



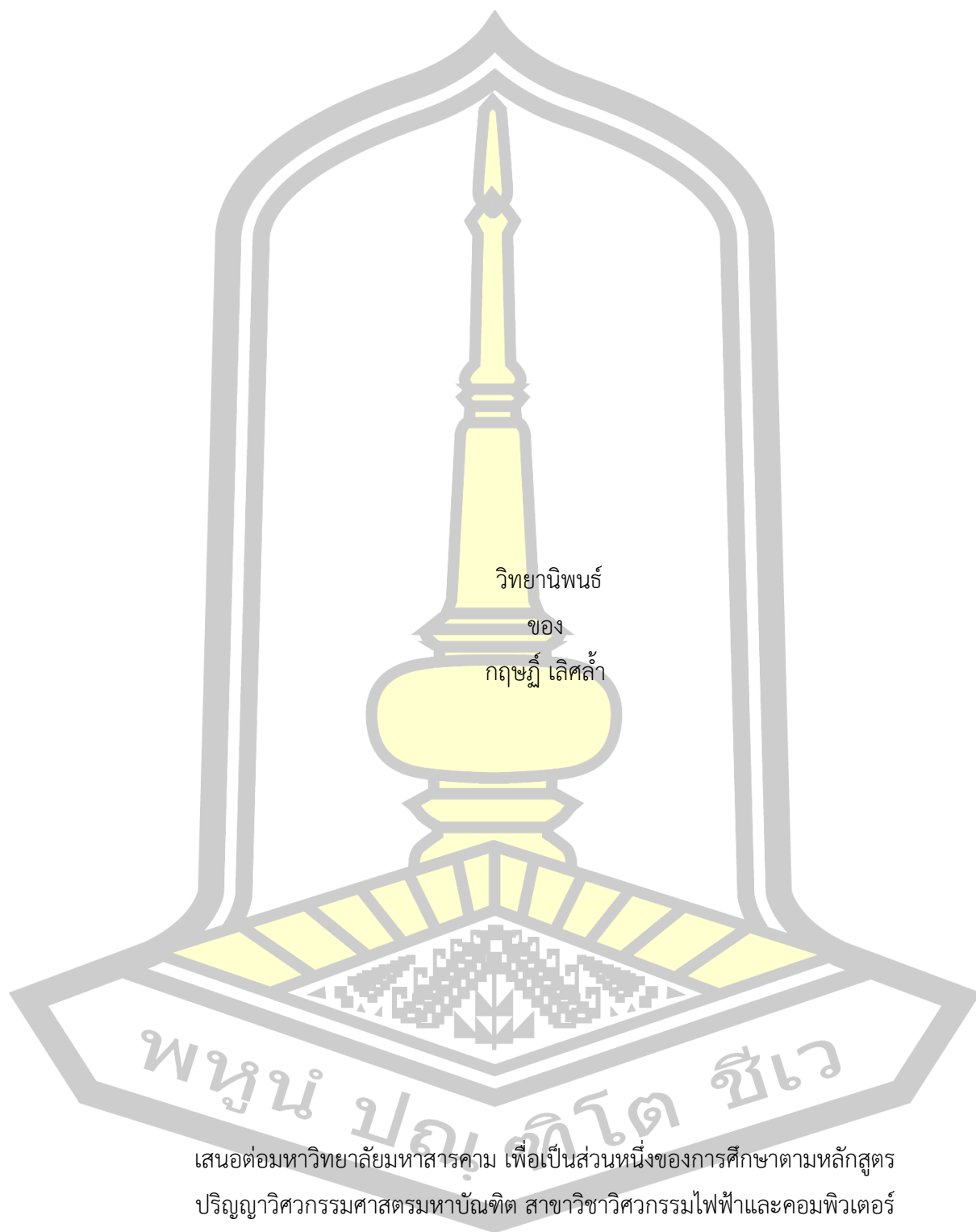
การลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนโดยใช้เทคนิคกรงฟาราเดย์

วิทยานิพนธ์  
ของ  
กฤษฎี เลิศล้ำ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนโดยใช้เทคนิคกรงฟาราเดย์

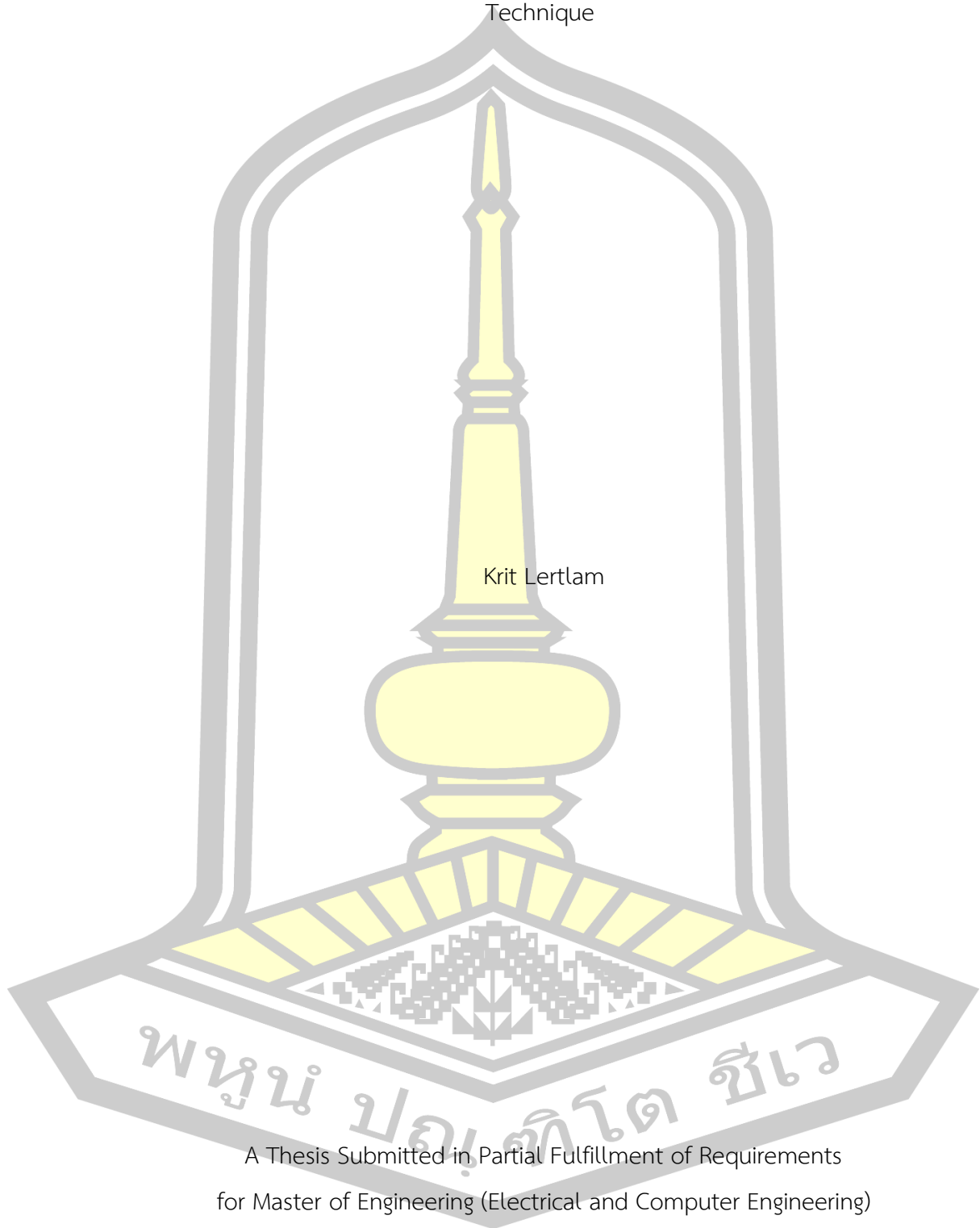


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Electro-Static Discharge Reduction in Silicone Filling Process using Faraday Cage  
Technique



Krit Lertlam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

May 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกฤษฎ์ เลิศล้ำ แล้ว  
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง )

กรรมการ

(ผศ. ดร. นวรัตน์ พิลาแดง )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



**ชื่อเรื่อง** การลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนโดยใช้เทคนิคกรงฟาราเดย์  
**ผู้วิจัย** กฤษฎี เลิศล้ำ  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง  
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
**มหาวิทยาลัย** มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2564

### บทคัดย่อ

จากการศึกษากระบวนการผลิตซิลิโคนพบว่ามีการปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรงในส่วนของการกรองซิลิโคนผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเพื่อหาสาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรงพบว่าในกระบวนการกรองซิลิโคนมีวัสดุที่เกี่ยวข้องกับไทโรโบอิเล็กทริกซีรีโต้แก์ ซิลิโคนที่มีส่วนผสมของซิลิโคนเป็นหลัก NMO-50 และ 80 ไมโครเมตร ซึ่งทำมาจากผ้าไนลอน ด้วยซิลิโคนที่มีความหนืดสูงมากทำให้ในกระบวนการกรองซิลิโคนจำเป็นต้องมีแรงอัดซิลิโคนขนาด 150 ถึง 200 บาร์ เพื่อกรองซิลิโคนให้มีความละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้มีการเสียดสีระหว่างซิลิโคนและผ้าไนลอน จนทำให้เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรง อีกทั้งยังส่งผลให้พนักงานที่ปฏิบัติงานในโรงงานได้รับผลกระทบจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนโดยเทคนิคกรงฟาราเดย์ ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาและทดลองในรูปแบบการจำลองดังนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de Graeff) เป็นต้นแบบในการศึกษาการสร้างประจุไฟฟ้าสถิต ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุที่อ้างอิงมาจากทฤษฎีไทโรโบอิเล็กทริกซีรีโต้แก์ ท่อ PVC และผ้าไนลอน เพื่อสร้างประจุไฟฟ้าสถิตแบบจำลองระบบวัดประจุไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการวัดประจุไฟฟ้าสถิต และกรงฟาราเดย์ที่ใช้ในการลดปริมาณไฟฟ้าสถิต ผู้วิจัยได้แบ่งทดลองออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยไม่มีกรงฟาราเดย์ การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราวด์ และการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์โดยมีการติดตั้งระบบกราวด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรงฟาราเดย์สามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตถึง 51% โดยไม่มีการติดตั้งระบบกราวด์ และเมื่อกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งระบบกราวด์จะมีปริมาณไฟฟ้าสถิตลดลงถึง 71%

คำสำคัญ : กรงฟาราเดย์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de graaff)

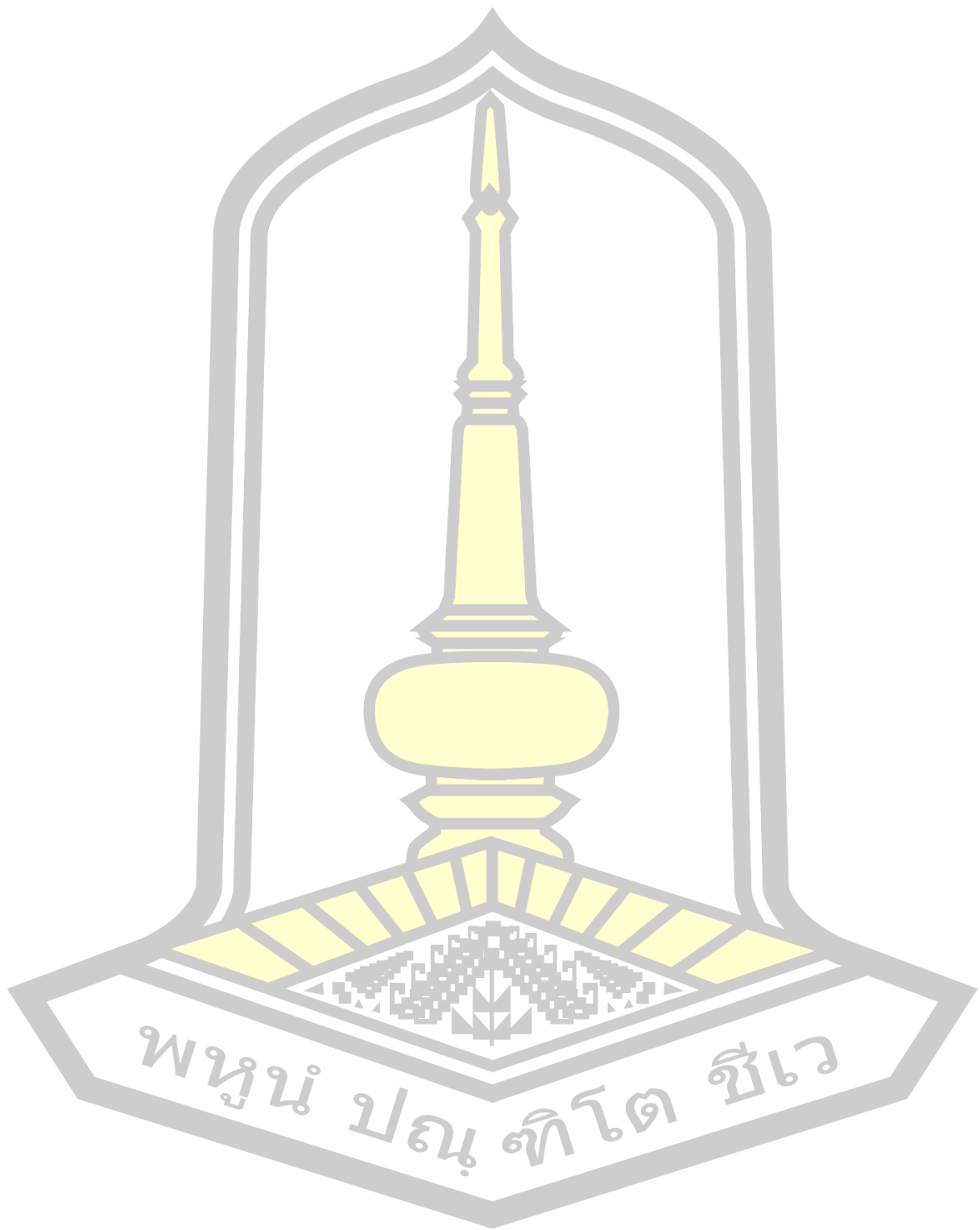
<b>TITLE</b>	Electro-Static Discharge Reduction in Silicone Filling Process using Faraday Cage Technique		
<b>AUTHOR</b>	Krit Lertlam		
<b>ADVISORS</b>	Assistant Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Engineering	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2021

### ABSTRACT

From the study of silicone glue filtering process finding, the intensive phenomenon of electrostatic discharge in the silicone glue filtering process. The researcher has studied the cause of the intensive electrostatic discharge and noticed that the filtering process had 2 triboelectric materials, There is a silicone glue that flows away from the filter which made from nylon which made a large amount of electrostatic charge that harm for the worker in this process.

This research studied how to reduce the amount of electrostatic charge in the silicone glue filtering process using a Faraday cage. This experimentation according to the generation of electrostatic charge from the Van de Graaff generator. The researcher has chosen 2 materials there are PVC pipe and Nylon fabric to generate the reference electrostatic charge. There are 3 parts of experimentation consists of the measurement of the electrostatic charge quantity without a Faraday cage, with a Faraday cage with no grounding, and a Faraday cage with grounding. From the result finding, the Faraday cage with no grounding can reduce the amount of electrostatic charge by 51 percent and 71 percent for the Faraday cage with grounding.

Keyword : faraday cage, Electrostatic generators (Ven de Greeff)



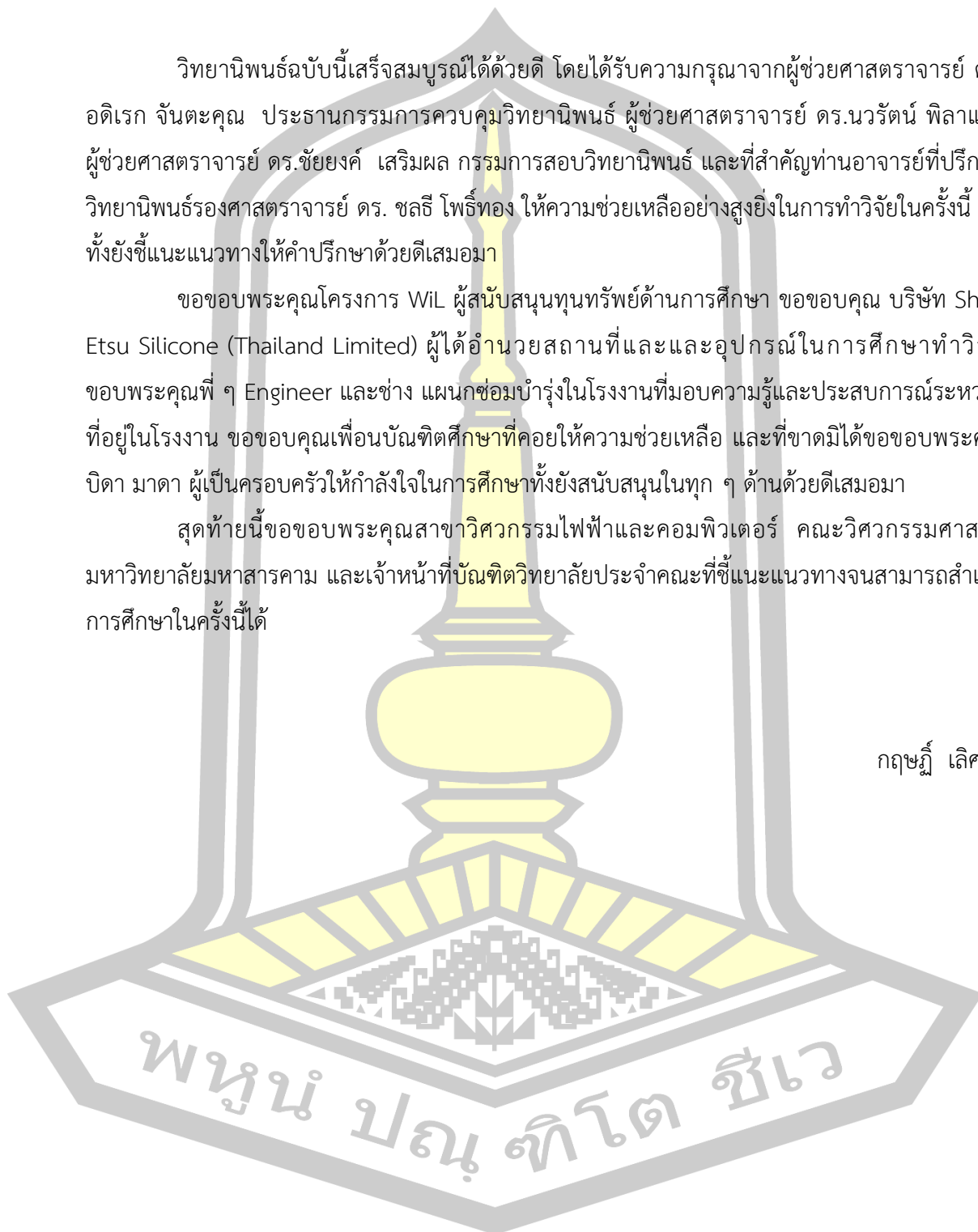
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติเรก จันทะคุณ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวรรตน์ พิลาแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เสริมผล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และที่สำคัญท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง ให้ความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งในการทำวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งยังชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณโครงการ WiL ผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ด้านการศึกษา ขอขอบคุณ บริษัท Shin-Etsu Silicone (Thailand Limited) ผู้ได้อำนวยสถานที่และอุปกรณ์ในการศึกษาทำวิจัย ขอขอบพระคุณพี่ ๆ Engineer และช่าง แผนกซ่อมบำรุงในโรงงานที่มอบความรู้และประสบการณ์ระหว่างที่อยู่ในโรงงาน ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ และที่ขาดมิได้ขอขอบพระคุณ บิดา มาตา ผู้เป็นครอบครัวให้กำลังใจในการศึกษาทั้งยังสนับสนุนในทุก ๆ ด้านด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยประจำคณะที่ชี้แนะแนวทางจนสามารถสำเร็จ การศึกษาในครั้งนี้ได้

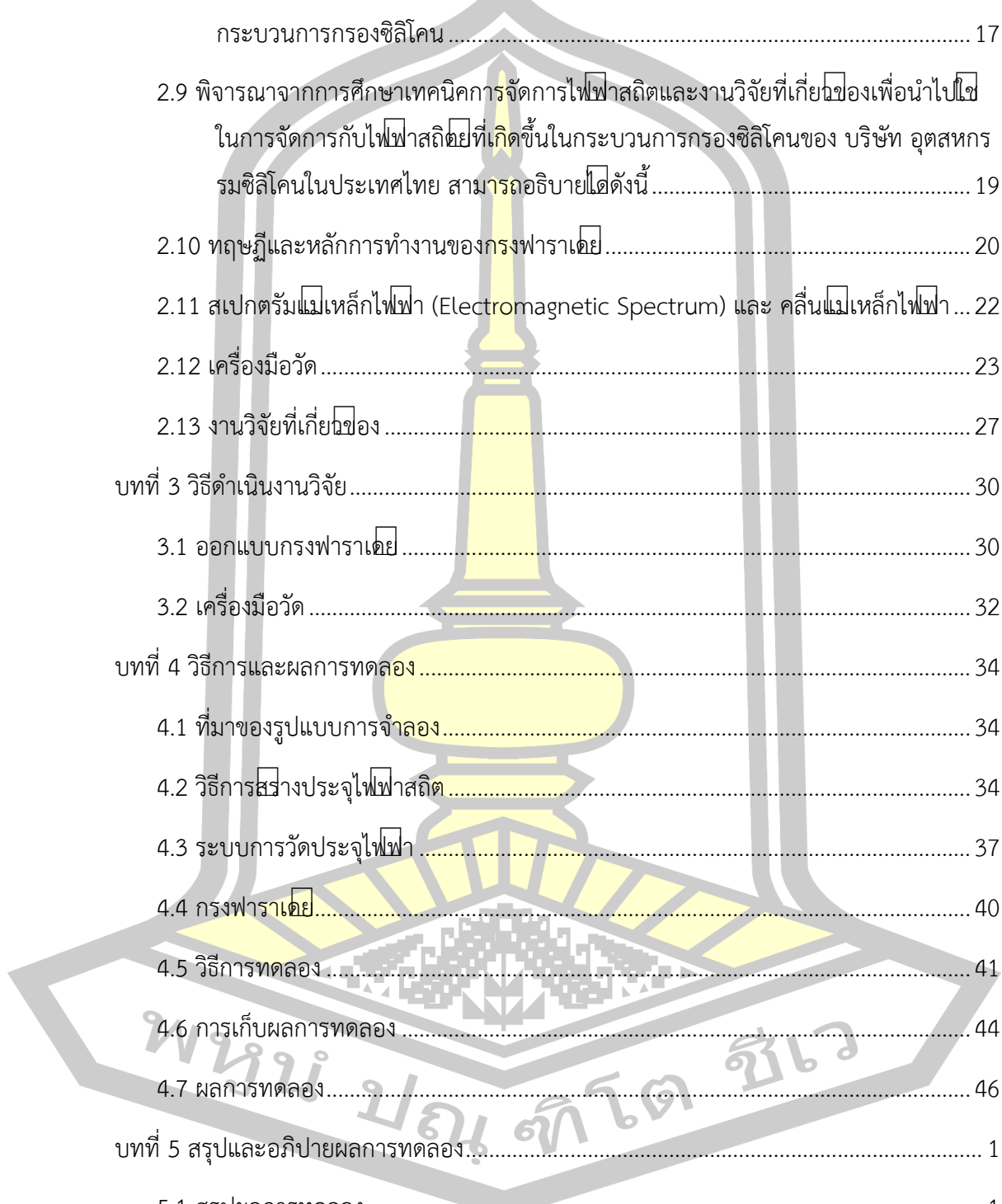
กฤษฎี เลิศล้ำ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้จากงานวิจัยครั้งนี้.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการกรองซิลิโคน.....	5
2.2 ไฟฟ้าสถิต (Static Electricity).....	10
2.3 ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric).....	11
2.4 การคายเทประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge : ESD).....	12
2.5 พิจารณาจากการศึกษาทฤษฎีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสาเหตุการเกิดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคน.....	12
2.6 ผลกระทบที่เกิดจากการคายเทประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge) อย่างรุนแรง.....	15

2.7	เทคนิคและวิธีการแก้ไขปัญหาไฟฟ้าสถิตของกระบวนการกรองซิลิโคนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ..	16
2.8	เทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและพิจารณานำไปใช้กับกระบวนการกรองซิลิโคน .....	17
2.9	พิจารณาจากการศึกษาเทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ในการจัดการกับไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองซิลิโคนของ บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย สามารถอธิบายได้ดังนี้ .....	19
2.10	ทฤษฎีและหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ .....	20
2.11	สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ...	22
2.12	เครื่องมือวัด .....	23
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย .....	30
3.1	ออกแบบกรงฟาราเดย์ .....	30
3.2	เครื่องมือวัด .....	32
บทที่ 4	วิธีการและผลการทดลอง .....	34
4.1	ที่มาของรูปแบบการจำลอง .....	34
4.2	วิธีการสร้างประจุไฟฟ้าสถิต .....	34
4.3	ระบบการวัดประจุไฟฟ้า .....	37
4.4	กรงฟาราเดย์ .....	40
4.5	วิธีการทดลอง .....	41
4.6	การเก็บผลการทดลอง .....	44
4.7	ผลการทดลอง .....	46
บทที่ 5	สรุปและอภิปรายผลการทดลอง .....	1
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	1
5.2	อภิปรายการทดลอง .....	2
5.3	ข้อเสนอแนะ .....	2

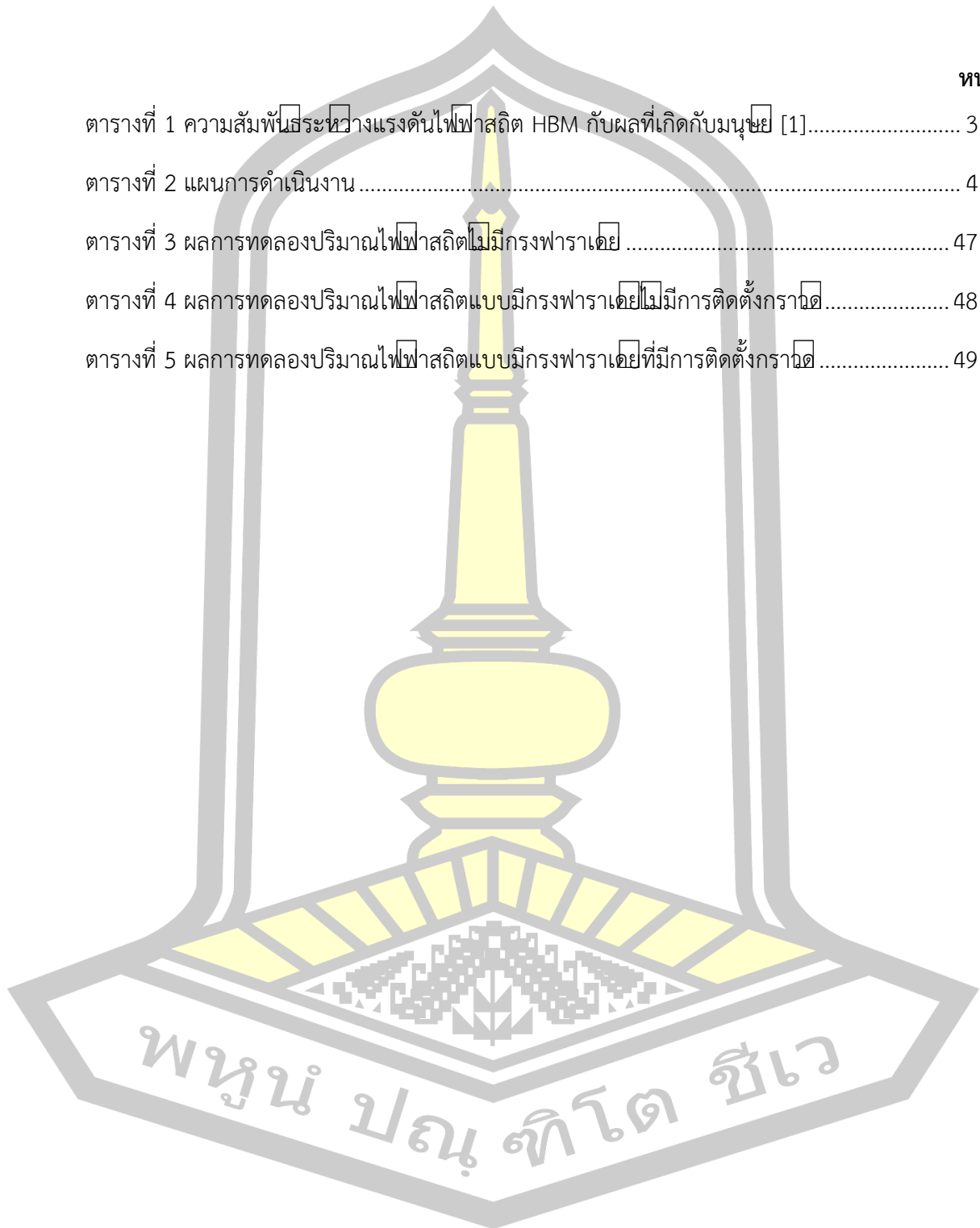


บรรณานุกรม.....	3
ภาคผนวก.....	7
ภาคผนวก ก ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟารา เดย์ไม่มีการติดตั้งกราด.....	8
ภาคผนวก ข ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟารา เดย์ไม่มีการติดตั้งระบบกราด.....	29
ภาคผนวก ค ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟารา เดย์มีการติดตั้งระบบกราวด์.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	64



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสถิต HBM กับผลที่เกิดกับมนุษย์ [1].....	3
ตารางที่ 2 แผนการดำเนินงาน .....	4
ตารางที่ 3 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตไม่มีกรงฟาราเดย์ .....	47
ตารางที่ 4 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด .....	48
ตารางที่ 5 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราด .....	49



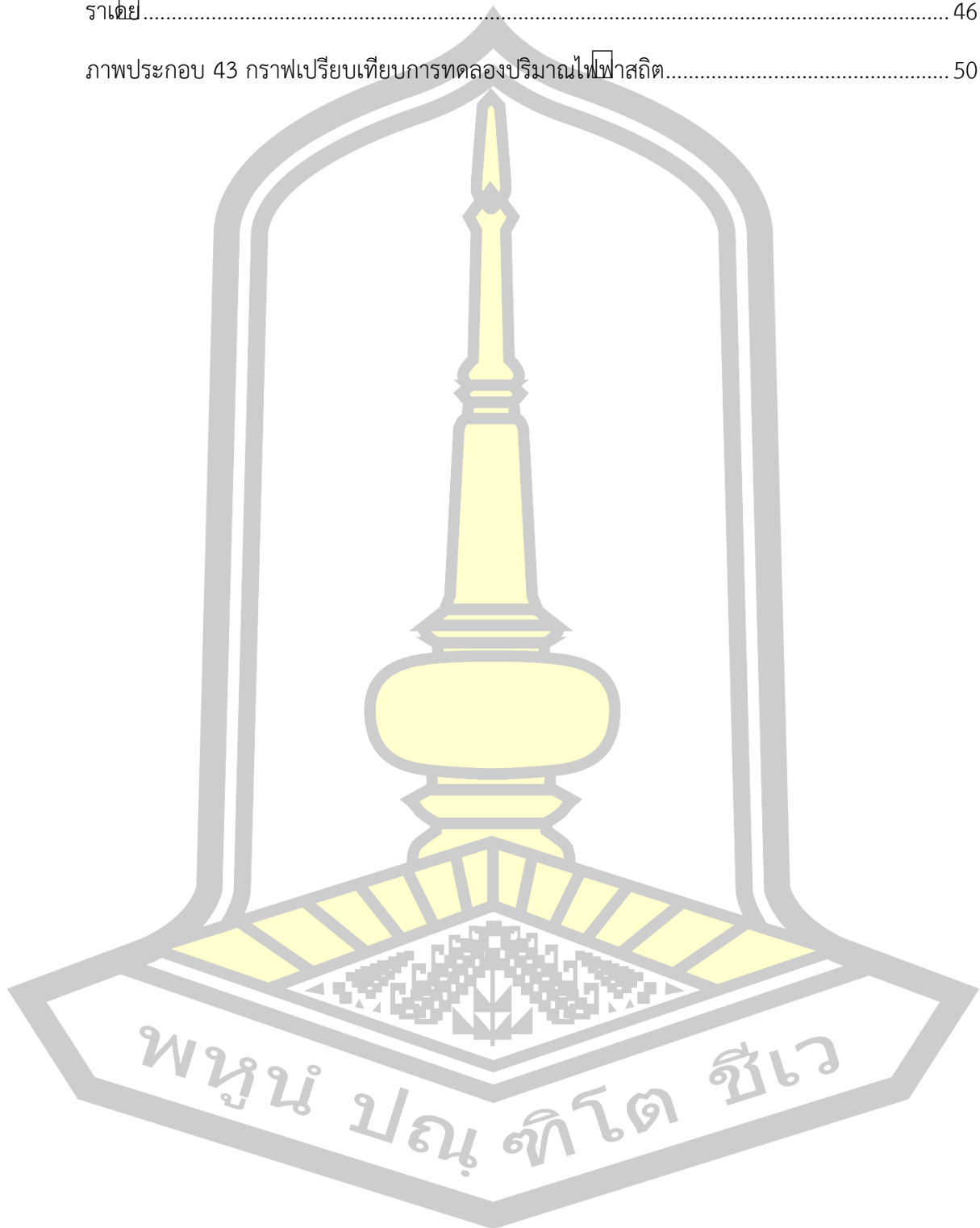


## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 เครื่องอัดซิลิโคน (Extruder machine) .....	6
ภาพประกอบ 2 แสดงภาพจำลอง ถังผสม (Vessel).....	7
ภาพประกอบ 3 แสดงภาพจำลอง วาล์ว (Valve).....	7
ภาพประกอบ 4 แสดงภาพจำลองท่อลำเลียง (Pipeline).....	8
ภาพประกอบ 5 แสดงภาพจำลองตัวกรองซิลิโคน (Basket Filter).....	8
ภาพประกอบ 6 แสดงภาพจำลองส่วนประกอบย่อยของตัวกรองซิลิโคน (Basket Filter).....	9
ภาพประกอบ 7 แสดงภาพจำลอง ถังบรรจุ.....	10
ภาพประกอบ 8 ตารางไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series) .....	11
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของซิลิโคน [5].....	13
ภาพประกอบ 10 การเคลื่อนที่ของซิลิโคน .....	14
ภาพประกอบ 11 การเคลื่อนที่ของซิลิโคนในตัวกรองซิลิโคน (Basket filter).....	15
ภาพประกอบ 12 ภาพจำลอง ระบบกราดที่ใช้ในระบบการผลิต .....	16
ภาพประกอบ 13 ภาพแสดงจำลองการกีดขวางสนามไฟฟ้าของกรงฟาราเดย์แบบ 2 มิติ [10].....	20
ภาพประกอบ 14 ภาพจำลองหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ แบบ 2 มิติ [16].....	21
ภาพประกอบ 15 แสดงย่านความถี่ของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า [18].....	23
ภาพประกอบ 16 ฝายฟาราเดย์และอิเล็กทรอนิกส์ [20].....	24
ภาพประกอบ 17 การวัดประจุด้วยฝายฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน [20].....	24
ภาพประกอบ 18 วงจรอุปแอมป์แบบอินทิเกรตออสซิลเลเตอร์ส่วนที่หนึ่งและวงจรขยายส่วนที่สอง [20].....	25
ภาพประกอบ 19 การวัดประจุด้วยฝายฟาราเดย์แบบเคลื่อนที่ผ่าน [20].....	26
ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันขาออก.....	26
ภาพประกอบ 21 ภาพจำลองกรงฟาราเดย์ที่ติดตั้งกับ GAF Filter.....	32

ภาพประกอบ 22 เซนเซอร์วัดไฟฟ้าสถิต .....	33
ภาพประกอบ 23 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de Graaff Generator).....	35
ภาพประกอบ 24 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างไฟฟ้าสถิต .....	36
ภาพประกอบ 25 แสดงภาพจำลองเครื่องสร้างไฟฟ้าสถิต .....	36
ภาพประกอบ 26 แสดงภาพจริงของเครื่องสร้างไฟฟ้าสถิต.....	37
ภาพประกอบ 27 ภาพจำลองระบบการวัดประจุไฟฟ้า .....	38
ภาพประกอบ 28 แผ่นทองแดง ขนาด 10x10 เซนติเมตร.....	38
ภาพประกอบ 29 วงจรขยายสัญญาณ.....	38
ภาพประกอบ 30 ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) รุ่น GDS-2074A .....	39
ภาพประกอบ 31 แสดงภาพจริงของระบบการวัดประจุไฟฟ้า .....	39
ภาพประกอบ 32 ลักษณะของการแสดงผลเริ่มต้นของระบบการวัดประจุไฟฟ้า.....	40
ภาพประกอบ 33 ตั๊กแตนอลูมิเนียม .....	40
ภาพประกอบ 34 แสดงภาพจำลองการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอกและแผ่นอิเล็กโทรด41	
ภาพประกอบ 35 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอกและแผ่นอิเล็กโทรด....	42
ภาพประกอบ 36 แสดงภาพจำลองการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ และ แผ่นอิเล็กโทรด.....	42
ภาพประกอบ 37 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ และแผ่น อิเล็กโทรด.....	43
ภาพประกอบ 38 แสดงภาพจำลองการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ติดตั้ง ระบบกราวด์ และแผ่นอิเล็กโทรด.....	43
ภาพประกอบ 39 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ติดตั้ง ระบบกราวด์ และแผ่นอิเล็กโทรด.....	44
ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างการแสดงผลจากเครื่องออสซิลโลสโคปของการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต แบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราวด์.....	45
ภาพประกอบ 41 ตัวอย่างการแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต.....	45

ภาพประกอบ 42 ตัวอย่างการแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต ไม่มีกรงฟาราเดย์.....	46
ภาพประกอบ 43 กราฟเปรียบเทียบการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต.....	50



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผู้วิจัยได้รับทุนภายใต้โครงการโรงเรียนในโรงงาน หรือ WiL (Work integrated Learning) ซึ่งเป็นความร่วมมือด้านการเรียนการสอนและการวิจัย 3 ภาคส่วน ได้แก่ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ และบริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย ซึ่งผู้วิจัยมีโอกาสมุ่งมั่นทำงานและดำเนินการวิจัยเพื่อปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการผลิตภายในบริษัทโดยใช้กระบวนการวิจัยและความรู้จากการเรียนการสอนของมหาวิทยาลัยมหาสารคามในการปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการดังกล่าว

จากการเข้าทำงานและการศึกษากระบวนการเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาดังกล่าว ได้รับทราบข้อมูลเบื้องต้นของ บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย ซิลิโคน (Silicone) หรือพอลิซิลอกเซน (Polysiloxanes) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักที่ประกอบด้วยซิลิคอน (Silicon) กับออกซิเจน (Oxygen) และมีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน มีสมบัติเป็นสารที่ละลายตัวยาก ทนทานต่อความร้อนสูง ยึดติดกับวัตถุได้ดี มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อร่างกายของมนุษย์ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมายในด้านต่าง ๆ อาทิ เช่น การผลิตกาว สารเคลือบผิว สารหล่อลื่น เครื่องสำอาง รวมไปถึงการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้นเป็นตัวกำหนดสมบัติที่ต้องการ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาและพัฒนากระบวนการในส่วนของการผลิต Liquid silicone rubber Injection Molding System (LIMs) ประกอบไปด้วยขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ขั้นตอนการเติมสารเคมี เป็นขั้นตอนการเติมสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ซิลิโคนตามคุณสมบัติที่ต้องการลงในถังผสม (Vessel) โดยมีอุปกรณ์และเครื่องจักรที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องบดเบส (Tree Roll Mill) เพื่อไปบดที่เป็นส่วนผสมหลักมีความละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเพื่อลำเลียงสารเคมี มีจำนวนทั้งหมด 6 บ่อ ซึ่งแต่ละบ่อจะลำเลียงสารเคมีแต่ละชนิดลงไปในถังผสมตามปริมาณที่กำหนดไว้ เครื่องชั่งน้ำหนักขนาด 2 ตัน ใช้สำหรับวัดปริมาณสารเคมีที่เติมลงไปถังผสม (Vessel) ขั้นตอนนี้ใช้เวลาทั้งหมดในการเติมสารเคมีลงในถังผสมประมาณ 2 ชั่วโมงต่อ 1 ถัง

**ขั้นตอนที่ 2** ขั้นตอนผสมสารเคมี ขั้นตอนนี้จะสืบเนื่องมาจากขั้นตอนการเติมสารเคมี เพื่อนำสารเคมีมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันหรือเพื่อเร่งปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้เครื่องผสม (Mixing machine) ในการผสมสารเคมีเป็นหลัก กระบวนการผสมสารเคมีจะมีขั้นตอนการผสมย่อย ๆ ดังนี้ Mixing time Scraping Flush Silicone De-air Mixing time Vacuum gauge การผสมสารเคมีแต่ละครั้งจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติที่ต้องการผลิตและจะถูกกำหนดโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพ (QA&QC)

**ขั้นตอนที่ 3** ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ โดยฝ่ายควบคุมคุณภาพการผลิต (QA/QC) จะสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบคุณภาพของซิลิโคน ได้แก่ สิ่งแปลกปลอม (Appearance) ภาวความหนืด (Viscosity) และระยะเวลาในการขึ้นรูป (Curing Time) ซิลิโคนที่ได้รับการตรวจสอบผ่านแล้วจะนำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป หากซิลิโคนที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะได้รับใบแจ้งงานจากฝ่ายควบคุมคุณภาพการผลิต (QA/QC) เพื่อแจ้งงานตามที่กำหนดไว้

**ขั้นตอนที่ 4** ขั้นตอนการกรองซิลิโคน จะใช้เครื่องอัด (Extruder Machine) เป็นหลักในการอัดซิลิโคนที่อยู่ในถังผสมด้วยแรงดันขนาด 150-200 บาร์ โดยมีตัวกรอง (Basket Filter) ที่ทำหน้าที่ในการกรองซิลิโคนที่ถูกอัดออกมาเพื่อให้ซิลิโคนมีความละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นไม่มีตะกอนตกค้างในผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาวิจัยพบว่ามีปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการกรองซิลิโคน ในขณะที่ทำการกรองซิลิโคนจะไหลออกมาจากตัวกรองซิลิโคน (Basket Filter) พร้อมกับเกิดปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge) อย่างรุนแรงส่งผลกระทบต่อพนักงานที่กำลังปฏิบัติงานในหน่วยงานถูกไฟฟ้าสถิตช็อตส่งผลทำให้เกิดอาการต่าง ๆ ตามมา [1] โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสถิตกับผลที่เกิดกับร่างกายมนุษย์ซึ่งจัดทำโดยสมาคมอุตสาหกรรมความปลอดภัยนานาชาติโดยใช้ Human Body Model (HBM) ดังแสดงในตารางที่ 1

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

ค่าแรงดันไฟฟ้าสถิต HBM (kV)	อาการที่ปรากฏกับมนุษย์
1	<input type="checkbox"/> ไม่มีความรู้สึก
2	<input type="checkbox"/> รู้สึกมีอาการชาที่มือ
3	<input type="checkbox"/> รู้สึกเหมือนโดนเข็มแทงมือ
5	มีอาการชาที่ข้อมแขน
6	มือและแขนมีอาการชา <input type="checkbox"/> ไม่มีแรงถึงบริเวณข้อมือ
7	มือและแขนมีอาการชา <input type="checkbox"/> ไม่มีแรงถึงบริเวณข้อมแขน
8	มือและแขนมีอาการชา <input type="checkbox"/> ไม่มีแรงถึงบริเวณข้อศอก
9	มือและแขนมีอาการชา <input type="checkbox"/> ไม่มีแรงถึงบริเวณรักแร้
10	มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมือ
11	มืออยู่ในสภาพไร้ความรู้สึก เกิดการกระตุกที่ข้อมแขน
12	แขนไม่สามารถสั่งการได้

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสถิต HBM กับผลที่เกิดกับมนุษย์ [1]

ดังนั้นการศึกษาวิจัยปัญหาและผลกระทบที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge) อย่างรุนแรง จากที่ความชื้นในอากาศที่ควรที่จะได้รับการแก้ไขและศึกษาวิธีการแก้ไขอย่างจริงจัง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคน
- 1.2.2 เพิ่มความปลอดภัยในกระบวนการทำงานของบุคลากร

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาสาเหตุการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคน
- 1.3.2 จำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตเพื่อทดลองการลดปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยเทคนิคกรงฟาราเดย์

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยครั้งนี้

- 1.4.1 ลดการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรอง
- 1.4.2 มีความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

### 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 2 แผนการดำเนินงาน

รายการ	ระยะเวลา					
	เดือนที่					
	1-2	3-5	6-8	9-12	13-14	15-16
1. ศึกษาสาเหตุการเกิดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรอง						
2. ศึกษาขั้นตอนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและหาวิธีแก้ไขที่เหมาะสมที่สุด						
3. ศึกษาออกแบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตและจัดสร้างเครื่องมือวัด						
4. ติดตั้งเพื่อทดสอบกรงฟาราเดย์และเก็บรวบรวมข้อมูล						
5. วิเคราะห์และจัดทำรายงานความก้าวหน้าของงานวิจัย						
6. ปรับปรุงกรงฟาราเดย์ และเก็บรวบรวมข้อมูลอีกครั้ง						

### 1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

บริษัท Shin-Etsu Silicone (Thailand Limited) ตั้งอยู่ที่ ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง 21130

พูน ปรณ ทิโต ชีเว



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่ใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาไฟฟ้าสถิตในกระบวนการผลิตของ บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย ซึ่งเนื้อหาประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการกรองซิลิโคน ทฤษฎีเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต (Static Electricity) พิจารณาจากการศึกษาทฤษฎีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสาเหตุ ผลกระทบที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge; ESD) อย่างรุนแรง เทคนิคการแก้ไขปัญหาไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและพิจารณานำไปใช้กับกระบวนการกรองซิลิโคน ทฤษฎี หลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องมือวัดไฟฟ้าสถิต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการกรองซิลิโคน

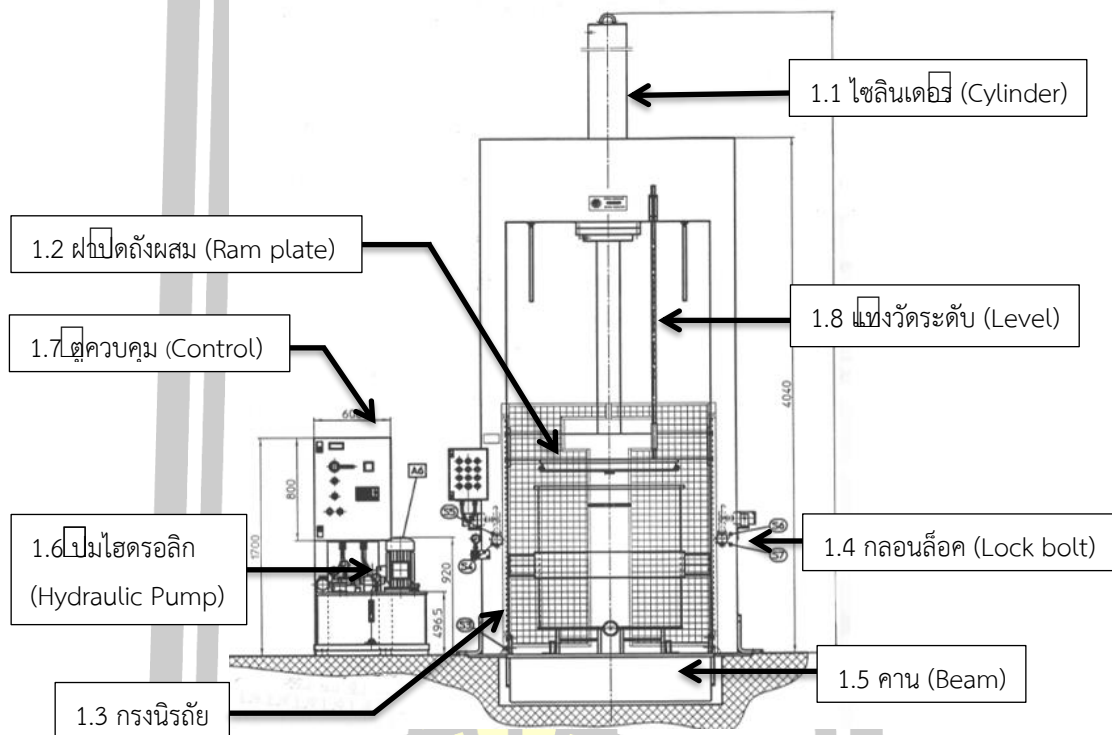
เมื่อพิจารณาส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการกรองซิลิโคน มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เครื่องอัดซิลิโคน (Extruder Machine) ถังผสม (Vessel) วาล์ว (Valve) ไลน์ลำเลียง (Pipeline) ตัวกรอง (Basket filter) และถังบรรจุ (Dram)

**2.2.1 เครื่องอัดซิลิโคน (Extruder Machine)** ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 1 เป็นเครื่องที่อาศัยเทคนิคที่ใช้แรงดันในการอัดซิลิโคนเพื่อให้ซิลิโคนเคลื่อนที่ออกไปยังตัวกรอง (Basket Filter) ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่

- 1) ไซลินเดอร์ (Cylinder) คือกระบอกสูบที่ใช้ไฮดรอลิกเป็นต้นกำลังงานของไหลให้เป็นพลังงานกล ไซลินเดอร์ทำหน้าที่ในการอัดแรงดันส่งไปที่ฝาปิดถังผสมที่เชื่อมติดกับแท่งลูกสูบโครเมียม (Rod Hard Chrome) ของไซลินเดอร์
- 2) ฝาปิดถังผสม (Ram plate) ทำหน้าที่เป็นฝาปิดเพื่ออัดซิลิโคนจากด้านบนของถังผสม ส่วนประกอบย่อยของฝาปิดถังผสม ประกอบไปด้วย แผ่นซีล (Plate seal) แท่งวัดระดับ (Level) เซนเซอร์ทุแฮน (Sensor two hands) เซนเซอร์ดันขึ้น (Sensor plat up) เซนเซอร์ถังผสม (Sensor Vessel) สตอปเปอร์ (Stopper) และ กระจกสะท้อน
- 3) กรงนิรภัย ทำหน้าที่ป้องกันอุบัติเหตุในขณะที่เครื่องอัดซิลิโคนกำลังทำงาน
- 4) กลอนล็อก (Lock bolt) จะมีทั้งสองข้างซ้ายและขวาจะทำงานพร้อมเพื่อรองรับน้ำหนักของคาน (Beam) ที่รับน้ำหนักท่อจากถังผสมในขณะที่ไซลินเดอร์กำลังทำงาน

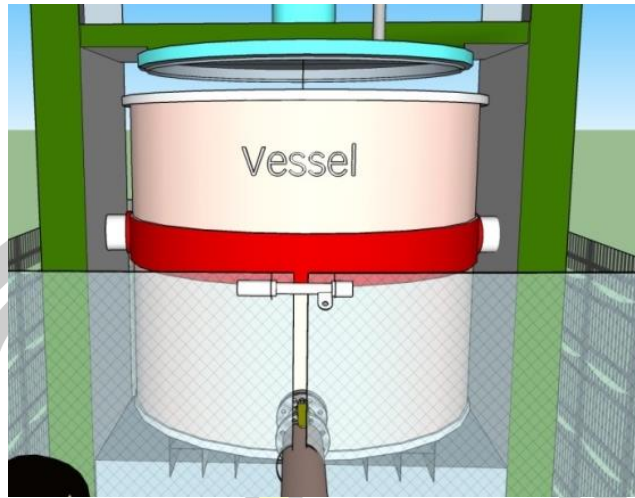


- 5) คาน (Beam) ทำหน้าที่รับน้ำหนักของถังผสมที่บรรจุซิลิโคน
- 6) ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลง พลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เช่น กำลังจาก มอเตอร์ไฟฟ้าให้เป็นพลังงานของไหลในรูปของอัตราการไหลและความดันซึ่งจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลอีกทีเพื่อนำไปใช้ในการอัด และยกถังผสม
- 7) ตู้ควบคุม (Control) ทำหน้าที่ควบคุมสั่งการเครื่องอัดซิลิโคน
- 8) แผงวัดระดับ (Level) ระดับซิลิโคนในถังผสม



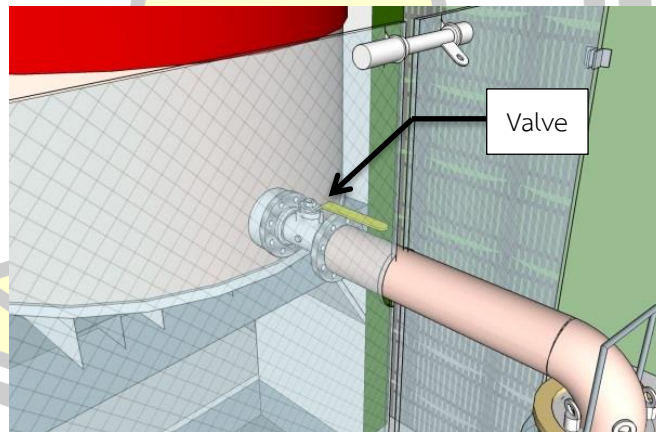
ภาพประกอบ 1 เครื่องอัดซิลิโคน (Extruder machine)

**2.2.2 ถังผสม (Vessel)** ตามภาพประกอบ 2 เป็นภาพขณะที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต ถังผสมจะแยกออกเป็นสองสีอย่างชัดเจน สีแดงคือกระบวนการผลิตฝั่ง A และ สีน้ำเงินคือกระบวนการผลิตฝั่ง B ซึ่งทั้งสองฝั่งจะมีกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน แต่ต่างกันส่วนผสมของสารเคมี ตัวถังผสมมีน้ำหนักมากถึง 700-900 กิโลกรัม สามารถบรรจุสารเคมีได้ถึง 800-900 กิโลกรัม และยังสามารถทน ความร้อน แรงดัน ที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี



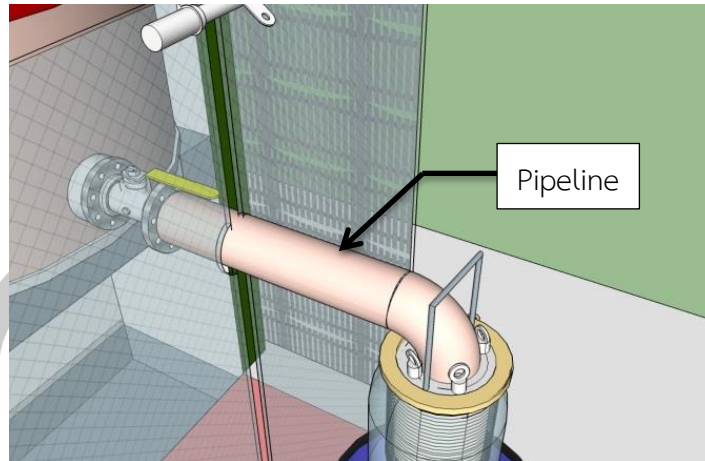
ภาพประกอบ 2 แสดงภาพจำลอง ถังผสม (Vessel)

**2.2.3 วาล์ว (Valve)** ตามภาพประกอบ 3 เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญเป็นวัสดุที่ทำมาจากสแตนเลส โดยจะมีตามคันโยกที่ยึดติดไว้กับตัววาล์วเพื่อใช้ควบคุมวาล์วให้เปิดปิดได้อย่างสามารถเปิดการไหลของของเหลวได้สนิทและรวดเร็ว มีหน้าที่ในการควบคุมการป้องกันไม่ให้อซิลิโคนไหลออกมาในขณะที่เครื่องอัดซิลิโคนไม่ทำงาน ตำแหน่งของวาล์วจะอยู่ระหว่างถังผสมและท่อลำเลียง



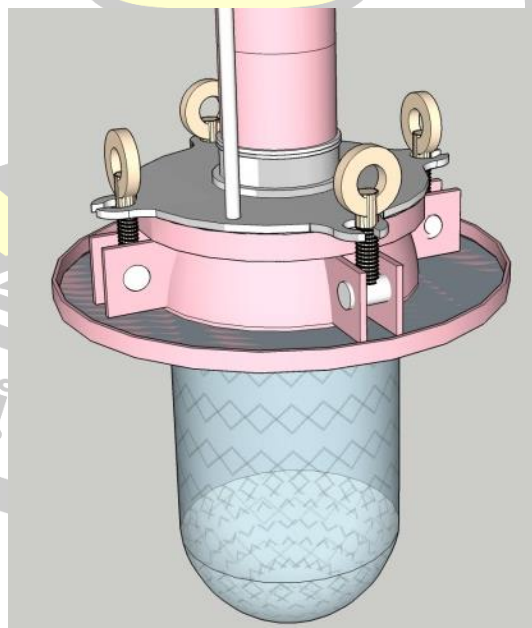
ภาพประกอบ 3 แสดงภาพจำลอง วาล์ว (Valve)

**2.2.4 ท่อลำเลียง (Pipeline)** ตามภาพประกอบ 4 เป็นวัสดุที่ทำมาจากสแตนเลสสามารถทนแรงดันได้สูงตำแหน่งของท่อลำเลียงจะอยู่ระหว่าง วาล์ว และตัวกรองซิลิโคน ทำหน้าที่ลำเลียงซิลิโคนที่ต่อเมื่อถังผสม (Vessel) ถูกฝาปิดถังผสม (Ram plate) อัดด้วยแรงดันขนาด 150-200 บาร์ ซิลิโคนจะเข้าไปยังท่อลำเลียงและลงไปยังตัวกรองเพื่อทำการกรองซิลิโคน

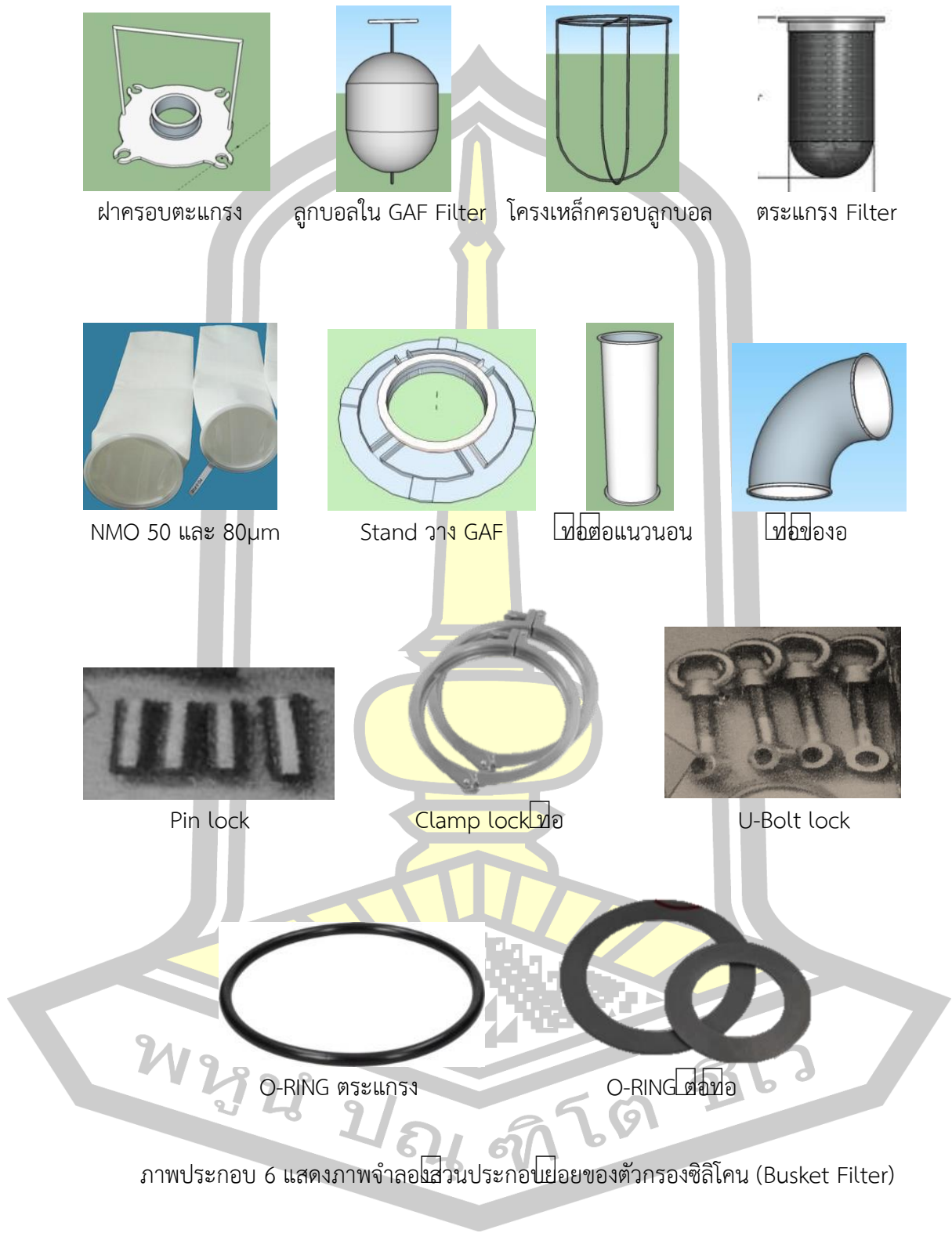


ภาพประกอบ 4 แสดงภาพจำลองท่อลำเลียง (Pipeline)

