

เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน
NON-INVASIVE ALCOHOL METER



โดย
นายวชิรวิชัย
นายวีรวัฒน์
นางสาวสุวภัทร
อัครลัทธินกุล
เอื้ออวยชัย
พรหมอุบล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน
NON-INVASIVE ALCOHOL METER

โดย

นายวชิรวิษณุ	อัศวสิทธิ์กุล	63010838
นายวีรวิฑมภ์	เอื้ออวยชัย	63010896
นางสาวสุภาภัทร	พรหมอุบล	63011022

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. จีรสุดา โกษิยาภรณ์
ศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน

NON-INVASIVE ALCOHOL METER

ผู้จัดทำ

- | | | |
|-------------------|---------------|----------|
| 1. นายชวิรัชชัย | อัศวสิทธิ์กุล | 63010838 |
| 2. นายวีรวิทย์ | เอื้ออวยชัย | 63010896 |
| 3. นางสาวสุภาภัทร | พรหมอุบล | 63011022 |

kesornji

(รศ.ดร. จีรสุดา โกษียาภรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปราโมทย์

(ศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินปริญญานิพนธ์เรื่อง “เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน” จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก รศ.ดร. จีรสุดา โกษิยาภรณ์ และ ศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้าวิจัยให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ระหว่างการจัดทำโครงการ

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านอาทิ บิดา มารดา และเพื่อนนักศึกษาที่คอยให้ ความรัก ความห่วงใย สนับสนุน ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้จัดทำเสมอมา

นายชิริวิชญ์ อัครสิทธิกุล
นายวีรวิฑณ์ เอื้ออวยชัย
นางสาวสุวิภัทร พรหมอุบล
ผู้จัดทำ

เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน
NON-INVASIVE ALCOHOL METER

โดย นายวชิรวิษณุ อัครวิฑูรย์ 63010838
นายวีรวิฑูรย์ เอื้ออวยชัย 63010896
นางสาวสุภาภัทร พรหมอุบล 63011022

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จีรสุตา โกษิยาภรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการวัดแอลกอฮอล์สามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การเจาะเลือด การวัดโดยการเป่าลมหายใจออก และการวัดจากเหงื่อ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้วิธีการเป่า ซึ่งการเป่าอาจจรรุกรานความเป็นส่วนตัว หรือมีความรู้สึกที่ไม่สะอาด ดังนั้นในปริญญาานิพนธ์นี้ผู้จัดทำจะนำเสนอการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์จากการลดทอนของลำแสงที่ถูกดูดซับโดยปริมาณของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในพลาสมาของเลือด โดยจะเลือกใช้ย่านแสงอินฟราเรดในช่วง 940 และ 1040 นาโนเมตร ซึ่งเป็นย่านแสงที่ดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดี และใช้เทคนิคการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ เพื่อให้การจัดเก็บสัญญาณไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน เนื่องจากใช้ตัวตรวจจับแสงตัวรับเพียงตัวเดียว เมื่อได้สัญญาณ PHOTOPLETHYSMOGRAPHY (PPG) ก็จะนำสัญญาณ PPG ดังกล่าวไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับ ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด แล้วทำการแสดงผลบนจอแสดงผล พบว่าได้ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน เท่ากับ 89.50% และได้ค่าความแม่นยำแบ่งเป็นช่วง ๆ ได้ ดังนี้ ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.01-0.03 มีค่าความแม่นยำ 0.0208 ± 0.0090 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.03-0.05 มีค่าความแม่นยำ 0.0395 ± 0.0149 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.05-0.07 มีค่าความแม่นยำ 0.0606 ± 0.0125 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.07-0.09 มีค่าความแม่นยำ 0.0805 ± 0.0215 ต่อการดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ต่อ 1 ครั้ง จำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

Currently, alcohol can be measured in many ways, such as drawing blood and measuring it by exhaling the breath and measurement of sweat but most often use the blowing method, which blowing may invade privacy or feeling unclean. Therefore, in this thesis, the authors will present the as chosen measurement of alcohol content from the attenuation of a beam of light absorbed by the amount of alcohol in the blood plasma. Infrared lights is in the range of 940 and 1040 nanometers, which is a light area that absorbs alcohol well. In addition, a frequency division multiplex signal combining technique is used so that the stored signals do not interfere with each other. At the receiver, the detected PPG signal is processed by the microcontroller ESP32 to calculate the absorbance ratio for determining the amount of alcohol in the blood which will be displayed the result on the screen. It was found that the accuracy of Non-Invasive Alcohol Meter was 89.50%, and the precision, which can be divided into ranges as follows : at the alcohol content level of 0.01-0.03, there is an accuracy value $0.0208 \pm 0.0090\%$. At the alcohol content level of 0.03-0.05, there is accuracy value $0.0395 \pm 0.0149\%$. At the alcohol content level of 0.05-0.07, there is accuracy value $0.0606 \pm 0.0125\%$. At the alcohol content level of 0.07-0.09, there is an accuracy value $0.0805 \pm 0.0215\%$. per drinking of 200 ml of alcoholic beverage per 1 time, a total of 4 times.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1	บทนำ
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1.2 วัตถุประสงค์
	1.3 ขอบเขตของปริิญยานิพนธ์
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง
	2.1 หลักการอัตราดูดซับ
	2.2 หลักการการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม
	2.3 เทคนิคการวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด
	2.4 เอทานอล
	2.5 PPG SIGNAL
	2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PPG และปริมาณระดับแอลกอฮอล์ในเลือด
	2.7 หลักการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์
	2.8 หลักการมอดูเลต
	2.9 หลักการดีมอดูเลต
	2.10 หลักการการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ
	2.11 ตัวกรองสัญญาณเชิงดิจิทัล
	2.12 วงจรที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์
	2.13 ไดโอดเปล่งแสง
	2.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32
	2.15 LM324N
	2.16 ตัวตรวจจับแสง
	2.17 2N2221A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.18 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัด	25
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปริญญาบัตร	
3.1 การออกแบบ	27
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	39
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	42
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองส่วนของฮาร์ดแวร์	48
4.2 ผลการทดลองส่วนของซอฟต์แวร์	50
4.3 ผลการทดลองเทียบกับเครื่องทั่วไป	59
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การดูดซับแสงของแอลกอฮอล์ในเลือด	3
2.2 การปรับเส้นโค้งให้เหมาะสมด้วยวิธี BEST FIT	5
2.3 กราฟแสดงข้อมูลแบบกระจาย	6
2.4 กราฟแสดงสมการของเส้นที่เหมาะสม	7
2.5 ลักษณะของสัญญาณ PPG	9
2.6 การวัดสัญญาณ PPG	10
2.7 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ PPG ระหว่างผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์และผู้ที่ไม่ดื่มแอลกอฮอล์	11
2.8 การมอดูเลตเชิงขนาดแบบเอเอ็ม	12
2.9 การดีมอดูเลตแบบตรวจจับซิงโครนัสดีเทคชัน	13
2.10 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่	15
2.11 โครงสร้างระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด	15
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	16
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของวงจรรองความถี่แถบผ่าน	18
2.14 วงจรขับไดโอดเปล่งแสง	20
2.15 วงจรบัฟเฟอร์	21
2.16 วงจรขยายทรานซิสเตอร์	21
2.17 หลอดไฟ LEDs	22
2.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32	22
2.19 LM324N	23
2.20 ตัวตรวจจับแสง	23
2.21 2N2221A	24
3.1 บล็อกไดอะแกรมหลักการการทำงานของระบบวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกล้ำที่มีการแสดงผลบนหน้าจอ	26
3.2 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบอุปกรณ์วัดสัญญาณ PPG	27
3.3 แผนผังการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ทั้ง 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32	28
3.4 แผนผังของวงจรขับไดโอดเปล่งแสง	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจรขับไดโอดเปล่งแสงที่สร้างเสร็จแล้ว	29
3.6 แผนผังของวงจรฝั่งภาครับ	30
3.7 วงจรฝั่งภาครับที่สร้างเสร็จแล้ว	30
3.8 แผนผังการรวมวงจร	31
3.9 วงจรรวมที่สร้างเสร็จแล้ว	31
3.10 แผนผังการทำงานในการสร้างและเก็บสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32	33
3.11 แผนภาพขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณและคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับ	34
3.12 แผนภาพการทำงานของการทำงานการติมอดูเลต	38
3.13 แผนภาพการทำงานของการทำงานการหาค่าสูงสุดและต่ำสุด	39
3.14 เครื่องออสซิลโลสโคป	40
3.15 เครื่องจ่ายไฟ	40
3.16 เครื่องกำเนิดสัญญาณ	41
3.17 โปรแกรม Arduino IDE	41
3.18 เว็บไซต์ EasyEDA	42
3.19 การติดตั้งการทดสอบการทำงานของโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์	43
3.20 การติดตั้งการทดสอบวงจรขับไดโอดเปล่งแสง	43
3.21 การติดตั้งการทดสอบวงจรฝั่งภาครับ	44
3.22 การติดตั้งการทดสอบตัวกรองความถี่แถบผ่านและตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน	45
3.23 การติดตั้งการทดสอบวงจรของระบบ	46
3.24 การติดตั้งการทดสอบวงจรรวมของระบบทั้งหมด	47
4.1 สัญญาณไซน์ที่แสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป	48
4.2 สัญญาณไซน์ที่ได้จากวงจรขับไดโอดเปล่งแสง	49
4.3 สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ที่ได้จากเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณและวงจรฝั่งภาครับ	49
4.4 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 35 – 125 เฮิรตซ์	51
4.5 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 139 - 241 เฮิรตซ์	52

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟผลตอบแทนของทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์	54
4.7 กราฟผลตอบแทนของทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์	55
4.8 สัญญาณ FDM ที่รับเข้ามา	55
4.9 สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร	56
4.10 สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร	56
4.11 สัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร	57
4.12 สัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร	57
4.13 สัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร	57
4.14 สัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร	58
4.15 สัญญาณ FDM ที่ได้จากการรวมวงจรทั้งหมด	59
4.16 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดค่าอัตราการดูดซับของเครื่องที่สร้างขึ้นกับค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า	60
4.17 กราฟแสดงฟังก์ชันสมการเชิงเส้นที่ได้จากการเก็บผลการทดลอง	61

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองความถี่แถบผ่านที่ความถี่ 35 - 125 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า	50
4.2	ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 35 - 125 เฮิรตซ์	51
4.3	ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว	51
4.4	ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 139 - 241 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า	51
4.5	ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 139 - 241 เฮิรตซ์	51
4.6	ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว	52
4.7	ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า	53
4.8	ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์	53
4.9	ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว	53
4.10	ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า	54
4.11	ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์	54
4.12	ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว	54
4.13	เปรียบเทียบค่าอัตราการดูดซับที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบเป่า	60
4.14	เปรียบเทียบค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นโดยคำนวณจากสมการที่ 4.1 กับเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบเป่า	62
4.15	ค่าความเที่ยงตรงของอาสาสมัครแต่ละคน	62
4.16	ค่าความแม่นยำของอาสาสมัครแต่ละคน	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดแอลกอฮอล์ที่อยู่ในเลือดเป็นกระบวนการทางการแพทย์ที่ใช้ในการประเมินปริมาณแอลกอฮอล์ที่มีในเลือดของบุคคลเพื่อประเมินระดับการดื่มแอลกอฮอล์ในร่างกาย ซึ่งมักนำมาใช้ในการคัดกรองหรือวินิจฉัยปัญหาการดื่มสุรากับสุขภาพหรือปัญหาทางสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับการดื่มสุรา เช่น การตรวจสุขภาพเนื่องจากการดื่มสุรามากเกินไปหรือโรคตับเรื้อรังเนื่องจากการดื่ม ซึ่งการวัดแอลกอฮอล์ที่อยู่ในเลือดมีหลายวิธีที่ใช้กัน เช่น การใช้เครื่องมือทางแลป (Laboratory-based test) การใช้เครื่องมือที่ให้ผลทันที (Point-of-care testing) โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการเป่าลมหายใจออก ซึ่งอาจจะรบกวนค่าความเป็นส่วนตัว หรืออาจจะรู้สึกไม่สะดวก

ดังนั้น ปรินูญานิพนธ์นี้เสนอการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้วิธีการลดทอนของลำแสงที่ถูกดูดซับโดยปริมาณของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในพลาสมาของเลือด โดยใช้ย่านแสงอินฟราเรดในที่มีความยาวคลื่น 940 นาโนเมตร และ 1040 นาโนเมตร ซึ่งเป็นย่านแสงที่สามารถดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดี และใช้เทคนิคการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing) เพื่อให้การจัดเก็บสัญญาณไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน เนื่องจากใช้ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เพียงตัวเดียวในการรับสัญญาณ Photoplethysmography (PPG) ที่ได้จากการลดทอนของลำแสงอินฟราเรด จากนั้นจะนำสัญญาณ PPG ที่ได้ดังกล่าวไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนการดูดซับ (Absorbance Ratio) ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาอัตราระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด (Blood Alcohol Concentration) แล้วทำการแสดงผลบนจอแสดงผล

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาช่วงของความยาวคลื่นที่แอลกอฮอล์ในเลือดสามารถดูดซับได้ดี
- 2) ศึกษาการทำงานและออกแบบเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดบริเวณปลายนิ้ว
- 3) นำหลักการ PPG มาออกแบบ และสร้างเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รบกวนได้

1.3 ขอบเขตของปรินูญานิพนธ์

ปรินูญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รบกวน โดยจะมีการขับแหล่งกำเนิดแสง 940 นาโนเมตร ด้วยคลื่นความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ และขับแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด 1040 นาโนเมตร ด้วยคลื่นความถี่ 190 เฮิร์ตซ์ เพื่อทำให้เกิดการรวมของสัญญาณ PPG ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และมีการคำนวณหาอัตราส่วนการดูดซับ เพื่อ

ใช้คำนวณหาค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด แล้วมีการแสดงผลปริมาณร้อยละของระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดบนจอแสดงผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

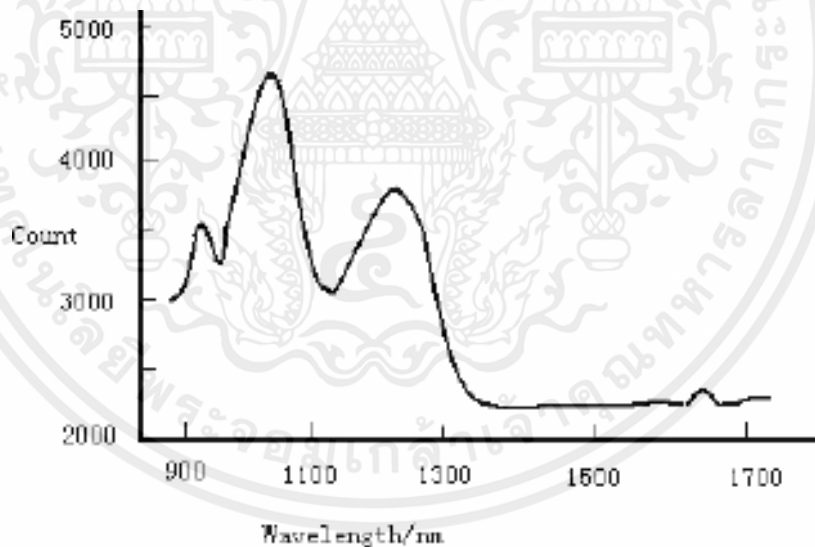
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน” ได้ทำการออกแบบการตรวจวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์จากการลดทอนของลำแสงที่ถูกดูดซับโดยปริมาณของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในพลาสมาของเลือด โดยใช้เทคนิคการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ เมื่อได้สัญญาณ PPG ก็จะนำสัญญาณดังกล่าวไปคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด ดังนั้นปริญญานิพนธ์ที่นำเสนอจึงมีหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 หลักการอัตราดูดซับ (Absorbance Ratio)

การวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้หลักการการลดทอนของลำแสงที่ถูกดูดซับโดยปริมาณของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในพลาสมาของเลือด จะใช้ความยาวคลื่นที่ 940 นาโนเมตร และ 1040 นาโนเมตร ซึ่งเป็นย่านแสงที่เลือดสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดี โดยสามารถแสดงการดูดซับแสงของแอลกอฮอล์ในเลือดได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การดูดซับแสงของแอลกอฮอล์ในเลือด

การวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดโดยหลักการการลดทอนของลำแสงที่ถูกดูดซับโดยปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งจะสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน 2 ความถี่ และส่วนของตัววัดที่จะทำหน้าที่ปล่อยและรับคลื่นแสง โดยจะเริ่มจากเมื่อนำนิ้วมือมาวางบนเซ็นเซอร์ตัวรับสัญญาณ และเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณ และจะมีเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณจำนวน 2 ตัว จะทำหน้าที่ปล่อยคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีค่าความยาวคลื่นที่ต่างกัน คือ ที่ 940 นาโนเมตร และที่ 1040 นาโนเมตร โดยคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองนี้จะสะท้อนผ่านเลือดในเวลาเดียวกันไปยังเซ็นเซอร์ตัวรับสัญญาณ ซึ่งเซ็นเซอร์ตัวรับสัญญาณนี้จะสามารถรับคลื่นแสงได้ 2 ช่วง คือ ช่วงที่มีการไหลของเลือด และช่วงที่ไม่มีไหลของเลือด โดยเมื่อทราบค่าการดูดซับแสงในแต่ละช่วงได้ ก็จะสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นแสง (R) ได้ดังสมการที่ 2.1 [1]

$$R = \frac{\frac{AC_{IR940}}{DC_{IR940}}}{\frac{AC_{IR1040}}{DC_{IR1040}}} \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือ อัตราการดูดซับคลื่นแสง
 AC_{IR940} คือ การดูดซับคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วงที่มีการไหลของเลือดที่คลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร
 DC_{IR940} คือ การดูดซับคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วงที่ไม่มีไหลของเลือดที่คลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร
 AC_{IR1040} คือ การดูดซับคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วงที่มีการไหลของเลือดที่คลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร
 DC_{IR1040} คือ การดูดซับคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วงที่ไม่มีไหลของเลือดที่คลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

2.2 หลักการการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve Fitting)

การปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม คือ กระบวนการในการหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับข้อมูลในแต่ละชุด โดยการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ Best Fit และ Exact Fit โดยในที่นี้ขอกล่าวถึงเพียงการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมด้วยวิธี Best Fit

วิธีการที่ง่ายที่สุดสำหรับการปรับเส้นโค้งให้เหมาะสมด้วยวิธี Best Fit คือ วิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งเส้นโค้งจะเป็นเส้นตรงในรูปแบบการแยกพารามิเตอร์ของสมการดังต่อไปนี้ [2]

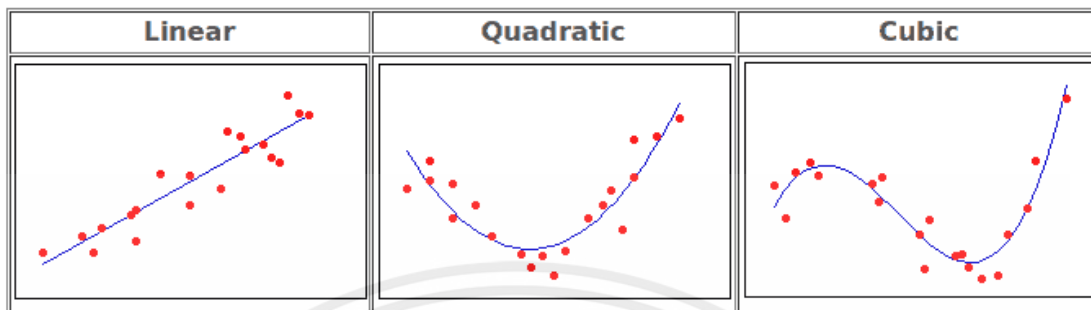
$$y = ax + b \quad (2.2)$$

โดยที่ a คือ ความชัน
 b คือ จุดตัดแกน

ส่วนการถดถอยพหุนาม (Polynomial regression) จะขึ้นอยู่กับค่า d
 เมื่อ d = 1 จะเป็นระบบสมการเชิงเส้น $y = ax + b$
 d = 2 จะเป็นระบบสมการกำลังสอง $y = ax^2 + bx + c$
 d = 3 จะเป็นระบบสมการกำลังสาม $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สามารถสังเกตได้ว่าทุกครั้งที่ค่าพารามิเตอร์ d มีค่าต่างกันจะใช้ฟังก์ชันที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การปรับเส้นโค้งให้เหมาะสมด้วยวิธี Best Fit

สำหรับปัญหานี้พบวิธีแก้ได้ใช้วิธีการปรับเส้นโค้งให้เหมาะสมด้วยวิธีการ Best Fit แบบ Least squares ซึ่งจะเป็นการหาเส้นโค้งด้วยวิธีการผลรวมกำลังสอง โดยวิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งความสัมพันธ์เชิงเส้นและความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่เชิงเส้น

ในกรณีที่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น เมื่อ $d = 1$ สมการที่เหมาะสม คือ $y = ax + b$ ดังนั้น จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ a และ b จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 เพื่อให้ค่า $T = \sum_i (y_i - (b + ax_i))^2$ มีค่าต่ำที่สุด โดยทำการอนุพันธ์เทียบกับ a และ b แล้วทำการแก้สมการหาค่า a และ b ที่ได้แทนในสมการที่ 2.2

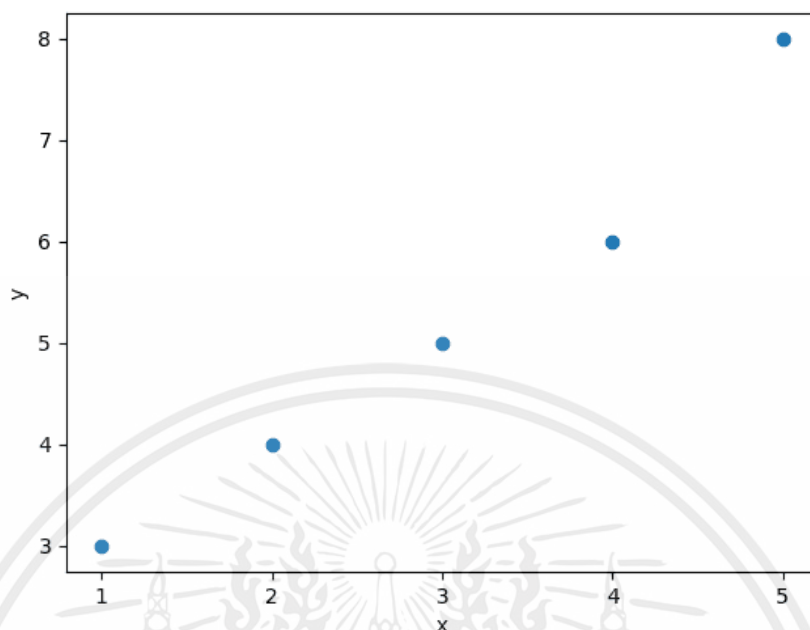
$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial a} &= 0 \\ 2 \sum_i (y_i - (b + ax_i))(-x_i) &= 0 \\ \sum_i x_i y_i &= b \sum_i x_i + a \sum_i x_i^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial b} &= 0 \\ 2 \sum_i (y_i - (b + ax_i))(-1) &= 0 \\ \sum_i y_i &= nb + a \sum_i x_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดย $n =$ จำนวนชุดของข้อมูล

โดยสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้ มีข้อมูลจำนวน 5 ชุด (1, 3), (2, 4), (3, 5), (4, 6), (5, 8) นำข้อมูลจำนวน 5 ชุด ไปพล็อตกราฟในรูปแบบกระจายจะได้ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงข้อมูลแบบกระจาย

ในการหาฟังก์ชันสมการเชิงเส้น $y = ax + b$ ดังนั้น จำเป็นที่จะต้องนำข้อมูลที่มีจำนวน 5 จุด ไปคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.3 และ 2.4 เพื่อหาค่า a และ b จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

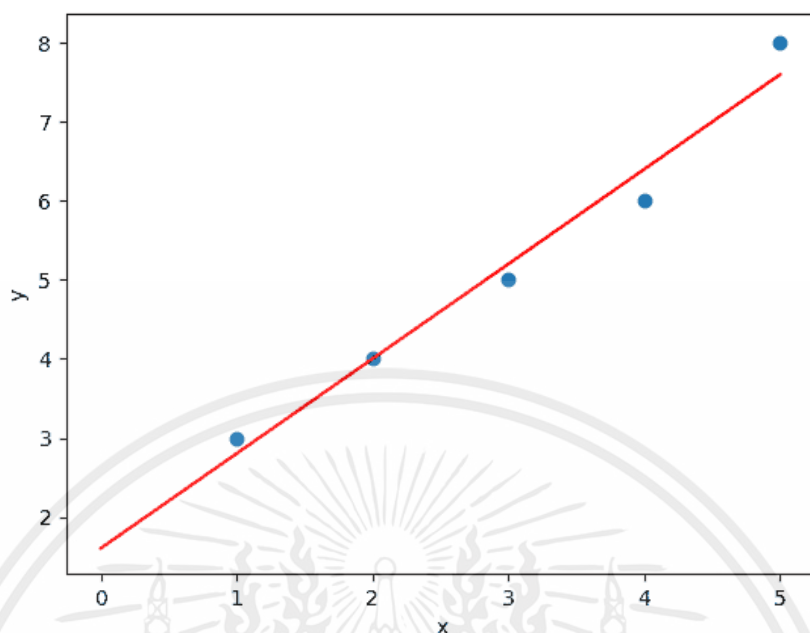
$$90 = 15b + 55a$$

$$26 = 5b + 15a$$

ทำการแก้ระบบสมการแบบสองตัวแปรข้างต้น พบว่า a มีค่าเท่ากับ 1.20 และ b มีค่าเท่ากับ 1.60 ดังนั้น จะได้ฟังก์ชันสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$y = 1.20x + 1.60$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะเห็นว่าเส้นสีแดงมีความสอดคล้องกับจุดสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีจำนวน 5 จุด โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.4 และเส้นสีแดงนี้จะมีระยะห่างจากข้อมูลที่มีข้างต้นน้อยที่สุดตามหลักการของการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมการเชิงเส้นที่เหมาะสม

2.3 เทคนิคการวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด

ค่าความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในเลือดเป็นการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของบุคคลให้ทราบว่ามีเท่าใด และยังช่วยกำหนดวิธีการปฏิบัติต่อผู้มีเมามา และตรวจสอบว่าผู้ทดลองมีอาการเมมาอย่างผิดกฎหมาย เช่น การดื่มสุราขณะอยู่ในทัณฑ์บน หรือดื่มแอลกอฮอล์เกินค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่กฎหมายกำหนดไว้ หรือมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการขับขี่ หรือการทำกิจกรรมที่ต้องการการควบคุมการใช้สติ และสภาวะทางสุขภาพอื่นๆ ซึ่งมีหลายวิธีในการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่ใช้งานกันอยู่มากมาย แต่ในที่นี้จะสรุปเกี่ยวกับวิธีการที่นิยมในการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด ดังนี้

2.3.1 การวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้เลือด

การทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดจากตัวอย่างเลือดโดยทั่วไปถือว่าแม่นยำ และเชื่อถือได้มากที่สุด เหตุผลที่แม่นยำได้มากที่สุด คือ ต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามผลจากการตรวจทางห้องปฏิบัติการสำหรับการตรวจวัดแอลกอฮอล์ในเลือดจะใช้เวลาหลายชั่วโมง บางสถานการณ์อาจใช้เวลาถึงหลายวัน ยิ่งไปกว่านั้นเลือดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บตัวอย่างเลือดที่เพียงพอ และการจัดเก็บที่เหมาะสมอีกด้วย

2.3.2 การวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้ลมหายใจ

การทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดด้วยลมหายใจเป็นวิธีที่พบได้บ่อยที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในเลือด เช่น เครื่องตรวจวัดแอลกอฮอล์ในเลือด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิเคราะห์ลมหายใจของตำรวจที่อาศัยเทคโนโลยีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Fuel Cell) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็ยังไม่ใช่วิธีการทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ที่แม่นยำที่สุด

2.3.3 การวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้น้ำลาย

การทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดด้วยน้ำลายเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วในการวัดแอลกอฮอล์ในเลือด โดยวิธีที่ใช้ในการทดสอบ คือ จะใช้ตัวอย่างน้ำลายบนแถบทดสอบแอลกอฮอล์น้ำลาย หากปริมาณแอลกอฮอล์มีค่าเกินมาตรฐานแถบทดสอบจะเปลี่ยนสี ซึ่งการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยน้ำลายจะไม่สามารถระบุค่าประมาณของระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดได้ สามารถให้ได้แค่ผลลัพธ์เบื้องต้นเท่านั้น

2.3.4 การวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้ปัสสาวะ

การทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยการตรวจปัสสาวะ ซึ่งจะใช้เฉพาะสถานการณ์ที่ไม่สามารถตรวจเลือด หรือลมหายใจได้ นอกจากนี้ ในบรรดาผู้ที่กฎหมายห้ามไม่ให้ดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ หรือไม่ได้รับอนุญาตให้ดื่มตามข้อตกลงของนายจ้าง การตรวจปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยปัสสาวะจะสามารถใช้ยืนยันได้ แต่ผลการทดสอบไม่ได้แม่นยำขนาดนั้น เนื่องจากการทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดโดยใช้ปัสสาวะ สามารถแสดงผลบวก หรือผลลบผิดพลาดได้ [3]

2.4 เอทานอล (Ethanol)

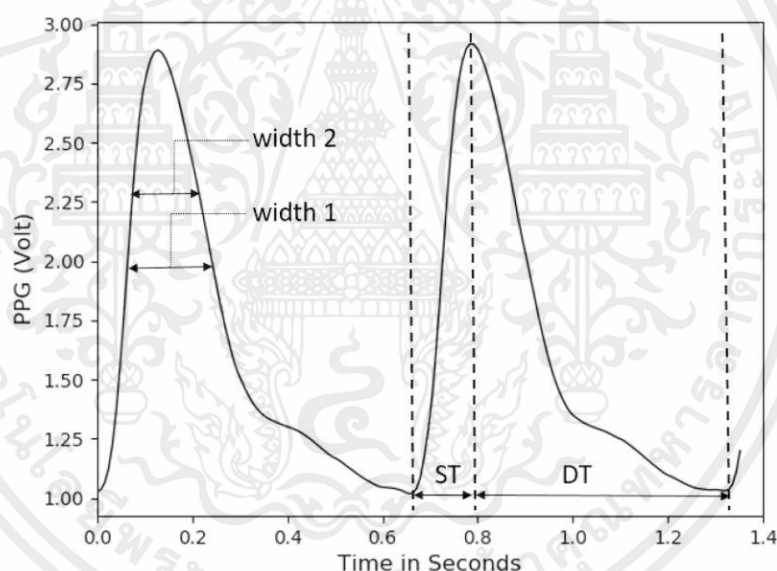
เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์เป็นสารที่พบได้ในแอลกอฮอล์ เมื่อทำการบริโภคแอลกอฮอล์เข้าไปในร่างกาย เอทานอลจะซึมเข้ากระแสเลือดและส่งผลกระทบต่อสัญญาณ PPG ภายในระยะเวลา 30 นาที โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ ซึ่งตามกฎหมายของประเทศไทยฉบับที่ 21 พ.ศ.2550 ได้ระบุไว้ว่า ผู้ขับขี่ที่มีอายุต่ำกว่า 20 ปี, ผู้ขับขี่ที่ถือใบขับขี่ชั่วคราว (แบบ 2 ปี), ผู้ขับขี่ที่มีใบขับขี่ประเภทอื่น, ผู้ขับขี่ที่อยู่ระหว่างการพักใช้ หรือถูกเพิกถอนใบขับขี่ หากพบว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์เกินกว่า 20 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ จะถือว่าเมาแล้วขับ ส่วนผู้ขับขี่ที่มีใบขับขี่ตลอดชีพ หรือใบขับขี่ 5 ปี และมีอายุเกิน 20 ปีบริบูรณ์ หากตรวจพบว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดเกิน 50 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ จะถือว่าเมาแล้วขับ

โดยเครื่องเป่าแอลกอฮอล์ตำรวจจะเป็นเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในร่างกายจากลมหายใจแบบตรวจยืนยันผล (Evidential) โดยจะสามารถตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด และแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขในหน่วย mg/100 ml แต่มักก่อให้เกิดความกังวลด้านสุขอนามัยและการละเมิดสิทธิมนุษยชน [4]

2.5 PPG Signal

2.5.1 หลักการ PPG

PPG Signal คือ สัญญาณที่ได้จากการใช้แสงเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณหลอดเลือดที่อยู่ใต้ผิวหนัง ที่เห็นได้โดยทั่วไป เช่น การวัดค่าออกซิเจนในเลือดโดยใช้ที่หนีบนิ้ว โดยจะใช้แสงของหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) ที่มาจากเซ็นเซอร์ตัวตรวจจับแสง ซึ่งจะอาศัยหลักการทางแสง คือ ปริมาณความเข้มของแสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อจะถูกดูดกลืนโดยเอทานอลในพลาสมาของเลือด ซึ่งพลาสมาจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 940-1040 นาโนเมตร โดยแสงจะถูกดูดกลืนได้ มากที่สุดในบริเวณที่ฉาย LED ลงบนโลหิต แล้วในระยะหัวใจบีบตัว เส้นโลหิตจะมีปริมาณโลหิตมากกว่าระยะหัวใจคลายตัว ทำให้ตัวตรวจจับแสงจับได้ถึงความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปและสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสโลหิตในหลอดเลือดในบริเวณนั้นได้ โดยแสดงลักษณะของสัญญาณ PPG ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.5 [5]



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณ PPG

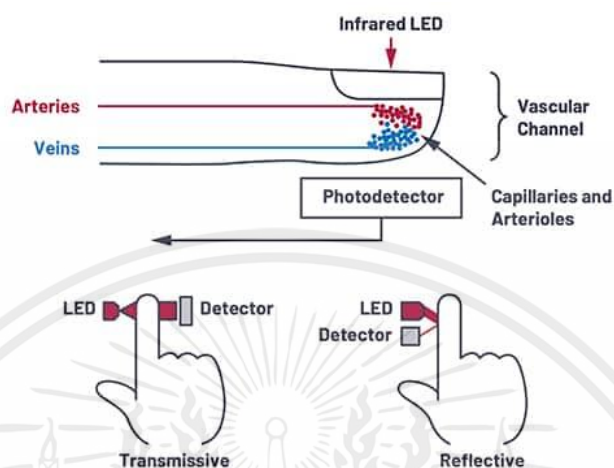
2.5.2 การวัดสัญญาณ PPG

การวัดสัญญาณ PPG มีสองแบบ คือ โหมดส่องผ่าน (transmission mode) และโหมดสะท้อนกลับ (reflectance mode) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงการวัดสัญญาณ PPG แบบโหมดสะท้อนกลับ

การวัดสัญญาณ PPG แบบโหมดสะท้อนกลับ จะใช้หลักการการส่งคลื่นที่ความยาวคลื่นต่างกัน 2 คลื่นความถี่ ซึ่งตัวตรวจจับแสงจะตรวจจับแสงที่สะท้อนจากเนื้อเยื่อ กระดูก หรือเส้นเลือด โดยสามารถตรวจจับได้กับส่วนต่างๆของร่างกายได้อย่างหลากหลาย เช่น นิ้ว แขนท่อนล่าง ท่อนขา หรือข้อมือ เป็นต้น แต่โหมดสะท้อนกลับสามารถถูกรบกวนได้หากผู้วัดเคลื่อนไหวร่างกาย อีกทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ PPG ที่สะท้อนกลับก็อาจจะถูกรบกวนได้หากกดตัวเซ็นเซอร์ด้วยแรงที่มากเกินไปจนทำให้เกิดแรงกดบนหลอดเลือดบริเวณที่ทำการวัดสัญญาณ โดยสามารถแสดงการวัดสัญญาณ PPG ได้ดังรูปที่ 2.6 [6]

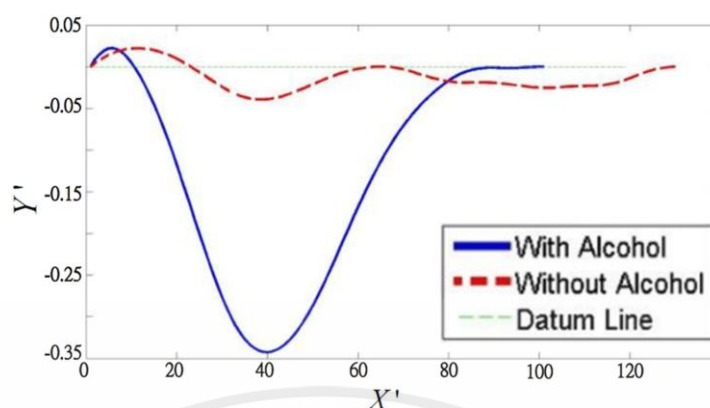


รูปที่ 2.6 การวัดสัญญาณ PPG

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PPG และปริมาณระดับแอลกอฮอล์ในเลือด

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ PPG และปริมาณระดับแอลกอฮอล์ในเลือด เนื่องจากเวลาดื่มแอลกอฮอล์จะกระตุ้นให้หัวใจเต้นเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อหัวใจมีการเต้นเร็วขึ้นก็จะยิ่งสูบฉีดเลือดมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลให้สัญญาณ PPG มีรูปร่างที่เปลี่ยนไป โดยที่สัญญาณ PPG จะแสดงค่า Systolic blood pressure (SBP) คือ ความดันเลือดที่สูงสุดขณะหัวใจห้องล่างบีบตัว และแสดงค่า Diastolic blood pressure (DBP) คือ ความดันเลือดที่ต่ำสุดขณะหัวใจห้องล่างคลายตัว ซึ่งค่าความดันเลือด 2 ค่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อตรวจจับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่เปลี่ยนแปลงได้

จากการทดสอบเปรียบเทียบจุดที่ความดันเลือดสูงสุดไปจนถึงจุดที่ความดันเลือดต่ำสุดของผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์และไม่ดื่มแอลกอฮอล์ พบว่า ผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์กราฟสัญญาณ PPG ที่ได้จะมีความชันมากกว่าผู้ที่ไม่ได้ดื่มแอลกอฮอล์จึงสามารถนำค่าความต่างนี้มาทำการตรวจจับปริมาณระดับแอลกอฮอล์ในเลือดได้ โดยสามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบสัญญาณ PPG ระหว่างผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์และผู้ที่ไม่ดื่มแอลกอฮอล์ ได้ดังรูปที่ 2.7 [7]



รูปที่ 2.7 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ PPG ระหว่างผู้ที่ดื่มแอลกอฮอล์และผู้ที่ไม่ดื่มแอลกอฮอล์

2.7 หลักการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Generate Sine Wave)

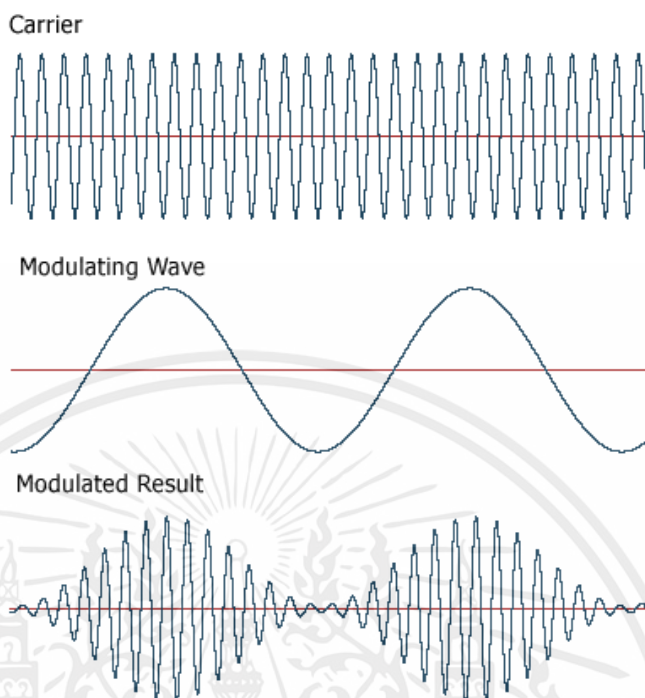
ในปริณญาณิพนธ์นี้ใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน คือ ความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ และความถี่ 190 เฮิร์ตซ์ เพื่อนำไปขับแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด โดยแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดจะมีค่าความยาวคลื่นต่างกัน คือ 940 นาโนเมตร และ 1040 นาโนเมตร ซึ่งสัญญาณไซน์ที่ใช้ขับแหล่งกำเนิดแสงสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การต่อวงจรโดยใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและออปแอมป์ กับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วในที่นี่จะกล่าวถึงการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์

หลักการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถทำได้โดยการสร้างสมการคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้จะออกผ่านขา Digital-to-Analog Converter (DAC) [8]

2.8 หลักการมอดูเลต (Modulation)

การมอดูเลตเป็นการนำสัญญาณพาห์และสัญญาณข่าวสารมาผสมกัน โดยสัญญาณพาห์จะเป็นตัวนำเอาสัญญาณข่าวสารไปยังจุดหมายปลายทาง ซึ่งรูปแบบของการมอดูเลตมีหลายวิธี โดยในที่นี้ขอกล่าวถึงเพียงการมอดูเลตเชิงขนาดแบบเอเอ็ม (Amplitude Modulation)

การมอดูเลตเชิงขนาดแบบเอเอ็มเป็นการนำสัญญาณคลื่นพาห์กับสัญญาณข่าวสารมาผสมกัน โดยที่ไม่ต้องสร้างสัญญาณที่มีความถี่และเฟสตรงกับสัญญาณคลื่นพาห์ แต่คลื่นพาห์ที่นำมาผสมนั้นจะต้องเป็นคลื่นพาห์ที่มีความถี่สูงกว่าสัญญาณข่าวสาร ซึ่งจะทำให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณข่าวสารที่นำมามอดูเลต โดยสามารถแสดงการมอดูเลตเชิงขนาดให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การมอดูเลตเชิงขนาดแบบเอเอ็ม

และสามารถอธิบายการมอดูเลตเชิงขนาดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการต่อไปนี้
โดยที่อธิบายสัญญาณข่าวสารเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.5

$$m(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad (2.5)$$

โดยที่ $m(t)$ คือ ข้อมูลข่าวสาร
 A_m คือ แอมพลิจูดของข้อมูลข่าวสาร
 ω_m คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณข้อมูลข่าวสาร

และสามารถอธิบายสัญญาณคลื่นพาห้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.6

$$c(t) = A_c \cos(\omega_c t) \quad (2.6)$$

โดยที่ $c(t)$ คือ สัญญาณคลื่นพาห้
 A_c คือ แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห้
 ω_c คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณคลื่นพาห้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสัญญาณข้อมูลข่าวสาร (2.5) และสัญญาณคลื่นพาห้ (2.6) เมื่อผ่านกระบวนการมอดูเลตเชิงขนาดแบบเอเอ็มแล้วจะได้สัญญาณเอเอ็มดังสมการที่ 2.7 [9]

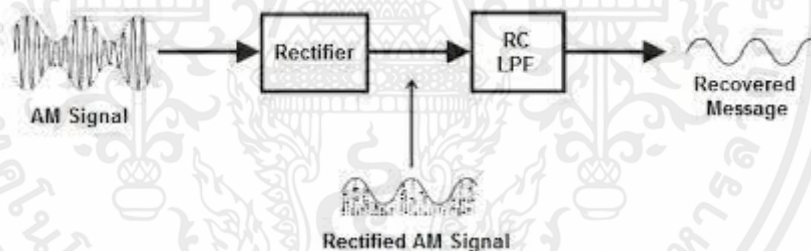
$$\begin{aligned}\varnothing_{AM}(t) &= A_c \cos(\omega_c t) + A_m \cos(\omega_m t) \cos(\omega_c t) \\ \varnothing_{AM}(t) &= [A_c + A_m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t)\end{aligned}\quad (2.7)$$

โดยที่ $\varnothing_{AM}(t)$ คือ สัญญาณเอเอ็ม

2.9 หลักการดีมอดูเลต (Demodulate)

การดีมอดูเลตเป็นการกู้คืนสัญญาณข่าวสารที่ถูกส่งมาในรูปแบบสัญญาณเอเอ็มให้มีความผิดเพี้ยนของข้อมูลข่าวสารให้น้อยที่สุด ซึ่งรูปแบบของการดีมอดูเลตมีหลายวิธี โดยในที่นี้ขอกล่าวถึงเพียงการดีมอดูเลตแบบตรวจจับซิงโครนัสดีเทคชัน (Synchronous Detection)

