอร์จะแสดงค่าปริมาณฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 ที่วัดได้ ซึ่งแสดงเป็นกราฟและตัวเลข พร้อมทั้งปุ่มเปิด-ปิดควบคุมการทำงานของระบบ โดยหน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงหน้าล็อกอิน หน้าเว็บแอปพลิเคชันขั้นตอนการลงทะเบียนสมัครสมาชิก และหน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงค่าฝุ่นและปุ่มควบคุมการเปิด-ปิดวงจร แสดงดังรูปที่ 3.4 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงหน้าล็อกอิน



รูปที่ 3.5 หน้าเว็บแอปพลิเคชันลงทะเบียนสมัครสมาชิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงค่าฝุ่นและปุ่มควบคุมการเปิด-ปิดวงจร

3.1.4 การออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32

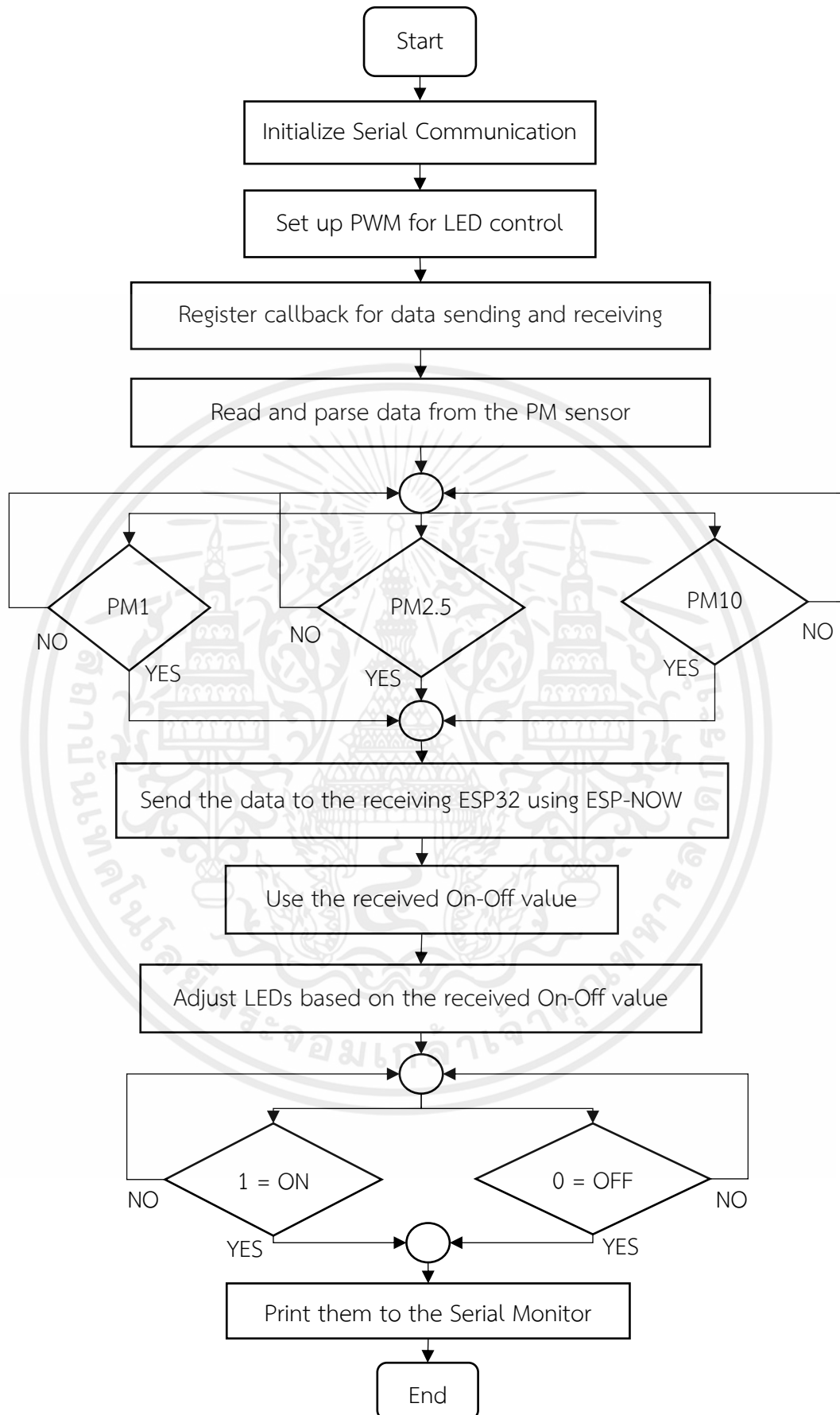
การออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 โดยเป็นการส่งสัญญาณแบบ Peer to Peer ซึ่งจะมี ESP32 ทั้งหมด 2 ตัวที่จะทำหน้าที่เป็น ESP32 ฝั่งส่ง และ ESP32 ฝั่งรับ โดยการออกแบบการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ฝั่งส่งจะใช้โปรโตคอลการสื่อสาร ESP-NOW ที่ทำให้สื่อสารกับ ESP32 ฝั่งรับได้ ซึ่งไม่ต้องใช้การเชื่อมต่อ Wi-Fi ส่วนไลบรารีที่ใช้จะมี esp_now.h เป็นไลบรารีสำหรับ ESP-NOW เพื่อการสื่อสารระหว่าง ESP32 ส่วน WiFi.h เป็นไลบรารีสำหรับการจัดการ Wi-Fi บน ESP32 และ SoftwareSerial.h เป็นไลบรารีสำหรับการสื่อสารซีเรียลแบบซอฟต์แวร์ ต่อมาจะเป็นตัวแปร Global ที่ใช้ ได้แก่ mySerial เป็นอินสแตนซ์ของ SoftwareSerial สำหรับการสื่อสารซีเรียลบนพิน 21 (Rx) และ 22 (Tx) ส่วนตัวแปร (pm1, pm2_5, pm10) กำหนดขึ้นเพื่อเก็บค่าจากการอ่านของเซนเซอร์วัดอนุภาค ส่วน LED1 และ LED2 คือการกำหนดพินสำหรับ LED ส่วน On-Off เป็นตัวแปรสตริงเพื่อเก็บค่าที่ได้รับจาก ESP32 อีกตัวหนึ่ง ส่วน freq, ledChannel, และ resolution เป็นตัวแปรสำหรับตั้งค่า PWM เพื่อควบคุม LED ส่วน receiverAddress เป็นตัวแปร MAC Address ของ ESP32 ที่รับข้อมูล และ sensorData เป็นโครงสร้างสำหรับเก็บข้อมูลเซ็นเซอร์ PM สำหรับการส่ง ส่วนฟังก์ชัน Callback (OnDataSent) เป็นส่วนฟังก์ชันที่เรียกเมื่อข้อมูลถูกส่งด้วย ESP-NOW มีการพิมพ์สถานะการส่งข้อมูลใน Serial Monitor ส่วนฟังก์ชัน Setup (setup) ทำการเริ่มต้นการสื่อสารซีเรียล PWM ของ LED และ Wi-Fi ในโหมด STA (Station) พร้อมทั้งเริ่มต้น ESP-NOW และตั้งค่า callback สำหรับการส่งข้อมูล และเพิ่ม peer (ESP32 ที่รับข้อมูล) เข้าสู่เครือข่าย ESP-NOW ส่วนฟังก์ชัน Loop (loop) เป็นการเรียกใช้ฟังก์ชัน Sending_Senser เพื่ออ่านค่าเซนเซอร์ PM จากนั้นนำข้อมูล PM ลงใน sensorData. ส่งข้อมูลไปที่ ESP32 ที่รับโดยใช้ ESP-NOW ทำการพิมพ์ข้อมูลที่ส่งลงใน Serial Monitor ส่วนฟังก์ชัน Sending_Senser อ่านและแยกข้อมูลจากเซนเซอร์อนุภาคที่เชื่อมต่อกับพอร์ตซีเรียลซอฟต์แวร์ mySerial ส่วนฟังก์ชัน Callback (OnDataReceived) เป็นฟังก์ชันที่เรียกเมื่อข้อมูลถูกรับโดยใช้ ESP-NOW แยกข้อมูลที่ได้รับ (ประเภท sensor_data) และดึงค่า "OnOff" ออกมา พิมพ์ค่า "OnOff" ที่ได้รับลงใน Serial Monitor และเรียกใช้ฟังก์ชัน on_off โดยฟังก์ชัน on_off รับพารามิเตอร์เป็น String และปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของ LED ขึ้นอยู่กับค่าที่ได้รับ ("0" หรือ "1") โดยกำหนดให้สอง ESP32 สื่อสารกันโดยใช้ ESP-NOW จะมีอุปกรณ์หนึ่งอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์อนุภาคและส่งมันพร้อมกับข้อมูลควบคุม LED ไปที่อุปกรณ์อีกตัวหนึ่ง อุปกรณ์ที่รับจะปรับ LED ของตนตามข้อมูลควบคุมที่ได้รับ โดยรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.7 และทำการทดสอบการส่งค่าซึ่งจะกำหนดค่า PM1 = 20 PM2.5 = 30 PM10 = 40 และตัวแปร boy แทนตัวแปร On-Off มีค่าเท่ากับ 42 แล้วส่งค่าให้ ESP32 ฝั่งรับ แสดงผลลัพธ์การทดสอบการทำงานแบบ Peer to Peer ของ ESP ฝั่งรับค่าดังรูปที่ 3.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ฝั่งส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

COM6

Sent PM sensor data with success

Last Packet Send Status:      Delivery Success
Received PM sensor data: {"pm1": 15,"pm2_5": 25,"pm10": 35,"boy": 24 }
Sent PM sensor data with success

Last Packet Send Status:      Delivery Success
Received PM sensor data: {"pm1": 15,"pm2_5": 25,"pm10": 35,"boy": 24 }
Sent PM sensor data with success

Last Packet Send Status:      Delivery Success
Received PM sensor data: {"pm1": 15,"pm2_5": 25,"pm10": 35,"boy": 24 }
Sent PM sensor data with success

Last Packet Send Status:      Delivery Success
Received PM sensor data: {"pm1": 15,"pm2_5": 25,"pm10": 35,"boy": 24 }
Sent PM sensor data with success