**2.2.5 ตัวกรอง (Basket Filter)** ตามภาพประกอบ 5 เนื่องจากการขึ้นตอนการผสมที่ยังไม่สมบูรณ์ 100% อาจยังมีสารเคมีบางส่วนที่ยังตกค้างหลงเหลือ ตัวกรองจะช่วยทำหน้าที่ในการกรองเพื่อให้อซิลิโคนมีความละเอียดและผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งจะมีส่วนประกอบย่อยของตัวกรองซิลิโคนจะประกอบไปด้วย ฝาครอบตะแกรง ลูกบอลในตัวกรอง โครงเหล็กครอบลูกบอล ตะแกรง Filter NMO 50µm NMO 80µm Stand วาง GAF ท่อต่อแวนอน ท่อของอ Pin lock Clamp lock ท่อ U-Bolt lock O-RING ตะแกรง O-RING ต่อท่อ ตามภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 5 แสดงภาพจำลองตัวกรองซิลิโคน (Basket Filter)



ฝาครอบตะแกรง

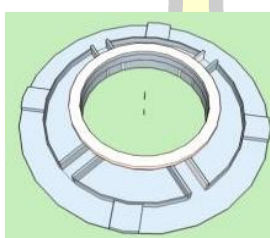
ลูกบอลใน GAF Filter

โครงเหล็กครอบลูกบอล

ตะแกรง Filter



NMO 50 และ 80µm



Stand วาง GAF



ท่อต่อแนวนอน



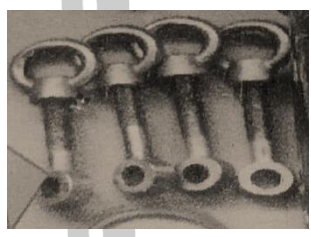
ท่อข้องอ



Pin lock



Clamp lock



U-Bolt lock



O-RING ตะแกรง



O-RING ต่อกิ่ง

ภาพประกอบ 6 แสดงภาพจำลองส่วนประกอบย่อยของตัวกรองซิลิโคน (Busket Filter)

2.2.6 ถังบรรจุ ถังบรรจุเป็นวัสดุที่ทำมาจากโลหะเตรียมการสำหรับบรรจุภัณฑ์ซิลิโคนที่ผ่านกระบวนการผลิต ตามภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงภาพจำลอง ถังบรรจุ

## 2.2 ไฟฟ้าสถิต (Static Electricity)

ไฟฟ้าสถิต [1] [2] เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุ โดยทั่วไป ไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นจาก 3 สาเหตุหลักด้วยกัน ได้แก่ การเหนี่ยวนำ (Induction) การแตะสัมผัส (Conduction) และ การเสียดสีถูกัน (Friction) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเหนี่ยวนำ (Charging by induction) แสดงการเกิดไฟฟ้าสถิตด้วยการเหนี่ยวนำ เมื่อนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้าไปใกล้วัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำจัดเรียงตัวของประจุไฟฟ้าใหม่ในตัววัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าหากนำสายดิน (Grounding) มาต่อจะเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟาลงพื้นดิน ทำให้อัตราที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเป็นวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า

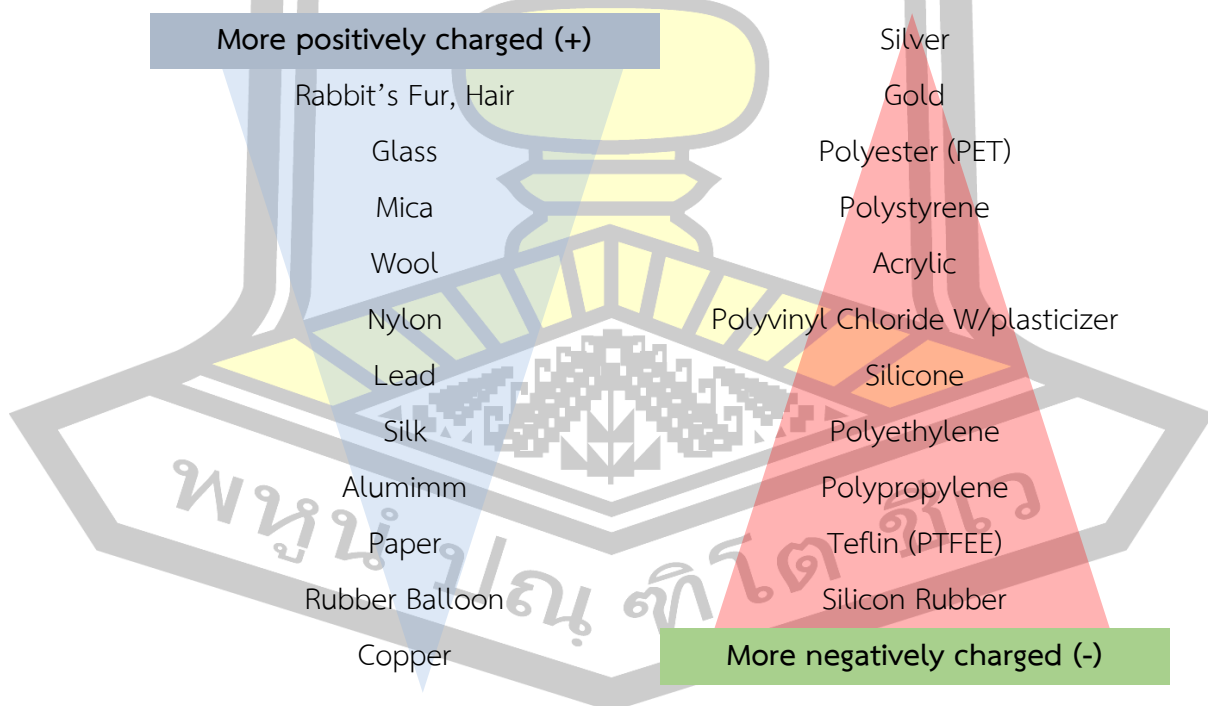
2. การแตะสัมผัส (Charging by Conduction) โดยนำวัตถุที่มีอำนาจทางไฟฟ้าไปแตะหรือสัมผัสกับวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจนกระทั่งวัตถุทั้งสองชนิดมีศักย์ไฟฟ้าเข้ากันจึงจะหยุดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า จากวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้ากลายเป็นวัตถุที่แสดงอำนาจประจุไฟฟ้าเป็นเดียวกันกับวัตถุที่นำมาแตะหรือสัมผัส



3.การเสียดสีด้วยกัน (Charging by Friction) เป็นการนำวัตถุสองชนิดมาเสียดสีกันทำให้มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) เกิดขึ้น วัตถุที่ได้อิเล็กตรอนจะแสดงอำนาจประจุไฟฟ้าเป็นบวก หากวัตถุที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ

### 2.3 ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric)

ไตรโบอิเล็กทริก [3] เกิดจากพื้นฐานของปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต เมื่อวัตถุทั้งสองชนิดเกิดการเสียดสีกันจะทำให้ประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัตถุเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า อันเนื่องมาจากผลของแรงกระตุ้นเชิงกลที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุ โดยที่วัสดุวัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น วัสดุวัสดุจำพวก แก้ว ไนลอน กระจกตาช จะมีความโน้มที่จะเกิดไฟฟ้าสถิตประจุบวก (Positive Charge) เนื่องจากมีความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดี และวัสดุวัสดุจำพวก ยาง PVC ซิลิโคน เส้นใยสังเคราะห์ จะมีความโน้มที่จะเกิดไฟฟ้าสถิตประจุลบ (Negative Charge) เนื่องจากมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี ตามภาพประกอบ 8 ตารางไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) แสดงให้เห็นระดับความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอน



ภาพประกอบ 8 ตารางไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series)

แสดงความจะเป็นศักย์ไฟฟ้าหลังการถ่ายเทประจุ [3]

## 2.4 การคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge : ESD) [4]

การคายประจุไฟฟ้าสถิต คือการคายประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุสองชนิดไม่เท่ากันเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน การเกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตได้ก็ต่อเมื่อมีการสะสมประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวที่มากพอทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับวัตถุที่อยู่บริเวณรอบ ๆ จนมีการแตกตัวของประจุลบและประจุบวกที่ถูกเหนี่ยวนำเดินทางมาประจบบัน ณ จุดจุดหนึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD: ElectroStatic Discharge) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักเป็นการคายประจุที่สะสมอยู่บนพื้นผิววัตถุสูงสุกราคาของโลก การเกิดเหตุการณ์ ESD เกิดขึ้นอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวของกิจกรรมการใช้ชีวิตประจำวันที่มีการสัมผัสหรือแยกจากกันระหว่างวัตถุ ความรุนแรงในการเกิดเหตุการณ์ ESD ในแต่ละครั้ง มีปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยดังนี้

1. ชนิดของวัตถุทั้งสอง ตามตารางโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series) แสดงในภาพประกอบ 8 เมื่อวัตถุทั้งสองชนิดอยู่ห่างกันมากความเป็นไปได้ของการคายประจุไฟฟ้าจะรุนแรงมากกว่าวัตถุทั้งสองชนิดที่อยู่ใกล้กัน
2. ความรุนแรง และระยะเวลาในการเสียดสี เมื่อวัตถุทั้งสองชนิดขัดสีกันอย่างรุนแรงกันมาก การคายประจุไฟฟ้าก็จะคายประจุได้มากเช่นกัน และระยะเวลาในการเสียดสีมากขึ้นยิ่งทำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้ามากขึ้น
3. ความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความชื้นน้อยยิ่งทำให้เกิดการคายประจุและสะสมของประจุไฟฟ้าได้ง่าย
4. ลักษณะของพื้นผิวของวัสดุทั้งสอง วัสดุที่มีพื้นผิวที่ขรุขระจะมีพื้นที่ในการเสียดสีมากทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น

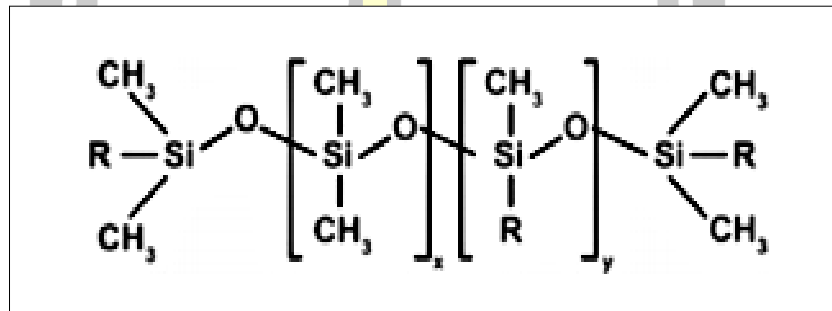
## 2.5 พิจารณาจากการศึกษาทฤษฎีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสาเหตุการเกิดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคน

จากการศึกษาพิจารณาพบว่าในกระบวนการกรองซิลิโคนมีวัสดุไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric) ได้แก่ NMO-50  $\mu\text{m}$  NMO-80  $\mu\text{m}$  และซิลิโคน (Silicone)

NMO-50 $\mu\text{m}$  และNMO-80 $\mu\text{m}$  เป็นวัสดุที่ทำมาจากโพลีเอไมด์ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มโพลิเอไมด์ (Polyamide) เส้นใยสังเคราะห์ในลอนเป็นพอลิเมอริกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) มีหมู่  $-(C-O-NH)-$  อยู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลอื่น ๆ ส่งผลให้ในลอนเป็นโพลิเมอร์ที่คงความแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิสูง มีความเหนียว ทนทานต่อการสึกหรอ ชัดดู ตลอดจนทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต NMO-50 $\mu\text{m}$  และNMO-80  $\mu\text{m}$  จะวางทับซ้อนกันในตัวกรองซิลิโคน นอกจากนี้ในลอนยังเป็นพลาสติกวิศวกรรม (Engineering Plastic) ที่มีความสำคัญ

ในด้านอุตสาหกรรมอีกด้วย ไนลอนถูกจัดเป็นวัสดุไตรโบอิเล็กทริกซีรี่ (Triboelectric Series) [3] ที่มีความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดี ตามภาพประกอบ 8 ตารางไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series)

**ซิลิโคน (Silicon) [3]** คือสารพอลิเมอร์ที่มีชื่อว่า พอลิไซลอกเซน (Polysiloxanes) เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์สังเคราะห์ ประกอบด้วยอะตอมของธาตุซิลิคอนสลับกับออกซิเจน โครงสร้างโดยทั่วไปของ ซิลิโคน เป็นดังแสดงในภาพประกอบ 9 จัดอยู่ในพอลิเมอร์ประเภทยาง



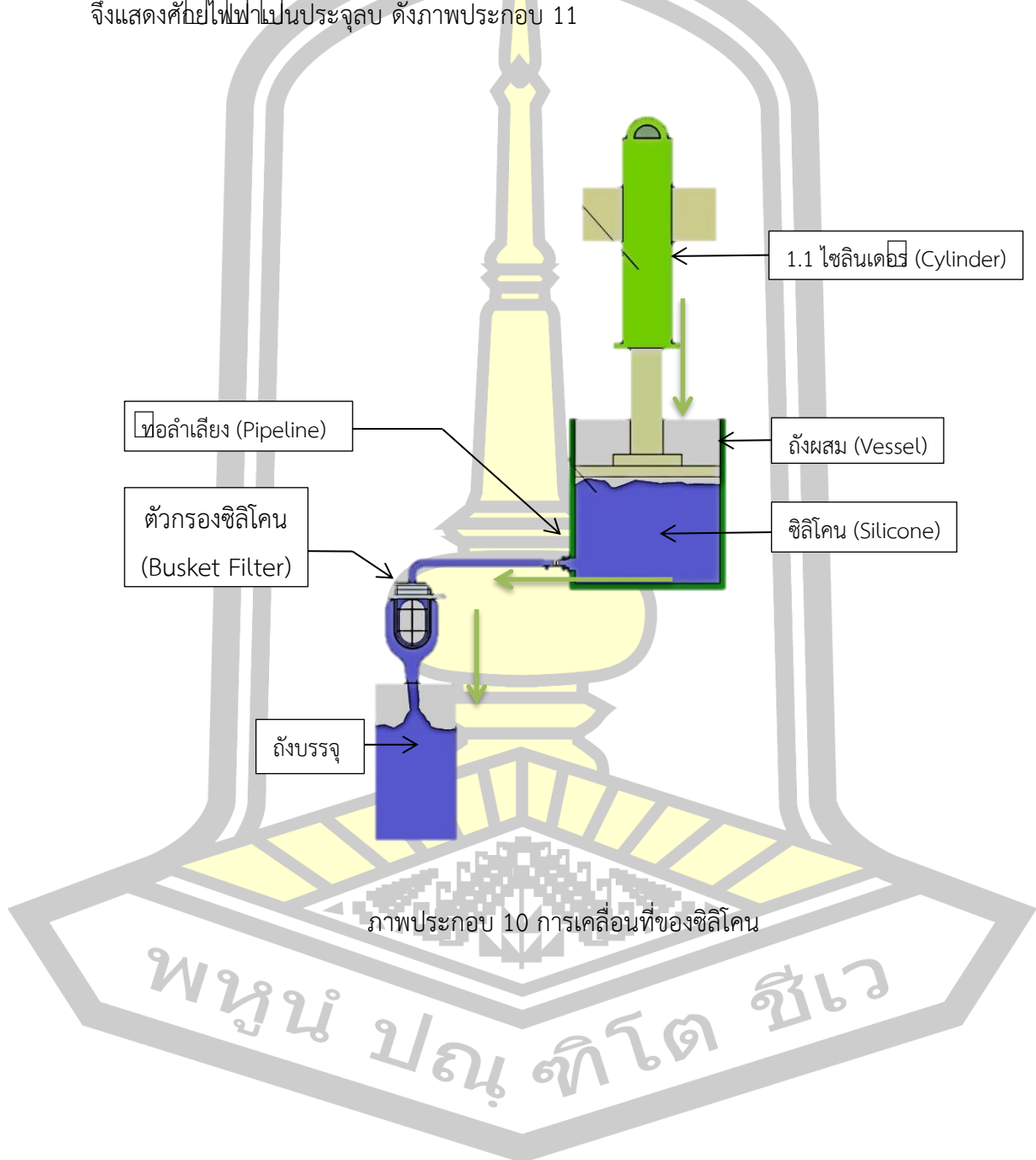
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของซิลิโคน [5]

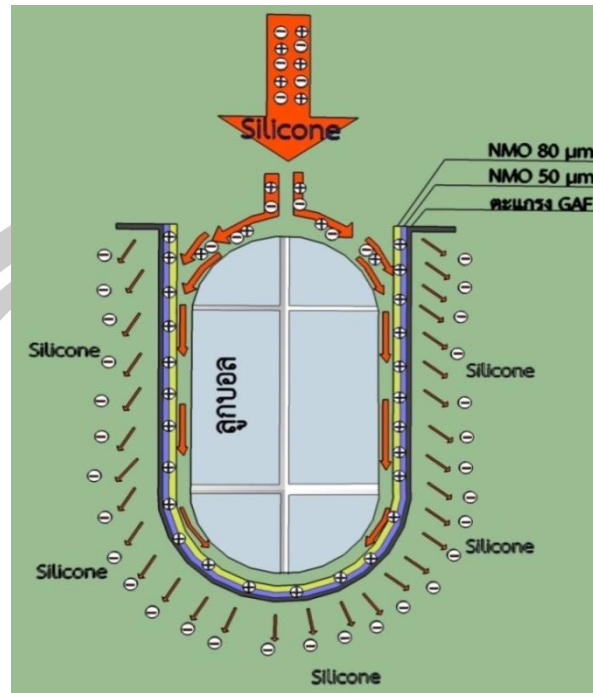
ซิลิโคน เป็นพอลิเมอร์ของธาตุซิลิคอน ซึ่งแตกต่างจากพลาสติกทั่วไป พอลิเมอร์ของธาตุคาร์บอน มีหลากหลายชนิด และหลายลักษณะเป็นทั้งของเหลว เป็นเจล ของกึ่งแข็ง และเป็นของแข็ง ขึ้นอยู่กับขนาดของพอลิเมอร์ ถ้าเป็นพอลิเมอร์ขนาดเล็กจะเป็นของเหลว พอลิเมอร์ขนาดใหญ่ในส่วนของซิลิโคนจะมีลักษณะเป็นยางเหนียวมีโครงสร้างแบบตาข่าย สามารถทำเป็นคงรูปหรือนำไปขึ้นรูปได้ คุณสมบัติของซิลิโคน คือไม่ไวไฟในการทำปฏิกิริยาเคมี สลายไดยาก ทนต่อสภาพแสงแดด ความร้อน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี ซึ่งในกระบวนการผลิตซิลิโคนในส่วนของ Liquid silicone rubber Injection Molding System (LIMs) จะผลิตยางซิลิโคน (silicone rubber) ที่นำไปใช้ในการขึ้นรูป และ ซิลิคอน (Silicon) ที่เป็นส่วนผสมหลักของการผลิต จะจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุไตรโบอิเล็กทริกซีรี่ (Triboelectric Series) มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี ตามภาพประกอบ 8 ตารางไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series)

จากภาพจำลองการไหลซิลิโคน ตามภาพประกอบ 10 แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของซิลิโคนที่ถูกไซลินเดอร์ (Cylinder) อัดด้วยแรงดัน 150-200 บาร์ ทำให้ซิลิโคนเคลื่อนที่ผ่านท่อลำเลียง (Pipeline) ไปยังตัวกรองซิลิโคน และเคลื่อนที่ลงถึงบรรจุ ตามลำดับ ในระหว่างที่ซิลิโคนเคลื่อนที่เข้าตัวกรอง ตามภาพประกอบ 11 ซิลิโคนจะถูกลูกบอลดันไว้เพื่อให้ซิลิโคนกระจายตัวออกไปบริเวณรอบ ๆ ลูกบอลเพื่อให้ซิลิโคนเคลื่อนที่ผ่าน NMO-50  $\mu\text{m}$  NMO-80  $\mu\text{m}$  และตะแกรง GAF



ตามลำดับ จากภาพจำลองนี้แสดงให้เห็นถึงการเสียดสีระหว่างวัสดุไตรโบอิเล็กทริกด้วยแรงดันขนาด 150-200 บาร์ทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างรุนแรงจนทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตตามมาอย่างรุนแรง ตามทฤษฎีไตรโบอิเล็กทริกแล้ว NMO-50  $\mu\text{m}$  NMO-80  $\mu\text{m}$  จะมีคุณสมบัติในการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดีจะแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวก และซิลิโคน จะมีคุณสมบัติในการรับอิเล็กตรอนได้ดีจึงแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุลบ ดังภาพประกอบ 11





ภาพประกอบ 11 การเคลื่อนที่ของซิลิคอนในตัวกรองซิลิคอน (Basket filter)

## 2.6 ผลกระทบที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge) อย่างรุนแรง

การเกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตได้ก็ต่อเมื่อมีการสะสมประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวที่มีมากพอที่จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับวัตถุที่อยู่บริเวณรอบ ๆ จนมีการแตกตัวของประจุลบและประจุบวกที่ถูกเหนี่ยวนำเดินทางมาประจบบัน ณ จุดจุดหนึ่ง เรียกว่าปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD: ElectroStatic Discharge) หากมีการคายประจุไฟฟ้าสถิตผ่านอุปกรณ์หรือผ่านร่างกายมนุษย์ย่อมสร้างความเสียหายและเกิดอันตรายได้ ดังนี้

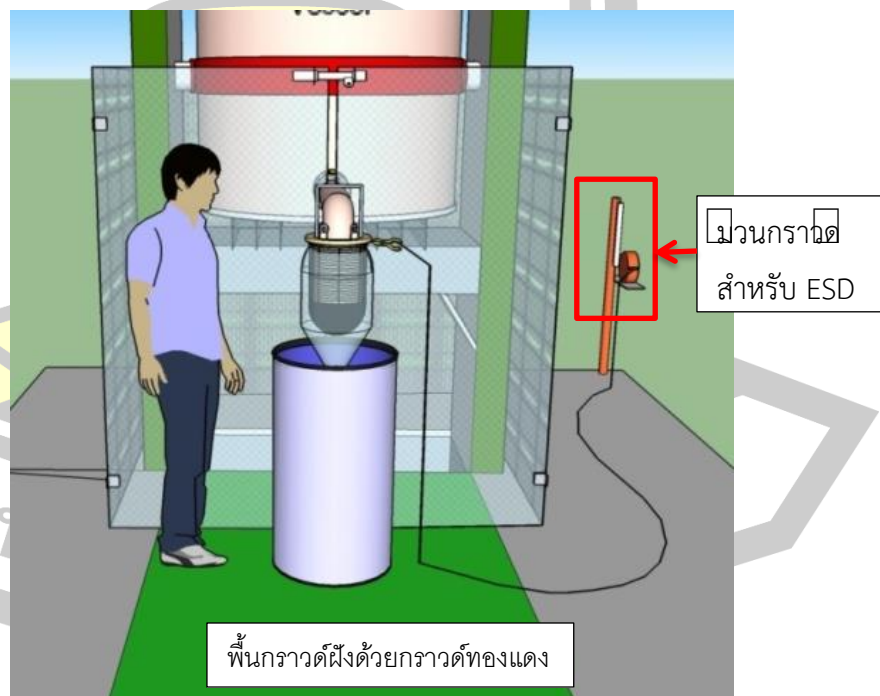
- 1) เป็นสาเหตุเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การระเบิดได้
- 2) ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหายชำรุด
- 3) เป็นอันตรายต่อชีวิตเมื่อเกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตผ่านร่างกายมนุษย์
- 4) สร้างความเสียหายให้กับเครื่องกลทางไฟฟ้า เช่น เกิดการดิสชาร์จผ่านชุดแบเรจ

ความอันตรายต่อชีวิตเมื่อเกิดการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าสถิตผ่านร่างกายมนุษย์นั้นสามารถประเมินได้จากจำนวนประจุหรือค่าแรงดันไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากความสัมพันธระหว่างแรงดันไฟฟ้าสถิตกับผลที่เกิดกับร่างกายมนุษย์ที่จัดทำขึ้นโดยสมาคมอุตสาหกรรมความปลอดภัยนานาชาติ โดยใช้ดัชนี Human Body Model (HBM) รายละเอียดดังตารางที่ 1

จากข้อมูลที่ได้อีกส่วนทำให้เราทราบถึงระดับอันตรายของการเกิดไฟฟ้าสถิตที่มีต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาวิธีการป้องกันที่เหมาะสมที่สุดที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต

## 2.7 เทคนิคและวิธีการแก้ไขปัญหาไฟฟ้าสถิตของกระบวนการกรองซิลิโคนที่ใช้ในปัจจุบัน

ณปัจจุบัน บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย มีการแก้ไขปัญหาโดยการใส่ระบบกราวด์เป็นหลัก ดังลักษณะแสดงภาพประกอบ 12 ซึ่งคือระบบกราวด์ที่ตำแหน่งตะแกรง GAF พื้นรองรับถังบรรจุ ที่ฝังด้วยกราวด์ทองแดง อุปกรณ์สำหรับการป้องกัน ไดเอก เสื่อ หมวก รองเท้า สำหรับป้องกันไฟฟ้าสถิต และเกียง พื้นด้วยฉนวนไฟฟ้า ใช้สำหรับปาดซิลิโคนที่ไหลออกมาจากตัวกรองซิลิโคน (Basket Filter) ระวังที่ทำการเปลี่ยนถังบรรจุ ทั้งหมดที่ได้อีกส่วนนั้นยังไม่สามารถที่จะป้องกันการถูกช็อตหรือโดนดูดจากไฟฟ้าสถิตได้ เนื่องจากวัสดุโพลีเอทิลีนที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ไดเอก NMO-50  $\mu\text{m}$  NMO-80  $\mu\text{m}$  และซิลิโคน นั้น มีความต้านทานไฟฟ้าที่สูงมากทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระหรือเคลื่อนที่ได้ช้า ๆ ดังนั้นการแก้ไขปัญหามาในปัจจุบันที่ได้อีกส่วนนั้นยังไม่สามารถที่จะแก้ไขและป้องกันไฟฟ้าสถิตได้



ภาพประกอบ 12 ภาพจำลอง ระบบกราวด์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

## 2.8 เทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและพิจารณานำไปใช้กับระบบการกรองซิลิโคน

เทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิต (Ionizer) ระบบกราวด์ (Grounding) กรงฟาราเดย์ (Faraday Cage) ตัวนำที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

**1. เครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิต (Ionizer)** เป็นระบบที่สร้างวิธีการปล่อยประจุแบบโคโรนา (Corona Discharge) มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดฝุ่น คายประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวของวัสดุ และยังช่วยเพิ่มไอออนในอากาศได้อีกด้วย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1] ได้ติดตั้ง Air Ionizer ที่ตำแหน่งสุดท้ายของการปล่อยผ้าไสรถเข็น และใช้ลมพัดประจุลงสู่ผ้า เพื่อไปจับรวมกลุ่มกันกับประจุของไฟฟ้าสถิตที่อยู่บนผ้า [2] ได้ใช้เครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิต (Ionizer) ที่พัฒนาโดยนักวิจัยของกรมวิทยาศาสตร์บริการ โดยการปลดปล่อยประจุไอออนบวกและไอออนลบเพื่อทำให้วัตถุมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าก่อนนำมาทดสอบ [6] ได้ใช้พัดลมสลายประจุไฟฟ้า (Ionizer) ที่มีประสิทธิภาพสูงมากโดยที่ระยะของการปลดปล่อยประจุจากกลางจะไกลกว่าเดิมประมาณ 2 เท่า เพื่อใช้ครอบคลุมบริเวณหัวอ่านและบันทึกข้อมูล

**2. ระบบกราวด์ (Grounding)** การต่อกราวด์ เชื่อมต่อกับทางไฟฟ้าระหว่างโครงสร้างที่เป็นตัวนำไฟฟ้า สามารถแก้ไขปัญหาการสะสมของประจุไฟฟ้าสถิตบนวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เพราะการเชื่อมต่อกับทางไฟฟ้าจะช่วยถ่ายเทประจุไฟฟ้าลงสู่พื้นดินได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างเข้ากับพื้นดิน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1] หนีบสายหลักดินเข้ากับโครงของรถเข็นผ้าเพื่อการคายประจุลงสู่พื้นโลกทำให้ใช้เวลาในการรอการคายประจุไฟฟาลดลงและปลอดภัยต่อการทำงานมากขึ้น [7] ได้ใช้ข้อมูลวิจัยนี้ว่า การติดตั้งระบบหลักดินเพื่อถ่ายเทกระแสไฟฟ้ารั่วไหลหรือกระแสไฟฟ้าสถิตลงสู่พื้นดินช่วยป้องกันไฟฟ้าสถิตที่อาจสะสมบนพื้นผิวของวัสดุที่นำไฟฟ้า

**3. กรงฟาราเดย์ (Faraday Cage)** เป็นแผงตัวนำหรือโลหะที่เชื่อมต่อกันเป็นตาข่าย ล้อมรอบวัตถุหรือสิ่งก่อสร้าง เป็นผลทำให้เกิดฉนวนไฟฟ้าสถิตโดย ลักษณะการทำงานของกรงฟาราเดย์ จะทำให้อากาศสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้อะจุภายในตัวนำไฟฟ้ากระจายไปในลักษณะที่ทำให้สนามไฟฟ้าภายในหักล้างกันเอง ปรากฏการณ์นี้ยังใช้เพื่อปกป้องคนหรืออุปกรณ์จากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอย่างฟ้าผ่า หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต (ElectroStatic Discharge) เนื่องจากกรงฟาราเดย์เป็นวัสดุนำไฟฟ้าและปกป้องพื้นที่ภายในไว้ได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [8] ได้ใช้ข้อมูลวิจัยนี้ว่า กรงฟาราเดย์เป็นแผงตัวนำหรือโลหะต่อเชื่อมกันเป็นตาข่าย เป็นผลทำให้เกิดฉนวนไฟฟ้าสถิต [9] ได้ใช้ข้อมูลวิจัยนี้ว่า เงื่อนไขของของตาข่ายกรงฟาราเดย์ควรมีขนาดเล็กกว่า 1 ใน 10 ของความยาวคลื่น ของสัญญาณกระแสที่จะเกิดฟ้าผ่าหรือการคายประจุไฟฟ้า จะทำให้การเปลี่ยนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกกรงฟาราเดย์ไม่มีผลต่อสิ่งที่อยู่ในกรงฟาราเดย์ [10] งานวิจัยนี้ ได้

จำลองกรงฟาราเดย์แบบ 2D พร้อมกับการอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ของผลป้องกันของกรงฟาราเดย์ จากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ลวดที่มีรัศมีที่กำหนด จำนวนเชิงลวด ขอบเขตของกรงฟาราเดย์ และสนามไฟฟ้าภายนอก

**4. การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity)** ฉนวนไฟฟ้าหลายตัวสามารถป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ โดยการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ให้แก่ สภาพแวดล้อม เมื่อมีความชื้นในสภาพแวดล้อมสูง การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อนทำให้ปริมาณของไอน้ำที่เข้ามาชนและดูดจับวัตถุเพิ่มขึ้นเกิดเป็นชั้นโมเลกุลของน้ำ บนพื้นผิววัตถุ ทำให้ความต้านทานกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวลดลงและช่วยยับยั้งการฉាយเทพระจุไฟฟ้า โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1] จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกันของความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) และแรงดันไฟฟ้าสถิต (kV) [2] ได้ให้ข้อมูลงานวิจัยนี้ว่า ประจุไฟฟ้าไม่สมดุลมักเกิดขึ้นได้เสมอเมื่อมีสภาวะอากาศในของปฏิบัติการที่แห้ง หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าร้อยละ 45 ซึ่งโดยปกติความควรมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 45 ถึง 60 %RH ปัญหาสามารถแก้ไขได้โดยการควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ [11] ได้ให้ข้อมูลงานวิจัยนี้ว่า กลไกการทำงานของสารป้องกันไฟฟ้าสถิตชนิดลดสารแรงดึงผิว สามารถลดทำงานได้ เมื่อมีความชื้นในอากาศสูง

**5. ตัวนำที่เป็นฉนวนไฟฟ้า** การทำให้พื้นผิวนำไฟฟ้าได้โดยการเพิ่มสารป้องกันไฟฟ้าสถิต สารเติมแต่ง หรือ การชุบเคลือบบนพื้นผิวของวัสดุ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [12] งานวิจัยนี้ได้สรุปว่า วัสดุที่เคลือบออกไซด์สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนซึกซิเนตเพื่อไม่มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ไฟฟ้าสถิต [13] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลของการเติม สารไฟฟ้าสองชนิด ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และ พอลิพีโรลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์เชิงประกอบ ผลสรุปของงานวิจัยนี้จะได้ว่า พอลิเมอร์เชิงประกอบมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานบรรจุภัณฑ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดผลกระทบของการปะทุไฟฟ้าสถิต [14] งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผสมโคโตนาน/(พอลิเอทิลีนไกลคอล) สรุปได้ว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณ พอลิ(เอทิลีนไกลคอล) เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของแผ่นฟิล์มลดลง

พูน ปรุ ทิโต ชเว



2.9 พิจารณาจากการศึกษาเทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ในการจัดการกับไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองซิลิโคนของ บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิต (Ionizer) เทคนิคการจัดการด้วยวิธีนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในกระบวนการกรองซิลิโคนได้ เนื่องจากเทคนิคนี้จะใช้ลมในเป่าเพื่อกระจายประจุไฟฟ้าไปในอากาศให้สัมผัสกับพื้นผิว อาจทำให้มีฝุ่น ละอองต่าง ๆ ตามมาอีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของซิลิโคน

2. ระบบกราวด์ (Ground system) เป็นการจัดการแบบพื้นฐานที่สุดเหมาะสมสำหรับวัสดุที่นำไฟฟ้า เป็นกาถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีให้ไหลลงสู่พื้นโลกได้อย่างรวดเร็ว [15] ตามมาตรฐาน IEEE 142-2007 ในโรงงานอุตสาหกรรมจะกำหนดค่าความต้านทานไม่เกิน 3 โอห์ม เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถปฏิบัติงานได้จริง ภาพประกอบ 2.16 ได้มีการต่อกราวด์แต่ยังไม่สามารถที่จะป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ในปัจจุบัน แต่ระบบกราวด์นี้จะนำไปในรวมกับกรงฟาราเดย์เพื่อช่วยป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าสถิต

3. กรงฟาราเดย์ (Faraday cage) สามารถนำใช้งานในกระบวนการได้เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำมาจากโลหะเชื่อมต่อกันเป็นตอข่ายทำให้กรงฟาราเดย์ไม่มีสิ่งแปลกปลอมและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของซิลิโคน กรงฟาราเดย์สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ หากมีการออกแบบที่หนาพอและขนาดของตอข่ายเล็กกว่าความยาวของคลื่น ดังนั้นเทคนิคและวิธีการจัดการไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีเทคนิคกรงฟาราเดย์สามารถนำมาใช้ในกระบวนการกรองซิลิโคนได้ และรวมกับระบบกราวด์

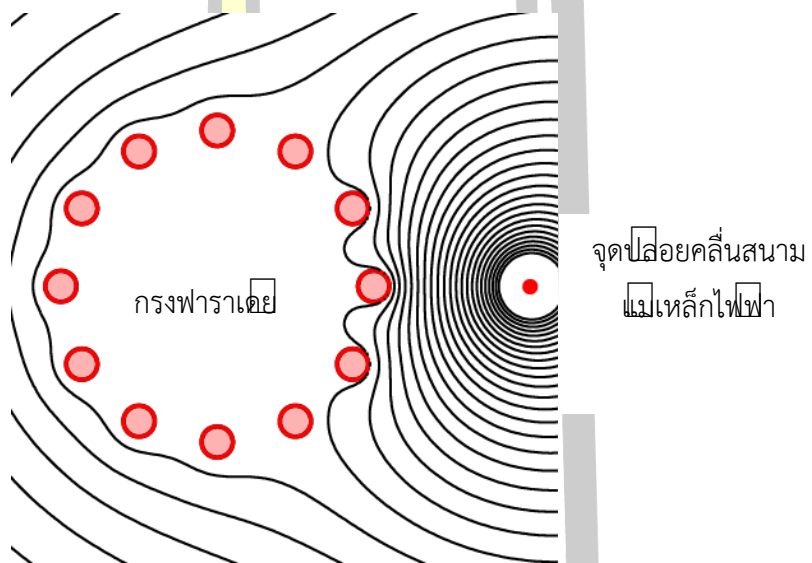
4. การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ปัจจุบัน บริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทยได้มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของห้องในกระบวนการกรองซิลิโคน อยู่ที่ 47-48 %RH เทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะใช้ในกระบวนการกรองซิลิโคนได้ เนื่องจากจะมีผลกระทบในด้านของพลังงานไฟฟ้า คุณภาพของซิลิโคน และเครื่องจักร จึงไม่สามารถที่จะใช้วิธีการจัดการแบบเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้

5. ตัวนำที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เทคนิคและการจัดการไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะใช้ในกระบวนการกรองซิลิโคนได้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพซิลิโคนมีสารเจือปน สิ่งแปลกปลอมต่างๆตามมา จึงไม่สามารถที่จะใช้วิธีการจัดการไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีนี้ได้

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นพิจารณาจากการศึกษาเทคนิคการจัดการไฟฟ้าสถิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยได้เลือกเทคนิคการจัดการโดยใช้ ระบบกราวด์ร่วมกับกรงฟาราเดย์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของซิลิโคนอีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบในเรื่องการสูญเสียพลังงานในอุตสาหกรรมอีกด้วย

## 2.10 ทฤษฎีและหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์

กรงฟาราเดย์ คือ แผงตัวนำหรือโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีต่อเชื่อมกันเป็นตบซาย (Mesh) สนามไฟฟ้าที่เข้ามากระทบจะทำให้ประจุไฟฟ้าภายในตัวนำเคลื่อนที่กระจายตัวไปในลักษณะที่ทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหักล้าง ดังภาพประกอบ 13 ภาพแสดงจำลองการกีดขวางสนามไฟฟ้าของกรงฟาราเดย์แบบ 2 มิติ [10]



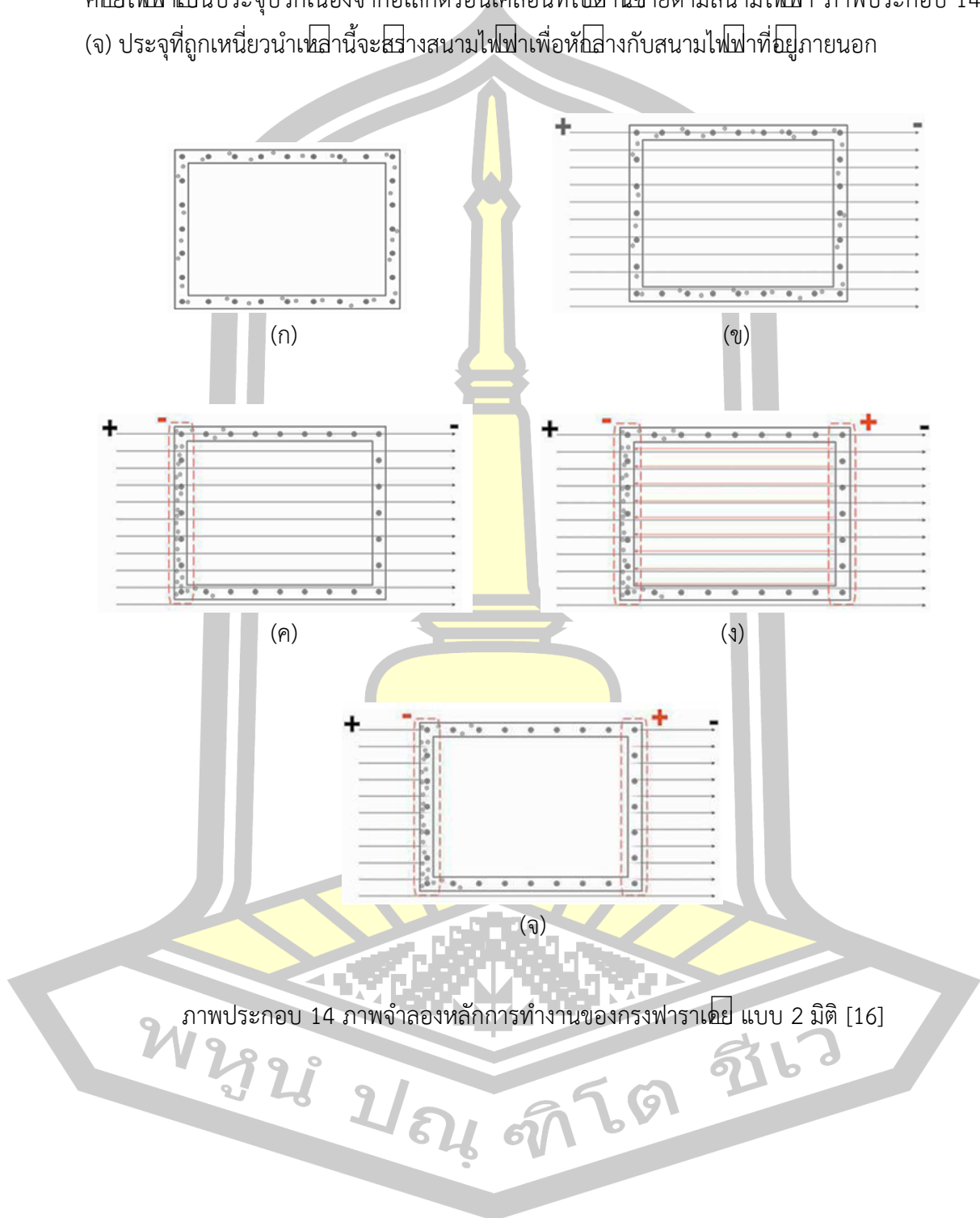
ภาพประกอบ 13 ภาพแสดงจำลองการกีดขวางสนามไฟฟ้าของกรงฟาราเดย์แบบ 2 มิติ [10]

โดยเงื่อนไขในการกีดขวางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของกรงฟาราเดย์ คือ ช่องตบซายของกรงฟาราเดย์ควรมีขนาดเล็กกว่า  $\frac{1}{10}$  ของแถบคลื่นความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) [9] จึงจะสามารถลดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกได้ กรงฟาราเดย์จะไม่สามารถกีดขวางสนามไฟฟ้าแม่เหล็กสถิตหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ได้ เช่น สนามแม่เหล็กของโลก แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เช่น คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดพลาสมา คลื่นที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรง กรงฟาราเดย์จึงจะสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

หลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ [16] ภาพประกอบ 14 ภาพจำลองหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ แบบ 2 มิติ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ภาพประกอบ 14 (ก) กรงฟาราเดย์ในขณะที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ภาพประกอบ 14 (ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวกเคลื่อนที่ผ่านกรงฟาราเดย์จากด้านซ้ายไปยังด้านขวา ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนของกรงฟาราเดย์เคลื่อนที่ไปยังด้านซ้ายตามภาพประกอบ 14 (ค) ภาพประกอบ 14 (ง) ด้านซ้ายของกรงฟาราเดย์

จะแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุลบเพื่อหักล้างกับสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาฝั่งขวาจะแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวกเนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้านซ้ายตามสนามไฟฟ้า ภาพประกอบ 14

(จ) ประจุที่ถูกเหนี่ยวนำเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อหักล้างกับสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายนอก





## 2.11 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [17]

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรูปพลังงานที่เปล่งออกมา (Emission) โดยที่ไม่ต้องการอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ ในรูปของคลื่นจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ คลื่นทางไฟฟ้า (Electric Wave) คลื่นทางแม่เหล็ก (Magnetic Wave) โดยคลื่นทั้งสองจะเคลื่อนที่ตั้งฉากกันและมีชื่อเรียกรวมว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ต้องอาศัยคุณสมบัติของแสงในรูปของอนุภาค โดยเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคโฟตอน (อนุภาคแสง) ที่มีพลังงานสูงชนกับอิเล็กตรอนในสสารทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาพร้อมกับพลังงานจลน์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวค่าหนึ่งเรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (Work function)

ในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ Albert Einstein [19] ได้อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนได้อย่างถูกต้อง โดยได้ใช้แนวคิดของ แมกซ์ พลังค์ (Max Planck) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบผิวโลหะจะมีลักษณะคล้ายอนุภาคประกอบไปด้วย พลังงานเล็กๆ (E) เรียกว่า ควอนตัมของพลังงาน หรือ โฟตอน (Photon) ขนาดจะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E = hv \quad (1.0)$$

เมื่อ  $E$  = พลังงาน (Energy) มีหน่วยเป็นจูล (J)

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) =  $6.25 \times 10^{-34}$  Js.

$v$  = ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Hz หรือ  $s^{-1}$

นอกจากนี้ความถี่ของคลื่นยังมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นดังต่อไปนี้

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

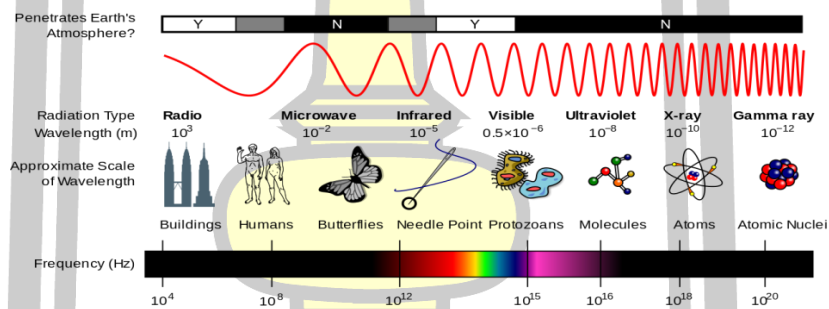
เมื่อ  $\lambda$  = ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$c$  = ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ =  $2.997 \times 10^8$  m/s

ดังนั้นค่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) [18] คือการปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นสเปกตรัมการเปล่งแสง ซึ่งแสงแบบต่อเนื่องจะประกอบไปด้วยช่วงความถี่ ความยาวคลื่น และพลังงานโฟตอน สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าจะครอบคลุมแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 เฮิรตซ์ จนถึง  $10^{12}$  เฮิรตซ์ การเปล่งแสงของอะตอมในสถานะแก๊ส จะไม่เป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง แต่จะเป็นสเปกตรัมแบบเส้น คือ แสงที่ปลดปล่อยความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่ง และธาตุทุกชนิดจะมีสเปกตรัมการเปล่งแสงเฉพาะตัว ความถี่ของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นแถบต่าง ๆ ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแต่ละย่านความถี่จะมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ วิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสง อัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ตามภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงย่านความถี่ของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า [18]

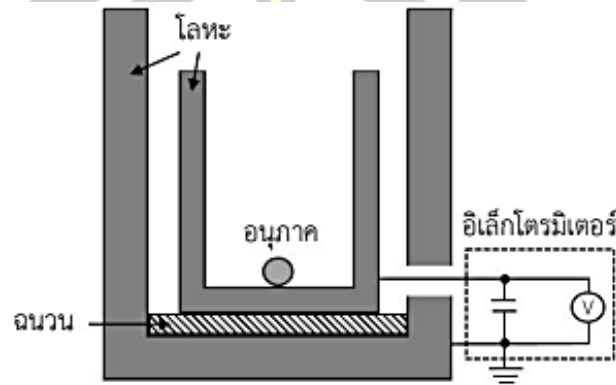
## 2.12 เครื่องมือวัด

ผู้วิจัยได้เลือกเฝ้าระบบการวัดประจำบางส่วนจากงานวิจัยในหัวข้อ การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าสถิตและจลนศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวน [20] โดยระบบการวัดของงานวิจัยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การวัดประจุโดยใช้ถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์

ถ้วยฟาราเดย์เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับประจุของอนุภาคถ้วยฟาราเดย์ทำมาจากโลหะที่เป็นตัวนำที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกล้อมรอบแกน มีกราดอยู่ด้านบนของผิวระนาบภายในและภายนอกของถ้วยฟาราเดย์เปรียบเสมือนตัวเก็บประจุ อนุภาคที่กระทบกับตัวนำด้านบนของถ้วยฟารา

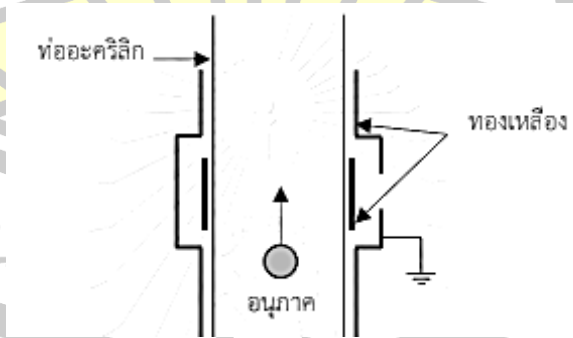
เฉย ทำให้เกิดการฉายเทพระจุไปที่ฉวยฟาราเดย์ ประจุดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิดการฉายเทพระจุที่ตัวนำด้านนอกเป็นเดียวกันในลักษณะตัวเก็บประจุ อิเล็กโตรมิเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อกับฉวยฟาราเดย์สามารถวัดค่าประจุออกมาได้ ตามภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบ 16 ฉวยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์ [20]

2. การวัดประจุด้วยฉวยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

อธิบายการทำงานและส่วนประกอบของการวัดประจุด้วยฉวยฟาราเดย์แบบอนุภาคในระนาบการเคลื่อนที่ ตามภาพประกอบ 17 อนุภาคที่ไม่มีประจุเคลื่อนที่ขึ้นลง ภายในท่อทดลอง การวัดประจุขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ที่ฉวยฟาราเดย์และวงจรวัดประจุติดกับข้อที่ไขทำการทดลองและแสดงผลออกมาเป็นค่าแรงดันที่ออสซิลโลสโคป ฉวยฟาราเดย์ทำจากทรงกระบอกทองเหลืองด้านในต่อเข้ากับวงจรรขยายและด้านนอกต่อกับกราวด์



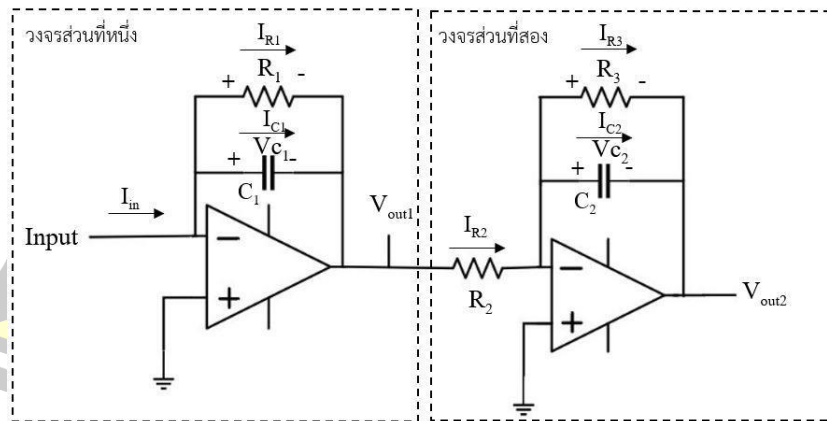
ภาพประกอบ 17 การวัดประจุด้วยฉวยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน [20]

3. วงจรวัดประจุ [20]

วงจรวัดประจุประกอบด้วยออปแอมป์ที่ต่อเป็นแบบวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ (Op-Amp integrator circuit) และวงจรมหาสัญญาณต่ออนุกรมกัน ตามภาพประกอบ 18 ลักษณะการทำงานของวงจรเมื่อมีแรงดันขาเข้า ( $V_{in1}$ ) กระแสของวงจรในช่วงเริ่มต้นจะไหลมาที่ตัวเก็บประจุ เนื่องจากตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) มีค่าเป็น 0 เวลาผ่านไปนานกระแสไหลจะผ่านตัวต้านทานเนื่องแรงดันอัดตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) ไม่เต็มแล้ว แรงดันขาออก ( $V_{out1}$ ) ต้องอยู่ในฟังก์ชันประจุ กระแสจึงถูกบังคับให้ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) วิธีการปรับค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ให้มากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองสามารถทำได้โดยปรับค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ ผลลัพธ์แรงดันขาออก ( $V_{out1}$ ) ที่ได้จะมีค่าส่วนกลับของแรงดันตัวเก็บประจุ ( $-V_c$ )

แรงดัน ( $V_{out1}$ ) ของวงจรที่หนึ่งคือแรงดันขาเข้า ( $V_{in2}$ ) ของวงจรที่สอง เมื่อแรงดันไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  ตามลำดับ ตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าน้อยมากเพราะต้องการขยายแรงดันขาออกของวงจรที่หนึ่ง ( $V_{out1}$ ) ที่มีค่าน้อยมากๆ สัญญาณที่ไหลออกจากตัวต้านทานคือสัญญาณแรงดันขาออก ( $V_{out2}$ ) ทำหน้าที่ขยายแรงดันแบบกลับขั้วให้มีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการ

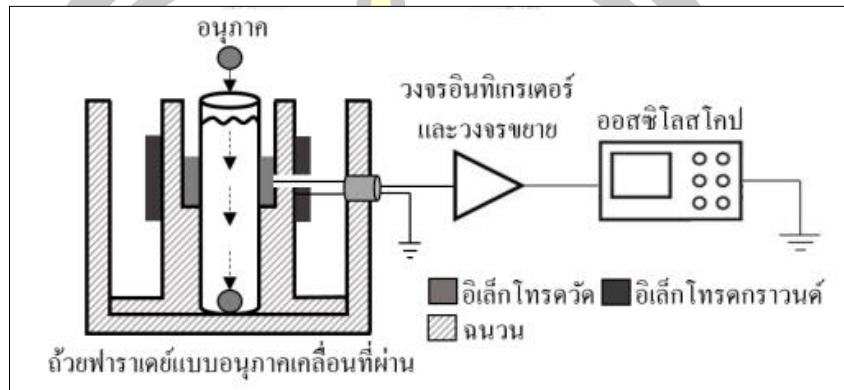
$$A_v = - \frac{R_3}{R_2} \text{ ไร่ } \tag{1.3}$$



ภาพประกอบ 18 วงจรออปแอมป์แบบอินทิเกรเตอร์ส่วนที่หนึ่งและวงจรมหาสัญญาณส่วนที่สอง [20]

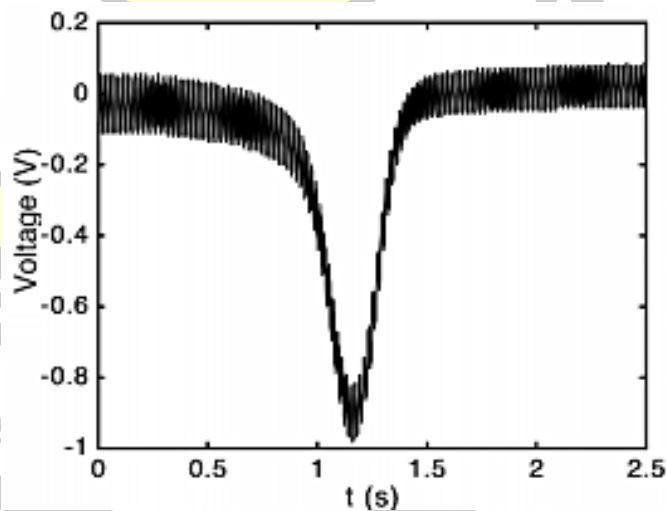
#### 4. การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาค

การทดลองเริ่มจากป้อนประจุให้กับอนุภาค อนุภาคที่ได้รับการป้อนประจุจะถูกปล่อยลงไหลเคลื่อนที่ผ่านน้ำมันในกระบอกทดลอง ซึ่งต่อกับวงจรออปแอมป์แบบอินทิเกรตเตอร์ทั้งสองส่วนและออสซิลอโคปตามภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบเคลื่อนที่ผ่าน [20]

จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันขาออกผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ ผลลัพธ์ของแรงดันที่ได้มีความเรียบ และไม่มีสัญญาณรบกวนตามภาพประกอบที่ 20



ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันขาออก

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารและบทความในฐานข้อมูลต่าง ๆ มีงานวิจัยที่น่าสนใจและเกี่ยวข้องดังนี้

งานวิจัยของ สุรเศรษฐ์ ศรีรอด

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการลดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการผลิตของโรงงานอเนก โดยใช้หลักการของการสร้างประจุ (Air Ionizer) ร่วมกับระบบรากสายดิน เพื่อลดประจุบนผิวที่เครื่องผลิตและรถเข็นผิว ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาไฟฟ้าสถิตทั้งสองด้าน โดยการติดตั้งระบบ Air Ionizer ที่เครื่องผลิต เพื่อลดปัญหาการเกิดไฟไหม้ผิว และช่วยลดประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวในระดับหนึ่งก่อนที่ผิวจะลงในรถเข็นผิว และใช้ระบบรากสายดินที่รถเข็นผิวเพื่อลดประจุไฟฟ้าสถิตให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย สำหรับพนักงานเข็นรถผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการติดตั้ง Air Ionizer เพียงอย่างเดียว เวลาในการรอการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่รถเข็นผิวเป็น 30 นาที เมื่อมีการใช้ระบบรากสายดินเพียงอย่างเดียวเวลาในการรอการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่รถเข็นผิวเป็น 15 นาที และเมื่อใช้ Air Ionizer ร่วมกับระบบรากสายดิน เวลาในการรอการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่รถเข็นผิวเป็น 5 นาที ซึ่งทำให้กระบวนการทำงานปลอดภัยและรวดเร็วขึ้น โดยการผลิต 150 เมตร ใช้เวลาเพียง 115 นาที

งานวิจัยของ Saksit Deelum

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาไฟฟ้าสถิตที่เป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของการชั่งน้ำหนักพบว่าตัวอย่างที่มีศักย์ไฟฟ้าแสดงค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงตลอด เครื่องชั่งขาดความเสถียรทำให้ไม่สามารถอ่านค่าได้ ค่าการวัดผิดพลาดไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าน้ำหนักที่ได้มีความมากกว่าน้ำหนักจริงของตัวอย่างนั้นอันเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างวัตถุและเครื่องชั่ง และค่าความทวนซ้ำได้ของผลการวัดไม่ติดเห็นได้จากผลการวัดที่กระจายตัวมากกว่าการชั่งตัวอย่างที่ไม่มีไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการกำจัดไฟฟ้าสถิตหรือการทำให้ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานควรตระหนักและให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เกิดความเสถียรขณะชั่งความแม่นยำและความเที่ยงของการวัดมีมากขึ้น ทำให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