การดีมอดูเลตแบบตรวจจับซิงโครนัสดีเทคชันสามารถทำได้โดยนำสัญญาณที่มีความถี่และเฟสตรงกันกับสัญญาณของความถี่คลื่นพาห้มาคูณกับสัญญาณเอเอ็ม หรือสัญญาณข่าวสารที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว จากนั้นนำสัญญาณที่ผ่านการคูณแล้วมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จะได้เป็นสัญญาณ $m(t)$ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การดีมอดูเลตแบบตรวจจับซิงโครนัสดีเทคชัน

และสามารถอธิบายการดีมอดูเลตแบบตรวจจับซิงโครนัสดีเทคชันเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\varnothing_{AM}(t) c(t) = [A_c + A_m \cos(\omega_m t)] A_c \left(\frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2} \right) \quad (2.8)$$

จากสมการทางคณิตศาสตร์

$$\cos^2\theta = \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} \quad (2.9)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.9 แทนในสมการ 2.8 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\varnothing_{AM}(t)c(t) &= [A_c + A_m \cos(\omega_m t)] A_c \left(\frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2} \right) \\
&= [A_c^2 + A_m A_c \cos(\omega_m t)] \left(\frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2} \right) \\
&= \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_c^2 \cos(2\omega_c t)}{2} + \frac{A_m A_c \cos(\omega_m t)}{2} \\
&\quad + \frac{A_m A_c \cos(\omega_m t) \cos(2\omega_c t)}{2}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

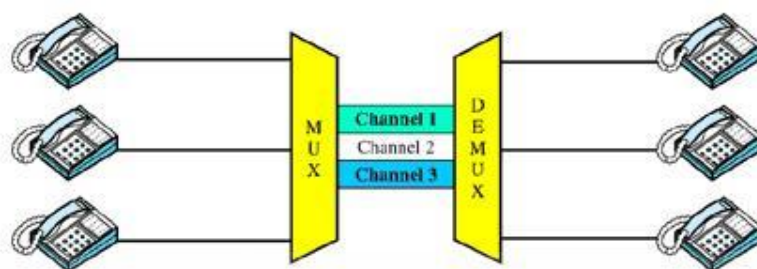
จากสมการที่ 2.10 คือ ผลจากการตีมอดูเลตที่ได้จากการคูณสัญญาณเอเอ็มกับคลื่นพาห์ โดยเมื่อนำผลจากการตีมอดูเลตจากสมการที่ 2.10 มาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้เป็นสัญญาณข้อมูลข่าวสาร [10]

2.10 หลักการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (Multiplexing)

ในการสื่อสารจำเป็นต้องมีการส่งสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณผ่านทางตัวกลางตัวเดียวกัน โดยตัวกลางนั้นจะมีความสามารถในการรับและแยกสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณออกจากกันได้ ซึ่งการรวมของสัญญาณจะเรียกว่าการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ และการแยกสัญญาณออกจากกันจะเรียกว่าการตีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (Demultiplexing) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงการมัลติเพล็กซ์แบบการรวมส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ คือ การส่งสัญญาณจากผู้ส่งหรือสถานีส่งจำนวนหลาย ๆ สถานีไปในช่องสัญญาณเดียวกัน ด้วยการใช้นิยามเทคนิคแบบแอนะล็อกที่เกี่ยวกับช่องสัญญาณของสัญญาณ โดยสัญญาณต่าง ๆ จะสร้างขึ้นด้วยการทำมอดูเลต (Modulate) กับพาหะที่มีความถี่ต่างกัน กล่าวคือ เป็นการแบ่งความถี่ของช่องสัญญาณของสถานีส่งสัญญาณออกเป็นช่องสัญญาณหรือช่องความถี่ย่อย ๆ สำหรับนำข้อมูลของแต่ละสถานีส่ง ซึ่งแต่ละสถานีส่งจะส่งข้อมูลภายในช่องสัญญาณหรือความถี่ที่ได้รับเท่านั้น และระหว่างช่องความถี่จะมีแถบความถี่ค้ำ (Guard Band) เพื่อป้องกันไม่ให้แต่ละช่องความถี่เกิดการแทรกแซงสัญญาณระหว่างกัน ตัวอย่างของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ เช่น การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุกระจายเสียง โทรทัศน์ โทรศัพท์เซลลูลาร์แบบแอนะล็อกและเพจเจอร์ บริเวณสถานีส่งจะมีอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เซอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการรับสัญญาณข้อมูลจากสถานีส่งแต่ละสถานีและส่งสัญญาณไปยังย่านความถี่ของสถานีต่าง ๆ ผ่านสายส่งเพื่อไปยังสถานีปลายทาง ในขณะที่สถานีปลายทางจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าตีมัลติเพล็กซ์เซอร์ ซึ่งจะทำการแยกสัญญาณคืนกลับตามย่านความถี่ให้สอดคล้องกับสถานีต้นทาง สำหรับตัวกลาง หรือช่องทางที่ใช้สื่อสารร่วมกันนั้นสามารถเป็นได้ทั้งสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ รวมถึงคลื่นวิทยุไมโครเวฟ โดยแสดงการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.10 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



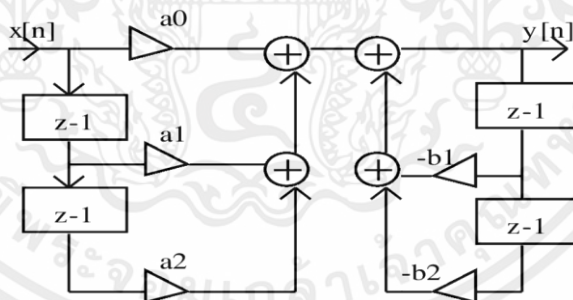
รูปที่ 2.10 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

2.11 ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข (Digital Filter)

ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข คือ ตัวกรองที่อาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการวิเคราะห์และการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งตัวกรองสัญญาณเชิงเลขจะมี 2 แบบ คือ ตัวกรองสัญญาณเชิงเลขระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response) และตัวกรองสัญญาณเชิงเลขระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response System) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงเพียงตัวกรองสัญญาณเชิงเลขระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

2.11.1 ระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

สามารถอธิบายโครงสร้างระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

จากโครงสร้างระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกได้ดังสมการที่ 2.11

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N_b-1} b_i x(n-i) - \sum_{j=1}^{N_a-1} a_j y(n-j) \quad (2.11)$$

โดยที่ $x(n)$ คือ สัญญาณขาเข้า
 $y(n)$ คือ สัญญาณขาออก
 a_j, b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

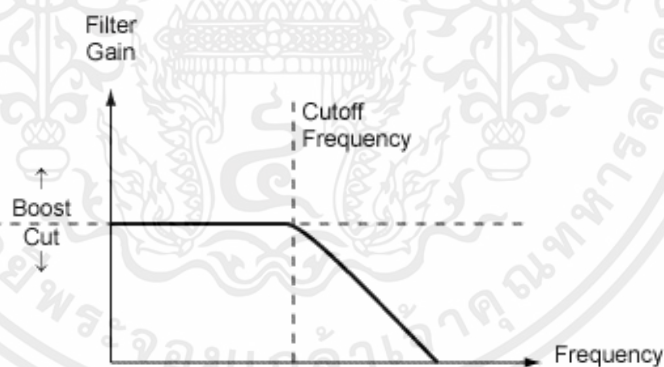
N_a, N_b คือ อันดับของระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

จะเห็นได้ว่าสัญญาณขาออก $y(n)$ เกิดจากผลรวมของสัญญาณขาเข้าก่อนหน้า $x(n-i)$ คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด b_i โดยที่ $i=0, 1, \dots, N_b-1$ รวมกับผลรวมของสัญญาณขาออกก่อนหน้า $y(n-j)$ คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด a_j โดยที่ $j=1, 2, \dots, N_a-1$

2.11.1.1 หลักการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

การกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นการยอมให้สัญญาณที่ความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่สูงกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.12 โดยการกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การต่อวงจรโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ กับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วในที่นี่จะกล่าวถึงการใช้อิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างการกรองความถี่ต่ำผ่าน

การสร้างการกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อกรองสัญญาณแบบอนาล็อก (analog signal) ที่ได้รับจากหน่วย Analog-to-Digital Converter (ADC) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการหรือสัญญาณที่มีความถี่สูง สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันลดทอนสัญญาณรบกวนแบบลูปได้ [12]



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่วงจกรองความถี่ต่ำผ่าน

โดยสามารถแสดงฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองได้ดังสมการที่ 2.12

$$H_{LPF}(s) = \frac{H_0 \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.12)$$

โดยที่ $H_{LPF}(s)$ คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ω_0 คือ ความถี่ตัดเชิงมุม

Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถนำมาออกแบบสมการวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองได้ดังนี้

$$H_{LPF}(s) = \frac{H_0 \omega_0^2}{\left(s + \frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2} \right) \left(s + \frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2} \right)} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} H_{LPF}(Z) &= \frac{H_0 \omega_0^2}{\left(1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1} \right) \left(1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1} \right)} \\ &= \frac{H_0 \omega_0^2}{1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1}} - \frac{\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}}{1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{H_0 \omega_0^2}{1 - e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1} 2 \left(\frac{e^{\frac{j\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}} + e^{-\frac{j\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}}}{2} \right) + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}} \\ \frac{y(Z)}{x(Z)} &= \frac{H_0 \omega_0^2}{1 - e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1} 2 \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$y(Z) = x(Z) H_0 \omega_0^2 + y(Z) e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1} 2 \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) - y(Z) e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2} \quad (2.16)$$

$$y(n) = H_0 \omega_0^2 x(n) + 2e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) y(n-1) - e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} y(n-2) \quad (2.17)$$

โดยที่ $x(n)$ คือ สัญญาณขาเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

$y(n)$ คือ สัญญาณขาออกวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

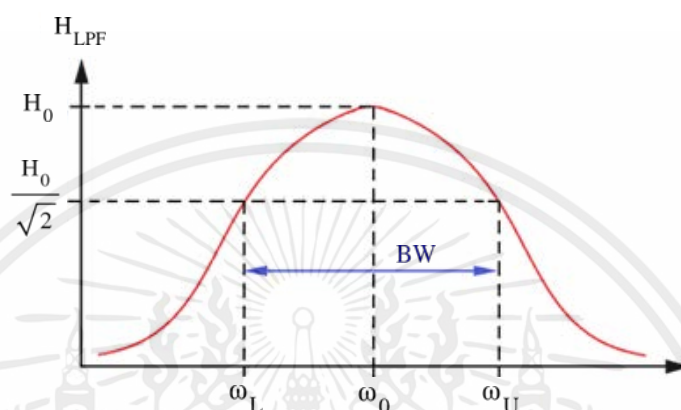
2.11.1.2 หลักการกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band-pass filter)

การกรองสัญญาณช่วงความถี่เป็นการให้ผ่านเฉพาะสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ที่กำหนด ส่วนสัญญาณที่อยู่นอกช่วงความถี่นั้นจะถูกลดทอนลงตามลำดับ โดยส่วนใหญ่ใช้ในเครื่องรับและส่งสัญญาณไร้สาย แต่ก็มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ ด้านของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถทำได้ 2 แบบ คือ การต่อวงจรโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจู่กับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการกรองสัญญาณช่วงความถี่

การกรองสัญญาณช่วงความถี่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันฟังก์ชันวงจรรวมดิจิทัลหรือ Digital Control Systems โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.13 [13]



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่วงจรรองสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าจุดที่มีการตอบสนองสูงที่สุดจะอยู่ในช่วงความถี่ตัด (Cutoff Frequency: ω_0) ส่วนจุดที่มีการตอบสนองลดลงมา $\frac{H_0}{\sqrt{2}}$ จะอยู่ในช่วงต่ำกว่าความถี่ตัด (Lower Cutoff Frequency: ω_L) และในช่วงสูงกว่าความถี่ตัด (Upper Cutoff Frequency: ω_U) ซึ่งผลต่างระหว่างช่วงต่ำกว่าความถี่ตัดและช่วงที่สูงกว่าความถี่ตัด เรียกว่า แบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างความถี่ตัดกับแบนด์วิดท์ เรียกว่า ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q) โดยสามารถแสดงฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรรองสัญญาณช่วงความถี่อันดับสองได้ดังสมการที่ 2.18

$$H_{BPF}(s) = \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (2.18)$$

โดยที่ $H_{BPF}(s)$ คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรรองสัญญาณช่วงความถี่

ω_0 คือ ความถี่ตัดเชิงมุม

Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ

จากฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถนำมาออกแบบสมการวงจรรองสัญญาณช่วงความถี่อันดับสองได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{\text{BPF}}(s) = \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} s}{\left(s + \frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2} \right) \left(s + \frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2} \right)} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{BPF}}(Z) &= \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1})}{\left(1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1} \right) \left(1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1} \right)} \\ &= \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1})}{1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1}} - \frac{\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s Z^{-1} + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}}{1 - e^{-\left(\frac{\omega_0}{Q} - \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)^2 - 4\omega_0^2}\right) T_s} Z^{-1}}} \\ &= \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1})}{1 - e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1/2} \left(e^{\frac{j\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}} + e^{-\frac{j\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}} \right) + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}} \\ &= \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1})}{1 - e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1/2} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\frac{y(Z)}{x(Z)} = \frac{\frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1})}{1 - e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1/2} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) + e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2}} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} y(Z) &= x(Z) \frac{H_0 \omega_0}{Q} (1-Z^{-1}) + y(Z) e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} Z^{-1/2} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) \\ &\quad - y(Z) e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} Z^{-2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} y(n) &= \frac{H_0 \omega_0}{Q} (x(n) - x(n-1)) + 2e^{-\frac{\omega_0}{2Q} T_s} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q}\right)^2}}{2}\right) y(n-1) \\ &\quad - e^{-\frac{\omega_0}{Q} T_s} y(n-2) \end{aligned} \quad (2.23)$$

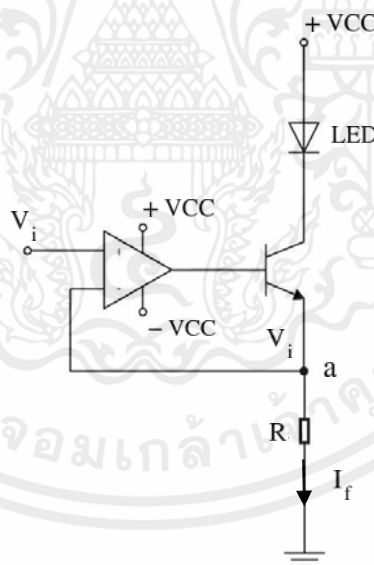
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $x(n)$ คือ สัญญาณขาเข้าของวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่
 $y(n)$ คือ สัญญาณขาออกของวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่

2.12 วงจรที่เกี่ยวข้องในปริภูมิอนุพันธ์

2.12.1 วงจรขับไดโอดเปล่งแสง (LED Driver Circuits)

วงจรขับไดโอดเปล่งแสง (LED Driver Circuit) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุมส่วนประกอบอื่นๆ ของวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์กำลังสูง หน้าจอแสดงผล LCD หน่วยความจำ เป็นต้น โดยปกติจะใช้เพื่อควบคุมกระแสที่ไหลผ่านวงจรและควบคุมอุปกรณ์บางอย่างในวงจร ซึ่งในปริภูมิอนุพันธ์นี้ใช้วงจรขับไดโอดเปล่งแสง แสดงดังรูปที่ 2.14 เพื่อควบคุมการทำงานของ IR LED โดยวงจรประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกควบคุมให้ทำงานเป็นสวิตช์ คือ หากสัญญาณอินพุตเป็นศูนย์จะทำให้แรงดันตกคร่อมขาเบสและขาอีมีเตอร์ น้อยกว่า 0.7V ทรานซิสเตอร์จะทำงานในโหมด cut-off ทำให้ LED ไม่ส่องสว่าง และหากสัญญาณอินพุตไม่เป็นศูนย์จะทำให้แรงดันตกคร่อมขาเบสและขาอีมีเตอร์มากกว่า 0.7V ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมด Saturation ส่งผลให้ LED ส่องสว่าง โดยแสดงวงจรขับไดโอดเปล่งแสงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.14 [14]



รูปที่ 2.14 วงจรขับไดโอดเปล่งแสง

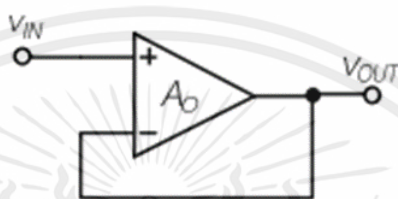
จากรูปที่ 2.14 พิจารณาที่โหนด a สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.24

$$R = \frac{V_i}{I_f} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer Circuits)

วงจรบัฟเฟอร์ คือ วงจรที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันอินพุตไปยังเอาต์พุตโดยไม่มีการลดทอนค่าแรงดันไฟฟ้า คุณสมบัติที่สำคัญของวงจรบัฟเฟอร์ คือ อัตราขยายวงจรมีค่าเท่ากับหนึ่ง ค่าความต้านทานอินพุตสูงมากและค่าความต้านทานเอาต์พุตมีค่าน้อยมาก เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) สูงนิยมใช้เชื่อมต่อระหว่างสองวงจร เพื่อช่วยให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ โดยแสดงลักษณะของวงจรบัฟเฟอร์ที่สร้างจากออปแอมป์ (Op-Amp) ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.15 [15]



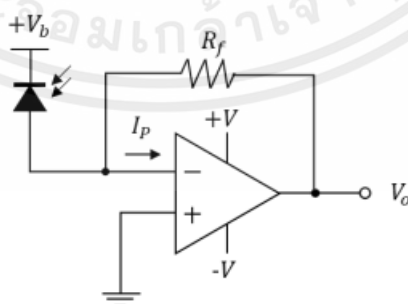
รูปที่ 2.15 วงจรบัฟเฟอร์

จากรูปที่ 2.15 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.25

$$V_{out} = V_{in} \quad (2.25)$$

2.12.3 วงจรขยายทรานอิมพีแดนซ์ (Transimpedance Amplifier)

การแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเซนเซอร์ตัวตรวจจับแสงให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า จะใช้วงจรขยายทรานอิมพีแดนซ์ (Transimpedance Amplifier) ซึ่งเป็นวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า ในวงจรมีการใช้งานออปแอมป์โดยที่ลักษณะของวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยแสดงวงจรขยายทรานอิมพีแดนซ์ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.16 [16]



รูปที่ 2.16 วงจรขยายทรานอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 2.16 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.26

$$V_{out} = -R_f \times I_p \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสง คือ สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แล้วปล่อยแสงสว่างออกมาได้ทันที โดยไดโอดเปล่งแสงจะเป็นหลอดไฟขนาดเล็กหลากสี เช่น สีแดง สีน้ำเงิน ดังรูปที่ 2.17 ต่อมา มีการปรับแก้ด้วยการนำหลอดไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินไปเคลือบเรืองแสงสีเหลือง จึงทำให้แสงจากหลอดไดโอดเปล่งแสงส่องออกมาเป็นสีขาว และสามารถใช้เป็นหลอดไฟส่องสว่างได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น [17]



รูปที่ 2.17 หลอดไฟ LEDs

2.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นบอร์ดพัฒนาสำเร็จรูปที่รองรับการเชื่อมต่อไวไฟ (Wi-Fi) และบลูทูธรุ่น 4.2 (Bluetooth 4.2 BLE) ผลิตโดยบริษัท Espressif จากประเทศจีน รองรับการใช้งานโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Arduino IDE มีการใช้งานง่ายและราคาถูก บอร์ดชนิดนี้มีการผลิตออกมาให้ใช้งานหลากหลายรุ่น ทั้ง ESP32-DevKitC, ESP-WROVER-KIT และ ESP32-PICO-KIT เป็นต้น โดยบอร์ดที่เป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน คือ ESP WROOM-32 Chip ซึ่งเป็นบอร์ดรุ่นแรกที่ถูกผลิตขึ้น มีการทำงานแบบสองคอร์ (Dual Core) ที่มีความเร็ว 240 เมกะเฮิร์ตซ์ มีขนาดของแรม 512 กิโลไบต์ และมีให้เลือกใช้งานทั้งรุ่น 30 ขา และ 36 ขา สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ โดยภายนอกมีลักษณะดังรูปที่ 2.18 และในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จำเป็นต้องจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ [18]



รูปที่ 2.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 LM324N

LM324N เป็นอุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีกำลังสูงขึ้น (Amplifier) สำหรับการทำงานออปแอมป์ โดยมีออปแอมป์สี่ตัวที่มีลักษณะเหมือนกันประกอบในแพ็คเกจเดียว ซึ่งทำงานจากแหล่งพลังงานเดียวกัน ด้วยลักษณะเฉพาะและต้นทุนต่ำของอุปกรณ์ตัวนี้ทำให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในวงจรวิทยุสมัครเล่นและในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการทำงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาขนาดกะทัดรัด โดยแสดงลักษณะภายนอกดังรูปที่ 2.19 [19]



รูปที่ 2.19 LM324N

2.16 ตัวตรวจจับแสง

ตัวตรวจจับแสงเป็นอุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N รอยต่อจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้ เช่น กระจกใส ตัวตรวจจับแสงจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ตอบสนองต่อแสงที่เรามองเห็น และแบบที่ตอบสนองต่อแสงในย่านอินฟราเรด ในการใช้งานจะต้องต่อตัวตรวจจับแสงในลักษณะไบอัสกลับ

ตัวตรวจจับแสงจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง เมื่อตัวตรวจจับแสงได้รับไบอัสกลับด้วยแรงดันค่าหนึ่ง และมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ ถ้าแสงที่มาตกกระทบมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะมีกระแสไหลในวงจร โดยกระแสที่ไหลในวงจรจะแปรผกผันกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ ลักษณะทั่วไปขณะไบอัสตรงจะยังคงเหมือนกับไดโอดธรรมดา คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ โดยแสดงลักษณะภายนอกดังรูปที่ 2.20 [20]



รูปที่ 2.20 ตัวตรวจจับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 2N2221A

ทรานซิสเตอร์ 2N2221A เป็นคอมโพเนนต์แบบ NPN (Negative-Positive-Negative) ที่ใช้ในแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือเครื่องขยายสัญญาณขนาดเล็ก โดยแสดงลักษณะภายนอกดังรูปที่ 2.21 และมีลักษณะดังนี้

ชนิดและโครงสร้าง : 2N2221A เป็นทรานซิสเตอร์แบบ NPN ที่ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ มีโครงสร้างทางขาที่มีสามส่วนหลัก คือ Emitter, Base, Collector ต่อเนื่องจากกัน โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจาก Emitter ไปยัง Collector ก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่ Base เพียงพอที่จะเปิดทางให้กระแสไฟฟ้าผ่าน Emitter-Base junction