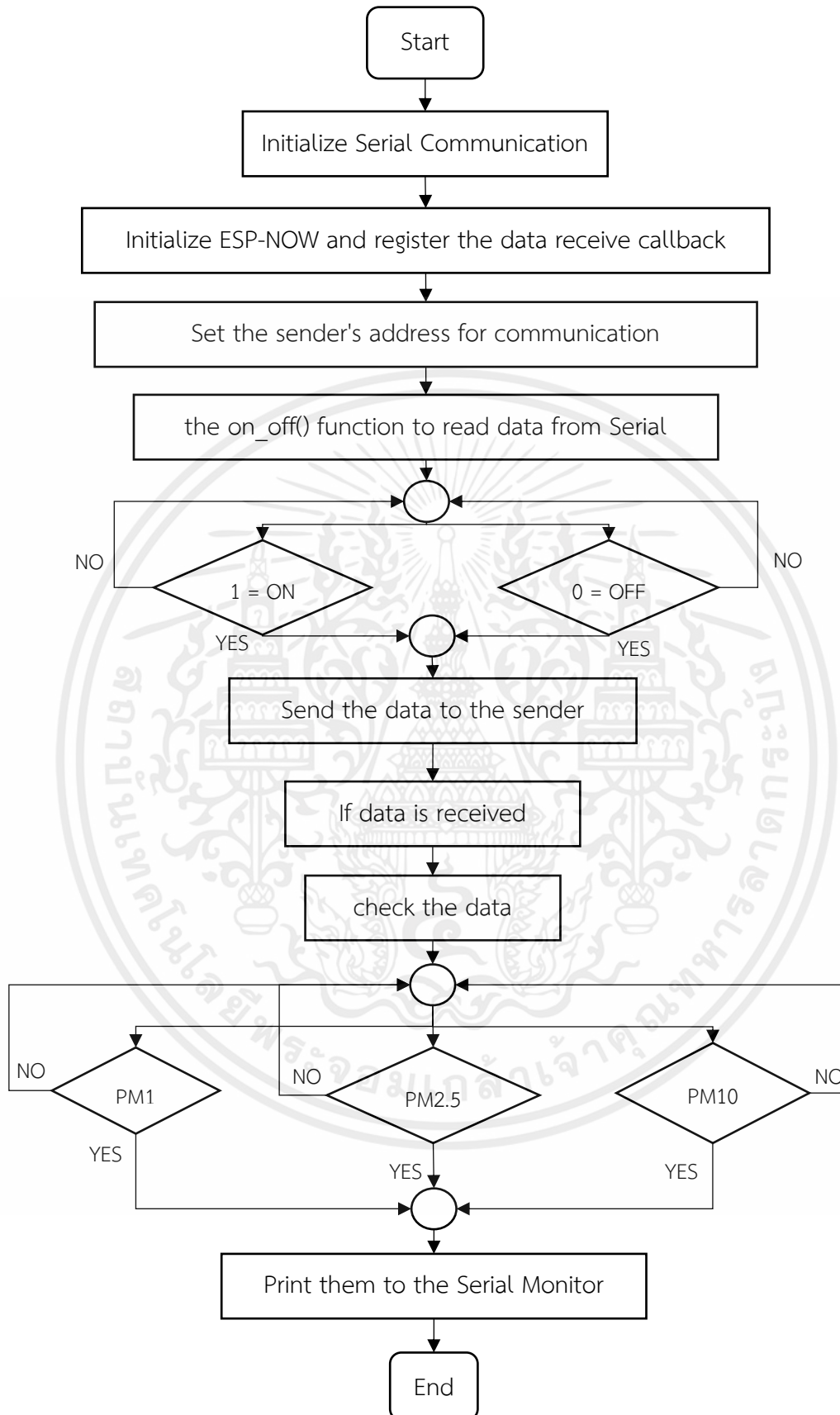
Last Packet Send Status:      Delivery Success
Received PM sensor data: {"pm1": 15,"pm2_5": 25,"pm10": 35,"boy": 24 }
Sent PM sensor data with success

```

รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบการทำงานแบบ Peer to Peer ของ ESP ฝั่งส่ง

โดยในส่วนการออกแบบออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 โดยเป็นการส่งสัญญาณแบบ Peer to Peer ของ ESP32 ฝั่งรับ ซึ่งการเริ่มต้น (Setup) จะเริ่มต้นจาก Serial Communication ที่จะสื่อสารกับหน้าเว็บแอปพลิเคชัน จากนั้นทำการเริ่มต้น ESP-NOW และลงทะเบียน Callback สำหรับการรับข้อมูล ทำการกำหนดค่าข้อมูลของอุปกรณ์ส่ง (Sender Address) และเพิ่ม Peer (อุปกรณ์ส่ง) เข้าสู่เครือข่าย ESP-NOW.

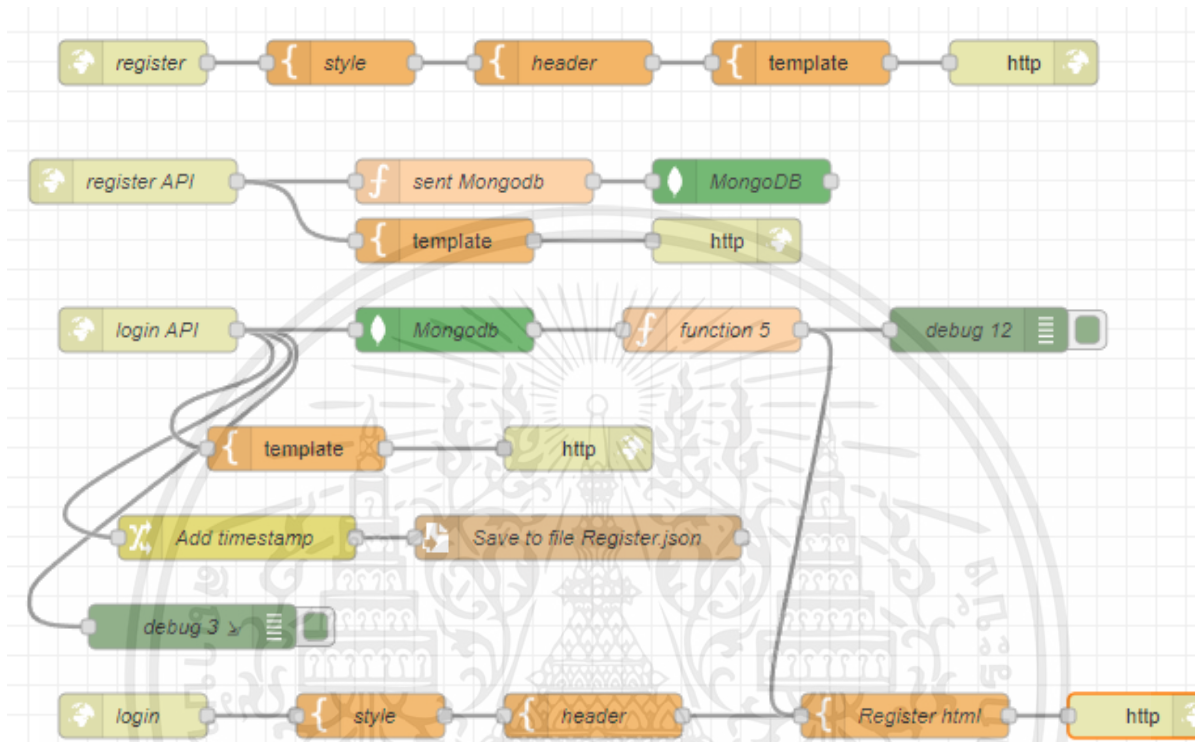
โดยในส่วนของลูปหลัก (Loop) เป็นการเรียกใช้ฟังก์ชัน on_off() เพื่ออ่านค่าจาก Serial (ค่า "On-Off") กำหนดค่า "On-Off" ในข้อมูล sensorData จากนั้นส่งข้อมูลที่มีค่า sensorData ไปที่ ESP32 อุปกรณ์ส่งผ่าน ESP-NOW ส่วนของ Callback Function OnDataReceived จะทำการตรวจสอบข้อมูลที่เข้ามาแล้วแปลงข้อมูลเป็น sensor_data จากนั้นนำค่า pm1, pm2_5, และ pm10 มาแสดงผลที่ Serial Monitor ส่วนฟังก์ชัน on_off ถ้ามีข้อมูลที่มีจาก Serial 0emedkiอ่านค่า "On-Off" จาก Serial ที่จะได้ค่าจากหน้าเว็บแอปพลิเคชันส่วนสุดท้ายคือ Callback Function OnDataSent เมื่อข้อมูลถูกส่งเข้ามา พิมพ์สถานะการส่งที่ Serial Monitor รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.9 และทำการทดสอบการส่งค่าซึ่งจะกำหนดค่า PM1 = 15 PM2.5 = 25 PM10 = 35 และตัวแปร boy แทนตัวแปร On-Off มีค่าเท่ากับ 24 แล้วส่งค่าให้ ESP32 ฝั่งส่งแสดงผลการทำงานของการทำงานแบบ Peer to Peer ของ ESP ฝั่งส่งค่าดังรูปที่ 3.10



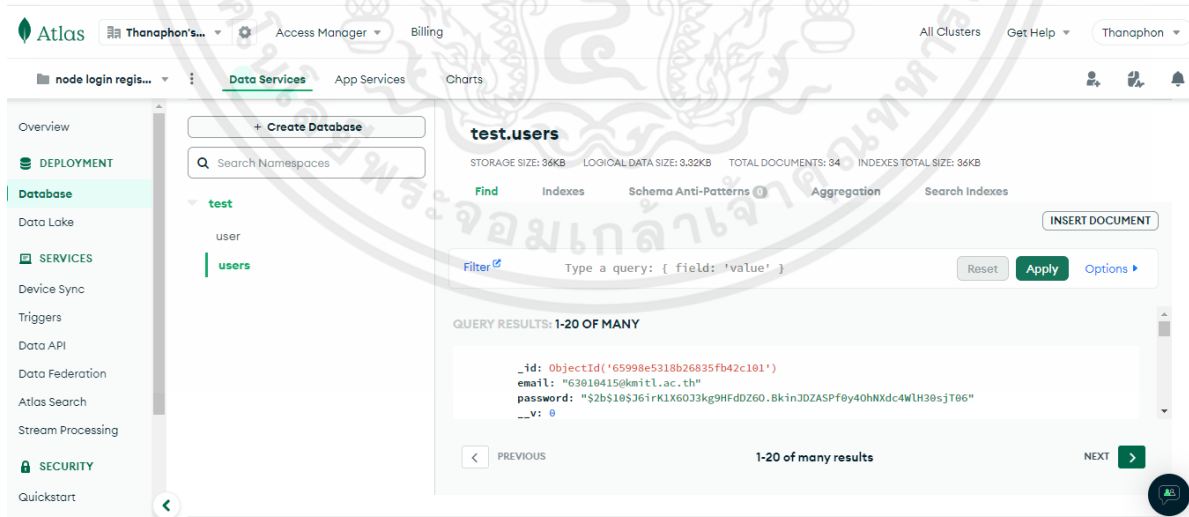
รูปที่ 3.9 ออกแบบการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ฝั่งรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ถูกส่งระหว่างผู้ใช้กับเซิร์ฟเวอร์ มีส่วนแก้ไขข้อมูล โดยระบบต้องมีการจัดการการแก้ไขข้อมูลส่วนตัวของผู้ใช้ และการรักษาความปลอดภัยในกระบวนการนี้ รายละเอียดของบล็อกโปรแกรม Node-RED ของเว็บแอปพลิเคชัน รายละเอียดหน้าเว็บ MongoDB สำหรับเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 บล็อกโปรแกรม Node-RED ของเว็บแอปพลิเคชัน

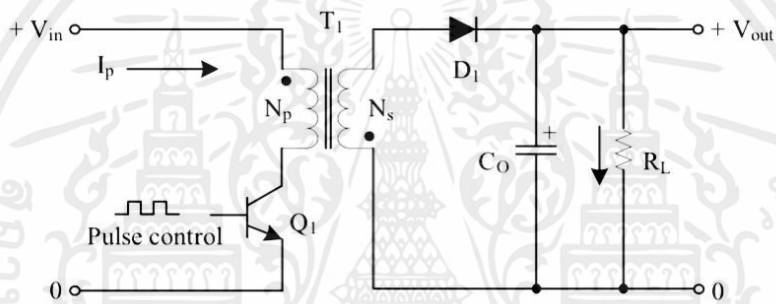


รูปที่ 3.12 หน้าเว็บ MongoDB สำหรับเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 หลักการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback converter) นี้มีการควบคุมที่ค่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์และควบคุมกระแสตามคำสั่งจากสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าทางขาเบส หม้อแปลง T_1 จะสร้างสภาวะปฐมนุญและทุติยภูมิกลับกันเพื่อควบคุมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแสไปสู่ไดโอด D_1 ก็จะอยู่ในสภาวะการทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ และไม่มีกระแสไหลผ่าน ทั้งนี้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะสะสมพลังงานในสภาวะปฐมนุญของหม้อแปลง T_1 แต่เมื่อ Q_1 หยุดทำงาน กระแสสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง T_1 จะยุบตัวทำให้เกิดการควบคุมชั่วของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขดปฐมนุญและทุติยภูมิ D_1 อยู่ในสภาวะการทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ พลังงานที่สะสมในขดปฐมนุญของหม้อแปลงจะถูกถ่ายเทออกไปยังขดทุติยภูมิ และมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ไปสู่ตัวเก็บประจุ C_1 และปล่อยค่าแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขดปฐมนุญและทุติยภูมิของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่การทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และช่วงเวลาของกระแสเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 รายละเอียดดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงและค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขาเข้าเมื่อวงจรทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times (V_{in} - V_{SAT}) \times t_{ON}}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (22)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานของ Q_1 (รอบต่อเวลา)

t_{ON} คือ ช่วงเวลาที่ Q_1 นำกระแสไฟฟ้า (วินาที)

N_s คือ จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ (รอบ)

N_p คือ จำนวนรอบของขดปฐมนุญ (รอบ)

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกของคอนเวอร์เตอร์ (โวลต์)

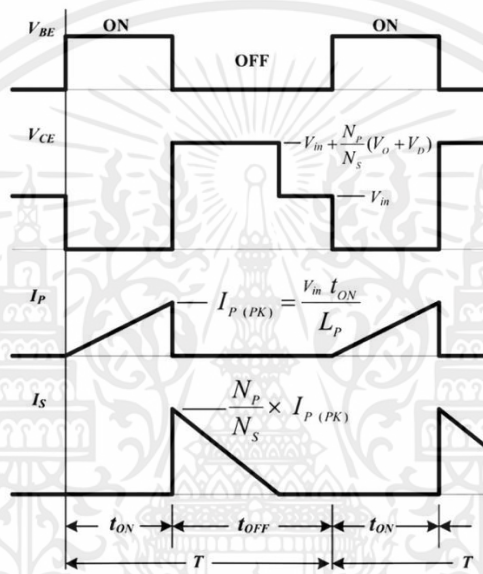
V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์ (โวลต์)

V_{SAT} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม Q_1 ขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว (โวลต์)

V_D คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด D_1 ขณะนำกระแส (โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานคือ กระแส I_p ที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลา และมีค่าสูงสุดเมื่อ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแสที่เวลา $T=T_{ON}$ โดยเมื่อ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขดลวดด้านทุติยภูมิจะเริ่มมีกระแสเริ่มต้นที่ $I_s=(N_p/N_s)I_{p(PK)}$ และลดลงตามเวลา ขณะที่กระแสไหลในขดลวดทุติยภูมิ ขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแส จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขดลวดทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ $(N_p/N_s)(V_o/V_D)$ และมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ Q_1 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเป็น $V_{in} + (N_p/N_s)(V_o/V_D)$ จนกระทั่งกระแสที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิมีค่าลดลงเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมที่ Q_1 จึงลดลงมามีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต V_{in} ลักษณะของกระแสและแรงดันในระหว่างการทำงานของวงจรเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบแหล่งจ่ายไฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

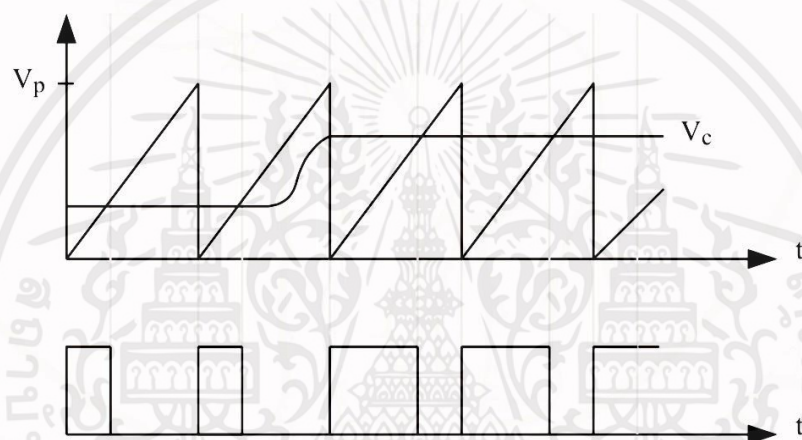


รูปที่ 3.14 ลักษณะกระแสและแรงดันในวงจรขณะทำงาน

ในการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะมีสัญญาณพัลส์ควบคุมการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เพื่อส่งผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

3.1.7 หลักการออกแบบสร้างสัญญาณแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การออกแบบสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม Pulse Width Modulation (PWM) จำเป็นต้องพิจารณารายละเอียดของฟังก์ชันการถ่ายโอนของพีดับเบิลยูเอ็ม หน้าที่หลักของวงจร PWM คือการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรเพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนที่ได้ เช่น ความผิดพลาดที่ได้รับการชดเชย ให้กลายเป็นค่ารอบทำงาน (Duty cycle) เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดขาเกตของอุปกรณ์สวิตช์ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจร (V_c) โดยที่จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth waveform) ที่มีค่าเท่ากับ V_p แรงดันไฟฟ้าทางออกจะแสดงลักษณะพีดับเบิลยูเอ็มเมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย และจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยตามภาพที่แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กระบวนการ PWM จะมีค่าแรงดันด้านออกเมื่อแรงดัน V_c ที่ออกจากวงจรขยายความคลาดเคลื่อนที่ถูกชดเชยมีค่าสูงกว่าค่าสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

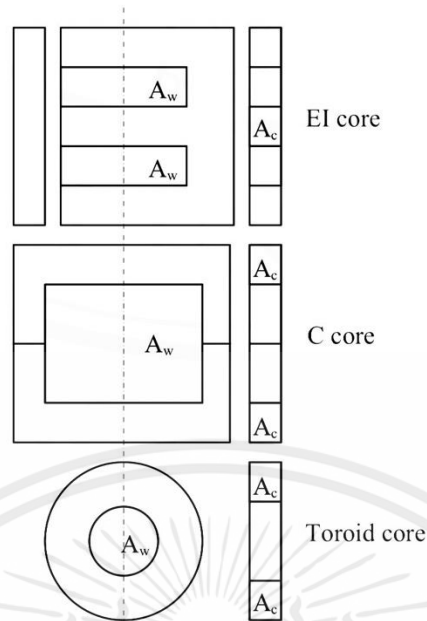
3.1.8 หลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงและเพิ่มกำลังไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งโดยทั่วไป ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง มักใช้วิธีการการคำนวณพื้นที่ผลคูณ (Area product A_p) ตามที่แสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 23

$$A_p = A_c \times A_w \quad (23)$$

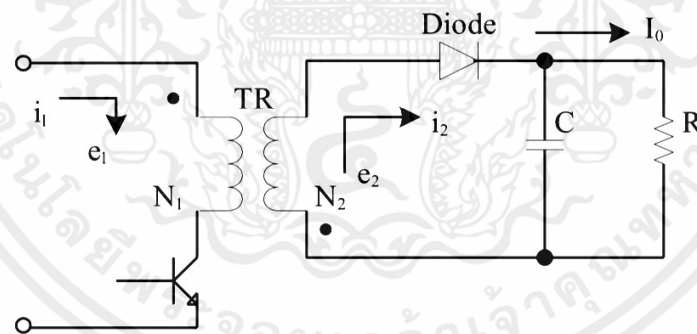
เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (Core area) (ตารางเมตร)

A_w คือ พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (Window area) (ตารางเมตร)



รูปที่ 3.16 พื้นที่ของ A_c และ A_w สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่าง ๆ

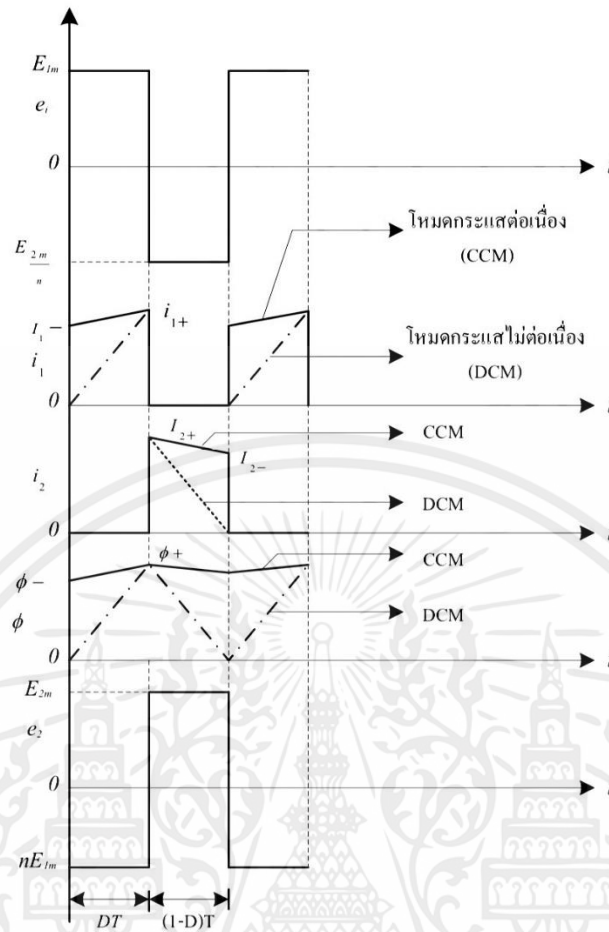
หม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่เหมือนตัวเหนี่ยวนำอีกหน้าที่หนึ่ง สำหรับโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ พลังงานถูกถ่ายเทไปยังโหลด ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หม้อแปลงไฟฟ้าดำเนินการในช่วงเวลา $(1-D)T$ และความสัมพันธ์ของสัญญาณถูกแสดงในรูปที่ 3.17



(ก) วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 3.17 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สัญญาณของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

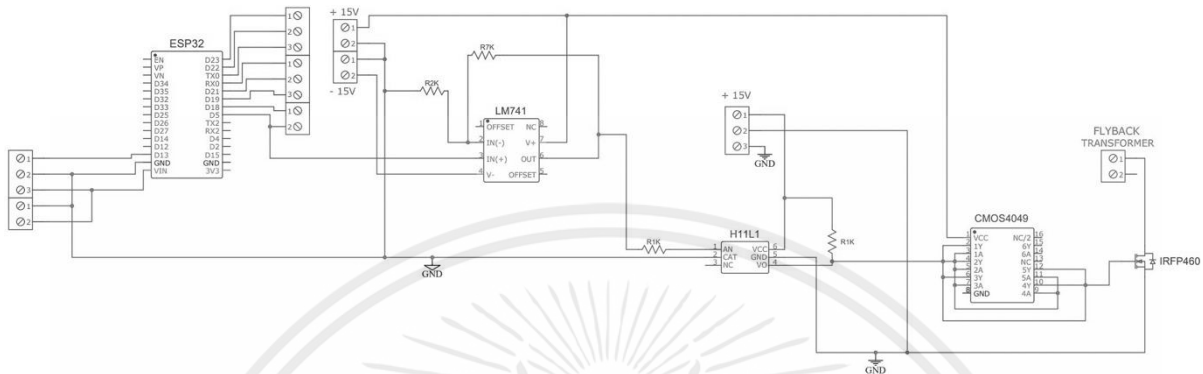
รูปที่ 3.17 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (ต่อ)

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรฟลายแบคจะทำหน้าที่เหมือนตัวเหนี่ยวนำ ทำให้สามารถแบ่งโหมดการทำงานได้เป็นสองรูปแบบ คือโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง (Incomplete energy transfer หรือ Continuous Conduction Mode: CCM) และโหมดกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง (Complete energy transfer หรือ Discontinuous Conduction Mode: DCM) การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ทุกแบบสามารถออกแบบให้ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องและกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องได้ ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงของวงจรฟลายแบคในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ลดลงเป็นศูนย์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าตรง (DC flux) โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนจาก ϕ_- ไปยัง ϕ_+ และกลับมาที่ ϕ_- กรณีดังกล่าวจะไม่ได้ใช้ประโยชน์จากช่วงซีกบวกของวงรอบของงานที่ทำโดยแรงแม่เหล็กกับแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของแม่เหล็กทำให้เกิดความร้อนพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนนี้เรียกว่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) [61] ได้เต็มที่ ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องจะมีขนาดใหญ่กว่ากรณีโหมดกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกเท่ากันและกรณีโหมดกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้ายอดที่มีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 หลักการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

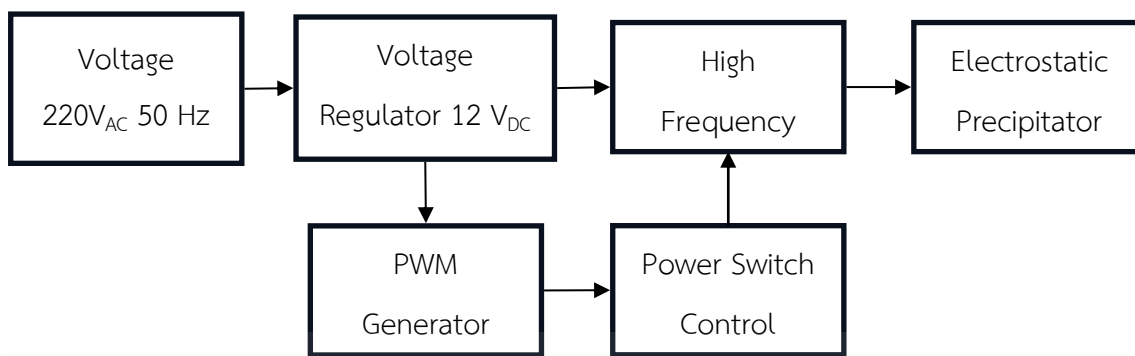
การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบพัลส์ สำหรับเครื่องกรองอากาศ หลักการไฟฟ้าสถิตขนาด 10 กิโลโวลต์ ชนิดประจุบวก ความถี่สวิตซ์ใช้งาน 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ใช้กับแรงดันอินพุตกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบพัลส์

3.1.9.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบพัลส์

ลำดับขั้นตอนการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบพัลส์ เริ่มต้นด้วยการรับแรงดันไฟฟ้าอินพุตขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต เข้าสู่วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าและแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เข้าไปสู่วงจรสร้างสัญญาณพีคเบิลยูเอ็ม โดยออกแบบให้สามารถปรับรอบทำงานได้ เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงมอสเฟตกำลังที่ได้ออกแบบให้ใช้งานในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต ถึง 200 กิโลเฮิร์ต ส่งผ่านต่อไปยัง หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในโครงการนี้เราเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิดฟลายแบ็คในการศึกษา หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานและสะสมพลังงานให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบกระแสตรงพัลส์ขนาด 10 กิโลเฮิร์ต จ่ายให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เมื่อได้รับแรงดันสูงกระแสตรงให้กับขั้วดิสชาร์จ ในขณะที่ขั้วตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์ ทำให้เกิดความโคโรนาดีสชาร์จขึ้นบริเวณรอบ ๆ ขั้วดิสชาร์จ และเกิดการไหลของอิเล็กตรอนพลังงานสูงผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่ออนุภาคของฝุ่นได้ไหลผ่านเข้าไปยังแผ่นตกตะกอน และอนุภาคจะไหลผ่านที่ช่องว่างระหว่างขั้วตกตะกอนกับดิสชาร์จที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มขั้นสูง จึงส่งผลทำให้อนุภาคได้รับประจุและถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตกสะสมอยู่บนผิวขั้วตกตะกอนโดยอนุภาคที่ตกตะกอนบนขั้วตกตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะหรือการสั่นสะเทือนเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงไปในที่เก็บฝุ่น โดยรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบพัลส์

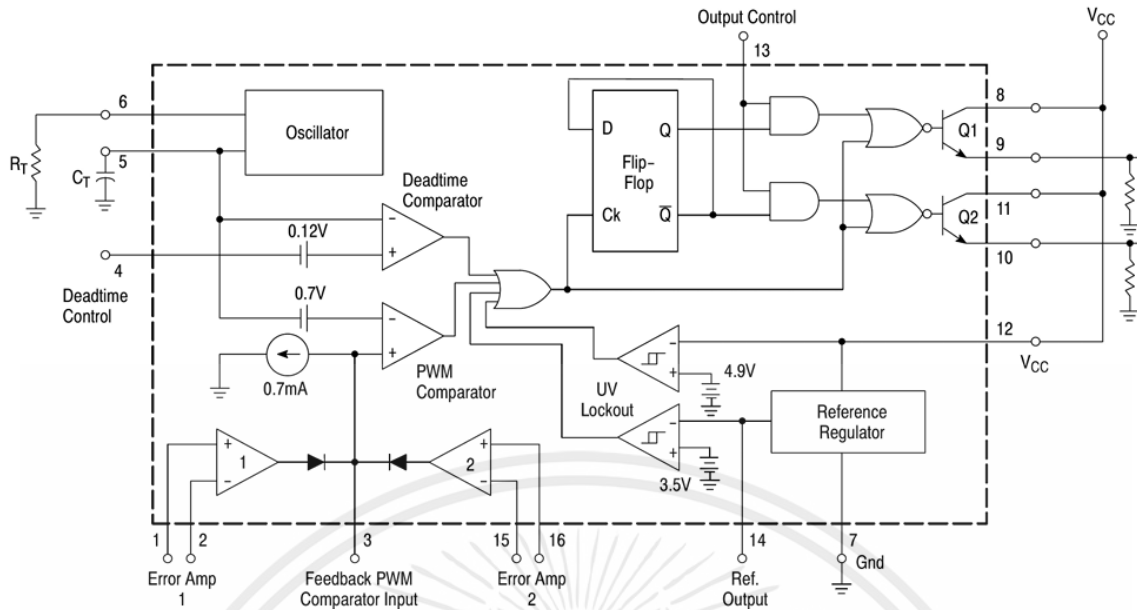
3.1.9.2 การออกแบบวงจรภาคควบคุมสัญญาณพัลส์

ภาคควบคุมสัญญาณพัลส์ ในการออกแบบได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มควบคุมการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าตามโครงสร้างภายในและขาใช้งานของไอซี TL494 ดังรูปที่ 3.20 โดยการทำงานจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันเอาต์พุตเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งคุณสมบัติของไอซีเบอร์ TL494 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของไอซีเบอร์ TL494

องค์ประกอบ	ขนาดพิกัดการใช้งาน
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน	7 ถึง 40 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	40 โวลต์
กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต	200 มิลลิแอมป์
ความต้านทาน	1.8 ถึง 500 กิโลโอห์ม
ค่าความจุไฟฟ้า	0.47 ถึง 10,000 นาโนฟารัด
ความถี่สวิตช์	1 ถึง 300 กิโลเฮิร์ต

การทำงานของวงจรภายในของไอซีได้นำหลักการโหมดควบคุมจากแรงดันมาใช้งาน จะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันเอาต์พุตและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจร ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความต่าง Error Amp ก่อนที่จะส่งไปยังวงจรพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.20 โครงสร้างภายในและขาใช้งานของไอซีเบอร์ TL494