งานวิจัยของ David P

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการไล่ระดับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบ 2 มิติ ของแท่งโลหะที่มีพื้นที่  $n$  รัศมี  $r$  ที่มีศักย์เท่ากัน ผลการวิจัยพบว่าผลการป้องกันของกรงฟาราเดย์จะขึ้นอยู่กับของแท่งโลหะที่มีพื้นที่ รัศมีจำกัดน้อยกว่าที่คาดไว้โดยปรับขนาดเป็น  $|\log r| / n$  ในการครอบคลุมที่เหมาะสมของ  $r$  ขนาดเล็กและ  $n$  ขนาดใหญ่ มีทั้งผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขและทฤษฎีบททางคณิตศาสตร์ได้โดยวิธีการของการประมาณต่อเนื่องจะไดมาในรูปแบบของเงื่อนไขขอบเขตที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันสำหรับสมการลาปลาซตามเส้นโค้ง สมการที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันแสดงให้เห็นว่าในกรงฟาราเดย์การเคลื่อนที่ของประจุจึงค่อนข้างยากเล็กน้อยภายนอก แต่ไม่เพียงพอสำหรับการยกเลิกที่จะได้ผลเต็มที่ ทางกายภาพ ผลข้างต้นเป็นหนึ่งในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตในพื้นที่ที่มีความจุ จำกัดรูปแบบอื่น ๆ ที่ไม่ต่อเนื่องของผลกระทบนั้นมาจากหลักการของการลดพลังงาน มีการกล่าวถึงส่วนขยายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและรูปทรงเรขาคณิต 3 มิติ

งานวิจัยของ Noor Amalina Zakaria

งานวิจัยนี้ศึกษาวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างกรงฟาราเดย์ขนาดมนุษย์ขึ้นพื้นฐาน วงจร ECG 1 ช่องรวมถึงตัวกรองรอยบากถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบผลกระทบของกรงฟาราเดย์ ผลลัพธ์ของสัญญาณ ECG ถูกเปรียบเทียบเมื่อวางไว้ในกรง (ภายในอาคาร) นอกกรงฟาราเดย์ (ภายในอาคาร) และภายนอกอาคาร จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกรงฟาราเดย์และผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนของสายไฟในระบบ ECG จากผลของโครงการนี้จะเห็นได้ว่า กรงฟาราเดย์สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนของสายไฟ 50 Hz ในสัญญาณ ECG

งานวิจัยของ พนิดตา โรจนวณิชย์

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบทางไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าเป็นหนทางหนึ่งใน การศึกษาลักษณะเชิงปริมาณของประจุบนอนุภาคในน้ำมันฉนวน วัตถุประสงค์หลักของการศึกษา คือ การสังเกตพฤติกรรมทางจลนศาสตร์ทางไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวนเพื่อทำความเข้าใจของประจุกับการเคลื่อนที่ การศึกษาทำโดยการวัดประจุบนอนุภาคทั้งในสภาวะสถิตและในระหว่างการเคลื่อนที่ ระบบวัดประจุที่ ประกอบโดยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและวงจรวัดประจุ ความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณ ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการแรงคูลอมป์ แรงโน้มถ่วง และแรงต้านความหนืดของตัวกลาง การทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบขนานและแบบทรงกลมกับระนาบ แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพิ่มขึ้น ตามขนาดแรงดัน ที่เพิ่มขึ้น การวัด ประจุบนอนุภาคทำได้โดยใช้ถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรวัดประจุและถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กโทรมิเตอร์ ใช้เวลา



ในการอัดประจุนาน 15 วินาที ถึง 240 วินาที การทดลองพบว่ามีค่าประจุที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดด้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน กับวงจรวัดประจุสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่กับผลการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กโตรมิเตอร์ แต่ค่าที่ได้มีขนาดต่ำกว่า ขนาดของอิเล็กโตรดมีผลต่อการวัด ประจุด้วยวงจรวัดประจุ อิเล็กโตรดที่มีขนาดกว้างให้ค่าผลการวัดสูงกว่าอิเล็กโตรดที่มีขนาดเล็ก สำหรับการสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน อิเล็กโตรดที่ใช้ในการวัดประจุมีสองตำแหน่งคือ A และ B ซึ่ง A ห่างจาก B เป็นระยะ 2 cm โดยที่อนุภาคเคลื่อนที่ถึงตำแหน่ง B มีค่ามากกว่า ตำแหน่ง A เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จะมีการสูญเสียประจุเกิดขึ้นส่งผลให้ประจุที่วัดได้จากตำแหน่ง B มีค่าน้อยกว่าตำแหน่ง A

งานวิจัยของ สุริยันต์ ศรีสงคราม

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบวัดค่าสมมูลไอออนของเครื่องสร้างประจุไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติและสามารถส่งผลการวัดไปยังส่วนเก็บข้อมูลแบบไร้สายได้ ระบบประกอบไปด้วยเซนเซอร์วัดไฟฟ้าสถิตแบบแอนะล็อกผ่านชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นค่าสมมูลไอออนด้วยเครื่องวัดการคายประจุด้วยค่าสัมพัทธ์เชิงสถิติ โดยมีค่าเซนเซอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.944 ผลการทดลองพบว่ามีค่าสมมูลไอออนที่วัดได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับการวัดของเครื่องวัดการคายประจุและมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 3.067 โวลต์ -6.957 โวลต์ เมื่อเทียบกับค่าสมมูลไอออนที่ 0 โวลต์ สามารถนำไปใช้อ้างอิงค่าสมมูลไอออนของเครื่องวัดการคายประจุที่มีค่าสมมูลไอออนอยู่ในช่วง -35 โวลต์ ถึง +35 โวลต์

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ความเข้าใจที่จะนำไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับ การออกแบบสร้างกรงฟาราเดย์เพื่อลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น และเครื่องมือวัดไฟฟ้าสถิตในซิลิโคนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการลดปริมาณไฟฟ้าสถิตของกรงฟาราเดย์

จากข้อสรุปในบทที่ 2 ในปัจจุบันบริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคนในประเทศไทย ได้มีการแก้ไขปัญหาโดยใช้ระบบกรงฟาราเดย์เป็นหลักจึงไม่สามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนได้เนื่องไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นในซิลิโคน และผ้าไนลอน ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถคายประจุและรับอิเล็กตรอนได้ดีเมื่อเกิดการเสียดสีหรือแยกตัวออกจากกันและมีความต้านทานไฟฟ้าสูงมากทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระหรือเคลื่อนที่ได้อย่างช้า ๆ เมื่อเกิดการสูญเสียความสมดุลของศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้โดยวิธีการนี้ได้

การสะสมประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวของวัตถุและแสดงศักย์อำนาจทางไฟฟ้าออกไปบริเวณรอบ ๆ หรือเรียกว่า “สนามไฟฟ้า” จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับวัตถุที่อยู่บริเวณโดยรอบและเมื่อศักย์ไฟฟ้ามีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ามาพอก็จะทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตในที่สุดผู้วิจัยได้มีการศึกษาหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์เพื่อหักล้างสนามไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและนำไปสู่การคายประจุไฟฟ้าสถิตได้ พบว่ามีข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการลดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีการกล่าวไว้ว่าขนาดของตอขายของกรงฟาราเดย์ควรมีขนาดเล็กกว่าหนึ่งในแปดหรือหนึ่งในสิบของความยาวคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งที่อยู่ในกรงตอขาย

ดังนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการกรองซิลิโคนโดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 ออกแบบกรงฟาราเดย์

จากการศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของกรงฟาราเดย์ในบทที่ 2 ผู้วิจัยได้เลือกใช้อลูมิเนียม เชื่อมต่อกันเป็นตอขาย หรือเรียกว่า ตอขายอลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความเหนียวต่อต้านการแตกหักสูง อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และตัวนำไฟฟ้าได้ดี

ที่สามารถจัดซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป การเลือกซื้อจะขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาสามารถหาได้จากสมการที่ 1.2 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

หรือ

$$\lambda = h \frac{c}{E}$$

เมื่อ  $E$  = พลังงาน (Energy) มีหน่วยเป็นจูล (J)  
 $h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) =  $6.25 \times 10^{-34}$  Js.  
 $c$  = ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ =  $2.997 \times 10^8$  m/s  
 $\nu$  = ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Hz หรือ  $s^{-1}$   
 $\lambda$  = ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงาน ( $E$ ) ที่แพร่ออกมาจากซิลิโคน จากได้จากสมการที่ 1.3

$$E = QV \quad (1.3)$$

เมื่อ  $Q$  = ปริมาณประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)  
 $V$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

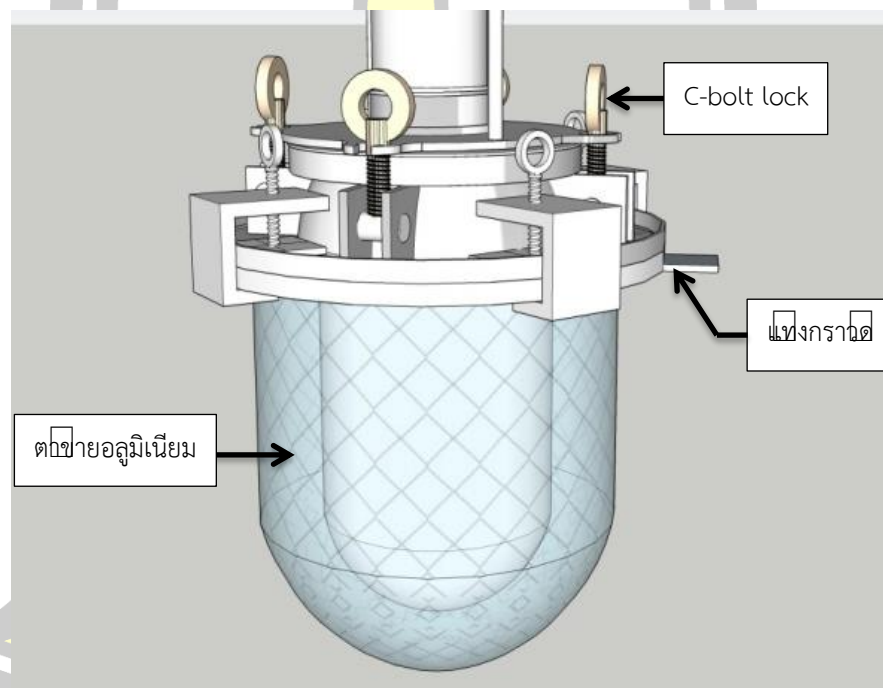
ซึ่งการหาค่าพลังงาน ( $E$ ) ทั้งหมดต้องมีเครื่องมือวัดอยู่อย่างใดก็ได้ เครื่องมือวัดไฟฟ้าสถิตย (ESD) เพื่อหาความต่างศักย์ของไฟฟ้า และ เครื่องมือวัดปริมาณประจุไฟฟ้า หรือหาปริมาณประจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ 1.4 เพื่อหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่ออกมาทั้งหมด

$$Q = It \quad (1.4)$$

เมื่อ  $I$  = กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)  
 $t$  = เวลา มีหน่วยเป็นวินาที (s)

จากสมการที่ 1.2 เมื่อรู้ค่าพลังงาน (E) ก็จะสามารถหาค่าความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผกผันกันได้โดยผู้วิจัยไม่มีเครื่องมือวัดที่ได้กล่าวมาจึงไม่สามารถจะวัดค่าพลังงานที่ออกมาจากซิลิโคนทั้งหมดในขณะที่กำลังทำการกรองซิลิโคนได้ และการจัดซื้อท่อขายอลูมิเนียมไม่สามารถจัดซื้อตามขนาดที่ต้องการได้ผู้วิจัยจึงมีวิธีแก้ไขปัญหามาโดยการจัดซื้อท่อขายอลูมิเนียมที่มีการจัดจำหน่ายที่มีอยู่ทั่วไป

การออกแบบลักษณะรูปทรงของกรงฟาราเดย์ ตามภาพประกอบ 21 ซึ่งประกอบไปด้วยแหงกราบ 2 ชิ้น ชุดล็อก (C-bolt lock) ท่อขายอลูมิเนียมโดยมีรัศมีขนาด 115 มิลลิเมตร ความสูงขนาด 400 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างตะแกรง GAF Filter กับกรงฟาราเดย์ขนาด 500 มิลลิเมตร และขนาดของท่อขายของกรงฟาราเดย์จะมีขนาดเล็กกว่า 1 ใน 10 ของแถบคลื่นความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

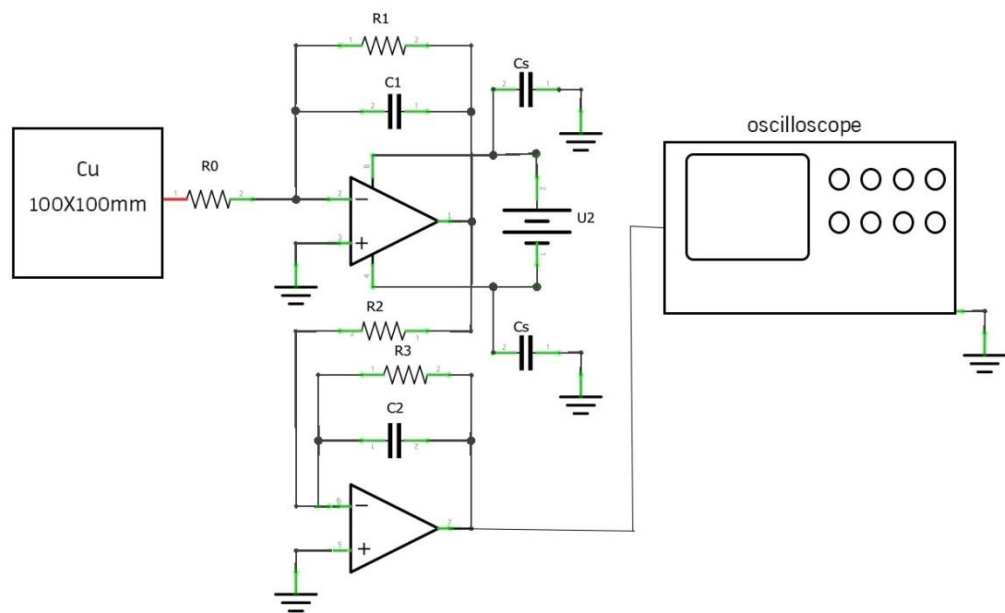


ภาพประกอบ 21 ภาพจำลองกรงฟาราเดย์ที่ติดตั้งกับ GAF Filter

### 3.2 เครื่องมือวัด

เซนเซอร์วัดไฟฟ้าสถิต ตามภาพประกอบ 22 เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประเภทวัดศักย์ไฟฟ้า โดยวงจรจะประกอบไปด้วย วงจรอินทิเกรเตอร์ (Op-Amp integrator circuit) วงจรขยายสัญญาณ ต่ออนุกรมและออปซิโอสโคป ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นแผ่นทองแดงจะเชื่อมกับอินพุตของออปแอมป์ มี

ขนาด 100x100 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อจับการเหนี่ยวนำของประจุไฟฟ้าสถิต แผลงจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ขนาด 24 โวลต์ ถูกต่อเข้ากับ  $\pm$  ของ ออปแอมป์ และ ตัวเก็บประจุ  $C_S$  มีค่าเท่ากับ 0.1  $\mu\text{F}$  เพื่อกรองสัญญาณความถี่สูง ผู้วิจัยได้พารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรเตอร์ คือ  $R_0 =$  ความต้านทานของสายไฟ  $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$   $C_1 = 2200 \text{ pF}$  วงจรขยายมีค่า  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$   $R_3 = 500 \text{ k}\Omega$   $C_2 = 100 \text{ pF}$  ซึ่งวงจรส่วนที่สองมีอัตราขยาย -500 เท่า



ภาพประกอบ 22 เซนเซอร์วัดไฟฟ้าสถิต

พูน ปณ ทิโต ชีเว

## บทที่ 4

### วิธีการและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการทดลองในรูปแบบการจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตและการรวบรวมข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองเพื่อพิสูจน์ผลลงของปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยเทคนิคกรงฟาราเดย์จากการเปรียบเทียบปริมาณไฟฟ้าสถิตก่อนติดตั้งกรงฟาราเดย์ ติดตั้งกรงฟาราเดย์ไม่มีกรงฟาราเดย์ และติดตั้งกรงฟาราเดย์ที่ต่อกรงฟาราเดย์ โดยใช้เครื่องมือวัดที่ได้จากการออกแบบไว้ในบทที่ 3 เพื่อวัดปริมาณไฟฟ้าสถิตในซิลิโคน

#### 4.1 ที่มาของรูปแบบการจำลอง

ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการทดลองในรูปแบบจำลอง เนื่องจากการจัดสร้างกรงฟาราเดย์ที่ได้มีการออกแบบไว้ในบทที่ 3 ใช้ระยะเวลาและงบประมาณในการจัดสร้างค่อนข้างที่จะสูงเกินไป ซิลิโคนยังมีความหนืดที่สูงมาก 700 ถึง 2050 Pa.s และไม่ใช้ตัวแปรคงที่เนื่องจากในกระบวนการผลิตจะมีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดส่งผลทำให้เกิดกาถ้ายเทอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิโคนในแต่ละเกรดมีความแตกต่างกันออกไปตามส่วนผสมของซิลิโคน ซึ่งส่วนผสมของซิลิโคนนั้นไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลที่เป็นความลับของทางบริษัท อุตสาหกรรมซิลิโคน (ประเทศไทย) จำกัด จึงไม่สามารถที่จะศึกษาปริมาณส่วนผสมของซิลิโคนที่มีส่วนสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำงานในขณะที่ทำการทดลองในห้องงานจริงอีกด้วย

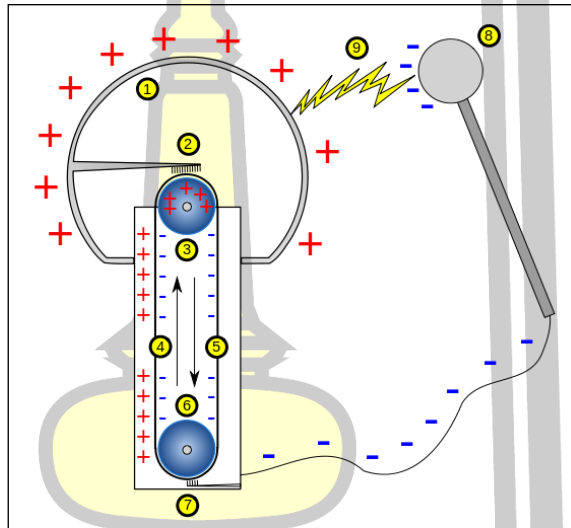
จากการศึกษากระบวนการกรองซิลิโคนในบทที่ 2 จะสรุปได้ว่า หลักการที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการกรองซิลิโคนเกิดจากการเสียดสีกันของวัสดุระหว่างซิลิโคนและผ้าไนลอนทำให้เกิดปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิววัสดุไม่เหมือนกัน ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการการเกิดไฟฟ้าสถิตและนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลอง โดยเลือกใช้วัสดุที่ได้อ้างอิงตาม ตารางที่โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series) ไดแก ผ้าไนลอน (Nylon) และท่อ PCV (Polyvinyl Chloride)

#### 4.2 วิธีการสร้างประจุไฟฟ้าสถิต

ผู้วิจัยได้ใช้หลักการสร้างประจุไฟฟ้าสถิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de Graaff Generator) ดังภาพประกอบ 23 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. โลหะกลวงทรงกลม ทำหน้าที่ เก็บประจุบวก

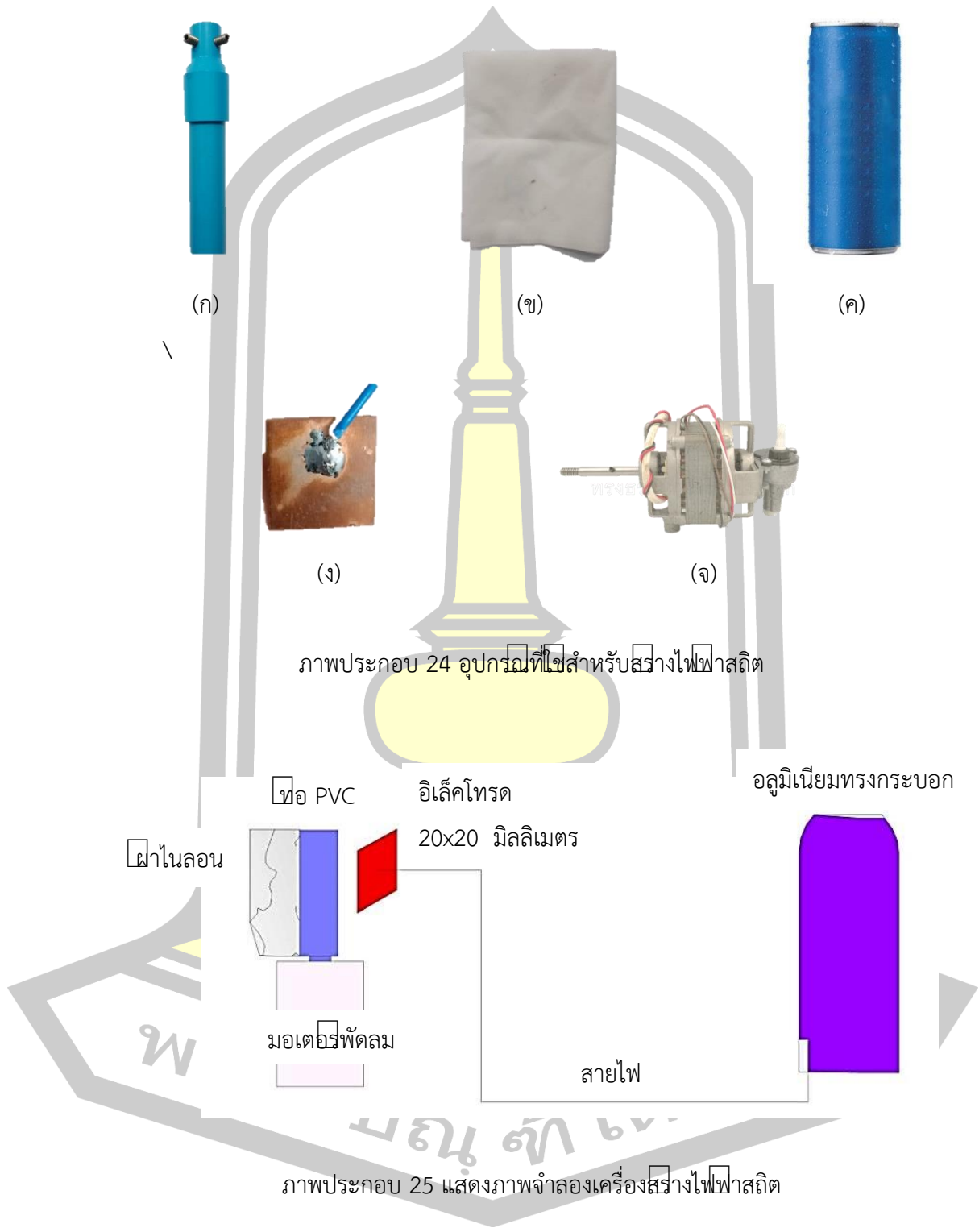
2. อิเล็กโทรดเชื่อมต่อกับโลหะทรงกลมและแปลงสัมผัสกับสายพานเพื่อดึงประจุไฟฟ้า
3. ลูกกลิ้งบน (Plexiglass)
4. ใต้วงของสายพานที่มีประจุลบ
5. ด้านในของสายพานที่มีประจุลบ
6. ลูกกลิ้งล่างต่อกับมอเตอร์
7. อิเล็กโทรดต่ำเชื่อมต่อกับกราวด์
8. โลหะทรงกลม ทำหน้าที่เก็บประจุลบ
9. ประกายไฟที่เกิดจากความแตกต่างของศักย์

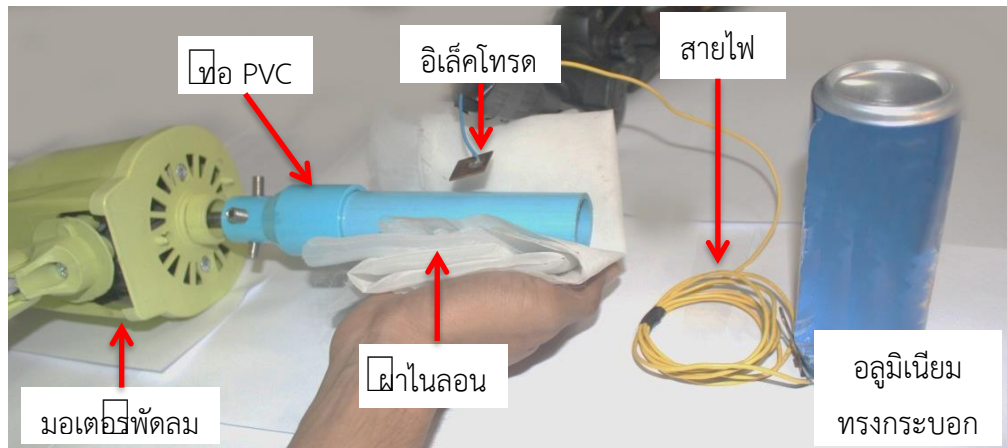


ภาพประกอบ 23 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de Graaff Generator)

โดยผู้วิจัยได้นำวิธีการเสียดสีและวิธีการนำประจุไฟฟ้าโดยอิเล็กโทรดเพื่อจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิต มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบจำลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ใต้วง PVC ขนาด 1 นิ้ว ยาว 16 เซนติเมตร ตามภาพประกอบ 24 (ก) ใต้วงไนลอน ขนาด 25x30 เซนติเมตร ตามภาพประกอบ 24 (ข) อิเล็กโทรดรับประจุ ขนาด 20x20 mm ตามภาพประกอบ 24 (ค) อลูมิเนียมทรงกระบอก ขนาด 245 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 24 (ง) มอเตอร์พัดลมขนาด 16 นิ้ว ตามภาพประกอบ 24 (จ) หลักการทำงานตามภาพประกอบ 25 ใต้วง PVC จะยึดติดกับมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ใต้วง PVC จะหมุนเพื่อเสียดสีกับใต้วงไนลอนทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า โดยมีอิเล็กโทรดขนาด 20x20 มิลลิเมตร มีหน้าที่รับประจุไฟฟ้าส่งไปยังกรงป้องกันอลูมิเนียมเพื่อเก็บประจุไฟฟ้า ภาพประกอบที่ 26 จะแสดงภาพจริงของการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิตที่ผู้วิจัยได้ทำการตั้งติดอุปกรณ์ต่าง ๆ







ภาพประกอบ 26 แสดงภาพจริงของเครื่องสร้างไฟฟ้าสถิต

#### 4.3 ระบบการวัดประจุไฟฟ้า

ระบบการวัดประจุไฟฟ้าจากการออกแบบใน บทที่ 3 ดังแสดงภาพประกอบ 27 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

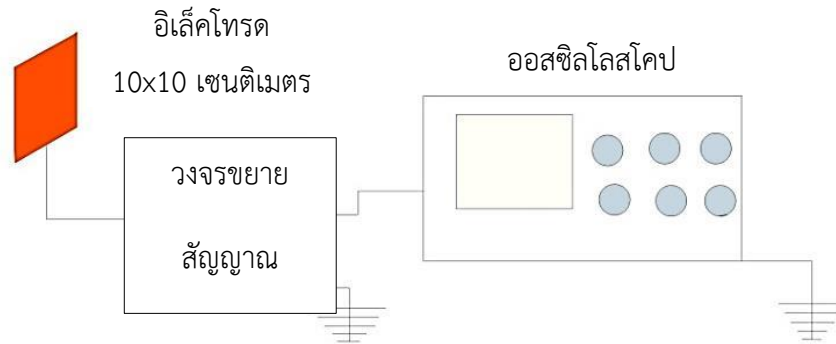
4.3.1 อิเล็คโทรด คือ แผ่นทองแดง ขนาด 10x10 เซนติเมตร ทำหน้าที่รับประจุไฟฟ้าสถิต ดังแสดงภาพประกอบ 28

4.3.2 วงจรขยายสัญญาณ จะประกอบไปด้วยวงจร วงจรอินทิเกรเตอร์ (Op-Amp integrator circuit) วงจรขยายสัญญาณต่ออนุกรม ดังแสดงภาพประกอบ 29

4.3.3 ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) รุ่น GDS-2074A เป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดง รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ออกมาเป็นภาพ ดังภาพประกอบ 30

ภาพประกอบ 31 จะแสดงภาพจริงของการทำงานของระบบการวัดประจุไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ และลักษณะของการแสดงผลเริ่มต้นของระบบการวัดประจุไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 32

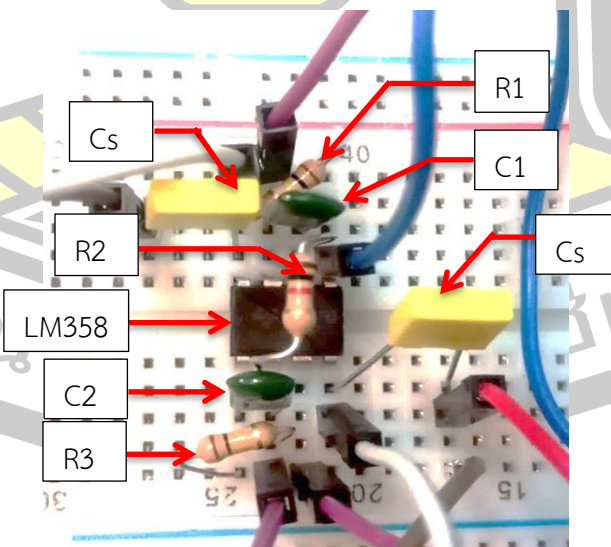
พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 27 ภาพจำลองระบบการวัดประจุไฟฟ้า



ภาพประกอบ 28 แผ่นทองแดง ขนาด 10x10 เซนติเมตร



ภาพประกอบ 29 วงจรรขยายสัญญาณ



ภาพประกอบ 30 ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) รุ่น GDS-2074A

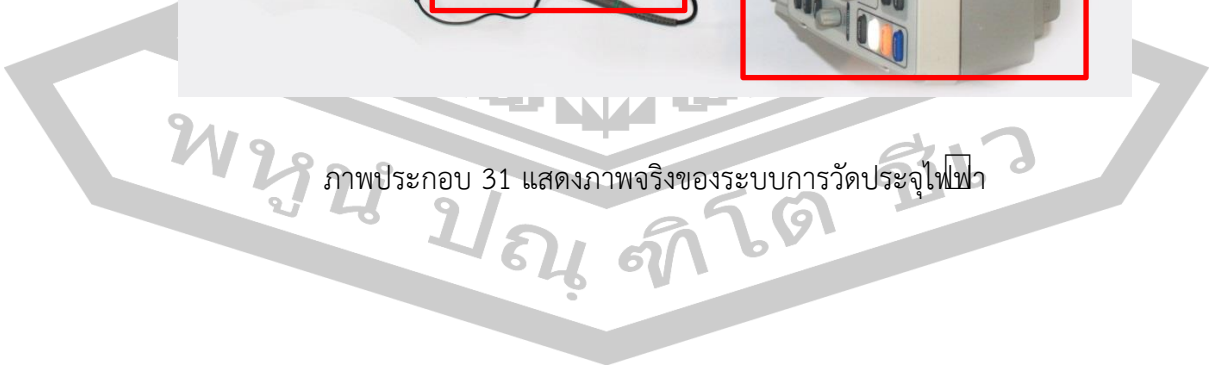


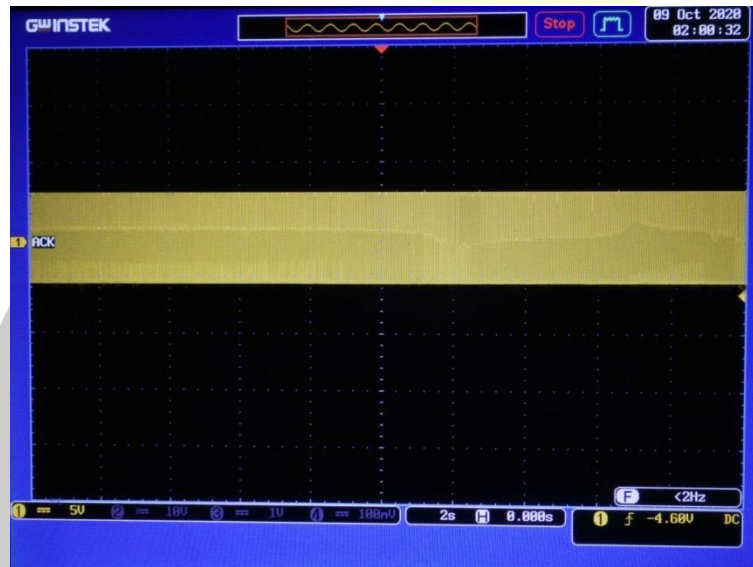
อิเล็กทรอนิกส์  
10x10 เซนติเมตร

วงจรขยาย  
สัญญาณ

ออสซิลโลสโคป

ภาพประกอบ 31 แสดงภาพจริงของระบบการวัดประจุไฟฟ้า





ภาพประกอบ 32 ลักษณะของการแสดงผลเริ่มต้นของระบบการวัดประจุไฟฟ้า

#### 4.4 กรงฟาราเดย์

กรงฟาราเดย์เป็นวัสดุที่ทำมาจากลวดอลูมิเนียมสานกันเป็นตาข่ายเรียบๆ ตาข่ายอลูมิเนียมซึ่งสามารถจัดซื้อได้ง่าย ดังแสดงภาพประกอบ 33 มีขนาด 210x290 มิลลิเมตร ขนาดของลวด 0.3 มิลลิเมตร และขนาดของตาข่ายมีขนาด 2x2 มิลลิเมตร โดยทำหน้าที่ลดปริมาณไฟฟ้าสถิตป้องกันการคายประจุไฟฟ้าสถิต และลดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จะไม่สามารถเกิดขวางสนามไฟฟ้าแม่เหล็กสถิตหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ ได้

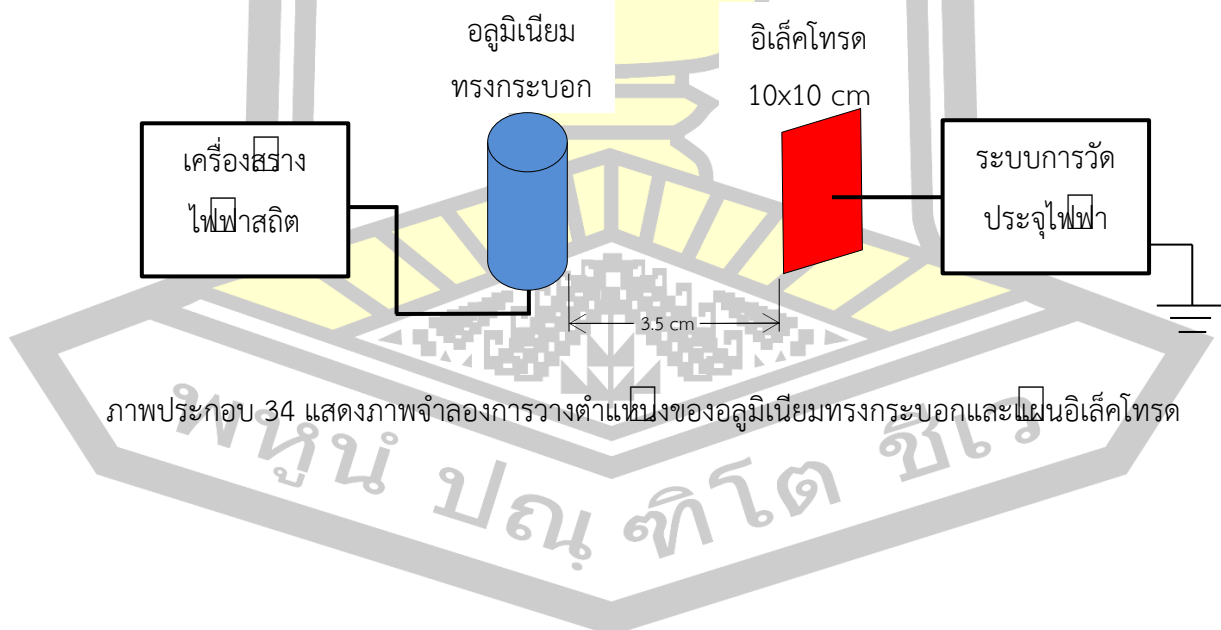


ภาพประกอบ 33 ตาข่ายอลูมิเนียม

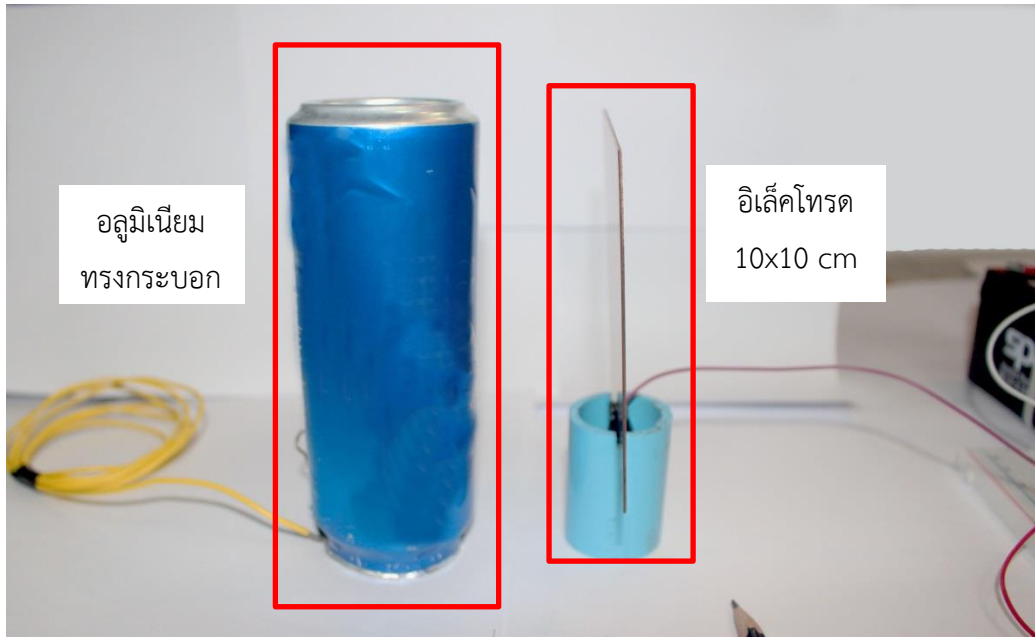
#### 4.5 วิธีการทดลอง

ภาพประกอบ 34 ภาพจำลองแสดงวิธีการติดตั้งเครื่องสร้างไฟฟ้าสถิตและระบบการวัดประจุไฟฟ้า เพื่อเตรียมในการทดสอบโดยตำแหน่งการวางอลูมิเนียมทรงกระบอกที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า และแผ่นอิเล็กโทรด ขนาด 10x10 เซนติเมตร จะอยู่ห่างกันด้วยระยะ 3.5 เซนติเมตร เมื่อเกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากอลูมิเนียมทรงกระบอกไปยังอิเล็กโทรดระบบวัดประจุไฟฟ้าสถิตจะแสดงภาพผลทดลองและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

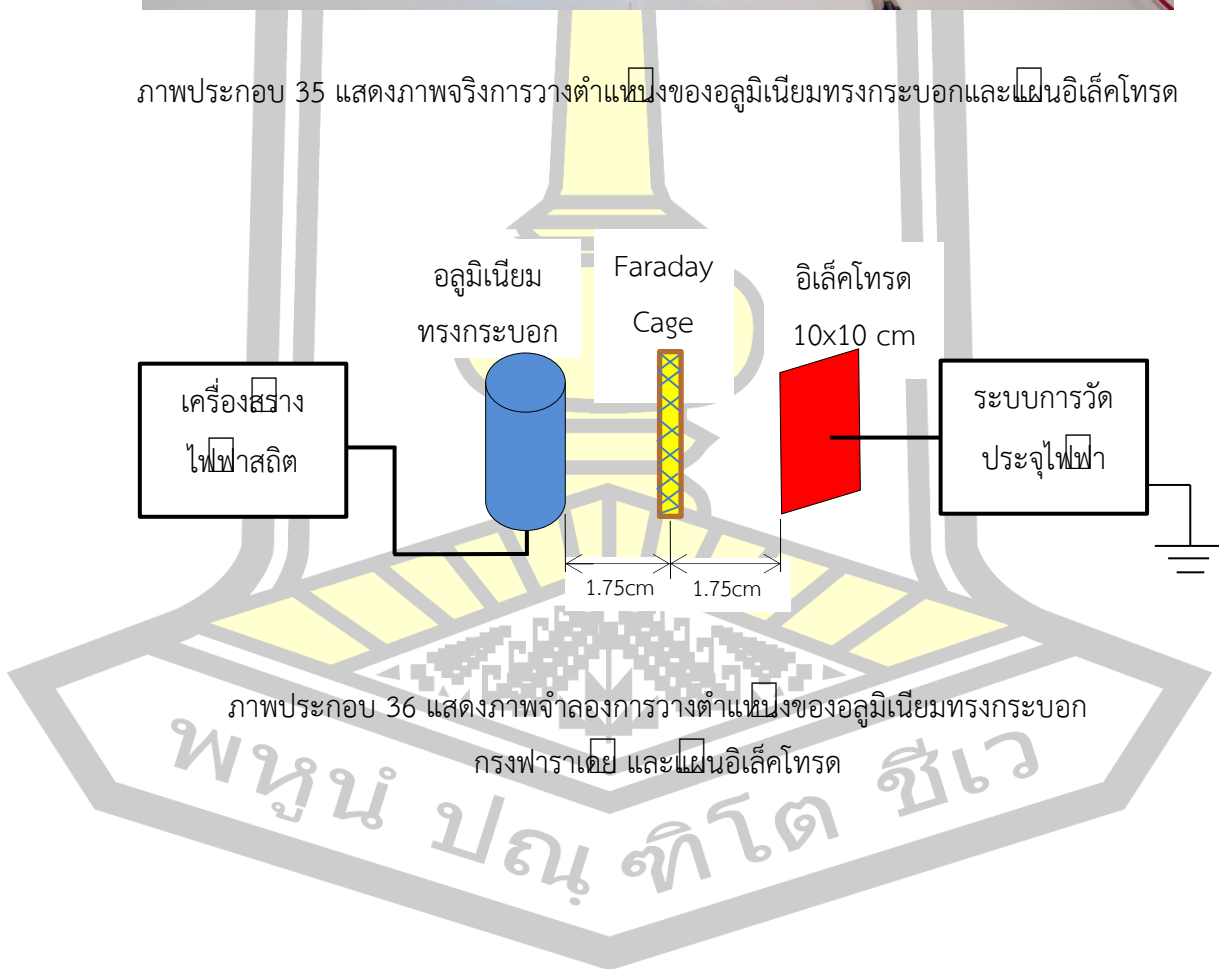
1. การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตไม่มีกรงฟาราเดย์ ดังแสดงภาพประกอบ 34 แสดงภาพจำลอง และภาพประกอบ 35 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอกและแผ่นอิเล็กโทรด
2. การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราดิ ดังแสดงภาพประกอบ 36 แสดงภาพจำลอง และภาพประกอบ 37 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ และแผ่นอิเล็กโทรด
3. การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราดิ ดังแสดงภาพประกอบ 38 แสดงภาพจำลอง และภาพประกอบ 39 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก กรงฟาราเดย์ติดตั้งระบบกราดิ และแผ่นอิเล็กโทรด



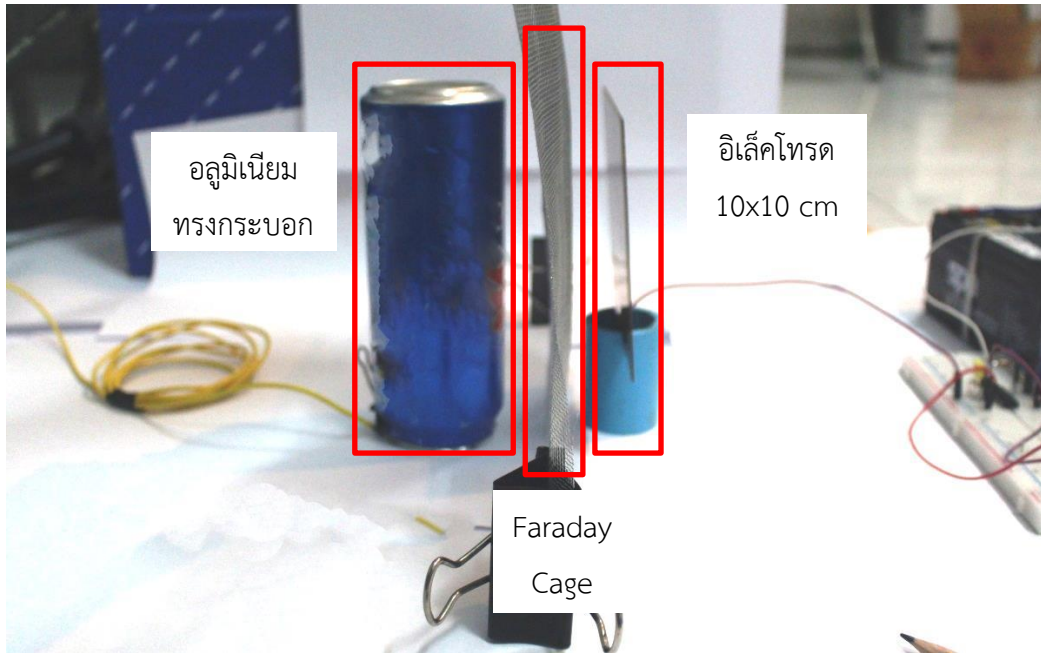




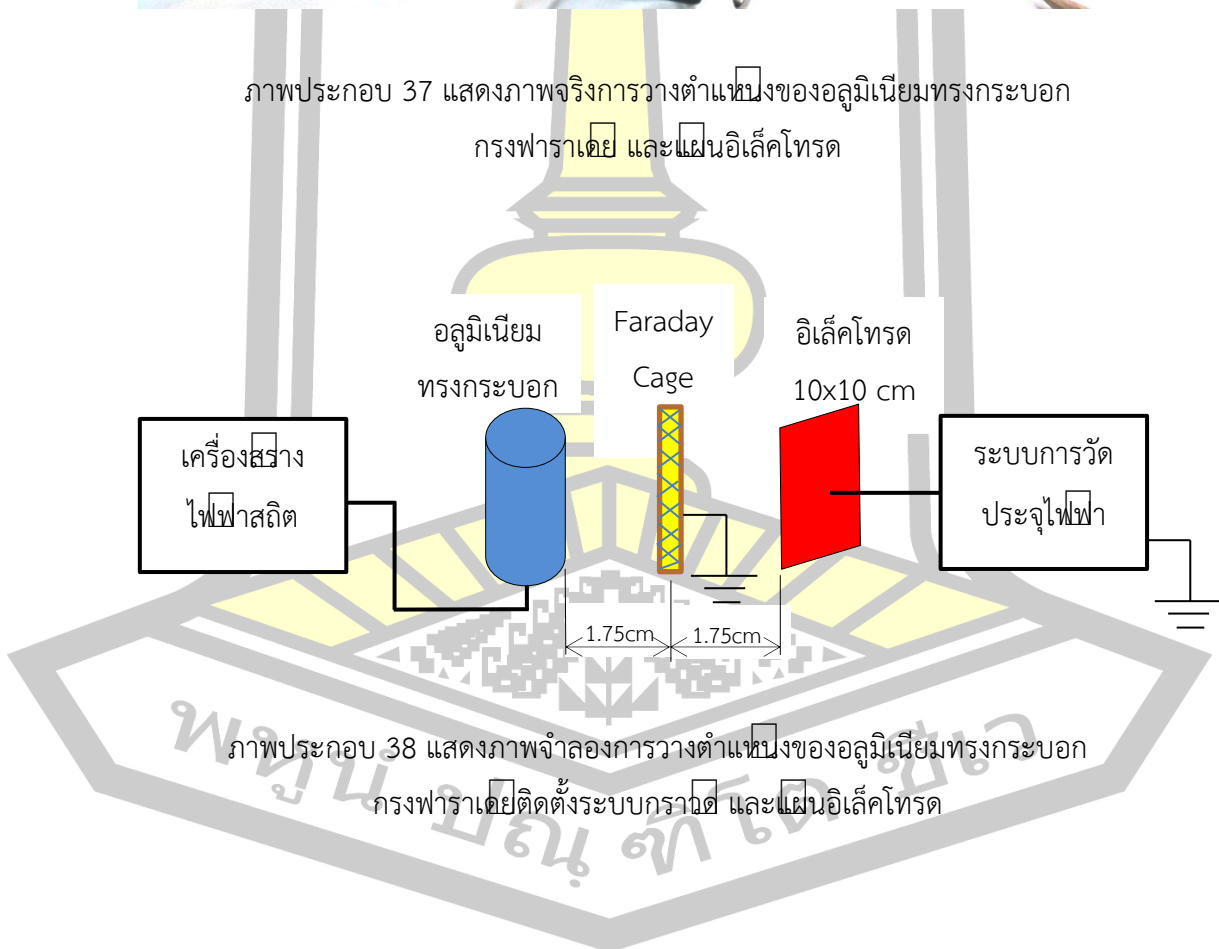
ภาพประกอบ 35 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอกและแผ่นอิลีคโตรด

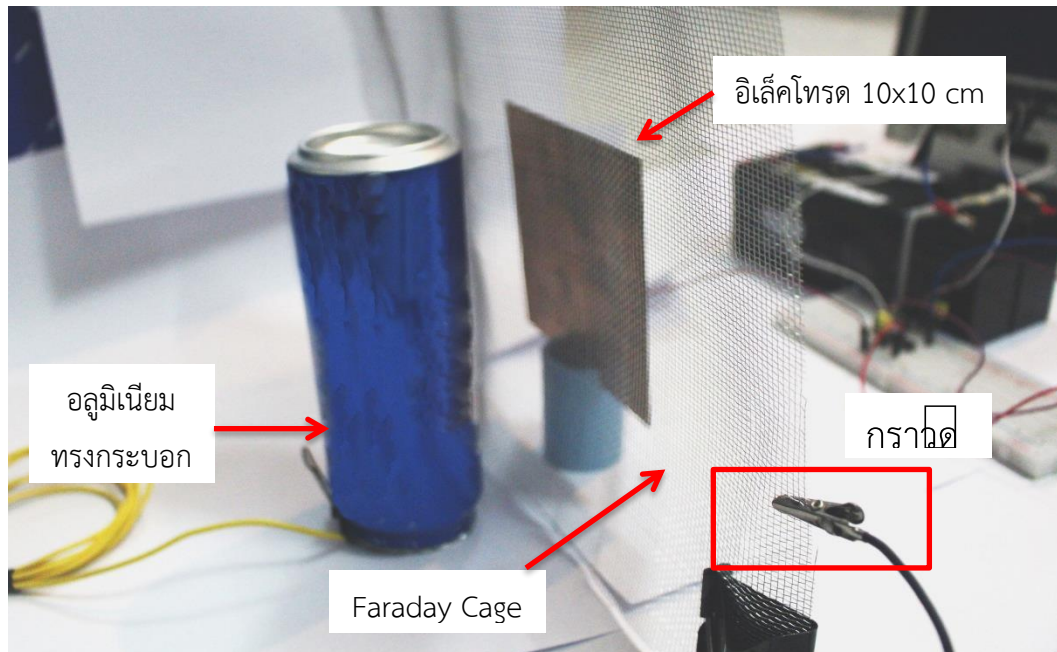






ภาพประกอบ 37 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก  
กรงฟาราเดย์ และแผ่นอลูมิเนียม





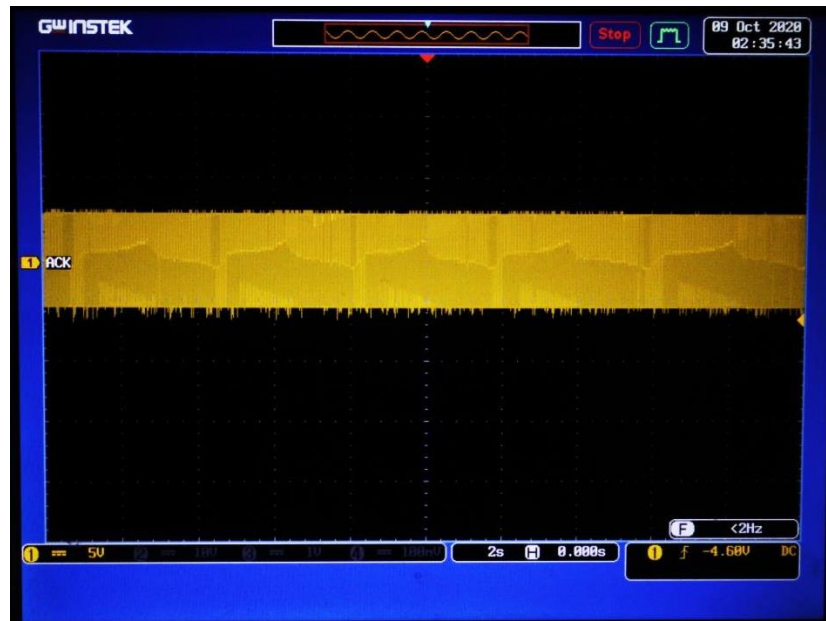
ภาพประกอบ 39 แสดงภาพจริงการวางตำแหน่งของอลูมิเนียมทรงกระบอก  
กรงฟาราเดย์ติดตั้งระบบกราวด์ และแผ่นอิเล็คโทรด

#### 4.6 การเก็บผลการทดลอง

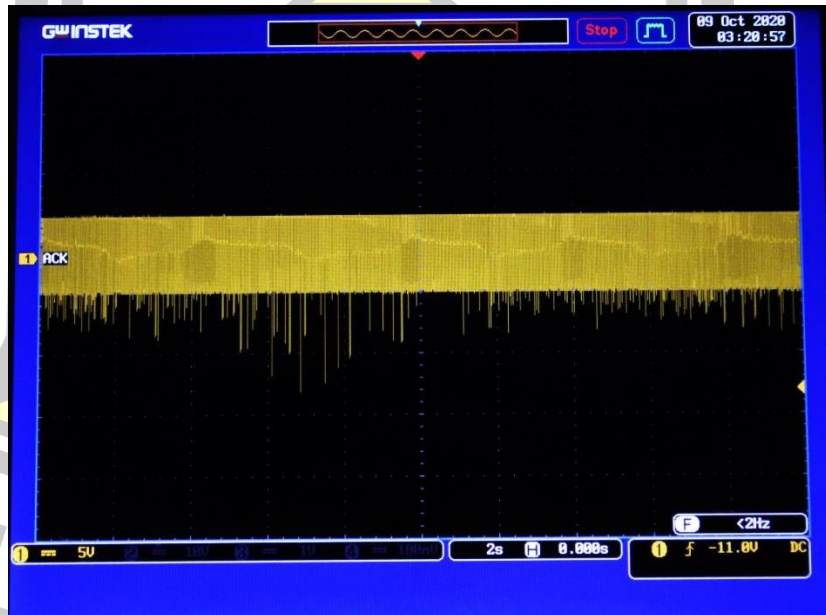
การทดลองจะทดลองที่อุณหภูมิห้องที่ 25 องศา ความชื้นที่ 47 %HR ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกัน  
กับห้องกระบวนการกรองซิลิโคน ปรับออสซิลโลสโคปสเกลวัตต์แรงดัน DC 5V คาบเวลา(T) 2s x10  
ช่อง = 20s เก็บผลการทดลอง 40 ครั้ง ในแต่ละรูปแบบใช้ระยะเวลาในการทดลองครั้งละ 20 วินาที  
โดยมีขั้นตอนการวัดดังต่อไปนี้

1. กดเปิดมอเตอร์พัดลมเบอร์ 3 เพื่อหมุนท่อ PVC ให้เสียดสีกับฝาไนลอน
2. ท่อ PVC ให้เสียดสีกับฝาไนลอนครบเวลา 20 วินาที จึงกดStopที่เครื่องออสซิลโลสโคป  
และมอเตอร์พัดลมตามลำดับ
3. ถ่ายภาพและเก็บผลการทดลอง

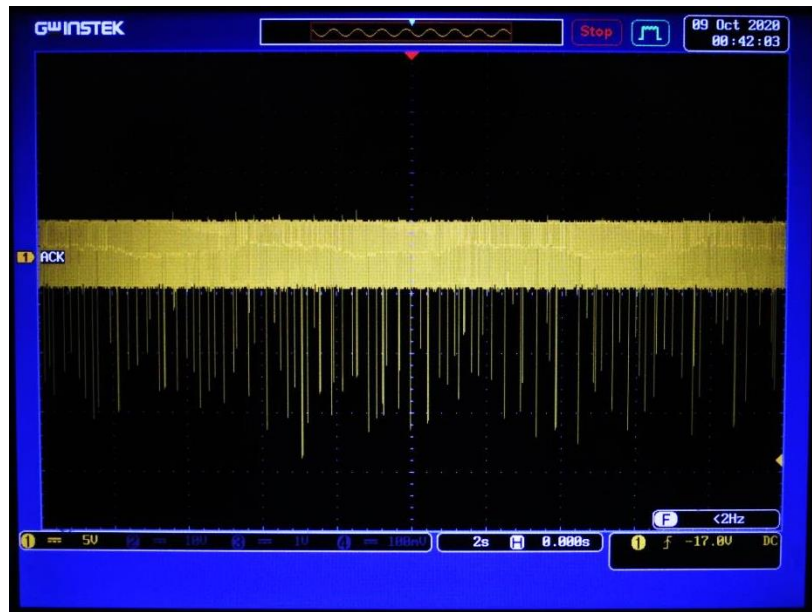
จากการทดสอบการวัดผลแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาการทดลอง 20 วินาทีค่าปริมาณไฟฟ้า  
เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังแสดงผู้วิจัยจึงได้เลือกเก็บผลแรงดัน ( $\Delta V$ ) สูงสุดในช่วงเวลาการ  
ทดลอง ดังตัวอย่างแสดงภาพประกอบ 40 41 และ 42 ตัวอย่างการแสดงผลจากออสซิลโลสโคป



ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างการแสดงผลจากเครื่องออสซิลโลสโคปของการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต  
แบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราด



ภาพประกอบ 41 ตัวอย่างการแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต  
แบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด



ภาพประกอบ 42 ตัวอย่างการแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต  
ไม่มีกรงฟาราเดย์

#### 4.7 ผลการทดลอง

การเก็บผลการทดลอง ดังตารางที่ 3 ในรูปแบบการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตไม่มีกรงฟาราเดย์จะแสดงให้ค่าปริมาณไฟฟ้าสถิตเฉลี่ยที่  $-16.52$  โวลต์ ตารางที่ 4 การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด แสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยมีค่าเฉลี่ยที่  $-8.09$  โวลต์ ตารางที่ 5 การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราด แสดงให้เห็นว่าปริมาณไฟฟ้าสถิตลดลงเป็นปริมาณมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $-4.85$  โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกราฟผลการทดลองทั้ง 3 รูปแบบจะแสดงให้เห็นได้ว่ากรงฟาราเดย์ที่ไม่มีการติดตั้งกราดสามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้ถึง 51 % และกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราดสามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้ถึง 71% ดังแสดงภาพประกอบ 43

ตารางที่ 3 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตไม่มีกรงฟาราเดย์

วัดปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยไม่มีกรงฟาราเดย์			
ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)	ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)
1	-14.2	21	-15
2	-17	22	-16.6
3	-20	23	-14.6
4	-13.6	24	-18
5	-13.2	25	-15.2
6	-12.2	26	-11.2
7	-13.2	27	-13
8	-20.6	28	-17.2
9	-19.6	29	-20.4
10	-15.4	30	-17.6
11	-15	31	-17
12	-16.6	32	-15
13	-15.2	33	-16.4
14	-20.4	34	-14
15	-18.4	35	-18.4
16	-18	36	-18.2
17	-20.8	37	-18.6
18	-18	38	-19.6
19	-10.4	39	-12.6
20	-16	40	-12.6