การทำงาน : ในการใช้งานเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์แบบ NPN นี้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้านำไปสู่ขั้ว Base อย่างเล็กน้อย จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทาง Collector ไปยัง Emitter อย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวขยายกระแสไฟฟ้า ในสถานการณ์ที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ จะไหลผ่าน Base หรือกระแสเล็กน้อยมาก ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสถานะปิด ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเลยระหว่าง Collector และ Emitter

การใช้งาน : สามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการขยายสัญญาณขนาดเล็ก เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเสียง หรือวงจรที่ต้องการควบคุมและขับเคลื่อนความแรงกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ [21]



รูปที่ 2.21 2N2221nA

2.18 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดและเก็บผลข้อมูลนั้นจำเป็นมากที่จะต้องมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำการวัด ดังนั้น เครื่องวัดจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพ และประสิทธิภาพของการทำงานว่ามีความน่าเชื่อถือมากพอที่จะรวบรวมข้อมูลให้มีความเที่ยงตรงหรือไม่ ซึ่งเครื่องมือวัดที่ดีจะมีคุณสมบัติหลายอย่าง แต่ในที่นี้ขอกกล่าวถึงคุณสมบัติ 2 ข้อ คือ ค่าความเที่ยงตรง (Accuracy) และค่าความแม่นยำ (Precision)

2.18.1 ค่าความเที่ยงตรง

ค่าความเที่ยงตรง คือ ค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ถูกต้อง โดยสามารถคำนวณหาค่าความเที่ยงตรงได้จากสมการที่ 2.27

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Measure} - \text{Standard}}{\text{Standard}} \right| \times 100$$

$$\% \text{ Accuracy} = 100 - \% \text{ Error} \quad (2.27)$$

โดยที่ Accuracy คือ ค่าความเที่ยงตรง

Error คือ ค่าความผิดพลาด

Measure คือ ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ

Standard คือ ค่าที่ถูกต้อง

2.18.2 ค่าความแม่นยำ

ค่าความแม่นยำ คือ ค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งเมื่อทำการวัดหลายๆครั้งจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถคำนวณหาค่าความแม่นยำได้จากสมการที่ 2.28

$$\% \text{ Precision} = \mu \pm \frac{\sum |x - \mu|}{n} \quad (2.28)$$

โดยที่ x คือ ค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดในแต่ละครั้ง

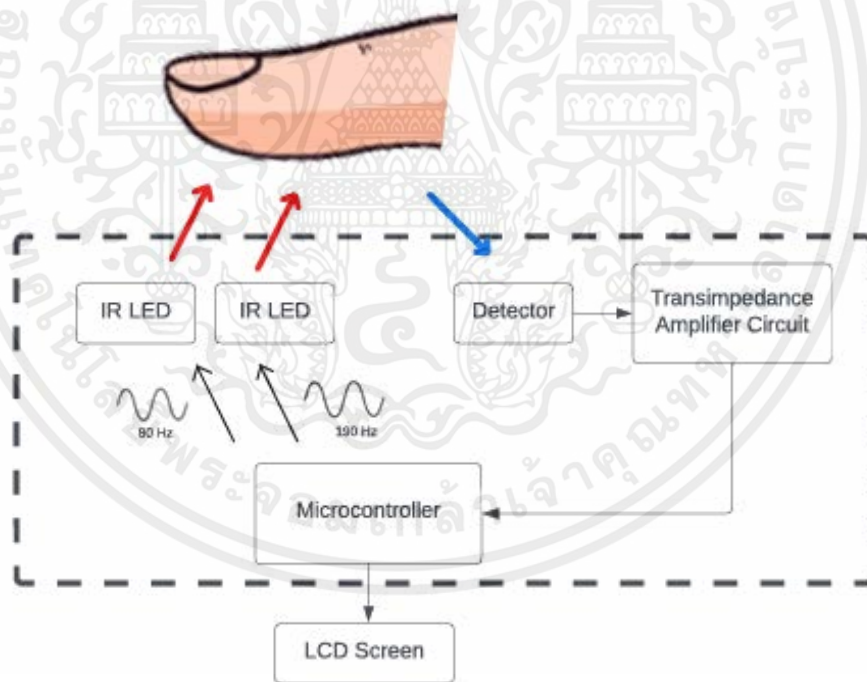
μ คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด

n คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัด

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปฏิญานิพนธ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของระบบวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกล้ำที่มีการแสดงผลบนหน้าจอ โดยหลักการการทำงานของอุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่น PPG จะเริ่มจากเมื่อนำนิ้วมือมาวางบนเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณและเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณ และจะมีเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณจำนวน 2 ตัว จะทำหน้าที่ปล่อยคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันคือ ที่ 940 นาโนเมตร และที่ 1040 นาโนเมตร โดยคลื่นทั้งสองนี้จะสะท้อนผ่านเลือดในเวลาเดียวกันไปยังเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณ ซึ่งสัญญาณ PPG ที่ได้จะถูกมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด จากนั้นจะถูกมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ แล้วสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อประมวลผลหาค่าอัตราการดูดซับ และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด โดยการประมวลผลทั้งหมดจะถูกกระทำบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นส่งข้อมูลที่ได้แสดงผลบนหน้าจอ LCD โดยสามารถแสดงแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมหลักการการทำงานของระบบวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกล้ำที่มีการแสดงผลบนหน้าจอ

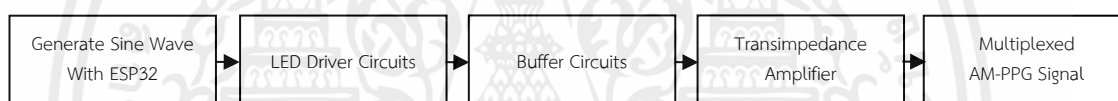
3.1 การออกแบบ

ในส่วนของการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1.1 การออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์

3.1.1.1 การออกแบบอุปกรณ์วัดสัญญาณ PPG

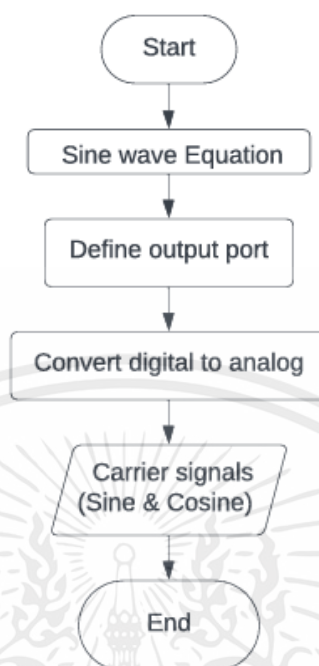
ในส่วนของอุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่น PPG จะประกอบไปด้วยวงจรย่อยดังรูปแบบบล็อกไดอะแกรมที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วย การสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 โดยจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณคลื่นพาห์เพื่อขับแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด วงจรขับไดโอดเปล่งแสง ทำหน้าที่ขับหลอด LED วงจรบัฟเฟอร์ซึ่งสร้างจากออปแอมป์ จะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันอินพุตไปยังเอาต์พุต โดยจะเป็นตัวเชื่อมระหว่างวงจรขับไดโอดเปล่งแสงกับวงจรขยายทรานซิมพีแดนซ์ และวงจรขยายทรานซิมพีแดนซ์ ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ต่อไป



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบอุปกรณ์วัดสัญญาณ PPG

1) การออกแบบและสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

การออกแบบและสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 สามารถทำได้โดยการสร้างสมการคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งผู้จัดทำต้องการสัญญาณคลื่นรูปไซน์ 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน คือ ความถี่ 80 เฮิรตซ์ และความถี่ 190 เฮิรตซ์ ซึ่งแผนผังการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ทั้ง 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ทั้ง 2 สัญญาณที่มีความถี่ต่างกันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

2) การออกแบบและสร้างวงจรขับไดโอดเปล่งแสง

การออกแบบและสร้างวงจรขับไดโอดเปล่งแสงจะใช้วงจรขับไดโอดเปล่งแสงเพื่อทำหน้าที่ขับหลอด LED และวงจรบัฟเฟอร์เพื่อให้แรงดันมีค่าคงที่ โดยใช้อปแอมป์สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่จะเป็นตัวสร้างสัญญาณอินพุตให้กับวงจร ซึ่งสามารถหาค่า R1 และ R2 ในรูปที่ 3.4 ได้จากสมการที่ 2.24 โดย $V_i = 2.4 \text{ V}$ และเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้ไดโอดเปล่งแสงทำงานอยู่ในช่วง 10-30 mA ดังนั้น เราจึงเลือกใช้ค่า $I_f = 24 \text{ mA}$

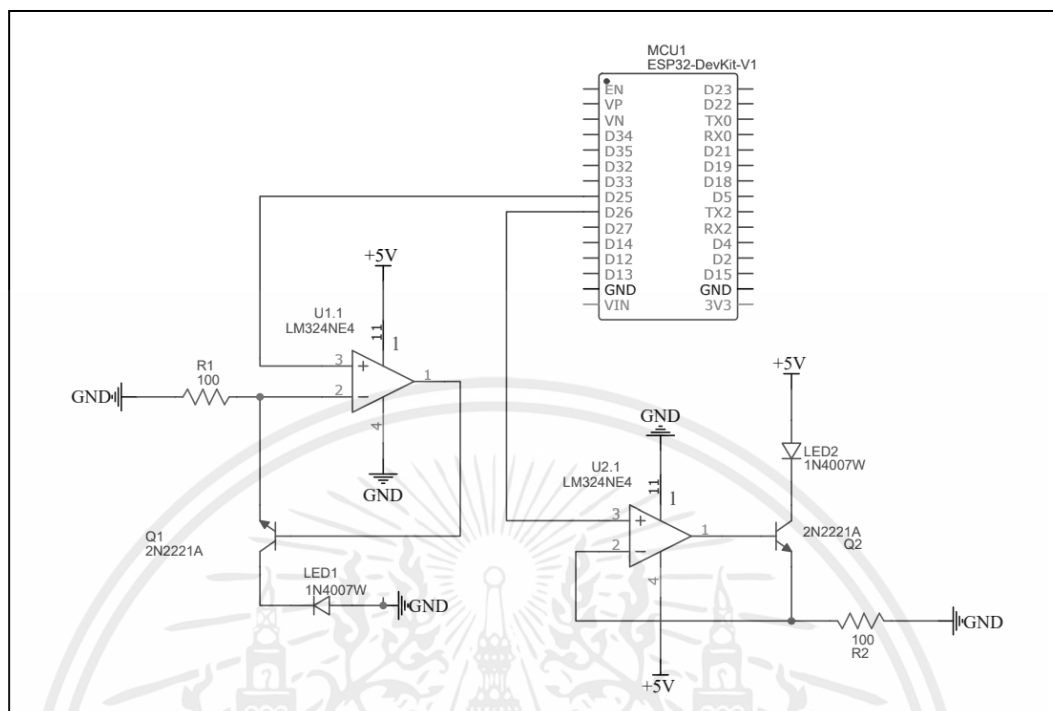
$$R1 = R2 = \frac{V_i}{I_f}$$

$$R1 = R2 = \frac{2.4}{24 \times 10^{-3}}$$

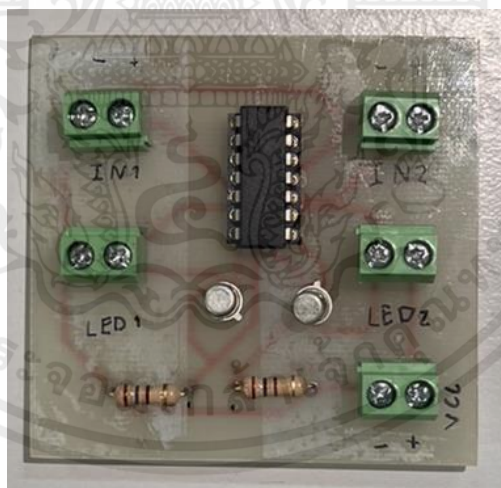
$$R1 = R2 = 100 \Omega$$

ทำการออกแบบวงจรในเว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งสามารถแสดงแผนผังของวงจรขับไดโอดเปล่งแสงได้ดังรูปที่ 3.4 แล้วนำลายวงจรพิมพ์ที่ได้ไปทำการกัดปรินต์บนแผ่นทองแดง จากนั้นใส่อุปกรณ์แล้วทำการบัดกรี ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แผนผังของวงจรขับไดโอดเปล่งแสง



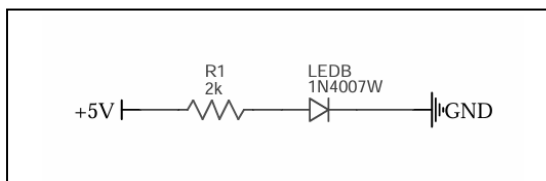
รูปที่ 3.5 วงจรขับไดโอดเปล่งแสงที่สร้างเสร็จแล้ว

3) การออกแบบและสร้างวงจรฝั่งภาครับ

การออกแบบและสร้างวงจรฝั่งภาครับจะใช้ตัวต้านทานในการออกแบบ เพื่อมาลดกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากเซนเซอร์ตัวตรวจจับแสง ซึ่งจะออกแบบโดยกำหนดให้ $R = 2 \text{ k}\Omega$ แล้วทำการออกแบบในเว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งสามารถแสดงแผนผังของวงจรฝั่งภาครับได้ดังรูปที่ 3.6 แล้วนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลายวงจรพิมพ์ที่ได้ไปทำการกัดปรินบนแผ่นทองแดง จากนั้นใส่อุปกรณ์แล้วทำการบัดกรี ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



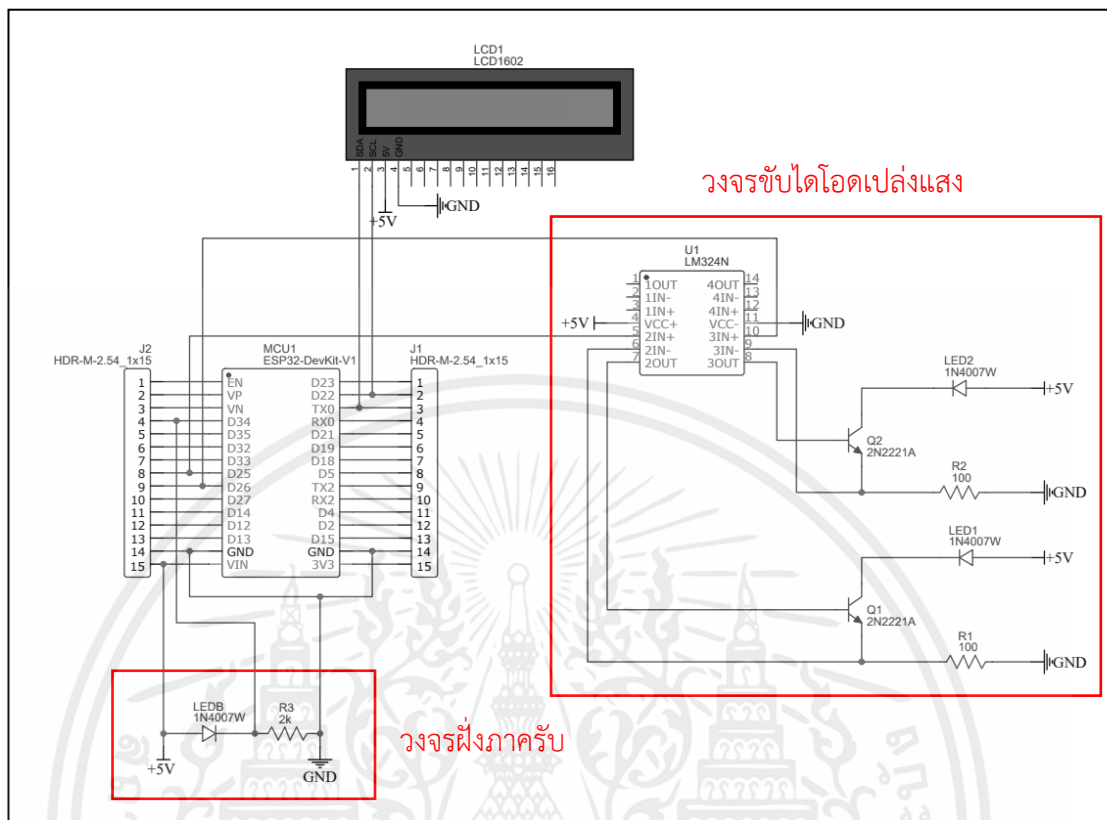
รูปที่ 3.6 แผนผังของวงจรฝังภาครับ



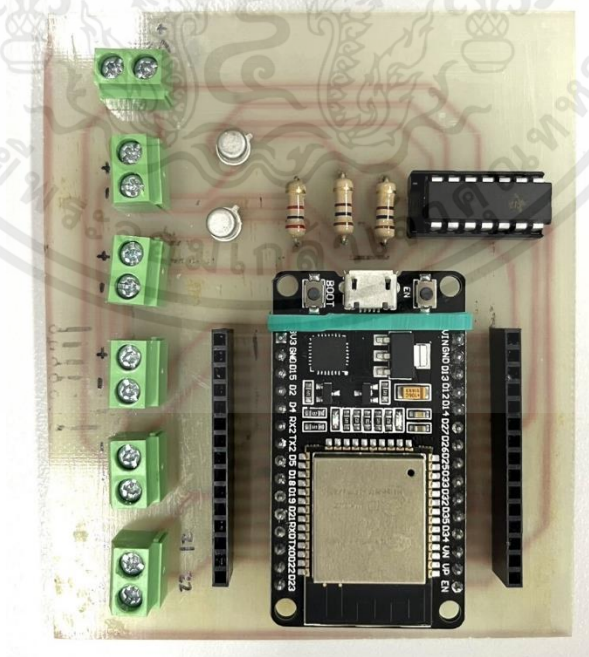
รูปที่ 3.7 วงจรฝังภาครับที่สร้างเสร็จแล้ว

4) การออกแบบและสร้างวงจรรวมของระบบทั้งหมด

ทำการรวมวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วทำการต่อวงจรรวมเข้ากับจอแสดงผล ซึ่ง จะทำการออกแบบวงจรในเว็บไซต์ EasyEDA โดยสามารถแสดงแผนผังการรวมวงจรได้ดังรูปที่ 3.8 และแสดงวงจรที่ทำการกัดปรินและบัดกรีแล้วได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนผังการรวมวงจร



รูปที่ 3.9 วงจรรวมที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบส่วนของซอฟต์แวร์

3.1.2.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรมสร้างและเก็บสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรม Arduino IDE เพื่อสร้างและเก็บสัญญาณไซน์ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งโปรแกรมจะเริ่มจากกำหนดเงื่อนไขตัวแปร n ให้เริ่มต้นที่ 1 ไปจนถึง 7500 แล้วทำการตรวจสอบค่าตัวแปร n จากนั้นนำค่าตัวแปร n ที่ได้ไปแทนค่าในสมการสร้างสัญญาณไซน์ดังสมการที่ 3.1

$$IR = 128 + (20 * \sin(n\theta)) \quad (3.1)$$

โดยที่

IR คือ สัญญาณไซน์

128 คือ ค่าครึ่งหนึ่งของค่า DAC ที่มีความละเอียด 8 บิต เป็นค่า offset เพื่อไม่ให้ข้อมูลเป็นค่าติดลบ

20 คือ ค่าที่เป็นกำลังขยายของสัญญาณ

$\theta = \frac{50\pi}{180}$ คือ ค่าที่ทำให้สัญญาณไซน์มีค่าเท่ากับ 190 เฮิรตซ์

$\theta = \frac{21\pi}{180}$ คือ ค่าที่ทำให้สัญญาณไซน์มีค่าเท่ากับ 80 เฮิรตซ์

ออกแบบสัญญาณไซน์ของเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณความถี่ตัวแรก โดยกำหนดให้ $\theta = \frac{50\pi}{180}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.2

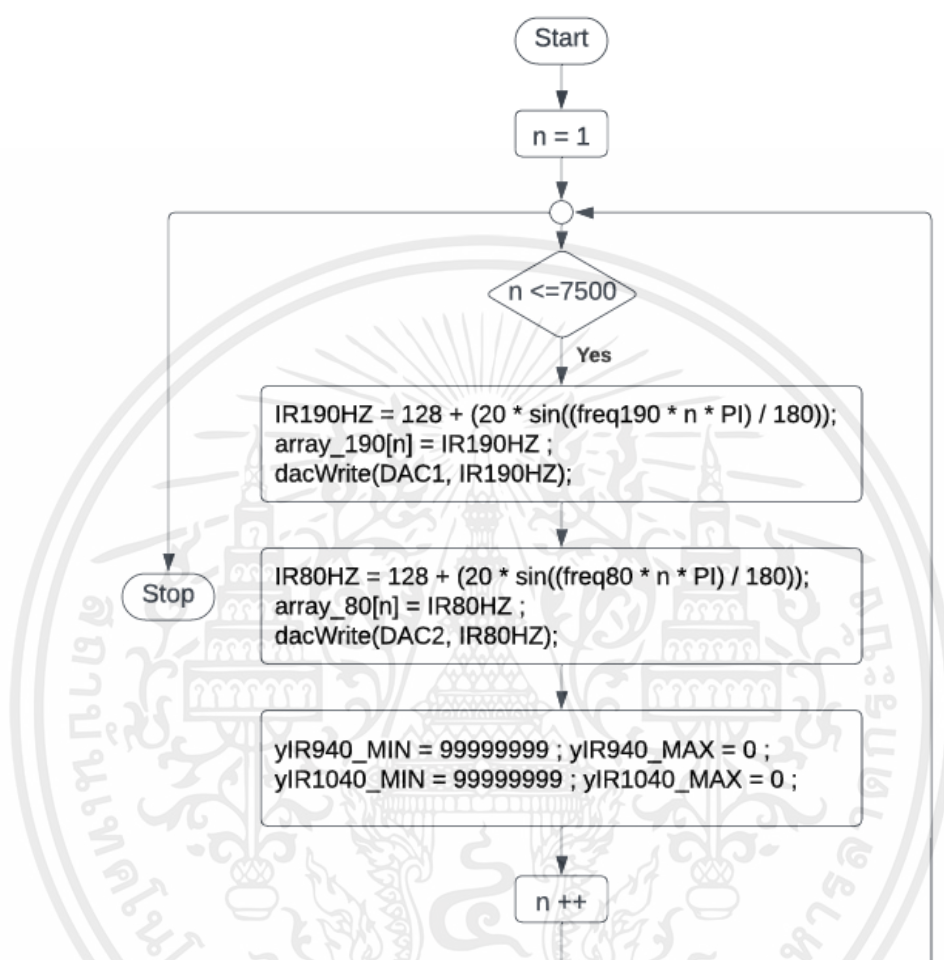
$$IR = 128 + \left(20 * \sin\left(\frac{50\pi n}{180}\right)\right) \quad (3.2)$$