1) การวงจรของ TL494 เป็นวงจรพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์กำหนด โดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 และ 5 ของไอซี คาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จากค่านวณตามสมการที่ 22

$$T = \frac{R_T C_T}{1.1} \quad (22)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงาน ($f = \frac{1}{T}$)

R_T คือ ความต้านทานการใช้งาน

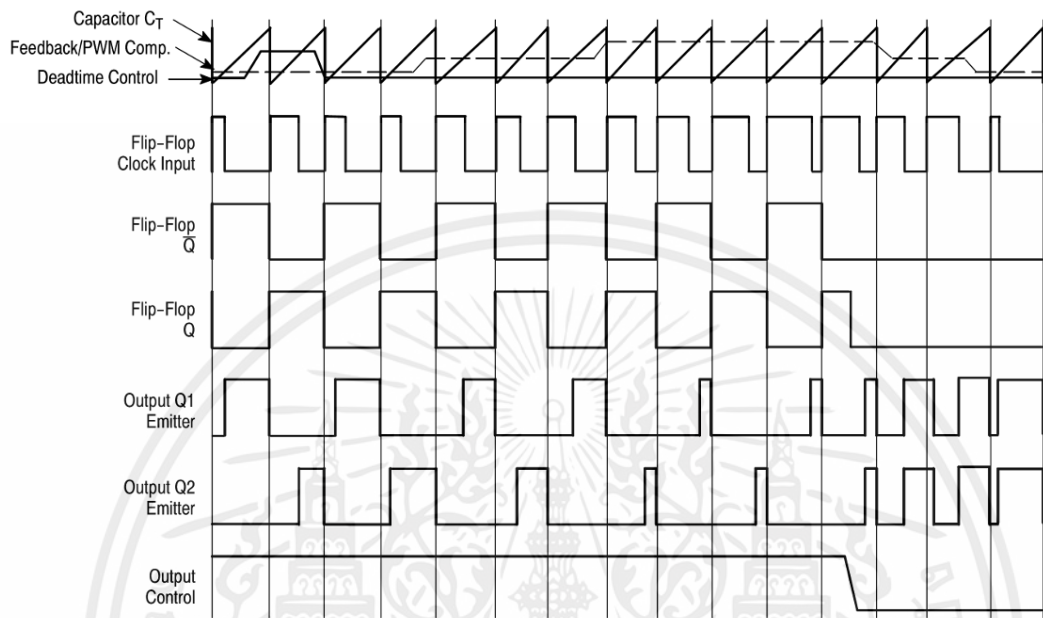
C_T คือ ค่าความจุไฟฟ้าใช้งาน(กำหนดเป็นค่าคงที่)

2) การทำงานของไอซีสำหรับคงค่าแรงดันไฟฟ้าของไอซีเบอร์ TL494 ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เพื่อใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์โดยความกว้างของเอาต์พุตของไอซีจะได้อาจมาจากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา S กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรขยายความต่าง Error Amp ทั้งสองตัวผ่านทาง PWM Comparator ส่วน NOR Gate ที่ควบคุมเฟาเวอร์ทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q_1 และ Q_2 จะทำงานเมื่อขา C_K ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ Low โดยที่ C_K จะอยู่ในสถานะ Low เมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้งสองตัว คือ แรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตหากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างของเอาต์พุตของไอซีจะลดลง ในทางกลับกันถ้าแรงดันป้อนกลับมีค่าลดลง ความกว้างของเอาต์พุตของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความกว้างของเอาต์พุตของไอซีนี้อาจกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขา 3 จาก 0.5 ถึง 3.5 โวลต์ ส่วนวงจรขยายความต่าง Error Amp ทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมดตั้งแต่ -0.3 ถึง -2 โวลต์ และสามารถใช้ในการตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ได้ วงจรขยายความต่าง Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะ High (Active high) โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา Non Inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ วงจรขยายความต่าง Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตต่ำสุดจะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาต์พุตของไอซี

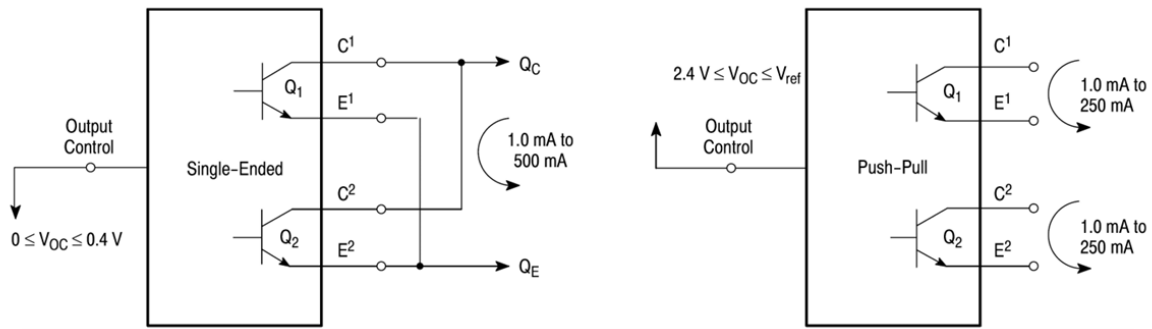


รูปที่ 3.21 สัญญาณลักษณะการทำงานของไอซีเบอร์ TL494[56]

3) การกำหนดค่าเวลาเมื่อ T_D ของไอซีเบอร์ TL494 สามารถออกแบบเพื่อกำหนดค่าเวลาเมื่อ T_D ของวงจรได้เอง โดยการต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี หากแรงดันไฟฟ้าที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเมื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ต่ออยู่ในวงจรของไอซี ดังนั้นช่วงเวลาทำงาน T_{ON} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีเมื่อต่อขา 13 (Output Control) เข้ากับขาที่ 14 ที่เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ($+5 V_{ref}$) จะให้ค่าเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลา และเมื่อต่อขาที่ 13 ลงกราวด์จะให้ค่าเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลา

4) การเลือกใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ที่เอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 เนื่องจากเอาต์พุต Q_1 และ Q_2 สามารถทำงานได้ใน 2 โหมดคือ ทำงานพร้อมกันหรือสลับกันได้ ซึ่งสามารถเลือกโหมดการทำงานได้ที่ขา 13 ณะที่ความจุไฟฟ้า C_T ดิสชาร์จเอาต์พุตของ Dead-Time Comparator จะส่งสัญญาณพัลส์ออกมา C_K จะมีสถานะเป็น High และจะหยุดการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High ต่อเข้ากับขา 4 ที่เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ($+5 V_{ref}$) เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานตามการควบคุมของ Flip-Flop ในกรณีนี้ค่าเวลาการทำงานจะเป็นสองเท่าของค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซีที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.22

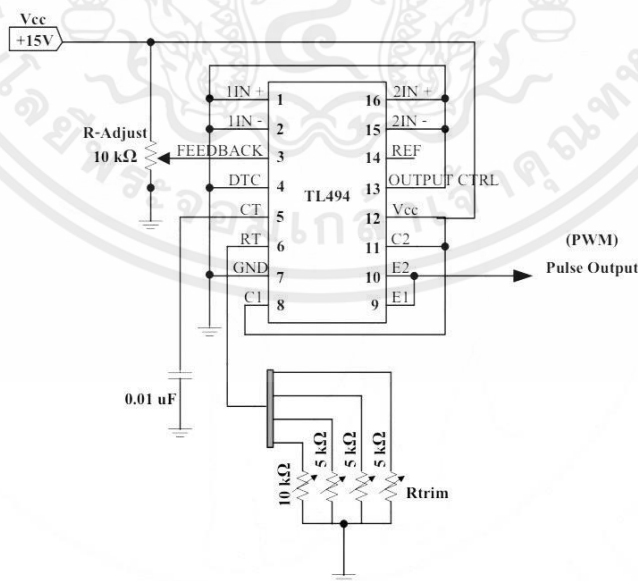
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ลักษณะการเลือกใช้อาต์พุตของไอซี TL494

สำหรับไอซีเบอร์ TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $7 \leq V_{CC} \leq 40$ โวลต์ มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงภายใน V_{ref} เท่ากับ 5 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรภายนอกได้ โดยมีความถูกต้อง ± 1.5 เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์ เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส

การออกแบบโดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้งานในวงจร 15 โวลต์จ่ายให้กับไอซีเบอร์ TL494 ที่เป็นตัวกำหนดและสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม โดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้ (R-adjust) ขนาด 10 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่สำหรับปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ และมีตัวเก็บประจุ (C_T) ขนาด 0.01 ไมโครฟารัด เป็นตัวกำหนดความถี่ประมาณ 0 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยความถี่ที่ต้องการจะอาศัยการปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (R-trim pot) ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งแสดงวงจรภาคควบคุม สัญญาณพัลส์เมื่อได้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มตามความถี่ที่ต้องการแล้วจะส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังขา 9 และขา 10 ของไอซีเบอร์ TL494 ไปยังวงจรภาคขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.23

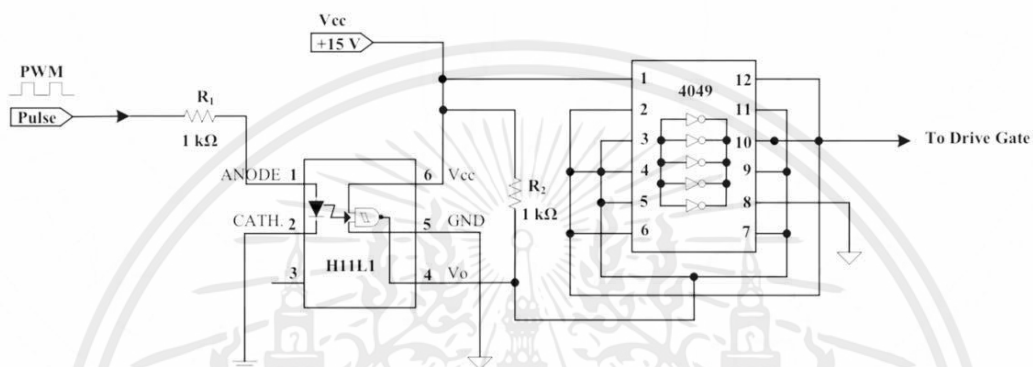


รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมภาคควบคุมสัญญาณพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9.3 การออกแบบภาควงจรขับมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มีการออกแบบให้ใช้ไอซี Optocoupler เบอร์ H11L1 เพื่อทำหน้าที่แยกส่วนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงออกจากส่วนแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ เพื่อให้ทำงานร่วมกับไอซี CMOS เบอร์ 4049 ที่มีคุณลักษณะการทำงานเป็นบัฟเฟอร์นอเทเกต ให้กับวงจรในภาคขับเคลื่อนทางขาที่ 4 และ 6 โดยการทำงานของไอซีเบอร์ 4049 จะต่อขาของ CMOS ในลักษณะการต่อแบบขนานกัน ทำให้เป็นไปได้ที่จะเพิ่มกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อนำไปสู่ที่ขาเกตของมอสเฟตกำลังที่ต้องการ กระแสไฟฟ้าสูง ๆ ได้ โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ไดอะแกรมภาคควบคุมขาเกตของมอสเฟตกำลัง

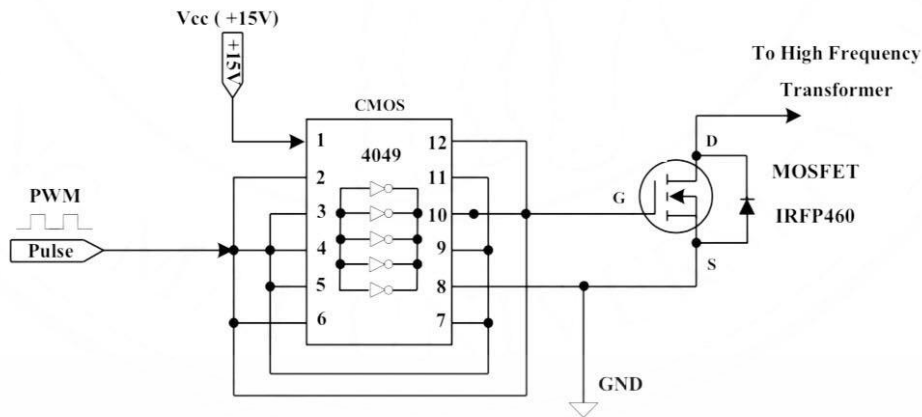
3.1.9.4 การออกแบบวงจรภาคควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เริ่มต้นด้วยการรับสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มจากวงจรในภาคขับเคลื่อนทางขาที่ 10 ของไอซีเบอร์ 4049 เพื่อทำการขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลัง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.25 ในการออกแบบได้เลือกใช้สวิตช์ควบคุมมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) เบอร์ IRFP460 สำหรับควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติสารกึ่งตัวนำมอสเฟตกำลัง เบอร์ IRFP460

องค์ประกอบ	ขนาดพิกัดการใช้งาน
สวิตช์ควบคุม	Power MOSFET เบอร์ IRFP460
พิกัดแรงดัน	500 โวลต์
พิกัดกระแส	20 แอมป์
ความถี่ในการสวิตช์	100 กิโลเฮิร์ต
ความต้านทาน $R_{DS(ON)}$	0.27 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ไดอะแกรมการทำงานของมอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP460

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค (Flyback Transformer) ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่รับกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อส่งไปยังขดลวดทางปฐมภูมิ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการพองตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงจากการพองตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิ มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงทางด้านขาออก ซึ่งระดับแรงดันสูงขาออก (V_s) จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการพันขดลวดทางทุติยภูมิ (N_s) และการปรับความถี่การใช้งาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23 และ องค์ประกอบเพื่อการพิจารณาในเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแสดงดังตารางที่ 3.3

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (23)$$

เมื่อ V_p คือ แรงดันไฟฟ้า

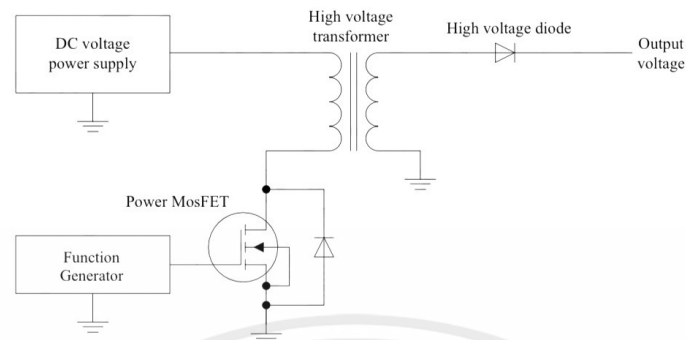
N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบเพื่อการพิจารณาในเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

องค์ประกอบ	ค่าที่ต้องการ	พิกัดใช้งาน
ชนิดหม้อแปลงไฟฟ้า	Flyback transformer	ใช้ความถี่สูง > 10 กิโลเฮิร์ต
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน	แรงดันไฟฟ้าในระบบ	กระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	แรงดันไฟฟ้า (V_{in})	กระแสตรง 12 ถึง 15 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าขาออก	แรงดันไฟฟ้า (V_{out})	10 กิโลโวลต์
กระแสไฟฟ้าใช้งาน	กระแสไฟฟ้าในระบบ	≤ 1 มิลลิแอมป์
ความถี่ใช้งาน	ความถี่ในการสวิตช์ (F_{sw})	10 ถึง 30 กิโลเฮิร์ต

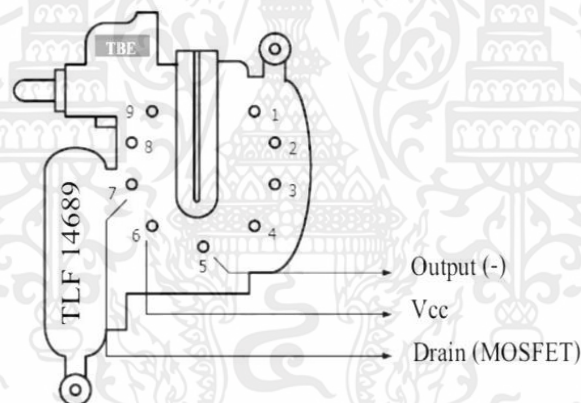
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบสมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง มีไดโอดแกรมวงจร สำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.26 ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.26 ไดโอดแกรมวงจรการทดสอบสมรรถนะหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบค

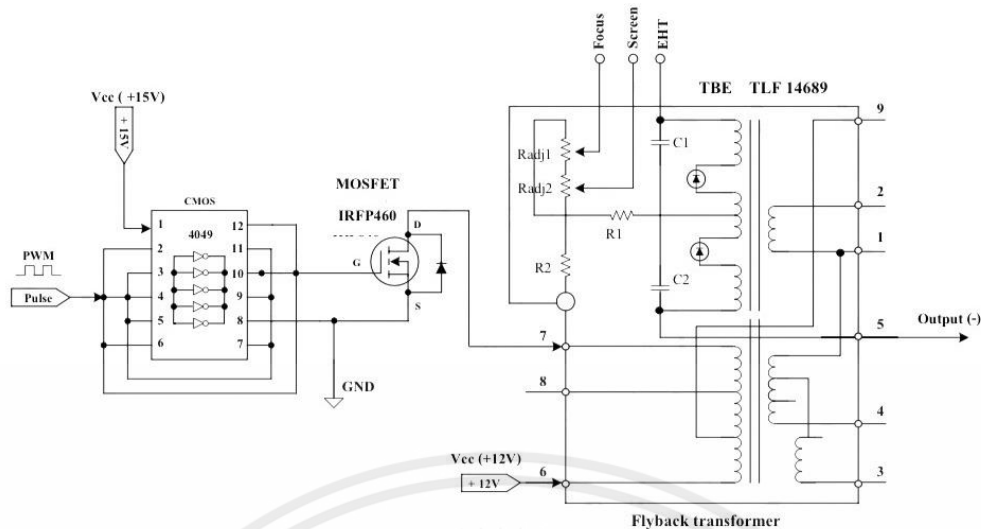
ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบคของ TBE รุ่น TLF14689F1 มาใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบพัลส์ต้นแบบ ซึ่งไม่ต้องมีการพันขดลวดปฐมภูมิเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โครงสร้างของขาใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบค TBE รุ่น TLF14689F1

โครงสร้างของขาที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.28 โดยกำหนด ขาแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{CC}) ที่ ขา 6 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{out}) ที่ขา 5 และขาที่ 7 จะทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์มาจากมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ไดอะแกรมวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงฟลายแบค TBE รุ่น TLF14689F1

สำหรับไดอะแกรมวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบฟลายแบค แสดงดังรูปที่ 3.28 ซึ่งได้ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ที่ขา 6 ของหม้อแปลงไฟฟ้านำสัญญาณพัลส์จากมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) จ่ายเข้าที่ขา 7 ของหม้อแปลงไฟฟ้า และที่ขา 5 และขา EHT จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแรงสูงมาให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตต่อไป

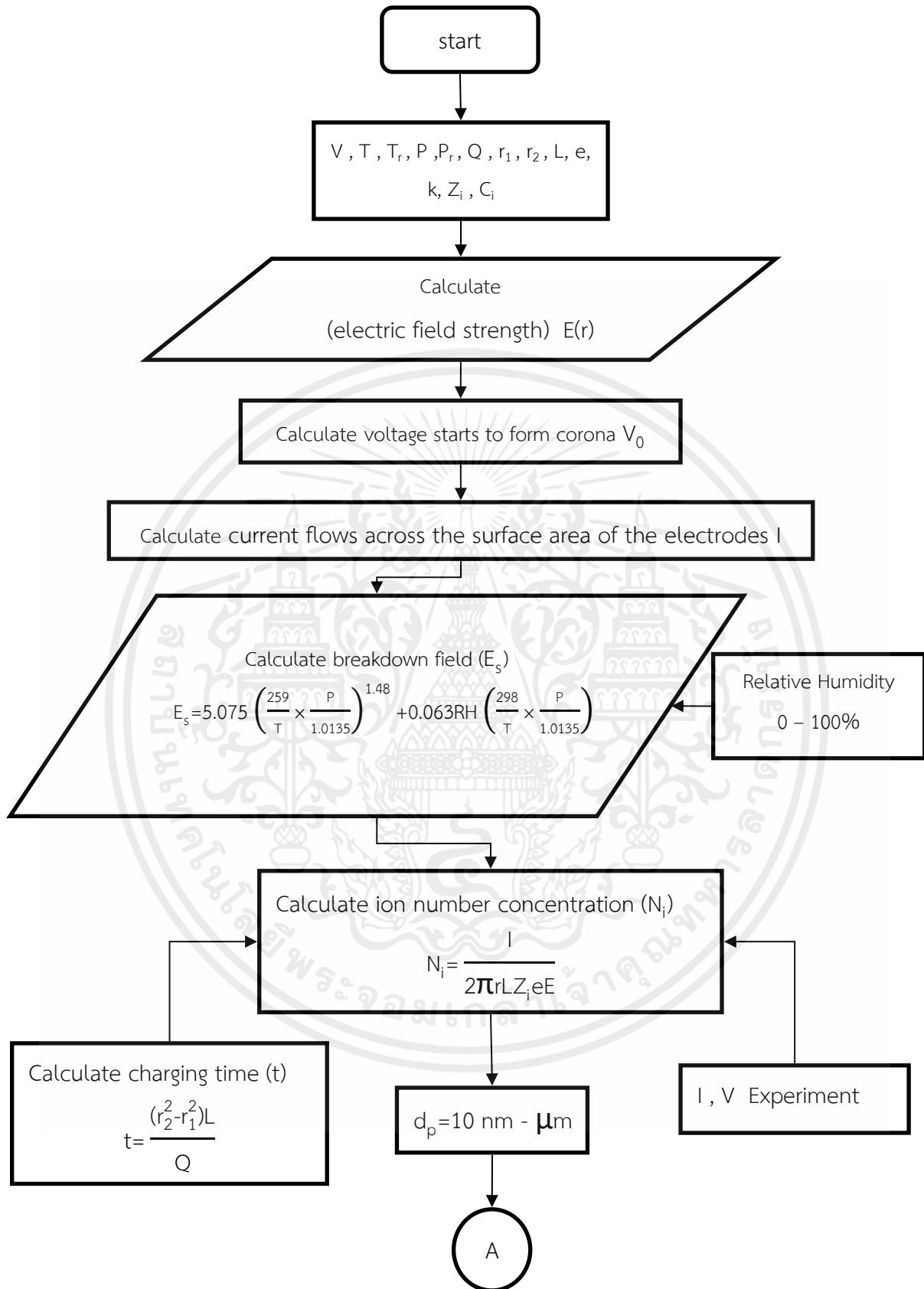
3.1.10 การออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น

การออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ความต้องการที่สำคัญคือการทราบถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องฟอกอากาศในกระบวนการนี้ จึงได้ทำการสร้างโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น การทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นโดยการกำหนดเงื่อนไข โดยป้อนค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ ที่ระดับ 10 กิโลโวลต์ อุณหภูมิของอากาศขณะทำงาน (T) มีค่าที่ 318 เคลวิน อุณหภูมิของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (T_r) มีค่าที่ 293 เคลวิน ความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน (P) มีค่าที่ 1 บาร์ และความดันบรรยากาศขณะทำงาน (P_r) มีค่าที่ 1 บาร์ การป้อนค่าตัวแปรของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้ารวมถึงรัศมีของขั้วดิสชาร์จ (r_1) มีค่าที่ 2 เซนติเมตร รัศมีของขั้วตกตะกอน (r_2) มีค่าที่ 4 เซนติเมตร ความยาวของขั้วตกตะกอน (L) มีค่าที่ 200 มิลลิเมตร ค่าประจุอิเล็กตรอน (e) มีค่าที่ 1.6×10^{-19} คูลอมป์ ค่าคงที่โบลท์มานน์ (k) มีค่าที่ 1.38×10^{-23} ความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของไอออน (Z_i) มีค่าที่ 1.4×10^{-4} ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที และความเร็วเฉลี่ยของไอออนที่เกิดขึ้นจากผลกระทำของอุณหภูมิ (Ci) มีค่าที่ 240 เมตรต่อวินาที จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (E_0) เพื่อนำค่าสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนามาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (V_0) และจากนั้นคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่กระชังในพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด (I) จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่มีการป้อนค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไอออน (N_i) ที่พิจารณาเวลาในการอัดประจุ และนำผลของกระแสดิสชาร์จจากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีการกำหนดให้มีการวนซ้ำคำนวณโดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร เพื่อหาค่าจำนวนประจุบนอนุภาค (n_p) จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของก๊าซ (λ) เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าตัวชดเชยของคันทิงแฮม (C_c) โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าตัวชดเชยของคันทิงแฮมตามค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ได้กำหนดแต่ละครั้ง จากนั้นจึงนำค่าตัวชดเชยของคันทิงแฮมที่ได้ไปหาค่าการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค (Z_p) เมื่อได้ค่าการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาคแล้ว โปรแกรมจึงคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน (η) โดยกำหนดให้มีการทำงานวนซ้ำคำนวณใหม่โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร ทำจนขนาดอนุภาคของฝุ่นมีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเมตร และแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของกราฟประสิทธิภาพการตกตะกอน โดยรายละเอียดการทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนแสดงดังรูปที่ 3.29 และ รูปที่ 3.30

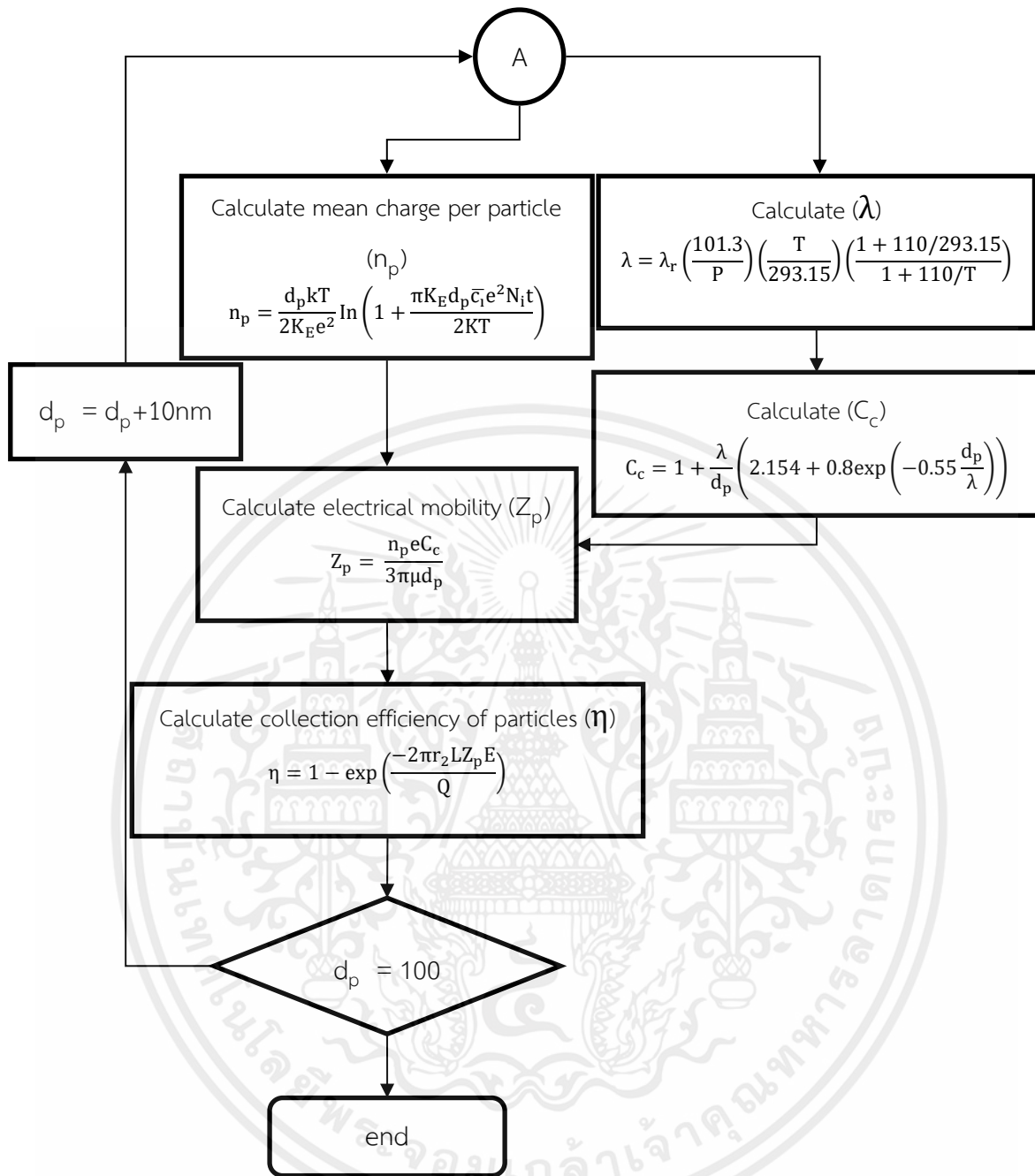