ตารางที่ 4 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด

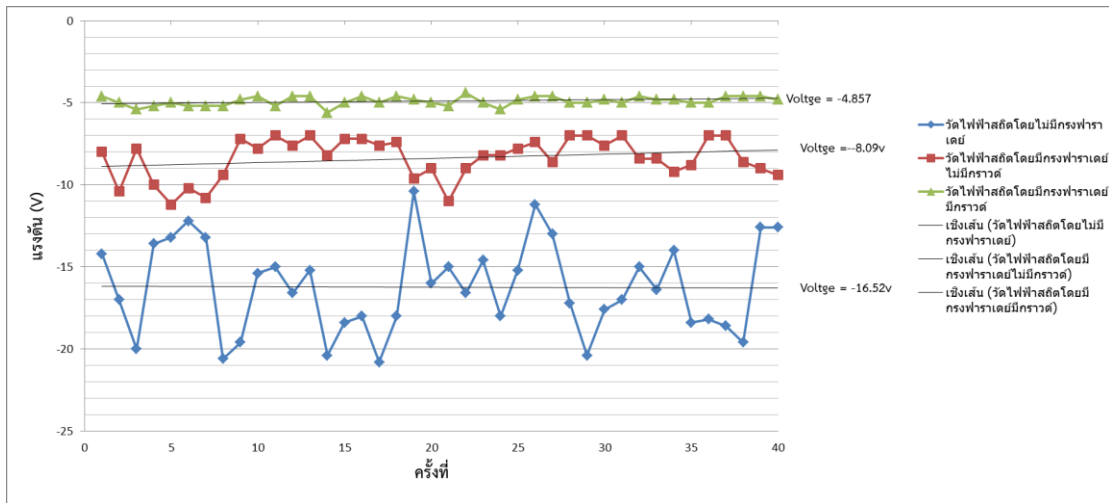
วัดปริมาณไฟฟ้าสถิตโดยมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด			
ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)	ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)
1	-8	21	-11
2	-10.4	22	-9
3	-7.8	23	-8.2
4	-10	24	-8.2
5	-11.2	25	-7.8
6	-10.2	26	-7.4
7	-10.8	27	-8.6
8	-9.4	28	-7
9	-7.2	29	-7
10	-7.8	30	-7.6
11	-7	31	-7
12	-7.6	32	-8.4
13	-7	33	-8.4
14	-8.2	34	-9.2
15	-7.2	35	-8.8
16	-7.2	36	-7
17	-7.6	37	-7
18	-7.4	38	-8.6
19	-9.6	39	-9
20	-9	40	-9.4



ตารางที่ 5 ผลการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราวิต

วัดปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราวิต			
ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)	ครั้งที่	$\Delta V$ (Voltage)
1	-4.6	21	-5.2
2	-5	22	-4.4
3	-5.4	23	-5
4	-5.2	24	-5.4
5	-5	25	-4.8
6	-5.2	26	-4.6
7	-5.2	27	-4.6
8	-5.2	28	-5
9	-4.8	29	-5
10	-4.6	30	-4.8
11	-5.2	31	-5
12	-4.6	32	-4.6
13	-4.6	33	-4.8
14	-5.6	34	-4.8
15	-5	35	-5
16	-4.6	36	-5
17	-5	37	-4.6
18	-4.6	38	-4.6
19	-4.8	39	-4.6
20	-5	40	-4.8





ภาพประกอบ 43 กราฟเปรียบเทียบการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต



## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในบทที่ 4 รูปแบบการจำลองสร้างประจุไฟฟ้าสถิตผู้วิจัยได้ใช้วัสดุที่อ้างอิงจากทฤษฎีไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Series) ได้แก่ท่อ PVC และผ้าไนลอน เพื่อสร้างประจุไฟฟ้าสถิต โดยอิเล็กโทรดขนาด 20x20 มิลลิเมตร รับประจุไฟฟ้าเพื่อเก็บประจุไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิเนียมทรงกระบอก ซึ่งมีต้นแบบมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสถิต (Van de Graaff Generator) ระบบการวัดประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดจะประกอบไปด้วย อิเล็กโทรดหรือแผ่นทองแดง ขนาด 10x10 เซนติเมตร ทำหน้าที่รับประจุไฟฟ้าสถิต วงจรขยายสัญญาณทำหน้าที่ขยายแรงดัน และออสซิลโลสโคป (oscilloscope) รุ่น GDS-2074A ทำหน้าที่แสดงผลการทดลอง กรงฟาราเดย์ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้คือหลอดอุณหภูมิเนียมสานกันเป็นตึกขาย ขนาด 210x290 มิลลิเมตร ขนาดของหลอด 0.3 มิลลิเมตร และขนาดของตึกขายมีขนาด 2x2 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ลดปริมาณไฟฟ้าสถิตป้องกันการคายประจุไฟฟ้าสถิต และลดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก

อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการทดลองที่ 25 องศา ความชื้นที่ 47 %HR ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกันกับห้องกระบวนการกรองซิลิโคน ปรับออสซิลโลสโคปสเกลแรงดัน DC 5V คาบเวลา(T) 2s x10 ของ = 20 วินาที เก็บผลการทดลอง 40 ครั้ง ในแต่ละรูปแบบใช้ระยะเวลาในการทดลองครั้งละ 20 วินาที การทดลองในรูปแบบที่ 1 การทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตไม่มีกรงฟาราเดย์ โดยจัดวางระยะห่างระหว่างอุณหภูมิเนียมทรงกระบอกที่ทำหน้าที่เก็บประจุและแผ่นอิเล็กโทรดของระบบวัดประจุไฟฟ้าด้วยระยะห่าง 3.5 เซนติเมตร ผลที่ได้ ดังตัวอย่างแสดงภาพประกอบ 42 และ ตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไฟฟ้าสถิตเฉลี่ยที่ -16.52 โวลต์ การทดลองในรูปแบบที่ 2 ทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด ผลที่ได้ ดังตัวอย่างแสดงภาพประกอบ 41 และ ตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไฟฟ้าสถิตเฉลี่ยที่ -8.09 โวลต์ ซึ่งปริมาณไฟฟ้าสถิตลดลงถึง 8.43 โวลต์ เมื่อเทียบกับการทดลองรูปแบบที่ 1 การทดลองในรูปแบบที่ 3 ทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ที่มีการติดตั้งกราด ดังตัวอย่างแสดงภาพประกอบ 40 และ ตารางที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไฟฟ้าสถิตเฉลี่ยที่ -4.85 โวลต์ซึ่งปริมาณไฟฟ้าสถิตลดลงถึง โวลต์ 11.67 โวลต์ เมื่อเทียบกับการทดลองรูปแบบที่ 1 จากกราฟเปรียบเทียบการทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิต ภาพประกอบ 43 แสดงให้เห็นว่ากรงฟาราเดย์สามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้มากถึง 51 % และเมื่อกรงฟาราเดย์ติดตั้งระบบกราดจะสามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้มากถึง 71% เมื่อเทียบกับการทดลองในรูปแบบที่ 1

## 5.2 อภิปรายการทดลอง

จากภาพตัวอย่างการแสดงผลจากเครื่องออสซิลโลสโคปจะสังเกตเห็นได้ว่าคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันในทิศทางแรงดันลบซึ่งเป็นตามทฤษฎีโทโบอิเล็กทรอนิกส์ที่แผ่นในลอนจะสูญเสียอิเล็กตรอนง่ายและแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกที่ท่อ PVC จะรับอิเล็กตรอนได้ดีและแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุลบ ซึ่งอิเล็กโตรดขนาด 20x20 มิลลิเมตร จะรับประจุลบจากท่อ PVC ไปยังออลูมิเนียมทรงกระบอกและเกิดการดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าสถิตอย่างต่อเนื่องในช่วงการทดลอง 20 วินาทีต่อครั้ง จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างผิดปกติในทิศทางเดียวกันเป็นจำนวนมากซึ่งลักษณะคล้ายกับ แรงดันเสิร์จ (Surge) ที่มีความผิดปกติในช่วงเวลาสั้นๆ กรงฟาราเดย์สามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้ซึ่งเป็นตามทฤษฎีของกรงฟาราเดย์ เนื่องจากออลูมิเนียมทรงกระบอกที่เก็บประจุไฟฟ้าจะแปรสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเหนี่ยวนำกับวัตถุที่อยู่รอบ ๆ กรงฟาราเดย์ที่ผู้วิจัยได้นำมาทดลองสามารถกีดขวางคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรออกมาได้เป็นบางส่วนส่งผลทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตไปยังอิเล็กโตรดของระบบวัดได้น้อยลงถึง 51% และยังมีประจุไฟฟ้าบางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ในหลอดตกขายเนื่องจากไม่มีการติดตั้งระบบกราวด์เพื่อนำประจุไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน เมื่อกรงฟาราเดย์มีการติดตั้งระบบกราวด์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำประจุภายในกรงฟาราเดย์ซึ่งประจุที่อยู่พื้นผิวโลกจะเคลื่อนที่ขึ้นมาตามแรงเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้กรงฟาราเดย์มีประสิทธิภาพในการกีดขวางมากขึ้นถึง 71%

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรงฟาราเดย์สามารถลดปริมาณไฟฟ้าสถิตได้จริง อีกทั้งยังสามารถนำไปศึกษาต่อยอดเพื่อนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาไฟฟ้าสถิตในหน่วยงานจริงได้อีกด้วย
2. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองจัดสร้างขึ้นมาเพื่อวัดปริมาณไฟฟ้าสถิตในรูปแบบจำลอง โดยเฉพาะไม่สามารถที่จะวัดปริมาณไฟฟ้าสถิตในหน่วยงานจริงได้เนื่องจากมีปริมาณไฟฟ้าสถิตที่สูงมาก

พูน ปรณ ทัต ชีเว

บรรณานุกรม

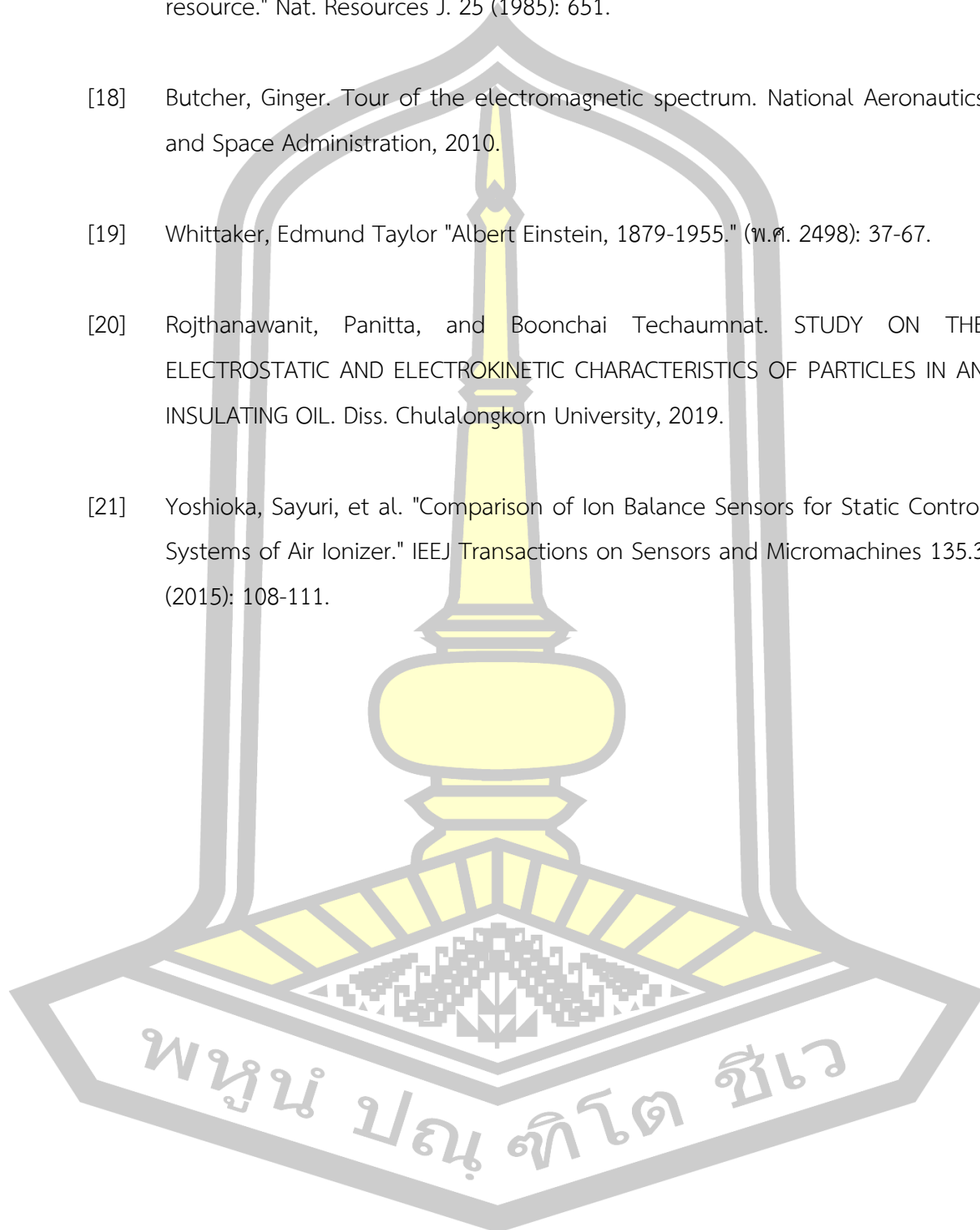


## บรรณานุกรม

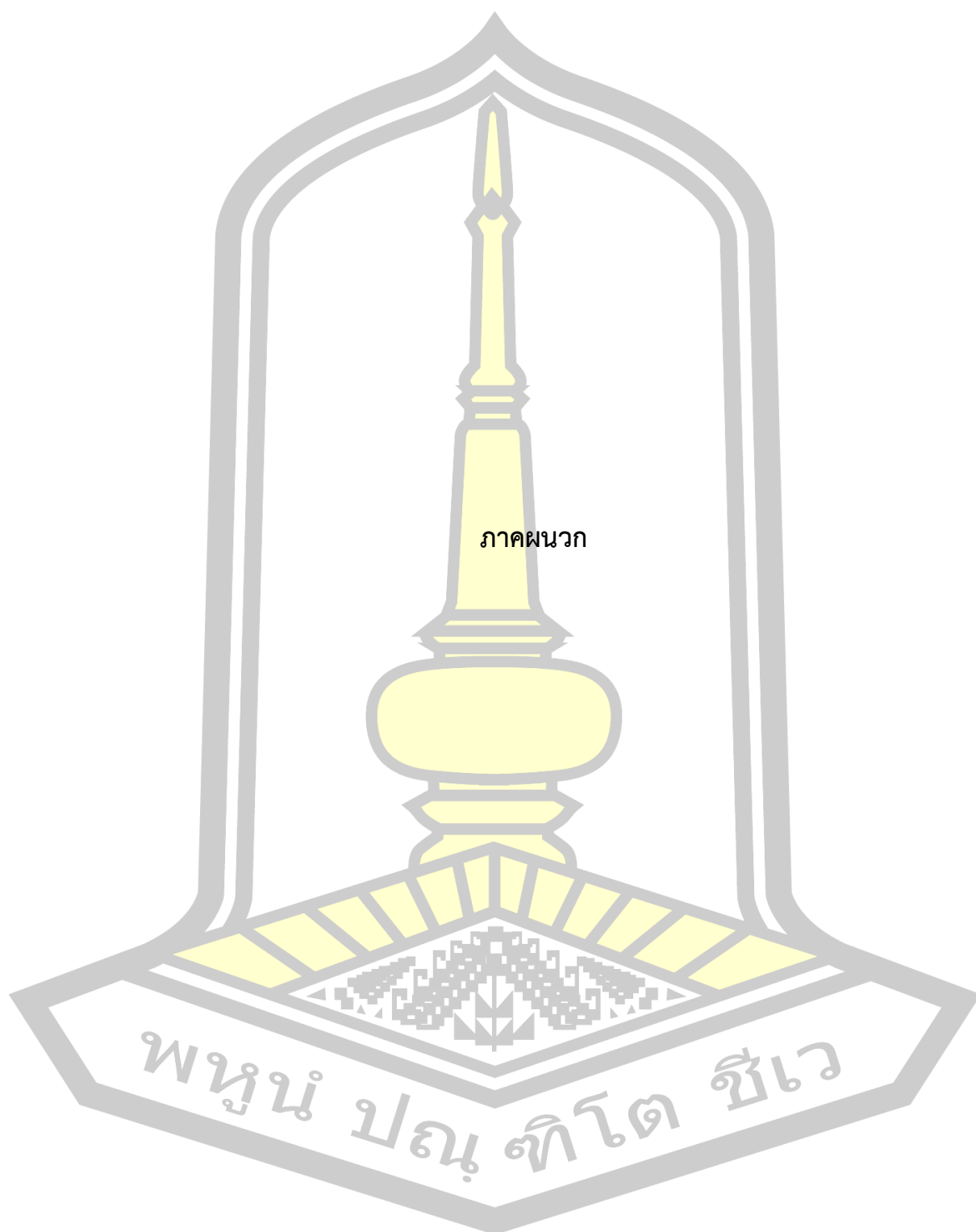
- [1] สุรเศรษฐ์ ศรีรอด, and ปานจิต ดำรงกุลกำจร. "การลดอันตรายของไฟฟ้าสถิตในโรงงานอบผ้า." วิศวกรรมสาร มก., ISSN 1685-9317, ส.ค.-ต.ค. 2552,ปีที่ 22, ฉบับที่ 69, หน้า 1-12
- [2] Wattanahuttakum, Acharawan, Saksit Deeum, and Boontham Limpiyapun. "ผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนัก." Bulletin of Applied Sciences 8.8 (2019): 64-71
- [3] Pan, Shuaihang, and Zhinan Zhang. "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review." Friction 7.1 (2019): 2-17.
- [4] Kelly, M. A., G. E. Servais, and T. V. Pfaffenbach. "An investigation of human body electrostatic discharge." INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR TESTING AND FAILURE ANALYSIS. AMERICAN TECHNICAL PUBLISHERS LTD, 1993.
- [5] Shit, Subhas C., and Pathik Shah. "A review on silicone rubber." National Academy Science Letters 36.4 (2013): 355-365.
- [6] นवल พรรณ ใจงาม. "การลดของเสียที่เกิดจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าสถิตในกระบวนการประกอบหัวอ่านโดยเปรียบเทียบวิธีซีกซ์ซีกซ์." PhD diss., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] สุรพล ดำรงกิตติกุล ดวงดี แสนรักษ์.(2554). "ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพด้านการออกแบบติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบกาต่อลงดิน". พิมพ์ครั้งที่1. สภาวิศวกร
- [8] มงคล ปุขยตานนท์, บงกช สุขอนันต์, (2556) "ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกสิ่งปลูกสร้าง". บทความวิชาการ วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2556

- [9] Metwally, I. A. and Heidler, F. H. 2008. Reduction of Lightning-Induced Magnetic Fields and Voltages Inside Struck Double Layer Grid-Like Shields. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 50(4):905 - 912.
- [10] Chapman, S. Jonathan, David P. Hewett, and Lloyd N. Trefethen. "Mathematics of the Faraday cage." Siam Review 57.3 (2015): 398-417.
- [11] ศิริลักษณ์ อรุณ สวัสดิ์. "การเตรียมกราฟีน/พอลิไพโรล-โค-พอร์มิลไพโรลคอมพอสิตสำหรับการเคลือบพอลิยูรีเทนฐานไฟฟ้าสถิต." PhD diss., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] Nuamcharoen, Miss Praewpanit. "PHYSICAL PROPERTIES OF REDUCED GRAPHENE OXIDE/POLY (BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES."
- [13] คุณาลยา สถานสถิต, et al. "สมบัติเชิงกลสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของ LLDPE ที่เติมพอลิไพโรลและคาร์บอนแบล็ก." Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok 21.2 (2011): 349-356.
- [14] วีรชน ศรีหاتا, สุปราณี แก้วภิรมย์ (2556). วัสดุป้องกันการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่เตรียมจากพอลิเมอโรลผสมไคโตซาน/พอลิ(เอทิลีนไกลคอล). วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2556
- [15] มณีนุช. พิระยศ. วีรวัฒน์. (2560) ANALYSIS OF GROUNDING SYSTEM FOR SAFETY IN GAS PRODUCTION AND GAS FILLING PLANT. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 9 ฉบับที่ 18 กรกฎาคม - ธันวาคม 2560
- [16] Noor Amalina Zakaria and Rubita Sudirman. (2008). "Electromagnetic Interference Effect from Power Line Noise in Electrocardiograph Signal using Faraday Cage" 2 n d IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia

- [17] Herter Jr, Christian A. "The electromagnetic spectrum: A critical natural resource." Nat. Resources J. 25 (1985): 651.
- [18] Butcher, Ginger. Tour of the electromagnetic spectrum. National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [19] Whittaker, Edmund Taylor "Albert Einstein, 1879-1955." (พ.ศ. 2498): 37-67.
- [20] Rojthanawanit, Panitta, and Boonchai Techaumnat. STUDY ON THE ELECTROSTATIC AND ELECTROKINETIC CHARACTERISTICS OF PARTICLES IN AN INSULATING OIL. Diss. Chulalongkorn University, 2019.
- [21] Yoshioka, Sayuri, et al. "Comparison of Ion Balance Sensors for Static Control Systems of Air Ionizer." IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines 135.3 (2015): 108-111.

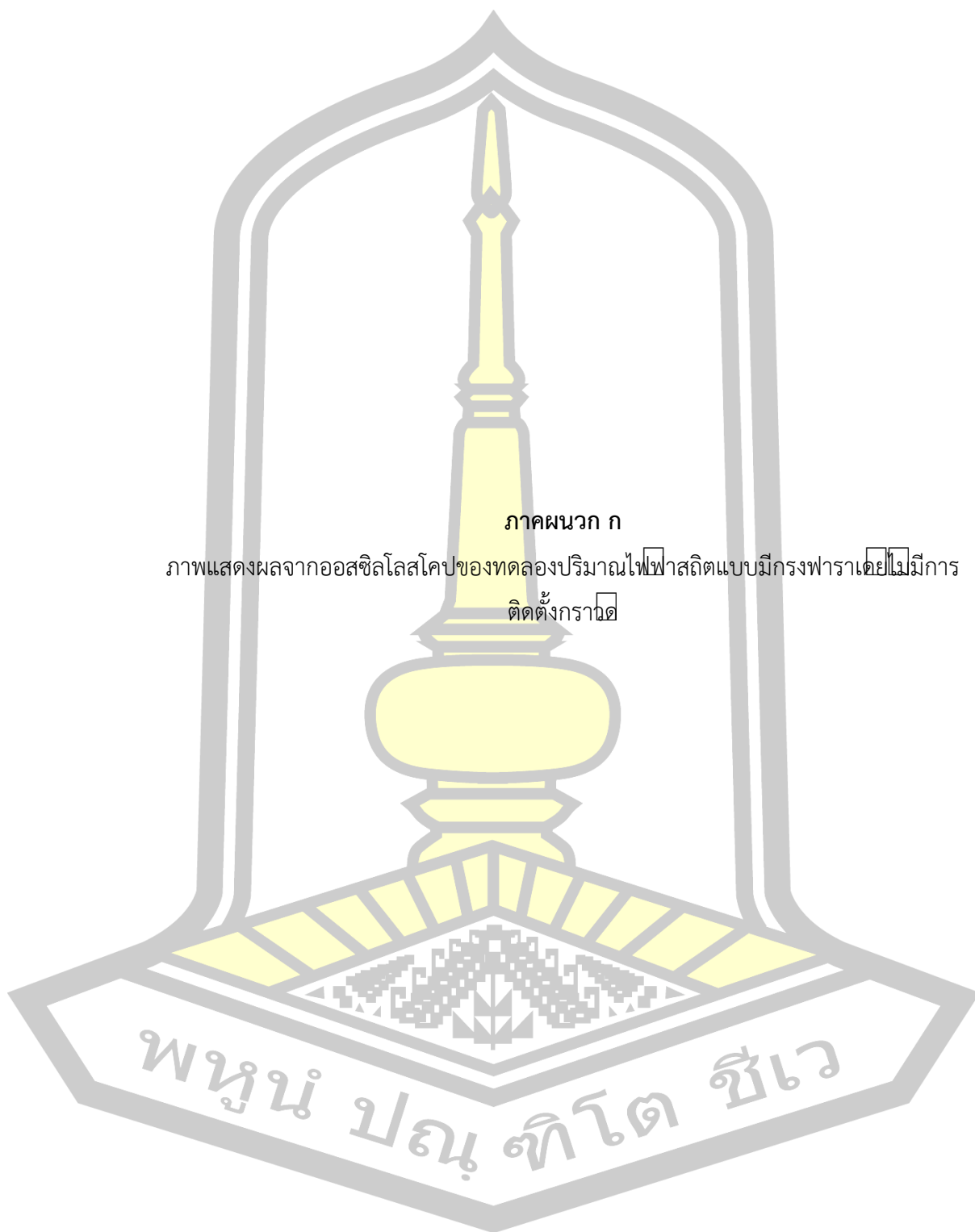






ภาคผนวก

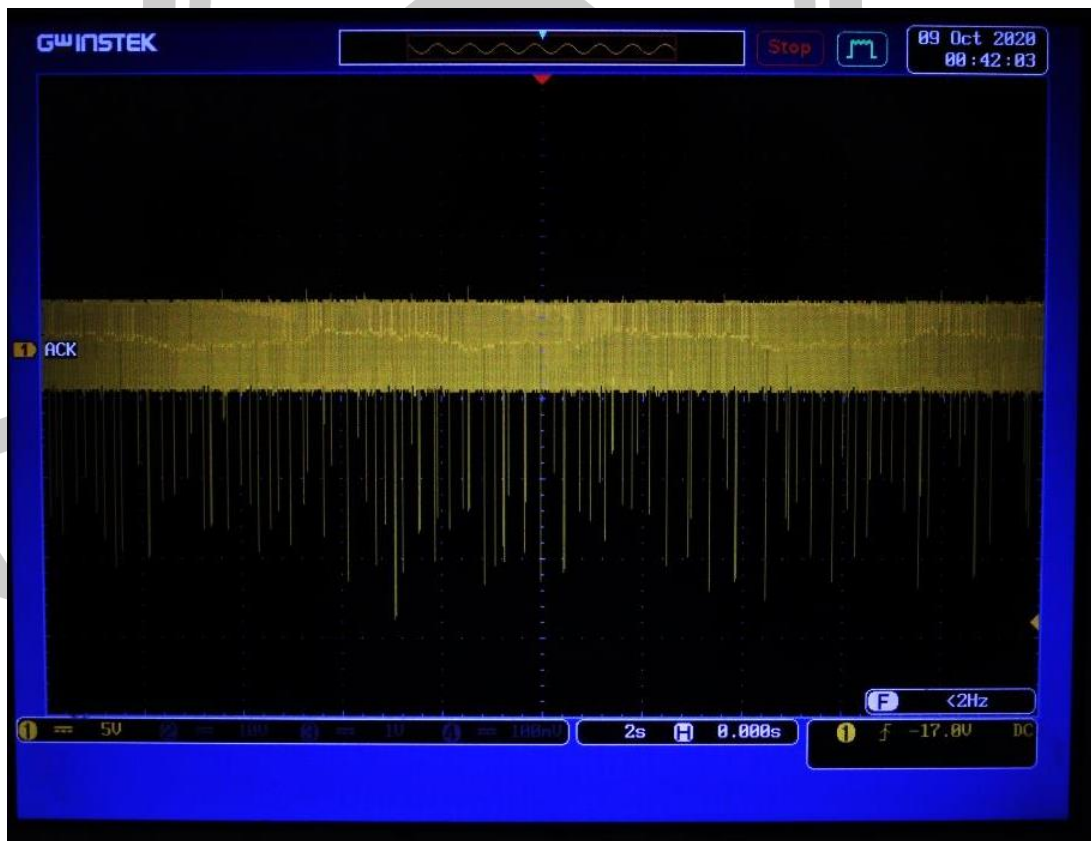
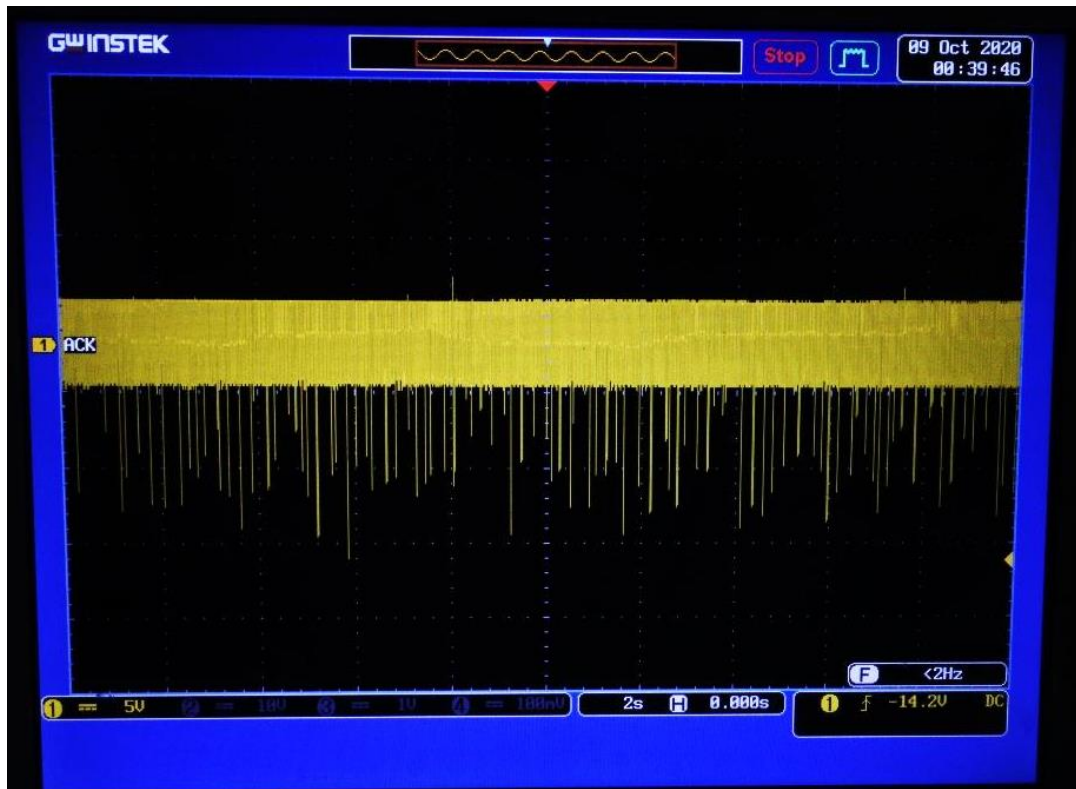
พุ่มนํ้า ปณฺ ทิโต ชีเว

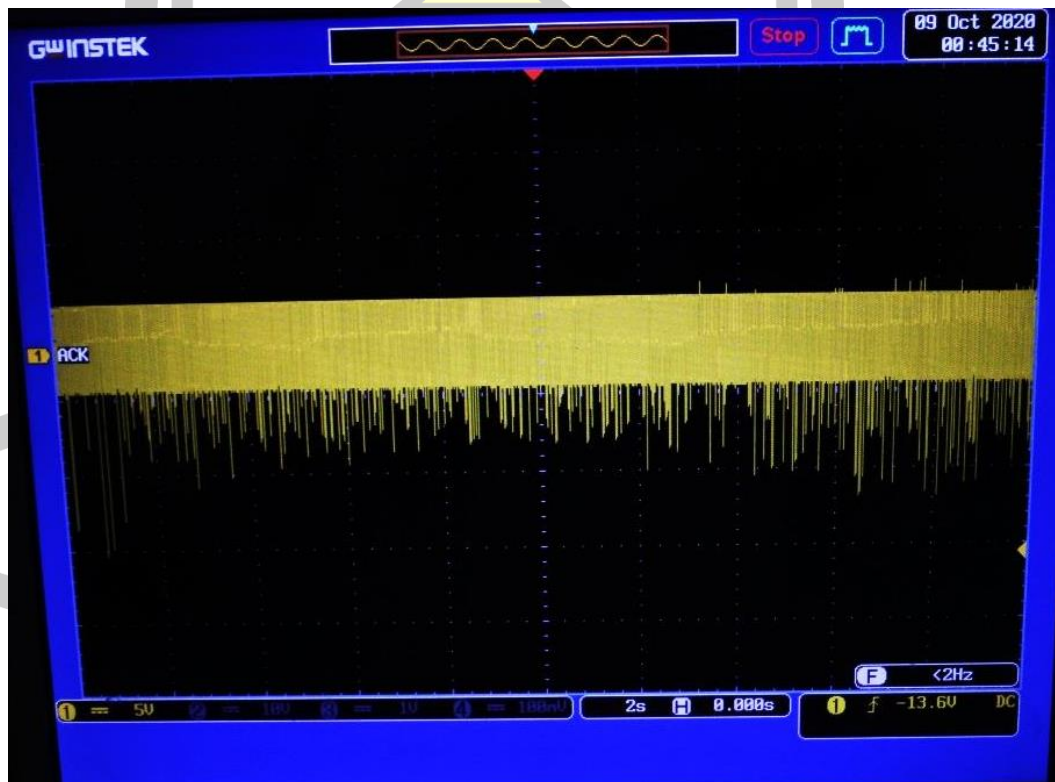
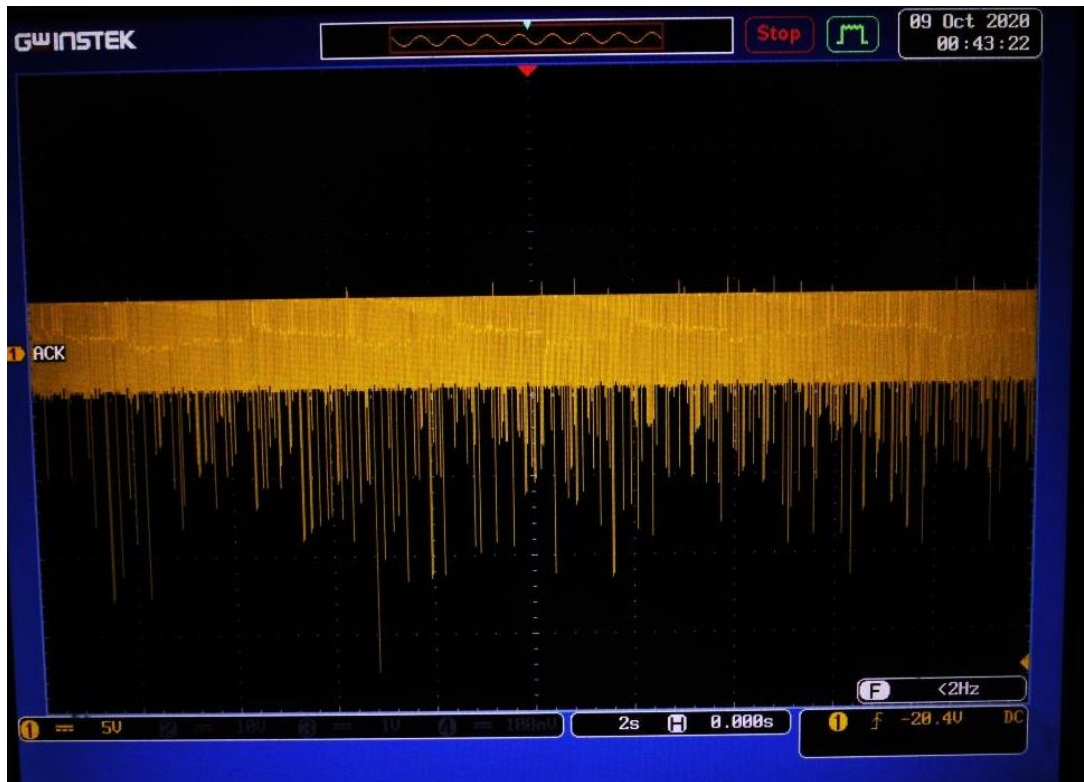


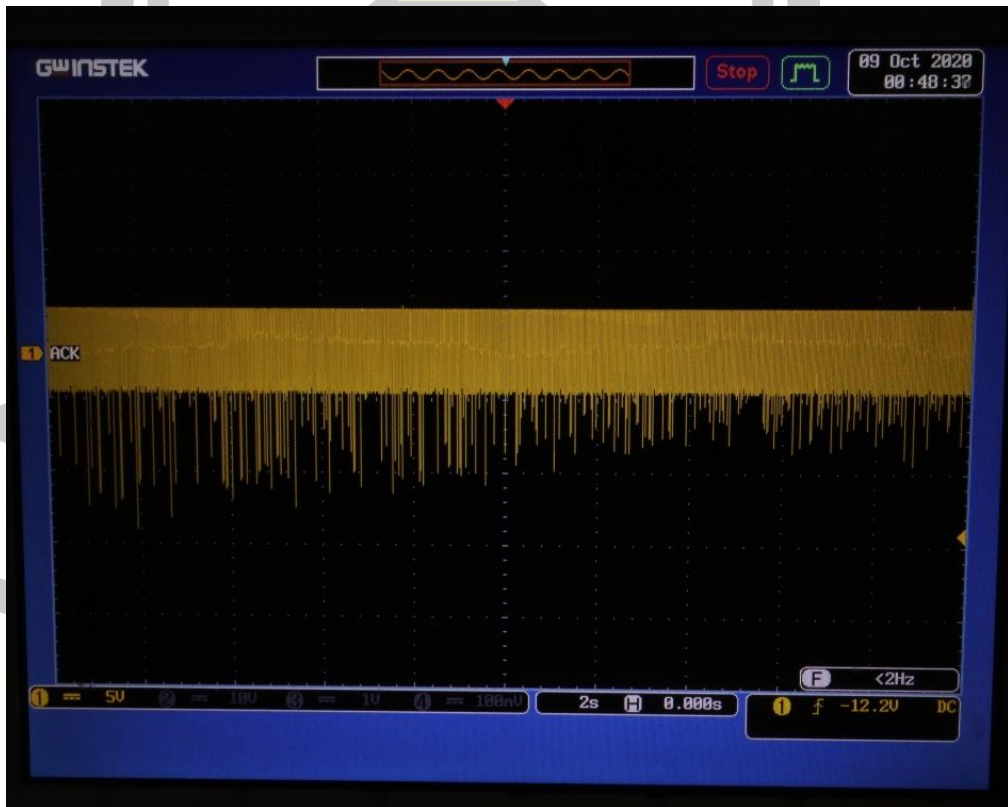
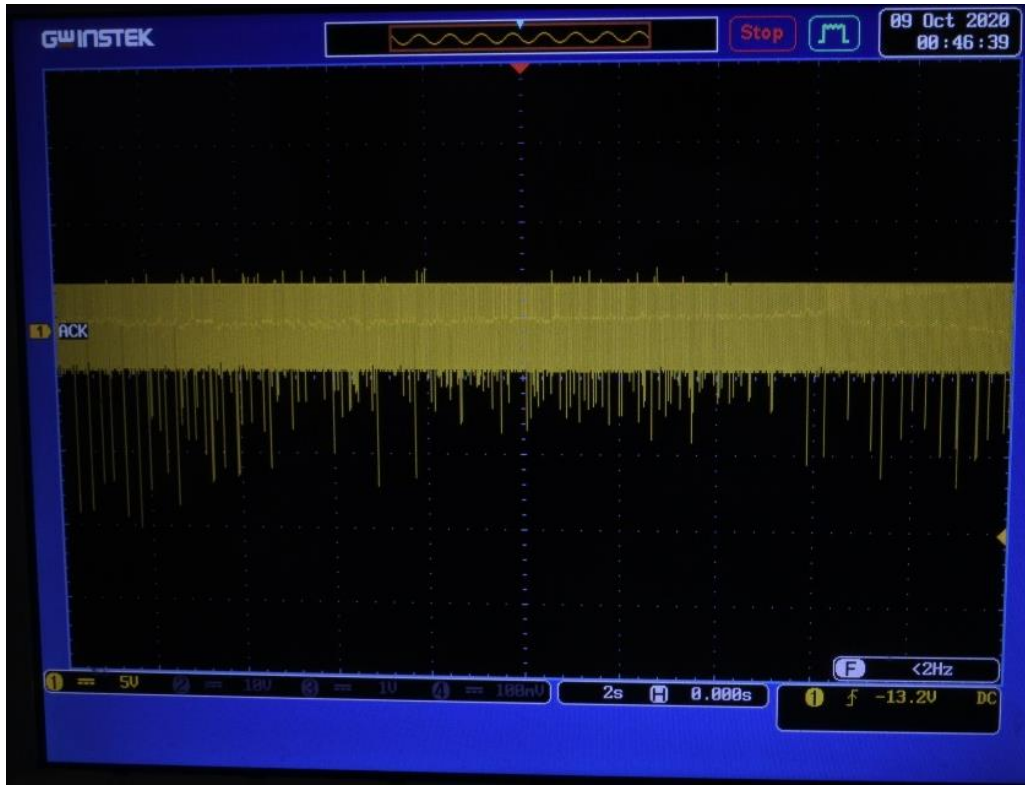
ภาคผนวก ก

ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งกราด

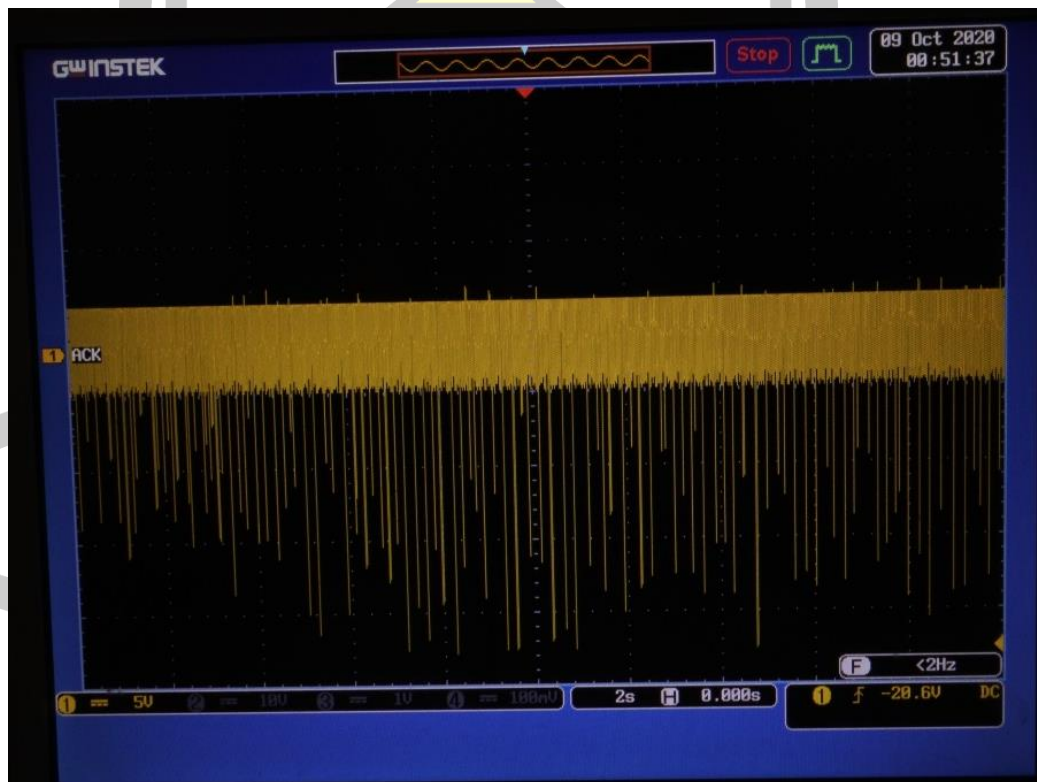
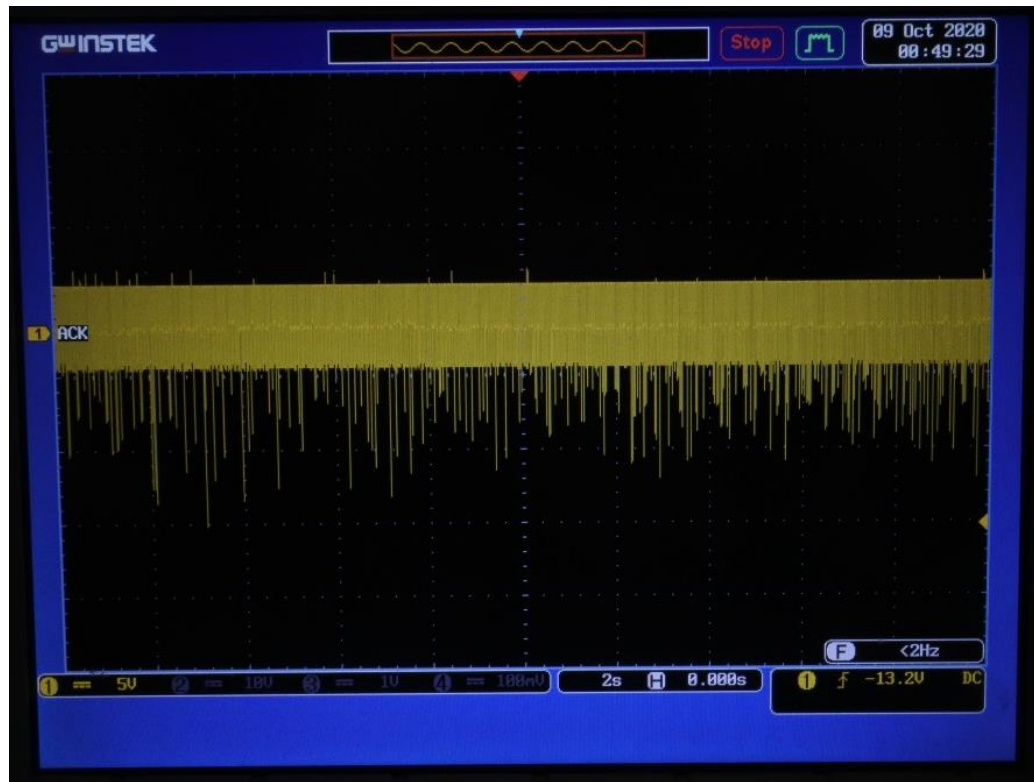
พหุจน์ ปณฺ ทิโต ชีเว

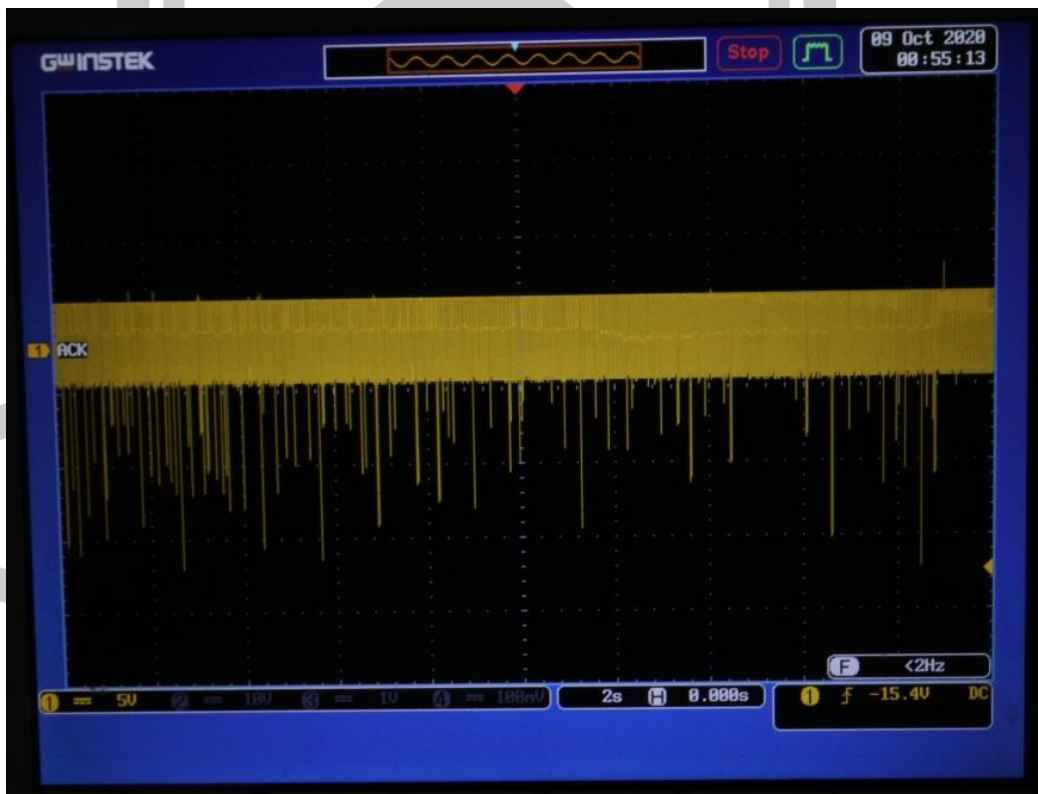
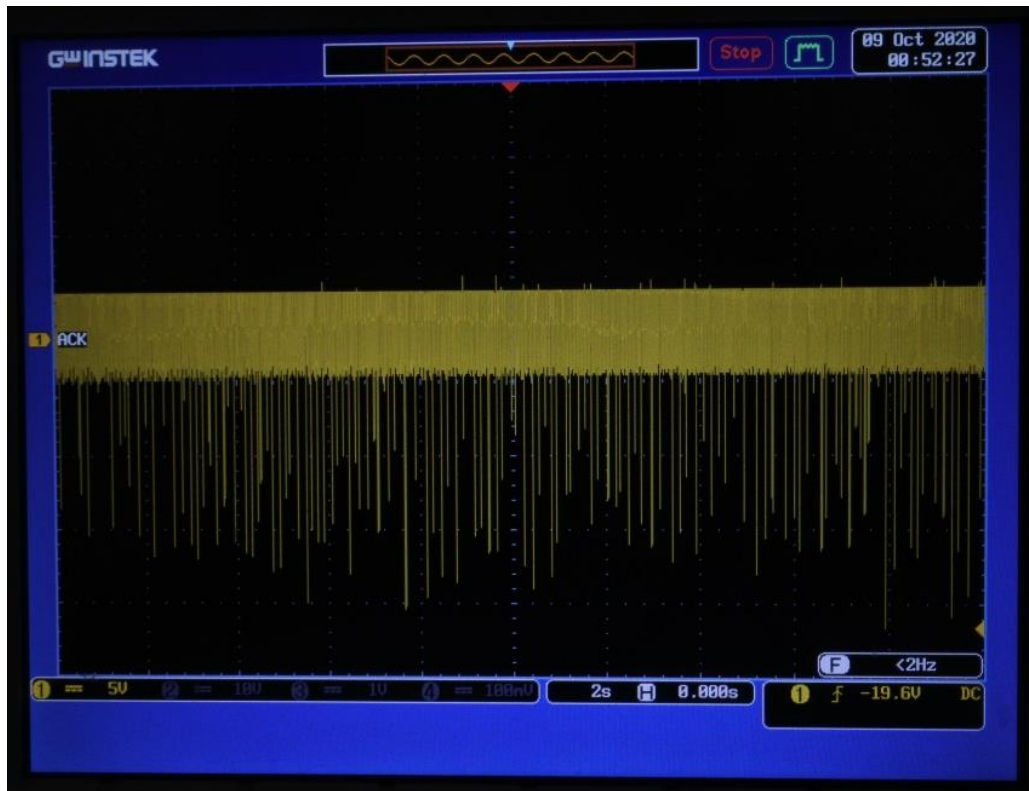




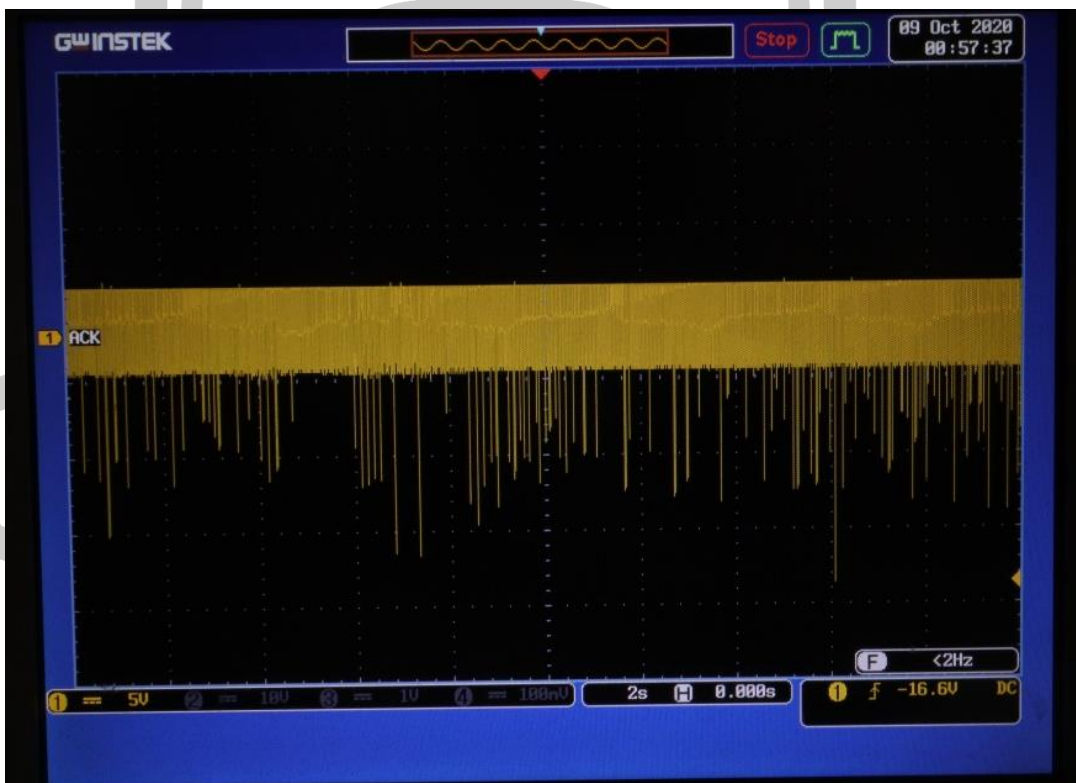
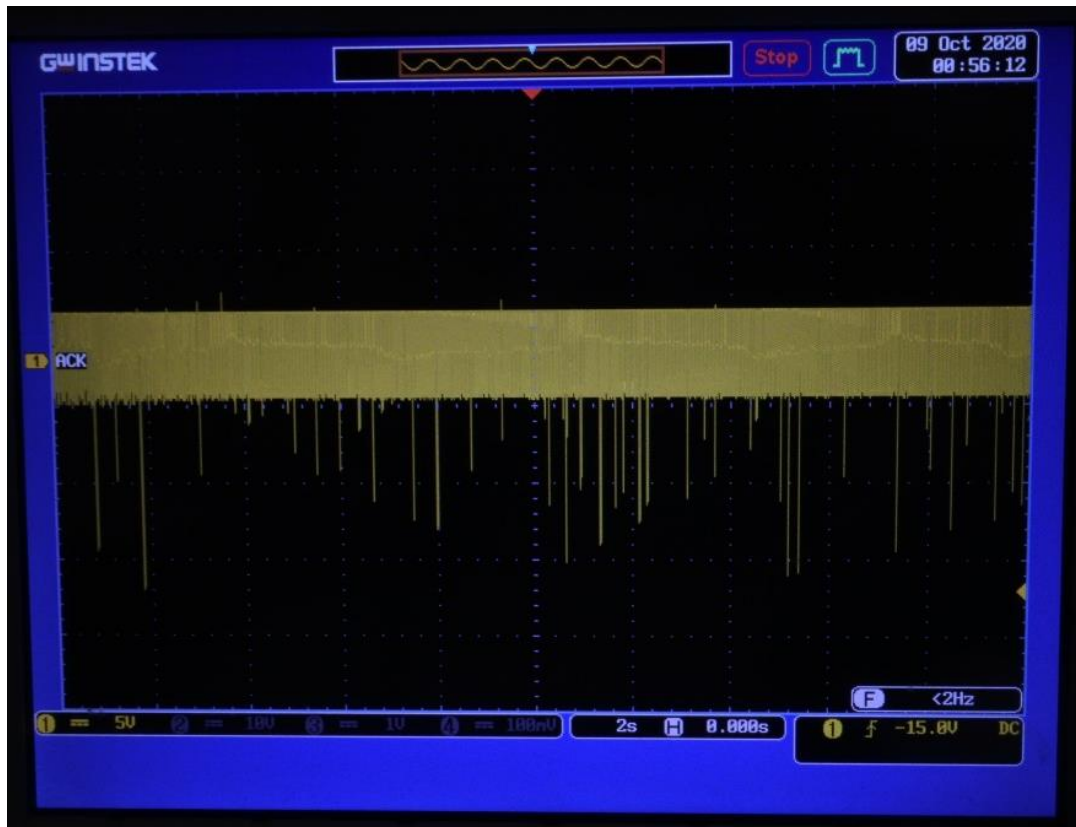


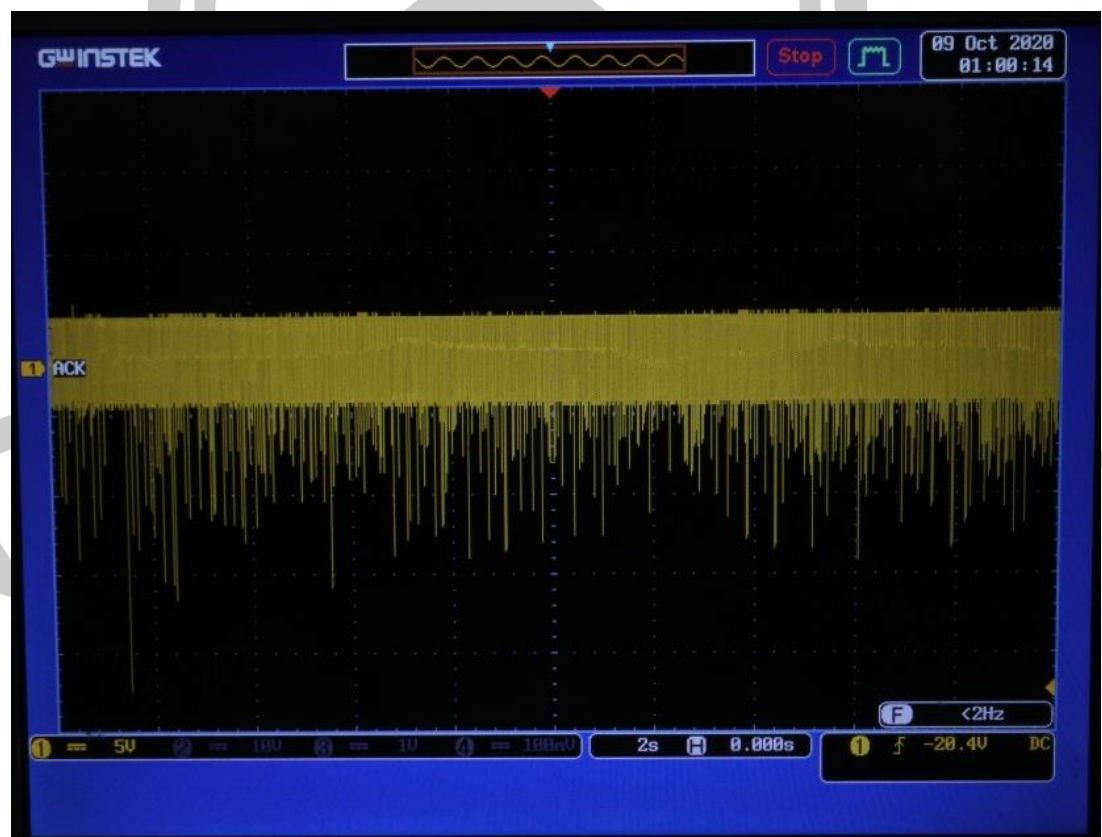
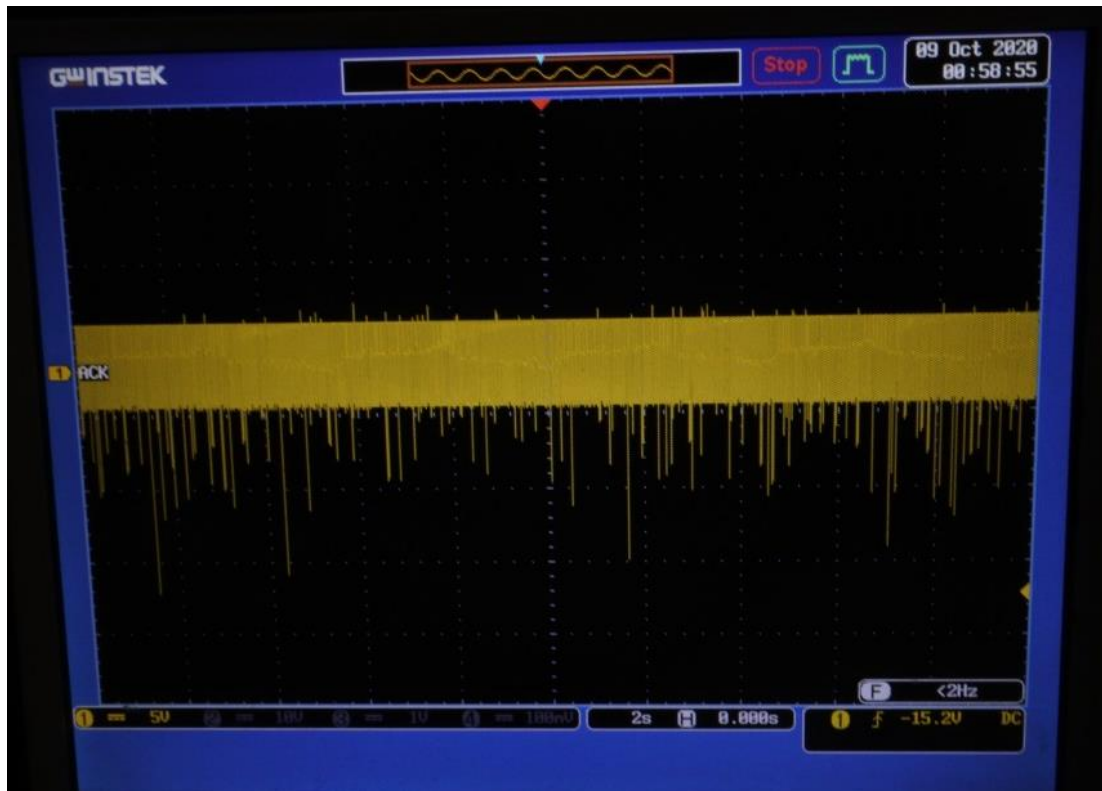