จะได้ค่าสัญญาณไซน์ความถี่ที่ 190 เฮิรตซ์ และออกแบบสัญญาณไซน์ของเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณความถี่ตัวที่สอง โดยกำหนดให้ $\theta = \frac{21\pi}{180}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.3

$$IR = 128 + \left(20 * \sin\left(\frac{21\pi n}{180}\right)\right) \quad (3.3)$$

จะได้ค่าสัญญาณไซน์ความถี่ 80 เฮิรตซ์ แล้วนำค่าสัญญาณไซน์ที่เป็นตัวเลขจากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ไปแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกส่งออกทางพอร์ต DAC ที่ขา 25 และขา 26 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ตามลำดับ จากนั้นสร้างตัวแปรอาร์เรย์จำนวน 2 ตัวแปร มาเก็บค่าสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ เพื่อที่จะนำตัวแปรอาร์เรย์ดังกล่าวไปใช้ในการดีมอดูเลตใน

ส่วนของการประมวลผลข้อมูลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ต่อไป โดยสามารถแสดงแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.10

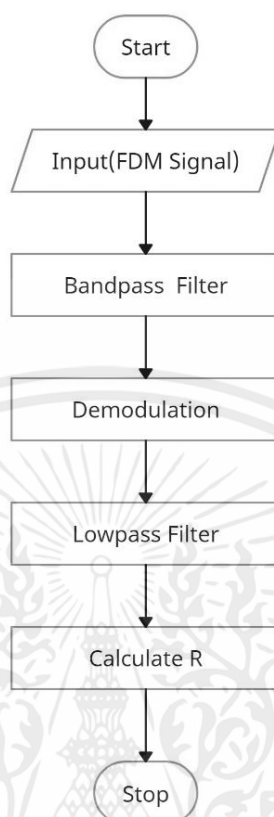


รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานในการสร้างและเก็บสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

3.1.2.2 การออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับประมวลผลข้อมูลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรม Arduino IDE เพื่อประมวลผลสัญญาณ และหาค่าอัตราการดูดซับ แล้วนำค่าอัตราการดูดซับที่ได้ไปหาระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด โดยจะทำการหาค่าอัตราการดูดซับผ่านกระบวนการต่อไปนี้ การรับสัญญาณ FDM ตัวกรองแถบความถี่ผ่านการตีมอดูเลต ตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่าน โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ได้ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แผนภาพขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณและคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับ

1) การออกแบบการรับสัญญาณ FDM

โปรแกรมจะเริ่มจากรับสัญญาณเอฟดีเอ็ม ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 3.4

$$\text{FDM}(t) = \text{PPG}_{\text{IR}940}(t) \cos(\omega_1 t) + \text{PPG}_{\text{IR}1040}(t) \cos(\omega_2 t) \quad (3.4)$$

โดยที่

$\text{PPG}_{\text{IR}940}(t)$ คือ สัญญาณพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร

$\text{PPG}_{\text{IR}1040}(t)$ คือ สัญญาณพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

$\cos(\omega_1 t)$ คือ สัญญาณคลื่นพาห์ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร

$\cos(\omega_2 t)$ คือ สัญญาณคลื่นพาห์ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

เมื่อรับสัญญาณเอฟดีเอ็มที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณที่นิ้วมือเข้ามาที่พอร์ต ADC ขา 34 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วนำสัญญาณเอฟดีเอ็มที่รับเข้ามาทำการผ่านตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ที่มีความถี่ศูนย์กลาง ω_1 จะได้สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 3.5

$$\text{AM}_{\text{IR}940}(t) = \text{PPG}_{\text{IR}940}(t) \cos(\omega_1 t) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $AM_{IR940}(t)$ คือ สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร

และถ้านำสัญญาณเอพีดีเอ็มที่รับเข้ามาทำการผ่านตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ที่มีความถี่ศูนย์กลาง ω_2 จะได้สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 3.6

$$AM_{IR1040}(t) = PPG_{IR1040}(t) \cos(\omega_2 t) \quad (3.6)$$

โดยที่ $AM_{IR1040}(t)$ คือ สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

2) การออกแบบตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่

การออกแบบตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถออกแบบได้จากสมการที่ 2.23

$$y(n) = B(x(n) - x(n-1)) + A_1 y(n-1) - A_2 y(n-2)$$

โดยที่ $A_1 = 2e^{-\frac{\omega_0 T_s}{2Q}} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4-(1/Q)^2}}{2}\right)$

$$A_2 = -e^{-\frac{\omega_0 T_s}{Q}}$$

$$B = \frac{H_0 \omega_0}{Q}$$

ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร กำหนดให้ $T_s = 588 \mu\text{sec}$, $Q = 2.67$, $H_0 = 2$ และ $\omega_0 = 160\pi$ โดยสามารถแทนค่าสัมประสิทธิ์ A_1 , A_2 และ B ได้ดังสมการด้านล่าง

$$A_1 = 2e^{-\frac{160\pi \cdot 588\mu}{2 \cdot 2.67}} \cos\left(\frac{160\pi \cdot 588\mu \sqrt{4-(1/2.67)^2}}{2}\right) = 1.9779 \quad (3.7)$$

$$A_2 = -e^{-\frac{160\pi \cdot 588\mu}{2.67}} = -0.8950 \quad (3.8)$$

$$B = \frac{2 \cdot 160\pi}{2.67} = 376.9911 \quad (3.9)$$

$$y_{IR940}(n) = 376.9911(x(n) - x(n-1)) + 1.8129y(n-1) - 0.8950y(n-2) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการออกแบบตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ของคลื่นอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร กำหนดให้ $T_s = 588 \mu\text{sec}$, $Q = 6.33$, $H_0 = 2$ และ $\omega_0 = 380\pi$ สามารถแทนค่าสัมประสิทธิ์ A_1, A_2 และ B ได้ดังสมการด้านล่าง

$$A_1 = 2e^{-\frac{380\pi \cdot 588\mu}{2 \cdot 6.33}} \cos\left(\frac{380\pi \cdot 588\mu \sqrt{4 - \left(\frac{1}{6.33}\right)^2}}{2}\right)$$

$$= 1.4475 \quad (3.11)$$

$$A_2 = -e^{-\frac{380\pi \cdot 588\mu}{6.33}}$$

$$= -1.1172 \quad (3.12)$$

$$B = \frac{2 \cdot 380\pi}{6.33}$$

$$= 377.1896 \quad (3.13)$$

$$y_{IR1040}(n) = 377.1896(x(n) - x(n-1)) + 1.4475y(n-1) - 1.1172y(n-2) \quad (3.14)$$

3) การออกแบบการดีมอดูเลต

นำสัญญาณจากสมการที่ 3.5 ไปทำการดีมอดูเลตด้วยการคูณกับตัวแปรอาร์เรย์ที่เก็บค่าสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ ω_1 จะได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 3.15

$$\begin{aligned} AM_{IR940}(t) * \cos(\omega_1 t) &= (PPG_{IR940}(t) \cos(\omega_1 t)) * \cos(\omega_1 t) \\ &= (PPG_{IR940}(t) \cos^2(\omega_1 t)) \\ &= PPG_{IR940}(t) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_1 t)\right) \\ &= \frac{PPG_{IR940}(t)}{2} + \frac{PPG_{IR940}(t) \cos(2\omega_1 t)}{2} \end{aligned} \quad (3.15)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีองค์ประกอบสัญญาณเกิดขึ้นทั้งหมด 2 ส่วน โดยเทอมที่ 1 ทางซ้ายมือ คือ สัญญาณพีพีจีที่เกิดจากคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร ส่วนเทอมที่ 2 ทางขวามือ คือ สัญญาณความถี่สูง ดังนั้น เมื่อนำสัญญาณที่เกิดจากการคูณดังกล่าวมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จะได้ค่าเอาต์พุตเป็นพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร เท่านั้น และถ้านำ $\cos(\omega_2 t)$ ไปคูณกับสัญญาณที่ได้จากสมการที่ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 3.16

$$\begin{aligned} AM_{IR1040}(t) * \cos(\omega_2 t) &= (PPG_{IR1040}(t) \cos(\omega_2 t)) * \cos(\omega_2 t) \\ &= (PPG_{IR1040}(t) \cos^2(\omega_2 t)) \\ &= PPG_{IR1040}(t) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_2 t)\right) \\ &= \frac{PPG_{IR1040}(t)}{2} + \frac{PPG_{IR1040}(t) \cos(2\omega_2 t)}{2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

นำสัญญาณจากสมการที่ 3.16 ไปผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้สัญญาณพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร โดยจะทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้จากสมการที่ 2.17

$$y(n) = Bx(n) + A_1y(n-1) - A_2y(n-2)$$

โดยที่

$$A_1 = 2e^{-\frac{\omega_0 T_s}{2Q}} \cos\left(\frac{\omega_0 T_s \sqrt{4-(1/Q)^2}}{2}\right)$$

$$A_2 = -e^{-\frac{\omega_0 T_s}{Q}}$$

$$B = H_0 \omega_0^2$$

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร โดยกำหนดให้ $T_s = 588 \mu\text{sec}$, $Q = 0.5$, $H_0 = 2$ และ $\omega_0 = 6\pi$ สามารถแทนค่าสัมประสิทธิ์ A_1 , A_2 และ B ได้ดังสมการด้านล่าง

$$A_1 = 2e^{-\frac{6\pi \cdot 588\mu}{2 \cdot 0.5}} \cos\left(\frac{6\pi \cdot 588\mu \sqrt{4 - \left(\frac{1}{0.5}\right)^2}}{2}\right)$$

$$= 1.9780 \quad (3.17)$$

$$A_2 = -e^{-\frac{6\pi \cdot 588\mu}{0.5}}$$

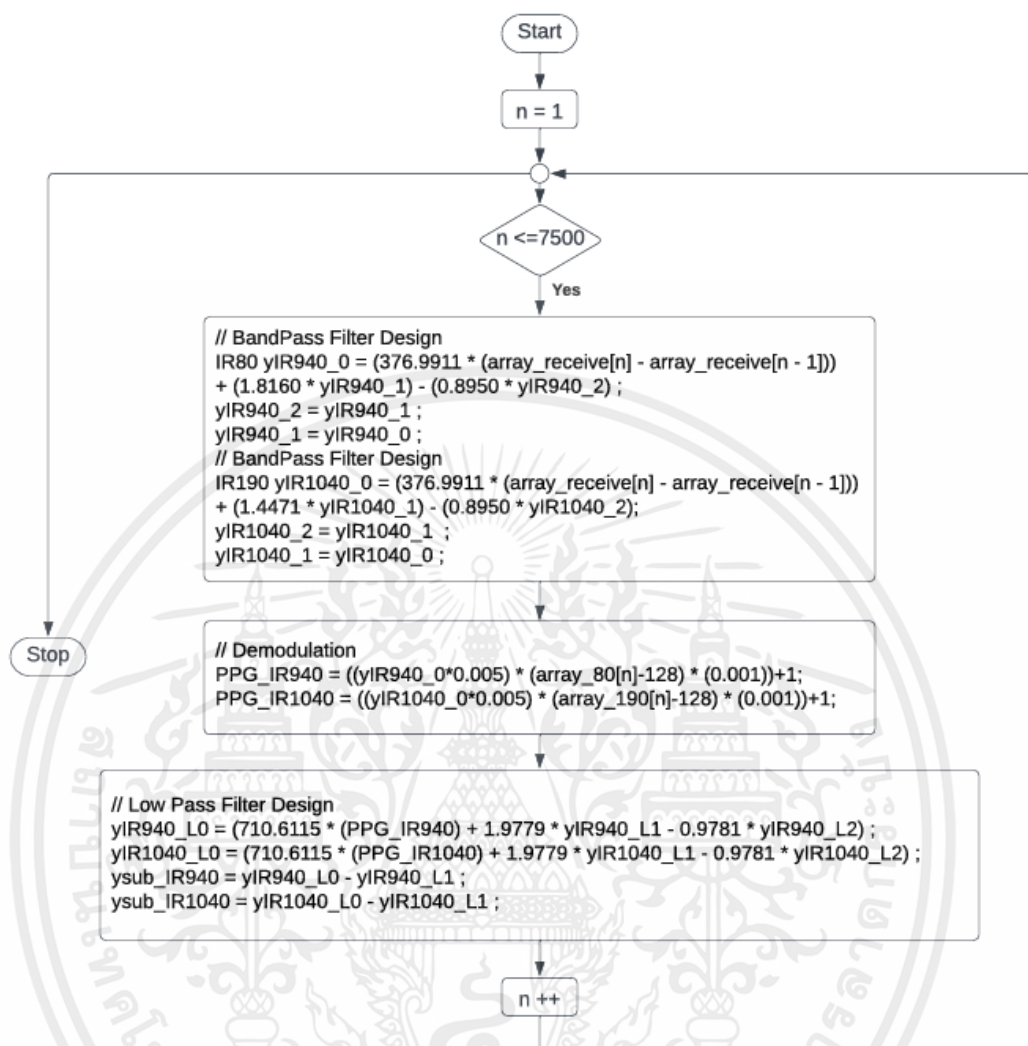
$$= -0.9781 \quad (3.18)$$

$$B = 2 * 36\pi^2$$

$$= 710.6115 \quad (3.19)$$

$$y(n) = 710.6115x(n) + 1.9780y(n-1) - 0.9781y(n-2) \quad (3.20)$$

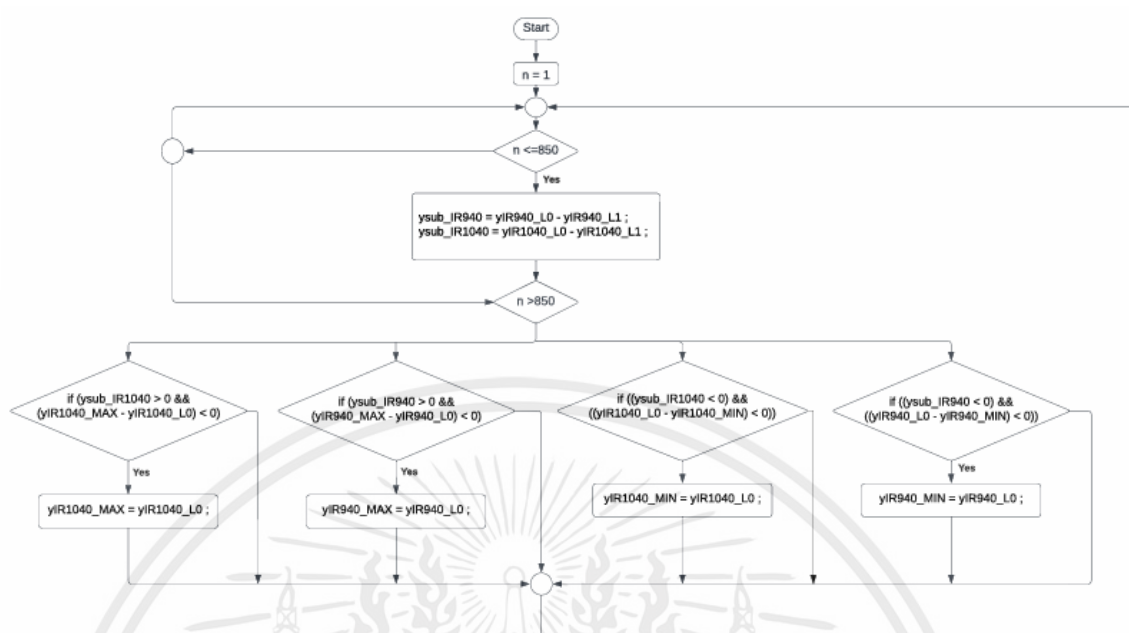
จะได้สัญญาณพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณพีพีจีที่คลื่นแสงอินฟราเรด 1040 นาโนเมตร ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านดังสมการที่ 3.20 โดยมีแผนภาพการทำงานของการดีมอดูเลตสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพการทำงานของขั้นตอนการดีมอดูเลตสัญญาณ

5) การออกแบบการหาค่าอัตราการดูดซับ

ทำการหาจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณพีพีจีของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร โดยนำค่าในแต่ละช่วงไปทำการหาจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณพีพีจีโดยการกำหนดเงื่อนไขว่าถ้าค่าปัจจุบันที่รับเข้ามามีค่ามากกว่าค่าในอดีตให้นำค่าปัจจุบันไปเทียบกับค่าสูงสุดที่เก็บเอาไว้ก่อนหน้านี้ ถ้าค่าปัจจุบันสูงกว่าค่าสูงสุดที่เก็บเอาไว้ให้ปรับค่าปัจจุบันเป็นค่าสูงสุดตัวใหม่ ซึ่งจะใช้เงื่อนไขกับสัญญาณพีพีจีทั้งสองค่า ($y_{IR940_{max}}$, $y_{IR1040_{max}}$) และถ้าทำการเปลี่ยนเงื่อนไขให้ตรงกันข้าม จะได้ค่าต่ำสุดของสัญญาณพีพีจีทั้งสองค่า ($y_{IR940_{min}}$, $y_{IR1040_{min}}$) ออกมา โดยมีแผนภาพการทำงานของการทำงานค่าสูงสุดและต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพการทำงานของการทำงานหาค่าสูงสุดและต่ำสุด

หลังจากนั้นทำการหาค่าอัตราการดูดซับได้จากสมการที่ 3.21

$$R = \frac{\frac{AC_{IR940}}{DC_{IR940}}}{\frac{AC_{IR1040}}{DC_{IR1040}}} = \frac{\frac{IR940_{max} - IR940_{min}}{(IR940_{max} + IR940_{min})/2}}{\frac{yIR1040_{max} - yIR1040_{min}}{(yIR1040_{max} + yIR1040_{min})/2}} \quad (3.21)$$

โดยที่

R คือ อัตราการดูดซับ

$yIR940_{max}$ คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณพีพีจีที่ 940 นาโนเมตร

$yIR940_{min}$ คือ ค่าต่ำสุดของสัญญาณพีพีจีที่ 940 นาโนเมตร

$yIR1040_{max}$ คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณพีพีจีที่ 1040 นาโนเมตร

$yIR1040_{min}$ คือ ค่าต่ำสุดของสัญญาณพีพีจีที่ 1040 นาโนเมตร

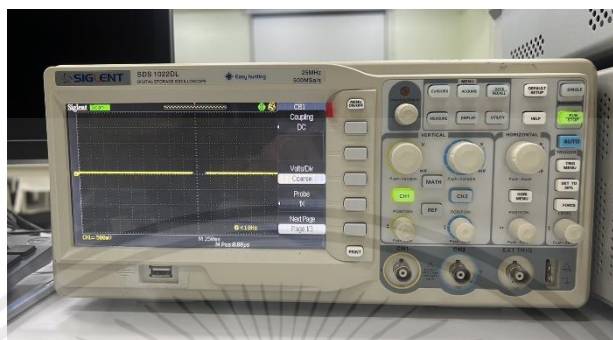
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในปฏิญานิพนธ์นี้มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.2.1 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า แสดงผลออกมาเป็นกราฟ ซึ่งจะแสดงผลผ่านหลอดภาพที่ฉาบด้วยฟอสเฟอร์ดังรูปที่ 3.14 ออสซิลโลสโคปใช้สำหรับวัดค่าแรงดันของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้า การวัดความถี่ วัดเฟสของสัญญาณ และใช้สำหรับการวัดแรงดันและคาบเวลา โดยผู้จัดทำจะนำมาใช้สำหรับแสดงสัญญาณไซน์ความถี่ที่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และใช้สำหรับตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่พอร์ตต่างๆของวงจร [22]



รูปที่ 3.14 เครื่องออสซิลโลสโคป

3.2.2 เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

เครื่องจ่ายไฟเป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดไฟฟ้า เป็นการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น พลังงานกล, พลังงานเคมี หรือ พลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟแบบควบคุมได้สามารถควบคุมแรงดันหรือกระแสเอาต์พุตให้มีค่าที่คงที่แน่นอน แม้ว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่พลังงานที่อินพุตก็ตาม โดยสามารถแสดงรูปร่างนอกได้ดังรูปที่ 3.15 [23]



รูปที่ 3.15 เครื่องจ่ายไฟ

3.2.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator)

เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ถือว่าเป็นเครื่องมือวัดที่จำเป็นต่อการใช้งานอีกชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ให้สัญญาณรูปร่างต่าง ๆ ขึ้นมาดังรูปที่ 3.16 สามารถควบคุมปรับแต่งได้ทั้งระดับความแรงและความถี่ โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณมาตรฐานเพื่อใช้งานในการตรวจสอบปรับแต่ง วัดเปรียบเทียบค่า หรือใช้อ้างอิง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

3.2.4 โปรแกรม Arduino IDE

โปรแกรม Arduino IDE เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับเขียนโปรแกรม, คอมไพล์ และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด Arduino หรือบอร์ดตัวอื่นๆ ที่คล้ายกัน เช่น Generic ESP8266 modules, NodeMCU หรือ WeMos D1 เป็นต้น โดยสามารถแสดงหน้าแรกของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 3.17 [25]



รูปที่ 3.17 โปรแกรม Arduino IDE

3.2.5 เว็บไซต์ EasyEDA

เว็บไซต์ EasyEDA เป็นโปรแกรมจำลองสำหรับการทำงานของวงจร และออกแบบแผ่นวงจร โดยสามารถแสดงตราสัญลักษณ์ของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 3.18 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 เว็บไซต์ EasyEDA

3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

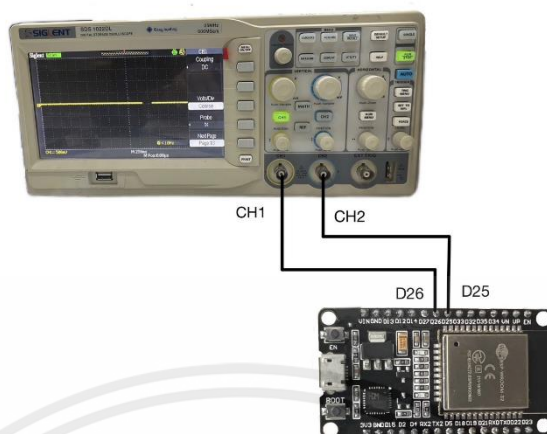
ในส่วนของการจัดเก็บผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การทดสอบส่วนของฮาร์ดแวร์