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 รายละเอียดการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน ส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 รายละเอียดการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน ส่วนที่ 2

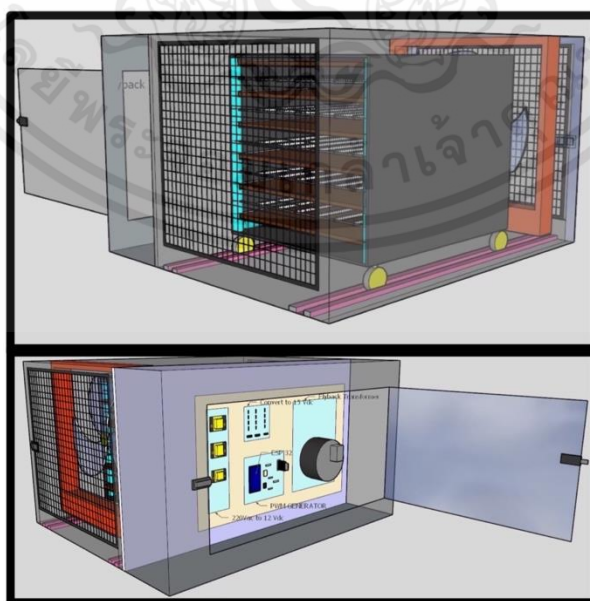
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 การออกแบบชั้นกรงอากาศ

การออกแบบชั้นกรงอากาศจัดสร้างชั้นกรงอากาศ ที่ใช้งานกับวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ซึ่งส่วนประกอบที่ใช้ประกอบไปด้วย แผ่น PCB ทำหน้าที่เป็นขั้วตักตะกอน เส้นโลหะพันเลื่อยทำหน้าที่เป็นขั้ว ดิสชาร์จ และ แผ่นอะคริลิกเป็นโครงสร้าง ซึ่งระยะห่างระหว่างโลหะดิสชาร์จกับโลหะดิสชาร์จ (S) และ ระยะห่างระหว่างโลหะดิสชาร์จกับแผ่นตักตะกอน (C) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของ สนามไฟฟ้าสมการที่ 1 โดยรัศมีทรงกระบอกสมมูลคือค่าระยะห่างระหว่างโลหะดิสชาร์จกับโลหะดิสชาร์จ (S) ต่อระยะห่างระหว่างโลหะดิสชาร์จกับแผ่นตักตะกอน (C) ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ทำให้ได้ ค่า $S = 4$ เซนติเมตร และ $C = 5$ มิลลิเมตร ซึ่งชั้นกรงอากาศจะมีทั้งหมด 11 ชั้น เป็นชั้นโลหะดิสชาร์จ 5 ชั้น และชั้นแผ่นตักตะกอน 6 ชั้น โดยชั้นกรงอากาศที่ได้ออกแบบเป็นชั้นงาน 3 มิติ และเครื่องฟอกอากาศ หลักการไฟฟ้าสถิตทางด้านหน้า ด้านหลังและแผงวงจร แสดงดังรูปที่ 3.31 และ 3.32 ตามลำดับ



รูปที่ 3.31 ชั้นกรงอากาศที่ได้ออกแบบเป็นชั้นงาน 3 มิติ

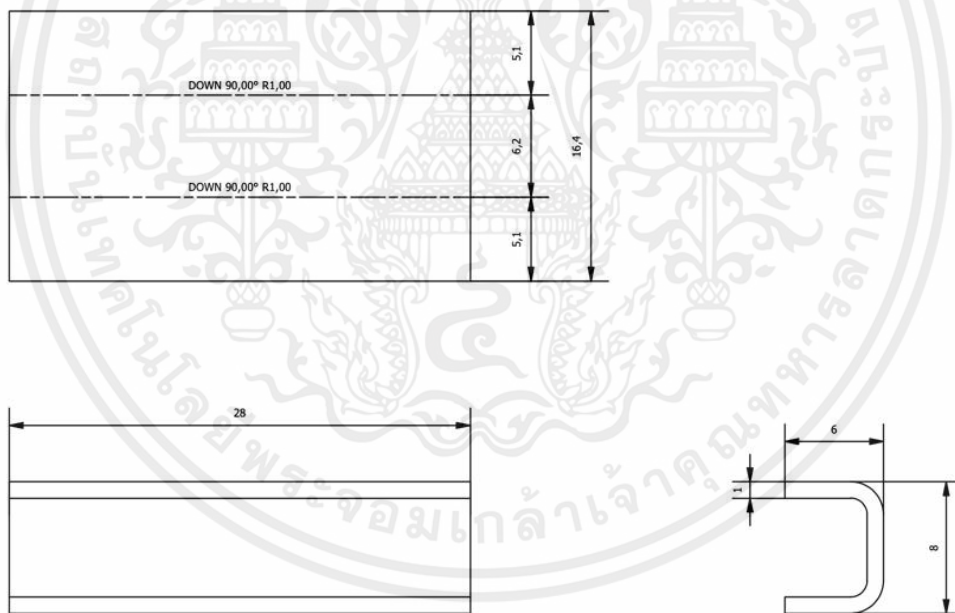


รูปที่ 3.32 ชั้นกรงอากาศที่ได้ออกแบบเป็นชั้นงานจริง

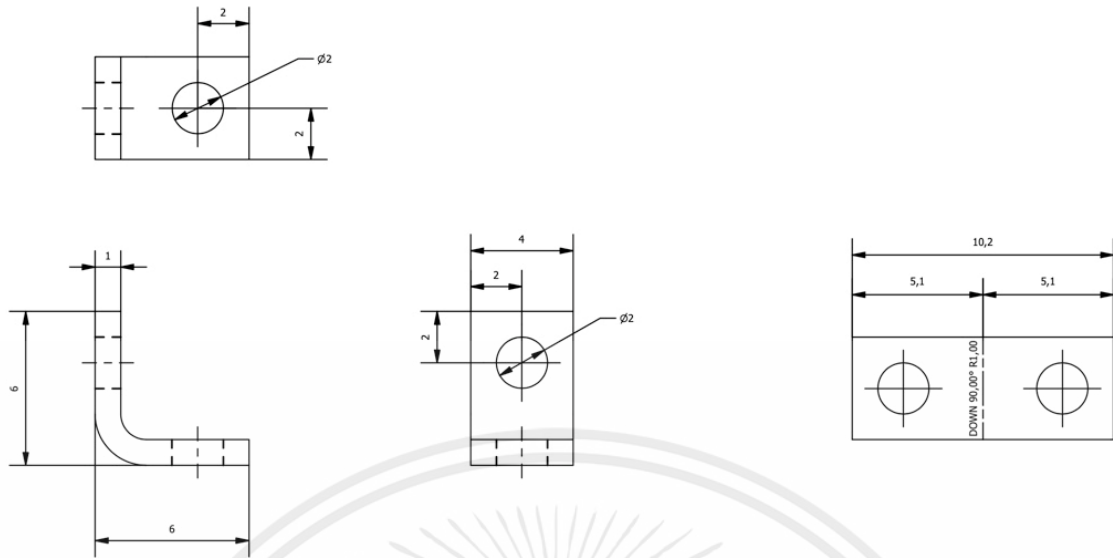
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11.1 โครงสร้างชั้นกรงอากาศที่ได้ทำการออกแบบ

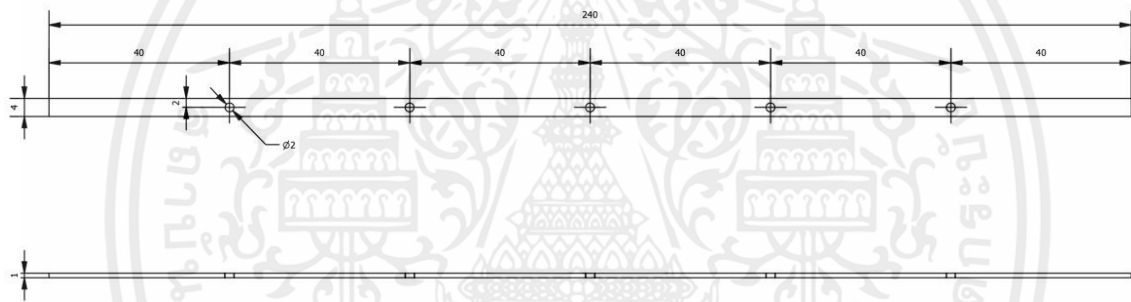
โครงสร้างชั้นกรงอากาศที่ได้ทำการออกแบบใหม่ จะแสดงรายละเอียดความกว้าง ยาว สูง หน้า และขนาดรูเจาะในบางชิ้นส่วนอุปกรณ์ โดยชิ้นส่วนแรกคือ รางใส่แผ่นตกตะกอนของเครื่องกรงอากาศมีขนาดความกว้างเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ยาวเท่ากับ 8 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 28 มิลลิเมตร และหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนต่อมาคือข้อต่ออุปกรณ์รูปตัวแอลเพื่อใช้ในการเชื่อมขั้วดิสซาร์จกับโครงชั้นกรงอากาศมีขนาดความกว้างเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ยาวเท่ากับ 6 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 4 มิลลิเมตร หนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตรและขนาดรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนต่อมาเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมขั้วดิสซาร์จกับขั้วดิสซาร์จมีขนาดความกว้างเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ยาวเท่ากับ 240 มิลลิเมตร และหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนต่อมาคือขั้วดิสซาร์จที่มีลักษณะเป็นพื้นเหลี่ยมโดยปลายทั้งสองข้างของพื้นเหลี่ยมจะมีรูเจาะเพื่อใช้ข้อต่อรูปตัวแอลในการยึดติดกับชิ้นส่วนที่เชื่อมขั้วดิสซาร์จกับขั้วดิสซาร์จมีขนาดความกว้างเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ยาวเท่ากับ 200 มิลลิเมตร หนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และขนาดรูเจาะทั้งสองด้านเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนสุดท้ายคือ แผ่นตกตะกอนของเครื่องกรงอากาศมีขนาดความกว้างเท่ากับ 210 มิลลิเมตร ยาวเท่ากับ 240 มิลลิเมตร และหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยจะแสดงดังรูปที่ 3.33 ถึง 3.37 ตามลำดับ



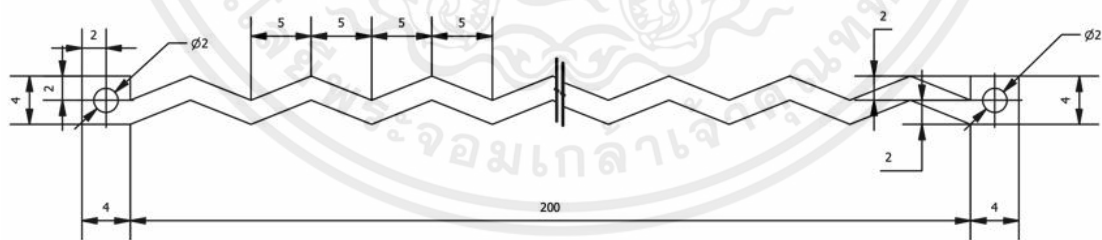
รูปที่ 3.33 รางใส่แผ่นตกตะกอนของเครื่องกรงอากาศ



รูปที่ 3.34 ข้อต่ออุปกรณ์รูปตัวแอลเพื่อใช้ในการเชื่อมขั้วดิสชาร์จกับโครงชั้นกรงอากาศ

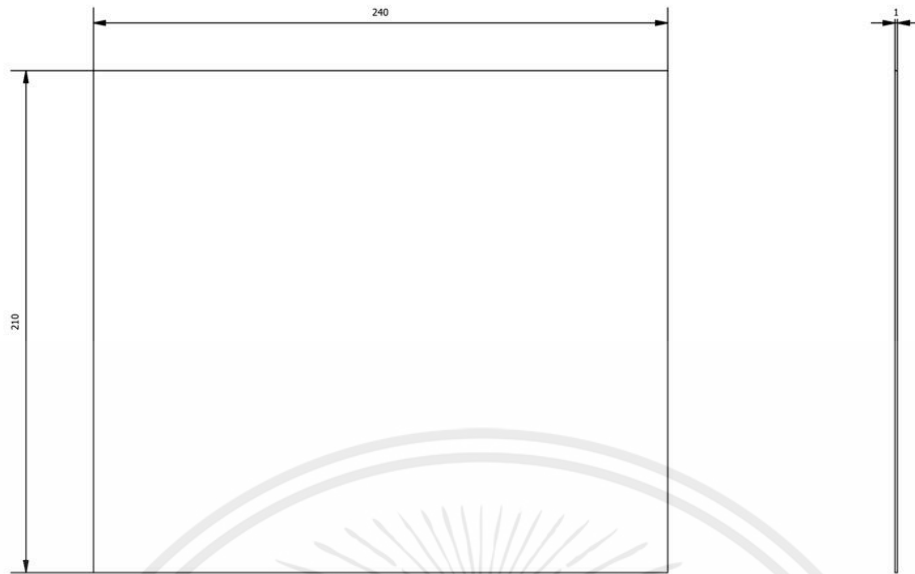


รูปที่ 3.35 ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมขั้วดิสชาร์จกับขั้วดิสชาร์จ



รูปที่ 3.36 ขั้วดิสชาร์จที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 แผ่นตตะกอนของเครื่องกรองอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32 ซึ่งเป็นบอร์ดที่รองรับการเชื่อมต่อทั้ง Wi-Fi และ Bluetooth ในตัวเดียวกัน มีขาใช้งาน 38 ขา รองรับการเขียนโปรแกรมโดยใช้ Arduino IDE และรองรับไลบรารีส่วนใหญ่ของ Arduino อีกทั้งยังใช้ ESP32-WROOM-32 ในการทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ

3.2.2 เซนเซอร์วัดฝุ่น PM3003

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์วัดฝุ่น PM3003 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์ สามารถวัดฝุ่นอนุภาคต่าง ๆ อย่าง PM1, PM2.5 และ PM10 สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับ ESP32 ได้

3.2.3 สร้างสัญญาณ PWM

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32 ซึ่งเป็นบอร์ดที่สามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ อีกทั้งสามารถปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) และปรับความถี่ โดยการเขียนโปรแกรม Arduino IDE

3.2.4 Operational Amplifier (Op Amp)

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้อุปกรณ์ LF351 ซึ่งคืออุปกรณ์ Op-Amp ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเหมาะแก่การใช้งานในวงจรที่มีความถี่สูง โดยโครงงานในปฏิญานิพนธ์นี้ใช้ความถี่ที่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ทำให้เลือกใช้อุปกรณ์ LF351

3.2.5 Optocoupler H11L1

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้อุปกรณ์ OPTO H11L1 ซึ่งการทำงานคือทางด้านหนึ่งจะปล่อยแสงอินฟราเรดจากหลอด LED ภายในตัวอุปกรณ์ออกมาและอีกด้านหนึ่งจะมีตัวรับแสงอินฟราเรดกลับเข้าไปโดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเลือกเพื่อแยกวงจรทั้งสองออกจากกัน ข้อดีของมันคือหากวงจรใดทำงานผิดปกติ ชัดข้อง หรือลัดวงจรจะไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรอื่นได้

3.2.6 CMOS 4049

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้อุปกรณ์ CMOS 4049 ซึ่งการทำงานเป็นบัฟเฟอร์ หมายถึงมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นที่สามารถใช้ในการขับตัวต้านทานแบบสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และบัฟเฟอร์ยังมีความสามารถในการแยกการทำงานของวงจรหนึ่งกับอีกวงจรหนึ่งได้ เพื่อป้องกันความเสียหายในกรณีเกิดการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 Power MOSFET

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้อุปกรณ์ IRFP460 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมการทำงานหรืออุปกรณ์ IRFP460 คือ Power MOSFET ประกอบไปด้วยสามส่วนคือ G (Gate) เป็นส่วนที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าและออก เป็นการออกไซด์ของโลหะสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า D (Drain) เป็นส่วนของสัญญาณขาออก และ S (Source) เป็นส่วนของสัญญาณขาเข้า

3.2.8 Flyback Transformer

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้อุปกรณ์ IRFP460 ซึ่งมีศักยภาพในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงฟลายแบค สามารถทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำเช่น 12 โวลต์ หรือ 5 โวลต์ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากหม้อแปลงทั่วไป การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคในยุคแรกเริ่มต้นด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวอนของลำอิเล็กตรอนในหลอดรังสีแคโทด

3.2.9 IC Voltage Regulator

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้ใช้อุปกรณ์ IC Voltage Regulator L7815 คือแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไอซีที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยข้อดีของแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นนั้นคือ มีความทนทานต่อกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูง

3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.3.1 การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหนด ทำการวัดปริมาณค่าฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้และนำไปเปรียบเทียบเพื่อลดความคลาดเคลื่อน

3.3.2 การทดสอบการทำงานของ การส่งข้อมูลระหว่าง ESP32

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (sender) จากนั้นทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหนด ทำการวัดปริมาณค่าฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 พร้อมทั้งส่งค่าฝุ่นที่วัดได้ให้กับ ESP32 (receiver) จากนั้น ESP32 (receiver) ทำการเก็บค่าจากหน้าเว็บแอปพลิเคชันที่ควบคุมการเปิด-ปิดวงจรส่งค่าไปยัง ESP32 (sender) บันทึกค่าได้และนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลระหว่างฝั่งส่งและฝั่งรับ

3.3.3 การทดสอบการทำงานการส่งค่าแสดงบนเว็บแอปพลิเคชัน

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เชื่อมต่อกับ Wi-Fi โดยเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม Arduino IDE ส่งการผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการวัดค่าฝุ่น จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแสดงบนหน้าเว็บแอปพลิเคชัน โดยเว็บแอปพลิเคชันจะเรียกใช้ฟังก์ชันการทำงานที่เขียนโดยภาษา JavaScript ที่เป็นตัวกลางระหว่างภาษา HTML บนเว็บแอปพลิเคชันกับภาษา C บน Arduino

3.3.4 การทดสอบการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM)

ทำการทดสอบโดยการใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32 ในการสร้างสัญญาณพัลส์โดยหน้าที่หลักของวงจร Pulse Width Modulation (PWM) จะทำการควบคุมการทำงานของกำลังมอเตอร์ อีกทั้งสามารถปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) และปรับความถี่ โดยการเขียนโปรแกรม Arduino IDE จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้

3.3.5 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Operational Amplifier (Op Amp)

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ LF351 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการขยายสัญญาณพัลส์ จากเดิมที่ได้สัญญาณพัลส์ขนาด 3.3 โวลต์เป็นสัญญาณพัลส์ขนาด 15 โวลต์ด้วยการใช้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier) จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้

3.3.6 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Optocoupler H11L1

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ H11L1 เข้ากับไอซี LF351 เพื่อเป็นการแยกวจรของทั้งสองส่วนออกจากกัน ได้แก่วจรส่วนสร้างสัญญาณพัลส์และวงจรถูกกำลังมอเตอร์ เนื่องจากเมื่อมีวงจรถูกกำลังมอเตอร์ส่วนหนึ่งเกิดความเสียหาย จะไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรถูกกำลังมอเตอร์อีกส่วน อีกทั้งอุปกรณ์ H11L1 เป็นตัวช่วยแยกระแสไฟฟ้าสูงออกจากวงจรถูกกำลังมอเตอร์และให้กระแสไฟฟ้าต่ำไหลผ่าน จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้

3.3.7 การทดสอบการทำงานของวงจรถูกกำลังมอเตอร์ (Power MOSFET)

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IRFP460 เข้ากับไอซี CMOS4049 ที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับวงจรถูกกำลังมอเตอร์ และทำการเชื่อมต่อสัญญาณพัลส์เข้าวงจรถูกกำลังมอเตอร์ ซึ่งตัว Power MOSFET ประกอบไปด้วยสามส่วนคือ G (Gate) เป็นส่วนที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าและออก เป็นการออกไซด์ของโลหะสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า D (Drain) เป็นส่วนของสัญญาณขาออก และ S (Source) เป็นส่วนของสัญญาณขาเข้า จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้

3.3.8 การทดสอบการทำงานของวงจรถูกแรงดันสูง (DC High Voltage)

ทำการทดสอบโดยการเชื่อมต่อวงจรสร้างสัญญาณพัลส์เข้ากับวงจรถูกกำลังมอเตอร์แล้วนำไปเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าแรงดันสูง จึงต้องมีการใช้วงจรโวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อเทียบอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าให้สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูง จากนั้นบันทึกค่าที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมคำนวณจำนวนชั้นกรองอากาศและระยะห่าง

ทำการทดสอบโดยการสร้างโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น จากนั้นทำการออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ความต้องการทราบถึงความสมรรถนะในการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ การทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นโดยการกำหนดเงื่อนไข โดยป้อนค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ โปรแกรมจะคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน (η) โดยกำหนดให้มีการทำงานวนซ้ำคำนวณใหม่โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร ทำจนขนาดอนุภาคของฝุ่นมีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเมตร และแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพการตกตะกอน และหาจำนวนประจุบนอนุภาค (np) จากนั้นบันทึกค่าที่ได้

3.3.10 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศ

ทำการทดสอบโดยการนำวงจรกระแสตรงแรงดันสูงมาเชื่อมต่อกับแผ่นชั้นกรองอากาศที่ได้ออกแบบ โดยทดสอบในห้องจำลองขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งในห้องจำลองจะมีเครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐานกับเครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เช่นเซอร์วิด บันทึกค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศ โดยค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกอากาศไดสัน ดีพีศูนย์สี่ (Dyson DP04 Air Purifier) จากนั้นนำปริมาณค่าฝุ่นก่อนกรองอากาศและหลังกรองอากาศไปหาประสิทธิภาพการกรองอากาศ และบันทึกผลที่ได้

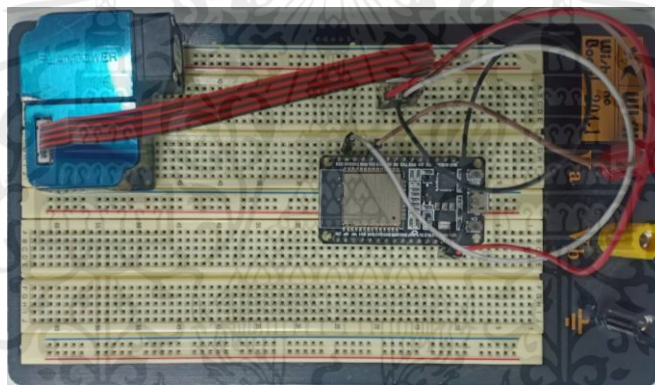
บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับการทำงานของเครื่องฟอกอากาศและการวัดค่าฝุ่นโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิตผู้จัดทำได้ทำการเก็บผลการทำงานของระบบ โดยแบ่งการทดสอบและจัดเก็บผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดค่าฝุ่นด้วยเลเซอร์

จากการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ด ESP32 แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยทำการวัดปริมาณค่าฝุ่น PM1, PM2.5 และ PM10 ซึ่งเซนเซอร์จะใช้พัดลมดูดอากาศเข้าไปในตัวเซนเซอร์ จากนั้นจะทำการตรวจจับฝุ่นด้วยแสงเลเซอร์ และค่าฝุ่นที่วัดได้จะแสดงบนจอ Serial Monitor แสดงดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำค่าฝุ่นที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละอองในอากาศ PM2.5 (SNDWAY รุ่น SW-825) แสดงดังรูปที่ 4.3

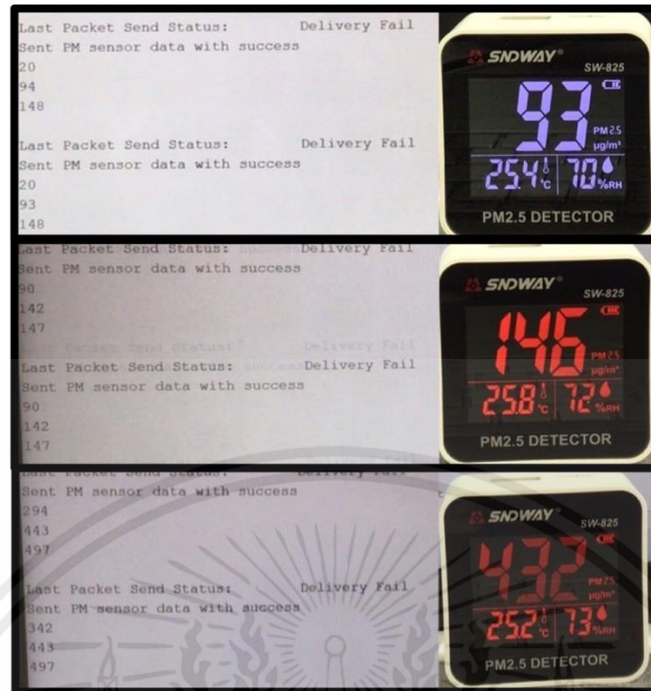


รูปที่ 4.1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ด ESP32