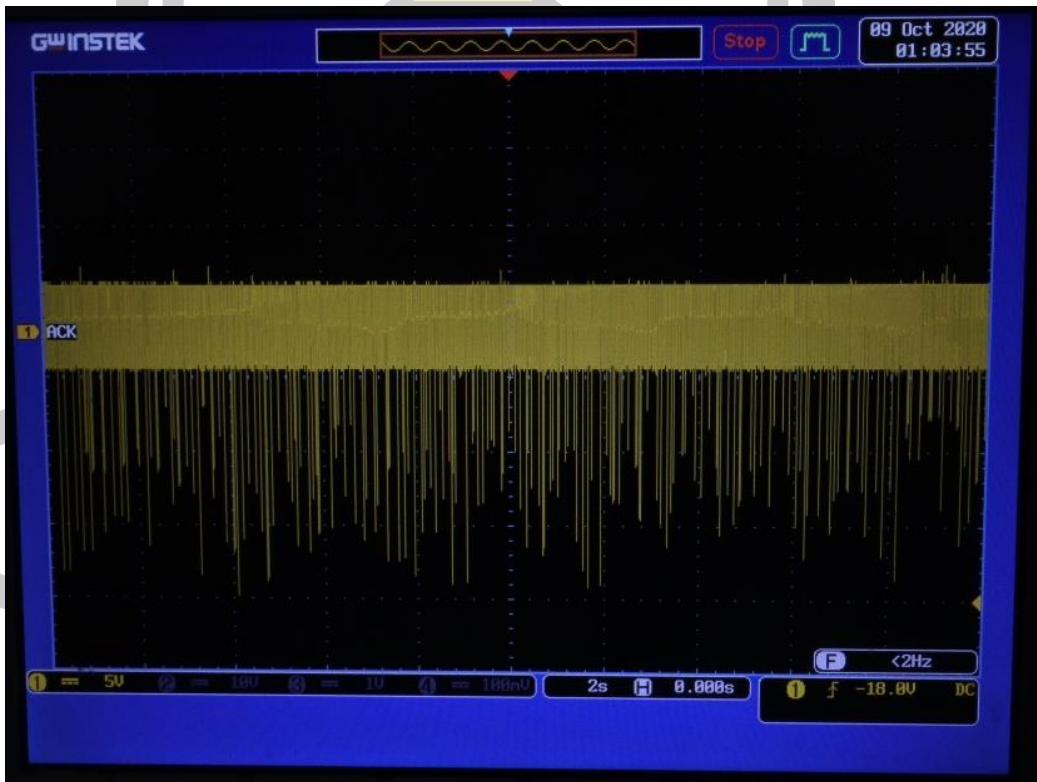
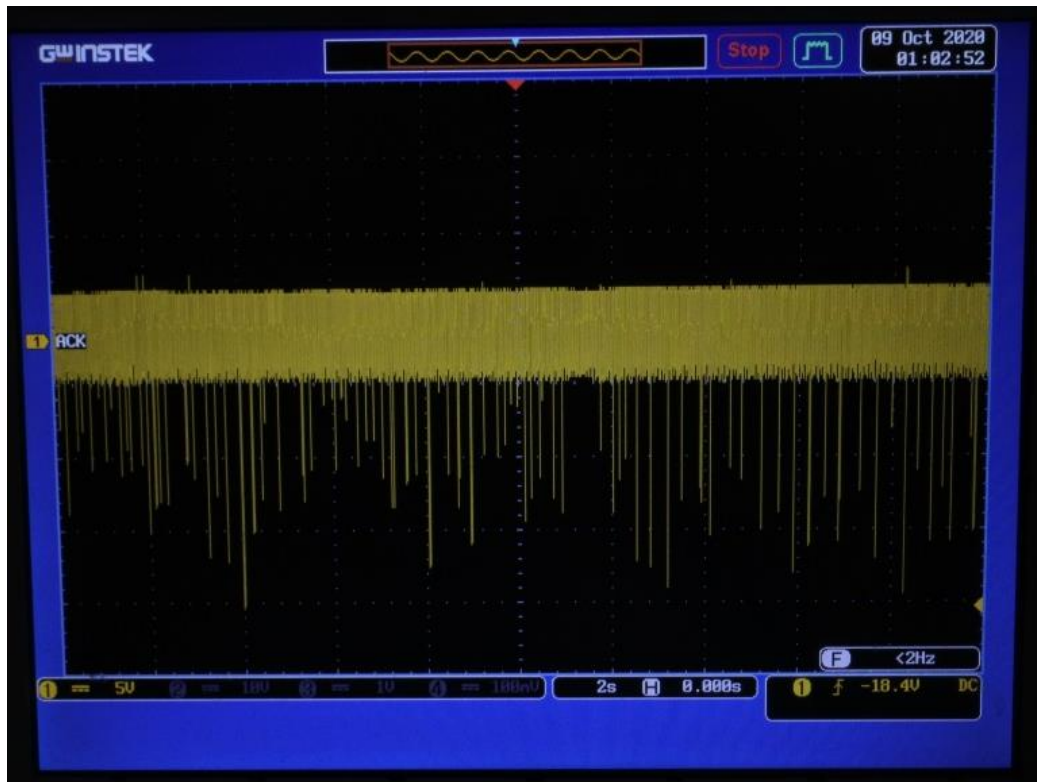


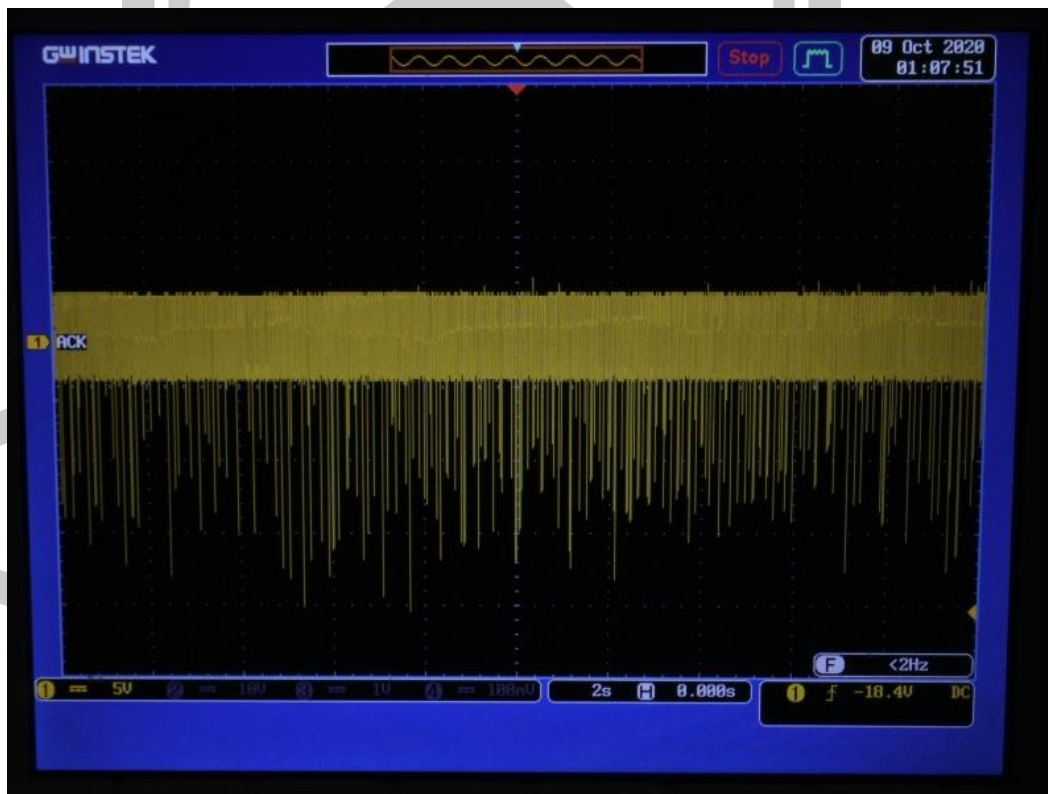
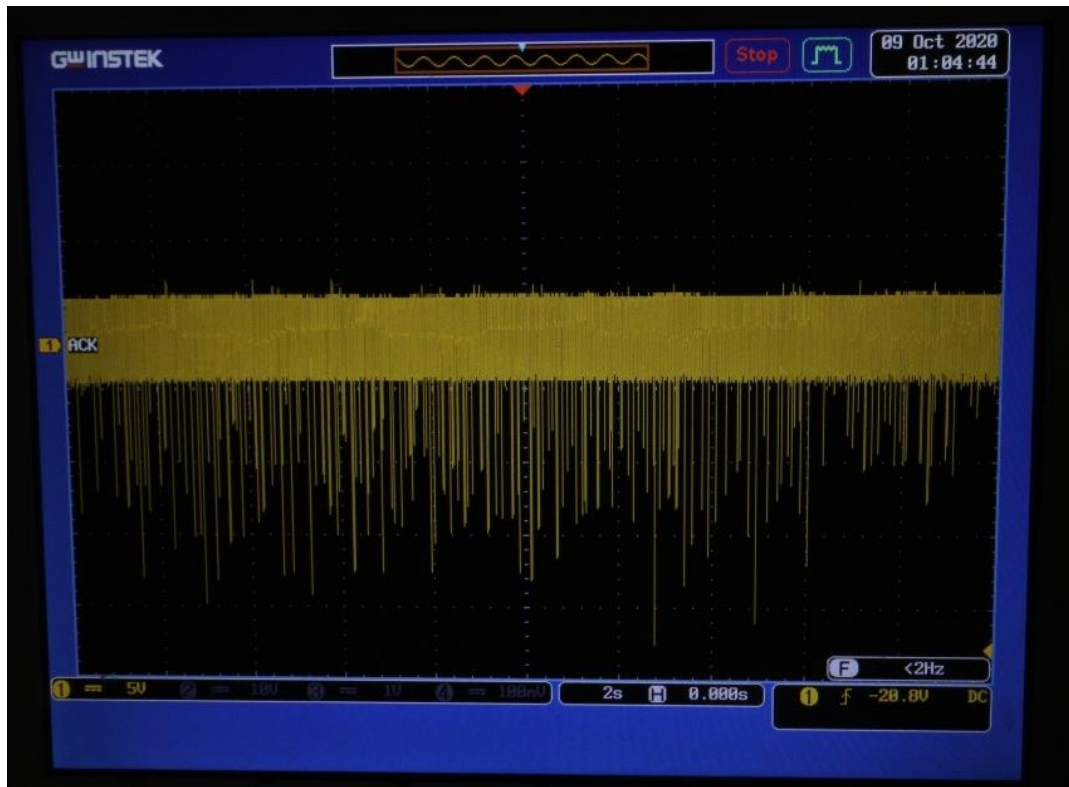




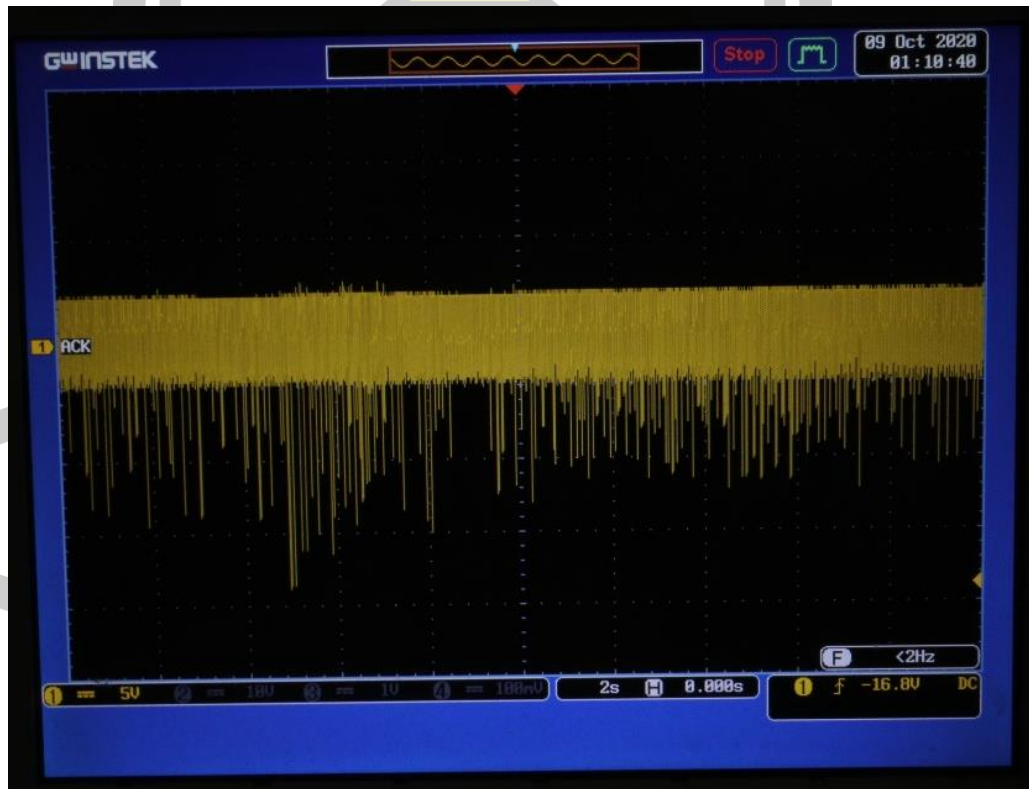
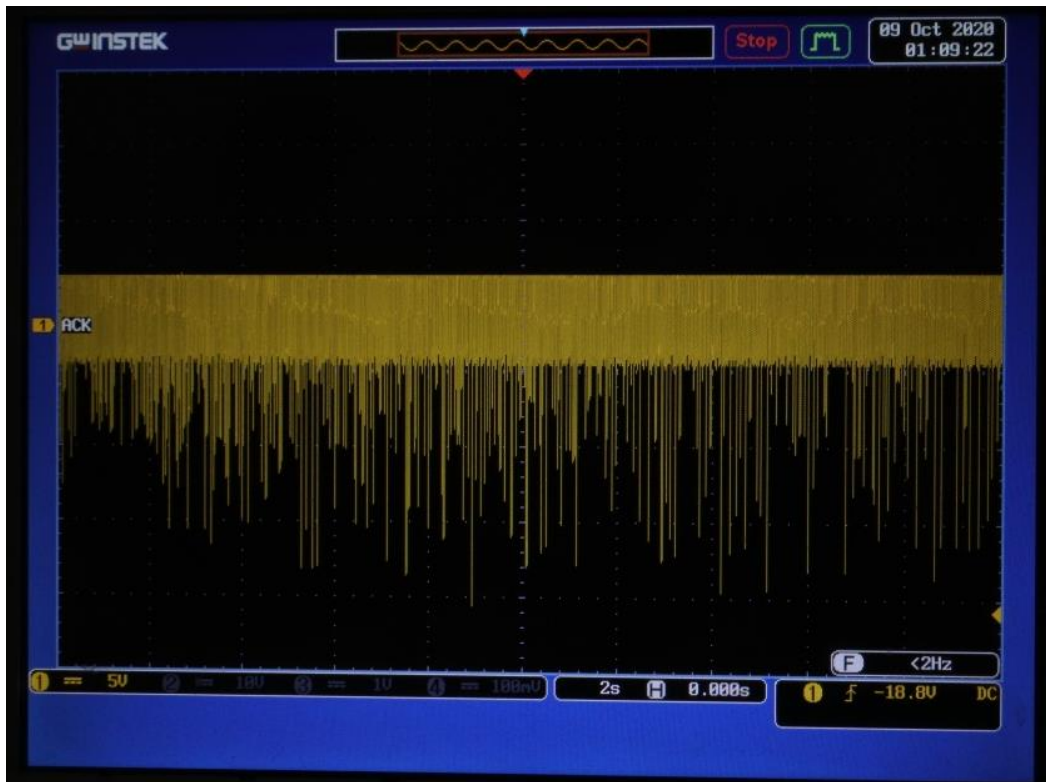


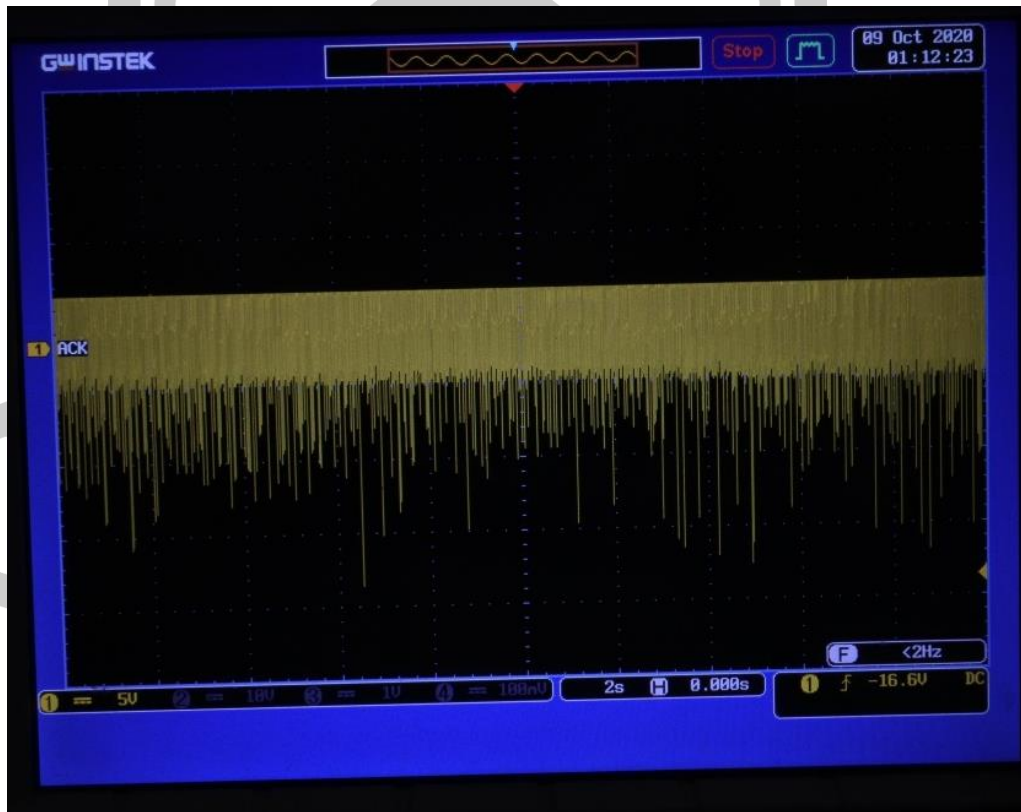
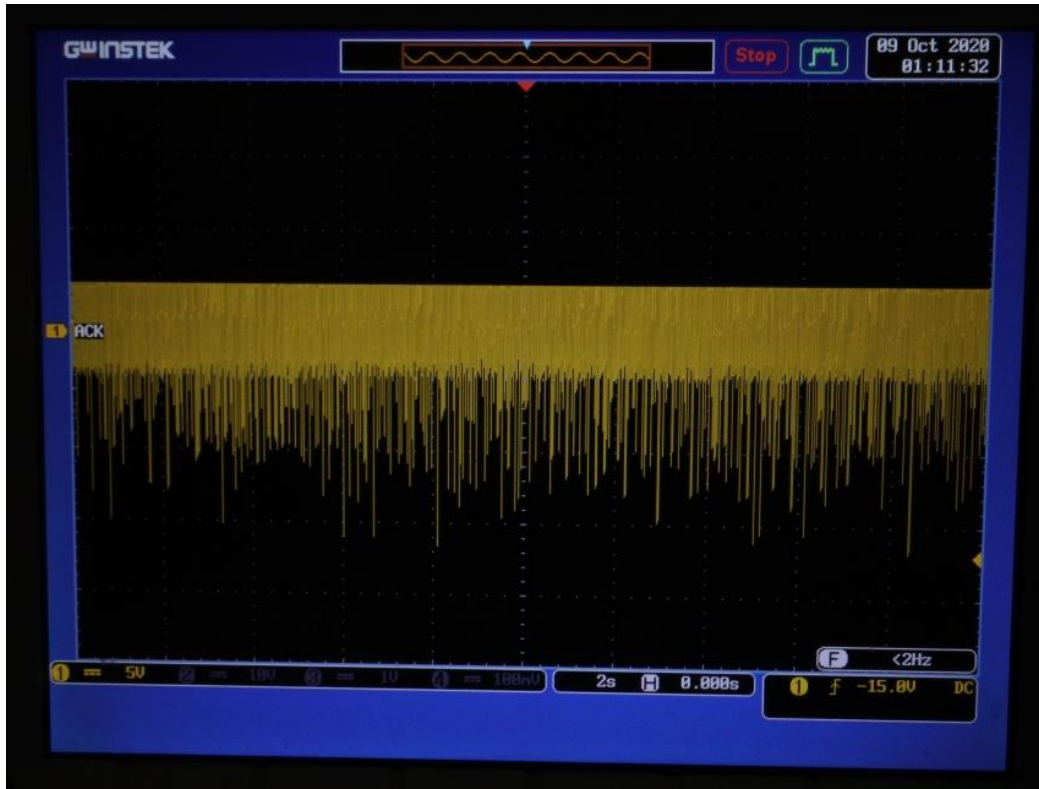


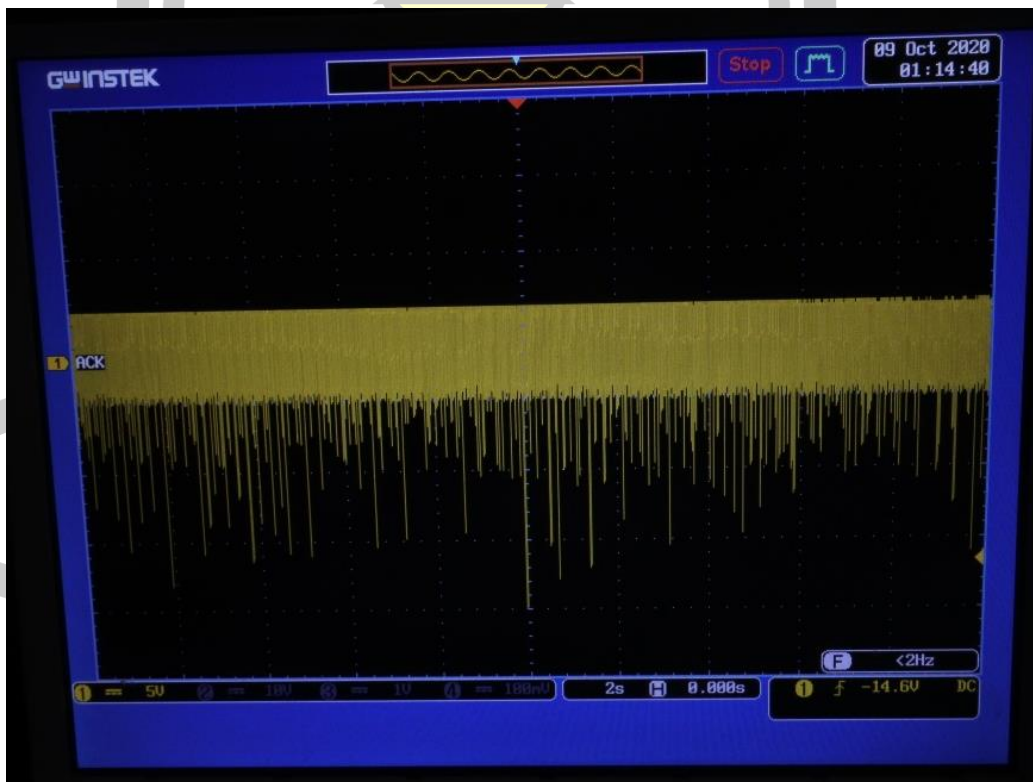
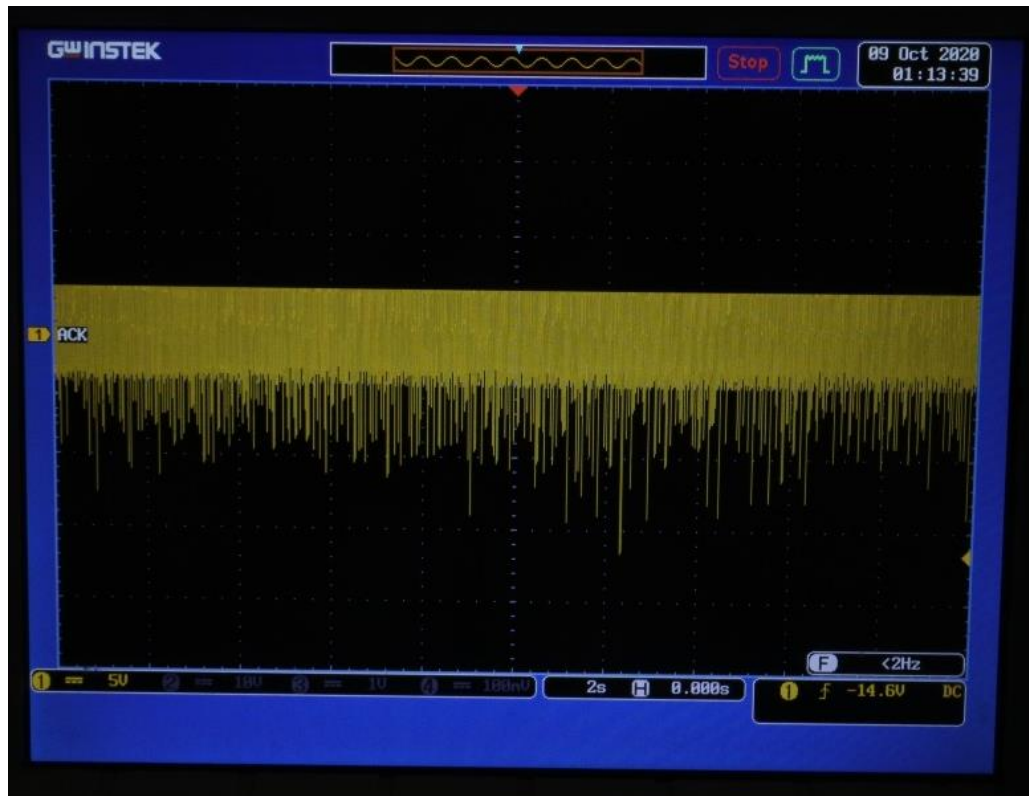




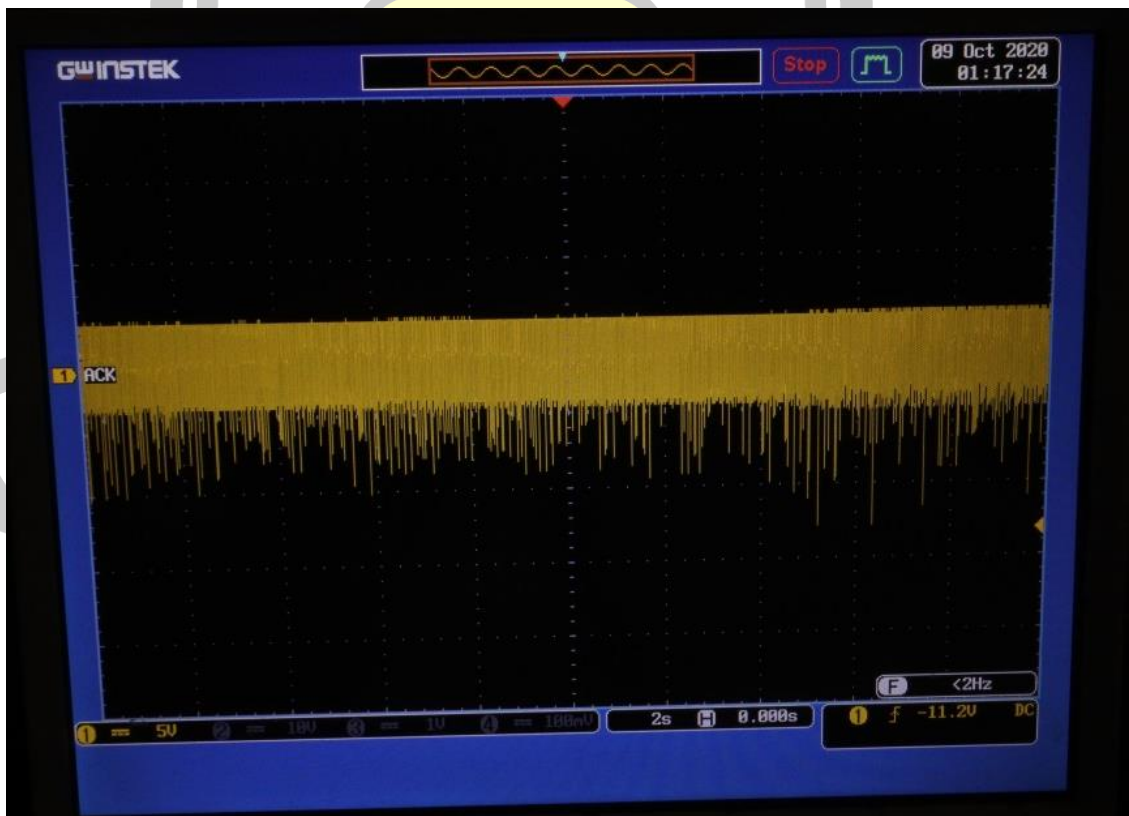
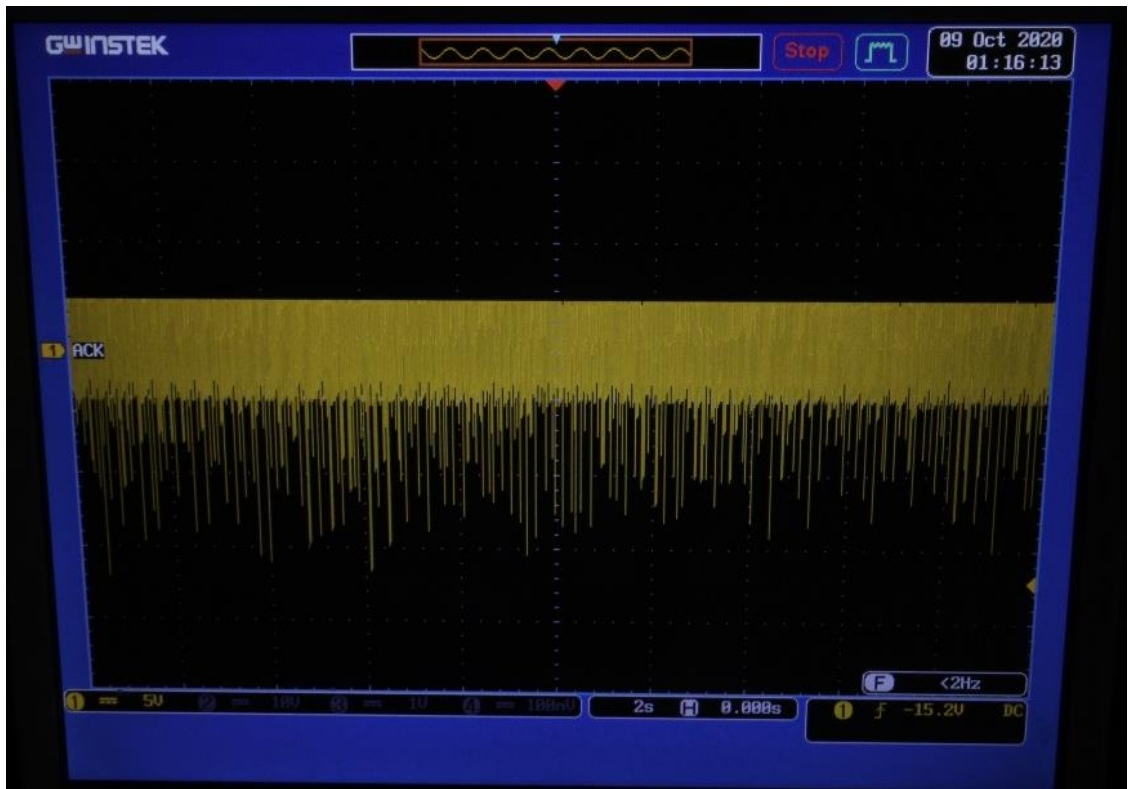


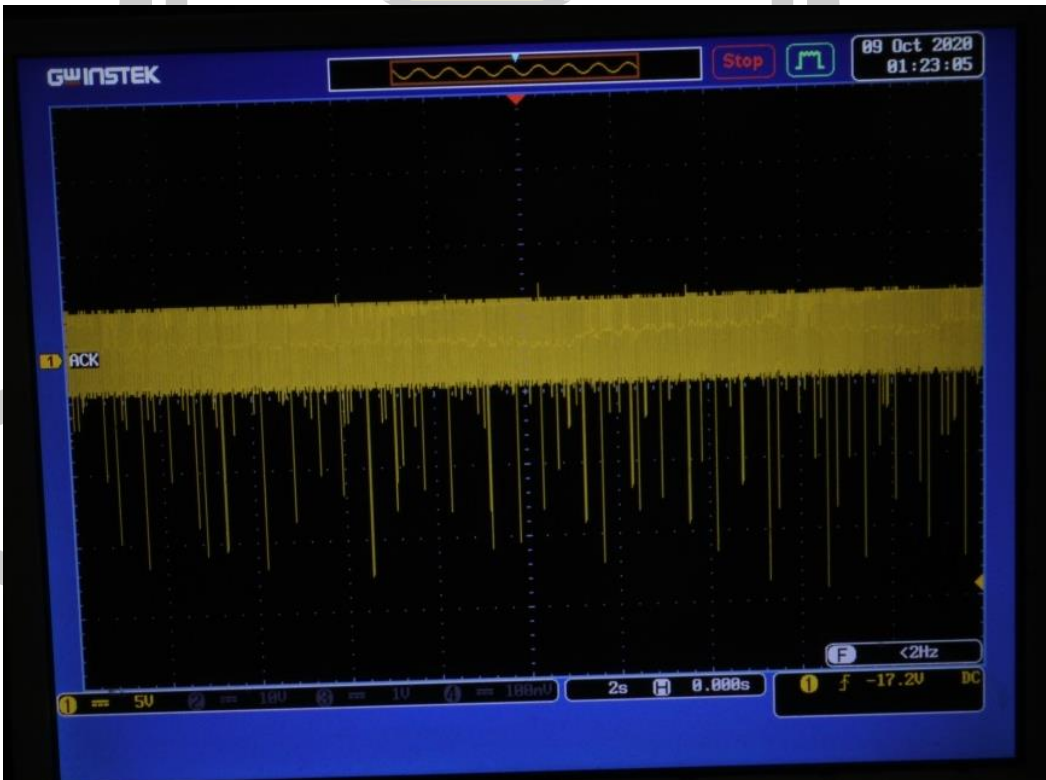
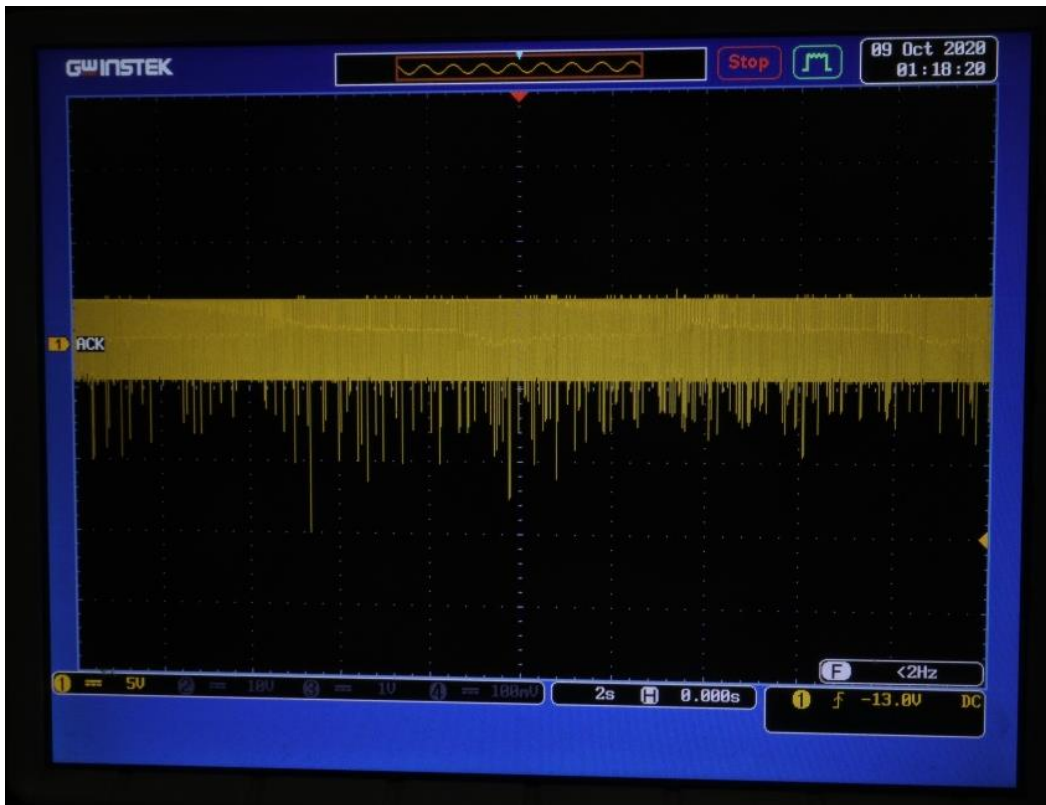


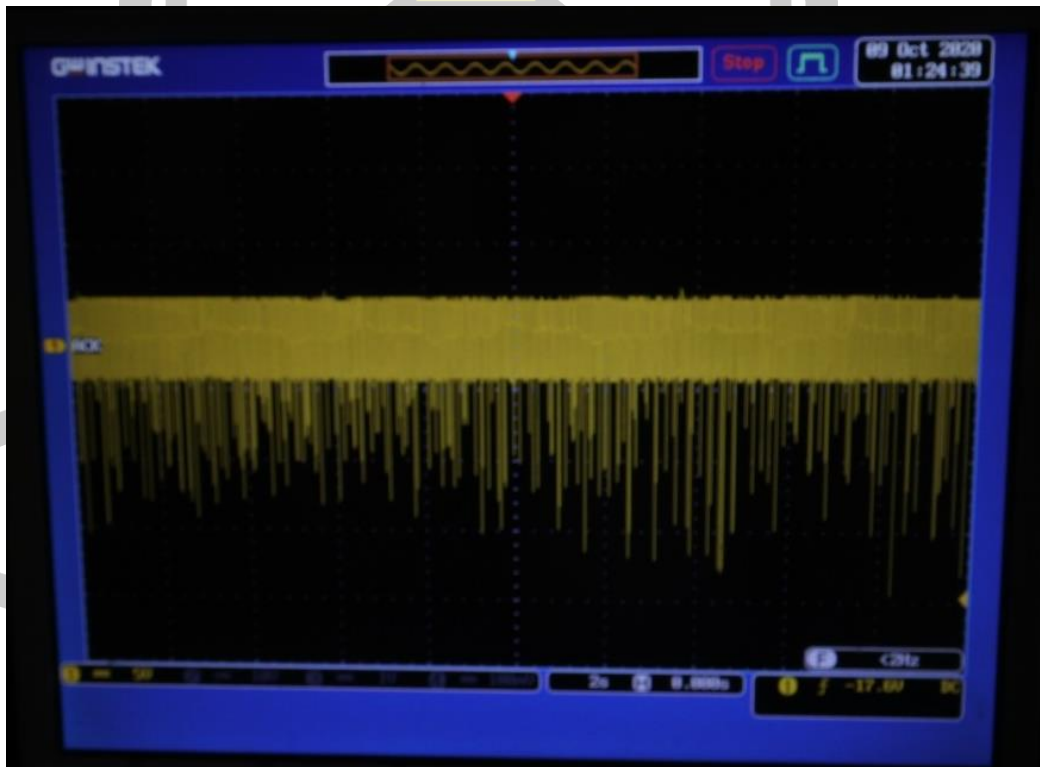
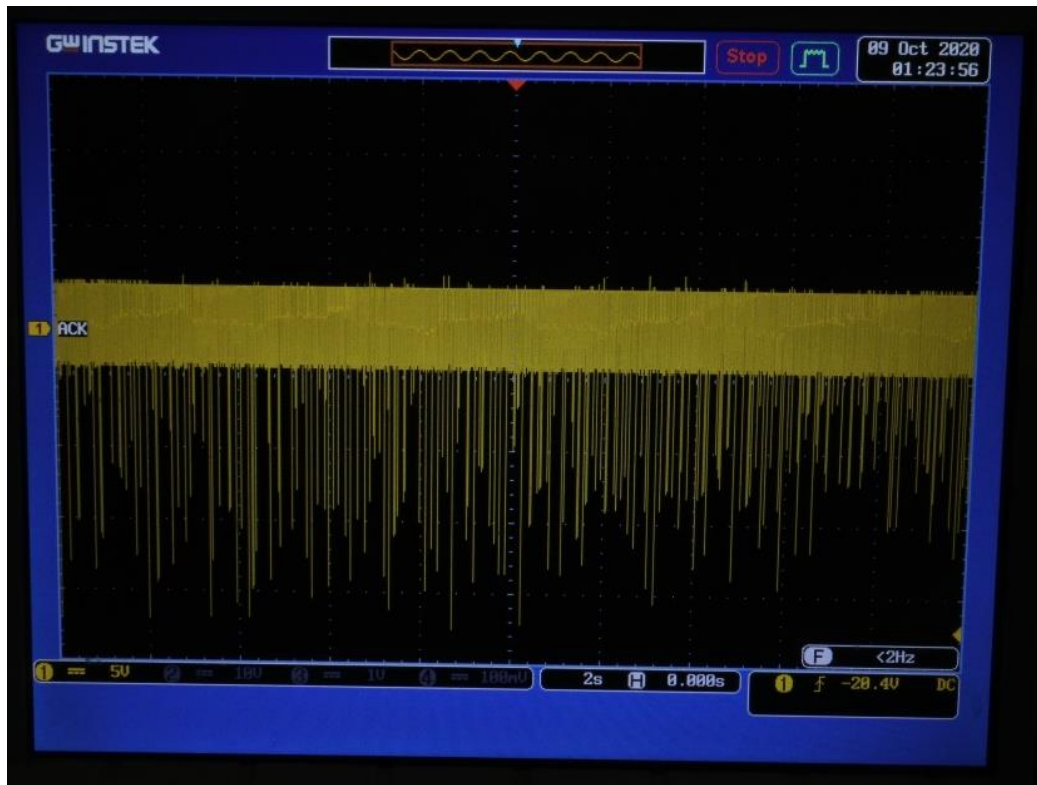


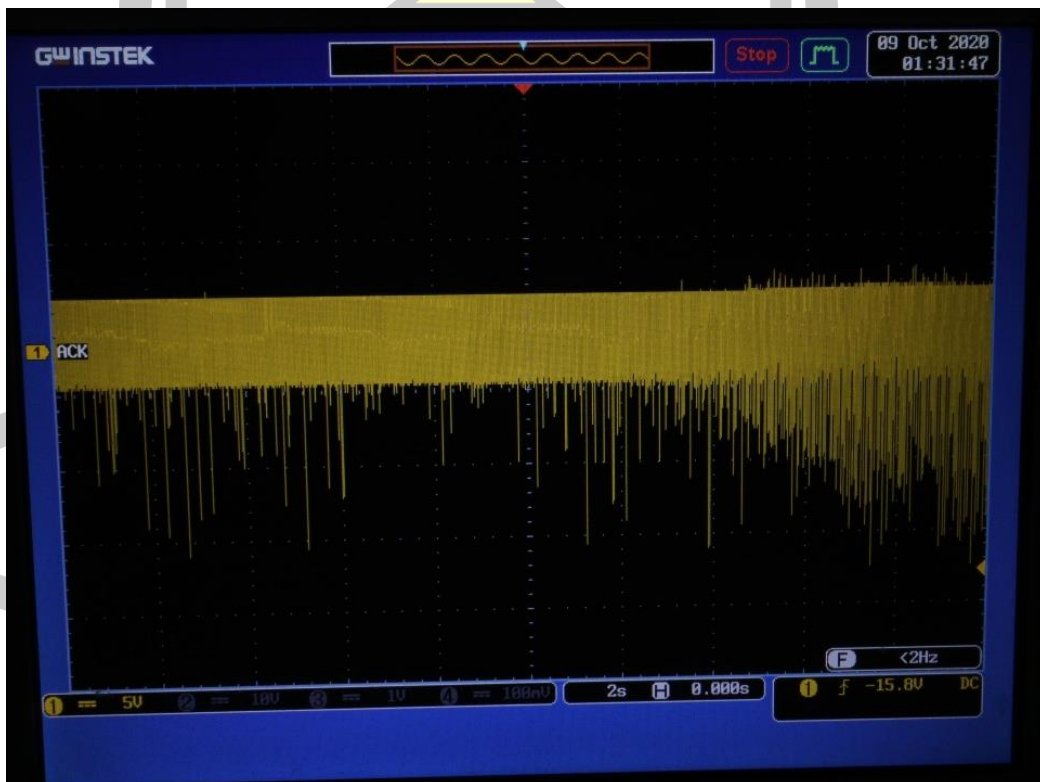
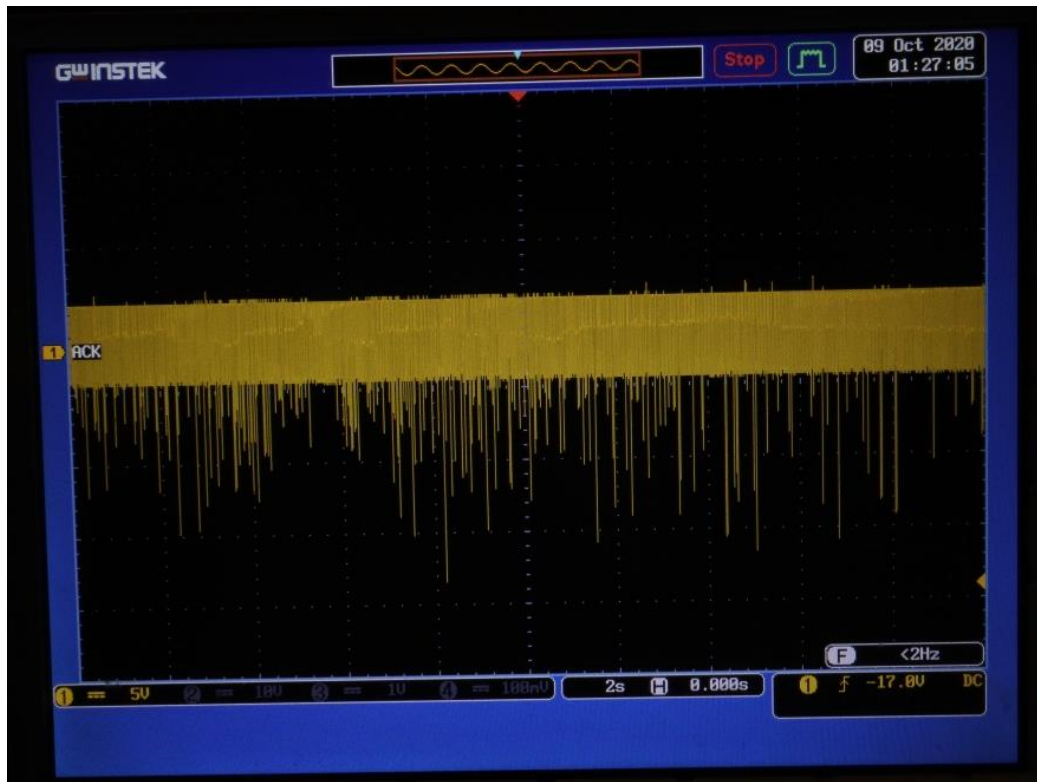




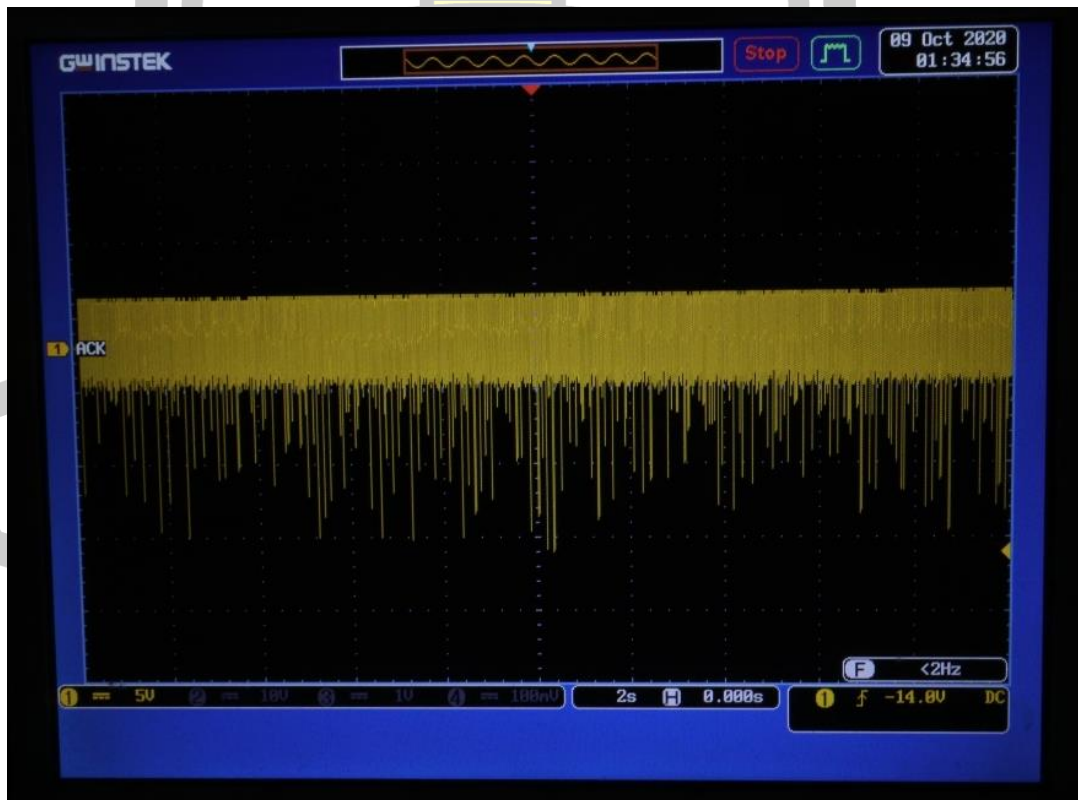
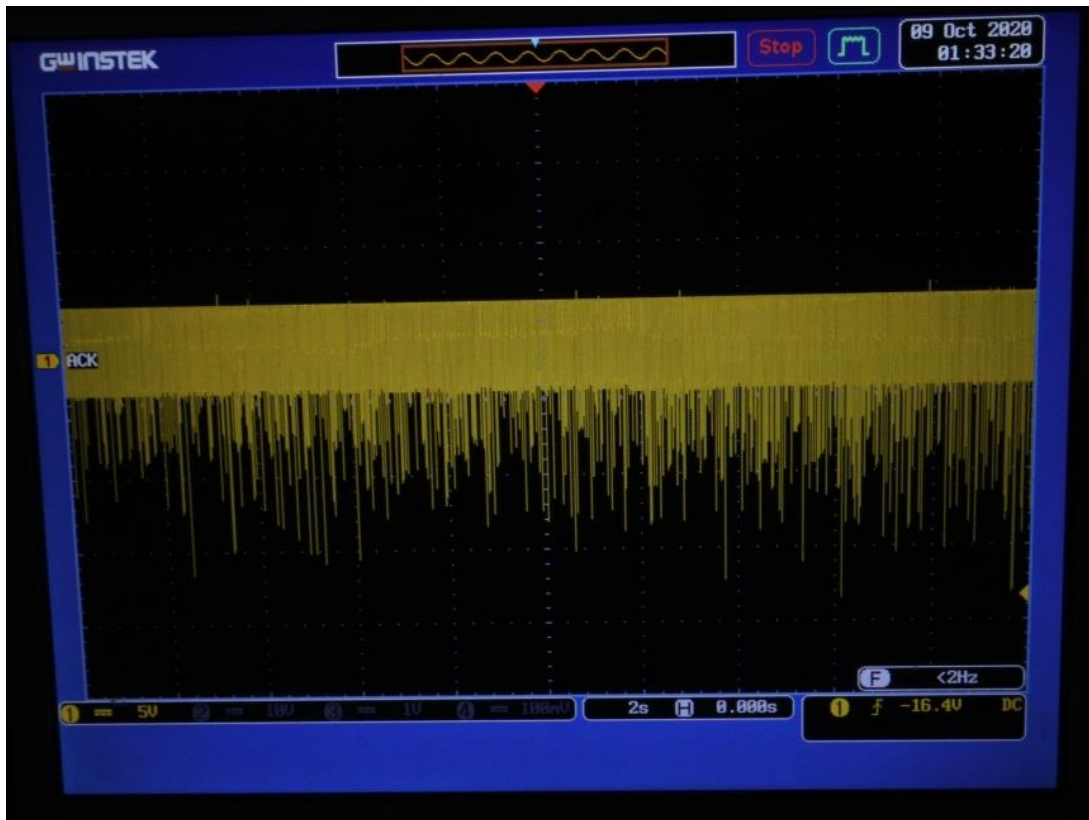


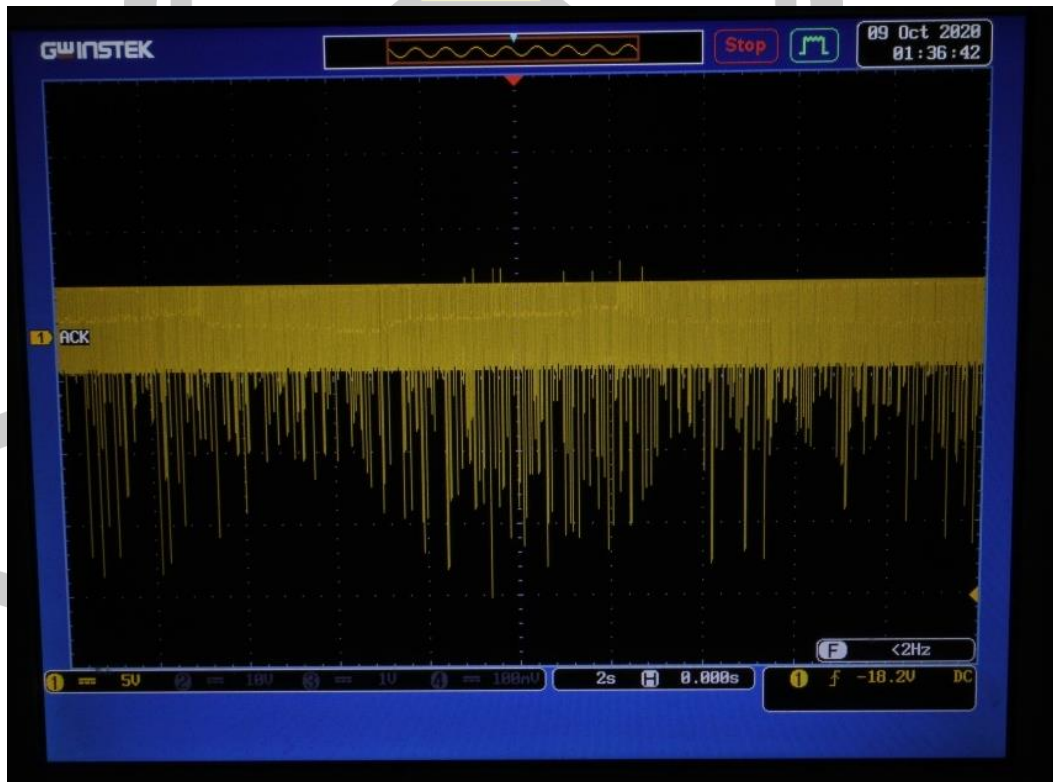
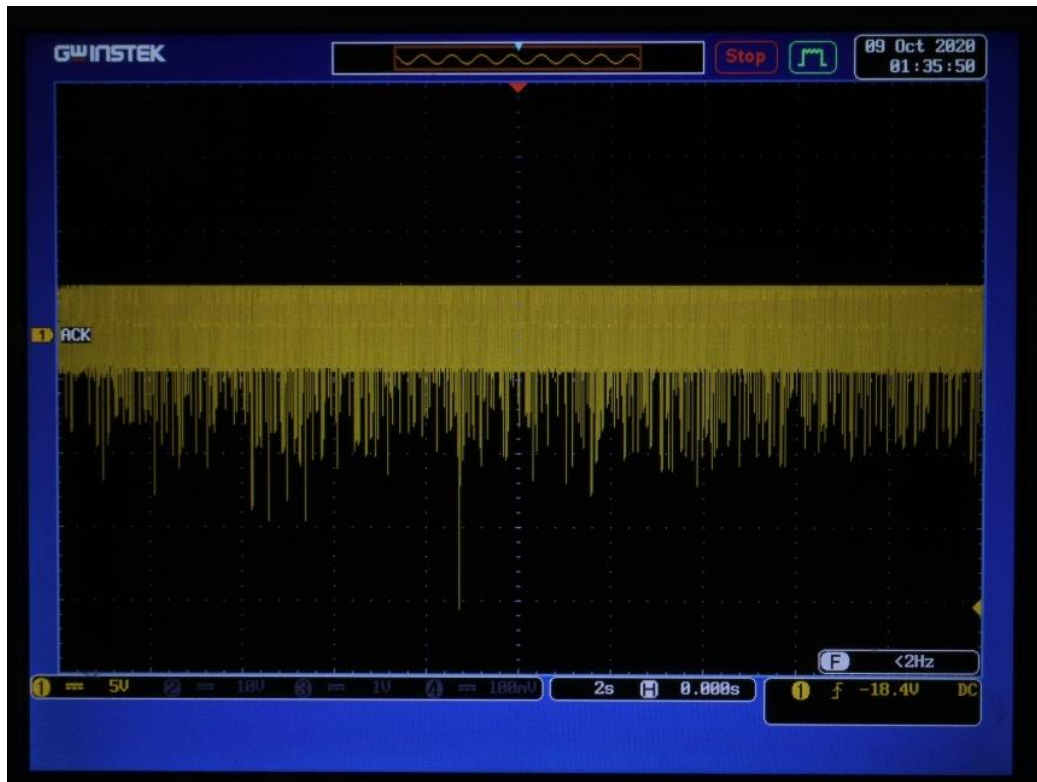