3.3.1.1 การทดสอบอุปกรณ์วัดสัญญาณ PPG

- 1) การทดสอบการสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ทำการอัปโหลดโปรแกรมลงไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นทำการติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 กับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 26 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 25 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และทำการดูสัญญาณไซน์บนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป แสดงการ ติดตั้งการทดสอบได้ดังรูปที่ 3.19

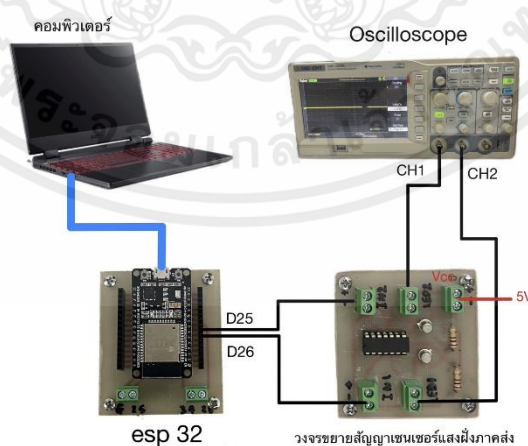


รูปที่ 3.19 การติดตั้งการทดสอบการทำงานของโปรแกรม
สร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์

2) การทดสอบการสร้างวงจรรีบไดโอดเปล่งแสง

ทำการติดตั้งวงจรรีบไดโอดเปล่งแสงเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ แล้วจ่ายไฟ 5 โวลต์ ที่พอร์ต Vcc แล้วทำการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 25 และ ขา 26 เข้ากับพอร์ตอินพุต 1 และพอร์ตอินพุต 2 ตามลำดับ จากนั้นวัดเอาต์พุต 1 และ เอาต์พุต 2 เพื่อที่จะดูสัญญาณที่ได้ผ่านจากวงจรรีบไดโอดเปล่งแสง โดยสามารถแสดงการติดตั้งการทดสอบวงจรรีบไดโอดเปล่งแสงได้ดังรูปที่ 3.20

ทำการอัปเดตโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์ ดังหัวข้อที่ 3.1.2.1 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการวัดสัญญาณได้บนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป



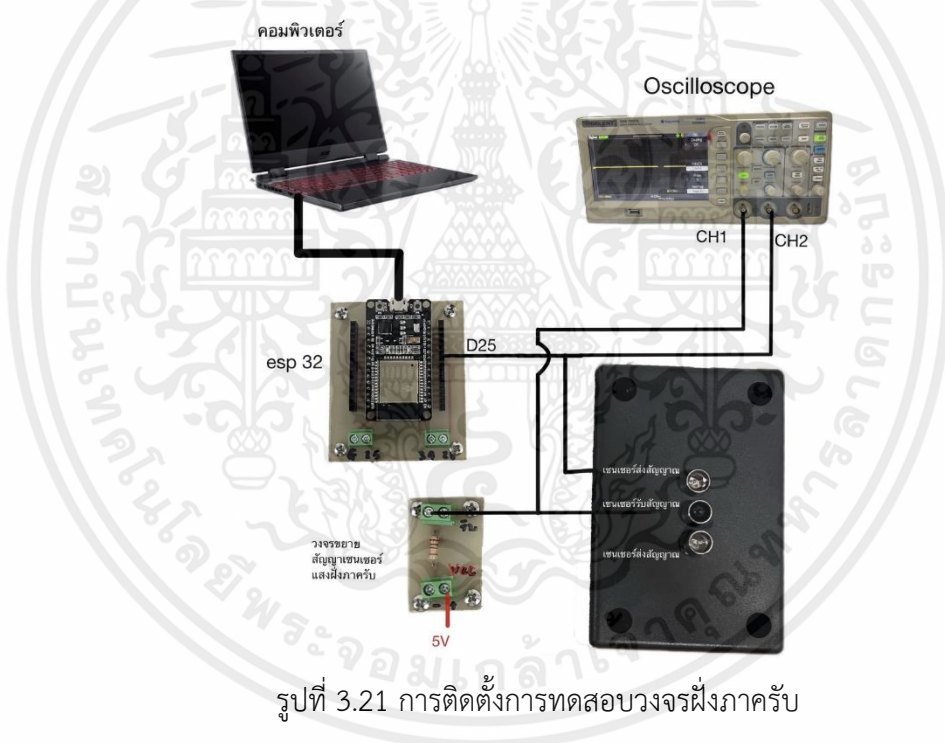
รูปที่ 3.20 การติดตั้งการทดสอบวงจรรีบไดโอดเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การทดสอบการสร้างวงจรฝั่งภาครับ

ทำการติดตั้งวงจรขยายสัญญาณเซนเซอร์แสงฝั่งภาครับเข้ากับเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณและเครื่องจ่ายไฟ แล้วจ่ายไฟ 5 โวลต์ ที่พอร์ต Vcc แล้วทำการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 25 เข้ากับเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณ แล้วทำการทดสอบโดยการนำนิ้วมือมาวางบนเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณและเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบว่าสัญญาณไหนที่วัดจากวงจรขยายสัญญาณเซนเซอร์แสงฝั่งภาครับกับสัญญาณไหนที่ได้จากเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณเหมือนกันหรือไม่ โดยสามารถแสดงการติดตั้งการทดสอบวงจรขยายสัญญาณเซนเซอร์แสงฝั่งภาครับได้ดังรูปที่ 3.21

ทำการอัปเดตโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์เพียงความถี่เดียว คือ 190 เฮิร์ตซ์ ดังหัวข้อที่ 3.1.2 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการวัดสัญญาณได้บนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.21 การติดตั้งการทดสอบวงจรฝั่งภาครับ

3.3.2 การออกแบบส่วนของซอฟต์แวร์

3.3.2.1 การทดสอบการประมวลผลข้อมูลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

1) การทดสอบตัวกรองความถี่แถบผ่าน

ทำการติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 34 เข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยป้อนค่าอินพุตขนาด 1 โวลต์ แล้วปรับค่าความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งแต่ 35 – 125 และ 139 - 241 เฮิร์ตซ์ จากนั้นให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ประมวลผลแล้วส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาที่ขา 25 และนำสัญญาณที่ได้มาเข้าเครื่องออสซิลโลสโคป แล้วนำค่าสัญญาณที่ผ่านตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

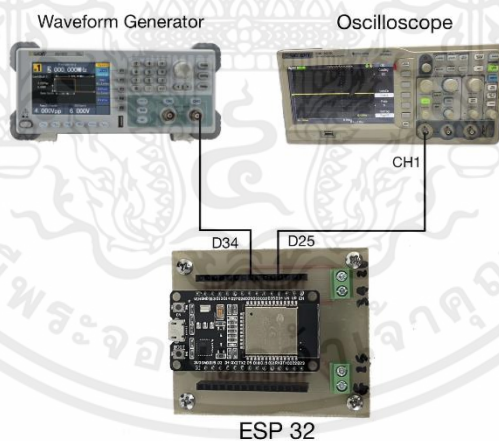
ความถี่แถบผ่านที่ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อดูว่าสัญญาณที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่เราต้องการหรือไม่ เพื่อทำการทดสอบตัวกรองความถี่แถบผ่าน โดยสามารถแสดงการติดตั้งการทดสอบตัวกรองความถี่แถบผ่านได้ดังรูปที่ 3.22

ทำการอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์เพียงความถี่เดียว คือ 190 เฮิรตซ์ ดังหัวข้อที่ 3.1.2.2 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการวัดสัญญาณได้บนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป

2) การทดสอบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ทำการติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 34 เข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยป้อนค่าอินพุตขนาด 1 โวลต์ แล้วปรับค่าความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งแต่ 60 – 110 และ 160 - 220 เฮิรตซ์ จากนั้นให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ประมวลผลแล้วส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาที่ขา 25 และนำสัญญาณที่ได้มาเข้าเครื่องออสซิลโลสโคปแล้วนำค่าสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ มาทำการพล็อตกราฟเพื่อดูว่าสัญญาณที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่เราต้องการหรือไม่ เพื่อทำการทดสอบ Low-pass filter โดยสามารถแสดงการติดตั้งการทดสอบ Low-pass filter ได้ดังรูปที่ 3.22

ทำการอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์เพียงความถี่เดียว คือ 190 เฮิรตซ์ ดังหัวข้อที่ 3.1.3 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการวัดสัญญาณได้บนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป



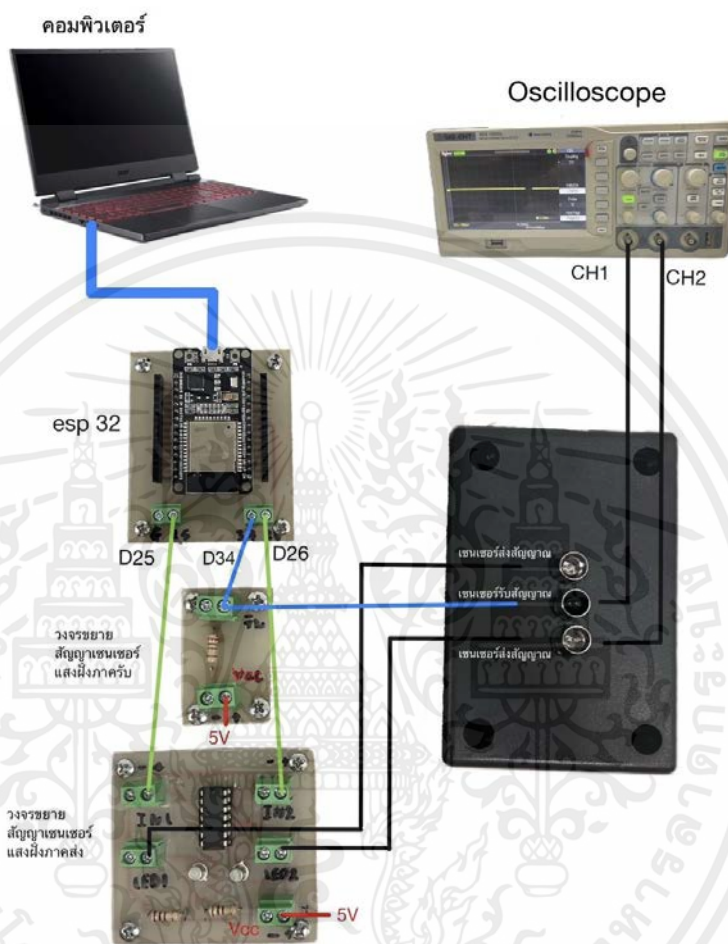
รูปที่ 3.22 การติดตั้งการทดสอบตัวกรองความถี่แถบผ่าน และตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

3) การทดสอบวงจรของระบบ

ทำการติดตั้งวงจรขับไดโอดเปล่งแสงและวงจรฝั่งภาครับเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ แล้วจ่ายไฟ 5 โวลต์ ที่พอร์ต Vcc แล้วทำการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 25, ขา 26 และขา 34 เข้ากับพอร์ตอินพุต 1, พอร์ตอินพุต 2 และพอร์ตเอาต์พุตของวงจร ตามลำดับ โดยสามารถแสดงการติดตั้งการรวมวงจรและประมวลผลสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการอัปเดตโปรแกรมที่ได้ตั้งหัวข้อที่ 3.1.2.2 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการเก็บสัญญาณที่ได้เมื่อนำนิ้วมือมาวางบนเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณ จากนั้นทำการบันทึกผลที่ได้บนหน้าจอออสซิลโลสโคป



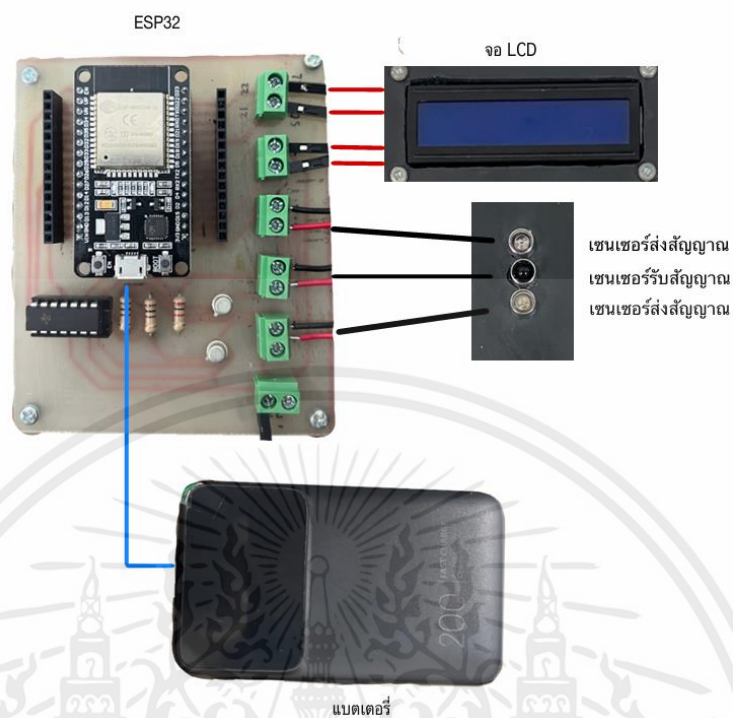
รูปที่ 3.23 การติดตั้งการทดสอบวงจรของระบบ

4) การทดสอบวงจรรวมของระบบทั้งหมด

ทำการติดตั้งวงจรรวมทั้งหมดให้เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขา 25, ขา 26 และขา 34 โดยจะมีแหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่สำรอง จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรรวมทั้งหมด ซึ่งวงจรรวมทั้งหมดจะทำการเชื่อมต่อกับหน้าจอแสดงผล LCD โดยสามารถแสดงการติดตั้งการรวมวงจรและประมวลผลสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.24

แล้วทำการอัปเดตโปรแกรมที่ได้ตั้งหัวข้อที่ 3.1.2.2 ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้วทำการเก็บสัญญาณที่ได้เมื่อนำนิ้วมือมาวางบนเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณ จากนั้นทำการบันทึกผลที่ได้บนหน้าจอออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การติดตั้งการทดสอบวงจรรวมของระบบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

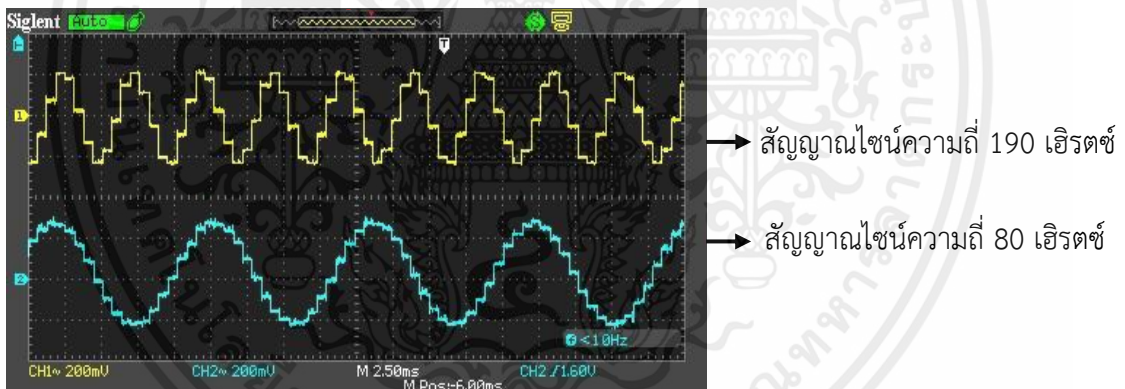
ผู้จัดทำได้ทำการเก็บผลการทำงานของระบบ โดยแบ่งการทดลองและจัดเก็บผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองส่วนของฮาร์ดแวร์

4.1.1 ผลการทดลองอุปกรณ์วัดสัญญาณ PPG

4.1.1.1 ผลการทดลองการทำงานของโปรแกรมสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

เมื่อทำการอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์รูปไซน์ที่มีความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์ ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และทำการติดตั้งดังหัวข้อที่ 3.3.1.1 หัวข้อย่อยที่ 1) จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์ ที่แสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.1

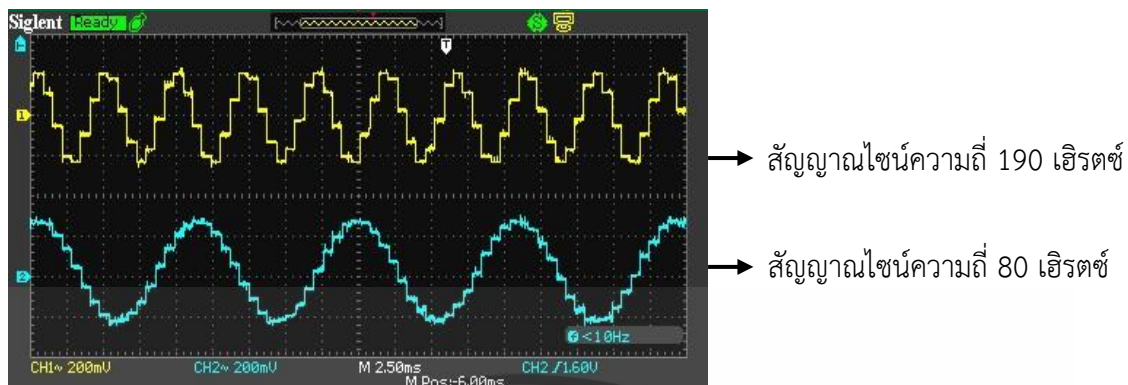


รูปที่ 4.1 สัญญาณไซน์ที่แสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป

จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ ที่ช่องสัญญาณที่ 1 และได้สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิร์ตซ์ ที่ช่องสัญญาณที่ 2 ซึ่งทั้งสองความถี่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3 โวลต์

4.1.1.2 ผลการทดลองวงจรขับไดโอดเปล่งแสง

หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังหัวข้อที่ 3.3.1.1 หัวข้อย่อยที่ 2) และอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์ ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เรียบร้อยแล้ว จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 80 และ 190 เฮิร์ตซ์ ที่แสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.2

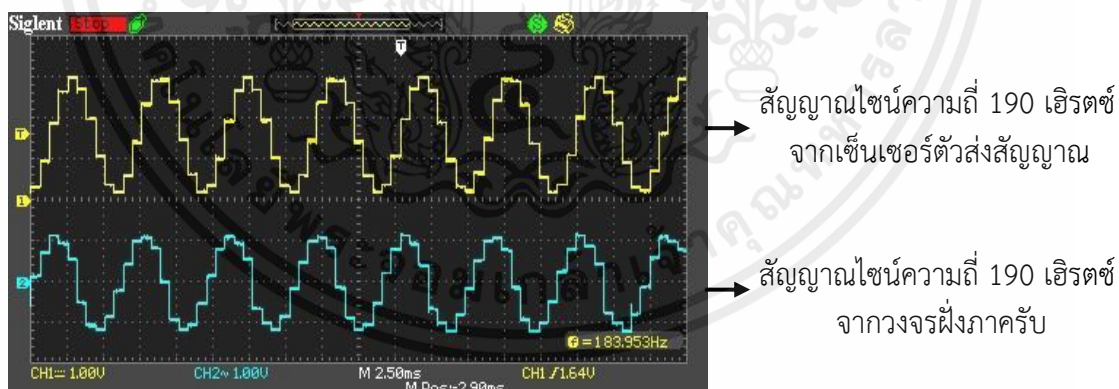


รูปที่ 4.2 สัญญาณไซน์ที่ได้จากวงจรขับไดโอดเปล่งแสง

จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 80 เฮิรตซ์ ที่ช่องสัญญาณที่ 1 และได้สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ที่ช่องสัญญาณที่ 2 ซึ่งทั้งสองความถี่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3 โวลต์

4.1.1.3 ผลการทดลองวงจรฝั่งภาครับ

หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังหัวข้อที่ 3.3.1.1 ดังหัวข้อย่อยที่ 3) แล้วอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพียงความถี่เดียว คือ 190 เฮิรตซ์เรียบร้อยแล้ว จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ที่เปรียบเทียบกับว่าเหมือนกันหรือไม่ระหว่างสัญญาณไซน์ที่วัดจากวงจรฝั่งภาครับกับสัญญาณไซน์ที่ได้จากเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณที่แสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ที่ได้จากเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณ และวงจรฝั่งภาครับ

จะได้สัญญาณไซน์ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ที่วัดจากเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่ 1 และสัญญาณไซน์ 190 เฮิรตซ์ ที่วัดจากวงจรฝั่งภาครับที่ช่องสัญญาณที่ 2 ซึ่งสัญญาณไซน์ที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน

4.2 ผลการทดลองส่วนของซอฟต์แวร์

4.2.1 ผลการทดลองการประมวลผลข้อมูลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

4.2.1.1 ผลการทดลองตัวกรองความถี่แถบผ่าน

ในการทดสอบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน กำหนดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต เท่ากับ 1 โวลต์ โดยป้อนค่าอินพุตสัญญาณไซน์ช่วงความถี่ 35-125 เฮิรตซ์ และนำไปผ่านวงจรกรอง ดิจิตอลในไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และนำสัญญาณที่ได้ออกมาดูเอาต์พุตผ่านทางเครื่อง ออสซิลโลสโคป โดยอ่านค่าเอาต์พุตที่ได้เป็นค่าแอมพลิจูดตามค่าความถี่ที่ป้อนเข้าไป หลังจากนั้นนำ ค่าสัญญาณที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเพื่อดูว่าสัญญาณที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่เราต้องการหรือไม่ จะได้ กราฟแสดงลักษณะสัญญาณที่ผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 35 -125 และ 139 - 241 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 35 - 125 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่าง ความถี่กับแรงดันไฟฟ้า

ความถี่ (เฮิรตซ์)	35	50	65	80	95	110	125
แรงดันไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	260	460	840	1180	840	580	460

โดยจะทำการหาค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลด้วยสมการที่ 4.1

$$N_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.1)$$

โดย N_{dB} คือ ค่าแอมพลิจูดที่เป็นหน่วยเดซิเบล

$\left(\frac{V_2}{V_1} \right)$ คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกส่วนด้วยแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

จะได้ค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 35 - 125 เฮิรตซ์

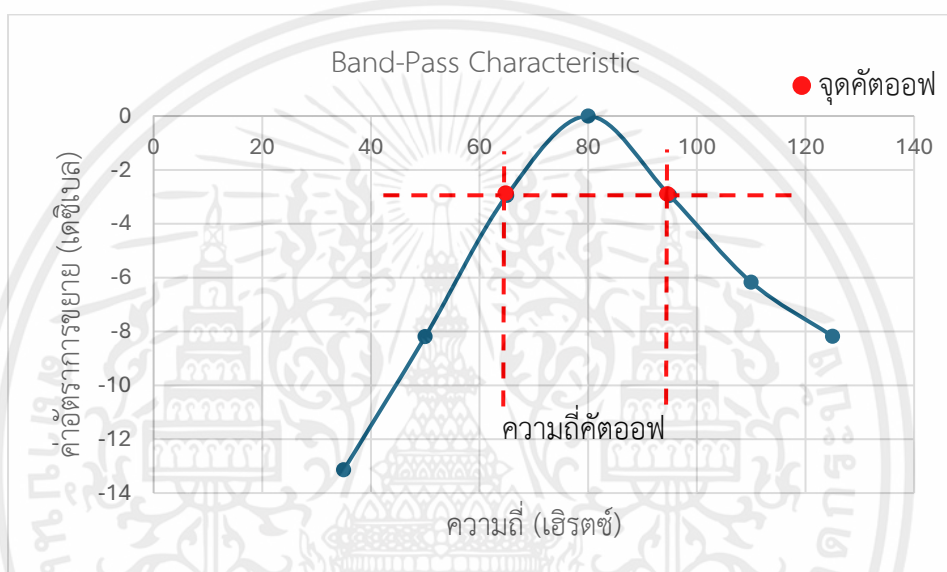
ความถี่ (เฮิรตซ์)	35	50	65	80	95	110	125
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-11.70	-6.74	-1.51	1.44	-1.51	-4.73	-6.74

จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2 มาผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชัน โดยนำค่า อัตราการขยายที่ความถี่ 80 เฮิรตซ์ ไปลบกับค่าอัตราการขยายที่ความถี่ต่างๆ จะได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว

ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	35	50	65	80	95	110	125
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-13.14	-8.18	-2.95	0.00	-2.95	-6.17	-8.18

โดยนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.3 ไปทำการพล็อตกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 แล้วหาจุดคutoff โดยการหาจุดตัดที่ -3 เดซิเบล ซึ่งจะได้ความถี่คutoffทางด้านต่ำและสูงที่ 64 และ 94 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กราฟผลตอบแทนของความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 35 - 125 เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.4 ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 139 - 241 เฮิร์ตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า

ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	139	156	173	190	207	224	241
แรงดันไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	280	460	840	1200	840	540	400

โดยจะทำการหาค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลด้วยสมการที่ 4.1 จะได้ค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 139 - 241 เฮิร์ตซ์

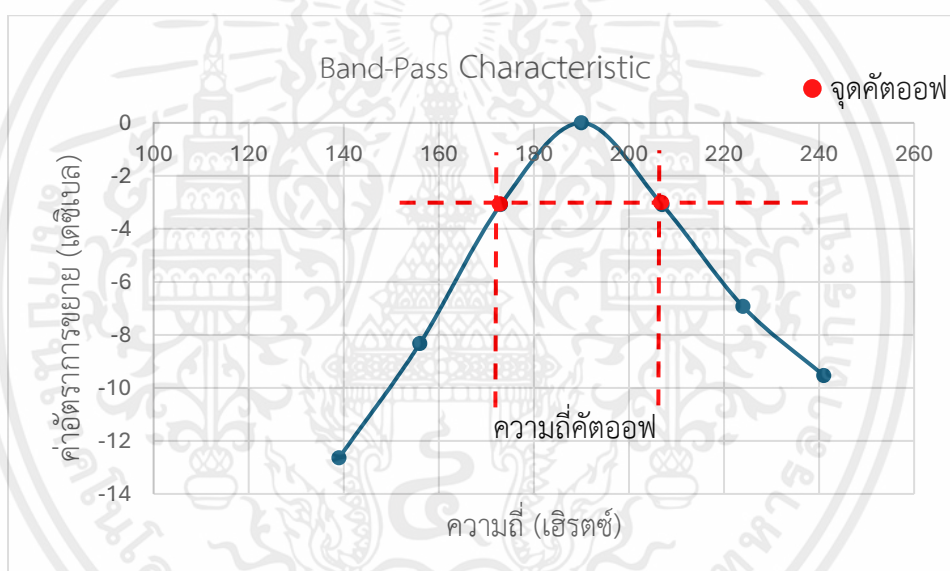
ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	139	156	173	190	207	224	241
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-11.06	-6.75	-1.51	1.58	-1.51	-5.35	-7.96

จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.5 มาผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชัน โดยนำค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 190 เฮิรตซ์ ไปลบกับค่าอัตราการขยายที่ความถี่ต่างๆ จะได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว

ความถี่ (เฮิรตซ์)	139	156	173	190	207	224	241
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-12.64	-8.33	-3.09	0.00	-3.09	-6.93	-9.54

โดยนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.6 ไปทำการพล็อตกราฟแสดงดังรูปที่ 4.5 แล้วหาจุดตัดออฟ โดยการหาจุดตัดที่ -3 เดซิเบล ซึ่งจะได้ความถี่คัตออฟทางด้านต่ำและสูงที่ 172 และ 208 เฮิรตซ์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ความถี่ 139 - 241 เฮิรตซ์

4.2.1.2 ผลการทดลองตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในการทดสอบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน กำหนดค่าแอมพลิจูด เท่ากับ 1 โวลต์ โดยป้อนค่าอินพุตสัญญาณไซน์ช่วงความถี่ 60-110 เฮิรตซ์ และนำไปผ่านวงจรกรองดิจิตอลในไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และนำสัญญาณที่ได้ออกมาดูเอาต์พุตผ่านทางเครื่องออสซิลโลสโคป โดยอ่านค่าเอาต์พุตที่ได้เป็นค่าแอมพลิจูดตามค่าความถี่ที่ป้อนเข้าไป หลังจากนั้นนำค่าสัญญาณที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเพื่อดูว่าสัญญาณที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่เราต้องการหรือไม่ จะได้กราฟแสดงลักษณะสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 60 - 110 และ 160 - 220 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า

ความถี่ (เฮิรตซ์)	60	70	80	90	100	110
แรงดันไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	510	507	504	311	208	144

โดยจะทำการหาค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลด้วยสมการที่ 4.1 จะได้ค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์

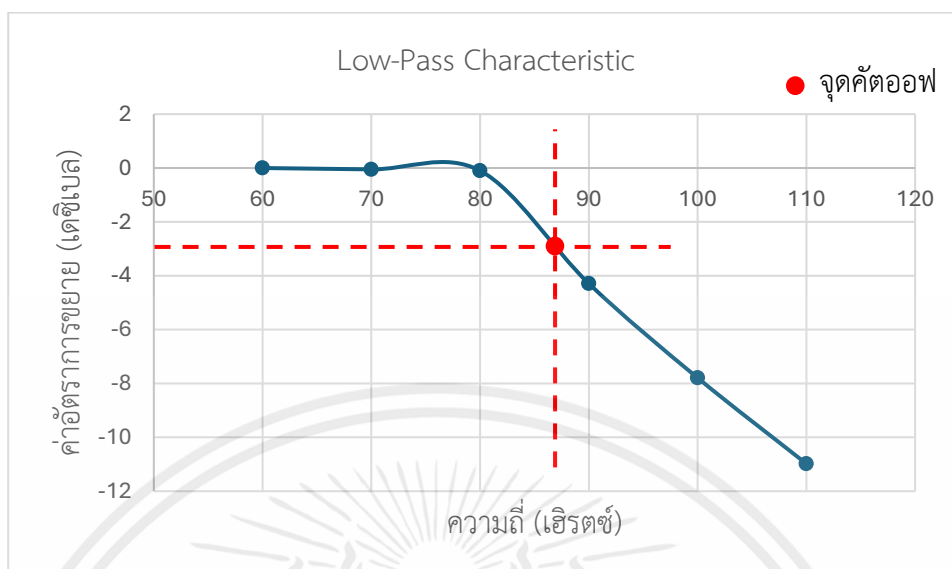
ความถี่ (เฮิรตซ์)	60	70	80	90	100	110
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-5.85	-5.90	-5.95	-10.14	-13.64	-16.83

จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.8 มาผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชัน โดยนำค่าอัตราการขยายใน pass band ที่มีค่าสูงสุดไปทำการลบกับค่าอัตราการขยายที่ความถี่ต่างๆ จะได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว

ความถี่ (เฮิรตซ์)	60	70	80	90	100	110
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	0.00	-0.05	-0.10	-4.29	-7.79	-10.98

โดยนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.9 ไปทำการพล็อตกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 แล้วหาจุดคัตออฟ โดยการหาจุดตัดที่ -3 เดซิเบล ซึ่งจะได้ความถี่คัตออฟ 87 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.6 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 60 - 110 เฮิรตซ์

ตารางที่ 4.10 ค่าแอมพลิจูดที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์ โดยเทียบระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้า

ความถี่ (เฮิรตซ์)	160	170	180	190	200	210	220
แรงดันไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	461	459	456	464	350	231	176

โดยจะทำการหาค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลด้วยสมการที่ 4.1 จะได้ค่าอัตราการขยายในหน่วยเดซิเบลตามตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าอัตราการขยายที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์

ความถี่ (เฮิรตซ์)	160	170	180	190	200	210	220
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	-6.73	-6.76	-6.82	-6.60	-9.12	-12.73	-15.09

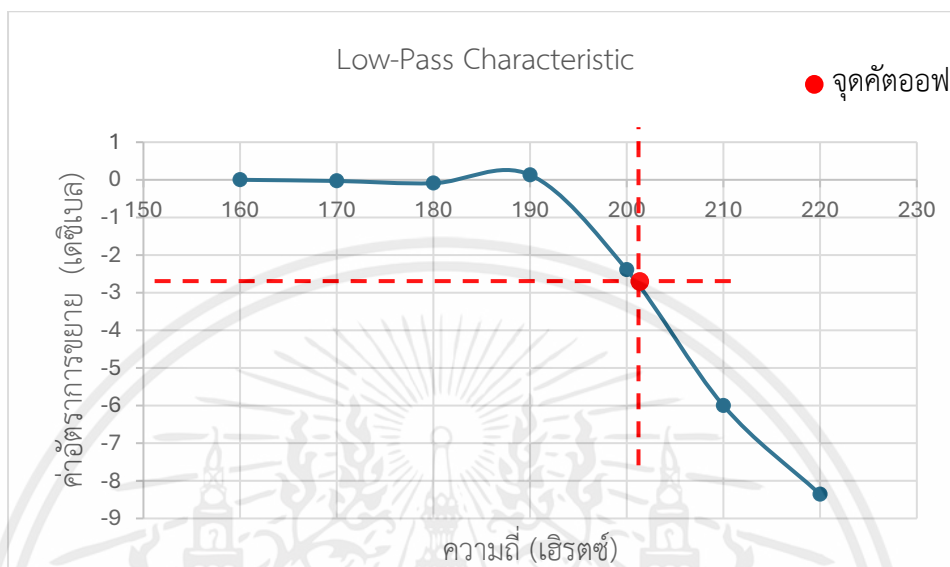
จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.11 มาผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชัน โดยนำค่าอัตราการขยายใน pass band ที่มีค่าสูงสุดไปลบกับค่าอัตราการขยายที่ความถี่ต่างๆ จะได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าอัตราการขยายที่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันแล้ว

ความถี่ (เฮิรตซ์)	160	170	180	190	200	210	220
ค่าอัตราการขยาย (เดซิเบล)	0.00	-0.03	-0.09	0.13	-2.39	-6.00	-8.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

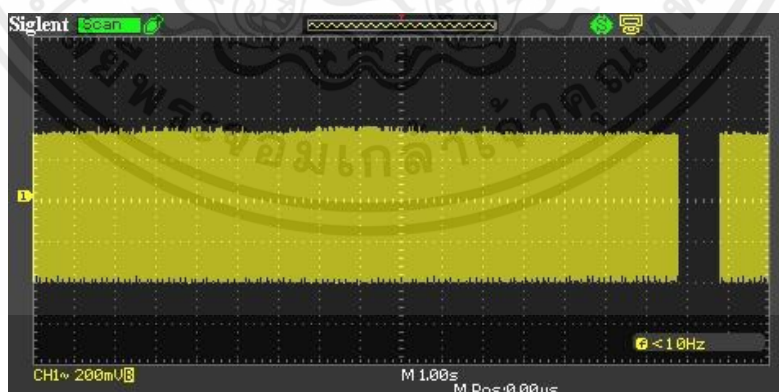
โดยนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.3 ไปทำการพล็อตกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 แล้วหาจุดคutoff โดยการหาจุดตัดที่ -3 เดซิเบล ซึ่งจะได้ความถี่คutoff 201 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.7 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 160 - 220 เฮิรตซ์

4.2.1.3 ผลการทดลองวงจรของระบบ

หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังหัวข้อที่ 3.3.4 แล้วอัปโหลดโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ ความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ และประมวลผลสัญญาณเรียบร้อยแล้ว เมื่อนำนิ้วมีอวางบนเซ็นเซอร์ตัวรับสัญญาณและเซ็นเซอร์ตัวส่งสัญญาณ จะได้สัญญาณ FDM ซึ่งแสดงบนหน้าจอออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.8



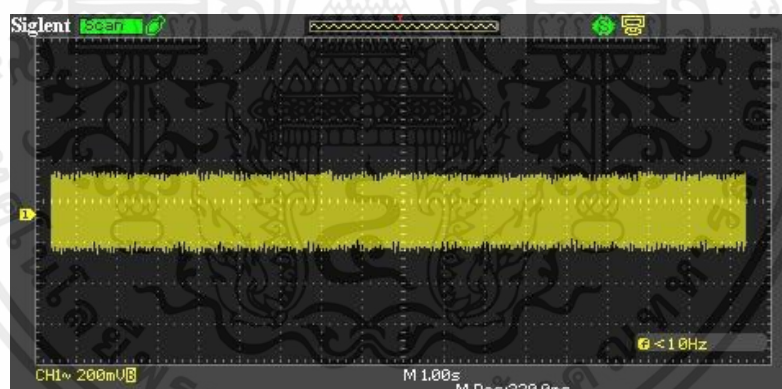
รูปที่ 4.8 สัญญาณ FDM ที่รับเข้ามา

โดยสัญญาณ FDM ที่ได้ คือ การรวมกันระหว่างสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร (สัญญาณ PPG ที่มีคูเลตกับคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร) กับสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร (สัญญาณ PPG ที่มีคูเลตกับคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร) และไฟตรง ดังนั้นจึงนำสัญญาณ FDM ที่ได้มาทำการลบด้วยค่าเฉลี่ยของสัญญาณ FDM เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดค่าไฟตรง จะได้สัญญาณ FDM ที่ผ่านการลบด้วยค่าเฉลี่ยของสัญญาณ FDM โดยสัญญาณ FDM ที่ผ่านการลบด้วยค่าเฉลี่ย คือ สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร รวมกันกับ สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร ดังนั้นจะทำการแยกสัญญาณ FDM ที่ผ่านการลบด้วยค่าเฉลี่ยเป็นสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร โดยนำสัญญาณ FDM นั้นมาผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่าน จะได้สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.9 และสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.10

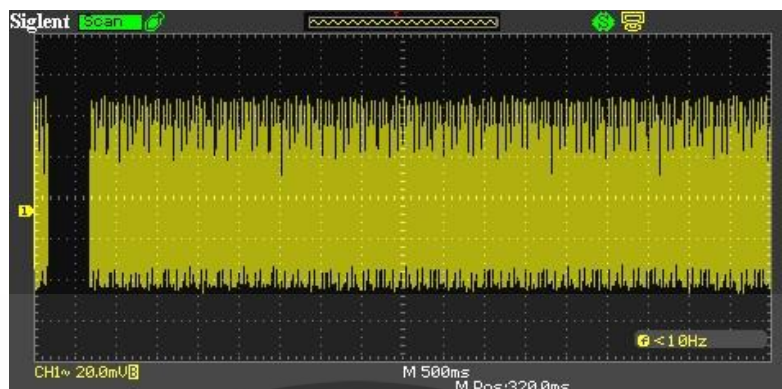


รูปที่ 4.9 สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

เมื่อได้สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร แล้ว จึงทำการตีมอดูเลตด้วยวิธีการ Synchronous detection โดยนำสัญญาณเอเอ็มของทั้งสองช่วงมาคูณกับสัญญาณคลื่นพาห์ จะได้เป็นสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.11 และจะได้สัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดของทั้งสองช่วงเริ่มเป็นขอบสัญญาณ PPG แล้ว

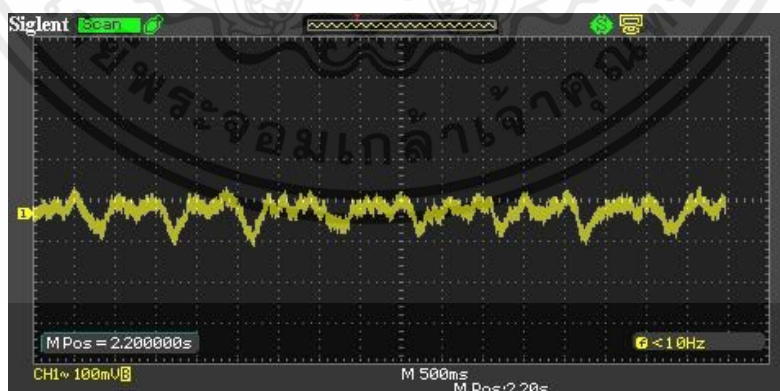


รูปที่ 4.11 สัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร



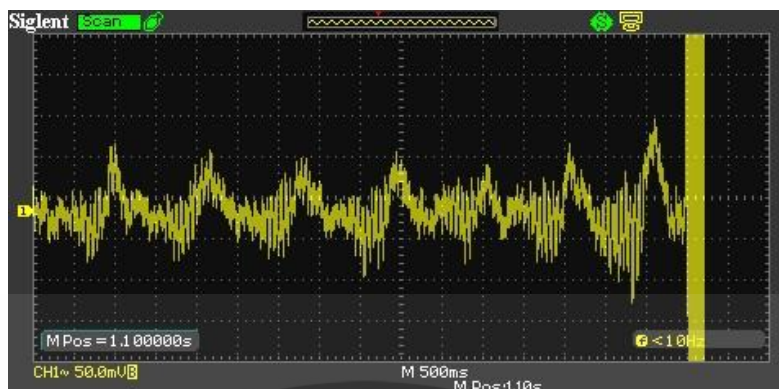
รูปที่ 4.12 สัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

นำสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 และ 1040 นาโนเมตร มาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จะได้สัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 และ 1040 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 สัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร

เมื่อทำการสุ่มสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 และ 1040 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ มาหนึ่งลูกคลื่นในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่ออ่านค่าจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณ PPG ทั้งสองแล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับได้ดังสมการที่ 4.1

$$R = \frac{\frac{AC_{IR940}}{DC_{IR940}}}{\frac{AC_{IR1040}}{DC_{IR1040}}} = \frac{\frac{\max - \min}{(\max + \min)/2} IR_{940}}{\frac{\max - \min}{(\max + \min)/2} IR_{1040}} \quad (4.1)$$

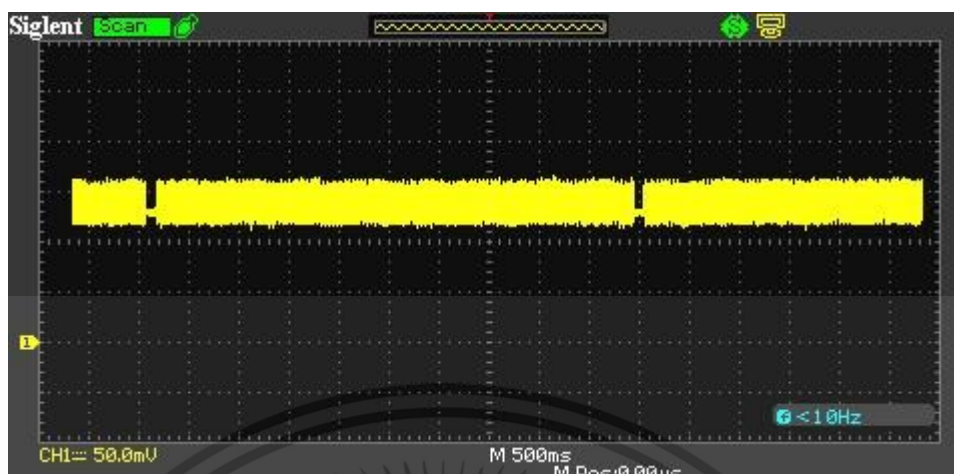
โดยจะอ่านค่าสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร ที่จุดสูงสุดได้ 18020254.00 และจุดต่ำสุดได้ 15388901.00 ส่วนค่าสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร ที่จุดสูงสุดได้ 10148668.00 และจุดต่ำสุดได้ 8495678.00 จากนั้นนำค่าจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณ PPG ทั้งสองมาคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับแสดงดังสมการที่ 4.2

$$R = \frac{\frac{18020254 - 15388901}{(18020254 + 15388901)/2}}{\frac{10148668 - 8495678}{(10148668 + 8495678)/2}} = 0.89 \quad (4.2)$$

จะได้ค่าอัตราการดูดซับแสง เท่ากับ 0.89

4.2.1.4 ผลการทดลองวงจรรวมของระบบทั้งหมด

จากการทดสอบวงจรรวมทั้งหมด แล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์และอัปโหลดโปรแกรมประมวลผลข้อมูลลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เมื่อนำนิ้วมือวางบนเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณและเซนเซอร์ตัวส่งสัญญาณ แล้วสัญญาณที่รับจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณ จะได้สัญญาณ FDM แสดงบนหน้าจอออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.15 ซึ่งสัญญาณ FDM ที่ได้เหมือนกับสัญญาณ FDM ที่วัดได้ที่เซนเซอร์ตัวรับสัญญาณก่อนการรวมวงจร แสดงว่าวงจรรวมทั้งหมดที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริง



รูปที่ 4.15 สัญญาณ FDM ที่ได้จากการรวมวงจรทั้งหมด

4.3 ผลการทดลองเทียบกับเครื่องเป่าทั่วไป

ในส่วนของการเก็บผลการทดลองเทียบระหว่างเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นกับเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า ผู้จัดทำได้แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ วัดค่าอัตราการดูดซับของเครื่องที่สร้างขึ้นเทียบกับระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า และ วัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องที่สร้างขึ้นกับระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า โดยมีผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

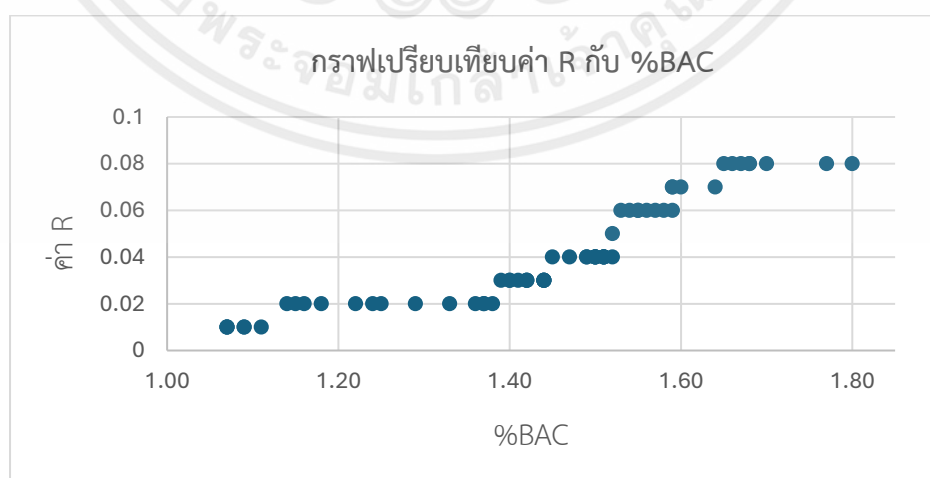
4.3.1 ผลการวัดระหว่างค่าอัตราการดูดซับของเครื่องที่สร้างขึ้นกับการวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า

ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าอัตราการดูดซับที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดจากเครื่องแบบเป่า โดยใช้ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 16 คน แบ่งเป็นเพศชาย 8 คน และเพศหญิง 8 คน ซึ่งจะมีการเก็บผลทั้งหมด 4 ครั้ง ครั้งละ 5 รอบ แล้วทำการเฉลี่ยค่าอัตราการดูดซับ โดยทุกๆรอบจะทำการดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ครั้งละ 200 มิลลิลิตร และสามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าอัตราการดูดซับที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดแบบเป่า

กลุ่มตัวอย่าง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4	
	%BAC	ค่า R	%BAC	ค่า R	%BAC	ค่า R	%BAC	ค่า R
ชาย1	0.02	1.14	0.04	1.49	0.06	1.54	0.06	1.56
ชาย2	0.01	1.07	0.03	1.39	0.04	1.52	0.06	1.57
ชาย3	0.02	1.33	0.03	1.40	0.06	1.53	0.07	1.64
ชาย4	0.01	1.09	0.02	1.36	0.04	1.47	0.08	1.65
ชาย5	0.02	1.15	0.03	1.40	0.04	1.51	0.08	1.70
ชาย6	0.01	1.07	0.03	1.44	0.04	1.51	0.08	1.66
ชาย7	0.01	1.09	0.02	1.37	0.04	1.49	0.07	1.59
ชาย8	0.02	1.29	0.03	1.41	0.04	1.50	0.08	1.80
หญิง1	0.02	1.16	0.03	1.44	0.05	1.52	0.08	1.68
หญิง2	0.01	1.11	0.02	1.44	0.06	1.55	0.06	1.59
หญิง3	0.01	1.07	0.03	1.42	0.04	1.51	0.08	1.77
หญิง4	0.02	1.25	0.03	1.44	0.04	1.50	0.06	1.58
หญิง5	0.02	1.18	0.02	1.38	0.04	1.51	0.07	1.60
หญิง6	0.02	1.24	0.03	1.42	0.04	1.50	0.08	1.67
หญิง7	0.02	1.22	0.03	1.42	0.04	1.50	0.07	1.59
หญิง8	0.03	1.37	0.04	1.45	0.06	1.55	0.08	1.68

จากตารางที่ 4.13 สามารถนำผลการทดสอบที่ได้มาพล็อตกราฟรูปแบบกระจายเพื่อหาสมการเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดค่าอัตราการดูดซับของเครื่องที่สร้างขึ้นกับ

ค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพล็อตกราฟเปรียบเทียบแสดงผลการวัดระหว่างค่าอัตราการดูดซับของเครื่องที่สร้างขึ้นกับผลการวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า สามารถนำมาหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ โดยการแทนค่าในสมการที่ 2.3 และ 2.4 แล้วนำค่า a และ b ที่ได้แทนในสมการที่ 2.2 โดยได้สมการดังนี้

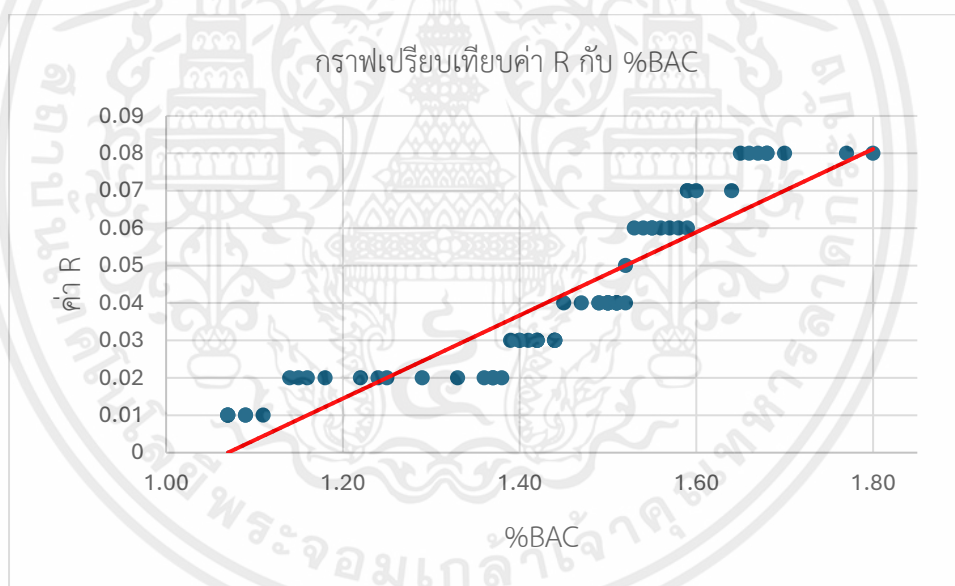
$$4.0986 = 93.6300b + 137.0101a$$

$$2.6800 = 65.0000b + 93.6300a$$

ทำการแก้ระบบสมการแบบสองตัวแปรข้างต้น พบว่า a มีค่าเท่ากับ 0.1113 และ b มีค่าเท่ากับ -0.1191 ดังนั้น จะได้ฟังก์ชันสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\% \text{BAC} = 0.1113(R) - 0.1191 \quad (4.3)$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะเห็นได้ว่าเส้นสีแดงมีความสอดคล้องกับจุดสีน้ำเงิน โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงฟังก์ชันสมการเชิงเส้นระหว่างค่าอัตราการดูดซับกับระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่ได้จากการเก็บผลการทดลอง

4.3.2 ผลการวัดระหว่างค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องที่สร้างขึ้นกับการวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของเครื่องแบบเป่า

ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดจากเครื่องแบบเป่า โดยใช้ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 8 คน แบ่งเป็นเพศชาย 3 คน และเพศหญิง 5 คน ซึ่งจะทำการเก็บผลทั้งหมด 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งละ 5 รอบ แล้วทำการเฉลี่ยค่าปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด โดยทุกๆรอบจะทำการดื่มเครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ครั้งละ 200 มิลลิลิตร และสามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดที่ได้จากเครื่องวัดระดับปริมาณ แอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้นโดยคำนวณจากสมการที่ 4.1 กับเครื่องวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ใน เลือดแบบเป่า

กลุ่ม ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4	
	%BAC ที่เป่า	%BAC ที่วัด	%BAC ที่เป่า	%BAC ที่วัด	%BAC ที่เป่า	%BAC ที่วัด	%BAC ที่เป่า	%BAC ที่วัด
ชาย1	0.010	0.016	0.040	0.034	0.030	0.040	0.070	0.080
ชาย2	0.010	0.012	0.020	0.020	0.040	0.038	0.040	0.038
ชาย3	0.010	0.014	0.020	0.024	0.040	0.030	0.040	0.042
หญิง1	0.010	0.012	0.020	0.020	0.030	0.028	0.050	0.040
หญิง2	0.040	0.038	0.070	0.076	0.080	0.080	0.080	0.082
หญิง3	0.040	0.044	0.060	0.066	0.080	0.080	0.070	0.072
หญิง4	0.020	0.022	0.080	0.064	0.070	0.082	0.080	0.084
หญิง5	0.020	0.022	0.040	0.042	0.050	0.052	0.040	0.040

ทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบ ไม่รูกำลัง โดยจะหาค่าความเที่ยงตรงได้จากสมการที่ 2.11 และหาค่าความแม่นยำได้จากสมการที่ 2.12 ซึ่งสามารถแสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รูกำลังได้ดัง ตารางที่ 4.15 และตารางที่ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 ค่าความเที่ยงตรงของอาสาสมัครแต่ละคน

อาสาสมัคร คนที่	ค่าความเที่ยงตรง (%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	80.00	85.00	90.00	85.72
2	80.00	100.00	95.00	95.00
3	60.00	80.00	75.00	95.00
4	80.00	100.00	99.33	75.00
5	95.00	91.43	100.00	97.50
6	90.00	90.00	100.00	97.14
7	90.00	80.00	82.86	95.00
8	90.00	95.00	95.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ค่าความแม่นยำของอาสาสมัครแต่ละคน

อาสาสมัคร คนที่	ค่าความแม่นยำ			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
1	0.0160 ± 0.0072	0.0340 ± 0.0088	0.0300 ± 0.0140	0.0800 ± 0.0340
2	0.0120 ± 0.0032	0.0200 ± 0.0080	0.0380 ± 0.0144	0.0380 ± 0.0176
3	0.0140 ± 0.0048	0.0240 ± 0.0128	0.0300 ± 0.0120	0.0420 ± 0.0184
4	0.0120 ± 0.0032	0.0200 ± 0.0120	0.0280 ± 0.0104	0.0400 ± 0.0120
5	0.0380 ± 0.0104	0.0760 ± 0.0256	0.0880 ± 0.0120	0.0820 ± 0.0284
6	0.0440 ± 0.0192	0.0660 ± 0.0088	0.0800 ± 0.0120	0.0720 ± 0.0224
7	0.0220 ± 0.0104	0.0640 ± 0.0152	0.0820 ± 0.0224	0.0840 ± 0.0152
8	0.0220 ± 0.0104	0.0420 ± 0.0136	0.0520 ± 0.0136	0.0400 ± 0.0200

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้น โดยการนำค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำของอาสาสมัครทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยพบว่า ได้ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดที่สร้างขึ้น เท่ากับ 89.50% และค่าความแม่นยำสามารถแบ่งเป็นช่วง ๆ ได้ ดังนี้ ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.01-0.03 มีค่าความแม่นยำ 0.0208 ± 0.0090 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.03-0.05 มีค่าความแม่นยำ 0.0395 ± 0.0149 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.05-0.07 มีค่าความแม่นยำ 0.0606 ± 0.0125 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.07-0.09 มีค่าความแม่นยำ 0.0805 ± 0.0215 ต่อการดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ต่อ 1 ครั้ง จำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รูกำลัง สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนของการสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์ ส่วนของการออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณเซ็นเซอร์แสงฝั่งภาคส่ง และวงจรฝั่งภาครับ ส่วนของการรวมวงจรและประมวลผลสัญญาณเพื่อนำไปคำนวณหาระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด และส่วนของการแสดงผลบนหน้าจอ โดยได้ทำการศึกษาลักษณะต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ และสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

- 1) สามารถเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 80 และ 190 เฮิรตซ์
- 2) สามารถออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณเซ็นเซอร์แสงฝั่งภาคส่ง และวงจรฝั่งภาครับได้
- 3) สามารถออกแบบและสร้างวงจรรวมทั้งหมดได้
- 4) สามารถออกแบบและสร้างตัวกรองแถบความถี่ผ่าน เพื่อนำไปใช้ในการแยกสัญญาณ FDM ให้เป็นสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร
- 5) สามารถออกแบบและสร้างการตีมอดูเลตแบบตรรกะจับซิงโครไนส์ดีเทคชัน เพื่อให้สัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณเอเอ็มของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร เป็นสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร
- 6) สามารถออกแบบและสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อนำไปใช้ในการตีมอดูเลตสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณความถี่สูงของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร ให้เป็นสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร
- 7) สามารถนำสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 940 นาโนเมตร และสัญญาณ PPG ของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ 1040 นาโนเมตร มาคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับได้
- 8) สามารถนำค่าอัตราการดูดซับไปคำนวณหาค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดได้ โดยใช้สมการ $\% BAC = 0.1113(R) - 0.1191$
- 9) สามารถเขียนโปรแกรม Arduino IDE ในการสร้างสัญญาณไซน์ การรับสัญญาณ FDM เข้าพอร์ต ADC การประมวลผลสัญญาณ การคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับ การคำนวณหาค่าระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือด และการแสดงผลข้อมูลบนหน้าจอ LCD
- 10) สามารถนำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รูกำลังได้ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รูกำลัง เท่ากับ 89.50% และได้ค่าความแม่นยำแบ่งเป็นช่วง ๆ ได้ ดังนี้ ที่ระดับปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลกอฮอล์ 0.01-0.03 มีค่าความแม่นยำ 0.0208 ± 0.0090 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.03-0.05 มีค่าความแม่นยำ 0.0395 ± 0.0149 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.05-0.07 มีค่าความแม่นยำ 0.0606 ± 0.0125 ที่ระดับปริมาณแอลกอฮอล์ 0.07-0.09 มีค่าความแม่นยำ 0.0805 ± 0.0215 ต่อการต้มเครื่องต้มแอลกอฮอล์ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ต่อ 1 ครั้ง จำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญญานิพนธ์ เรื่อง เครื่องวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดแบบไม่รุกราน สามารถนำมาใช้ในการวัดระดับแอลกอฮอล์ได้จริง แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของประสิทธิภาพของเครื่องที่ยังไม่มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำมากพอ เนื่องจากย่านแสงที่ใช้ในการวัดแอลกอฮอล์นั้นอยู่ในช่วงเดียวกับย่านแสงที่สามารถใช้วัดน้ำตาลในเลือดได้ ดังนั้น ควรศึกษาและทดลองใช้ช่วงของย่านแสงที่ไม่มีตัวแปรอื่นรบกวน

บรรณานุกรม

- [1] Wen-fei Liu. “Non-invasive measurement study of human blood alcohol concentration based on NIR dynamic spectrum”.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6109091>.
- [2] Panagiotis Antoniadis and Michal Aibin. “Introduction to Curve Fitting”.
<https://www.baeldung.com/cs/curvefitting#:~:text=Curve%20fitting%20is%20the%20process,remove%20noise%20from%20a%20function>.
- [3] วรนิติ คมมีผล. “บทความการตรวจพิสูจน์ว่าเมา”.
http://clmjournal.org/_fileupload/journal/414-1-2.pdf.
- [4] Alcotec. “รู้จักเครื่องเป่าแอลกอฮอล์ตำรวจ”.
<https://www.alco-tec.co.th/th/recommend-standard-police-alcohol>.
- [5] Meir Nitzan and Zehava Ovadia-Blechman. “Physical and physiological interpretations of the PPG signal”.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B97801282337400>.
- [6] ทิพย์นิรินทร์ วัจนะรัตน์. “การพัฒนาระบบวัดช่วงเวลาเดินทางผ่านของซีพจรสำหรับการประมาณค่าความดันโลหิตแบบไร้ปลอกแขน”.
<https://digital.car.chula.ac.th/cgi/viewcontent.cgi?article=10614&context>
- [7] Yang-Yi Chen, Chun-Liang Lin, Yu-Cheng Lin and Changchen Zhao. “Non-invasive detection of alcohol concentration based on photoplethysmogram signals”.
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-ipr.2017>.
- [8] IoT Engineering Education. “การสร้างสัญญาณพัลส์โดยใช้ Arduino-ESP32”.
https://iot-kmutnb.github.io/blogs/esp32/arduino_esp32_pulse_counter.
- [9] มหาวิทยาลัยขอนแก่น. “การมอดูเลต”.
<http://eestaff.kku.ac.th/~virasit/192231/>.

- [10] DEI Virtual Lab. “Amplitude Demodulation”.
http://www.evaldate.in/lab2/pages/AM-Demod/AM-D/AM-D_I.html
- [11] ดร.พิพัฒน์ หิรัญย์วณิชชากร. “การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่”.
<https://th.wikipedia.org/wiki/>.
- [12] การเรียนรู้เกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์. “ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน”.
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Low-pass-filter.php>.
- [13] Techopedia. “ตัวกรองผ่านแถบคืออะไร”.
<https://th.theastrologypage.com/band-pass-filter>.
- [14] Hackster.io. “ตัวขับLED”.
<https://th.element14.com/lighting-led-drivers-technology>.
- [15] มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. “OP-AMPS”.
<http://pws.npru.ac.th/thawatchait/data/files/Lecture%208%20Op-amp.pdf>.
- [16] มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. “วงจรการประยุกต์ใช้งาน OP-AMPS”.
https://pws.npru.ac.th/thawatchait/data/files/Chapter%203_Application.
- [17] BlueTech LED Technology System. “หลอดไฟ LED”.
<https://www.bluetech-led.com-led>.
- [18] Polaridad. “เรียนรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32”.
https://polaridad.es/th/conoce-el-microcontrolador-utilizado-por-esp32/#google_vignette.
- [19] Yooutuber. “ชิปแรงดันไฟ 324 พิน LM324”.
<https://yooutube.ru/th/324>.
- [20] ชิตชัย โพธิ์ประภา. “โฟโตไดโอด”.
<http://phchitchai.wbvschool.net/page>.
- [21] Mouser Electronics. “2N2221A”.
<https://th.mouser.com/ProductDetail/Central-Semiconductor/2N2221A>.

- [22] Wikipedia. “ออสซิลโลสโคป”.
<https://th.wikipedia.org/wiki>.
- [23] Scmashopping. “Power supply”.
<http://www.scmashopping.com/category/48/electronic-test-measurement-multimeters-clamp-meters-oscilloscopes/1-16-power-supply>.
- [24] Scmashopping. “Signal generators”.
<http://www.scmashopping.com/Category/46/electronic-test-measurement-multimeters-clamp-meters-Oscilloscopes/1-14-signal-generators>.
- [25] PoundXI. “วิธีการใช้งานโปรแกรม Arduino IDE เบื้องต้น”.
<https://poundxi.com/%E0%B8%A7A1-arduino-ide>.
- [26] ครูประภาส. “การใช้งานโปรแกรมออกแบบลายวงจรพิมพ์ด้วย EasyEDA”.
https://passport.easyeda.com/#/login?response_type=code&client_id=easyeda.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <driver/dac.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <math.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
#define l 7500
#define DAC1 25
#define DAC2 26
int n = 0;
float R = 0;
int loopnum = l;
const int sensor = 34;
float array_receive[l] = {};
float array_190[l] = {};
float array_80[l] = {};
float yIR940_1 = 0 ;
float yIR940_2 = 0 ;
float yIR940_0 = 0 ;
float yIR940_L0 = 0 ;
float yIR940_L1 = 0 ;
float yIR940_L2 = 0 ;
float yIR1040_0 = 0;
float yIR1040_1 = 0;
float yIR1040_2 = 0;
float yIR1040_L0 = 0 ;
float yIR1040_L1 = 0 ;
float yIR1040_L2 = 0 ;
float PPG_IR940 = 0;
float PPG_IR1040 = 0;
float ysub_IR940 = 0;
float ysub_IR1040 = 0;
float yIR940_MAX = 0;
float yIR940_MIN = 0 ;
float yIR1040_MAX = 0;
float yIR1040_MIN = 0 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float IR190HZ = 0;
float IR80HZ = 0;
float freq190 = 48;
float freq80 = 21;
float BAC = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
}

void loop() {
  for (n = 0; n < loopnum; n++)
  {
    IR190HZ = 128 + (20 * sin((freq190 * n * Pi) / 180));
    array_190[n] = IR190HZ ;
    dacWrite(DAC1, IR190HZ);

    IR80HZ = 128 + (20 * sin((freq80 * n * Pi) / 180));
    array_80[n] = IR80HZ ;
    dacWrite(DAC2, IR80HZ);

    // กำหนดค่าเริ่มต้นของจุดสูงสุดและจุดต่ำสุด
    yIR940_MIN = 9999999999 ; yIR940_MAX = 0 ;
    yIR1040_MIN = 9999999999 ; yIR1040_MAX = 0 ;

    array_receive[n] = analogRead(sensor) / 10 ;

    delayMicroseconds(475);
  }

  for (n = 2; n < loopnum; n++)
  {
    // BandPass Filter Design IR80

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

        if ((ysub_IR1040 < 0) && ((yIR1040_L0 - yIR1040_MIN) < 0)) // ค่าของ IR
ที่ได้น้อยกว่าค่าเดิม
    {
        yIR1040_MIN = yIR1040_L0 ; // ปรับค่า Minimum IR1040
    }
    if ((ysub_IR940 < 0) && ((yIR940_L0 - yIR940_MIN) < 0)) // ค่าของ RED ที่
ได้น้อยกว่าค่าเดิม
    {
        yIR940_MIN = yIR940_L0 ; // ปรับค่า Minimum IR940
    }
}
yIR940_L2 = yIR940_L1 ;
yIR940_L1 = yIR940_L0 ;
yIR1040_L2 = yIR1040_L1 ;
yIR1040_L1 = yIR1040_L0 ;
}

R = ((yIR940_MAX - yIR940_MIN) / ((yIR940_MAX + yIR940_MIN) / 2)) /
((yIR1040_MAX - yIR1040_MIN) / ((yIR1040_MAX + yIR1040_MIN) / 2)) ;

BAC = (0.1113 * R) - 0.1191;

// Set negative BAC values to zero
if (BAC < 0) {
    BAC = 0;
}

Serial.print("R = ");
Serial.println(R);
Serial.print("IR940_MAX = ");
Serial.println(yIR940_MAX);
Serial.print("IR940_MIN = ");
Serial.println(yIR940_MIN);
Serial.print("IR1040_MAX = ");
Serial.println(yIR1040_MAX);
Serial.print("IR1040_MIN = ");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Serial.println(yIR1040_MIN);  
Serial.print("BAC (%) = ");  
Serial.println(BAC);  
  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("BAC (%) = ");  
lcd.print(BAC);  
  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้