```
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 38 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 35 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 35 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
{ "pm1": 23 ug/m3, "pm2_5": 36 ug/m3, "pm10": 37 ug/m3 }
```

รูปที่ 4.2 ค่าการวัดฝุ่นที่แสดงบนจอ Serial Monitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

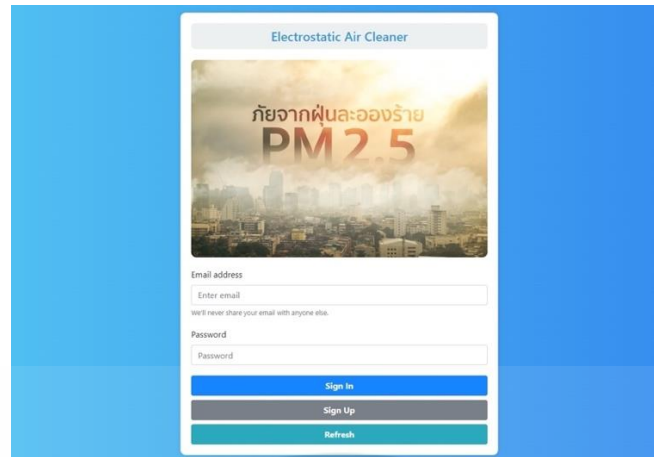


รูปที่ 4.3 ค่าฝุ่นที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละอองในอากาศ PM2.5 (SNDWAY รุ่น SW-825)

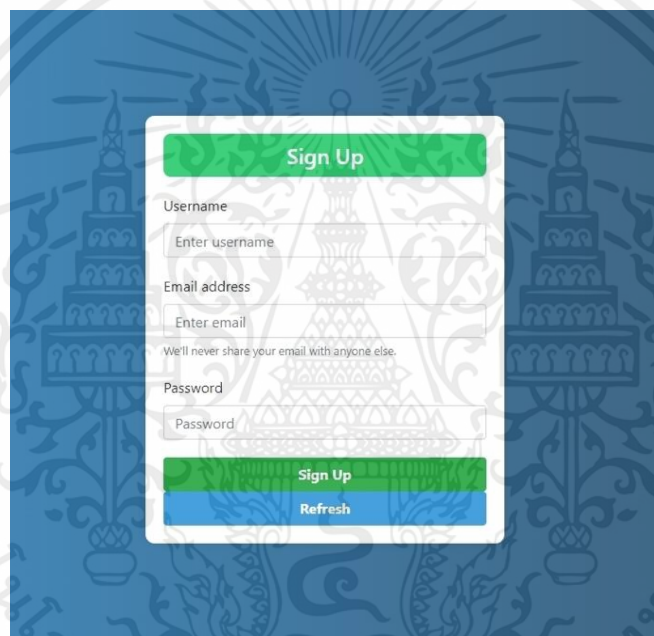
จากผลการทดสอบพบว่า ค่าฝุ่นที่วัดได้จากเซนเซอร์ค่าฝุ่นมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องวัดฝุ่นละอองในอากาศ PM2.5 (SNDWAY รุ่น SW-825) และมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากเซนเซอร์ที่มีความล่าช้าในการวัดค่าฝุ่น หรือเซนเซอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตรวจจับค่าฝุ่นที่ไม่สะดวกต่อการวัด

4.2 ผลการทดสอบการทำงานของการทำงานของการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32

จากการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดฝุ่นด้วยคลื่นเลเซอร์ PM3003 เข้ากับบอร์ด ESP32 ทำการวัดปริมาณค่าฝุ่น PM1 PM2.5 และ PM10 พร้อมทั้งส่งค่าฝุ่นที่วัดได้ให้กับ ESP32 (receiver) และฝั่ง ESP32 (receiver) จะเก็บค่าการเปิด-ปิดของวงจรส่งค่าให้ ESP32 (sender) เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของวงจร โดยการสื่อสารระหว่าง ESP32 ฝั่งส่งและฝั่งรับโดยใช้ ESP-NOW (ESP32 Now) เป็นการส่งข้อมูลในระยะใกล้ ๆ ระหว่างอุปกรณ์ ESP32 สองตัว โดยไม่ต้องเชื่อมต่อ Wi-Fi หรืออินเทอร์เน็ตโดยตรง นี่คือหลักการทำงานของ ESP-NOW การเตรียม ESP32 สำหรับการสื่อสารจะต้องเขียนโค้ดบนทั้ง ESP32 ฝั่งส่งและฝั่งรับ เพื่อเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการสื่อสารผ่าน ESP-NOW โดยใช้ฟังก์ชัน `esp_now_init()` เพื่อเริ่มต้นการใช้งาน ESP-NOW บนทั้งสองอุปกรณ์ ส่วนการกำหนดบทบาทของฝั่งส่งและฝั่งรับจะต้องกำหนดบทบาทของแต่ละอุปกรณ์ว่าจะทำหน้าที่เป็นตัวส่ง (sender) หรือตัวรับ (receiver) การเพิ่มอุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อในฝั่งส่งจะต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่ต้องการส่งข้อมูลไปยังด้วยฟังก์ชัน `esp_now_add_peer()` แต่ละอุปกรณ์จะมี MAC address ที่สองอุปกรณ์สามารถใช้ในการระบุตัวเอง การส่งข้อมูลในฝั่งส่งสามารถใช้ `esp_now_send()` เพื่อส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่กำหนดเป็นผู้รับ โดยการส่งข้อมูลระหว่าง ESP32 ทั้ง 2 ตัวระหว่างฝั่งส่งกับฝั่งรับแสดงดังรูปที่ 4.4 และผลลัพธ์การส่งค่าระหว่าง ESP32 ทั้ง 2 ตัวระหว่างฝั่งส่งกับฝั่งรับแสดงดังรูปที่ 4.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เว็บแอปพลิเคชันแสดงหน้าล็อกอิน



รูปที่ 4.7 หน้าเว็บแอปพลิเคชันลงทะเบียนสมัครสมาชิก



รูปที่ 4.8 หน้าเว็บแอปพลิเคชันแสดงผลค่าฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากการทดสอบพบว่า สามารถนำค่าฝุ่นที่วัดได้ไปแสดงบนหน้าเว็บแอปพลิเคชัน โดยเว็บแอปพลิเคชันจะเรียกใช้ฟังก์ชันการทำงานที่เขียนด้วยภาษา JavaScript ที่เป็นตัวกลางระหว่างภาษา HTML บนเว็บแอปพลิเคชันกับภาษา C บน Arduino ได้สำเร็จ

4.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (PWM)

จากการทดสอบการใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32 ในการสร้างสัญญาณพัลส์โดยหน้าที่หลักของวงจร Pulse Width Modulation (PWM) เป็นสัญญาณที่จะทำการควบคุมการทำงานของกำลังมอเตอร์ อีกทั้งสามารถปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) และปรับความถี่ โดยการเขียนโปรแกรม Arduino IDE โดยการคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอด (V_{pp}) และความถี่ที่ใช้ในการทำงานสามารถดูผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอดและความถี่ที่ใช้ในการทำงาน

จากการทดสอบพบว่า สามารถสร้างสัญญาณพัลส์ที่สามารถปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) และความถี่ได้ โดยเมื่อสังเกตผลลัพธ์จากรูปที่ 4.8 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} เท่ากับ 3.3 โวลต์และได้ความถี่เท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

4.5 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Operational Amplifier (Op Amp)

จากการทดสอบโดยการเชื่อมต่อวงจรสร้างสัญญาณพัลส์เข้ากับอุปกรณ์ LF351 ซึ่งคืออุปกรณ์ Op-Amp ชนิดวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier) ที่มีหน้าที่การขยายสัญญาณขาเข้า ส่งผลให้เมื่อได้รับสัญญาณขาออกให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและไม่กลับเฟสเป็นเฟสเดียวกันกับสัญญาณขาเข้า โดยจะทำการป้อนสัญญาณขาเข้าที่ขั้วบวก ซึ่งเหมาะแก่การใช้งานในวงจรที่ต้องการความถี่สูง โดยสามารถดูสัญญาณขาออกในรูปด้านล่างที่ได้ผ่านการขยายสัญญาณแล้ว อีกทั้งได้ทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอด (V_{pp}) และความถี่ที่ใช้ในการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ LF351

สังเกตผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 4.10 สามารถขยายสัญญาณพัลส์จากขนาด 3.3 โวลต์ ให้เป็นสัญญาณพัลส์ขนาด 12 โวลต์ โดยการคำนวณพบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} มีค่าเท่ากับ 12 โวลต์ และได้ความถี่มีค่าเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์

4.6 ผลการทำงานของอุปกรณ์ Optocoupler H11L1

จากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ Optocoupler H11L1 ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่าสามารถแยกการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนได้ตามความต้องการ โดยสามารถดูสัญญาณขาเข้าในรูปด้านบน และผลลัพธ์สัญญาณขาออกในรูปด้านล่างที่ได้ผ่านการขยายสัญญาณแล้ว อีกทั้งได้ทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอด (V_{pp}) และความถี่ที่ใช้ในการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.11

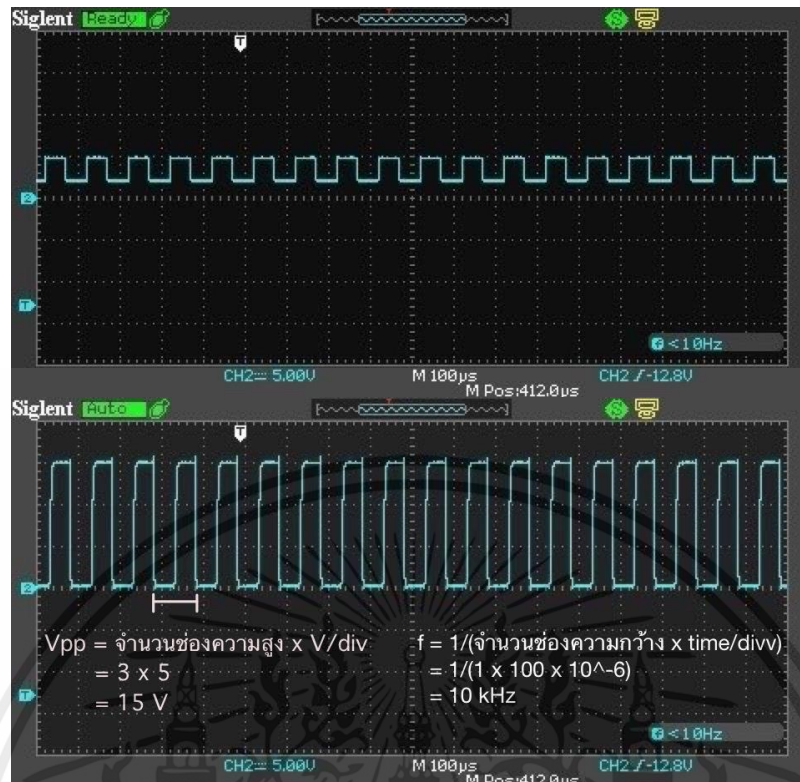


รูปที่ 4.11 สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ H11L1

สังเกตผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 4.11 สามารถแยกการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนได้ และสามารถแยกกระแสไฟฟ้าสูงออกสัญญาณพัลส์ซึ่งจะให้กระแสไฟฟ้าต่ำไหลผ่าน โดยจากคำนวณพบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ และได้ความถี่มีค่าเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

4.7 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกำลังมอสเฟต (Power MOSFET)

จากการทดสอบโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IRFP460 เข้ากับไอซี CMOS4049 ที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับวงจร โดยจะเชื่อมต่อในลักษณะ IRFP460 ขา D (Dain) เป็นส่วนของสัญญาณขาออก และขา S (Source) เป็นส่วนของสัญญาณขาเข้า เมื่อทำการเชื่อมต่อสัญญาณพัลส์เข้าวงจรสามารถดูสัญญาณขาเข้าในรูปด้านบนและผลลัพธ์สัญญาณขาออกในรูปด้านล่างที่ได้ผ่านการขยายสัญญาณแล้ว อีกทั้งได้ทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากยอดถึงยอด (V_{pp}) และความถี่ที่ใช้ในการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.12

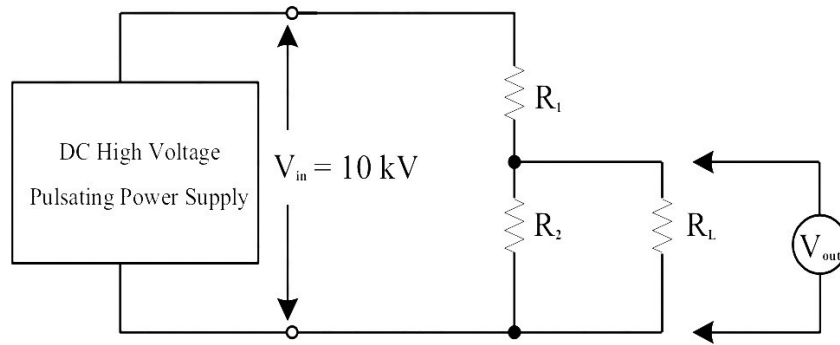


รูปที่ 4.12 สัญญาณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ IRFP460

สังเกตผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 4.12 สัญญาณขาเข้า (Source) มีค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} 5 โวลต์ ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์จากนั้นคำนวณสัญญาณขาออก (Dain) พบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} มีค่าเท่ากับ 15 โวลต์ และได้ความถี่มีค่าเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะนำสัญญาณขาออกไปควบคุมการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

4.8 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกระแสตรงแรงดันสูง (DC High Voltage)

จากการทดสอบโดยการเชื่อมต่อวงจรสร้างสัญญาณพัลส์เข้ากับวงจรกำลังมอสเฟตแล้วนำไปเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าแรงดันสูงจึงต้องมีการใช้วงจรโวลต์เดจิติไวเดอร์เพื่อเทียบอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าให้สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงได้ ซึ่งกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอินพุต V_{in} เท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ความต้านทาน R_1 เท่ากับ 1 เมกกะโอห์ม R_2 เท่ากับ 100 กิโลโอห์ม โดยรายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรโวลต์เตจติไวเดอร์

คำนวณอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าจากสมการดังนี้

จากสมการ
$$V_{out} = \frac{V_{in} (R_2 // R_L)}{(R_1 + R_2 // R_L)} \quad (24)$$

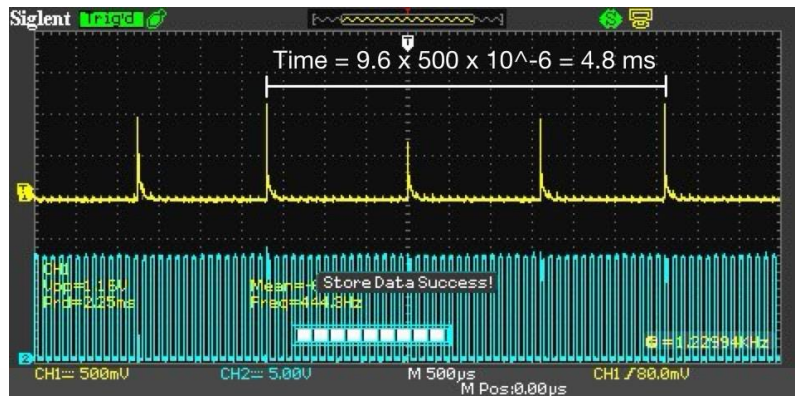
$$V_{out} = \frac{10kV (100k\Omega // 100\Omega)}{(1M\Omega + 100k\Omega // 100\Omega)} \quad (25)$$

ดังนั้น

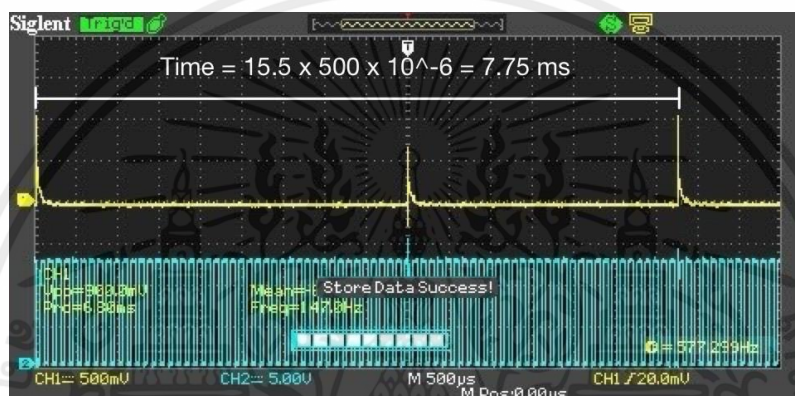
$$V_{out} = 1V$$

อัตราส่วนของแรงดันของ $V_{in} = V_{out}$ มีค่าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ = 1 โวลต์

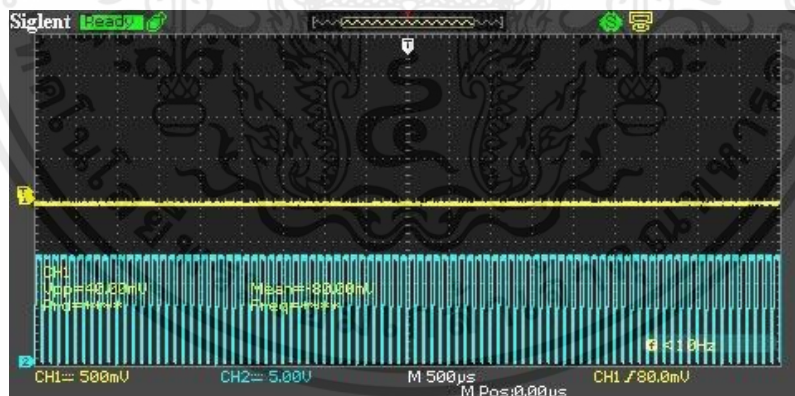
เมื่อได้อัตราส่วนของแรงดัน จึงนำวงจรโวลต์เตจติไวเดอร์ มาใช้ทำการวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้ออกมาจากหม้อแปลง จากนั้นได้ทำการเปลี่ยนรอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 25% 50% และ 75% เพื่อสังเกตความถี่ที่เกิดแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ โดยคำนวณเวลาที่เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ 25% จะพบแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ในทุก ๆ 4.8 มิลลิวินาที ในกรณี 50% จะพบแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ในทุก ๆ 7.75 มิลลิวินาที และเมื่อใช้รอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 75% หม้อแปลงไม่ทำงาน โดยในทุกการเปลี่ยนรอบการทำงานจะพิจารณาที่ time/div มีค่าเท่ากับ 500 ไมโครวินาที วิธีการคำนวณเวลาที่เกิดแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ วงจรโวลต์เตจติไวเดอร์ที่ได้ทำการสร้างแสดงดังรูปที่ 4.17 และวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.14 รอบการทำงานที่ 25%



รูปที่ 4.15 รอบการทำงานที่ 50%



รูปที่ 4.16 รอบการทำงานที่ 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 วงจรโวลต์เตจตีไวเดอร์ที่สร้าง



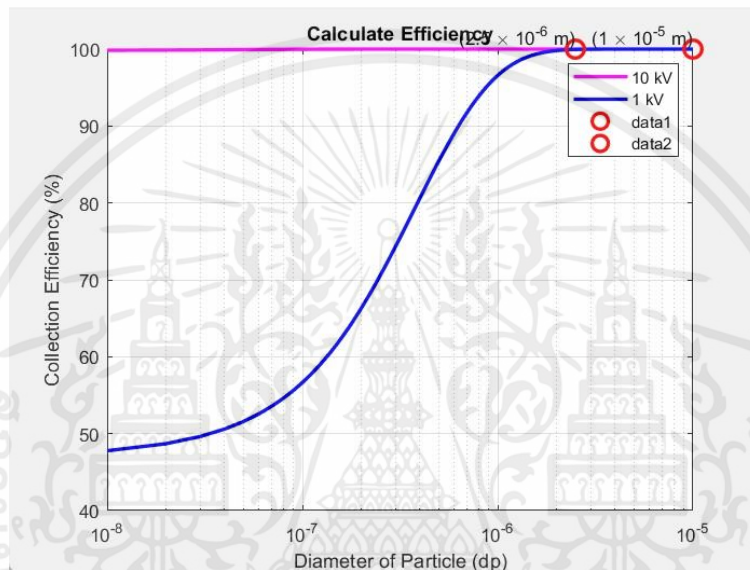
รูปที่ 4.18 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จากการทดสอบพบว่า สามารถสร้างวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงได้ และได้เลือกใช้รอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 25% โดยผลลัพธ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.14 อ่านค่ารอบการทำงานจะพบแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ในทุก ๆ 4.8 มิลลิวินาที และเมื่อเทียบอัตราส่วนจะทราบค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้เท่ากับ 10 กิโลโวลต์

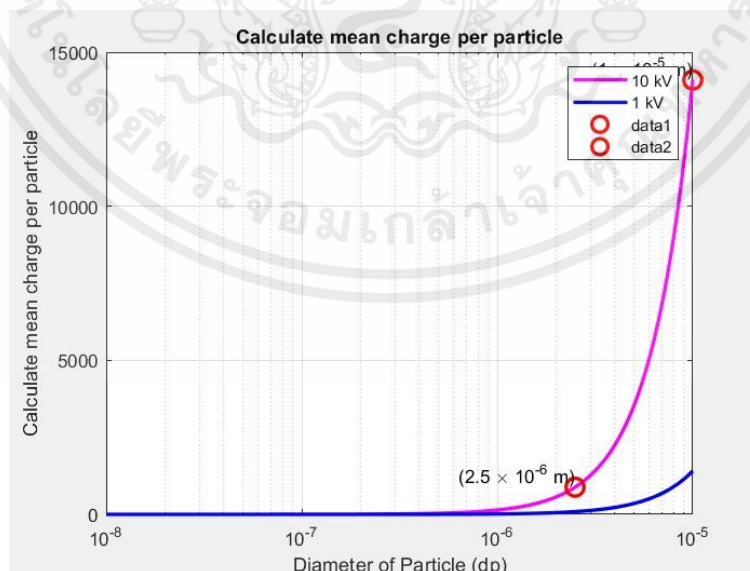
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณชั้นกรองอากาศและระยะห่าง

จากการทดสอบการทำงานของโปรแกรมผลลัพธ์ที่ได้จากออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ความต้องการที่สำคัญคือการทราบถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องกรองอากาศ ในกระบวนการนี้ จึงได้ทำการสร้างโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น แสดงดังรูปที่ 4.19 การวิเคราะห์จำนวนประจุที่อนุภาคฝุ่นจะได้รับ แสดงดังรูปที่ 4.20 คุณสมบัติของเครื่องกรองอากาศที่ได้จากหลักการไฟฟ้าสถิต แสดงดังรูปที่ 4.21 และชิ้นงานจริงได้จัดทำขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์จำนวนประจุที่อนุภาคฝุ่นจะได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*****
Calculate Collection Efficiency ESP
*****

Show Constant Value
- Wire Radius (r1) = 4.000e-03 m
- ESP RADIUS (r2) = 6.366e-03 m
- ESP Pipe Length (L) = 2.000e-01 m
- Temperature exhaust gas (T) = 318.000 K
- Temperature referable (Tr) = 293.000 K
- working Pressure (P) = 1.014e+00 kPa
- Pressure referable (Pr) = 1.000e+00 kPa
- Charge per electron (e) = 1.610e-19 C
- Mobility of ions (Zi) = 0.000141 m^2V.s
- Breakdown field (Es) = 3745653.157835 V/m
- Constant Value (A) = 3.010e-02 m^1/2

Show Calculation Value
- Air density (d) = 9.338e-01 V/m
- Corona onset field (E0) = 5.220e+06 V/m
- Corona (Vo) = 9.704e+03 V
*****