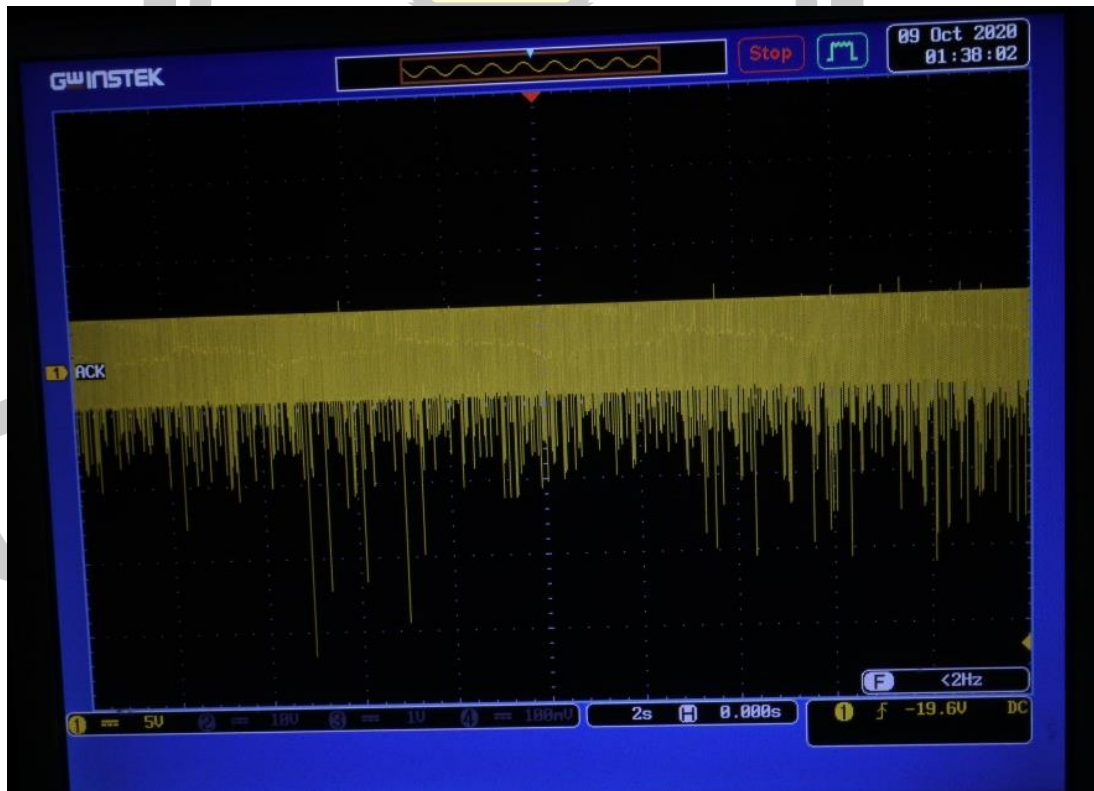
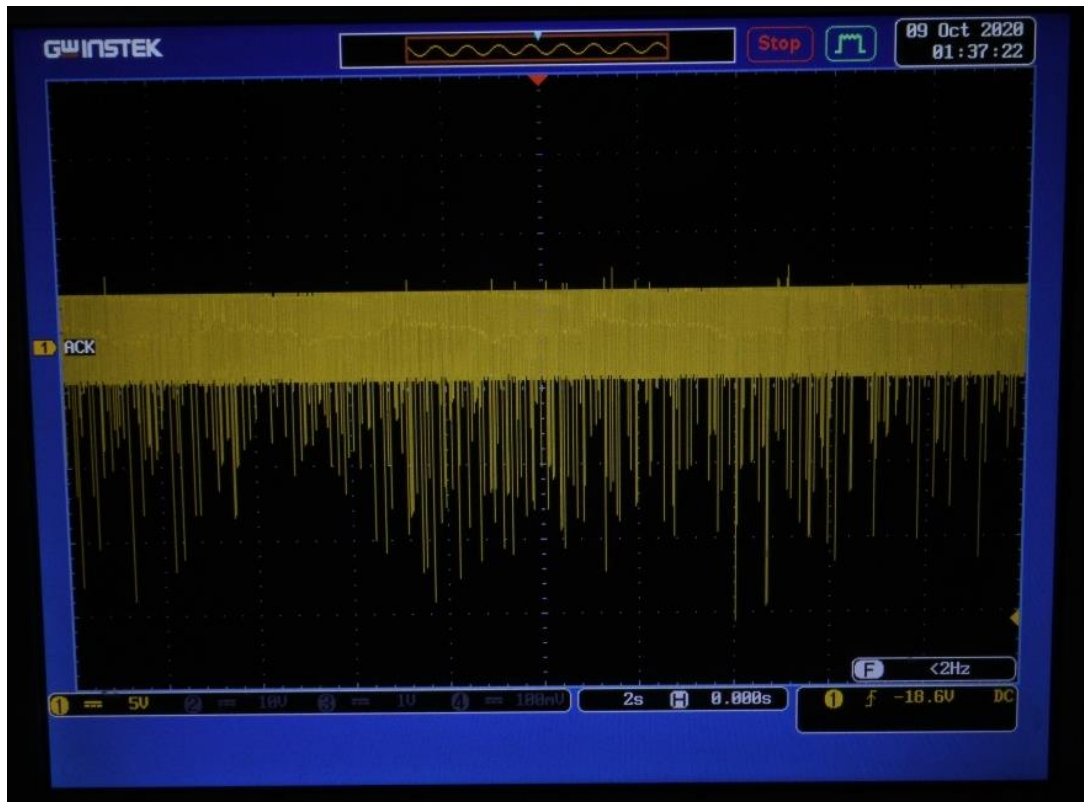




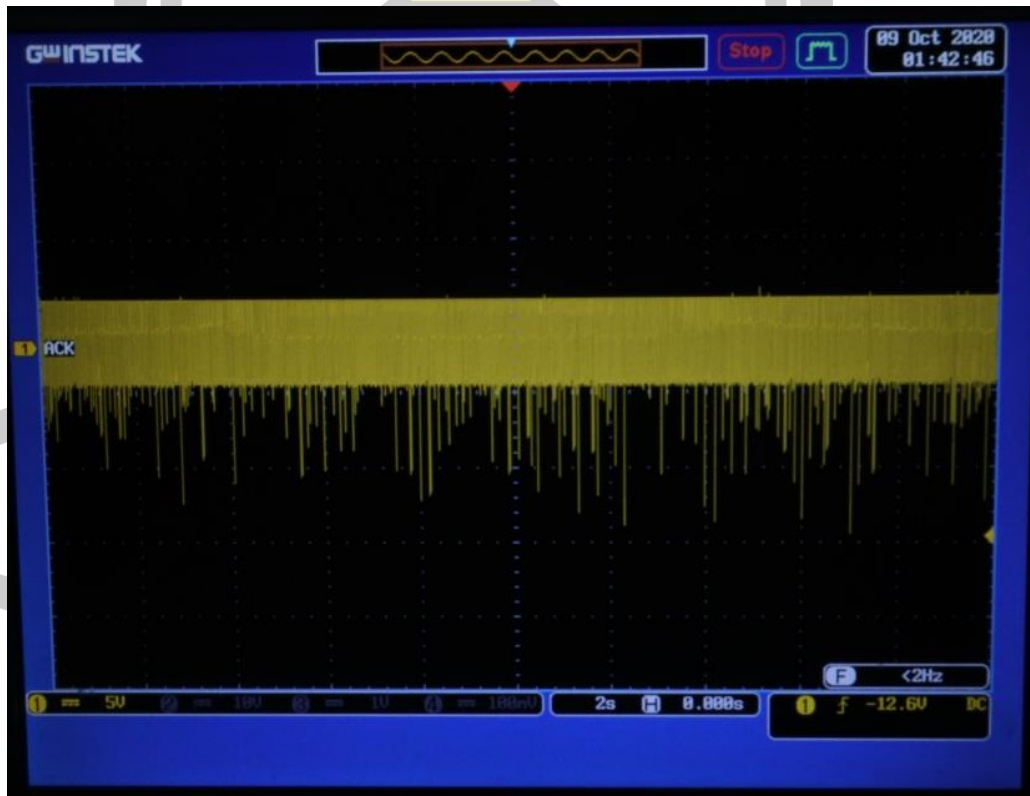
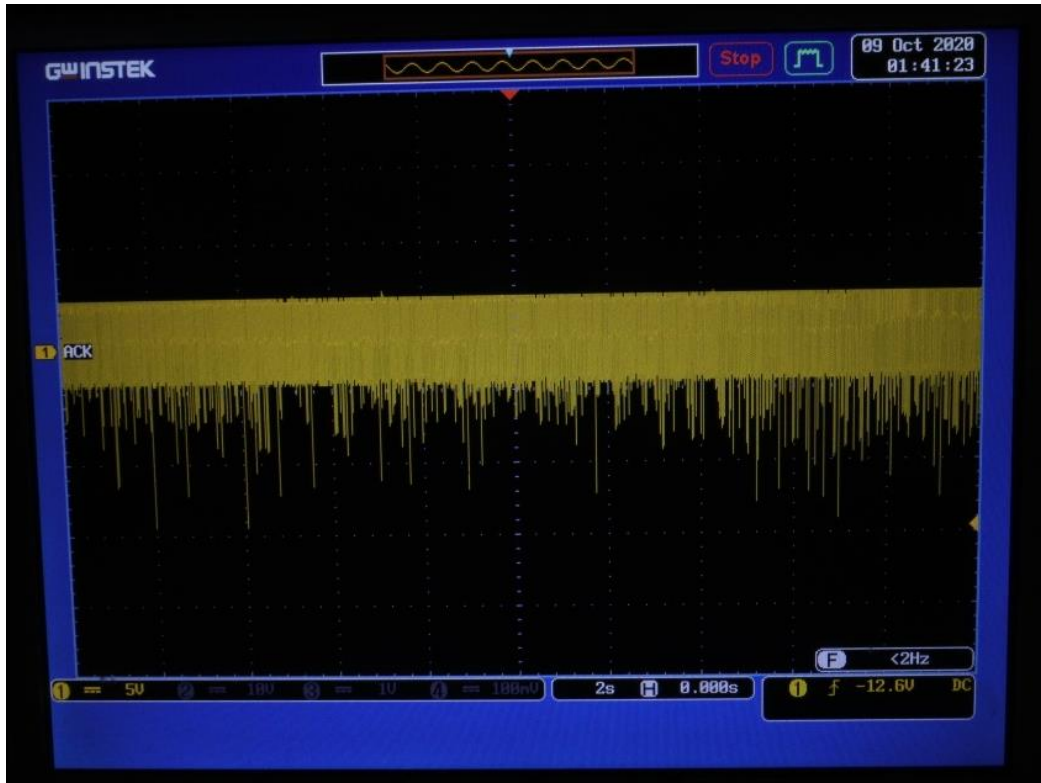










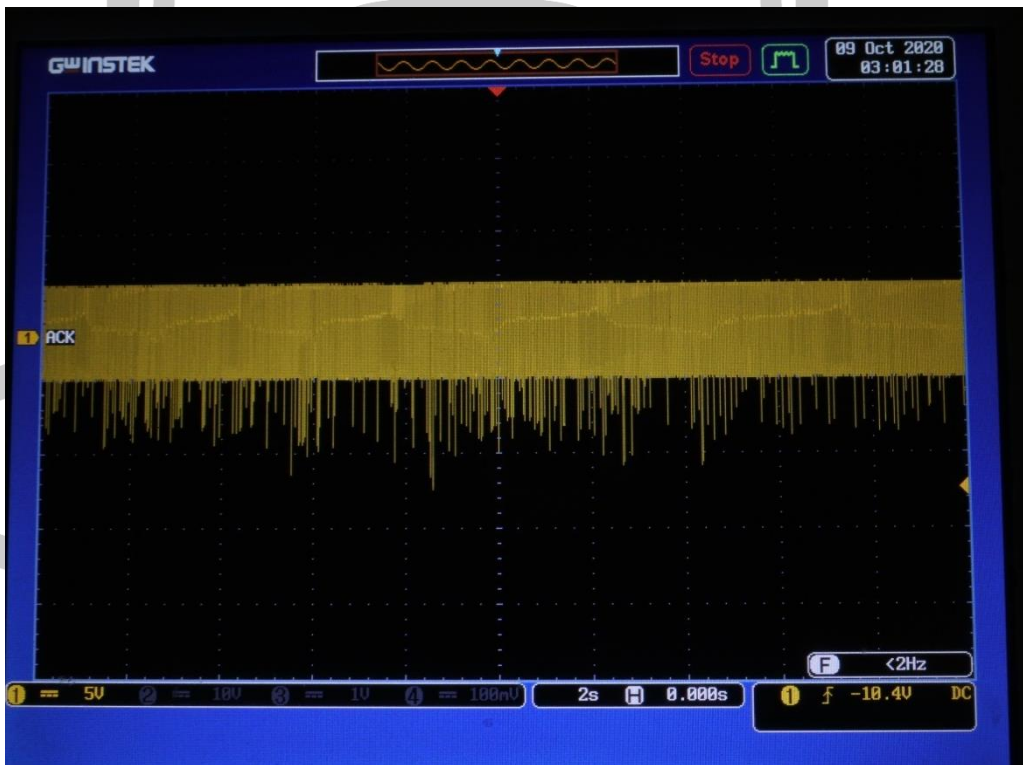
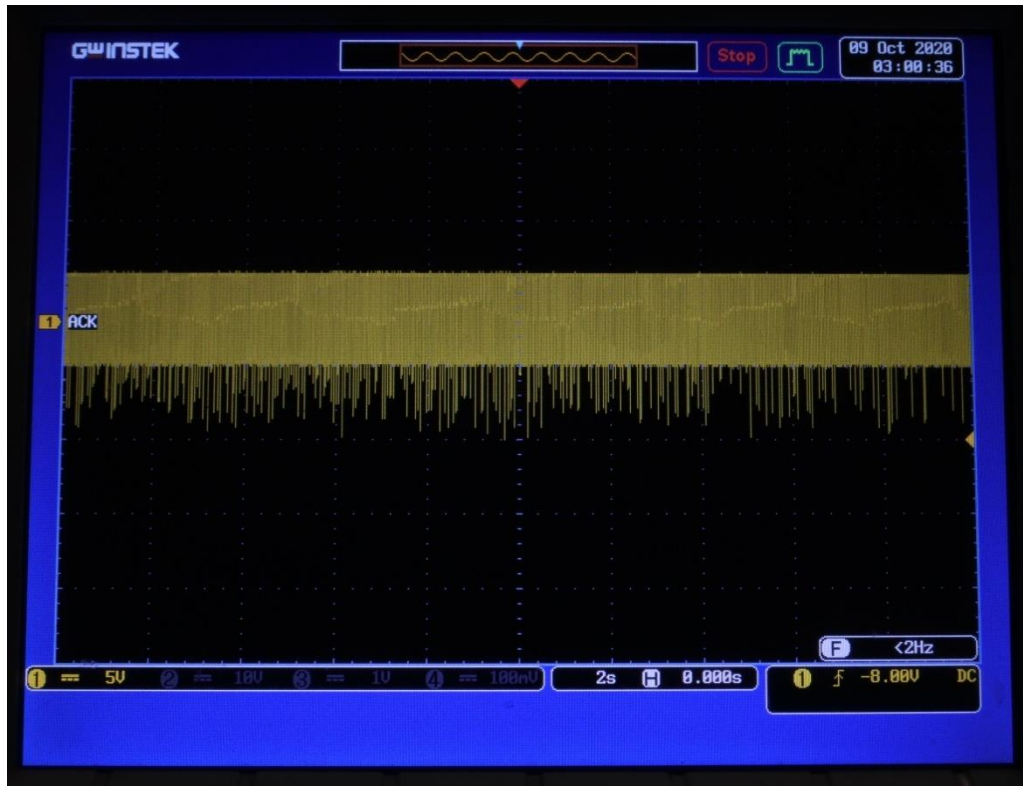


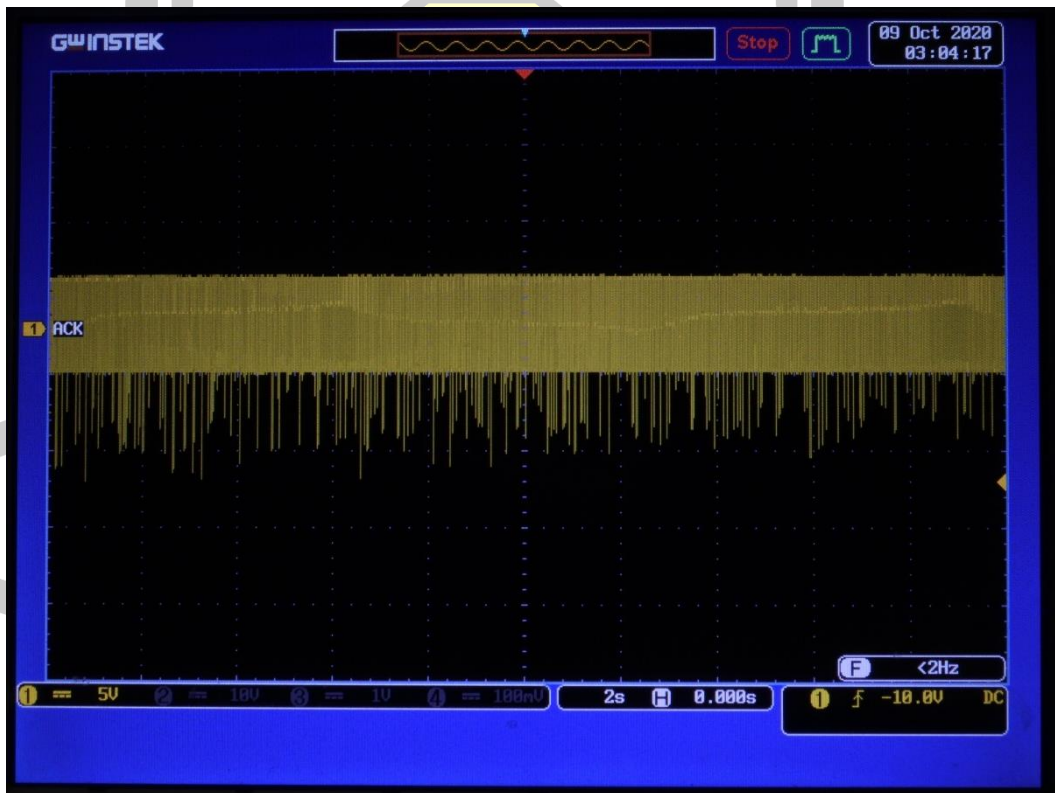
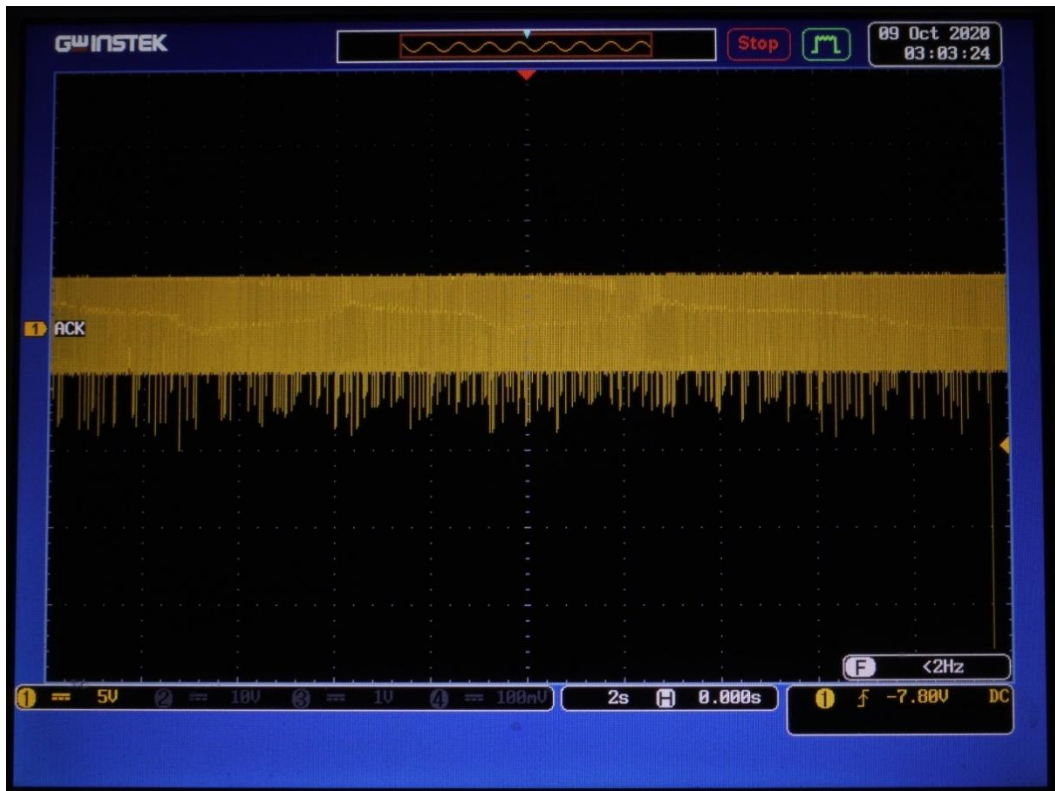


ภาคผนวก ข

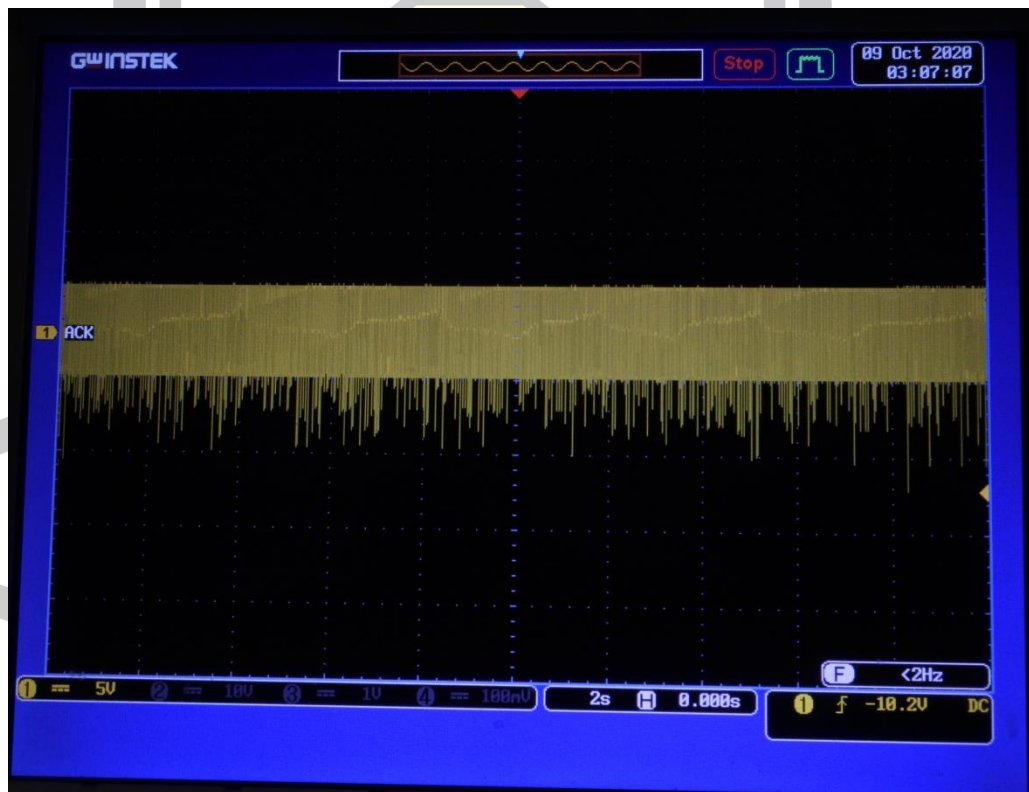
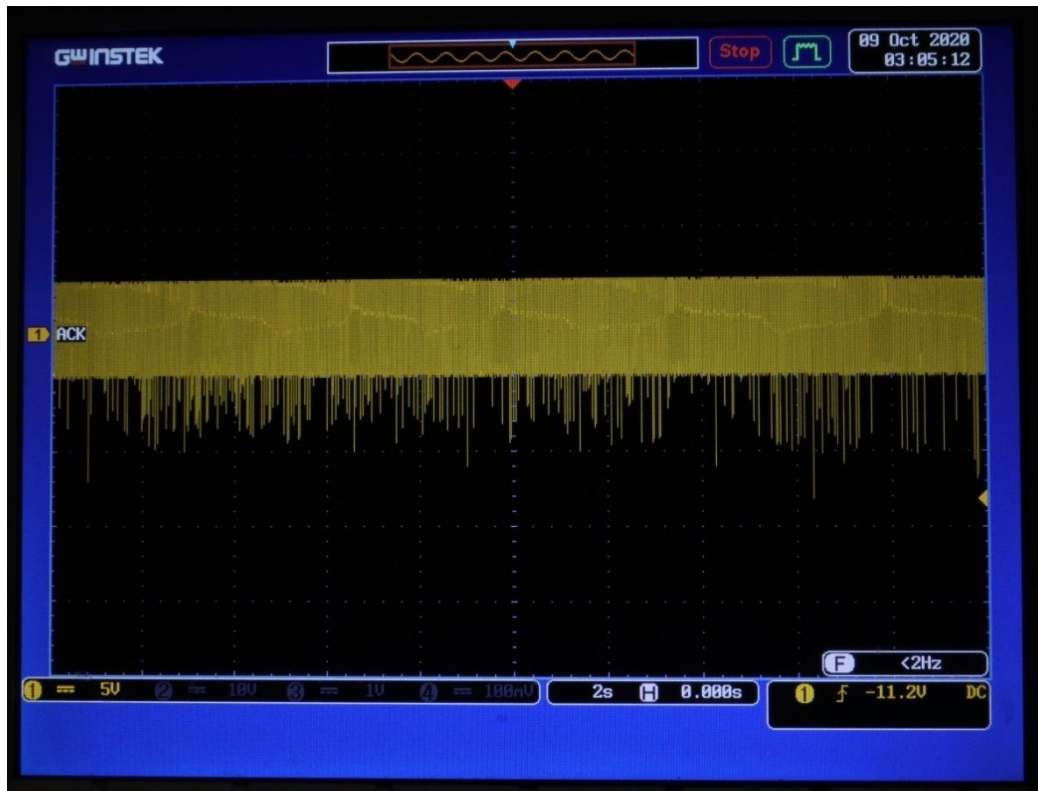
ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์ไม่มีการติดตั้งระบบกราวด์

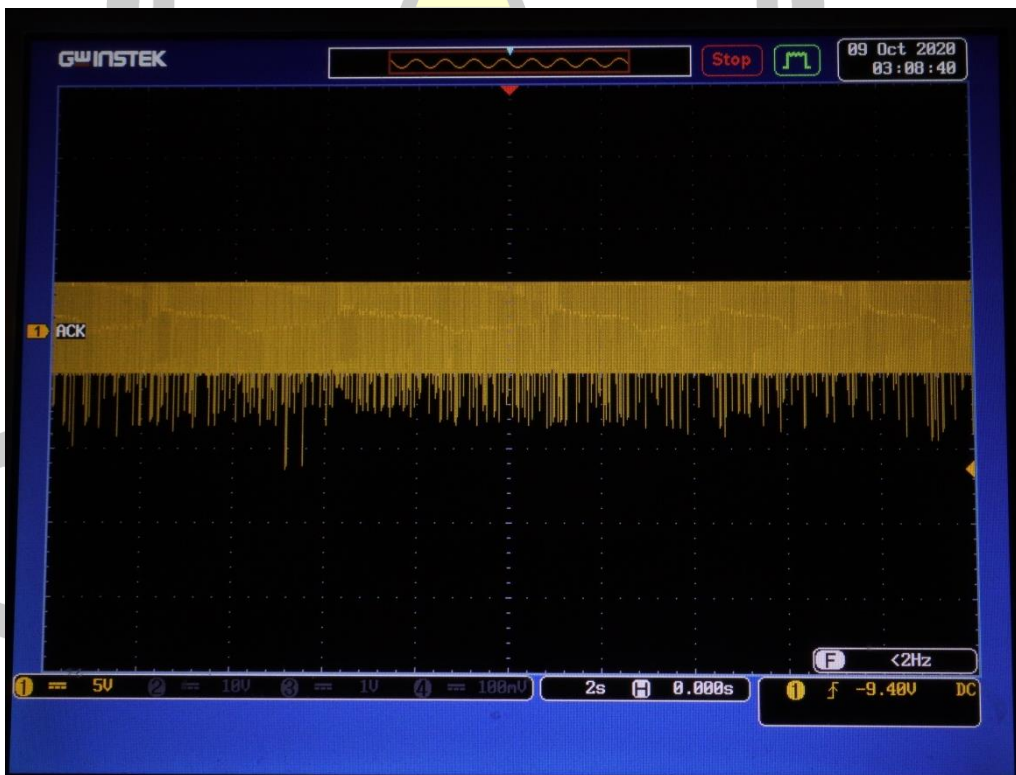
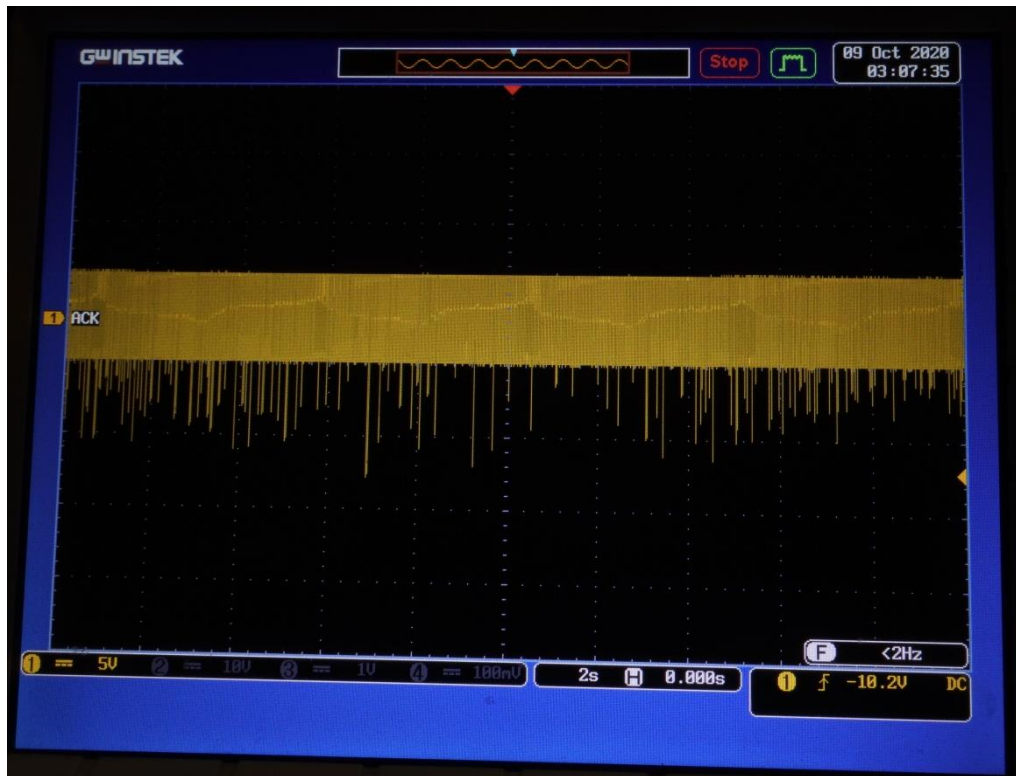
พหุบัน ปณฺ ทิโต ชีเว

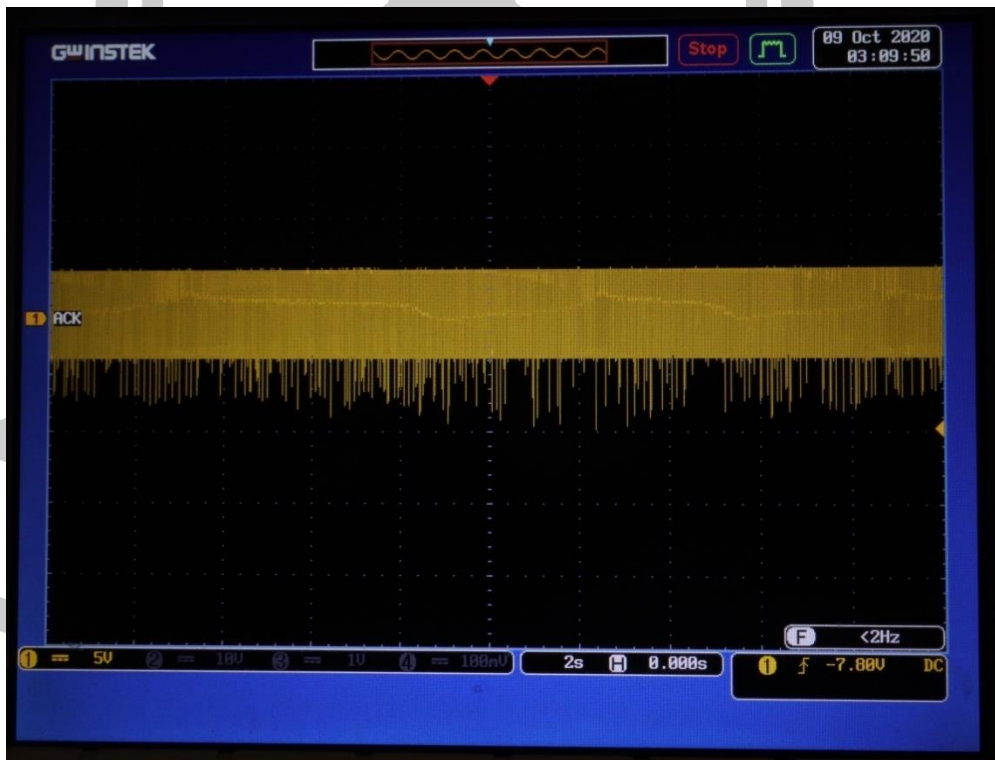
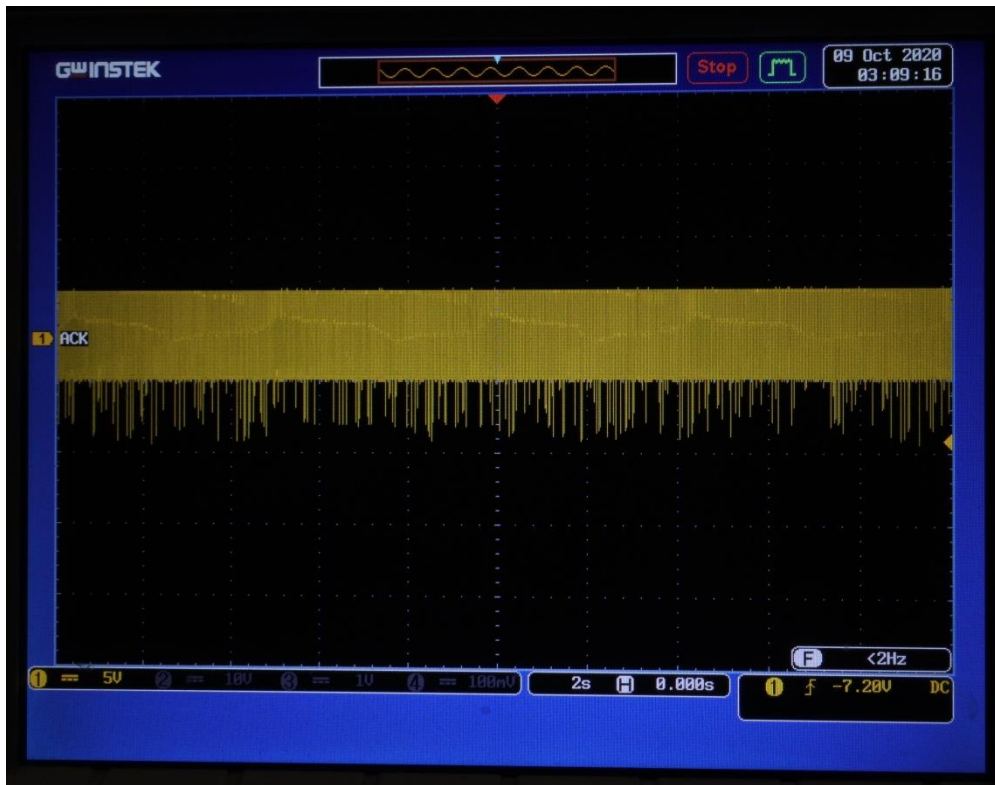




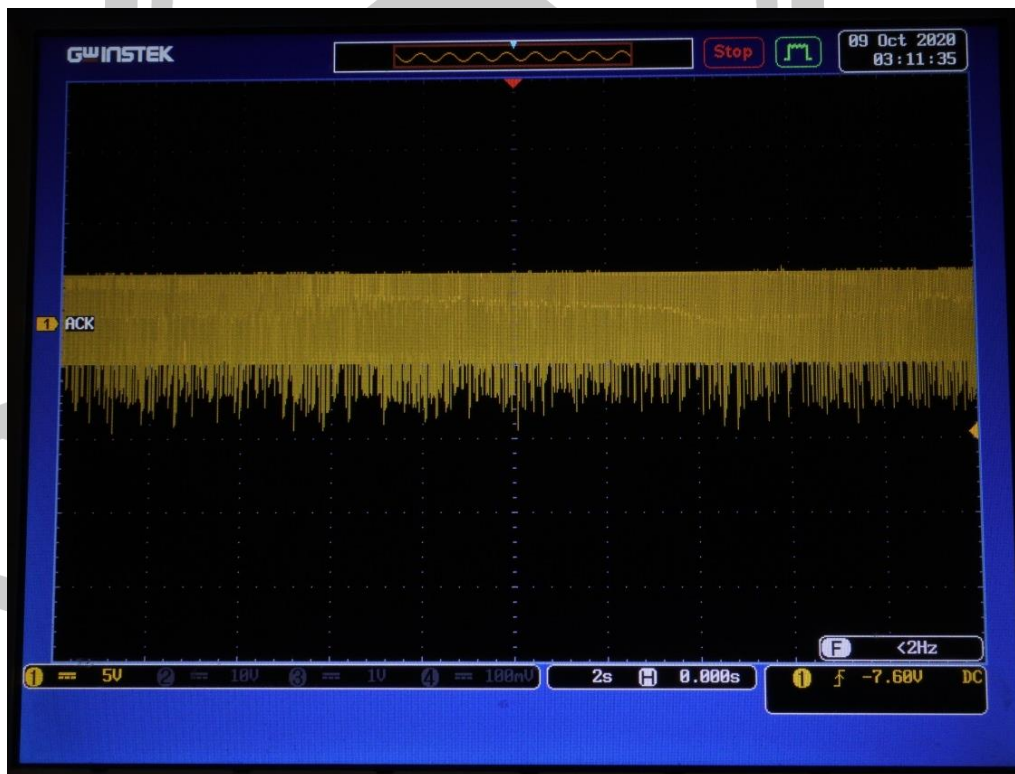
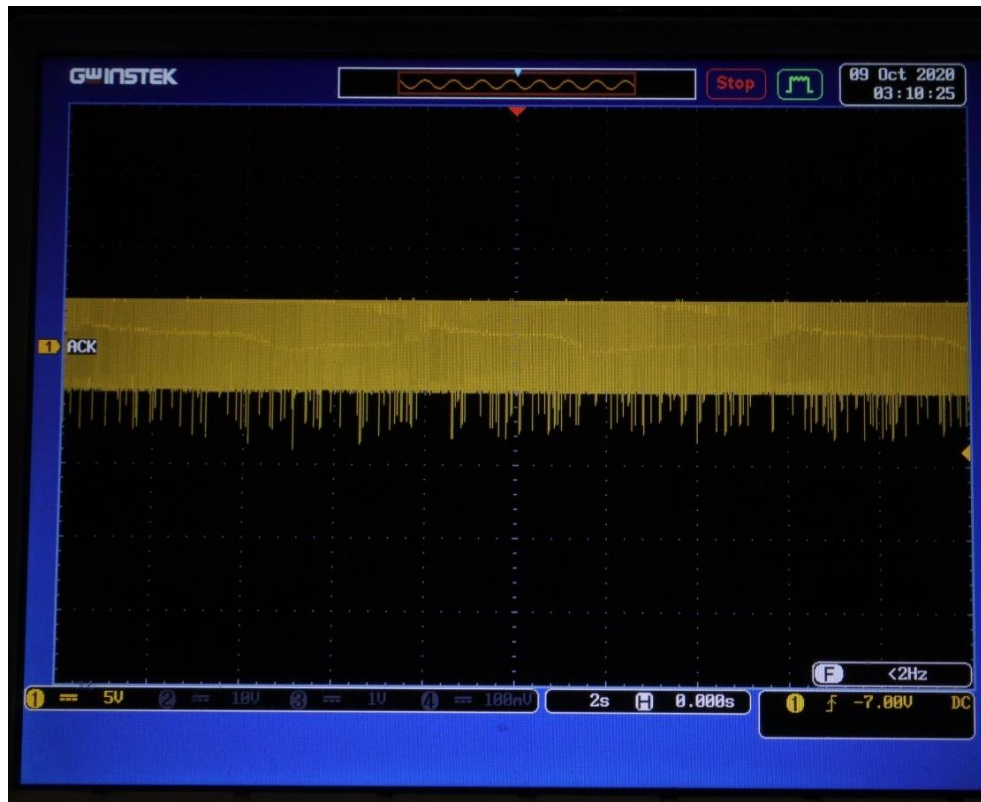


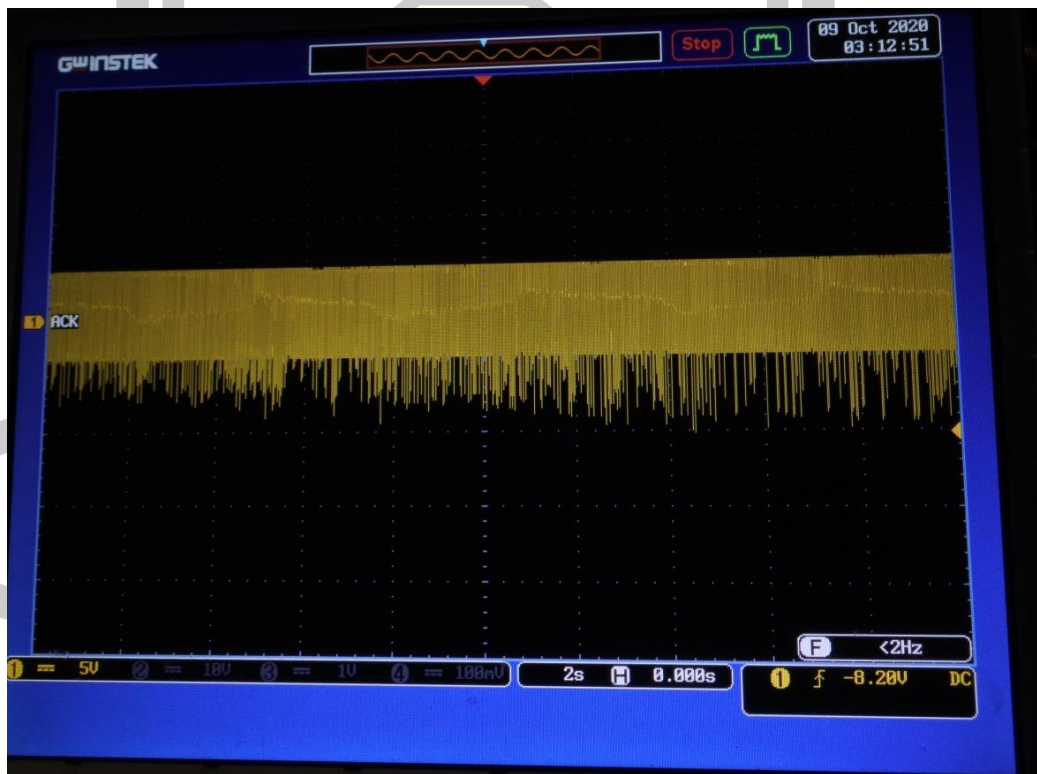
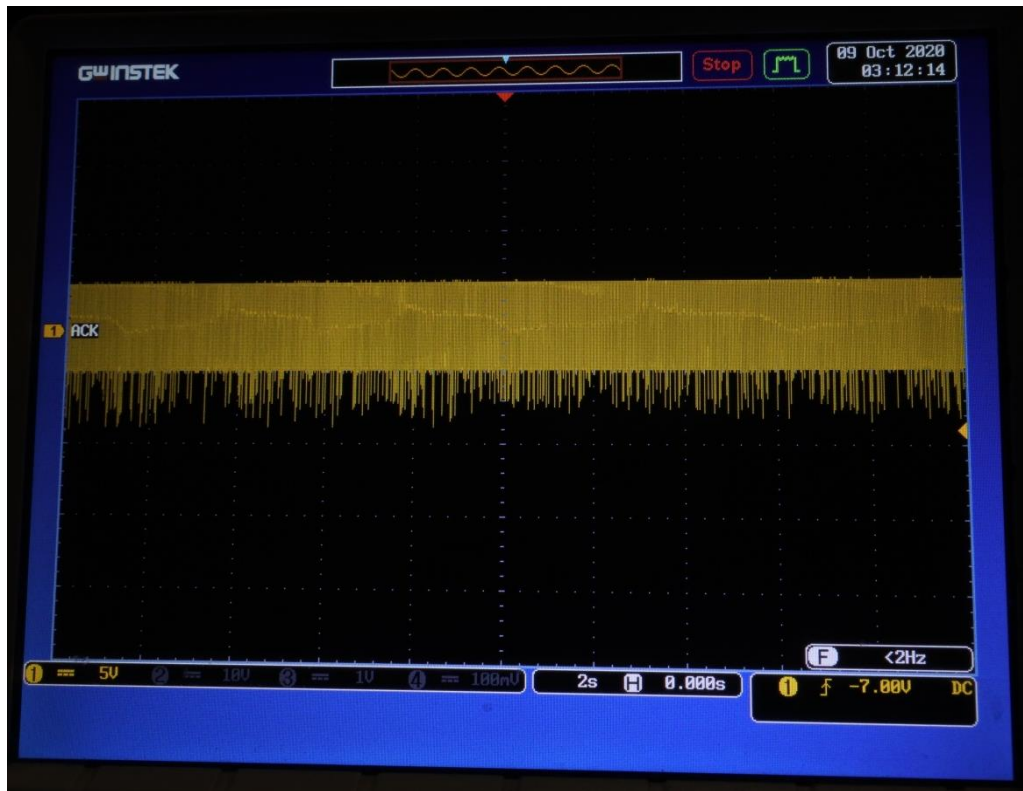


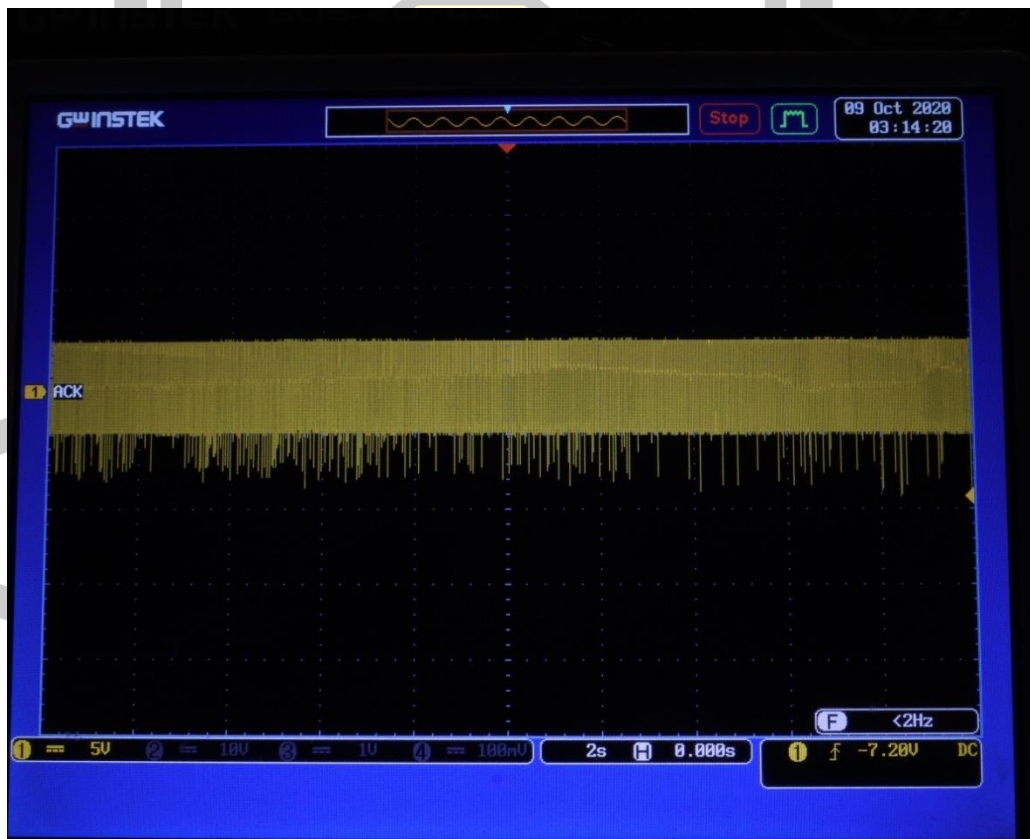
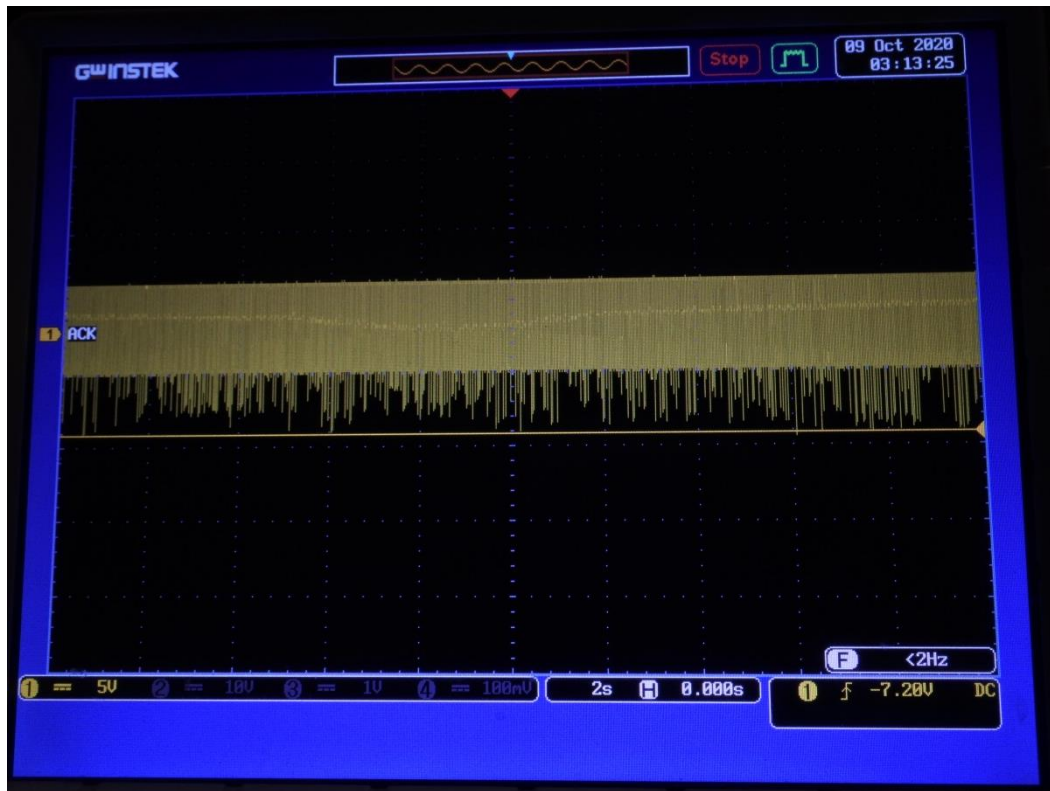




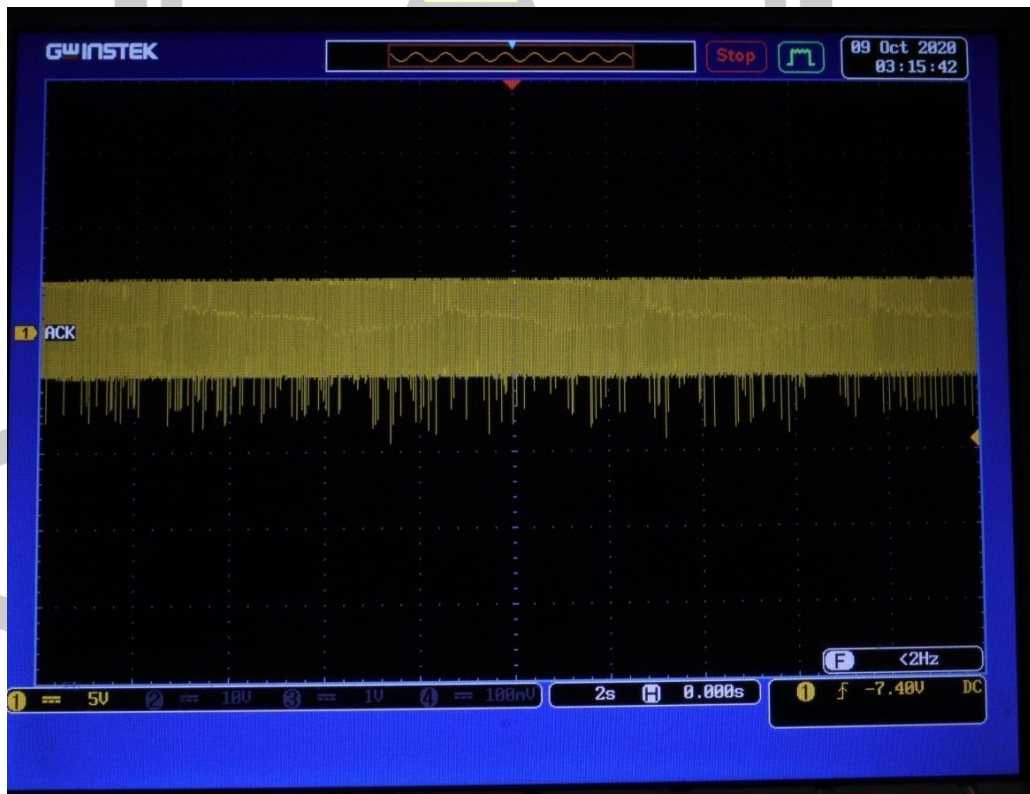
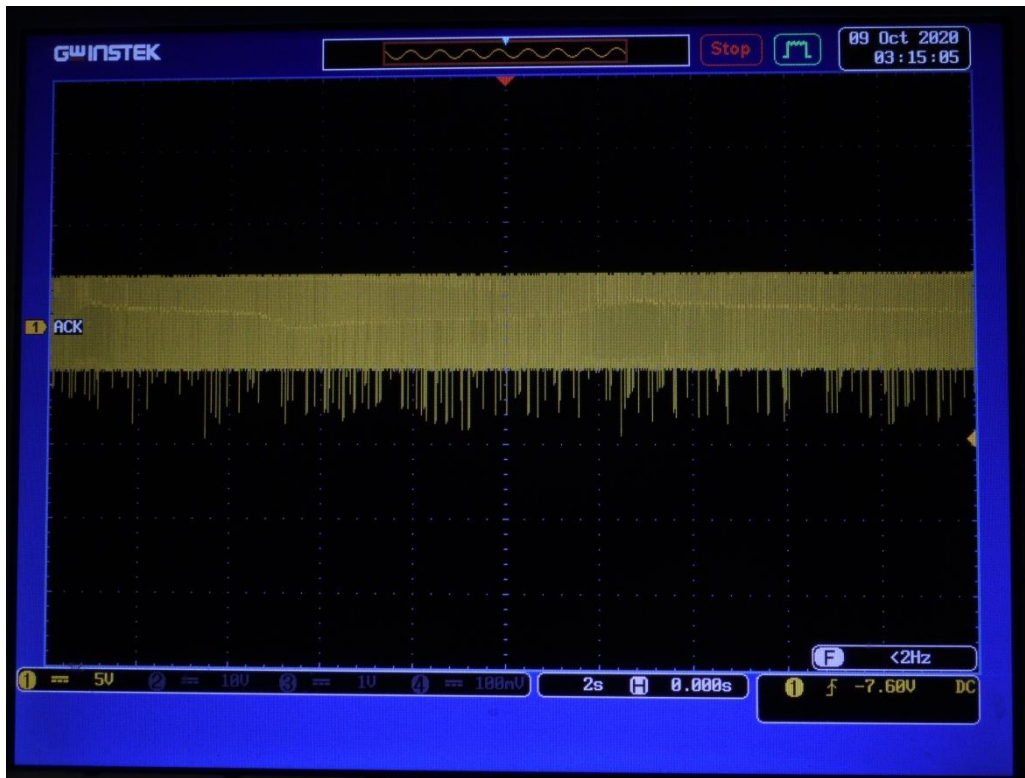


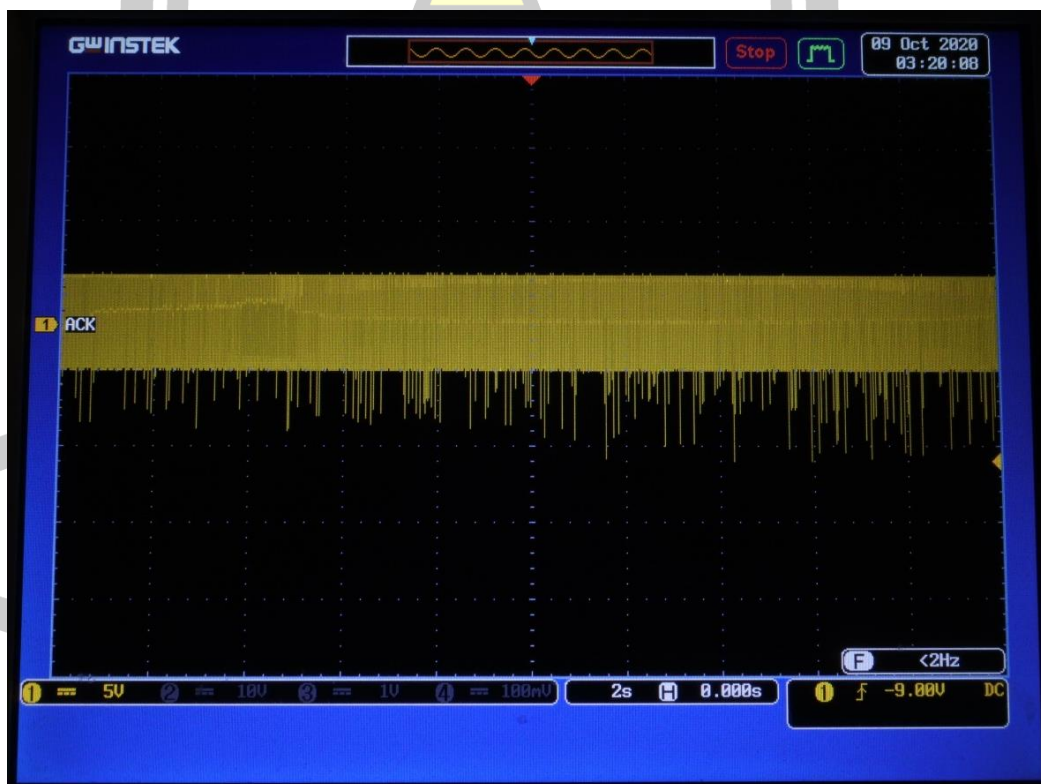
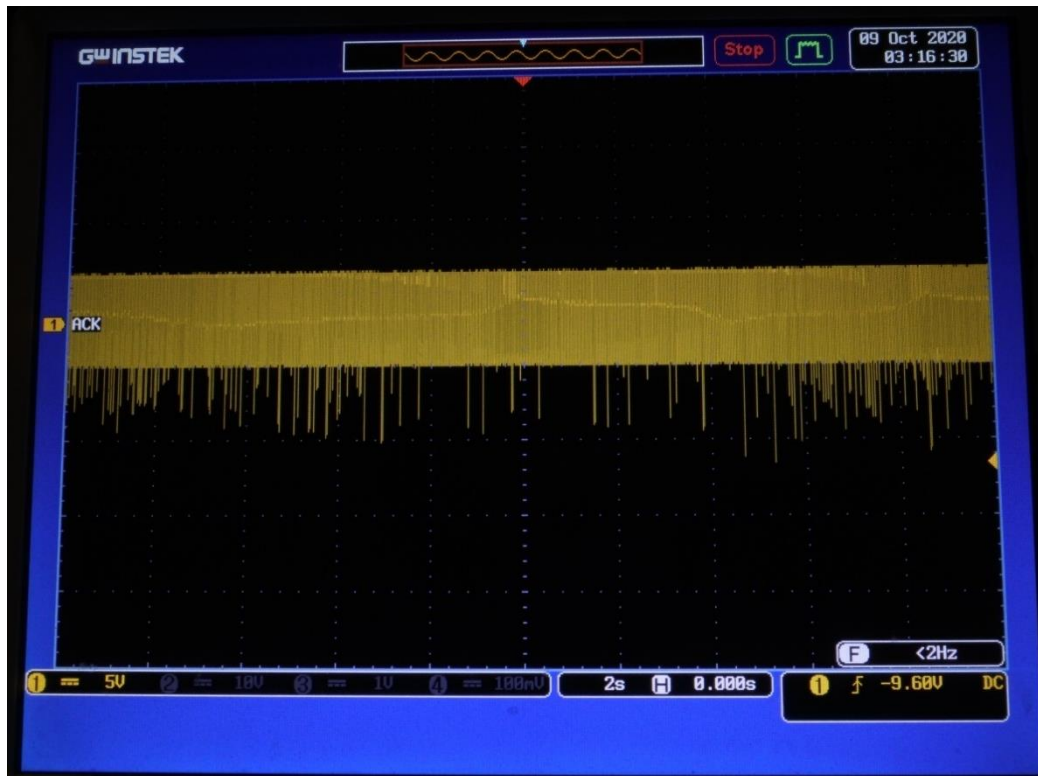


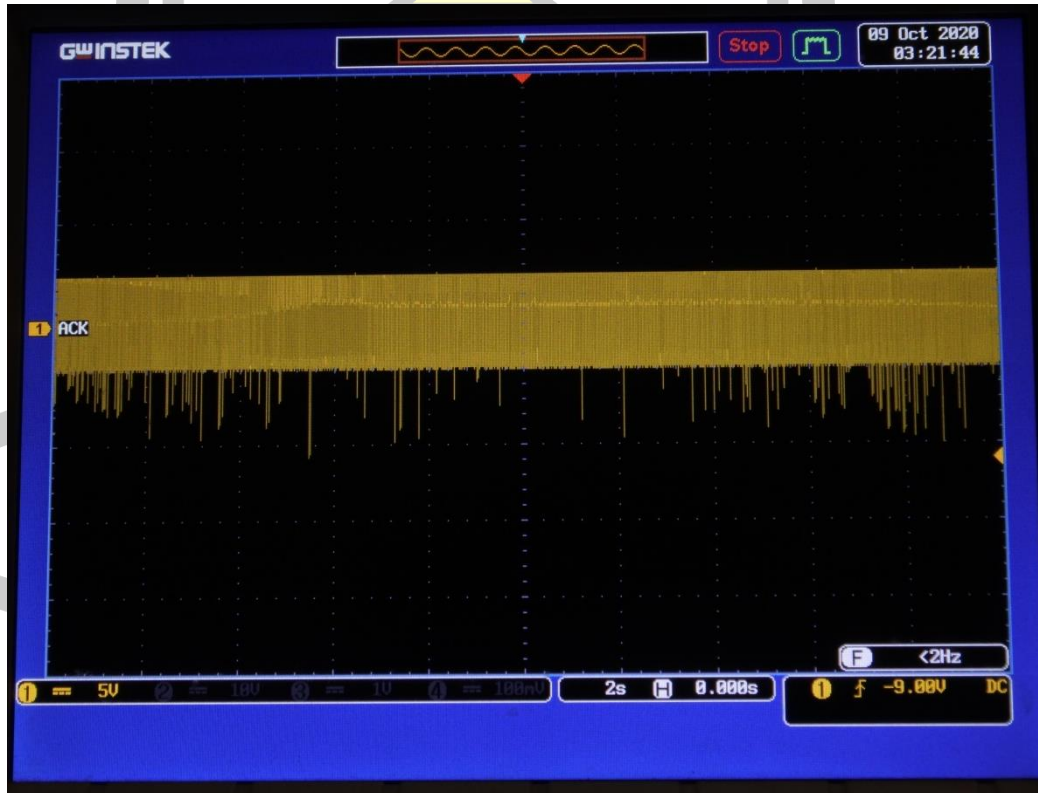
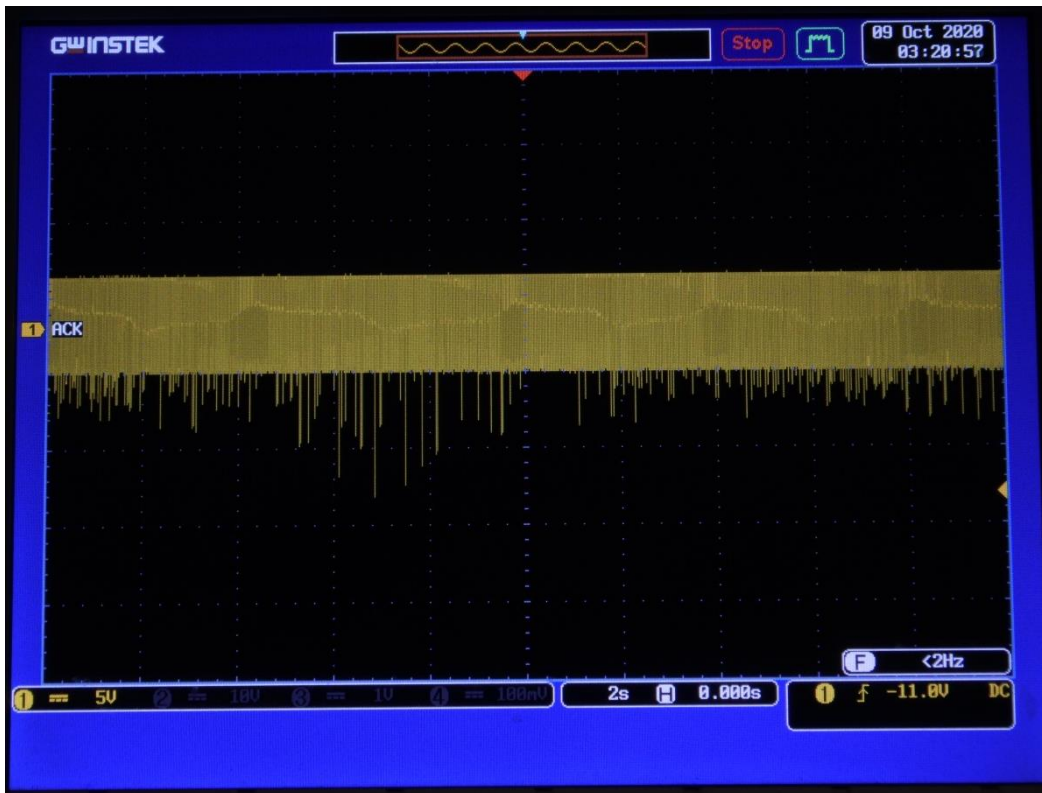




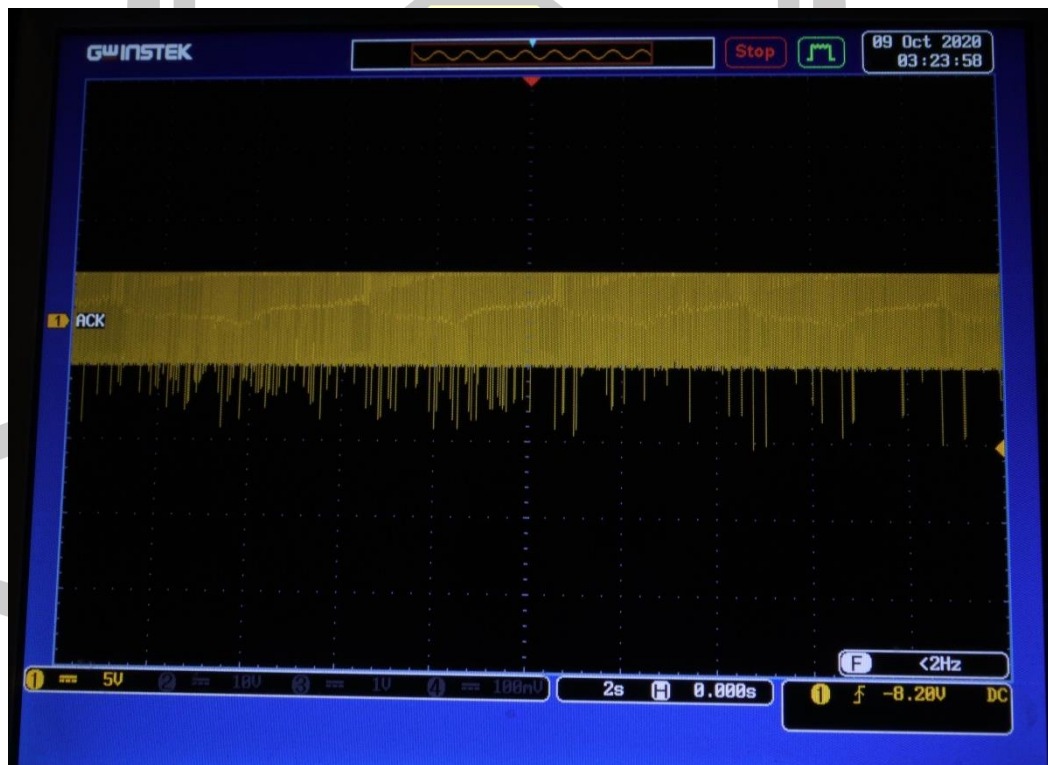
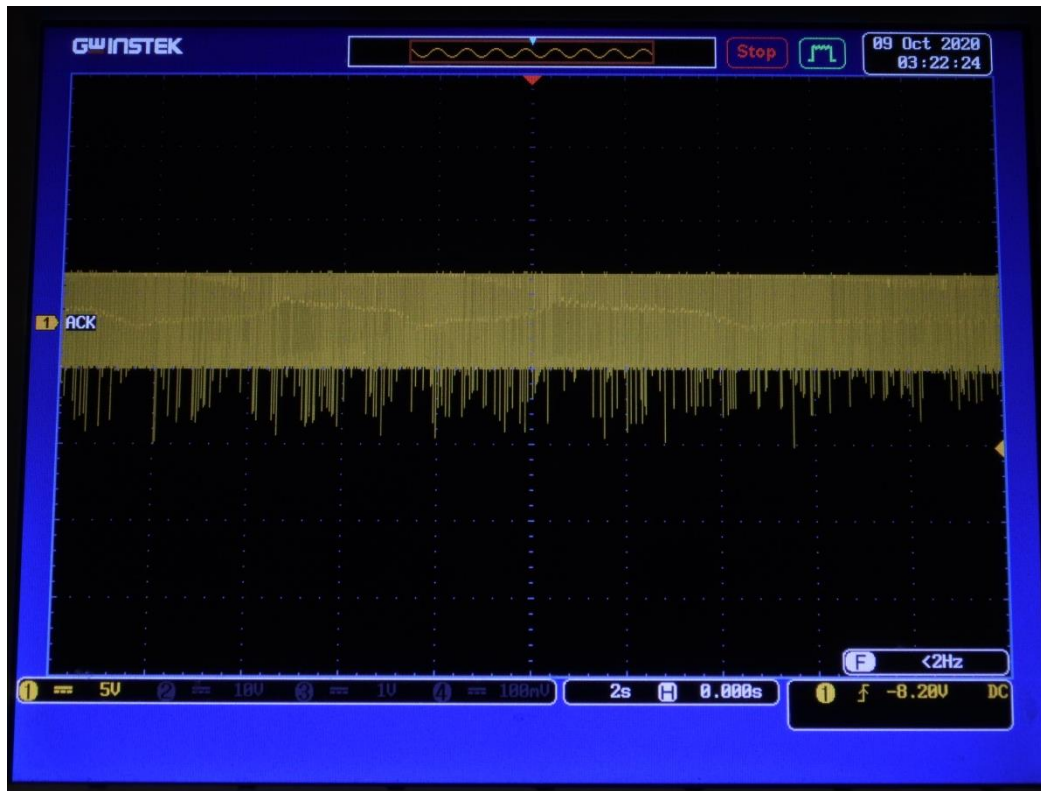


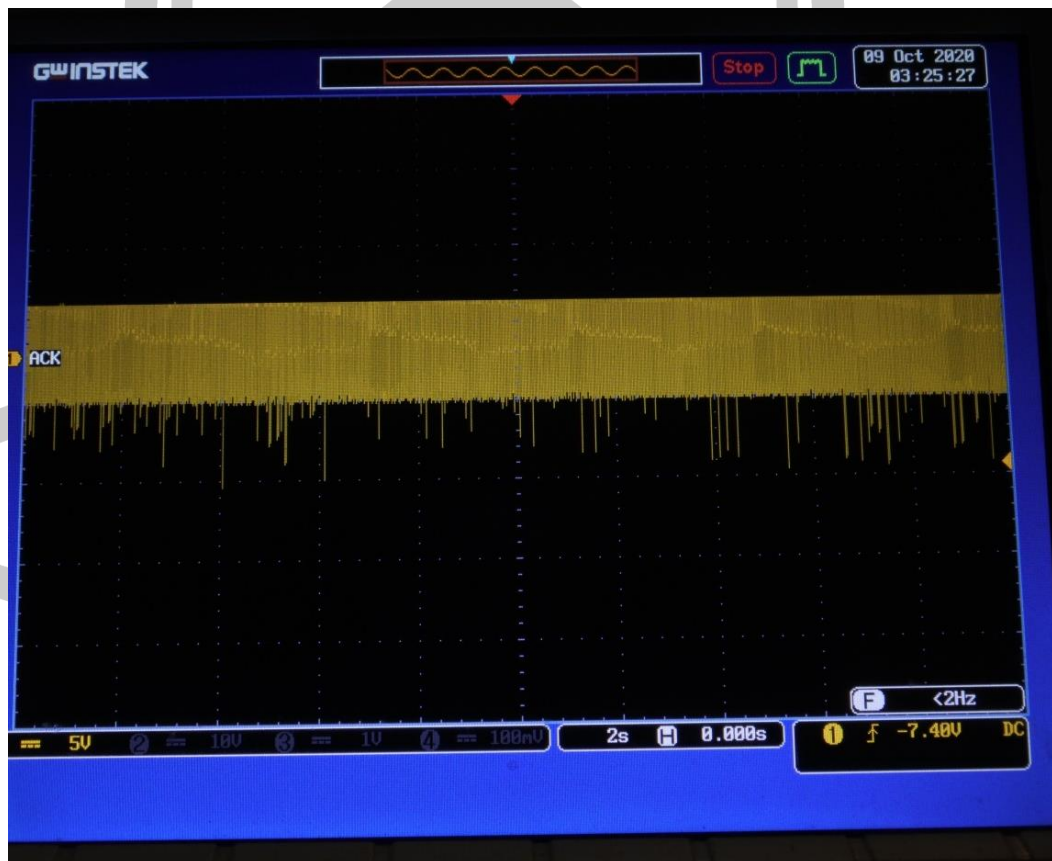
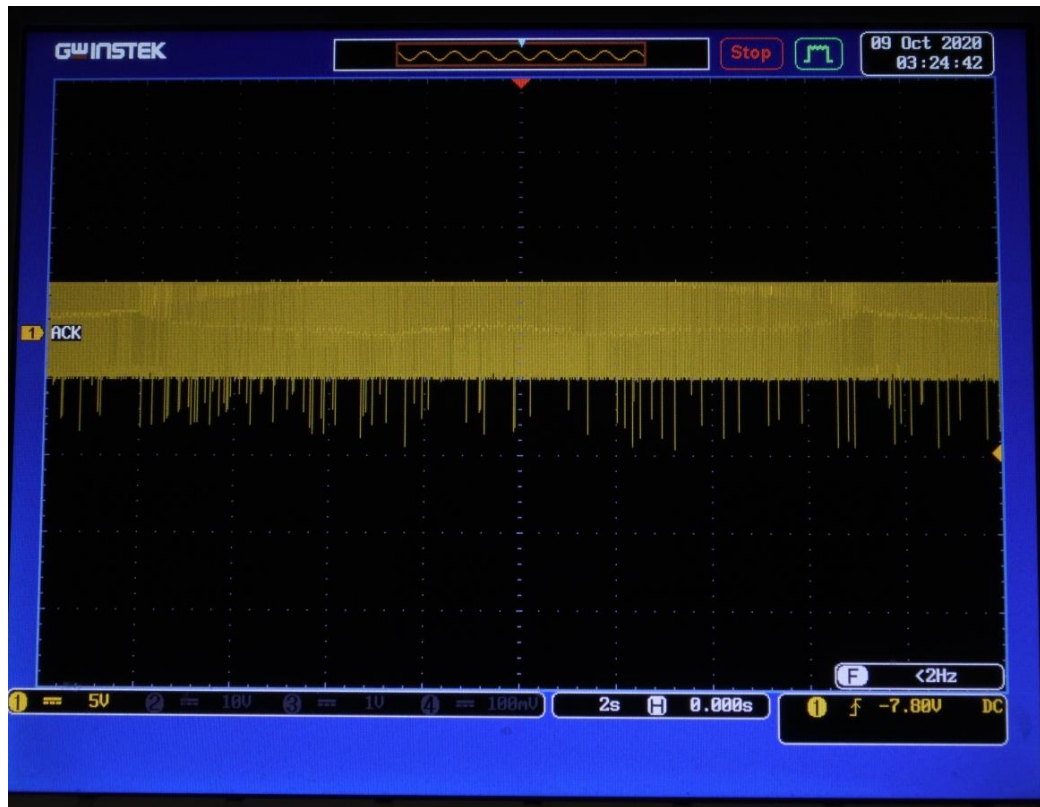


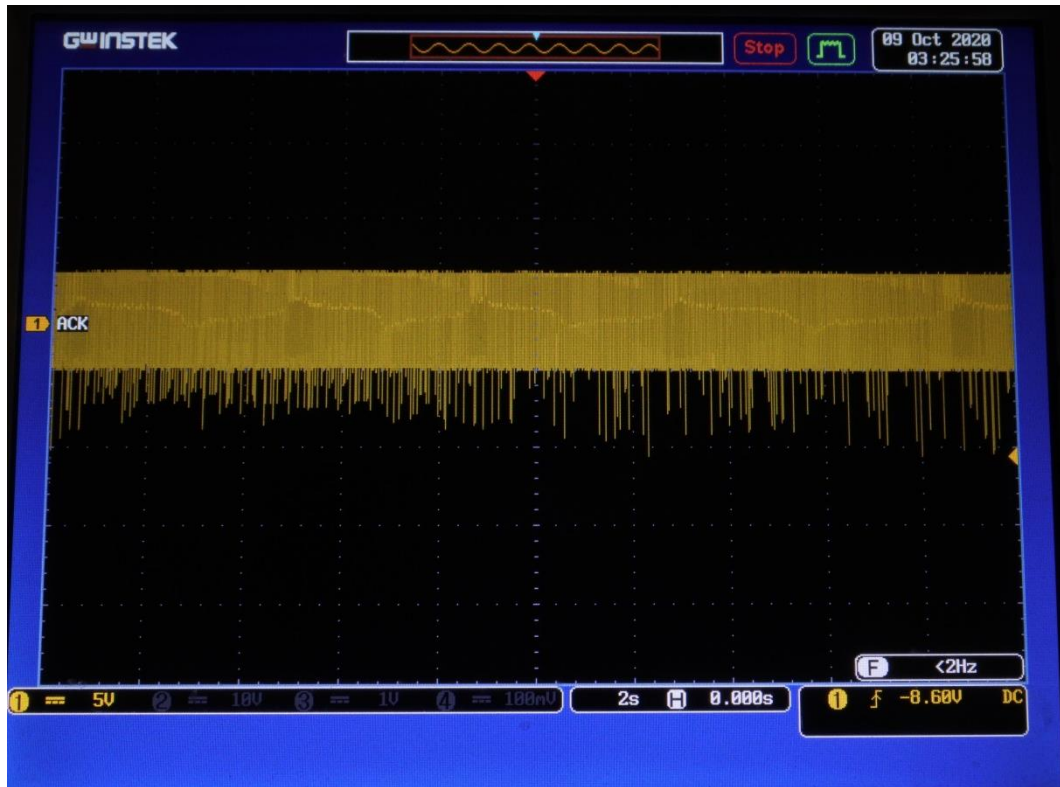


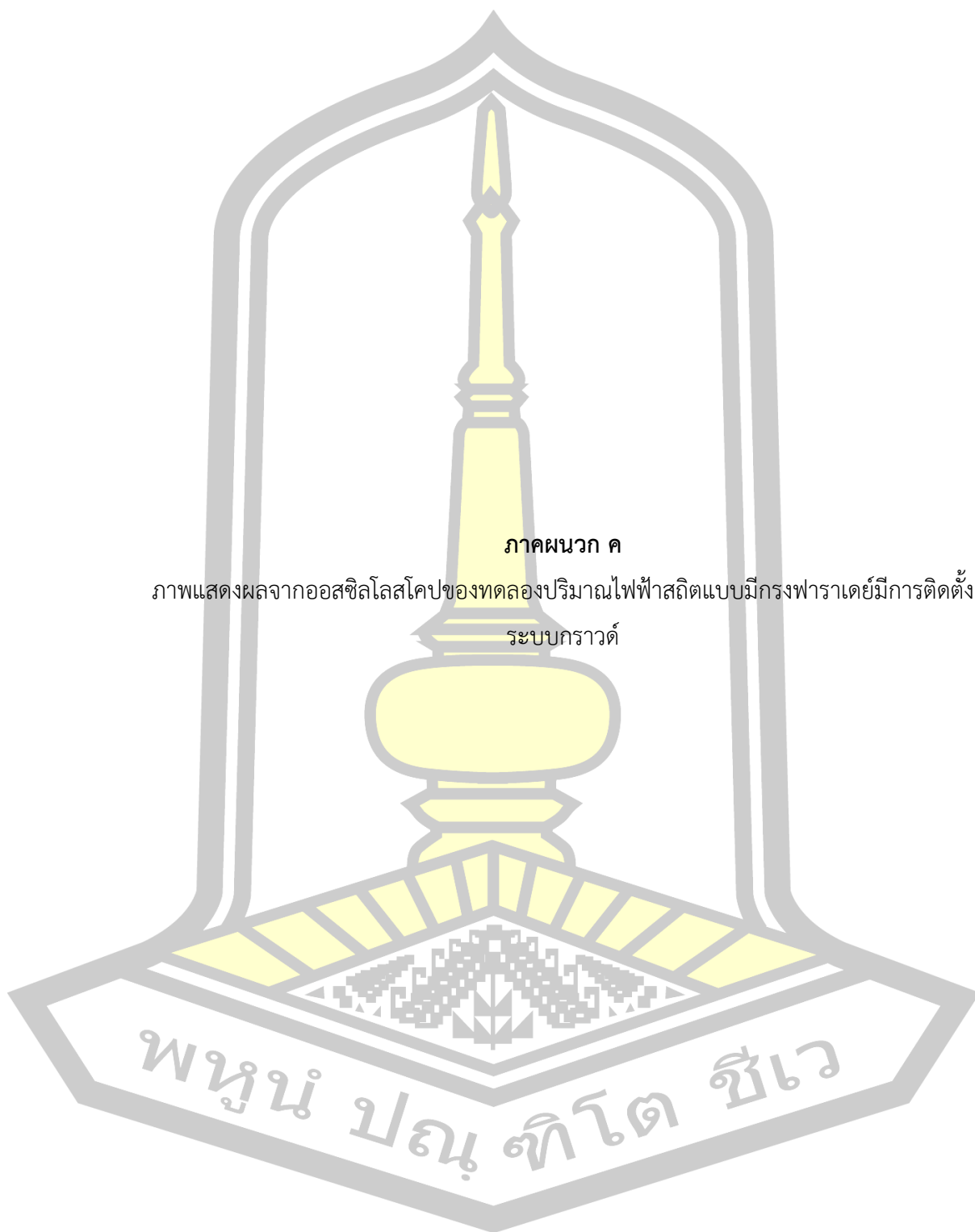








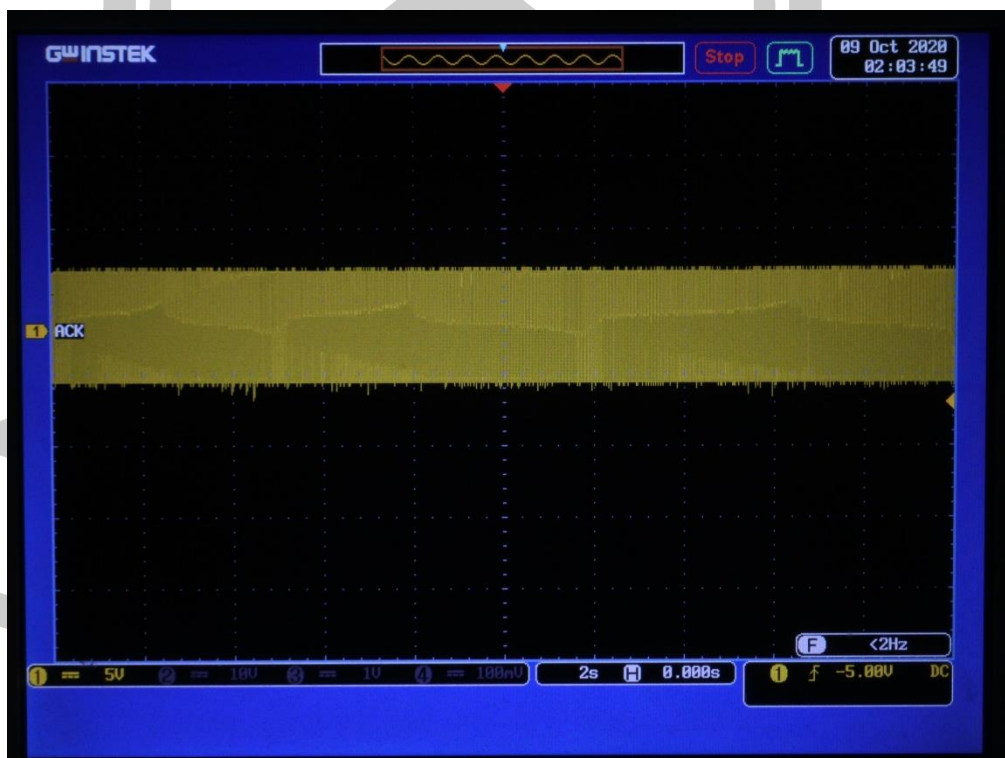
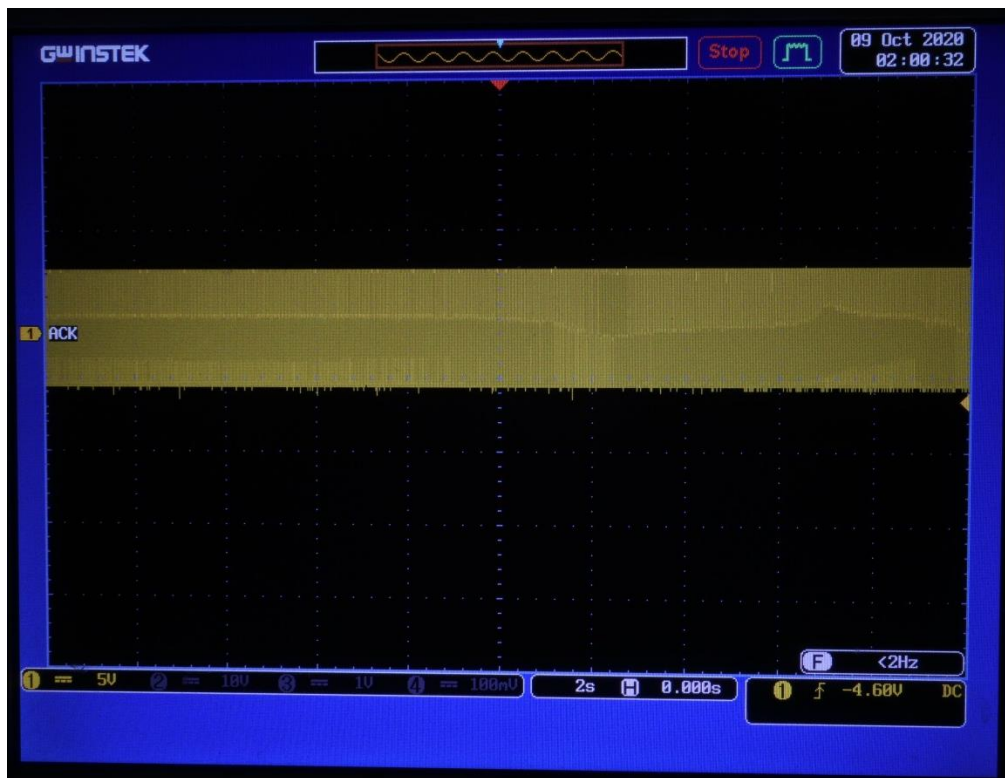




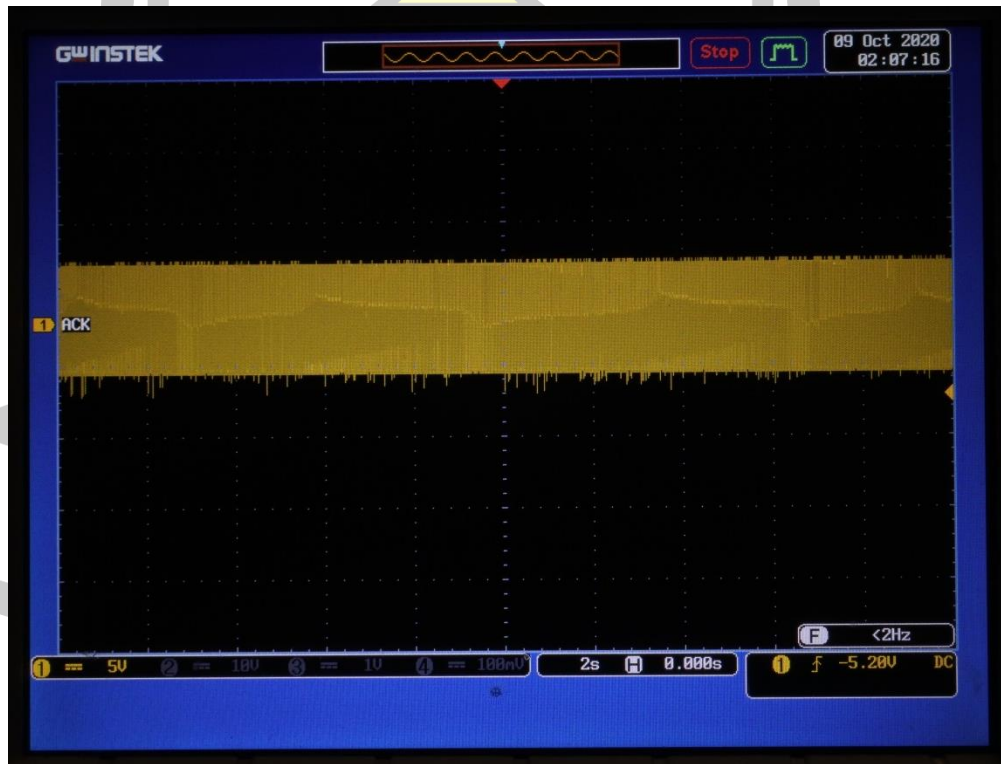
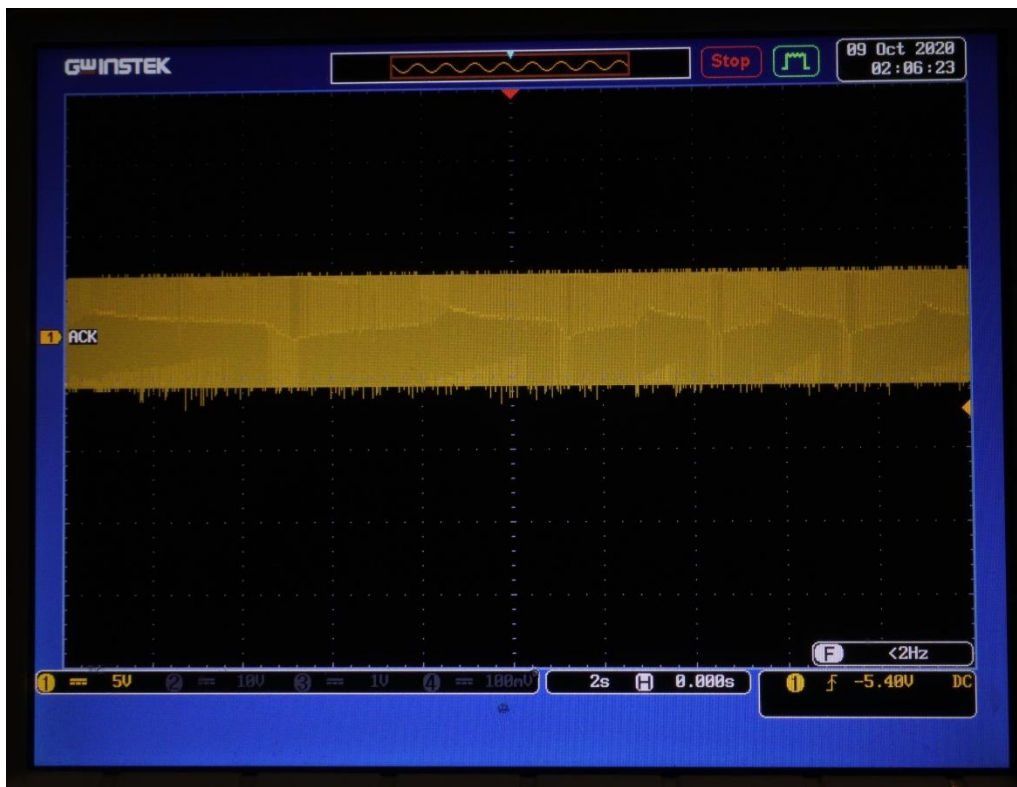
ภาคผนวก ค

ภาพแสดงผลจากออสซิลโลสโคปของทดลองปริมาณไฟฟ้าสถิตแบบมีกรงฟาราเดย์มีการติดตั้งระบบกราวด์

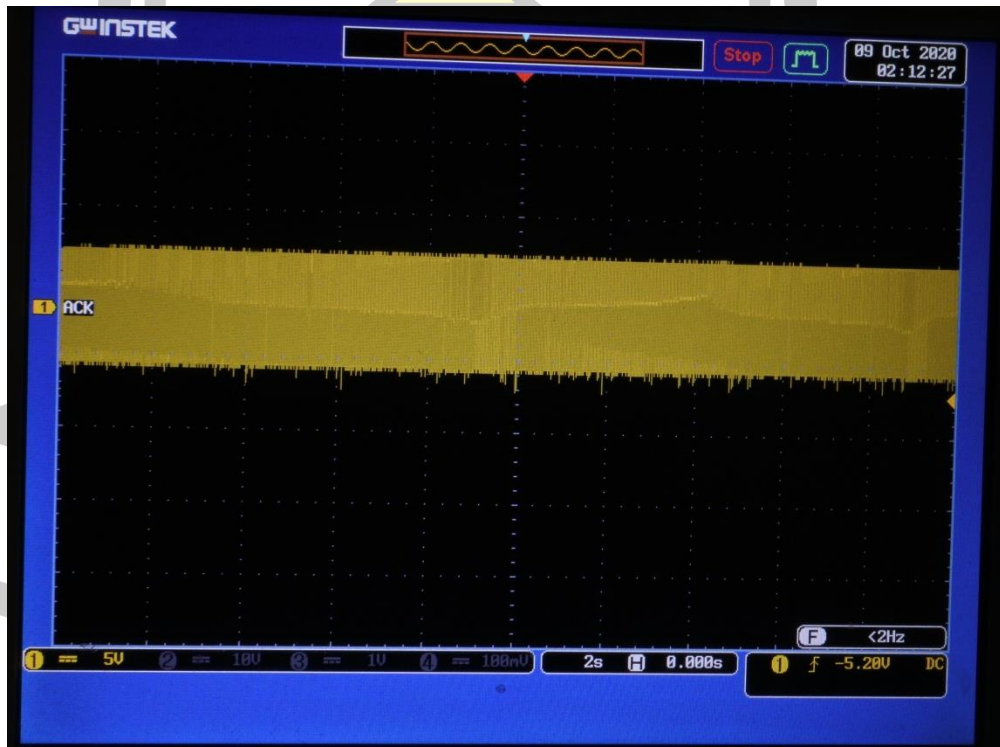
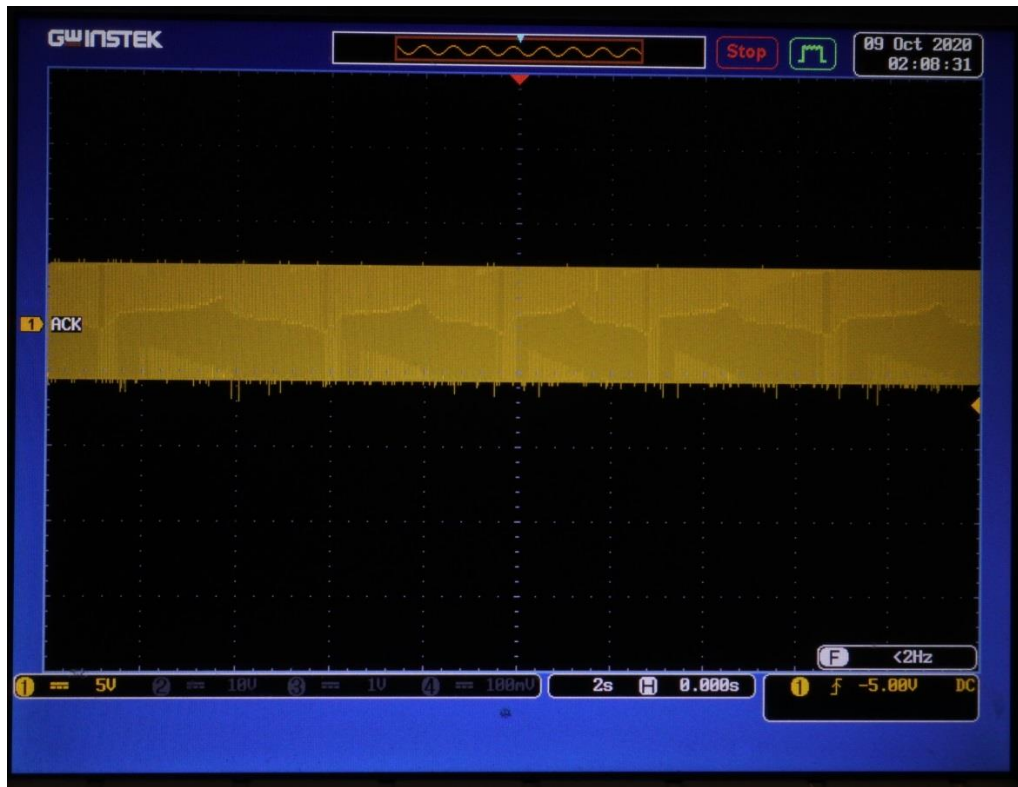
พหุณฺ์ ปณฺุ ทิทฺโต ชิเว

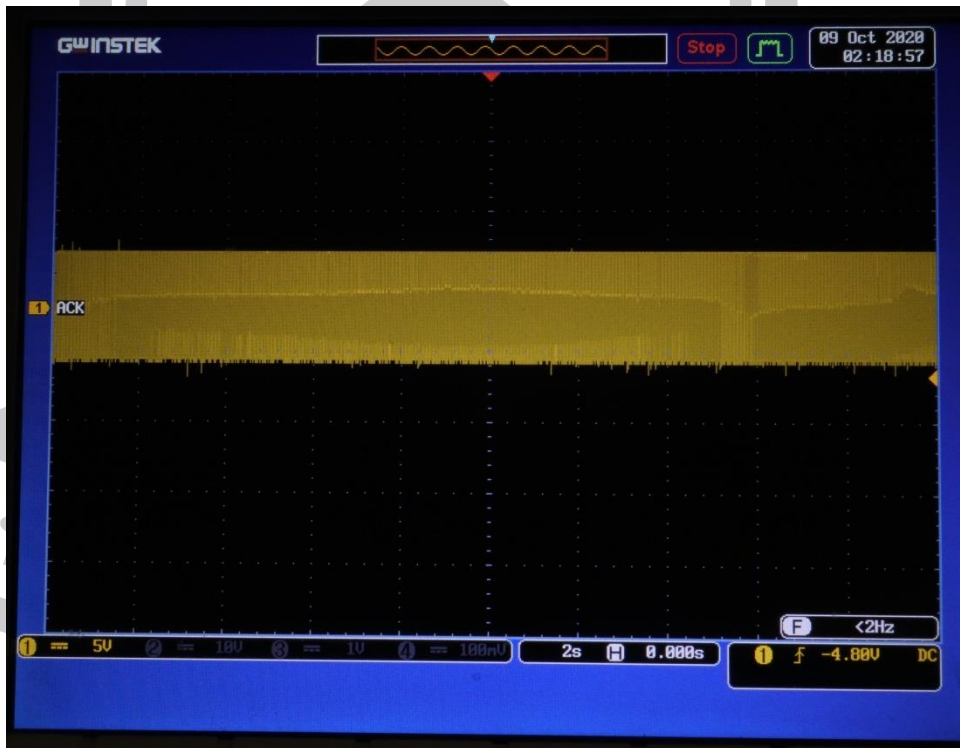
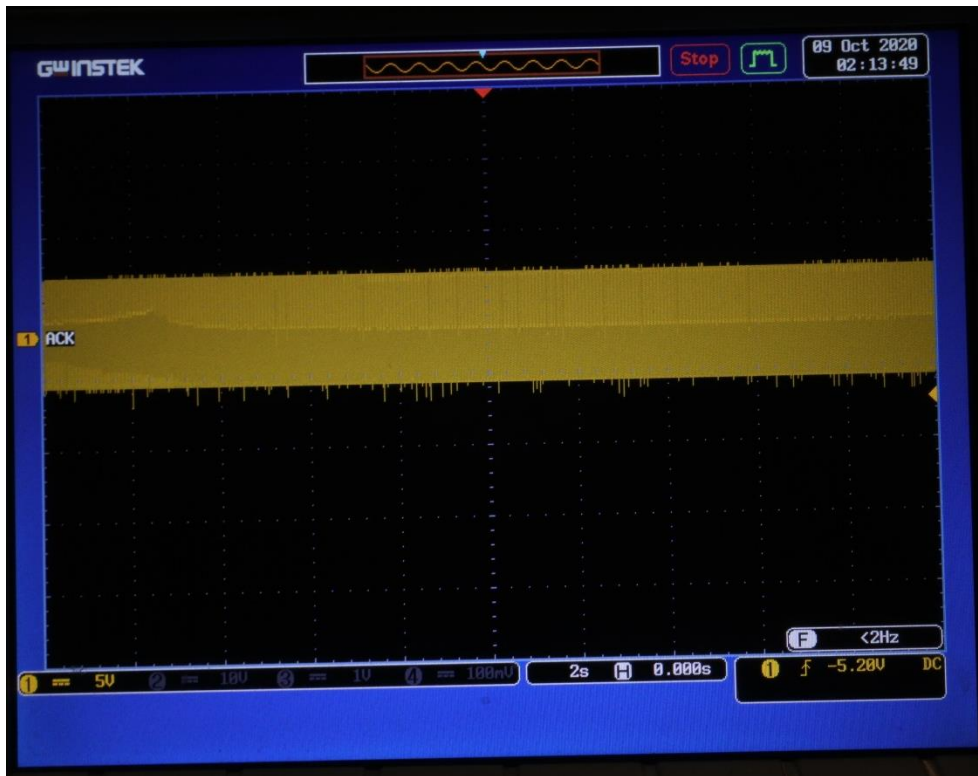


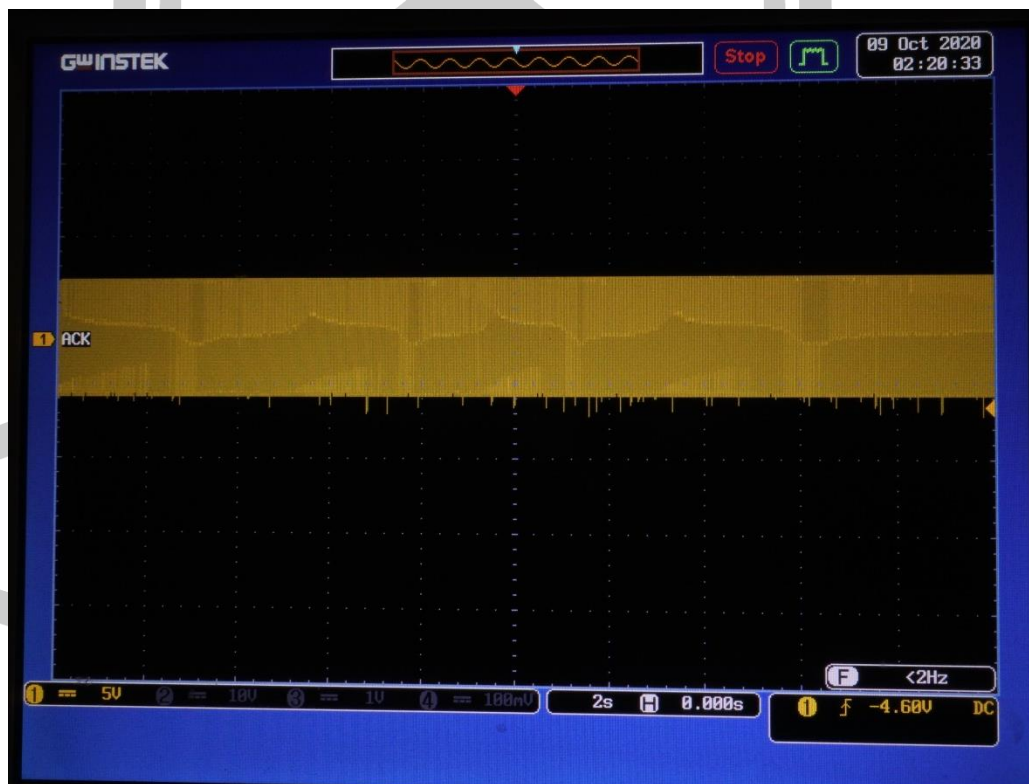
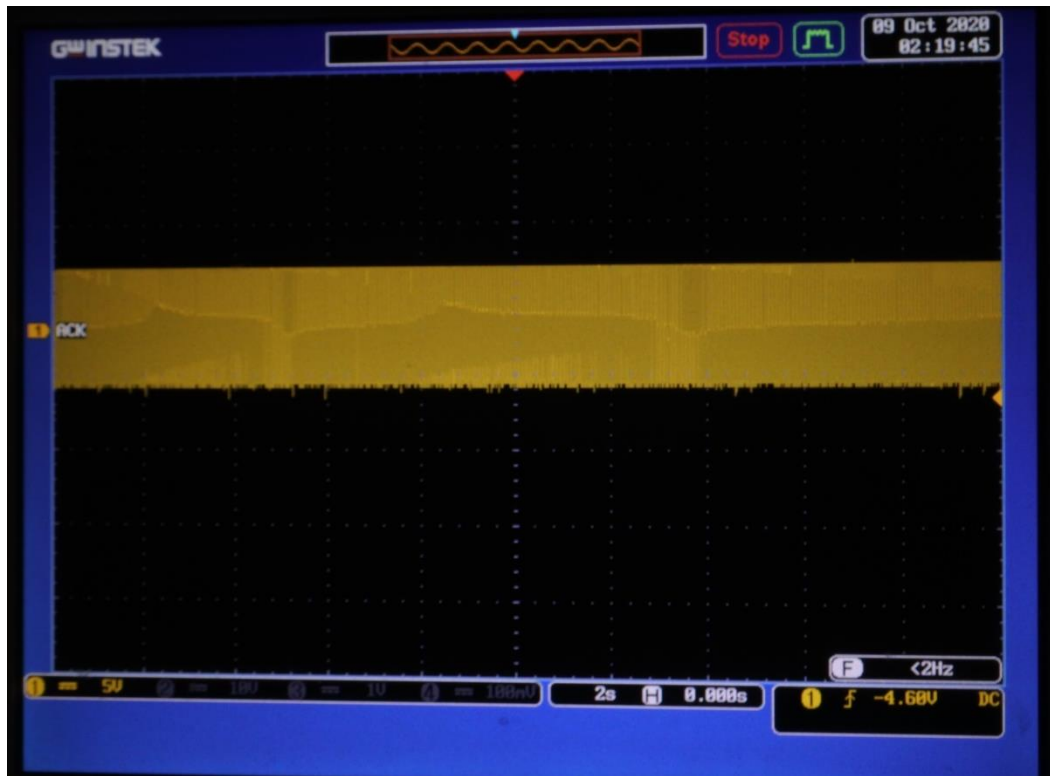


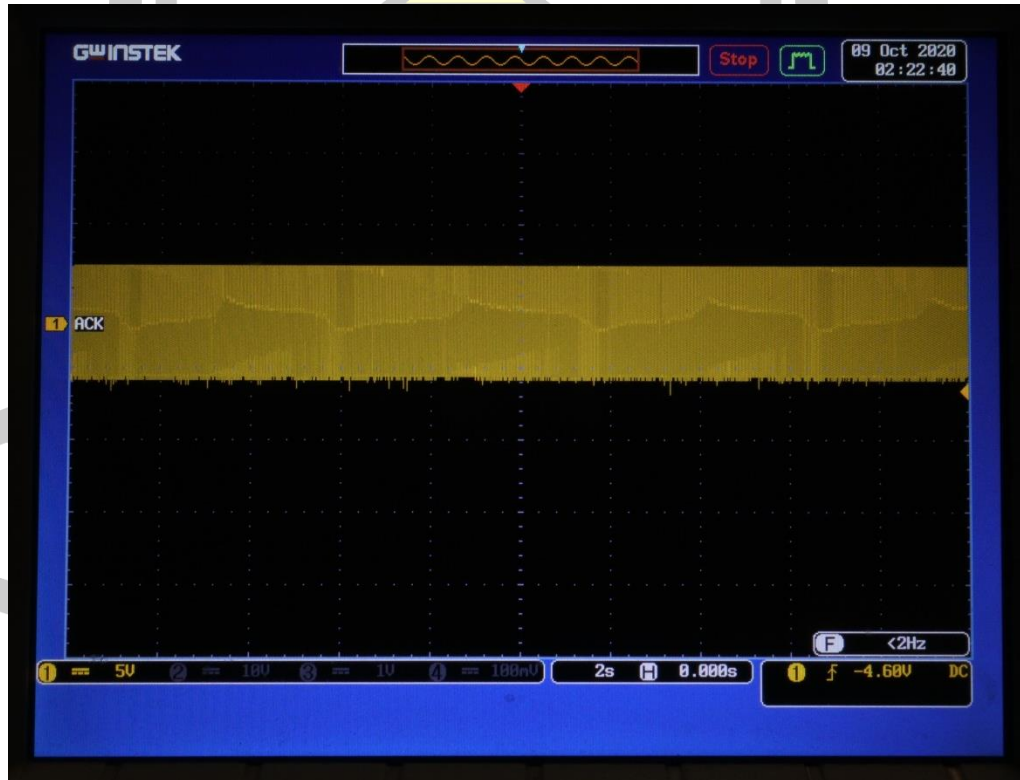
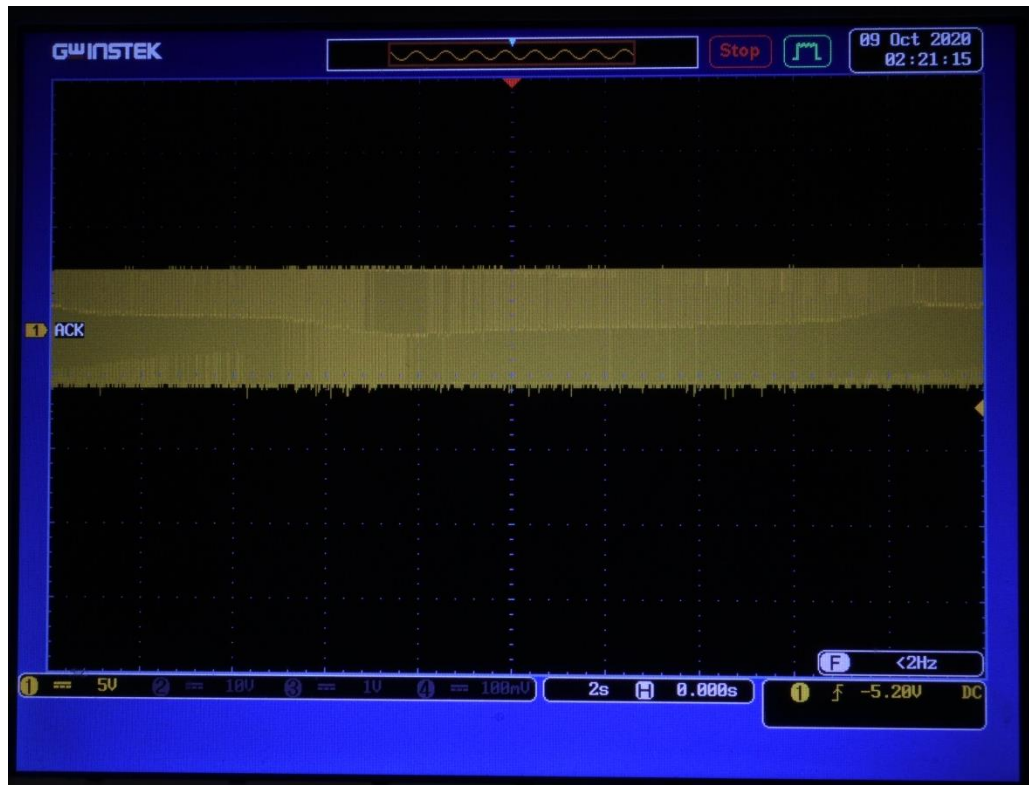




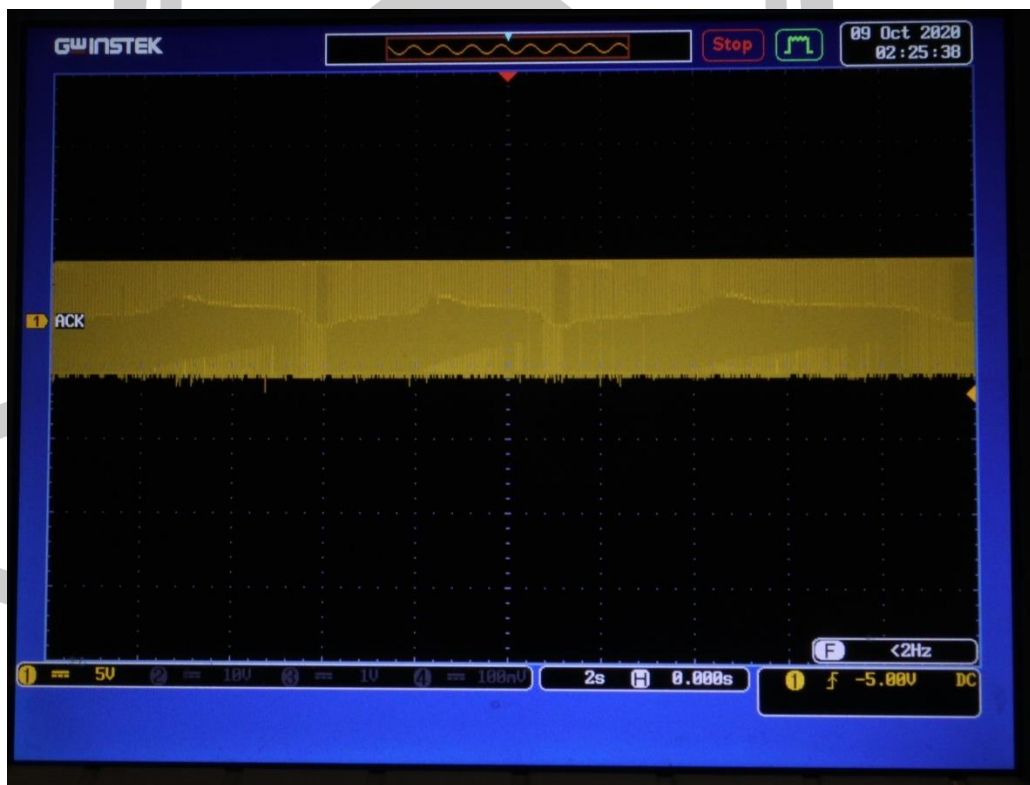
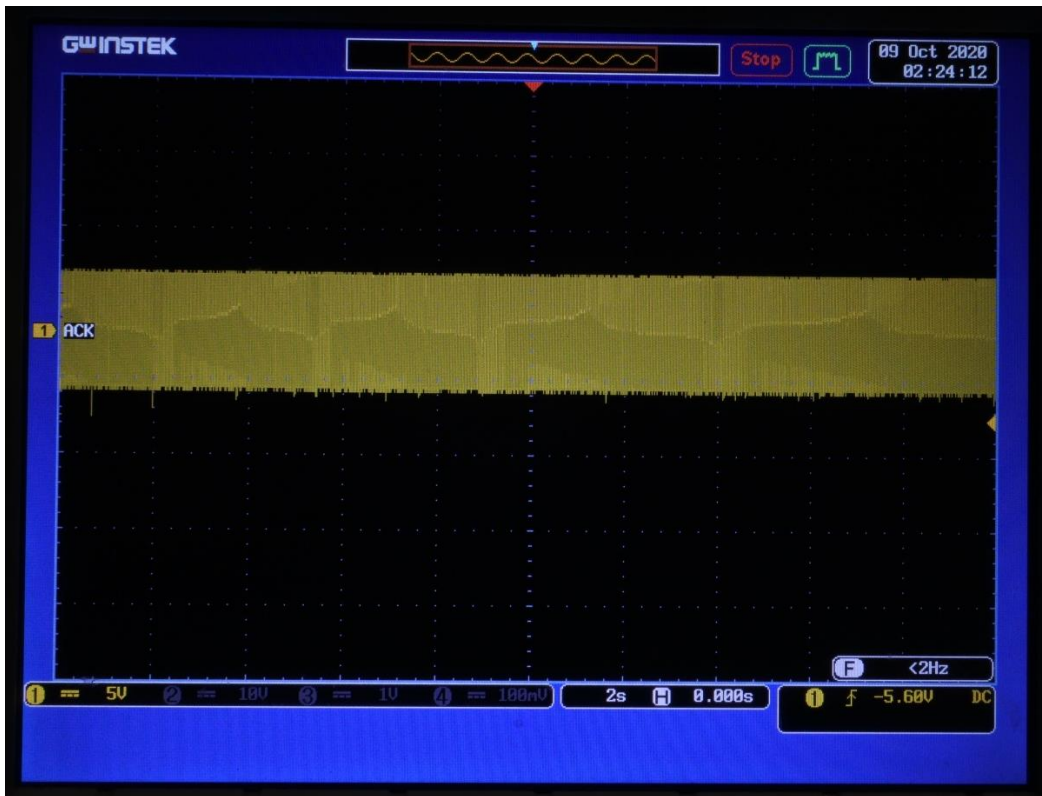