```

รูปที่ 4.21 คุณสมบัติของเครื่องกรองอากาศที่ได้จากหลักการไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 4.22 ชิ้นงานจริงที่ได้จัดทำขึ้น

จากการคำนวณโดยโปรแกรมจะพบว่า ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะสามารถตกตะกอนได้ดีกับอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งที่ค่าขนาดอนุภาคฝุ่น PM2.5 จากรูปที่ 4.19 สามารถตกตะกอนได้ 99.99% ส่วนจำนวนประจุที่อนุภาคฝุ่นจะได้รับยิ่งอนุภาคใหญ่ก็จะได้รับค่าประจุมากขึ้นจากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 บ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน อีกทั้งแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นของเครื่องฟอกอากาศ

จากการทดสอบโดยการนำวงจรกระแสตรงแรงดันสูงมาเชื่อมต่อกับแผ่นชั้นกรองอากาศที่ได้ ออกแบบ โดยทดสอบในห้องจำลองขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร แสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งในห้องจำลองจะมีเครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐานกับเครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์แบบเลเซอร์ แสดงดังรูปที่ 4.24 บันทึกค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศ โดยค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกอากาศ ไดสัน ดีพีศูนย์สี่ (Dyson DP04 Air Purifier) ซึ่งค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลัง การกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต แสดงดังตารางที่ 4.1 4.2 4.3 ค่าเฉลี่ยของการกรอง อากาศของทั้ง 3 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.4 กราฟค่าเฉลี่ยของการกรองอากาศของฝุ่น PM2.5 แสดงดัง รูปที่ 4.25 ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศ ไดสัน ดีพีศูนย์สี่ แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.23 ห้องจำลองขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.24 ห้องจำลองจะมีเครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐานกับเครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 1

เวลาที่ใช้ (นาทีก)	เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน (ไมครอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด (ไมครอน)
0	500	500
5	500	500
10	325	317
15	209	222
20	110	118
25	65	70
30	44	41
35	37	31
40	23	25
45	14	16
50	4	5
55	0	0
60	0	0
65	0	0
70	0	0
75	0	0
80	0	0
85	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 2

เวลาที่ใช้ (นาทีก)	เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน (ไมครอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด (ไมครอน)
0	500	500
5	500	500
10	323	320
15	206	213
20	105	110
25	61	68
30	40	42
35	35	33
40	21	23
45	12	15
50	3	4
55	0	0
60	0	0
65	0	0
70	0	0
75	0	0
80	0	0
85	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต ครั้งที่ 3

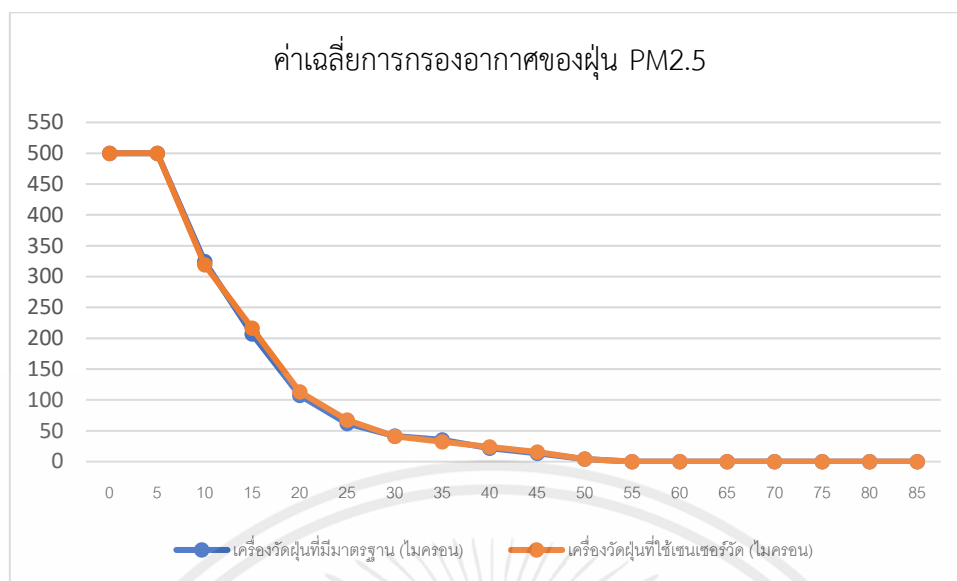
เวลาที่ใช้ (นาท)	เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน (ไมครอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด (ไมครอน)
0	500	500
5	500	500
10	326	320
15	207	215
20	108	112
25	60	64
30	41	40
35	34	33
40	22	24
45	14	16
50	5	4
55	0	0
60	0	0
65	0	0
70	0	0
75	0	0
80	0	0
85	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต

เวลาที่ใช้ (นาทีก)	เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน (ไมครอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด (ไมครอน)
0	500.00	500.00
5	500.00	500.00
10	324.67	319.00
15	207.33	216.67
20	107.67	113.33
25	62.00	67.33
30	41.67	41.00
35	35.33	32.33
40	22.00	24.00
45	13.33	15.67
50	4.00	4.33
55	0.00	0.00
60	0.00	0.00
65	0.00	0.00
70	0.00	0.00
75	0.00	0.00
80	0.00	0.00
85	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟค่าเฉลี่ยของการกรองอากาศของฝุ่น PM2.5

ตารางที่ 4.5 ค่าฝุ่นและเวลาที่เกิดการตกตะกอนของฝุ่นทั้งก่อนและหลังการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศ ไตสัน ดีพีศูนย์สี่

เวลาที่ใช้(นาที)	เครื่องวัดฝุ่นของเครื่องกรองอากาศทั่วไป (ไม่มีคาร์บอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน (ไม่มีคาร์บอน)	เครื่องวัดฝุ่นที่ใช้เซนเซอร์วัด (ไม่มีคาร์บอน)
0	999	500	2789
1	710	500	1578
2	374	453	753
3	140	144	261
4	44	51	77
5	22	21	25
6	12	11	13
7	7	6	8
8	4	3	5
9	2	1	3
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า โทร. 02-010-1000 หรือ 02-010-1001

จากการทดสอบพบว่า การทำงานของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตใช้เวลาในการตกตะกอน 30 นาที จึงจะสามารถทำให้ค่าฝุ่น PM2.5 ต่ำกว่า 50 ไมครอนได้ (พิจารณาค่าฝุ่นที่เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน) จากตารางที่ 4.4 เมื่อนำค่าไปหาประสิทธิภาพการตกตะกอนจากสมการที่ 19 ได้ค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน 0.9999 หรือเท่ากับ 99.99% ที่เวลา 55 นาที ส่วนการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ ไดสัน ดีพี ศูนย์สี่ (Dyson DP04 Air Purifier) ใช้เวลาในการตกตะกอน 5 นาที จึงจะสามารถทำให้ค่าฝุ่น PM2.5 ต่ำกว่า 50 ไมครอนได้ (พิจารณาค่าฝุ่นที่เครื่องวัดฝุ่นที่มีมาตรฐาน) เมื่อนำค่าไปหาประสิทธิภาพการตกตะกอนจากสมการที่ 19 ได้ค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน 0.9999 หรือเท่ากับ 99.99% ที่เวลา 10 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปฏิญานินพจน์นี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างเครื่องฟอกอากาศที่สามารถกรองอากาศให้บริสุทธิ์และช่วยลดขยะจากเครื่องกรองอากาศแบบแผ่นกรองอากาศเนื่องจากเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตไม่ต้องการเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศเพียงแต่ทำความสะอาดก็สามารถใช้กรองอากาศได้อย่างยาวนาน จึงได้ทำการศึกษาและจัดทำเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต โดยระบบเครื่องฟอกอากาศและวัดค่าฝุ่นโดยใช้เซนเซอร์วัดฝุ่นแบบเลเซอร์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการวัดค่าฝุ่นจากนั้นนำค่าฝุ่นไปแสดงบนเว็บแอปพลิเคชันพร้อมทั้งเก็บค่าบนเว็บแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดระบบ และส่วนของการกรองอากาศที่ใช้วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยอาศัยหลักการไฟฟ้าสถิตมาช่วยในการออกแบบการกรองฝุ่นในอากาศ

ผู้จัดทำได้ออกแบบและจัดทำเครื่องฟอกอากาศและวัดค่าฝุ่น โดยจะทดสอบการวัดค่าฝุ่นให้มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องวัดฝุ่นละอองในอากาศ PM2.5 (SNDWAY รุ่น SW-825) จากนั้นก็ส่งค่าฝุ่นไปแสดงบนเว็บแอปพลิเคชันพร้อมทั้งเก็บค่าบนเว็บแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดระบบ ส่วนการกรองฝุ่นในอากาศนั้นผู้จัดทำได้ทำการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อไปใช้กับวงจรกำลังมอสเฟตแล้วนำสัญญาณขาเดรนจากวงจรกำลังมอสเฟตไปใช้ควบคุมการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบฟลายแบคแล้วทำการวัดค่าเอาต์พุตที่ได้แต่ด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีค่าแรงดันสูงจึงต้องใช้วงจรโวลต์เตจดีไวเดอร์มาช่วยวัดค่า หลังจากนั้นนำวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาเชื่อมต่อกับชั้นกรองอากาศที่ออกแบบโดยหลักการไฟฟ้าสถิต

หลังจากนั้น ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองฝุ่นในอากาศของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต โดยบันทึกค่าฝุ่น ทุก ๆ 5 นาที จนค่าฝุ่น PM2.5 มีค่าต่ำกว่า 50 ไมครอน ซึ่งถือว่าเป็นค่าฝุ่นในอากาศที่ปกติ โดยเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 30 นาที นำค่าฝุ่นก่อนและหลังการกรองไปหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจากสมการที่ 19 ในเวลา 55 นาที ได้ค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศ 0.9999 หรือเท่ากับ 99.99% เมื่อเทียบกับเครื่องฟอกอากาศ ไดสัน ดีพีศูนย์สี่ (Dyson DP04 Air Purifier) ที่ใช้เวลาเพียง 5 นาที ในการทำให้ค่าฝุ่น PM2.5 มีค่าต่ำกว่า 50 ไมครอน และเมื่อหาประสิทธิภาพตกตะกอนในเวลา 10 นาที ได้ค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศ 0.9999 หรือเท่ากับ 99.99%

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการกรองฝุ่นในอากาศเพื่อทำให้อากาศบริสุทธิ์ พบว่าเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตสามารถกรองอากาศได้และสามารถวัดค่าฝุ่นแล้วนำค่าไปแสดงบนเว็บแอปพลิเคชันได้ แต่ปัญหาที่พบเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอากาศคือการกรองอากาศใช้เวลานานในการทำให้ฝุ่นตกตะกอน สาเหตุมาจากการใช้พัดลมดูดอากาศที่เล็กเกินไป ทำให้ดึงอากาศมากรองได้ช้า อีกทั้งวัสดุที่ใช้จัดทำชั้นกรองอากาศมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้น้อย ทำให้ใช้เวลานานในการทำให้ฝุ่นตกตะกอน และสามารถแก้ไขด้วยการเปลี่ยนพัดลมและวัสดุอุปกรณ์จัดทำชั้นกรองอากาศ

เนื่องจากเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตผู้จัดทำได้มีการสร้างวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเมื่อทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับโพลด วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเริ่มทำงาน และสนามไฟฟ้าเริ่มมีความเข้มข้นมาก จะส่งผลกระทบต่อ ESP32 ในการส่งค่าฝุ่นไปแสดงบนแอปพลิเคชัน ทำให้เว็บแอปพลิเคชันไม่สามารถแสดงค่าฝุ่นได้จนกว่าจะปิดการทำงานของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สามารถแก้ไขได้โดยการนำ ESP32 ไปใส่กล่องโลหะเพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้า และจากการทดสอบการทำงานของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานได้ระยะเวลาหนึ่ง หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำการตัดการทำงานเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่หม้อแปลงไฟฟ้ามีการตัดการทำงานแบบลัดวงจรทำให้วงจรทั้งหมดหยุดทำงานไป และสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าประเภทอื่น

บรรณานุกรม

- [1] Suwit Kiravittayal “การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<https://suwitkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/servomotor.html>
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [2] โมดูลมอร์ “PWM และการใช้งานบน Arduino, ESP32 และ ESP8266 ต่างกันอย่างไร” [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก :
<https://www.modulemore.com/article/21/pwm>
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [3] Chiang Mai University “ออปแอมป์และโฟโตไดโอด” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
https://archive.lib.cmu.ac.th/ful/T/2533/tchem0633tt_ch2.pdf
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [4] รศ. ดร. มนตรี ศิริปรัชญานันท์ “ออปแอมป์ และลิเนียร์ ไอซี” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<https://images-se-ed.com/ws/Storage/PDF/978616/082/9786160823536PDF.pdf>
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [5] navapadol “วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า และการประมวลผลสัญญาณทางไฟฟ้า” [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก :
<https://navapadol.files.wordpress.com/2016/01/chapter-03-01.pdf>
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [6] Blogger. “Node-RED คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://pantamitsombaddee.blogspot.com/p/node-red-node-red-apis-application.html>.
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [7] Unipi Technology. “Node-RED” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.unipi.technology/products/node-red-66>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [8] Withoutcoffee Icantbedev. “Ngrok คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://devhub.in.th/blog/ngrok-test-local-website>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [9] Curity.io. “Ngrok” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://curity.io/resources/learn/mobile-setup-ngrok/>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 24 ต.ค. 2566)
- [10] ai-corporation.net “Arduino IDE คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.ai-corporation.net/2021/11/18/what-is-arduino-ide/>
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 27 ต.ค. 2566)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Mindphp “Matlab (แมตแล็บ) ภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูง คืออะไร” [ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก:
[chromeextension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://staff.cs.psu.ac.th/sathit/
DigitalImage/BasicMatlab.pdf](chromeextension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/http://staff.cs.psu.ac.th/sathit/DigitalImage/BasicMatlab.pdf) (วันที่สืบค้นข้อมูล: 27 ต.ค. 2566)
- [12] MATLAB - KDMC “MATLAB - KDMC” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://kdmc.kmitl.ac.th/services/matlab/>(วันที่สืบค้นข้อมูล: 27 ต.ค. 2566)
- [13] appmaster “MongoDB คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://appmaster.io/th/blog/mongodb-khuee-aair> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [14] Amazon Web Services “JavaScript คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://aws.amazon.com/th/what-is/javascript/> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [15] Mindphp “JavaScript คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://www.mindphp.com/A3.html> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [16] MarcusCodes “แนะนำภาษา c++” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://marcuscode.com/lang/cpp/introduction> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [17] Mindphp “HTML คืออะไร[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://www.mindphp.com/คู่มือ/73คืออะไร/2026-htmlคือ>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [18] พิชิต วิจิตรบุญรักษ์ “HTML(2564)” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
https://www.bu.ac.th/knowledgecenter/executive_journal/july_sep_11/pdf/aw32.pdf
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [19] Tanakron “ESP-NOW คือ” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://medium.com/@s5701012610149/esp-now-aa199e180c17>.
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)
- [20] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. “หลักการและทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง”[ออนไลน์]. เข้าถึง
ได้จาก:
https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/enel30355va_ch2.pdf
(วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[21] วิสูตร อาสนวิจิตร และคณะ. “การออกแบบและประเมินตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อ สำหรับดักฝุ่นละออง ขนาดเล็กจากโรงบ่มใบยาสูบ” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:

https://www.researchgate.net/profile/Assocprofdr-Panich-Intra/publication/336284341_Design_and_Evaluation_of_a_Multiple-tube_Electrostatic_Collector_for_Part particulate_Matter_Removal_from_Tobacco_Monopoly_Exhaust/links/5d996aac458515c1d3989a6b/Design-and-Evaluation-of-a-Multiple-tube-Electrostatic-Collector-for-Particulate-Matter-Removal-from-Tobacco-Monopoly-Exhaust.pdf (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[22] ผศ.ดร.พานิช อินต๊ะ. “เทคโนโลยีการวัดและควบคุมฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิต” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:

https://www.researchgate.net/profile/Assocprofdr-Panich-Intra/publication/275834178_Electrostatic_Aerosol_Measurement_and_Control_Technology/links/5580484208aea3d7096e4657/Electrostatic-Aerosol-Measurement-and-Control-Technology.pdf (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[23] aballtechno “ฝุ่นละออง ฝุ่นขนาดใหญ่ PM 10 และฝุ่นขนาดเล็ก PM 2.5” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:

<https://www.aballtechno.com/article/71/> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[24] aballtechno “ฝุ่น PM 2.5 คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:

<https://www.aballtechno.com/article/91/> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[25] Fitrox Electronic. “ESP-32 NodeMCU 38 Pins.” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<http://fitrox.lnwshop.com/product/1340/esp32-devkitc-wifiblueetooth-38-pins>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[26] Amazon. “ESP-32 NodeMCU.” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<https://www.amazon.in/Allianztec-ESP-WROOM-32-Development-Microcontroller-Integrated/dp/B08VJ2CKG1>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 7 ม.ค. 2567)

[27] MikroElectronic. “Pin ESP32 WROOM 32” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<https://www.mikroelec.com/product/697/esp-wroom-32-mcu-module-38pin-wifibtle-goouuu-esp32-module-development-board-wireless-wifiblueetooth>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 9 ม.ค. 2567)

[28] Lnw “PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003)” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<https://www.analogread.com/product/983/pm2-5-laser-dust-sensor-pms3003>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 9 ม.ค. 2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Atrobot. “PM2.5 Laser Dust Sensor (pms3003)” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.lazada.co.th/products/pms3003-pm25-i3635384706-s13645202293.html?>
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 9 ม.ค. 2567)
- [30] Arduino4. “L7815” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.arduino4.com/article/1/-ic-voltage-regulator-7805-7809-7812>
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [31] ร้านช่างอำนวยการ. “L7815” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.changamnuai.com/product/725/l7815-to-220>
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [32] Texas Instruments. “CD4049” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4050b.pdf?ts=1698679182215&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [33] Major Brands. “CD4049” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.amazon.com/Brands-CD4049-Semiconductors-Inverting-Converter/dp/B06VV8G92F>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [34] Mouser Electronics. “CD4049BE” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://th.mouser.com/ProductDetail/TexasInstruments/CD4049UBE?qs=D5pVkbrrsqL-vQoWdk2gTTw%3D%3D>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [35] Fmuser5131. “TL494 การทำงาน” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://th.fmuser.net/content/?19935.html>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 10 ม.ค. 2567)
- [36] Warf Electronics. “TL494” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.warf.com/view.TL494_SMPS_Controller-1436.html.
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 20 ม.ค. 2567)
- [37] Surachit. “IC TL494” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://hamsiam.in.th/index.php?topic=21590.0>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 20 ม.ค. 2567)
- [38] Admin. “Power MOSFET การทำงาน” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2513.
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 20 ม.ค. 2567)
- [39] Vishay Siliconix. “Power MOSFET IRFP460” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.vishay.com/docs/91237/91237.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 20 ม.ค. 2567)
- [40] Mouser Electronics. “IRFP460 ข้อมูลจำเพาะ” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://th.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/IRFP460?qs=BvZgL2cZLn%2F1e0n5zn07%252BQ%3D%3D>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 22 ม.ค. 2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] วิกิพีเดีย “Photodiode” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
https://th.m.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:P_hotodiode_symbol.svg (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [53] gotronic.fr “Photodiode BPV10NF” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://www.gotronic.fr/art-photodiode-bpv10nf-2292.htm>
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [54] Dr. Krok “diode” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://dict.drkrok.com/diode/>(วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [55] หจก. สตาร์เซอร์กิต “THE ZENER DIODE” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
https://www.star-circuit.com/article/THE_ZENER_DIODE/ZENER-DIODE.html/
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [56] thiti.dev “ซีเนอร์ไดโอด (ZENER DIODE)” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://thiti.dev/blog/2485/> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [57] STMicroelectronics “LF351 รายละเอียด” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<https://th.mouser.com/datasheet/2/389/lf351-1849733.pdf>
 (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [58] STMicroelectronics “ข้อมูลจำเพาะ LF351” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<https://th.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/LF351N?qs=hprEbj%252BdINpkaWu0DIsOeQ%3D%3D> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 21 ก.พ. 2567)
- [59] jf-parede.pt “Flyback Transformer คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://th.jf-parede.pt/what-is-flyback-transformer> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 23 ก.พ. 2567)
- [60] เฮงเฮงแอลอีดี “หม้อแปลง 12V power switching คืออะไร” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<https://xn--72ca3bzdvdvbbcb1eb5icp.com/> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 23 ก.พ. 2567)
- [61] Illustrationprize. “การสูญเสีย Hysteresis” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
<https://illustrationprize.com/th/419-hysteresis-loss.html> (วันที่สืบค้นข้อมูล: 23 ก.พ. 2567)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <!-- Required meta tags -->
  <meta charset="utf-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1, shrink-to-fit=no">
  <!-- Bootstrap CSS -->
  <link rel="stylesheet"
href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.3.1/dist/css/bootstrap.min.css"
  integrity="sha384-
ggOyR0iXCbMQv3Xipma34MD+dH/1fQ784/j6cY/iJTQUOhcWr7x9JvoRxT2MZw1T"
crossorigin="anonymous">
  <title>Sign Up</title>
  <style>
    body {
      margin: 0;
      padding: 0;
      display: flex;
      justify-content: center;
      align-items: center;
      min-height: 100vh;
      background: linear-gradient(to right, #3498db, #2c3e50); /* Gradient background
color */
    }
    .container {
      max-width: 400px;
      width: 100%;
      background-color: #fff; /* White background color */
      padding: 20px;
      border-radius: 10px;
      box-shadow: 0 0 10px rgba(0, 0, 0, 0.1);
    }
  </style>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

h1 {
  font-size: 24px;
  margin-bottom: 20px;
  color: #fff; /* White text color */
  text-align: center;
  background-color: #2ecc71; /* Green background color */
  padding: 10px;
  border-radius: 8px;
}
.form-group {
  margin-bottom: 20px;
}
.btn {
  font-weight: bold;
}
.refresh-btn {
  background-color: #3498db; /* Light blue background color */
  color: #fff; /* White text color */
}
@media (max-width: 576px) {
  .container {
    padding: 10px;
  }
  h1 {
    font-size: 20px;
  }
}
</style>
</head>
<body>
  <div class="container">
    <h1>Sign Up</h1>
    <form action="/signup" method="post" onsubmit="return validateSignUpForm()">

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

<div class="form-group">
  <label for="exampleInputUsername">Username</label>
  <input name="username" type="text" class="form-control"
id="exampleInputUsername"
  placeholder="Enter username">
</div>
<div class="form-group">
  <label for="exampleInputEmail2">Email address</label>
  <input name="email" type="email" class="form-control" id="exampleInputEmail2"
  aria-describedby="emailHelp" placeholder="Enter email">
  <small id="emailHelp" class="form-text text-muted">We'll never share your email
with anyone else.
  </small>
</div>
<div class="form-group">
  <label for="exampleInputPassword2">Password</label>
  <input name="password" type="password" class="form-control"
id="exampleInputPassword2"
  placeholder="Password">
</div>
<button type="submit" class="btn btn-success btn-block">Sign Up</button>
</form>
<!-- Add the "Refresh" button with an onclick event -->
<button class="btn btn-block refresh-btn" onclick="refreshPage()">Refresh</button>
</div>
<!-- Optional JavaScript -->
<!-- jQuery first, then Popper.js, then Bootstrap JS -->
<script src="https://code.jquery.com/jquery-3.3.1.slim.min.js"
  integrity="sha384-
q8i/X+965DzO0rT7abK41JStQIAqVgRVzpbzo5smXKp4YfRvH+8abtTE1Pi6jizo"
  crossorigin="anonymous"></script>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/popper.js@1.14.7/dist/umd/popper.min.js"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

integrity="sha384-
UO2eT0CpHqdSjQ6hJty5KVphtPhzWj9WO1clHTMGa3JDZwrnQq4sF86dIHNDz0W1"
  crossorigin="anonymous"></script>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.3.1/dist/js/bootstrap.min.js"
  integrity="sha384-
JjSmVgyd0p3pXB1rRibZUAYolly6OrQ6VrjIEaFf/nJGzlxFDsf4x0xIM+B07jRM"
  crossorigin="anonymous"></script>
<script>
function validateSignUpForm() {
  var username = document.getElementById("exampleInputUsername").value;
  var email = document.getElementById("exampleInputEmail2").value;
  var password = document.getElementById("exampleInputPassword2").value;
  if (username.trim() === "") {
    alert("Please enter a username");
    return false;
  }
  if (!isValidEmail(email)) {
    alert("Please enter a valid email");
    return false;
  }
  if (password.trim() === "") {
    alert("Please enter a password");
    return false;
  }
  console.log("Username: " + username);
  console.log("Email: " + email);
  console.log("Password: " + password);
  return true;
}
function isValidEmail(email) {
  var emailRegex = /^[^\s@]+@[^\s@]+\.[^\s@]+$/;
  return emailRegex.test(email);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

window.addEventListener('beforeunload', function (event) {
  if (event.target.activeElement.tagName.toLowerCase() !== 'button') {
    var isConfirmed = window.confirm('Leaving this page will discard your changes.
Are you sure you want to leave?');
    if (!isConfirmed) {
      event.preventDefault();
    }
  }
});

function refreshPage() {
  window.location.href = 'http://127.0.0.1:1880/login';
}
</script>
</body>
</html>
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <style>
    body {
      font-family: Arial, sans-serif;
      margin: 0;
      padding: 0;
      box-sizing: border-box;
      display: flex;
      flex-direction: column;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    align-items: center;
    justify-content: center;
    height: 100vh;
}
h1 {
    text-align: center;
    margin-bottom: 20px;
}
iframe {
    width: 100%;
    height: 100%;
    border: none; /* Remove the border around the iframe */
}
</style>
</head>
<body>
    <iframe id="loginFrame" src="http://127.0.0.1:1880/login"></iframe>
</body>
</html>
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <style>
        body {
            font-family: Arial, sans-serif;
            margin: 0;
            padding: 0;
            box-sizing: border-box;
            overflow: hidden; /* ป้องกัน scrollbar เมื่อใช้ 100vh */
        }
    </style>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

h1 {
    text-align: center;
}
iframe {
    width: 100vw;
    height: 100vh;
    border: none; /* ลบ border */
    margin: 0; /* ลบ margin */
    padding: 0; /* ลบ padding */
    display: block;
}
#logout-link {
    display: none;
    text-align: center;
    margin-top: 10px;
}
.button-container {
    text-align: center;
    margin-top: 10px;
}
.custom-button {
    padding: 10px;
    background-color: #3498db; /* Light blue background color */
    color: #fff; /* White text color */
    border: none;
    border-radius: 5px;
    cursor: pointer;
    margin: 0 5px; /* Add margin between buttons */
}
</style>
</head>
<body>
    <iframe id="main-frame" src="{{payload}}"></iframe>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

<div id="logout-link">
  <a href="http://127.0.0.1:1880/login">Logout</a>
</div>
<div class="button-container">
  <button class="custom-button" onclick="refreshPage()">Refresh (URL: <span
id="current-url"></span></button>
</div>
<script>
function refreshPage() {
  var currentURL = window.location.href;
  document.getElementById('current-url').innerText = currentURL;
  window.location.href = 'http://127.0.0.1:1880/login';
}
// Use load event instead
window.addEventListener('load', function () {
  var currentURL = window.location.href;
  if (currentURL === 'http://127.0.0.1:1880/ui') {
    document.getElementById('logout-link').style.display = 'block';
  }
  // หากมีการรีเฟรชให้ย้อนกลับไป http://127.0.0.1:1880/login
  window.addEventListener('beforeunload', function () {
    var currentURL = window.location.href;
    if (currentURL === 'http://127.0.0.1:1880/ui' || currentURL ===
'http://127.0.0.1:1880/register') {
      window.location.href = 'http://127.0.0.1:1880/login';
    }
  });
});
</script>
</body>
</html>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <!-- Required meta tags -->
  <meta charset="utf-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1, shrink-to-fit=no">
  <!-- Bootstrap CSS -->
  <link rel="stylesheet"
href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.3.1/dist/css/bootstrap.min.css"
  integrity="sha384-
ggOyR0iXCbMQv3Xipma34MD+dH/1fQ784/j6cY/iJTQUOhcWr7x9JvoRxT2MZw1T"
crossorigin="anonymous">
  <title>Sign In</title>
  <style>
    body {
      margin: 0;
      padding: 0;
      display: flex;
      justify-content: center;
      align-items: center;
      min-height: 100vh;
      background: linear-gradient(to right, #56CCF2, #2F80ED); /* Updated gradient
background color */
    }
    .container {
      max-width: 600px;
      width: 100%;
      background-color: #fff; /* White background color */
      padding: 20px;
      border-radius: 10px;
      box-shadow: 0 0 10px rgba(0, 0, 0, 0.1);
    }
  </style>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

h1 {
  font-size: 24px;
  margin-bottom: 20px;
  color: #3498db; /* Light blue text color */
  text-align: center;
  background-color: #ecf0f1; /* Light gray background color */
  padding: 10px;
  border-radius: 8px;
}
.form-group {
  margin-bottom: 20px;
}
.btn {
  font-weight: bold;
}
.banner {
  width: 100%;
  border-radius: 10px;
  margin-bottom: 20px;
}
small {
  display: block;
  margin-top: 5px;
  color: #95a5a6; /* Light gray text color */
}
@media (max-width: 576px) {
  .container {
    padding: 10px;
  }
  h1 {
    font-size: 20px;
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

</style>
</head>
<body>
  <div class="container">
    <h1>Electrostatic Air Cleaner</h1>
    
    <form action="/register" method="post" onsubmit="return validateForm()">
      <div class="form-group">
        <label for="exampleInputEmail1">Email address</label>
        <input name="email" type="email" class="form-control" id="exampleInputEmail1"
          aria-describedby="emailHelp" placeholder="Enter email">
        <small id="emailHelp" class="form-text text-muted">We'll never share your email
with anyone else.
        </small>
      </div>
      <div class="form-group">
        <label for="exampleInputPassword1">Password</label>
        <input name="password" type="password" class="form-control"
id="exampleInputPassword1"
          placeholder="Password">
      </div>
      <button type="submit" class="btn btn-primary btn-block">Sign In</button>
      <a href="http://127.0.0.1:1880/Register" class="btn btn-secondary btn-block">Sign
Up</a>
      <button class="btn btn-info btn-block" onclick="refreshPage()">Refresh</button>
    </form>
  </div>
  <!-- Optional JavaScript -->
  <!-- jQuery first, then Popper.js, then Bootstrap JS -->
  <script src="https://code.jquery.com/jquery-3.3.1.slim.min.js"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    integrity="sha384-
q8i/X+965DzO0rT7abK41JStQIAqVgRVzpbzo5smXKp4YfRvH+8abtTE1Pi6jizo"
    crossorigin="anonymous"></script>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/popper.js@1.14.7/dist/umd/popper.min.js"
    integrity="sha384-
UO2eT0CpHqdSJK6hJty5KVphtPhzWj9WO1clHTMGa3JDZwrnQq4sF86dIHNDz0W1"
    crossorigin="anonymous"></script>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.3.1/dist/js/bootstrap.min.js"
    integrity="sha384-
JjSmVgyd0p3pXB1rRibZUAYoily6OrQ6VrjIEaFf/nJGzlxFDsf4x0xIM+B07jRM"
    crossorigin="anonymous"></script>
<script>
function validateForm() {
    // Your validation logic...
}
function refreshPage() {
    window.location.href = 'http://127.0.0.1:1880/login';
}
</script>
</body>
</html>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(21, 22);
unsigned int pm1 = 0;
unsigned int pm2_5 = 0;
unsigned int pm10 = 0;
int LED1 = 2;
int FanPin1 = 18;
int FanPin2 = 19;
int FanPin3 = 23;
String boy = "";
const int freq = 10000;
const int ledChannel = 0;
const int resolution = 8;
uint8_t receiverAddress[] = {0x94, 0xB5, 0x55, 0x25, 0x7C, 0xFC};
typedef struct sensor_data {
    unsigned int pm1;
    unsigned int pm2_5;
    unsigned int pm10;
    String boy; // เพิ่มตัวแปรที่ชื่อ "boy" เพื่อส่งกลับไป
} sensor_data;
sensor_data sensorData;
esp_now_peer_info_t peerInfo;
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
}
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    ledcSetup(ledChannel, freq, resolution);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ledcAttachPin(LED1, ledChannel);
pinMode(FanPin1, OUTPUT);
pinMode(FanPin2, OUTPUT);
pinMode(FanPin3, OUTPUT);
digitalWrite(FanPin1, HIGH);
digitalWrite(FanPin2, HIGH);
digitalWrite(FanPin3, HIGH);
while (!Serial);
mySerial.begin(9600);
WiFi.mode(WIFI_STA);
if (esp_now_init() != ESP_OK) {
  Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
  return;
}
esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
esp_now_register_rcv_cb(OnDataReceived);
memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
  Serial.println("Failed to add peer");
  return;
}
}
void loop() {
  // Read PM sensor values
  Sending_Senser();
  // Set PM sensor data
  sensorData.pm1 = pm1;
  sensorData.pm2_5 = pm2_5;
  sensorData.pm10 = pm10;
  esp_err_t result = esp_now_send(receiverAddress, (uint8_t *)&sensorData,
sizeof(sensorData));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sent PM sensor data with success");
    Serial.println(pm1);
    Serial.println(pm2_5);
    Serial.println(pm10);
} else {
    Serial.println("Error sending the PM sensor data");
}
delay(2000);
}

void Sending_Senser() {
    int index = 0;
    char value = 0;
    char previousValue;
    while (mySerial.available()) {
        value = mySerial.read();
        if ((index == 0 && value != 0x42) || (index == 1 && value != 0x4d)) {
            Serial.println("Cannot find the data header.");
            break;
        }
        if (index == 1||index == 2||index == 3||index == 4||index == 6||index == 8||index ==
10||index == 11||index == 12||index == 13||index == 14) {
            previousValue = value;
        }
        else if (index == 5) {
            int new_pm1 = previousValue + value;
            pm1 = new_pm1;
            if (new_pm1 > 500)pm1 = 500;
        }
        else if (index == 7) {
            int new_pm2_5 = previousValue + value;
            pm2_5 = new_pm2_5;
            if (new_pm2_5 > 500) pm2_5 = 500;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
else if (index == 9) {
    int new_pm10 = previousValue + value;
    pm10 = new_pm10;
    if (new_pm10 > 500) pm10 = 500;
} else if (index > 15) {
    break;
}
index++;
}
while (mySerial.available()) mySerial.read();
}
void OnDataReceived(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *data, int data_len) {
    if (data_len == sizeof(sensor_data)) {
        sensor_data *receivedData = (sensor_data *)data;
        boy = receivedData->boy; // นำค่า "boy" ที่ได้รับมาใช้
        Serial.print("{\"boy\": ");
        Serial.print(boy);
        Serial.println("}");
        on_off(boy);
    } else {
        Serial.println("Received data of unexpected size");
    }
}
}
void on_off(String value) {
    if (value == "1") {
        //ledcWrite(ledChannel, 64); // 25% of 255
        ledcWrite(ledChannel, 128);
        //ledcWrite(ledChannel, 192); // 75% of 255
        digitalWrite(FanPin1, LOW);
        digitalWrite(FanPin2, LOW);
        digitalWrite(FanPin3, LOW);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (value == "0") {
    ledcWrite(ledChannel, 0);
    digitalWrite(FanPin1, HIGH);
    digitalWrite(FanPin2, HIGH);
    digitalWrite(FanPin3, HIGH);
}
}

#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
uint8_t senderAddress[] = {0x4C, 0x11, 0xAE, 0x9C, 0xB6, 0x10};
String boy= "";
const int freq = 10000;
const int ledChannel = 0;
const int resolution = 8;
typedef struct sensor_data {
    unsigned int pm1;
    unsigned int pm2_5;
    unsigned int pm10;
    String boy; // เพิ่มตัวแปรที่ชื่อ "boy" เพื่อส่งกลับไป
} sensor_data;
sensor_data sensorData;
esp_now_peer_info_t peerInfo;
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
}
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

esp_now_register_recv_cb(OnDataReceived);
esp_now_register_recv_cb(OnDataReceived);
memcpy(peerInfo.peer_addr, senderAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}
}
}
void loop() {
    on_off();
    // ตัวรับข้อมูลสามารถอัปเดตค่า "boy" ก่อนส่งข้อมูลกลับ
    sensorData.boy = boy ; // ตัวอย่าง: กำหนดค่า "boy" เป็น 24
    //
    // Set PM sensor data
    // sensorData.pm1 = 15;
    // sensorData.pm2_5 = 25;
    // sensorData.pm10 = 35;
    esp_err_t result = esp_now_send(senderAddress, (uint8_t *)&sensorData,
    sizeof(sensorData));

    // if (result == ESP_OK) {
    //     Serial.println("Sent PM sensor data with success");
    // } else {
    //     Serial.println("Error sending the PM sensor data");
    // }
    delay(2000);
}

void OnDataReceived(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *data, int data_len) {
    if (data_len == sizeof(sensor_data)) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sensor_data *receivedData = (sensor_data *)data;

unsigned int pm1 = receivedData->pm1;
unsigned int pm2_5 = receivedData->pm2_5;
unsigned int pm10 = receivedData->pm10;
// int boy = receivedData->boy; // นำค่า "boy" ที่ได้รับมาใช้
// Serial.print("Received PM sensor data:");
Serial.print(" {\\"pm1\\": ");
Serial.print(pm1);
Serial.print(",\\"pm2_5\\": ");
Serial.print(pm2_5);
Serial.print(",\\"pm10\\": ");
Serial.print(pm10);
Serial.println(" }");
} else {
  Serial.println("Received data of unexpected size");
}
}
void on_off() {
  if (Serial.available()) {
    boy = Serial.readString();
  }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
คำสั่งการประมวลประสิทธิภาพเครื่องฟอกอากาศ และ หาคุณสมบัติของเครื่องฟอกอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear all; clf; clc;
fprintf('*****\n');
fprintf('    Calculate Collection Efficiency ESP \n');
fprintf('*****\n');
r1= 0.0002; %m
r2= 0.005; %m
d1= 4*r2/pi;
L = 0.2; %m 200 mm (ESP Pipe Length)
T = 318; %K (Temperature exhaust gas)
Tr= 293; %K (Temperature referable)
P = 1.0135; %bar(working Pressure)
Pr= 1; %bar(Pressure referable)
Q = 1*(0.001/60); %m^3/s (QESP)
e = 0.000000000000000000161; %1.61E-19 C (Charge per electron)
eo= 0.0000000000000000008854; %8.854e-12 F/m
Zi= 0.000141; %m^2V.s (Charge per electron)
%Es = 3126000; %3.126e6 V/m(Breakdown field)
%Es = 3370000; %Positive (Breakdown field)
A = 0.0301; %3.01e-2 m^1/2
%A = 0.0266; %Positive
k = 0.00000000000000000000000013806; %1.3806e-23 (Boltzmann constant)
ci= 240; %m/s
er= 3; %(Dielectric constant of particle)
KE= 9000000000; %N.m^2/C2(Electrostatic Constan)
u = 0.000018134; %1.8134e-5 kg.m/s^2 (viscosity)
m = 0.0000000066; %
RH= 0; %Relative Humidity 0-100(%)
Es= (5.075*1000000)*(((259/T)*(P/1.0135))^1.48)+0.063*RH*((298/T)*(P/1.0135))*1000000;
d = (Tr/T)*(P/Pr);
E0= Es*(d+(A*sqrt(d/r1)));
Vo= E0*r1*log(d1/r1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Show Constant Value
fprintf('    Show Constant Value\n');
fprintf(' - Wire Radius (r1) = %.3e m\n',r1);
fprintf(' - ESP Radius (r2) = %.3e m\n',d1);
fprintf(' - ESP Pipe Length (L) = %.3e m\n',L);
fprintf(' - Temperature exhaust gas (T) = %.3f K\n',T);
fprintf(' - Temperature referable (Tr) = %.3f K\n',Tr);
fprintf(' - working Pressure (P) = %.3e kPa\n',P);
fprintf(' - Pressure referable (Pr) = %.3e kPa\n',Pr);
fprintf(' - Charge per electron (e) = %.3e C\n',e);
fprintf(' - Mobility of ions (Zi) = %f m^2V.s\n',Zi);
fprintf(' - Breakdown field (Es) = %f V/m\n',Es);
fprintf(' - Constant Value (A) = %.3e m^1/2\n',A);
% Show Calculation Value
fprintf('    Show Calculation Value\n');
fprintf(' - Air density (d) = %.3e V/m\n',d);
fprintf(' - Corona onset field (E0) = %.3e V/m\n',E0);
fprintf(' - Corona (Vo) = %.3e V\n',Vo);
fprintf('*****\n');
%fprintf(' [V] [] [Ni] \n');
%fprintf(' [Ni] \n');
% Calculation Nit
P_dp=[]; P_eff=[];P_np=[];P_dp1=[]; P_eff1=[];P_np1=[];P_dp2=[]; P_eff2=[];P_np2=[];
for multiplier=10:10

V= multiplier*1000; %V
Ec= V/(d1*log(d1/r1));
ic=(8*3.141*L*eo*Zi*V*(V-Vo))/((d1^2)*log(d1/r1));
Ni=(ic*log(d1/r1))/(2*3.141*L*e*Zi*V);
Nit=(ic*((d1)^2-(r1)^2)*log(d1/r1)) / (2*Zi*e*V*Q);

V1= multiplier*100; %V
Ec1= V1/(d1*log(d1/r1));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ic1=(8*3.141*L*eo*Zi*V1*(V1-Vo))/((d1^2)*log(d1/r1));
Ni1=(ic1*log(d1/r1))/(2*3.141*L*e*Zi*V1);
Nit1=(ic1*((d1)^2-(r1)^2)*log(d1/r1) / (2*Zi*e*V1*Q);

V2= multiplier*500; %V
Ec2= V2/(d1*log(d1/r1));
ic2=(8*3.141*L*eo*Zi*V2*(V2-Vo))/((d1^2)*log(d1/r1));
Ni2=(ic2*log(d1/r1))/(2*3.141*L*e*Zi*V2);
Nit2=(ic2*((d1)^2-(r1)^2)*log(d1/r1) / (2*Zi*e*V2*Q);
%fprintf(' dp np Zp eff\n');
%fprintf(' dp \n');
%fprintf(' np \n');
%fprintf(' eff\n');
% Calculation n_field,np,Cc, Zp and eff
for multiplier2=1:1000

dp=multiplier2*0.00000001; %m
P_dp=[P_dp dp];
n_field=((3*er)/(er+2))*((Ec*dp^2)/(4*KE*e))*((3.141*KE*e*Zi*Nit)/(1+3.141*KE*e*Zi*Nit));
np = n_field ;
Cc = 1+(m/dp)*(2.514+0.8*exp(-0.55*(dp/m)));
Zp = (np*e*Cc)/(3*3.141*u*dp);
eff =(1-exp(-(2*3.141*d1*L*Zp*Ec)/Q))*100;
P_eff=[P_eff eff];
P_np=[P_np np];

dp1=multiplier2*0.00000001; %m
P_dp1=[P_dp1 dp1];
n_field1=((3*er)/(er+2))*((Ec1*dp1^2)/(4*KE*e))*((3.141*KE*e*Zi*Nit1)/(1+3.141*KE*e*Zi*Nit1));
np1 = n_field1 ;
Cc1 = 1+(m/dp1)*(2.514+0.8*exp(-0.55*(dp1/m)));
Zp1 = (np1*e*Cc)/(3*3.141*u*dp1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eff1 =(1-exp(-(2*3.141*d1*L*Zp*Ec1)/Q))*100;
P_eff1=[P_eff1 eff1];
P_np1=[P_np1 np1];

dp2=multiplier2*0.00000001; %m
P_dp2=[P_dp2 dp2];
n_field2=((3*er)/(er+2))*((Ec1*dp2^2)/(4*KE*e))*((3.141*KE*e*Zi*Nit1)/(1+3.141*KE*e*Zi*Nit1));
np2 = n_field2 ;
Cc5 = 1+(m/dp2)*(2.514+0.8*exp(-0.55*(dp2/m)));
Zp5 = (np2*e*Cc)/(3*3.141*u*dp2);
eff2 =(1-exp(-(2*3.141*d1*L*Zp*Ec1)/Q))*100;
P_eff2=[P_eff2 eff2];
P_np2=[P_np2 np2];
end
%Show Result V,ic, Ni,dp, np,Zp and eff
%fprintf(' %.3e %.3e %.3e \n',V,ic,Ni);
%fprintf(' %.3e \n',Ni);
%fprintf(' %.3e %.3e %.3e %.3f \n',dp, np,Zp,eff);
%fprintf(' %.3e \n',dp );
%fprintf(' %.3e \n',np );
%fprintf(' %.3f \n',eff);
end
% Show Result in Figure
figure(1);
semilogx(P_dp,P_eff, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Collection Efficiency (%)');
title('Calculate Efficiency ');
legend('10 kV')
grid();
%length(P_dp)
%length(P_np)
figure(2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

semilogx(P_dp, P_np, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Calculate mean charge per particle ');
title('Calculate mean charge per particle ');
legend('10 kV')
grid();
figure(3);
semilogx(P_dp1,P_eff1, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Collection Efficiency (%)');
title('Calculate Efficiency ');
legend('1 kV')
grid();
%length(P_dp)
%length(P_np)
figure(4);
semilogx(P_dp1, P_np1, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Calculate mean charge per particle ');
title('Calculate mean charge per particle ');
legend('1 kV')
grid();
figure(5);
semilogx(P_dp2,P_eff2, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Collection Efficiency (%)');
title('Calculate Efficiency ');
legend('5 kV')
grid();
%length(P_dp)
%length(P_np)
figure(6);
semilogx(P_dp2, P_np2, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

xlabel('Dimeter of Particle (dp)');
ylabel('Calculate mean charge per particle ');
title('Calculate mean charge per particle ');
legend('5 kV')
grid();
% Show Result in Figure
figure(1);
semilogx(P_dp, P_eff, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
hold on; % Add this line to keep the current plot
xlabel('Diameter of Particle (dp)');
ylabel('Collection Efficiency (%)');
title('Calculate Efficiency');
legend('10 kV');
grid();

% Plot for 1 kV
figure(1);
semilogx(P_dp1, P_eff1, 'LineWidth', 2, 'Color', 'b'); % Use a different color for the second
plot
legend('10 kV', '1 kV'); % Add legend for both plots

figure(2);
semilogx(P_dp, P_np, 'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
hold on;
xlabel('Diameter of Particle (dp)');
ylabel('Calculate mean charge per particle');
title('Calculate mean charge per particle');
legend('10 kV');
grid();

% Plot for 1 kV
figure(2);
semilogx(P_dp1, P_np1, 'LineWidth', 2, 'Color', 'b');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
legend('10 kV', '1 kV');
```

```
figure(1);
```

```
hold on;
```

```
dp_highlight1 = 1e-5;
```

```
highlight_eff1 = interp1(P_dp, P_eff, dp_highlight1);
```

```
plot(dp_highlight1, highlight_eff1, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
```

```
text(dp_highlight1, highlight_eff1, ' (1 \times 10^{-5} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',  
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
dp_highlight2 = 2.5e-6;
```

```
highlight_eff2 = interp1(P_dp, P_eff, dp_highlight2);
```

```
plot(dp_highlight2, highlight_eff2, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
```

```
text(dp_highlight2, highlight_eff2, ' (2.5 \times 10^{-6} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',  
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
% ??????????? 2
```

```
figure(2);
```

```
hold on;
```

```
highlight_np1 = interp1(P_dp, P_np, dp_highlight1);
```

```
plot(dp_highlight1, highlight_np1, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
```

```
text(dp_highlight1, highlight_np1, ' (1 \times 10^{-5} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',  
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
highlight_np2 = interp1(P_dp, P_np, dp_highlight2);
```

```
plot(dp_highlight2, highlight_np2, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
```

```
text(dp_highlight2, highlight_np2, ' (2.5 \times 10^{-6} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',  
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
figure(3);
```

```
hold on;
```

```
highlight_eff1 = interp1(P_dp1, P_eff1, dp_highlight1);
```

```
plot(dp_highlight1, highlight_eff1, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
text(dp_highlight1, highlight_eff1, ' (1 \times 10^{-5} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
highlight_eff2 = interp1(P_dp1, P_eff1, dp_highlight2);
plot(dp_highlight2, highlight_eff2, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
text(dp_highlight2, highlight_eff2, ' (2.5 \times 10^{-6} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',
'HorizontalAlignment', 'right');
```

```
figure(4);
hold on;
highlight_np1 = interp1(P_dp1, P_np1, dp_highlight1);
plot(dp_highlight1, highlight_np1, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
text(dp_highlight1, highlight_np1, ' (1 \times 10^{-5} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',
'HorizontalAlignment', 'right');

highlight_np2 = interp1(P_dp1, P_np1, dp_highlight2);
plot(dp_highlight2, highlight_np2, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
text(dp_highlight2, highlight_np2, ' (2.5 \times 10^{-6} m)', 'VerticalAlignment', 'bottom',
'HorizontalAlignment', 'right');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้