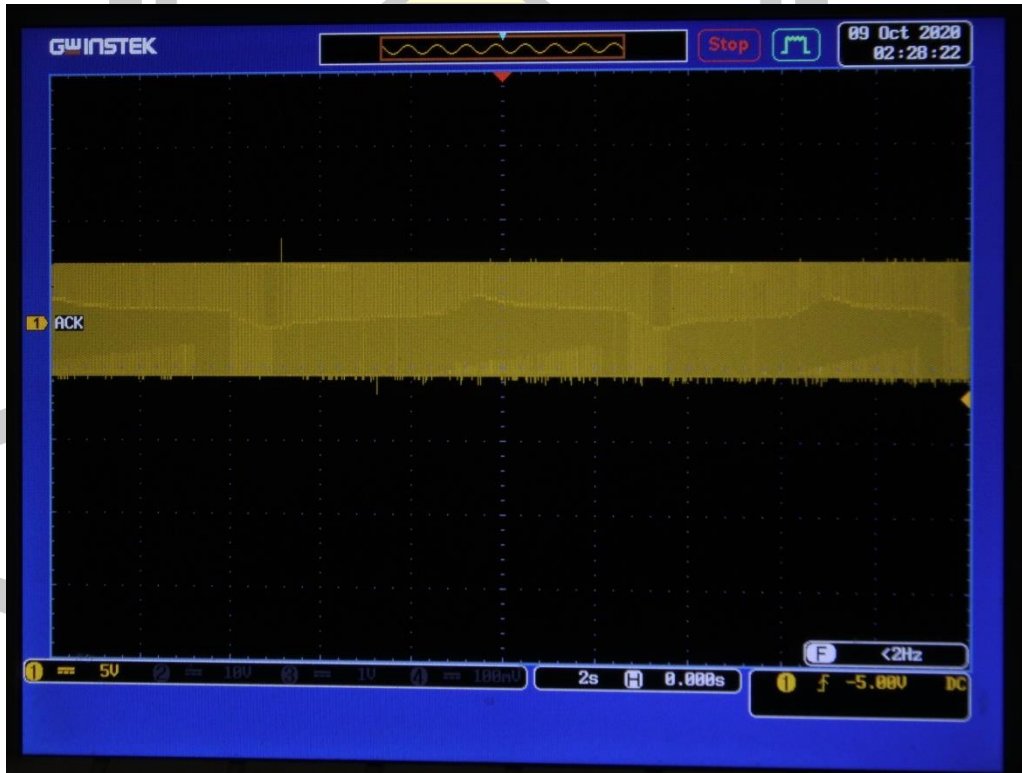
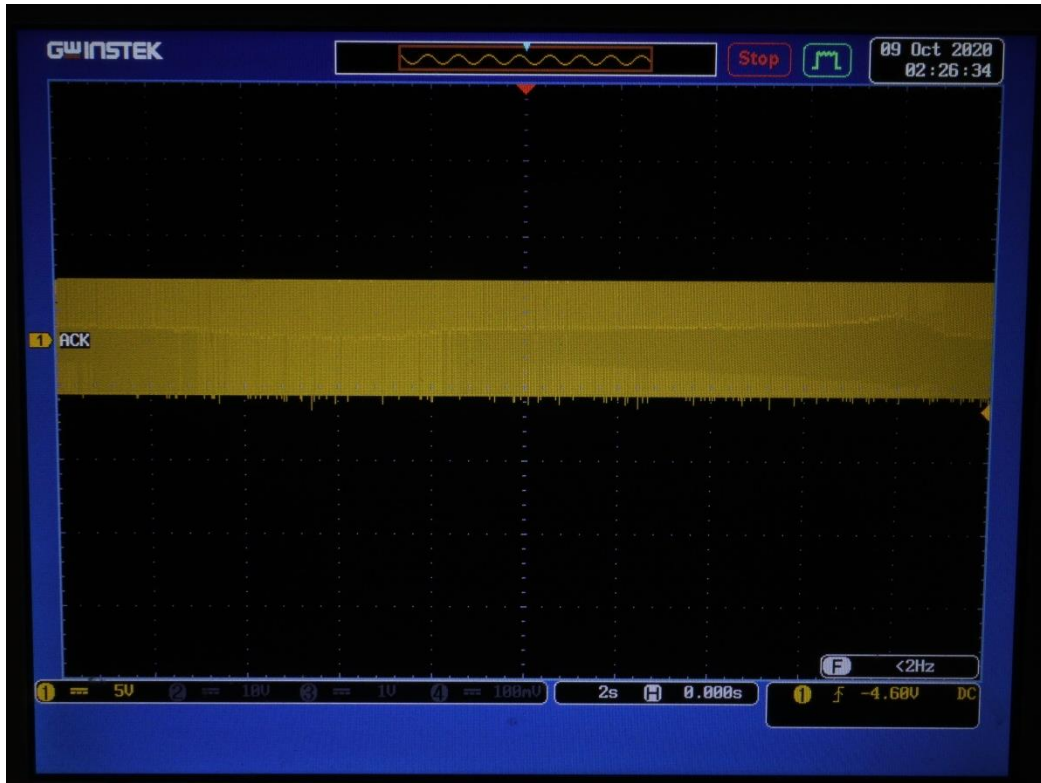




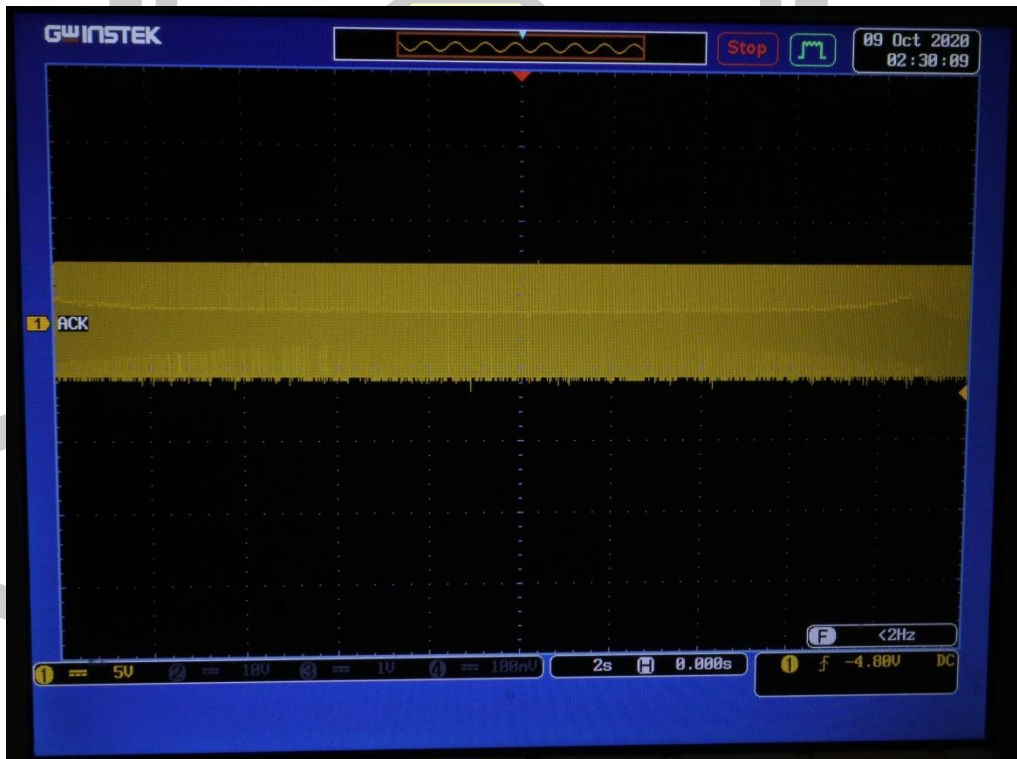
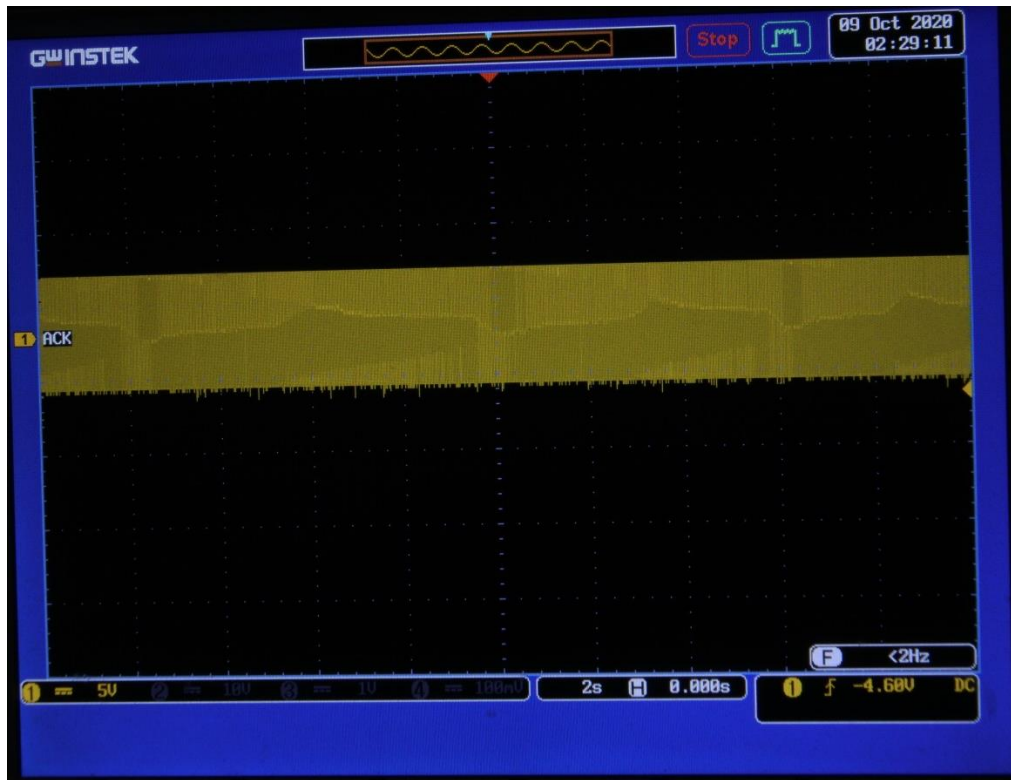


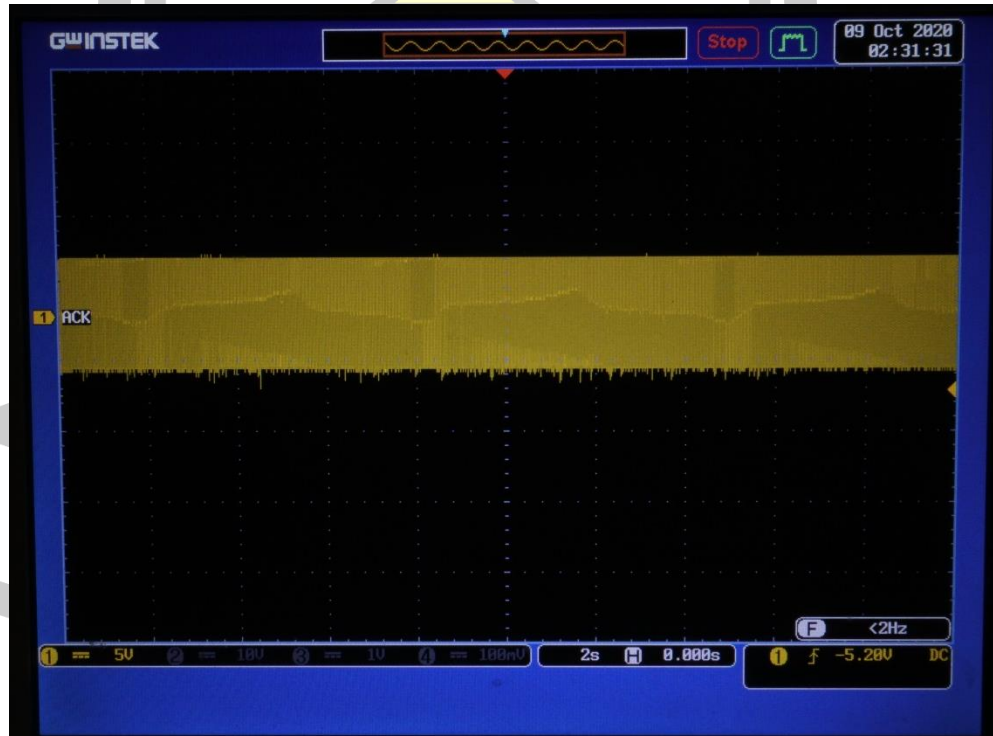
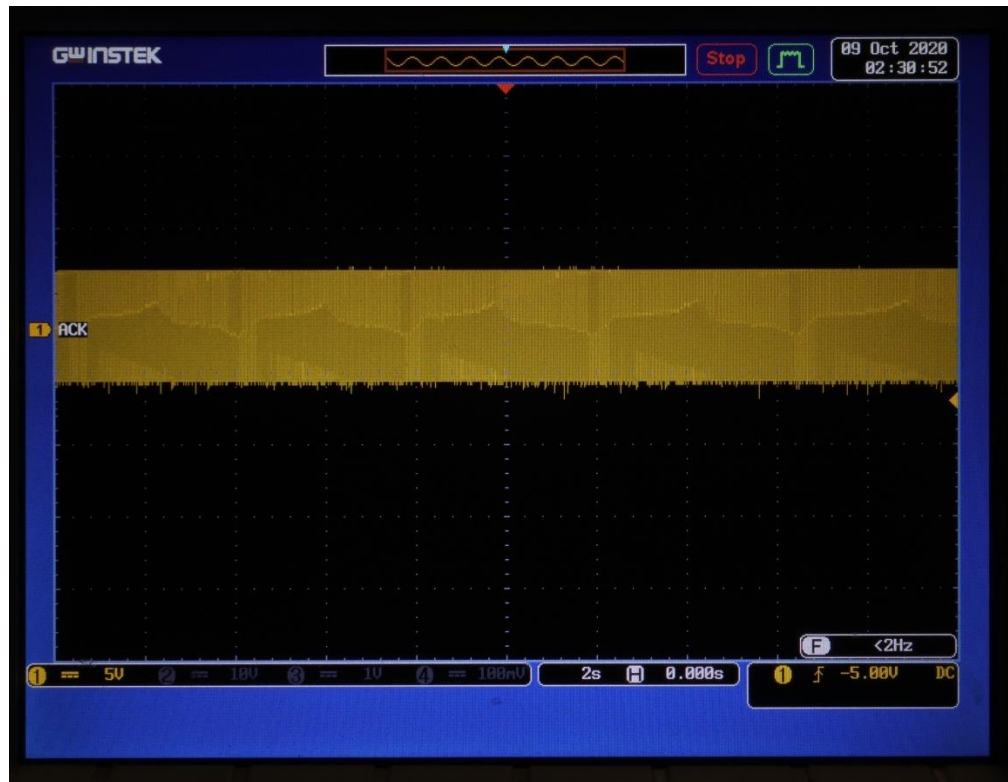


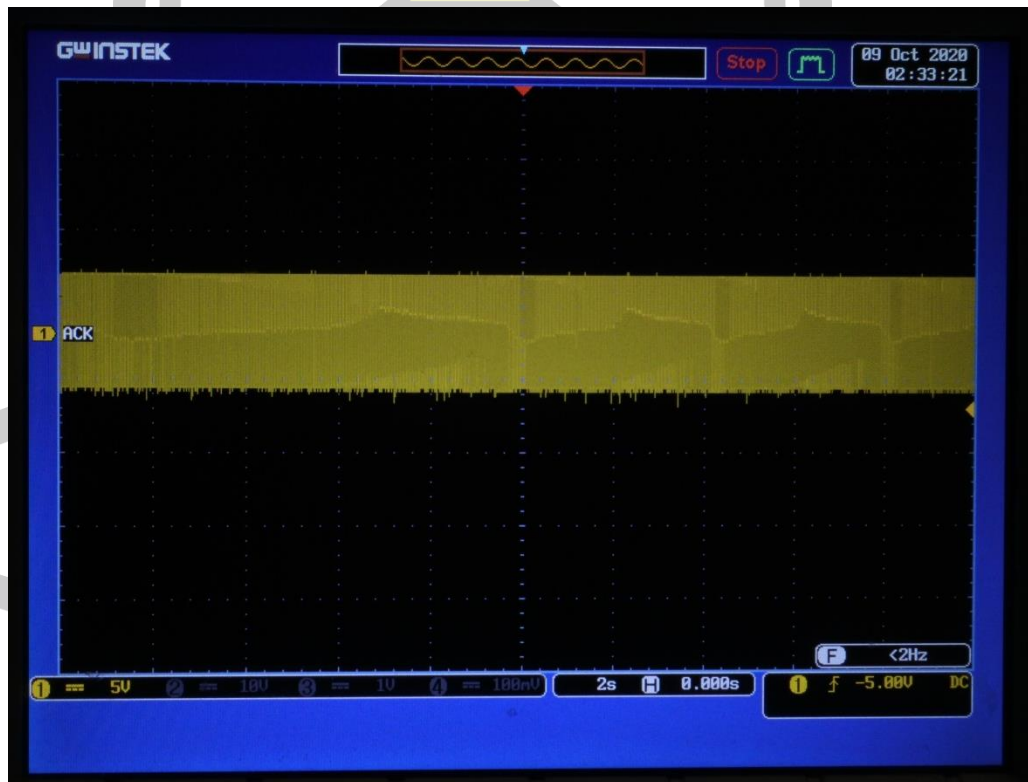
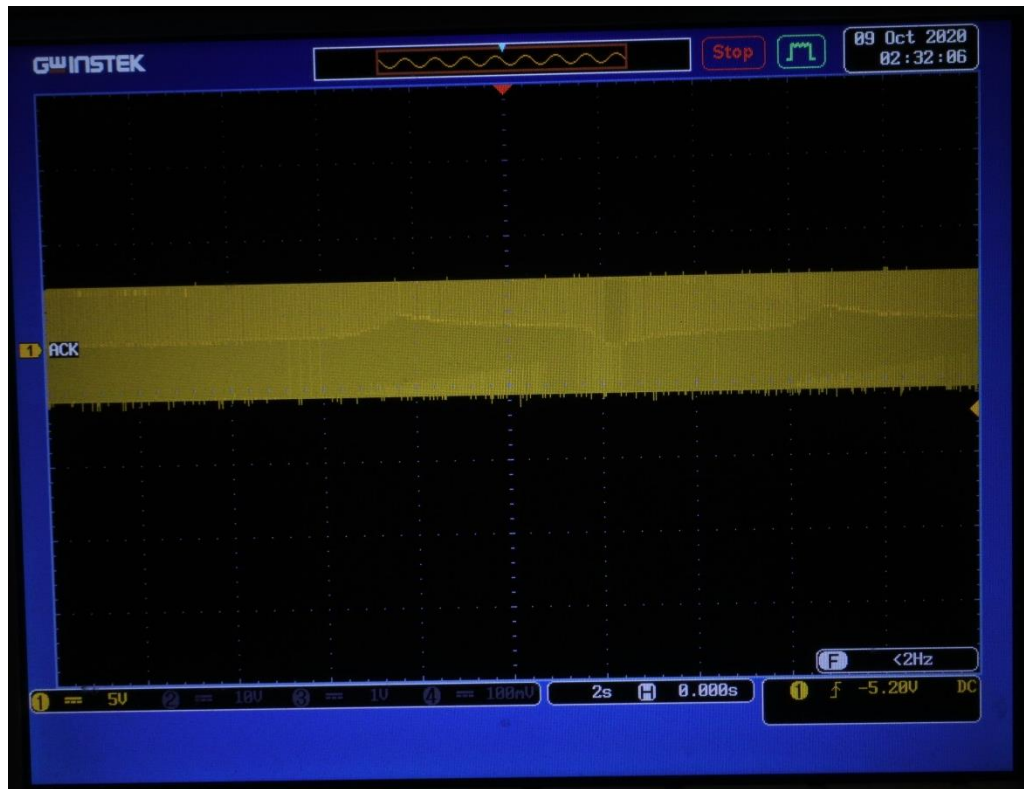


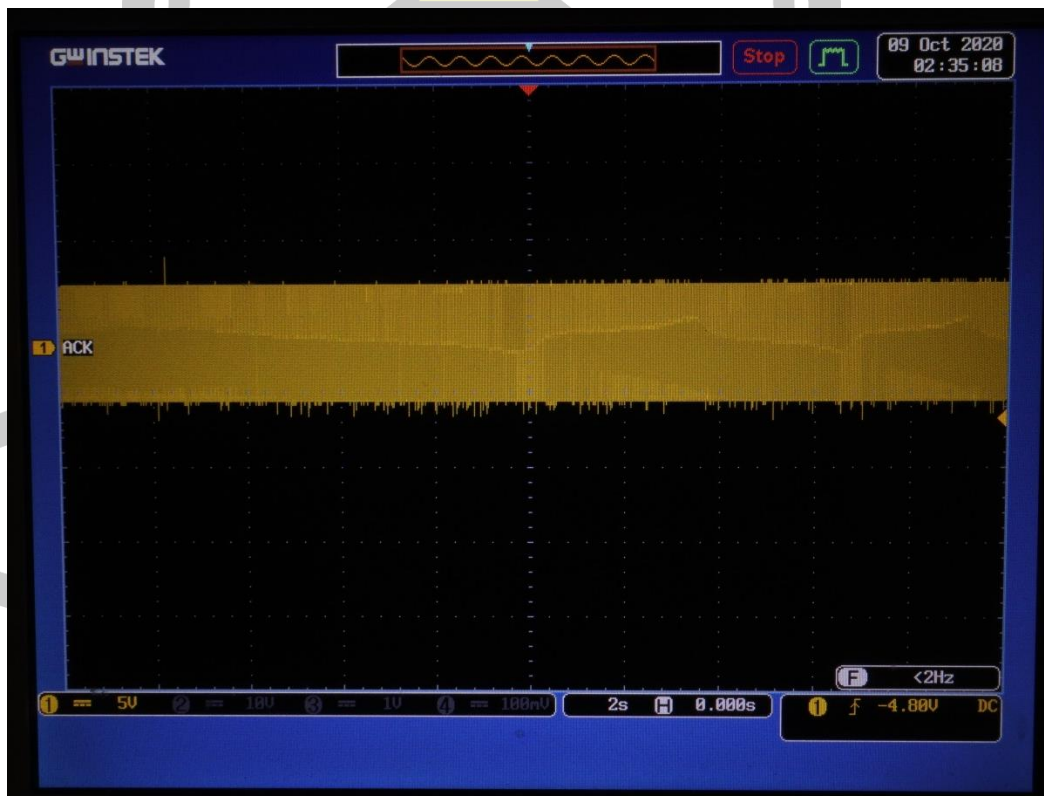
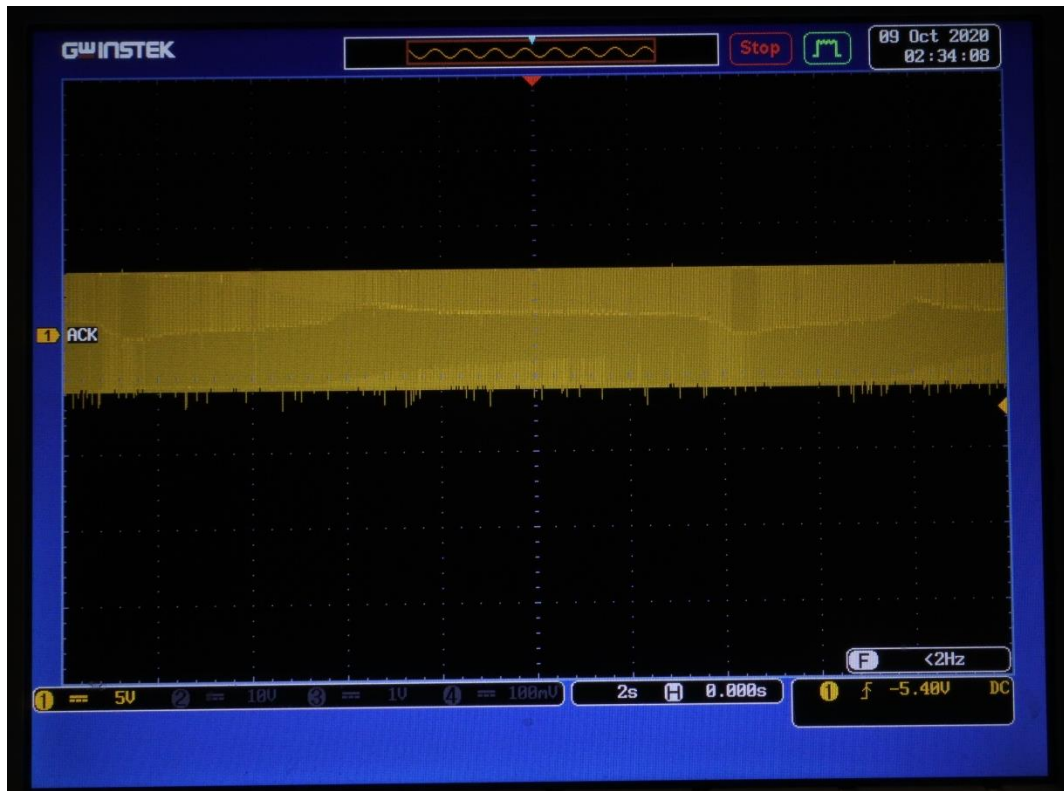




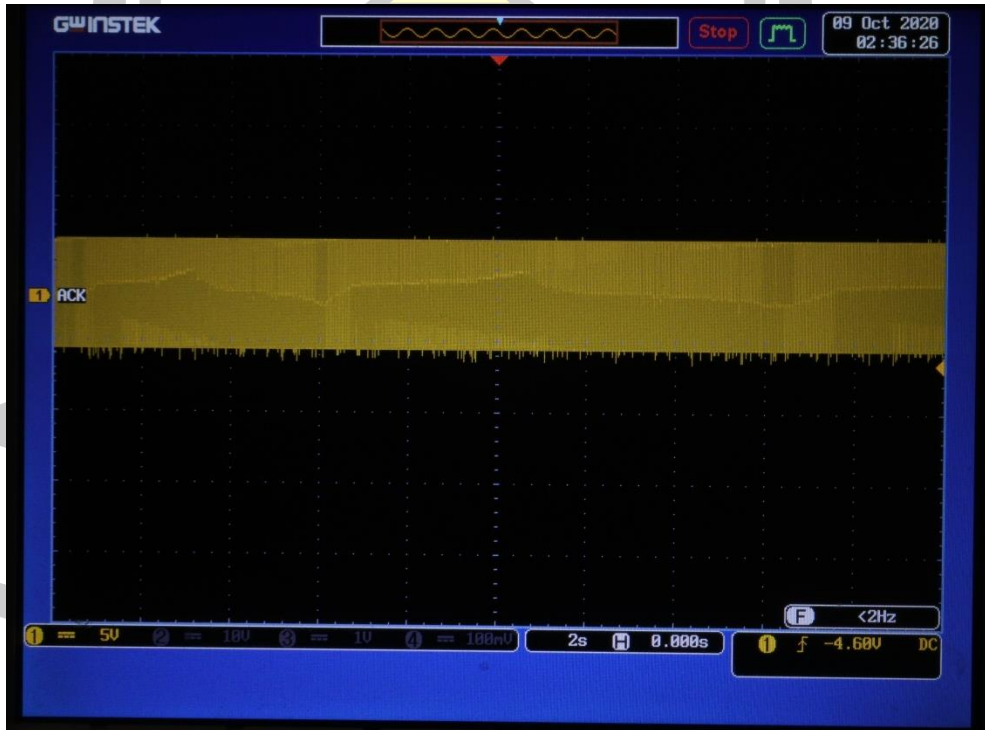
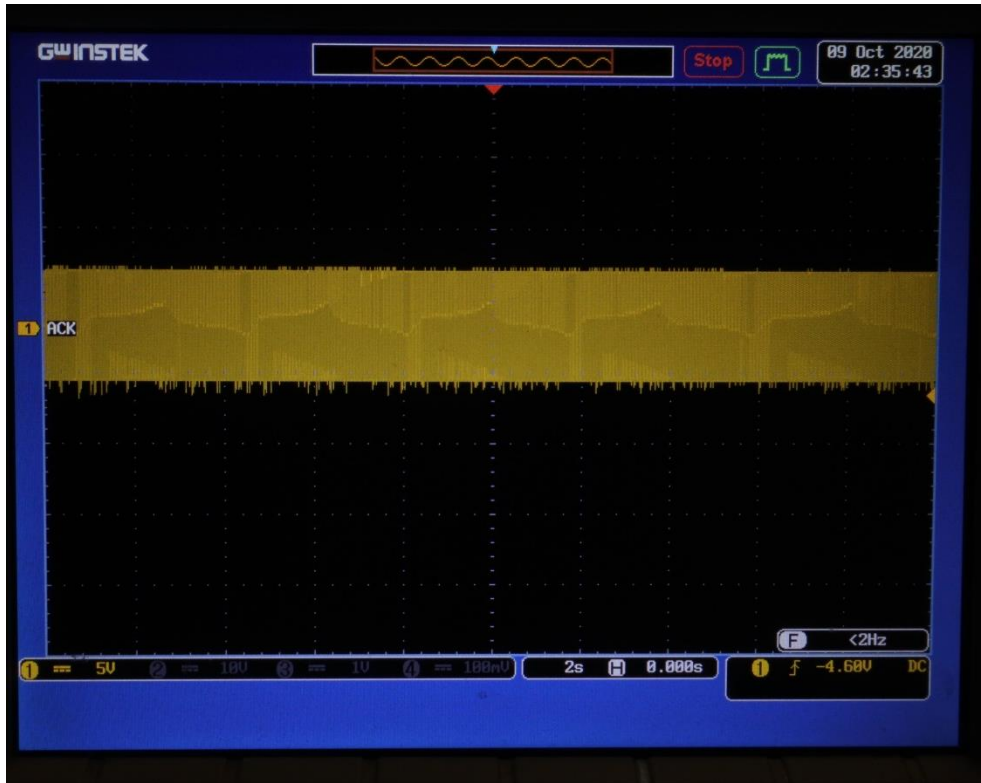




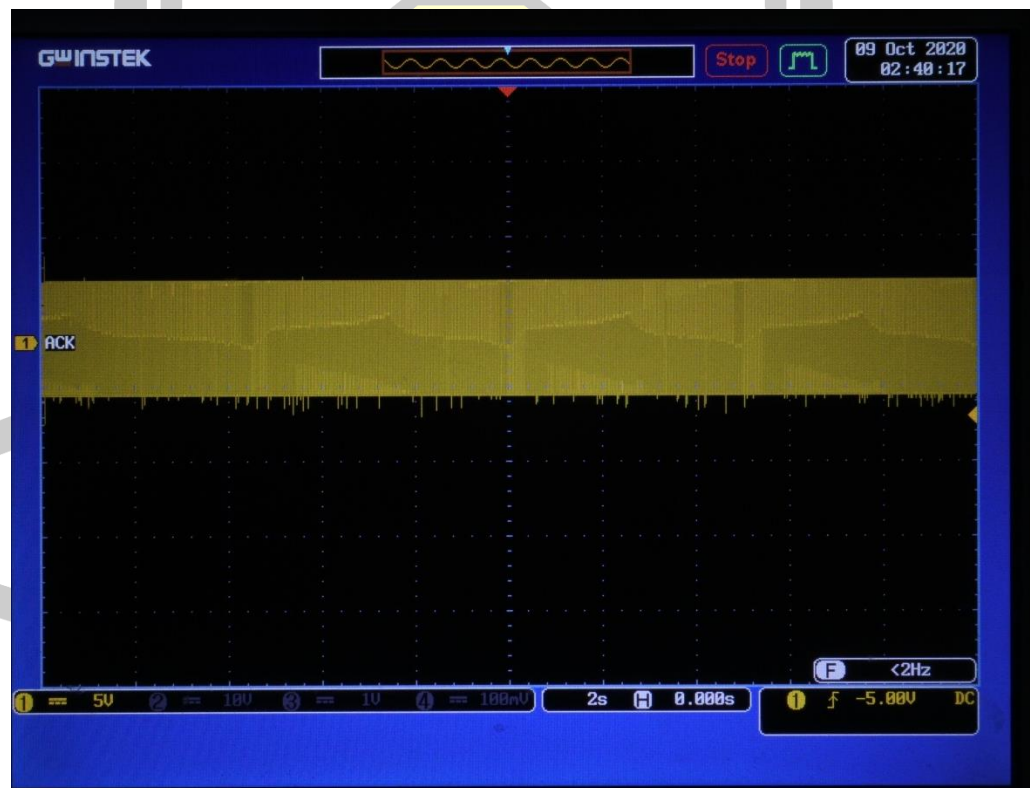
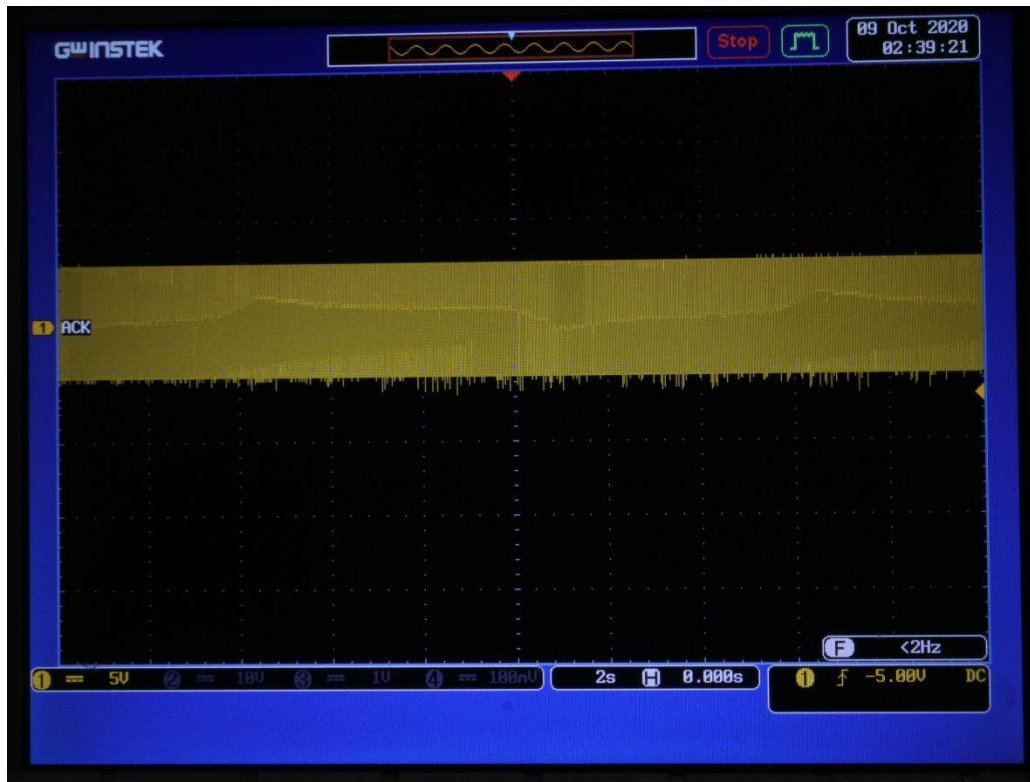


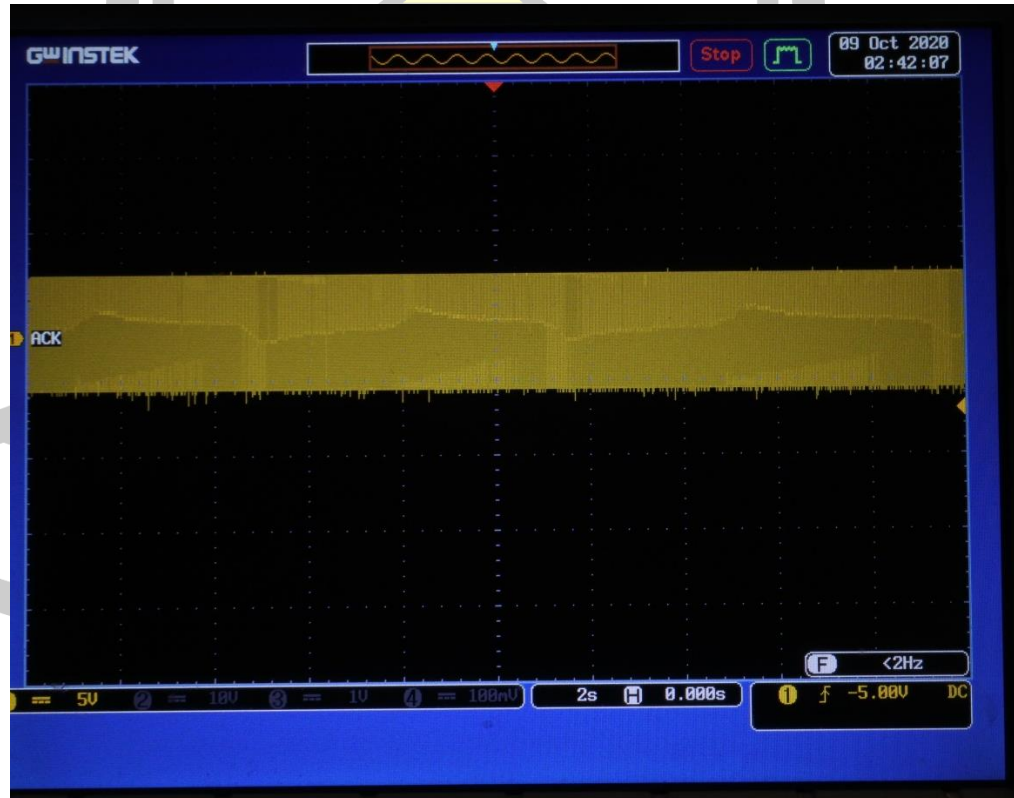
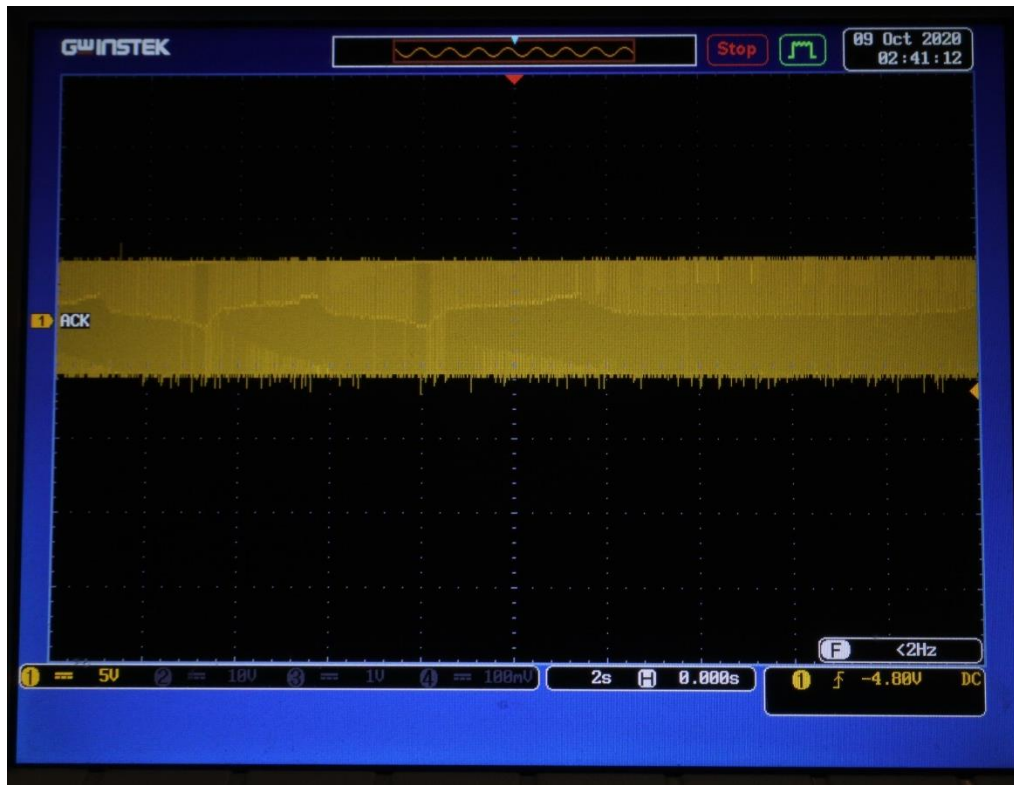


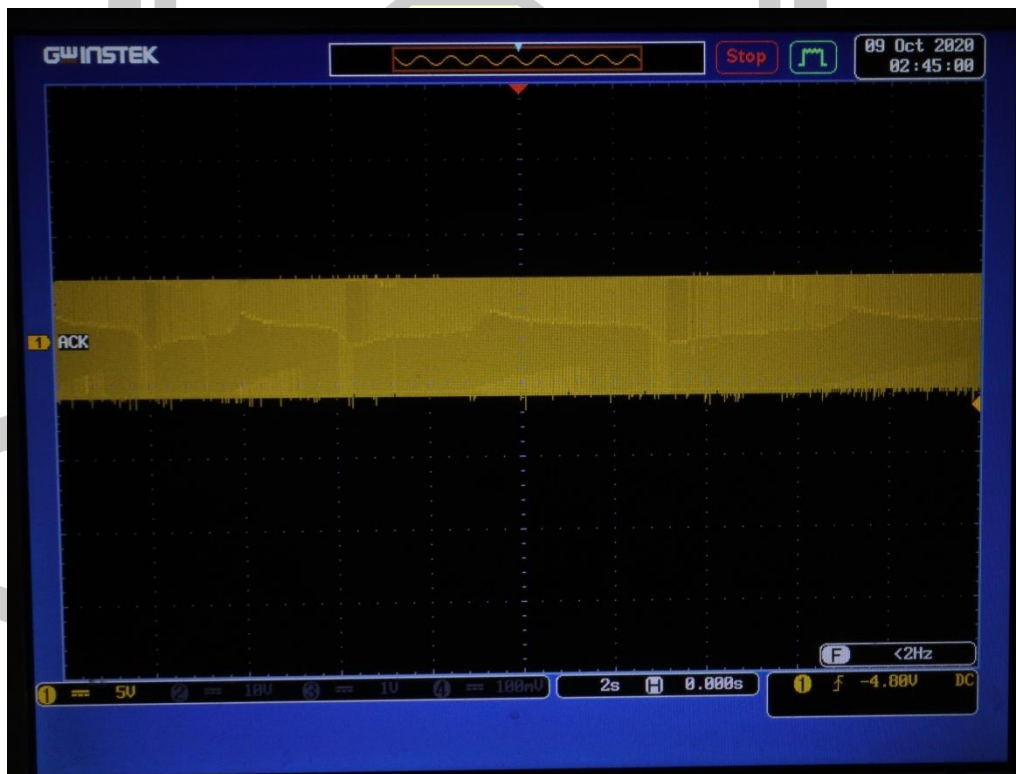
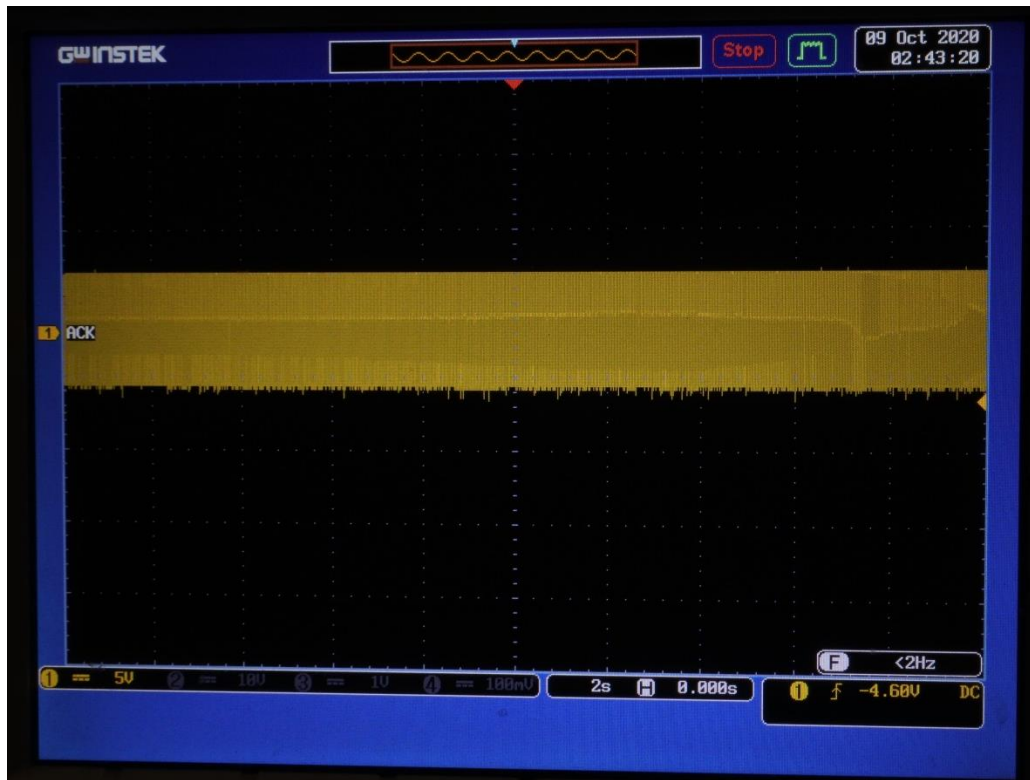


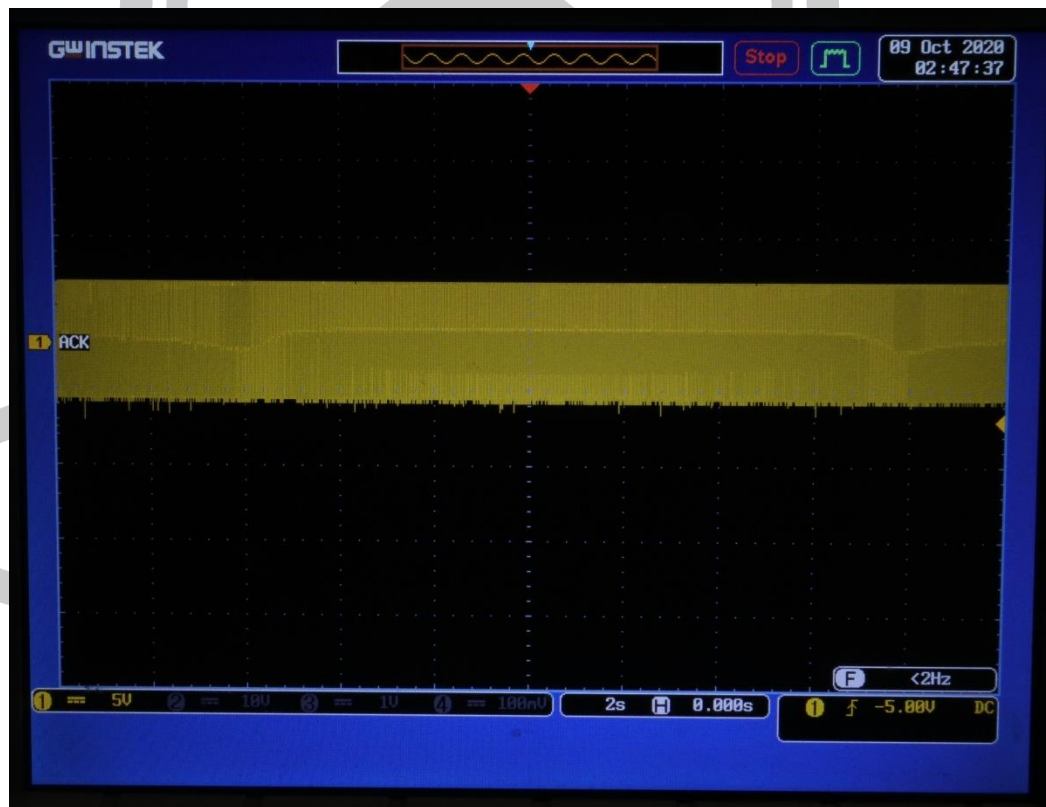
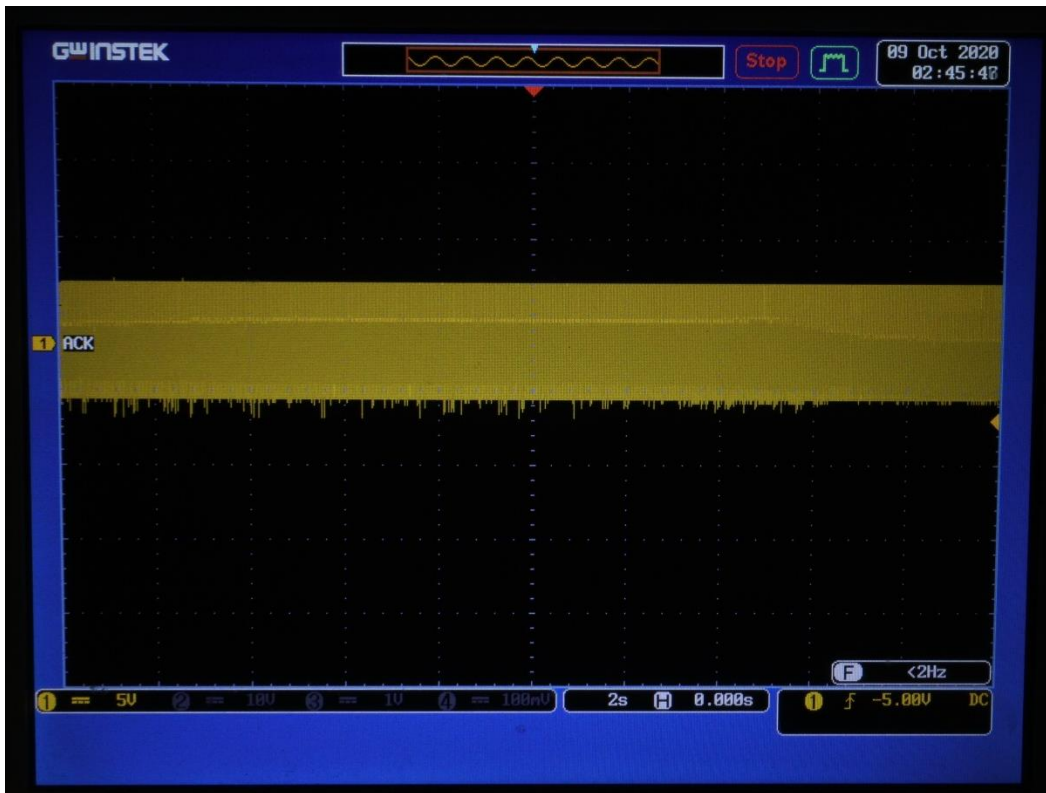




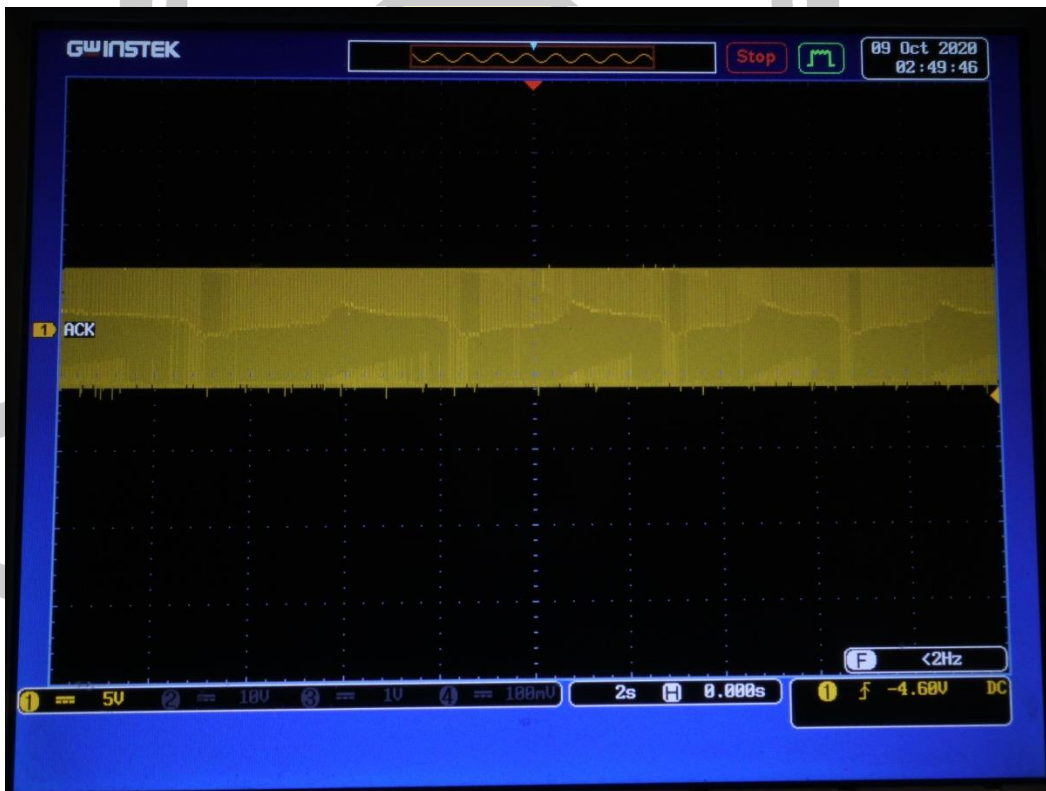
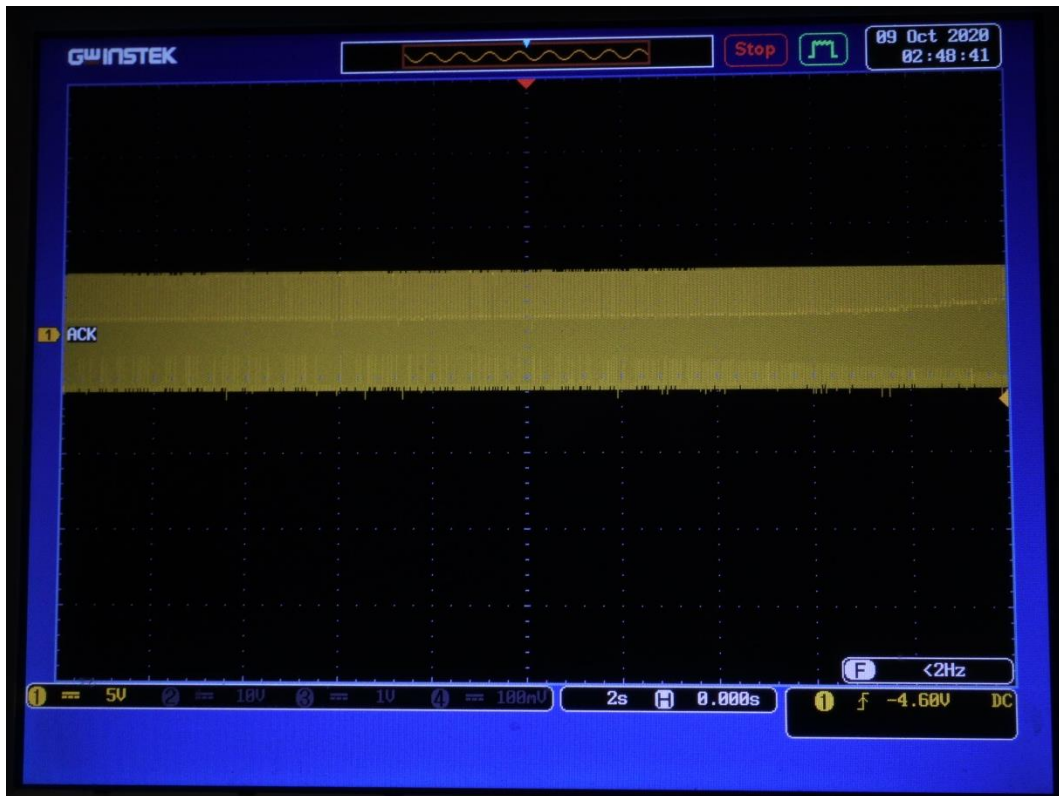




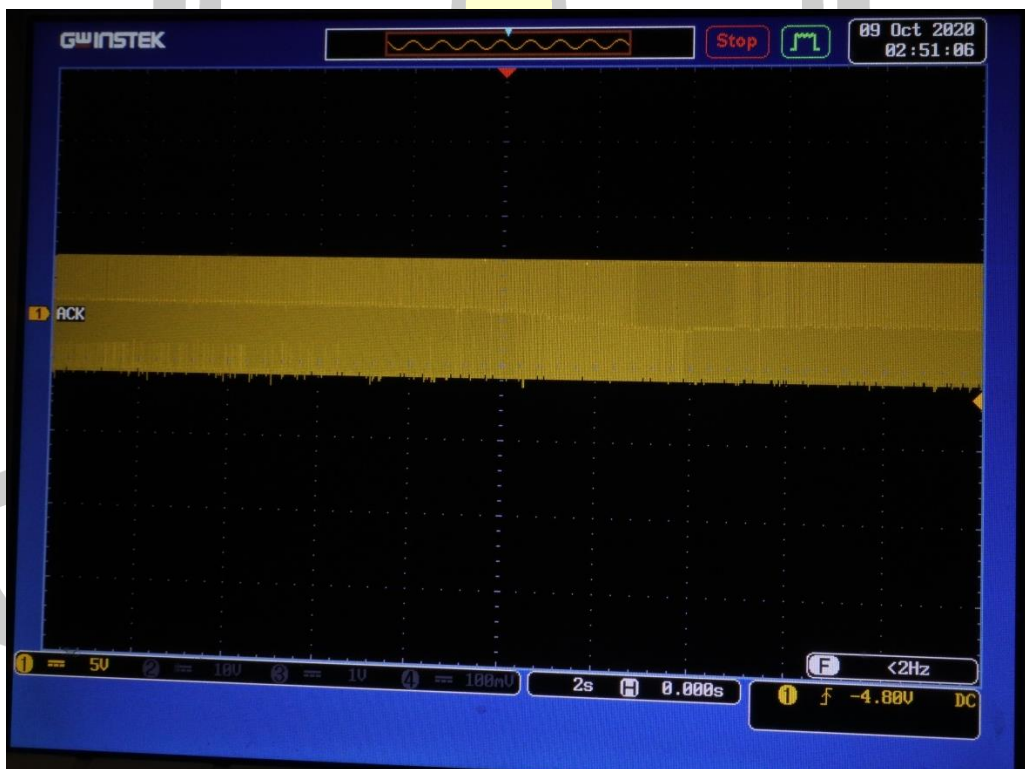
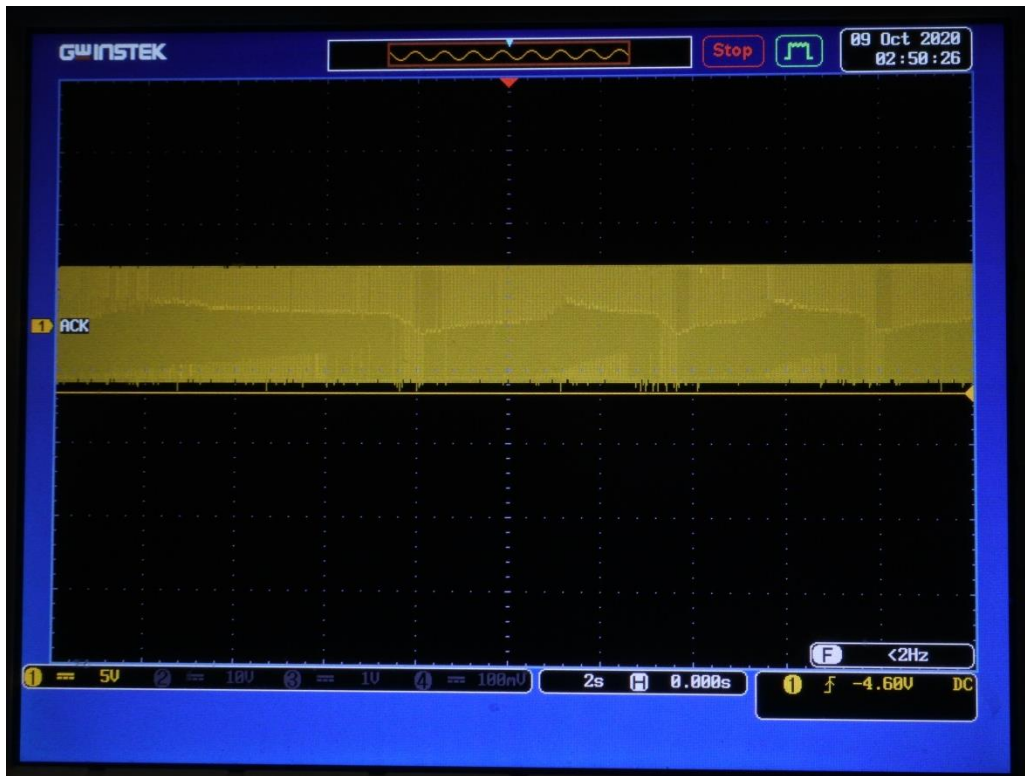












## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกฤษฎี เลิศล้ำ
วันเกิด	18 ตุลาคม 2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	102/5 บ้านหนองฟ้าเลื่อน ต.แจนแลน อ.กุฉินารายณ์ จ.กาฬสินธุ์ 46110
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยวิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บ.Shin-Etsu Silicones (Thailand) Limited ตั้งอยู่ เลขที่ 2 หมู่ 2 นิคมอุตสาหกรรมเอเชีย ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2558 มัธยมปลาย โรงเรียนบัวขาว จังหวัดกาฬสินธุ์ พ.ศ.2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนการศึกษาจากโครงการ WiL (Work-integrated Learning) โดยสำนักนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ร่วมกับภาคอุตสาหกรรม

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว