

เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและ  
เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของ  
เฮลมโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

INFRARED SMOKE DETECTOR AND HELMHOLTZ  
RESONATOR PHOTOACOUSTIC DETECTOR



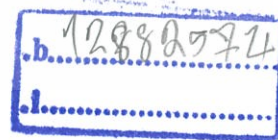
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและ  
เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของ  
เฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

INFRARED SMOKE DETECTOR AND HELMHOLTZ  
RESONATOR PHOTOACOUSTIC DETECTOR



เลขที่.....149303  
เลขทะเบียน.....12 กพ ๕๕๓  
วัน เดือน ปี.....12 กพ 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2558

# INFRARED SMOKE DETECTOR AND HELMHOLTZ RESONATOR PHOTOACOUSTIC DETECTOR



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS , FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2015

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์  
Infrared Smoke Detector and Helmholtz Resonator Photoacoustic Detector

ชื่อนักศึกษา นายธีรวัฒน์ แดงน้อย รหัสนักศึกษา 55051519  
นางสาวธีรศรา คำมา รหัสนักศึกษา 55051520  
นายนคร ทศนวิรุฬห์ รหัสนักศึกษา 55051521

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิชานันท์ ธีระขุฑุโสภณ ประธานกรรมการ	
อ.ธนภรณ์ สีสาวพัฒนานนท์ กรรมการ	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นายธีรารุณี แดงน้อย รหัสนักศึกษา 55051519 นางสาวธีรศรา คำมา รหัสนักศึกษา 55051520 นายนคร ทศนวิรุฬห์ รหัสนักศึกษา 55051521
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการออกแบบการและสร้างตัวตรวจวัดควัน โดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างตัวตรวจวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติก โดยใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ (HR-PA) ตัวตรวจวัดควันสามารถปรับความไวขยายการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด แต่ในโปรเจกต์นี้ได้กำหนดค่าไว้ เมื่อสัญญาณมีควันกับไม่มีควันให้แตกต่างกัน 2mV ส่วนตัววัด HR-PA มีความถี่ก่าถอนจากการทดลอง 814 Hz ในขณะที่จากการคำนวณ 780 Hz และเมื่อนำไปทดสอบสามารถวัดและพบค่าแถบพลังงานต้องห้ามของ ZnO เท่ากับ 380 nm หรือ 3.27 eV

คำสำคัญ : ความถี่ เฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ รังสีอินฟราเรด โฟโตอะคูสติก ความถี่ก่าถอน

Title	Infrared Smoke Detector and Helmholtz Resonator Photoacoustic Detector
Students	Mr.Teerawut Tangnoi Student ID 55051519 Miss Theerisara Khamma Student ID 55050120 Mr.Nakorn Tussanaviroon Student ID 55051521
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Assoc.Prof.Wicharn Techitdheera

### Abstract

In this special project we have designed and constructed smoke detector based on IR absorption (IR-Smoke Detector) and Helmholtz resonator based photoacoustic detector (HR – PA Detector). IR – Smoke Detector can vary its sensitivity to measure smoke but in this project 2 mV sensitivity as input different between smoke and no smoke was fixed. The resonance frequency 814 Hz was measured in HR – PA with respect to 780 Hz calculated value. Energy gap of ZnO was tested by HR – PA and found that the  $E_g$  equal to 380 nm or 3.27 eV

**Keywords :** Photoacoustic, Helmholtz cells, absorption, resonance, frequency

## กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากโครงการนี้สำเร็จลุล่วงเป็นไปได้อย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายที่ได้ให้คำปรึกษาและได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอดดังนั้นโครงการฉบับนี้จึงต้อง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด อีกทั้งยังได้ให้แนวทางการทำรายงานการวิจัยและยังแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาในส่วนที่ไม่เข้าใจ รวมถึงให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์การทดลอง คอยตรวจสอบการทำงานและคอยผลักดันให้งานได้ดำเนินการต่อไปได้อย่างลุล่วง

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เป็นคณะกรรมการ ที่คอยให้ความรู้และแนะนำข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขให้โครงการพิเศษนี้ดีขึ้น และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ที่ได้ให้โอกาสในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอบขอบคุณ รศ.ดร.วราวุฒิ เถาฉัตรดา และ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่ได้ให้ใช้อุปกรณ์ทางการทดลอง และได้อธิบายเนื้อหาในส่วนที่ไม่เข้าใจ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อกลุ่มของข้าพเจ้า อีกทั้งขอบคุณเพื่อนๆฟิสิกส์ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้ และกราบขอบพระคุณครอบครัว พ่อ แม่ ที่คอยเป็นกำลังใจในทุกๆด้าน ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง

ขอบขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆที่กลุ่มข้าพเจ้าได้นำมาอ้างอิงเพื่อประกอบความน่าเชื่อถือในการทำรายงาน ซึ่งคาดหวังว่ารายงานโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในงานทางด้านการประยุกต์ใช้การทำงานของเครื่องมือวัดควัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือให้กำลังใจในทุกสิ่งทุกอย่างต่อโครงการพิเศษนี้

ธีราวุฒิ แต่งน้อย

ธีรศรา คำมา

นคร ทิศนวิรุฬห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อและสัญลักษณ์	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 Photoacoustics	4
2.1.1 Photoacoustic effect	4
2.1.2 Helmholtz Resonator	5
2.1.3 Windowless Open Photoacoustic Helmholtz Cell	5
2.1.4 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้	8
2.1.4.1 แหล่งกำเนิดแสง	8
2.1.4.2 เครื่องแยกความยาวคลื่น	9
2.1.4.3 เครื่องตัดแสง	10
2.1.4.4 ระบบขยายสัญญาณ	11
2.1.4 ไมโครโฟน	12
2.1.5.1 ประเภทของไมโครโฟน	12
2.1.5.2 หลักการทำงานของไมโครโฟน	12
2.1.5.3 การเลือกใช้งานไมโครโฟนตามความเหมาะสม	16
2.2 Smoke Detection	17
2.2.1 ควัน	17
2.2.1.1 ควันดำ	17
2.2.1.2 ควันขาว	17
2.2.1.3 สารพิษต่างๆที่อยู่ในควันไฟ	18
2.2.2 แหล่งกำเนิดแสง	20
2.2.2.1 แสงอินฟราเรด	21
2.2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 Photo detector	24
2.2.3.1 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับเป็นตัวรับรู้	24
2.3 คลื่นความร้อน	26
2.3.1 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน	26
2.3.2 การแพร่กระจายความร้อน	29
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>34</b>
3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	34
3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	34
3.2.1 เครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	34
3.2.2 เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	35
3.3 สูตรการคำนวณการออกแบบเครื่องมือวัด	38
3.4 การออกแบบเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์	39
3.4.1 โปรแกรม solid works	39
3.4.2 การออกแบบเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	40
3.4.3 การออกแบบเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	41
3.4.4 เครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด ในแนวนอน	42
3.4.5 เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ในแนวนอน	43
3.5 วิธีการดำเนินงาน	46
3.5.1 วงจรอินฟราเรดดีเทคเตอร์	46
3.5.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	46
3.6 การทดสอบเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	47
3.7 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	48
3.8 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	49
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>50</b>
4.1 ผลการทดสอบระบบการทำงานของเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2. ผลการทดสอบระบบการทำงานของเครื่องมีผลวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้ หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	52
4.2.1 วัดสารตัวอย่าง Carbon black โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์	52
4.2.2 วัดสารตัวอย่าง Zinc oxide โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์	54
4.2.3 วัดสารตัวอย่าง Carbon black โดยปรับค่าความ ยาวคลื่น จาก 350 – 400 nm โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 811 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap	56
4.2.4 วัดสารตัวอย่าง Zinc Oxide โดยปรับค่าความ ยาวคลื่น จาก 350 – 400 nm โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 811 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	65
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวกก	
ภาคผนวกข	
ภาคผนวกค	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 การแบ่งช่วงความยาวคลื่นของแสงอินฟราเรดตามมาตรฐาน ISO 20473	22
4.1 ตารางบันทึกการเกิดเสียงของเครื่องมือวัดควีนโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	50
4.2 ผลการทดสอบค่าความถี่(Hz) และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า(V) จากสารตัวอย่าง Carbon black ที่ความยาวคลื่น 360 nm	52
4.3 ผลการทดสอบค่าความถี่(Hz)และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า (V) จากสารตัวอย่าง Zinc oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm	54
4.4 ผลการทดสอบค่าความยาวคลื่น(nm)และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า( $\mu$ V)จากสารตัวอย่าง Carbon black ที่ความถี่ 814 Hz	56
4.5 ผลการทดสอบค่าความยาวคลื่น (nm)และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า( $\mu$ V)จากสารตัวอย่าง Zinc oxide ที่ความถี่ 814 Hz	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	6
2.2	8
2.3	8
2.4	9
2.5	9
2.6	10
2.7	11
2.8	12
2.9	13
2.10	13
2.11	14
2.12	15
2.13	15
2.14	16
2.15	16
2.16	17
2.17	18
2.18	21
2.19	22
2.20	23
2.21	24
2.22	25
2.23	25
2.24	26
2.25	26
2.26	30
2.27	31
3.1	39
3.1 (ก)	40
(ข)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 (ก) เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งที่ออกแบบ โดยใช้โปรแกรม Solid works	41
(ข) เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งที่สร้างขึ้นมาตามทีออกแบบ	
3.4 โครงสร้างของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด ชนิดแนวนอนใน มุมมองวัดดูต่างๆ (a) มุมมอง Isometric ,(b) มุมมอง Diametric ,(c) มุมมอง Trimetric และ (d) Top ( มุมมองด้านบน )	42
3.5 โครงสร้างของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์ เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ชนิดแนวนอน ในมุมมองวัดดูต่างๆ (a) มุมมอง Isometric ,(b) มุมมอง Diametric ,(c) มุมมอง Trimetric และ (d) Top ( มุมมองด้านบน )	43
3.6 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	44
3.7 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์ เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	45
3.8 วงจรอินฟราเรดดีเทคเตอร์ แบบ Schematic	46
3.9 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน แบบ Schematic	46
3.10 การทำงานของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	47
3.11 การทำงานของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์ เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	48
3.12 แผนภาพระบบการทำงานของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	49
3.13 แผนภาพระบบการทำงานของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของ เฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	49
4.1 การเปรียบเทียบการติดไฟ LED ของระบบเมื่อไม่มีควัน	51
4.2 การเปรียบเทียบการติดไฟ LED ของระบบเมื่อมีควัน	51
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ค่าความต่างศักย์( $\mu\text{V}$ ) ในสารตัวอย่าง Carbon Black ที่ความยาวคลื่น 360 nm	53
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ค่าความต่างศักย์( $\mu\text{V}$ ) ในสารตัวอย่าง Zinc oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm	55
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )ของสาร ตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide ที่ความถี่ 814 Hz ในช่วงความยาวคลื่น 350 – 400 Hz	64
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )ของสาร ตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide ที่ความถี่ 814 Hz ในช่วงความยาวคลื่น 350 – 400 Hz	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ppm	หนึ่งในล้านในล้านส่วน Part Per Million
Hz	เฮิรต
v	ความเร็ว
$f$	ความถี่
$\lambda$	ความยาวคลื่น
c	ความเร็วเสียงในอากาศ 343 m/s
f	ความถี่เรโซแนนซ์
p	ของแสงฉายรังสีตัวอย่าง
kHz	กิโลเฮิรต
NDE	การวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย
MHz	เมกกะเฮิรต
m/s	เมตรต่อวินาที
S	พื้นที่ของหลอดเสียง
V	ปริมาตรของอากาศในโพรงเสียง
l	ความยาวของหลอดเสียง
L	ความยาวของท่อ
$\Psi$	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
$\gamma$	ความเร็วเสียงในของเหลวที่บรรจุเซลล์
nm	หน่วยวัดความยาวคลื่น นาโนเมตร
$\mu\text{m}$	หน่วยวัดความยาวคลื่น ไมโครเมตร
UV	อัลตราไวโอเล็ต
IR	Infrared
X-ray	รังสีเอ็กซ์
NIR	Near-Infrared
MIR	Mid-Infrared
FIR	Far-Infrared
LED	Light emitting diode
LDR	Light Dependent Resister
g	ความโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีเทคนิคหลายอย่างที่ถูกนำมาใช้ในการประยุกต์การใช้งานของเครื่องมือวัด smoke detector เพื่อให้เครื่องมือวัดควันเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากการศึกษาข้อมูลในทางด้านนี้เราจึงได้นำหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด มาประยุกต์ใช้ในงานทดลองของเรา เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับควันไฟต่างๆ อีกทั้งยังนำหลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ มาใช้ในการวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เพื่อหาสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้จากหลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

ควันในปัจจุบันนี้พบว่ามีหลายรูปแบบที่มาจากเผาไหม้ของวัตถุ ท่อไอเสีย ยาสูบ หรือการทำอาหาร ซึ่งควันนั้นจัดเป็นคอลลอยด์ ที่เป็นอนุภาคของของแข็งหรือของเหลว กระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นแก๊สที่มีอยู่ในอากาศจะถูกปล่อยออกมา เมื่อมีการเผาวัสดุหรือเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน พร้อมกับปริมาณของอากาศหรือผสมในมวลสารชนิดอื่น ซึ่งเป็นส่วนเกินจากผลที่เกิดขึ้นจากความร้อน

โดยเทคนิคเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ เป็นหลักการที่อาศัยการกำหนดของเสียง จากการออกแบบเครื่องมือ โดยพบว่าเราต้องคำนวณค่าความถี่ที่เครื่องมือวัดของเราสามารถที่จะวัดได้โดยเราจะนำค่าความถี่ที่คำนวณได้มาใช้ในการทดลอง และเพื่อตอบสนองความต้องการในปัจจุบัน เราก็ได้นำหลักการการดูดกลืนแสงของแสงอินฟราเรดเข้ามาเกี่ยวข้องในงานวิจัย สำหรับการวัดสัญญาณเตือนไฟไหม้ โดยเราได้ทำการทดสอบว่าหลักการที่เรานำมาใช้กับทั้งสองระบบ มีประสิทธิภาพมากเท่าไร เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปศึกษาต่อยอดงานวิจัย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์
- 2) เพื่อศึกษาการดูดกลืนของควัน
- 3) เพื่อสร้างและทดสอบการใช้งานของตัวตรวจวัดควันและตัวตรวจวัดโฟโตอะคูสติก

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) สร้างและทดสอบตัวตรวจวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด
- 2) สร้างและทดสอบตัวตรวจวัดโฟโตอะคูสติกโดยใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัยจะสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัยและวางแผนการทำงาน

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการทำงานของเฮล์มโฮลทซ์โรเซนเตอร์ กับหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือวัด

ขั้นตอนที่ 4 หาอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในการออกแบบ และออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือวัดโดยใช้โปรแกรม Solid Work

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประกอบอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบในการออกแบบสร้างเครื่องมือวัด

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดโดยใช้ควีนจากรูปเป็นสารตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์และสรุปผล

ขั้นตอนที่ 8 จัดทำรูปเล่มและเผยแพร่

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												
	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	
ขั้นตอนที่ 1	■	■											
ขั้นตอนที่ 2	■	■											
ขั้นตอนที่ 3			■	■	■	■	■						
ขั้นตอนที่ 4					■	■	■	■	■				
ขั้นตอนที่ 5								■	■	■			
ขั้นตอนที่ 6										■	■		
ขั้นตอนที่ 7											■	■	
ขั้นตอนที่ 8												■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เครื่องมือวัดที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริง
- 2) เราสามารถเข้าใจระบบการทำงานต่างๆของเครื่องมือวัดโดยอาศัยหลักการของ  
เฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ และหลักการดูดกลืนแสงของแสงอินฟราเรด
- 3) เราสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองได้
- 4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับควีนได้หลายประเภท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือวัดทั้งสองระบบได้แก่ ระบบที่วัดคว้นและระบบที่วัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ซึ่งระบบวัดคว้นจะอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและระบบวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งจะอาศัยหลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ ซึ่งการออกแบบสำหรับการทดลองหลักการของระบบนั้นพบว่า เราได้นำหลักการของเฮล์มโฮลทซ์เซลล์ ที่อธิบายถึงการประดิษฐ์เครื่องมือวัด พบว่าเป็นประโยชน์ต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเป็นอย่างดี

### 2.1 Photoacoustic Detector

#### 2.1.1 Photoacoustic effect

Photoacoustic เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุใด ได้รับแสง แล้วเกิดการเปลี่ยนรูปพลังงาน จนได้เป็นพลังงานเสียงออกมา

งานวิจัยด้าน photoacoustic นี้มีการทำวิจัยมามากกว่า 10 ปีแล้ว ซึ่งจะเป็นการวิจัยเพื่อ งานทางด้านการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย(NDE) และงานด้าน spectroscopy เพื่องาน trace gas detection เป็นหลัก กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อน (โดยกระบวนการ absorption ของวัตถุที่รับแสง) และกระบวนการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นคลื่นเสียง มักจะมีคุณสมบัติที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรเช่น ลักษณะของพลังงานแสงที่ให้กับวัตถุ (เช่น มีลักษณะเป็น pulse หรือถูก modulate ที่ความถี่ช่วงไหน ถ้าเป็นงาน photoacoustic spectroscopy จะใช้ modulation frequency ไม่เกิน 100 kHz ดังนั้นคลื่นเสียงจะอยู่ในรูปแบบของ sound และ low frequency ultrasound ส่วนถ้าเป็นงานด้านbiomedical imaging จะใช้ pulsed laser หรือ laser ที่ถูก modulate ในความถี่ย่าน MHz ซึ่งจะทำให้เสียงอยู่ในรูปแบบของ high frequency ultrasound) และคุณลักษณะของวัตถุที่รับแสงเอง(เช่นค่า optical absorption coefficient, ค่า thermal diffusivity, ค่า thermal expansion coefficient เป็นต้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 Helmholtz Resonator

Helmholtz Resonator ซึ่งตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ ชื่อ Hermann Ludwig Ferdinand Von Helmholtz (1821-1894) ตัวเครื่อง Helmholtz resonator จริงๆแล้ว เป็นรูปทรงกลม มีปากเปิด โดยทั่วไปจะมีหลอดยื่นเข้าไปด้านใน ซึ่งอากาศไหลเข้าไปและสั่น ผ่านทางช่องปากเปิดหรือหลอด ที่ความถี่ Resonance ซึ่งกำหนดโดยปริมาตรของอากาศด้านใน และความยาวของปากเปิดหรือหลอด

Helmholtz Effect นี้จะช่วยช่วยลด Peak ของความถี่ Resonance หลักและเพิ่มการตอบสนองเสียงเบส ถ้าไม้หน้าปราศจากความถี่ Resonance หลัก จะเกิดเสียงที่ไม่ชัดเจน และเสียงเบสจะหายไปอย่างมาก ในช่วงยุค 1800 เราจะพบว่ากระเือกขนาดของปริมาตรตัวกีตาร์กับ ขนาด sound hole นั้นมาจากประสบการณ์เป็นส่วนใหญ่ ช่างกีตาร์ส่วนมากยังไม่สามารถใช้ Helmholtz resonance ในการคำนวณในงานของพวกเขาได้

สมการความถี่ Resonance ของ Helmholtz สามารถเขียนได้ตามด้านล่าง

$$f = (c / \pi) (S / VL) \quad (1)$$

จาก  $f$  = ความถี่ Resonance

$c$  = ความเร็วเสียงในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (343 m/s)

$S$  = พื้นที่ของหลอดเสียง

$V$  = ปริมาตรของอากาศในโพรงเสียง

$L$  = ความยาวของหลอดเสียง

มีข้อจำกัดอยู่ 1 ข้อ ในสมการของ Helmholtz ในสมการนี้จะ Assume ว่าผนังของตัว Resonator จะเป็นวัตถุที่เป็น Rigid แต่ในความเป็นจริง side top back ของกีตาร์จะมีการสั่นสะเทือน เข้าและออกมากกว่าที่จะอยู่คงที่ ซึ่งจะส่งผลให้ ความถี่ Resonance จริง จะต่ำกว่าความถี่ที่คำนวณได้จากสมการ

### 2.1.3 Windowless Open Photoacoustic Helmholtz Cell

ปรากฏการณ์ที่ถือว่าเป็นข้อเสียของ Helmholtz cell ของ photoacoustic ที่พบว่ามีสัญญาณ photoacoustic ที่พื้นหลังที่เกิดจากการดูดซึมแสงจากหน้าต่างเซลล์ ถึงแม้ว่าจะมีวิธีที่ช่วยลดสัญญาณพื้นหลังนี้ เช่น การปรับคลื่นแสงหรือเวลากรองโดเมนของการตอบสนองของ photoacoustic จากตัวอย่างวิธีการที่ถูกจำกัด และการใช้งานเฉพาะ ไม่มีแบบที่สมบูรณ์จะลบสัญญาณพื้นหลังที่กล่าวถึง รายงานนี้ได้นำเสนอการออกแบบ windowless open photoacoustic Helmholtz cell และผลการวัดเบื้องต้นของการตอบสนองความถี่ของการตอบสนองการวัด เช่น เซลล์ การกำจัดของหน้าต่างกำจัดแหล่งที่มาหลักของสัญญาณพื้นหลัง photoacoustic นอกจากนี้ การออกแบบที่นำเสนอช่วยให้กระแสดำกัก หรือบังคับการไหลของของเหลวที่บรรจุในเซลล์ เป็นผลให้เซลล์สามารถดัดแปลงได้ง่ายอย่างต่อเนื่องในเวลาจริงวัด photoacoustic ภายใต้การเลือกที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมของขนาดเซลล์ Q-factors ดังกล่าวแบบเปิด photoacoustic Helmholtz resonators มีความใกล้เคียงกับปัจจัยของ Q- factors ที่สอดคล้องกับแบบปิดเซลล์ Helmholtz

การออกแบบของ photoacoustic cell ได้ถูกสร้างขึ้นอย่างมากมาย ในการประยุกต์การใช้งาน อีกทั้งยังมีปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาคือ ขนาดของสัญญาณ photoacoustic (A) จะเป็นไปตามสมการ [11]

$$A \propto \frac{P}{fV} Q \quad (2)$$

เมื่อ P คือ power ของแสงที่ฉาย

f คือความถี่ของการตกกระทบของแสง

V คือปริมาตรของเซลล์,

Q คือควอลิตี้แฟคเตอร์ของเซลล์ ถ้าแสงที่ถูกปรับที่ความถี่ resonance ของเซลล์ ตามสมการที่ 1 ความถี่ของการตั้งค่าจะเปลี่ยนแปลงได้ไม่กัวิธี(ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการประยุกต์ใช้งานมากมาย), นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อการออกแบบ photoacoustic cell อีกมากมาย

ไอเสียของ Photoacoustic Helmholtz การออกแบบเซลล์ซึ่งมักจะใช้ใน photoacoustic โดยเฉพาะในการตรวจสอบกลุ่มของตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยในกรณีที่ยางที่เป็น acoustic ซึ่งโครงสร้างจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่ได้พัฒนาโดยเชื่อมต่อกันท่อ โดยการสั่นพ้องด้วยความถี่  $f_0$  ของโครงสร้างดังกล่าวสามารถหาได้โดย [11]

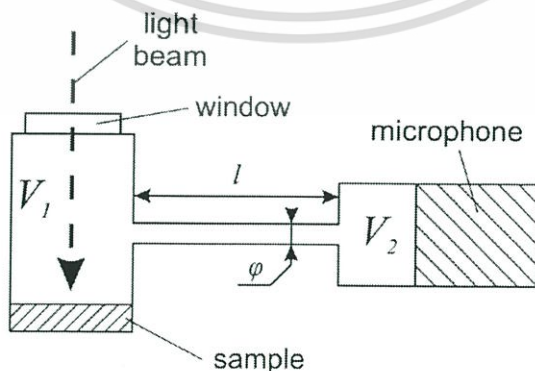
$$f_0 = \frac{v\varphi}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{l} \frac{v_1+v_2}{v_1v_2}} \quad (3)$$

เมื่อ  $V_1, V_2$  คือ cavity volume

l คือ ความยาวท่อ

$\Psi$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$\gamma$  คือ ความเร็วเสียงในของเหลวที่บรรจุเซลล์



รูปที่ 2.1 แบบร่างของเซลล์ Helmholtz acoustic resonator [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสังเกตได้ง่ายจากสมการ ในทางตรงกันข้ามกับเซลล์ที่ขึ้นอยู่กับการยืน resonance คลื่นเสียงสะท้อนความถี่ของไอเสีย Helmholtz ไม่ได้เป็นฟังก์ชันที่เรียบง่ายของขนาดของมัน เนื่องจากกลไกต่างๆของการสั่นพ้อง ซึ่งในกรณีของ Helmholtz เซลล์ผลลัพธ์จากการกระตุ้นความดันของลูกสูบ เช่น ในช่องตัวอย่างที่นำไปสู่ความดันคลื่นการเปลี่ยนแปลงในการพัฒนาการและกระแสของเหลวที่บรรจุเซลล์

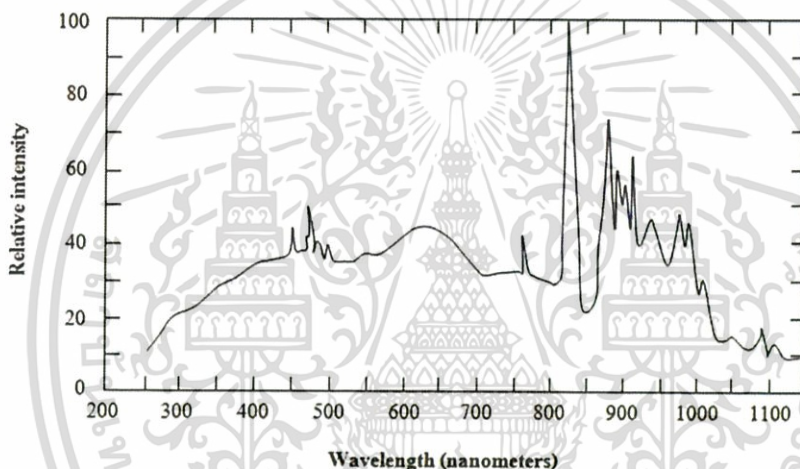
แม้แสดงให้เห็นถึงข้อดีหลายประการของไอเสีย Helmholtz โครงสร้างถ้านำไปใช้ในการวัด Photoacoustic เนื่องจากช่วงทั้ง 2 ช่วงเป็นไปได้ที่จะใช้  $\frac{1}{2}$ " หรือ 1" ไมโครโฟนในขณะที่เก็บผลรวมปริมาณของเซลล์ขนาดเล็กไม่กี่  $\text{cm}^3$  ซึ่งจะส่งผลให้ระดับสัญญาณสูงขึ้นดู  $Eq1$  พร้อมกันแม้ว่า Q-factor ของ Helmholtz resonators ไม่สูงมากซึ่งมักประมาณ 20 เพิ่มเติมเพื่อความไวของการตั้งค่า สมการ 2 แสดงให้เห็นว่าแม้ในขนาดที่ค่อนข้างเล็กก็เป็นไปได้ที่เสียงสะท้อนความถี่ค่อนข้างต่ำซึ่งอาจใช้กับการเพิ่มขึ้นต่อไปในสัญญาณออก ในทางตรงกันข้ามความถี่ของเสียงสะท้อนสามารถปรับในช่วงกว้างที่เหมาะสมขนาดของเซลล์เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวท่อจึงแทบไม่มีผลในการรวมปริมาตรเซลล์) ช่องคู่-ช่องของไอเสีย Helmholtz ช่วยแยกกลุ่มตัวอย่างจากไมโครโฟน และป้องกันปฏิกิริยาของแสงกับไมโครโฟน ซึ่งจะผลิตสัญญาณ Photoacoustic พื้นหลังที่เกิดจากการดูดกลืนแสงโดยไมโครโฟน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงโครงสร้าง ช่องคู่-หรือหลายช่อง ใช้สำหรับการสร้างที่ง่ายของการตอบสนองความถี่ และลดการซับซ้อนของการดำเนินงานของการตั้งค่า ความแตกต่างที่อาจจะใช้สำหรับการลดลงของเสียง Acoustic เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นในสัญญาณวัดถ้าไมโครโฟนอยู่ในช่วงที่แตกต่างเฟสสัญญาณ 180 องศา

ตามที่กล่าวถึงข้อดีโครงสร้าง Helmholtz อาจดูเป็นทางออกที่สมบูรณ์แบบสำหรับการใช้งาน Photoacoustic ใดๆในขณะที่ส่วนใหญ่จะใช้ในการตรวจสอบของแข็ง

## 2.1.4 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้

### 2.1.4.1 แหล่งกำเนิดแสง

ในการจัดระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโตรสโกปี เราจะใช้หลอดปล่อยประจุซีนอนขนาด 450 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้ให้ความยาวคลื่นในช่วง 200 – 2500 นาโนเมตร จากการอาร์คระหว่างขั้วในหลอดที่ถูกบรรจุแก๊สซีนอนเอาไว้ภายในหลอดปล่อยประจุชนิดความดันสูงประเภทซีนอน(Xe lamp) จะทำงานที่ความดันช่วง 50-70 บรรยากาศ และเป็นแหล่งกำเนิดที่มีประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความเข้มสูงจาก 230-2,000 nm สเปกตรัมการปลดปล่อยส่วนใหญ่จะเป็นแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงระหว่าง 800-1,000 nm จะมีความเข้มสูงสุด



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดซีนอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูงกำลังที่ได้สามารถให้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.3 แหล่งกำเนิดแสง Xe lamp  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยแสงจะออกจากแหล่งกำเนิดแสงแล้วเข้าสู่ entrance slit แล้วตกกระทบที่กระจก และสะท้อนไปยังเกรตติง เกรตติงจะทำหน้าที่แยกแสงและได้แสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมค่าหนึ่ง แสงความยาวคลื่นเดียวนี้จะตกกระทบกระจกและสะท้อนออกมาทาง exit slit ดังนั้น เครื่องแยกความยาวคลื่นนี้จึงต้องมีโปรแกรมควบคุมเพื่อสะดวกต่อการใช้งาน โดยโปรแกรมจะสามารถกำหนดขนาดของ entrance-exit slit ได้ ซึ่งควรมีค่าน้อย เพราะจะทำให้แสงที่ออกมาที่มีความคม และโปรแกรมจะสามารถเลือกความยาวคลื่นของแสงได้ โดยจะไปสั่งการให้เกรตติงหมุนจนได้แสงที่มีความยาวคลื่นตรงตามที่ต้องการนั่นเอง

### 2.1.4.3 เครื่องตัดแสง

เครื่องตัดแสง เป็นเครื่องที่มีลักษณะเป็นวงล้อใบพัดแยกเป็นส่วนๆ เป็นวิธีมอดูเลตแสงที่ง่าย มีประสิทธิภาพ และมีคุณภาพปรับความเร็วได้ และมีสัญญาณรบกวนในการสั้นของแสงที่โดนตัดต่ำ จึงมีการนำมาใช้ในการค้าอย่างแพร่หลาย เครื่องตัดแสงมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปแบบการมอดูเลตและความถี่ คือ มันจะมอดูเลตแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และสามารถตัดแสงในย่านความถี่จาก 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์เท่านั้น(ความถี่ในการตัดแสงสูงสุดถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ ส่วนความถี่ในการตัดแสงค่าต่ำสุดมีผลมาจาก Phase jitter ที่สูง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำมอเตอร์จะทำงานได้ไม่ดี เพราะต้องควบคุมการหมุนให้มีความเร็วต่ำ)

Mechanical Chopper จะทำหน้าที่ให้การมอดูเลตแสง โดยใช้ใบพัดที่เป็นวงล้อในการตัดแสงเป็นช่วงๆ เพราะในการวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติคจำเป็นต้องวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความดันในโฟโตอะคูสติคเซลล์ ซึ่งตัวตัดแสงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณอ้างอิงแก่เครื่องขยายสัญญาณ Lock-in Amplifier ด้วย



รูปที่ 2.6 ภาพเครื่องตัดแสง

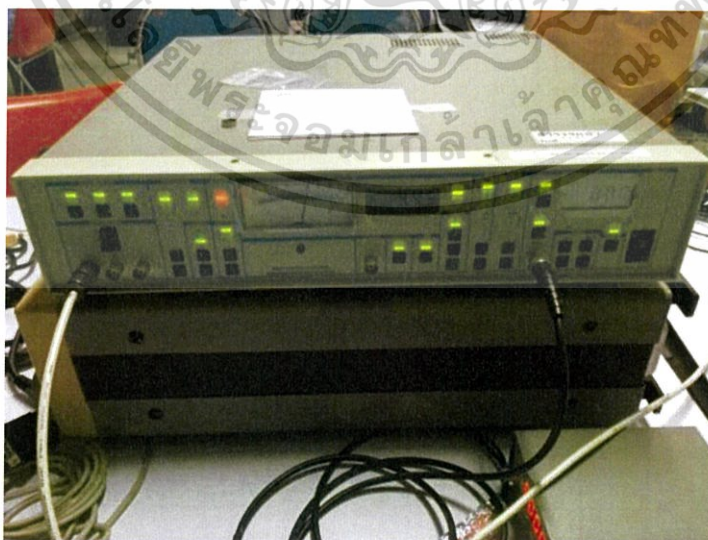
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4.4 ระบบขยายสัญญาณ

ตัวขยายสัญญาณ หรือ วงจรขยายสัญญาณ(Electronic Amplifier or Amplifier) หรือเรียกสั้นๆ ว่า Amp เป็นอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณ โดยการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟและการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีรูปร่างเหมือนสัญญาณอินพุต แต่มีขนาดใหญ่กว่า คือตัวขยายสัญญาณทำการกล้ำสัญญาณ(modulate) เอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟ

เครื่องขยายสัญญาณลือคอินจะถูกนำมาใช้ในการลดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนการวัด เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์มีขนาดเล็กมากในระดับไมโครโวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องขยายสัญญาณลือคอินที่มีการวัดสัญญาณด้วยวิธี Phase-Sensitive Detection (PSD) ที่ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณด้วย Bandwidth ที่แคบมากๆ เราจึงสามารถวัดสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

จากรูปที่ 2.2 สัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์จะถูกต่อเข้ากับอินพุตของเครื่องขยายสัญญาณลือคอิน ผ่านโวลต์เตจอินพุตแบบซิงเกิลเอนด์ที่มีสัญญาณ A บนแผ่นหน้าเครื่อง(Single Ended, A) จากนั้นเราจะปรับให้สัญญาณผ่านตัวกรองสัญญาณทั้งแบบ Bandpass Auto tracking และ Notch ต่อมาสัญญาณจะผ่านส่วนขยายสัญญาณก่อนจะเข้าสู่ส่วน Phase-Sensitive Detection ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่มีเฟสหรือความถี่เดียวกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อทำการบวกหรือลบสัญญาณ สัญญาณลัพธ์ที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของกระแสตรงก่อนผ่านวงจรกรองแบบ Low pass และจะขยายสัญญาณอีกครั้ง โดยสัญญาณเอาต์พุตสามารถอ่านได้จากหน้าจอดีเอสดี



รูปที่ 2.7 ภาพ lock-in amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน คืออุปกรณ์รับเสียงแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อประมวลผลในเครื่องขยายเสียงหรืออุปกรณ์ผสมเสียงอื่น ๆ ไมโครโฟนประกอบด้วยขดลวดและแม่เหล็กเป็นหลัก เมื่อเสียงกระทบตัวรับในไมโครโฟน จะทำให้ขดลวดสั่นสะเทือนติดกับสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นหลักการทำงานตรงข้ามกับลำโพง โดยทั่วไปไมโครโฟนใช้รับเสียงพูดหรือเสียงร้องเพลง ดังนั้นไมโครโฟนจึงมีการแบ่งแยกชนิดต่าง ๆ ตามองค์ประกอบหรือชิ้นส่วนที่ประกอบขึ้นมาเป็นตัวไมโครโฟน โดยไมโครโฟนที่นิยมใช้กันมีอยู่ 5 ประเภท โดย 3 ประเภทแรกที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นไมโครโฟนระดับมืออาชีพระดับโพรเฟสชันนอล (Professional) อีก 2 ประเภทไม่ใช่ไมโครโฟนระดับโพรเฟสชันนอล คือ

- 1.แบบมูฟวิงคอยล์(Moving coil)
- 2.แบบริบบอน (Ribon)
- 3.แบบคอนเดนเซอร์หรือคาปาซิเตอร์(Condenser/Capacitor)
- 4.แบบคาร์บอน (Carbon)
- 5.แบบคริสตอลหรือแบบเซรามิก(Crystal Ceramic)

นี่คือการแยกประเภทจากโครงสร้างหรือจากองค์ประกอบของไมโครโฟน

#### 2.1.5.1 ประเภทของไมโครโฟน

1. ไมโครโฟนแบบไดนามิกมูฟวิงคอยล์ (Dynamic Moving Coil Microphone) หรือที่เรียกสั้นๆว่าไดนามิกไมโครโฟน อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นไมโครโฟนที่ใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของขดลวดตามเสียงที่มากระทบ และเมื่อขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กถาวร ก็จะเกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามคลื่นเสียงนั้น ไมโครโฟนชนิดนี้เป็นที่นิยมแพร่หลาย ครอบคลุมการใช้งานเกือบทุกประเภท เพราะสามารถรับเสียงในย่านกว้างทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูงได้



รูปที่ 2.8 รูปไมโครโฟนแบบไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์ (Condenser Microphone) เป็นไมโครโฟนที่ออกแบบโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ตามเสียงที่มากระทบแผ่นฉนวนที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลทสองแผ่น โดยส่วนใหญ่ไมโครโฟนประเภทนี้จะต้องมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเช่น ถ่านไฟฉายอยู่ด้วย สามารถตอบสนองความถี่สูงได้ดีมาก



รูปที่ 2.9 รูปไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์

3. ไมโครโฟนแบบไร้สาย (Wireless Microphone) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “ไมค์ลอย” ซึ่งความจริงก็คือไมโครโฟน 2 แบบแรก เพียงแต่เพิ่มวงจรเครื่องส่งให้สามารถส่งสัญญาณออกมาเป็นคลื่นวิทยุได้นั่นเอง

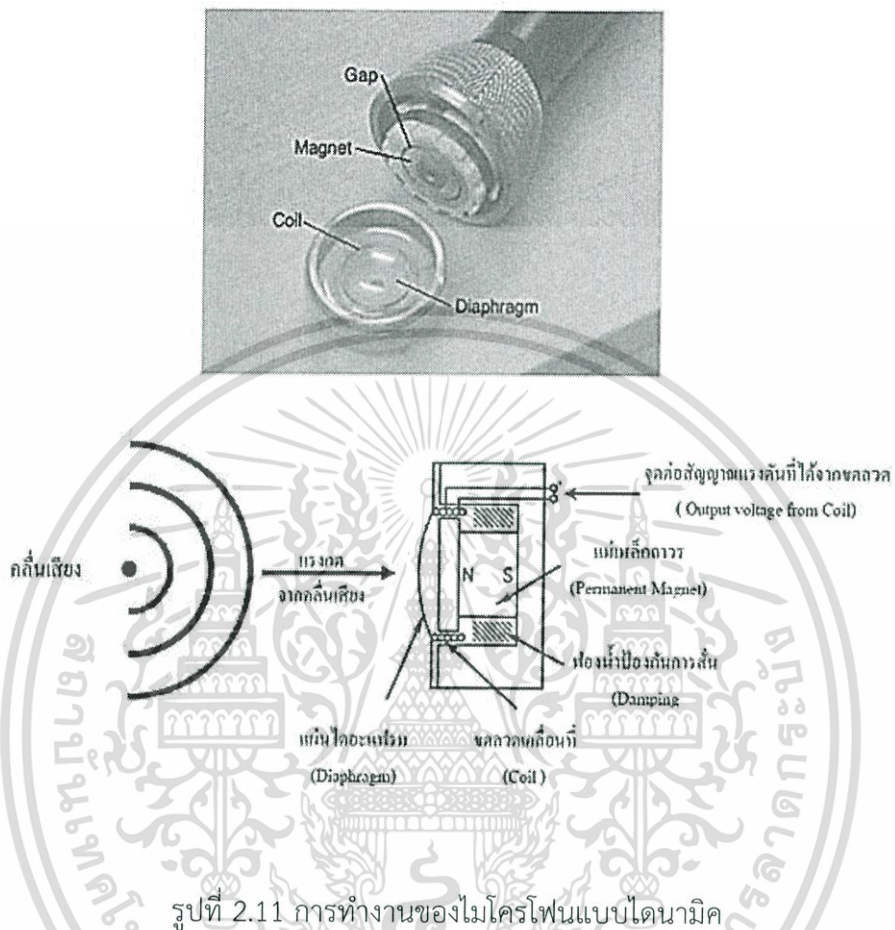


รูปที่ 2.10 รูปไมโครโฟนแบบไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.5.2 หลักการทำงานของไมโครโฟน

### 1.การทำงานของไมโครโฟนแบบไดนามิก



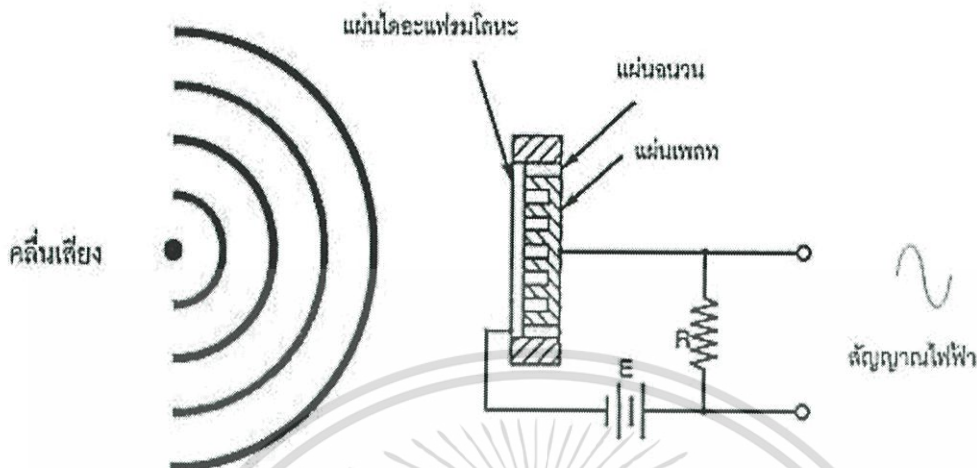
รูปที่ 2.11 การทำงานของไมโครโฟนแบบไดนามิก

ไมโครโฟนชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้แผ่นไดอะแฟรมที่เป็นโลหะบางๆ การทำงานจะใช้หลักการของตัวเก็บประจุ คือเมื่อมีคลื่นเสียงเข้ามากระทบแผ่นไดอะแฟรมทำให้แผ่นไดอะแฟรมมีการเคลื่อนที่เข้าออก ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ค่าความจุของไมโครโฟนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อต่อเข้ากับตัวต้านทานและแบตเตอรี่ภายนอก ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานตามไปด้วย

ไมโครโฟนประเภทนี้มักจะมีช่องใส่แบตเตอรี่ และมีวงจรมอนิเตอร์สัญญาณอยู่ภายในตัวไมโครโฟน เพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน และลดสัญญาณรบกวน แต่ถ้าเป็นไมโครโฟนราคาถูก ๆ ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ มักจะใช้ไฟเลี้ยงและวงจรมอนิเตอร์สัญญาณจากภายในเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การทำงานของไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์



รูปที่ 2.12 การทำงานของไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์

ไมโครโฟนชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้แผ่นไดอะแฟรมที่เป็นโลหะบางๆ การทำงานจะใช้หลักการของตัวเก็บประจุ คือเมื่อมีคลื่นเสียงเข้ามากระทบแผ่นไดอะแฟรมทำให้แผ่นไดอะแฟรมมีการเคลื่อนที่เข้าออก ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ค่าความจุของไมโครโฟนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อต่อเข้ากับตัวต้านทานและแบตเตอรี่ภายนอก ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานตามไปด้วย

ไมโครโฟนประเภทนี้มักจะมีช่องใส่แบตเตอรี่ และมีวงจรขยายสัญญาณอยู่ในตัวไมโครโฟน เพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน และลดสัญญาณรบกวน แต่ถ้าเป็นไมโครโฟนราคาถูก ๆ ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ มักจะใช้ไฟเลี้ยงและวงจรขยายสัญญาณจากภายในเครื่อง

3.การทำงานของไมโครโฟนแบบไร้สาย



รูปที่ 2.13 การทำงานของไมโครโฟนแบบไร้สาย

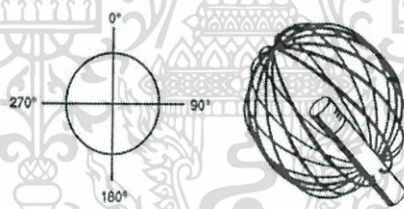
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นการรวมหัวไมโครโฟน วงจรขยายสัญญาณจากไมโครโฟน หรือปรีไมโครโฟน และวงจรส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไว้ภายในตัวไมโครโฟน เพื่อส่งสัญญาณไปยังภาครับที่ต่อไปยังเครื่องขยายเสียงได้โดยไม่ต้องใช้สาย

### 2.1.5.3 การเลือกใช้งานไมโครโฟนตามความเหมาะสม

ปกติไมโครโฟนจะมีหลายราคาตามคุณภาพ มีราคาตั้งแต่ 50-60 บาท จนถึงหลักหมื่นบาท โดยแตกต่างกันที่ คุณภาพการตอบสนองความถี่เสียง และความไวในการรับ นอกจากนี้การเลือกใช้อีกยังพิจารณาถึงขนาดความเหมาะสมและวัสดุที่ใช้ทำด้วย เช่นในงานบรรยาย ที่ต้องการความคล่องตัว อาจใช้ไมโครโฟนแบบไร้สาย หรือไมโครโฟนที่มีน้ำหนักเบา งานแสดงสดบนเวทีและงานบันทึกเสียง อาจต้องการไมโครโฟนที่มีคุณภาพเสียงที่ดี แต่หากใช้ในงานสนามที่ไม่ต้องการคุณภาพเสียงมากเท่าไร เราก็สามารถเลือกใช้ไมโครโฟนราคาถูกได้ นอกจากนี้ในกรณีของไมโครโฟนแบบไดนามิก ยังพิจารณาถึงขนาดอิมพีแดนซ์ของไมโครโฟนด้วย ถ้าใช้สายต่อยาวมาก ๆ ควรใช้ไมโครโฟนที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ เพราะสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าไมโครโฟนอิมพีแดนซ์สูง และถ้าเป็นไมโครโฟนที่มีคุณภาพเรายังพิจารณาถึง รูปแบบการรับคลื่นเสียงจากข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติต่างๆ ส่วนใหญ่มีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ

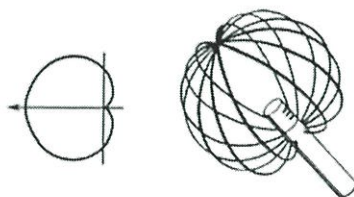
#### 1. แบบรับเสียงรอบทิศทาง (Omni Direction)



รูปที่ 2.14 แบบการรับคลื่นเสียงของไมโครโฟนแบบรับเสียงรอบทิศทาง

มักจะเป็นรูปแบบของไมโครโฟนที่ใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ โดยแบบนี้จะเหมาะสำหรับการบันทึกเสียง เพราะมีการตอบสนองความถี่กว้าง แต่มีโอกาสที่จะเกิดเสียงฮอนได้ง่าย การติดตั้งจึงควรพิจารณาเป็นพิเศษ และการใช้งานไม่ควรพูดห่างไมโครโฟนมากนัก

#### 2. แบบรับเสียงเฉพาะด้านหน้าไมโครโฟน (Cardioid Direction)



รูปที่ 2.15 แบบการรับคลื่นเสียงของไมโครโฟนแบบรับเสียงด้านหน้า

เป็นไมโครโฟนที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ สามารถรับเสียงที่ห่างไมโครโฟน โดยไม่มีปัญหาเสียงรบกวน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 Smoke Detection

### 2.2.1 คว้น

คว้น จัดเป็นคอลลอยด์ ที่เป็นอนุภาคของของแข็งหรือของเหลว กระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นแก๊สที่มีอยู่ในอากาศ จะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาวัสดุหรือเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน พร้อมกับปริมาณของอากาศหรือผสมในมวลสารชนิดอื่น ซึ่งเป็นส่วนเกินจากผลที่เกิดขึ้นจากความร้อน เช่น เตา, เทียนไข, ตะเกียงน้ำมัน และเตาไฟ แต่ก็อาจใช้สำหรับเป็นการกำจัดศัตรูพืช, การสื่อสารโดยใช้สัญญาณคว้น, การป้องกันตัวโดยการสร้างฉากคว้น, การทำอาหารเช่นแชลมอนรมคว้น หรือเครื่องยาสูบชนิดต่างๆ คว้นยังใช้ในพิธีกรรม, ฐูปบูชา, ยางหอม ที่เผาเพื่อผลิตกลิ่น ในบางครั้งคว้นยังถูกนำไปใช้เป็นสารแต่งกลิ่น และเครื่องป้องกันสำหรับของกินต่างๆ คว้นยังเป็นส่วนประกอบของไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอเสียจากดีเซลซึ่งคว้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

**2.2.1.1 คว้นดำ** คืออนุภาคของถ่านหรือคาร์บอนเป็นผง เขม่าเล็ก ๆ ที่เหลือจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นส่วนใหญ่ เช่น รถเมล์ รถปิกอัพดีเซล รถขนาดใหญ่ โดยทั่วไป และจากโรงงานอุตสาหกรรม คว้นดำนอกจากจะบดบังการมองเห็นและเกิดความสกปรกแล้ว ยังสามารถเข้าสู่ปอดโดยการหายใจเข้าไป และสะสมในถุงลมปอดเป็นสารทำให้เกิดโรคมะเร็งหรือเป็นตัวนำสารให้เกิดโรคมะเร็งปอดและทำให้หลอดลมอักเสบได้ ค่ามาตรฐานปริมาณคว้นดำที่ปล่อยออกจากท่อไอเสียรถยนต์เครื่องดีเซลจะต้องไม่เกินร้อยละ 50



รูปที่ 2.16 ลักษณะของคว้นดำ [ที่มา: web.ku.ac.th/]

**2.2.1.2 คว้นขาว** เกิดจากเครื่องยนต์ที่ไม่ได้รับการบำรุงรักษาอย่างดีโดยเฉพาะรถจักรยานยนต์เก่าคว้นขาวคือสารไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมัน เชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ แล้วถูกปล่อยออกมาทางท่อไอเสีย สารไฮโดรคาร์บอนเมื่อโดนแสงอาทิตย์จะเกิดปฏิกิริยา สร้างก๊าซโอโซนอันเป็นพิษภัยแรง การสูดคว้น ถือเป็นสาเหตุหลักของการเสียชีวิตของผู้ที่ตกเป็นเหยื่อของอค์ศิกภัยในอาคารสถานที่ คว้นสามารถสังหารผู้คนได้โดยความร้อน, สารพิษ และเข้าปอดจนเกิดการระคายเคืองโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้อื่นๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ลักษณะของควันขาว [ที่มา: auto.sanook.com/3932/]

ควันขาวของเครื่องยนต์ เกิดจากการเผาไหม้น้ำมัน กับน้ำมันเครื่องร่วมกัน ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่ถึงจุดที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ และเมื่อเผาไหม้แล้ว ควันที่ออกปลายท่อไอเสีย เจออุณหภูมิต่ำกว่า และความชื้น ทำให้กลายเป็นควันขาว

ควันดำ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ คือเชื้อเพลิงมีมากกว่าอากาศในห้องเผาไหม้ สัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศไม่พอดี จึงเกิดควันดำ สาเหตุที่ทำให้ส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศไม่พอดีอนุภาคของควันจัดเป็นละอองลอยหรือหมอก ของอนุภาคของแข็งหรือหยดของเหลวที่แพร่กระจายไปในอากาศซึ่งมักมองเห็นได้เมื่อถูกกระทบกับแสง โดยปกติแล้วหมอกควันไม่ได้ขัดขวางต่อการมองเห็น หากแต่มันเป็นอนุภาคที่มีความละเอียดจนบดบังการมองเห็นแบบปกติไป

### 2.2.1.3 สารพิษต่างๆที่อยู่ในควันไฟ

1.คาร์บอนมอนอกไซด์ (CARBON MONOXIDE) เป็นแก๊สพิษที่มีอันตรายอย่างสูงต่อคน นอกจากความเป็นพิษแล้ว แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ยังเป็นแก๊สเชื้อเพลิงอีกด้วย เมื่อมีความเข้มข้นในอากาศสูง ๆ สามารถลุกไหม้และเกิดการระเบิดได้อย่างรุนแรง เพลิงไหม้ในบริเวณที่โล่งแจ้งจะมีอันตรายจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลงไป

2.แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CARBON DIOXIDE) เกิดจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แบบไม่เป็นเชื้อเพลิง และไม่ก่ออันตรายแก่ร่างกายโดยตรง แต่จะไม่ทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน

3.แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HYDROGEN CYANIDE) เป็นแก๊สพิษที่มีความรุนแรงมากกว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มาก แก๊สนี้เกิดจากการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีองค์ประกอบของคลอรีน เช่น พลาสติก ยาง เส้นใย ขนสัตว์ หนังสัตว์ ไม้ หรือผ้าไหม เป็นแก๊สที่เบากว่าอากาศ จึงมีอันตรายมากในการเผาไหม้ในอาคารหรือบริเวณจำกัดต่างๆ

4.แก๊สฟอสจีน (PHOSGENE) เกิดจากการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีส่วนประกอบของคลอรีน เช่นคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ฟรีออน (น้ำยาทำความเย็น) หรือเอธิลีนไดคลอไรด์ เป็นแก๊สที่เป็นพิษสูงมากสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ (HYDROGEN CHLORIDE) เป็นแก๊สพิษที่เกิดจากการเผาไหม้สารที่มีองค์ประกอบของคลอรีน มีสภาพเป็นกรดและทำอันตรายได้เช่นกัน แม้จะไม่รุนแรงเท่ากับแก๊สฟอสจีนหรือแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ก็ตาม

6.แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HYDROGEN SULFIDE) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของวัสดุพวก ยาง พรม ไม้ ขนสัตว์ หรือวัสดุอื่นใดที่มีกำมะถันผสมอยู่ นอกจากนั้นยังเป็นแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งลุกติดไฟได้อีกด้วย แต่ไม่ถึงขั้นเกิดระเบิด มีกลิ่นคล้ายไข่เน่า มักจะเรียกว่า “แก๊สไข่เน่า” มีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อต่าง ๆ ได้มาก

7.แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SULFUR DIOXIDE) เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ของกำมะถันในอากาศ เป็นแก๊สพิษความเข้มข้นเพียง 150 ppm เมื่อผสมกับน้ำหรือความชื้นที่ผิวหนัง จะเกิดกรดกำมะถัน ซึ่งมีฤทธิ์กัดอย่างรุนแรงผู้ได้รับแก๊สนี้จึงมีอาการสำลักและหายใจไม่ออกอย่างฉับพลัน

8.แก๊สแอมโมเนีย (AMMONIA) เกิดจากการเผาไหม้ไม้ ขนสัตว์ ฝ้าใหม่ น้ำยาทำความสะอาดหรือสารอื่นที่มีสารประกอบของไนโตรเจน และไฮโดรเจน มีกลิ่นฉุนรุนแรง ทำให้เกิดความรำคาญและทำลายเนื้อเยื่อ แต่ไม่มีตัวเลขส่วนผสมที่ทำให้เสียชีวิต

9.ออกไซด์ของแก๊สไนโตรเจน (OXIDE OF NITROGEN) ได้แก่ แก๊สไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และไนโตรเจนเตตระออกไซด์ เกิดจากการเผาไหม้พวกไม้ ขี้เลื่อย พลาสติก ยางที่มีไนโตรเจนผสมสีและแลคเกอร์บางชนิด

10.แก๊สอะโครลีน (ACROLEIN) เป็นแก๊สเกิดจากการเผาไหม้สารที่เป็นไขมัน และอาจเกิดจากเผาไหม้สี และไม้บางชนิด เป็นแก๊สที่มีอันตรายสูง

11.ไอโลหะ (METAL FUMES) คือ ไอของโลหะหนักต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะนั้นได้รับความร้อนสูง เช่น ไอปรอท ไอตะกั่ว ไอสังกะสี ไอดีบุก ส่วนใหญ่เพลิงไหม้โรงผลิตหรือโรงเก็บอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ จะเกิดไอโลหะได้มากและไอเหล่านี้มีอันตราย

12.เขม่าและควันไฟ (SOOT AND SMOKE) เขม่า คือ ก้อนหรือเศษของวัสดุที่ยังเผาไหม้ไม่หมด จะมีลักษณะเป็นผงหรือละออง ส่วน ควันไฟ เป็นสารผสมระหว่างเขม่า ขี้เถ้า และวัสดุต่าง ๆ ที่เกิดมาจากกองเพลิง รวมทั้งพวกแก๊สและไอน้ำต่าง ๆ ด้วย ผลของเขม่าและควันไฟ คือทำให้ผู้ป่วยสำลักและอาจถูกเผาที่ผิวหนังหรือตามตัว

### 2.2.2 แหล่งกำเนิดแสง

แสง (light) คือ คลื่นชนิดหนึ่งและมีพลังงานการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น หรือบางครั้งอาจรวมถึงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วย แสงคือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถมองเห็นได้ คือ อยู่ในย่านความถี่ 380 Hz ( $3.8 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์) ถึง 789 Hz ( $7.5 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ( $v$ ) ความถี่ ( $f$  หรือ  $\nu$ ) และ ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ของแสง

$$v = f\lambda \quad (4)$$

ความเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าคงที่ ดังนั้นเราจึงสามารถแยกแยะแสงโดยใช้ตามความยาวคลื่นได้ โดยแสงที่เรามองเห็นได้ข้างต้นนั้นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 นาโนเมตร (nm) และ 700 nm (ในสุญญากาศ)

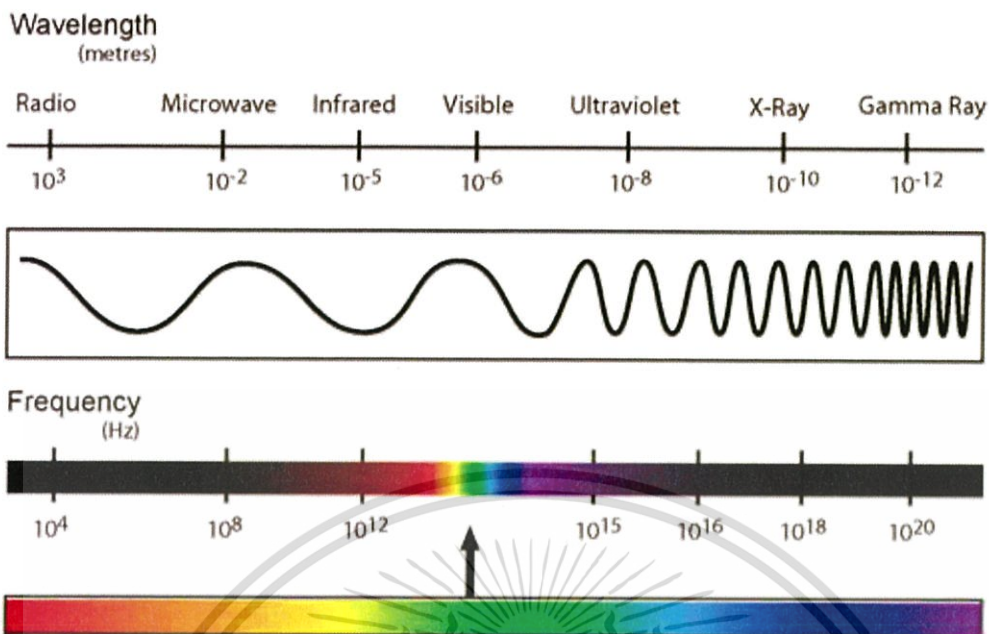
การมองเห็นของมนุษย์นั้นเป็นผลมาจากภาวะอนุภาคของแสงโดยเฉพาะ เกิดจากการที่ก้อนพลังงานแสง (อนุภาคโฟตอน) ไปกระตุ้น เซลล์รูปแท่งในจอตา (rod cell) และ เซลล์รูปกรวยในจอตา (cone cell) ที่จอตา (retina) ให้ทำการสร้างสัญญาณไฟฟ้าบนเส้นประสาท และส่งผ่านเส้นประสาทตาไปยังสมองทำให้เกิดการรับรู้มองเห็น

ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร (nm) หรือ 0.4 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ถึง 700 นาโนเมตร (nm) หรือ 0.7 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) เป็นช่วงที่ทำให้เกิดการมองเห็นของตามนุษย์ และเรียกว่าเป็นช่วงของแสง ช่วงที่ทำให้เกิดการมองเห็น (Visible Region) หรือที่เรียกกันว่า แสงขาว (Visible Light)

แสงช่วงนี้อยู่ระหว่างแสงในช่วงที่ตามองไม่เห็น 2 ช่วง คือ

1) อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) จะเป็นช่วงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าช่วงของแสงขาวหรือมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 380 นาโนเมตร ลงไปจนถึง 10 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งแสงอัลตราไวโอเล็ตออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วง UV-A มีความยาวคลื่น 380 ถึง 315 นาโนเมตร, ช่วง UV-B มีความยาวคลื่น 315 ถึง 280 นาโนเมตร และ ช่วง UV-C มีความยาวคลื่น 280 ถึง 10 นาโนเมตร

2) อินฟราเรด (Infrared : IR) เป็นช่วงที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าช่วงแสงขาว โดยมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 770 นาโนเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ในบางครั้งเราเรียกแสงอินฟราเรดว่า “รังสีความร้อน” โดยทั้ง 3 ช่วงที่กล่าวมาในข้างต้นนี้ สามารถเรียกรวมกันได้ว่า “Optical Region”



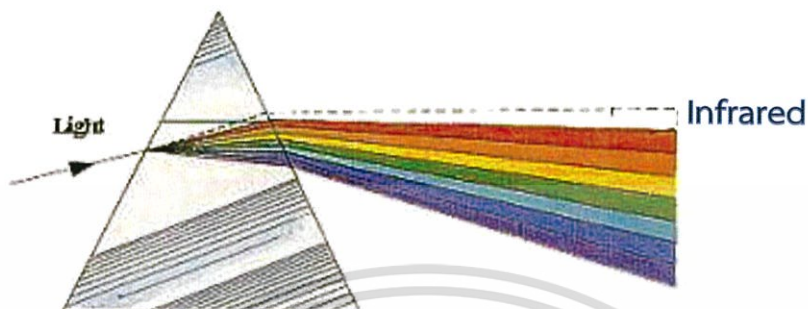
รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า [ที่มา: <http://www.cssckmutt.in.th/>]

### 2.2.2.1 แสงอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด หรือ รังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งแผ่มาจากดวงอาทิตย์ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์นั้นมีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดนั้นมีความยาว คลื่นต่างกัน เช่น แสงที่ตามองเห็น(Visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400 -700 นาโนเมตร, รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) มีความยาวคลื่น 1 - 400 นาโนเมตร, รังสีแกมมา (Gamma ray) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.01 นาโนเมตร, รังสีเอ็กซ์ (X-ray) ความยาวคลื่น 0.01 - 1 นาโนเมตร เป็นต้น

สำหรับรังสีอินฟราเรด มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร- 1 มิลลิเมตร และมีความถี่อยู่ระหว่าง 10<sup>11</sup>-10<sup>14</sup> Hz มีความถี่ในช่วงเดียวกับไมโครเวฟ มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นวิทยุ สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200 องศาเซลเซียสถึง 4,000 องศาเซลเซียสจะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา คุณสมบัติเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรด เช่น ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แตกต่างกันก็คือ คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความถี่ คือยิ่งความถี่สูงมากขึ้นพลังงานก็สูงขึ้นด้วยเป็นคลื่นที่มีความถี่ถัดจากความถี่ของสีแดงลงมา มนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรด แต่ก็รู้สึกถึงความร้อนได้ ส่วนสัตว์บางชนิด เช่น งูมีประสาทสัมผัสรังสีอินฟราเรด สามารถทราบตำแหน่งของเหยื่อได้ โดยการสัมผัสรังสีอินฟราเรดซึ่งแผ่ออกมาจากร่างกายของเหยื่อ เมื่อโลกได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ โลกจะแผ่รังสีสะท้อนกลับสู่บรรยากาศเรียกว่า รังสีโลก (terrestrial radiation) ซึ่งเป็นรังสีอินฟราเรดในคลื่นยาว ซึ่งแตกต่างจากรังสีอินฟราเรดจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นช่วงคลื่นสั้น ตามปกติแล้วไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจะมีปริมาณพอเหมาะและสามารถ ดูดซับพลังงานส่วนนี้ไว้ ทำให้ โลกเก็บความร้อนไว้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคน สัตว์และพืช ในปัจจุบันมีการนำรังสีอินฟราเรดมา ประยุกต์ใช้งานหลายอย่างด้วยกัน เช่น ใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารของอุปกรณ์ไร้สายหลายชนิดทั้ง โทรศัพท์มือถือและ คอมพิวเตอร์ กล้องอินฟราเรดที่สามารถจับภาพได้แม้ในเวลากลางคืน



รูปที่ 2.19 แสงอินฟราเรดที่ออกมาจากปริซึม [ที่มา: <http://share.psu.ac.th/>]

#### การแบ่งแสงอินฟราเรด

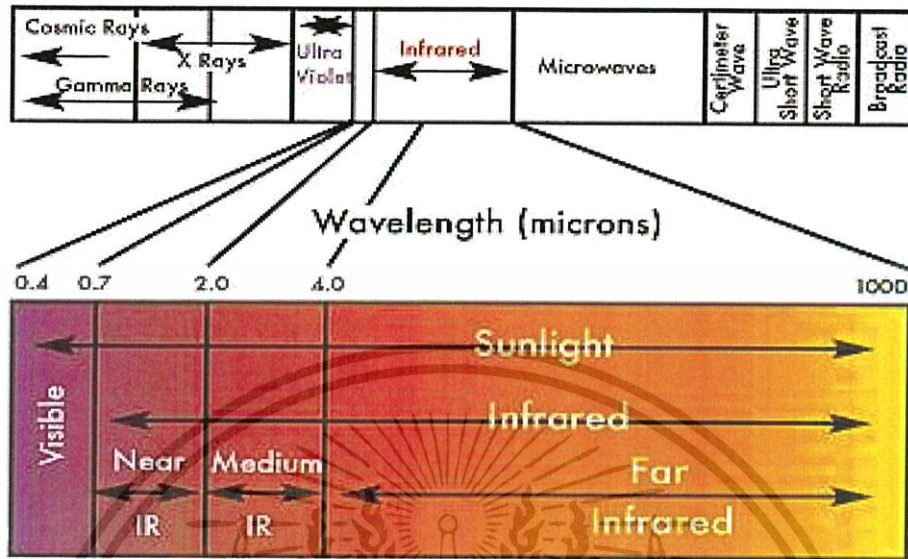
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ จะเห็นได้ว่ารังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นที่มากกว่าแสงที่ตามองเห็นที่ยาวที่สุด ซึ่งก็คือสีแดง ด้วยเหตุนี้เองจึงเรียกรังสีชนิดนี้ว่า รังสีอินฟราเรด หรือ รังสีใต้แดง รังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นได้เป็น 3 ช่วงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงความยาวคลื่นของแสงอินฟราเรดตามมาตรฐาน ISO 20473

Designation	Abbreviation	Wavelength
Near-Infrared	NIR	0.78-3 $\mu\text{m}$
Mid-Infrared	MIR	3-50 $\mu\text{m}$
Far-Infrared	FIR	50-1,000 $\mu\text{m}$

แสงอินฟราเรด เป็นคลื่นความถี่สั้น เป็นตัวกลางในการสื่อสารอีกแบบหนึ่งซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายไมโครเวฟ เป็นแสงที่มีทิศทางในระดับสายตา ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุทึบแสงได้ นิยมใช้ในการติดต่อในระยะทางที่ใกล้ๆ การประยุกต์ใช้คลื่นอินฟราเรดจะเป็นการประยุกต์ใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communication) ในการควบคุมเครื่องมือ เครื่องใช้ไฟฟ้า โดยการส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณไปทาง LED (Light emitting diode) โดยตัวส่ง (transmitter) หรือ laser diode และจะมีตัวรับ (receiver) และทำการเปลี่ยนข้อมูลให้กลับไปเป็นเหมือนข้อมูลเริ่มแรก



รูปที่ 2.20 สเปกตรัมของแสงอินฟราเรด

#### 2.2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน

1 อินฟราเรดช่วงใกล้ (Near-Infrared) หรือ NIR เป็นช่วงคลื่นสั้นของรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นประมาณ 0.7 ไมโครเมตรจนถึง 3.0 ไมโครเมตร แสงอินฟราเรดในช่วงนี้มักจะประยุกต์ใช้ในงานถ่ายภาพความร้อน

2 ช่วงอินฟราเรด (Mid-Infrared) หรือ MIR ในบางครั้งอาจเรียกว่า ช่วงคลื่นกลางของแสงอินฟราเรด ก็ได้ จะมีความยาวคลื่นประมาณ 3.0 ไมโครเมตรจนถึง 50 ไมโครเมตร อินฟราเรดระยะกลางมักประยุกต์ใช้กับระบบ นาวิติของจรวดขีปนาวุธ (Missile)

3 อินฟราเรดช่วงไกล (Far-Infrared) หรือ FIR เป็นช่วงคลื่นยาวของแสงอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นประมาณ 50 ไมโครเมตรขึ้นไป ช่วงนี้จะมีพลังงานความร้อนไม่มากนัก จึงนิยมใช้ในการบำบัดผู้ป่วย เช่น อาการปวดเมื่อยเรื้อรัง และผู้ป่วยด้วยโรคความดันโลหิต รวมถึงการควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 Photo detector

เทคนิคการตรวจจับด้วยเสียงจะใช้ไมโครโฟนสำหรับตรวจจับความดันที่เปลี่ยนแปลงไปในอากาศหรือใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เป็นตัวตรวจจับ Thermoelastic wave ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง วิธีการทางแสงของการตรวจจับคลื่นความร้อนจะประกอบด้วยการใช้ Probe beam และตัวไวแสง (Photodetector) เพื่อตรวจการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างที่ถูกทำให้ร้อน ในกรณีตัวอย่างที่เป็นของไหลก็ใช้วิธีเดียวกันในการตรวจจับ วิธีการทางแสงยังสามารถใช้ควบคุมการขยายความร้อนที่ถูกมอดูเลต โดยเทคนิค Probe beam displacement หรือใช้วิธี Interferometry

การตรวจจับสัญญาณแสงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

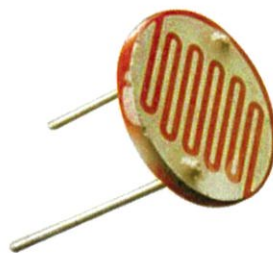
- การตรวจจับโดยตรง ( direct detection)
- การตรวจจับแบบเฮเทอโรไดน์ ( heterodyne detection )

การตรวจจับโดยตรงคือการตรวจจับสัญญาณแสงที่ตกกระทบเครื่อง ตรวจจับแสง (photodetector) ที่ภาครับโดยตรงโดยไม่ได้แปลงความถี่ใดๆทั้งสิ้นวิธีการโมดูลেশันและดีโมดูลেশันที่ใช้กันในการสื่อสารผ่านใยแก้วปัจจุบันนิยมใช้โมดูลেশันความเข้ม

#### 2.2.3.1 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับเป็นตัวรับรู้

##### 1.) LDR (Light Dependent Resister)

Photo conductive cell เป็นทรานสดิวเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์ประเภท Passive Transducer ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “เซลล์นำแสงอาทิตย์” หรือ “ตัวต้านทานพลังงานแสง” แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมเรียกว่า “LDR” ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณแสงประเภทหนึ่งที่ทำมาจาก CdS (Cadmium sulfide) โดยเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง เมื่อถูกแสงจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป โดยจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง นั่นคือถ้าไม่มีแสงมาตกกระทบบนตัว LDR จะทำให้ความต้านทานภายในของ LDR มีค่าสูง แต่ในขณะเดียวกันเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ค่าความต้านทานภายในของ LDR ก็จะมีค่าต่ำลงจนเกิดเป็นสภาพความนำไฟฟ้า กล่าวโดยสรุปคือ ค่าความต้านทานภายในของ LDR จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความเข้มที่ตกกระทบ โดย LDR มีลักษณะดังรูป



## 2.) Photodiode

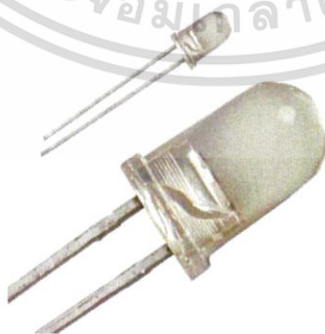
Photo Diode เป็นเซนเซอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภท Passive Transducer และเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณแสงอีกประเภทหนึ่ง โดยเมื่อแสงตกกระทบผิวหน้าจะทำให้ความต่างศักย์ตรงรอยเชื่อมต่อระหว่าง P และ N ของสารกึ่งตัวนำของไดโอดมีการเปลี่ยนแปลง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้ง่ายขึ้น เมื่อถูกแสงจึงมีกระแสในวงจรเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกับ LDR แต่ photo diode จะมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าอยู่มาก เนื่องจากมันสามารถตอบสนองที่เร็วและได้ดีกว่า ดังนั้นจึงเหมาะอย่างมากที่จะนำไปใช้กับสภาพของแสงที่มีความถี่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.22 Photodiode [ที่มา: ecetutorials.com/]

## 3.) การวัดรังสีอินฟราเรด

IR Photodiode ใช้หลักการเดียวกันกับ Photodiode แต่สารกึ่งตัวนำนี้จะตอบสนองต่อพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของอินฟราเรด โดยอาศัยความต่างศักย์ตรงรอยเชื่อมต่อระหว่าง P และ N ของสารกึ่งตัวนำของไดโอดทำให้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.23 IR photodiode [ที่มา: digikey.com/]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.) การวัดความเข้มเสียง

Condenser Microphone จะมีลักษณะคล้ายกับแผ่นเก็บประจุไฟฟ้าคือ ประกอบด้วยแผ่นโลหะบางๆสองแผ่นที่วางห่างกัน เมื่อมีเสียงมากระทบแผ่นโลหะ พลังงานเสียงจะทำให้แผ่นโลหะบางๆเข้าชิดหรือห่างกัน เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทำให้สามารถวัดค่าความเข้มเสียงได้

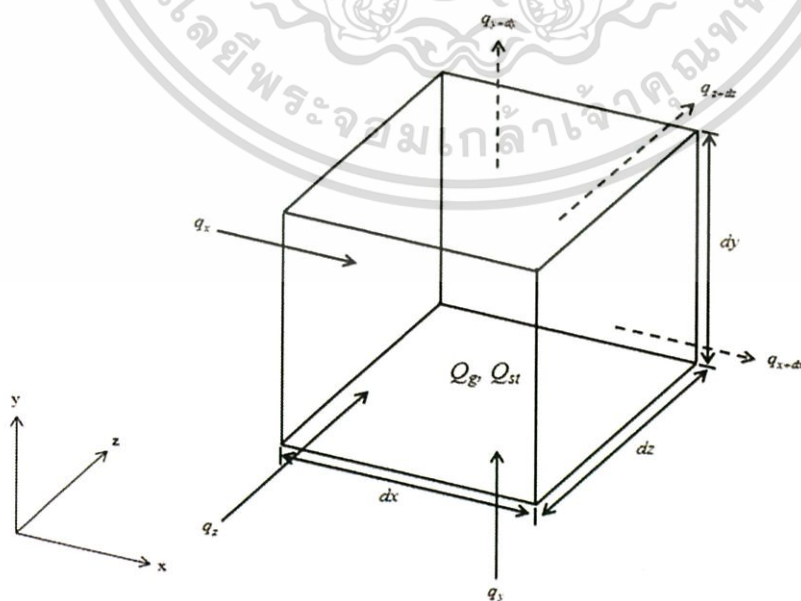


รูปที่ 2.24 Condenser Microphone

## 2.3 คลื่นความร้อน

### 2.3.1 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มัล จำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิในตัวกลางในเงื่อนไขต่างๆ เช่น การพิจารณาการอนุรักษ์พลังงานในปริมาตรขนาดเล็ก  $dV$  เพื่อให้ทราบลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในตัวกลาง และการพิจารณาสมการอัตราการส่งผ่านความร้อน เพื่อให้ทราบกระบวนการส่งผ่านความร้อน เป็นต้นโดยการพิจารณาดังกล่าว จะทำให้สามารถกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ได้



เอกสารนี้ รูปที่ 2:25 ปริมาตรย่อยสำหรับทำวิเคราะห์ห้การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก [1] ระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาปริมาตร  $dV$  ที่มีขนาด  $dx$ ,  $dy$  และ  $dz$  และมีฟลักซ์ของพลังงานความร้อนไหลเข้า-ออก จากปริมาตร  $dV$  ดังนี้

$$Q_{in} + Q_g - Q_{out} = Q_{st} \quad (5)$$

เมื่อ  $Q_{in}$  คือ อัตราความร้อนที่ไหลเข้าไปในปริมาตร  $dV$  และมีค่าเท่ากับ

$$Q_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (6)$$

เมื่อ  $Q_g$  คือ อัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตร  $dV$  และมีค่าเท่ากับ

$$Q_g = \dot{g} dx dy dz \quad (7)$$

เมื่อ  $\dot{g}$  คือ อัตราการกำเนิดพลังงานต่อ 1 หน่วยปริมาตรภายในตัวกลาง

เมื่อ  $Q_{out}$  คือ อัตราความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร  $dV$  และมีค่าเท่ากับ

$$Q_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (8)$$

เมื่อ  $Q_{st}$  คือ อัตราความร้อนที่สะสมอยู่ในปริมาตร  $dV$  และมีค่าเท่ากับ

$$Q_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (9)$$

เมื่อ  $\rho$ ,  $c$  คือ ค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลาง ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการที่(6)-(9) ลงในสมการที่(5) จะได้ว่า

$$q_x + q_y + q_z + \dot{g} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (10)$$

นำกฎของ Fourier มาพิจารณาสมการที่(6) จะได้ว่า ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าปริมาตร  $dV$  ในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  คือ  $q_x$ ,  $q_y$  และ  $q_z$  เป็นดังนี้

$$q_x = -k dy dz \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x \quad (11)$$

$$q_y = -k dx dz \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_y \quad (12)$$

$$q_z = -k dx dy \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_z \quad (13)$$

นำกฎของ Taylor expansion มาพิจารณาสมการที่(8) คือ เมื่อฟลักซ์ความร้อนไหลเข้าแล้ว แพร่กระจายไปจนสุดขอบปริมาตร  $dV$  ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร  $dV$  จะเป็นดังนี้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (14)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (15)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่(14) – (16) ลงในสมการที่(10) จะได้ว่า

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{g} dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (17)$$

แทนสมการที่(11) – (13) ในสมการที่(17) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k dy dx \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left( k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy + \frac{\partial}{\partial z} \left( k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \dot{g} dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (18)$$

สมการที่(18) เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการการกระจายความร้อน(Heat diffusion equation)ในระบบพิกัดฉาก ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เรื่องการนำความร้อน สมการนี้อธิบายได้ว่า “อัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อน(โดยการนำความร้อน) เข้าไปในปริมาตร รวมกับ อัตราการเกิดพลังงานความร้อนในปริมาตร จะเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนสะสมภายในปริมาตรนั้น” และจากสมการการกระจายของความร้อน(Heat diffusion equation)ในระบบพิกัดฉาก เราสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1) ค่าการนำความร้อน(k) ของวัสดุเป็นแบบสมมาตร(Isotropic)

$$\text{จะได้} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \text{ เมื่อ } \alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (19)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สภาพแพร่ทางความร้อน(Thermal diffusivity,  $m^2s^{-1}$ ) จาก  $\frac{k}{\rho c}$  ทำให้ทราบ

ว่าอัตราความร้อนจะแพร่เข้าไปในวัสดุได้ดีเพียงใด ขึ้นกับค่าการนำความร้อนและพลังงานสะสมในวัสดุด้วย

กรณีที่ 2) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

การอธิบายนี้สามารถอ้างอิงถึงสมการ Fourier หรือสมการการกระจาย

กรณีที่ 3) เมื่อมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g(x,y,z)}{k} = 0 \quad (21)$$

ซึ่งก็คือสมการ Poisson

กรณีที่ 4) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

ซึ่งก็คือสมการ Laplace

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การแพร่กระจายความร้อน

พิจารณาตัวกลางแบบ Isotropic homogeneous เมื่อมีความร้อนแพร่มาตกระทบพื้นผิวในทิศ  $x$  โดยผ่านระนาบ  $yz$  ดังนี้

$$\left(\frac{Q_0}{2}\right) [1 + \cos(\omega t)] \quad (23)$$

จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์(Fourier's law of conduction)

$$q_{cd} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

ถ้าพลังงานความร้อนที่มาตกระทบเป็นดังสมการที่(23) จะได้ว่า

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{Q_0}{2} [1 + \cos(\omega t)] = \text{Re} \left\{ \frac{Q_0}{2} [1 + \exp(j\omega t)] \right\} \quad x = 0, t > 0 \quad (24)$$

จากสมการที่(24) สามารถแบ่งพิจารณาได้ 2 เทอม

เทอมแรกคือ  $\frac{Q_0}{2}$  เป็นส่วนที่แสดงถึงการเพิ่มอุณหภูมิแบบคงที่

เทอมที่สองคือ  $\frac{Q_0}{2} \exp(j\omega t)$  เป็นส่วนของการมอดูเลตทางความร้อน

ซึ่งเราจะพิจารณาแค่เทอมที่ 2 เท่านั้น

จากสมการการกระจายของความร้อน(Heat diffusion equation) ในระบบพิกัดฉาก เมื่อพิจารณาแค่ 1 มิติ ในกรณีที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน จะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad x < 0, t > 0 \quad (25)$$

กำหนดผลเฉลยของสมการที่ (25) เท่ากับ

$$T(x, t) = \text{Re}(T(x) \exp(j\omega t)) \quad (26)$$

แทนค่าสมการที่(26) ลงในสมการที่(25) จะได้

$$\exp(j\omega t) \left( \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(x) \right) = 0 \quad (27)$$

จะได้

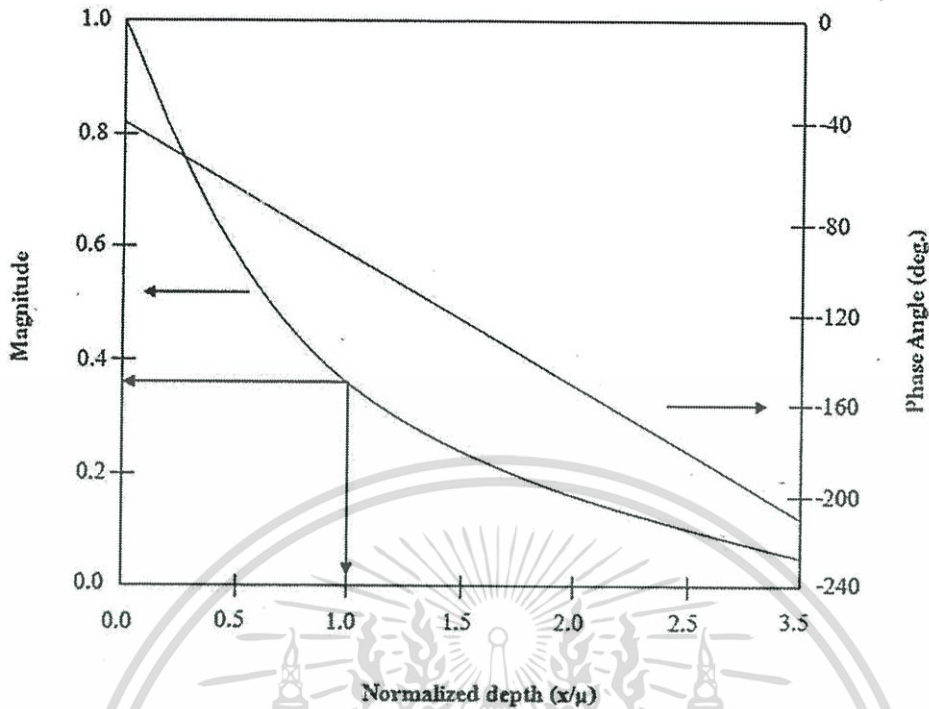
$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c k \omega}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \exp j \left(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (28)$$

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c k \omega}} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \exp j \left(\omega t - \frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (29)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{1}{\mu} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

จากผลเฉลยนี้ แบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแอมพลิจูด และส่วนเฟสซึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นผิว(Normalized depth) จะพบว่า มีการลดลงแบบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นผิว(Normalized depth)จะพบว่า มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น นั่นคือ เมื่อมีคลื่นความร้อนแพร่กระจายลึกลงไปในพื้นผิวของวัตถุ จะพบว่า บริเวณที่ลึกลงไปในพื้นผิวจะมีความร้อนน้อยกว่าบริเวณพื้นผิวนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนกับความลึกของพื้นผิวอินทรีย์ [1]

นอกจากนี้ ผลเฉลยของสมการการแพร่กระจายของความร้อน(Heat diffusion equation) ยังสามารถอธิบายในแนวทางอื่นได้อีก ดังนี้

1) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายเหมือนกับคลื่นทั่วไป

คลื่นความร้อนจะมีการสั่น โดยการสั่นของคลื่นความร้อนจะขึ้นกับรูปแบบของ  $exp(j\omega t)$  และมีเวกเตอร์คลื่น (wave vector) คือ

$$\frac{1}{\mu} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad \text{หรือ} \quad \mu = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad (30)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusion length)

2) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายไม่เหมือนกับคลื่นทั่วไป

เมื่อเกิดการแพร่กระจายของคลื่นความร้อน คลื่นความร้อนจะสั่นแบบ heavily damped และลดลงอย่างสม่ำเสมอ โดยคลื่นความร้อนจะมีค่าคงที่ของการลดลง(delay constant) เท่ากับค่า Thermal diffusion length

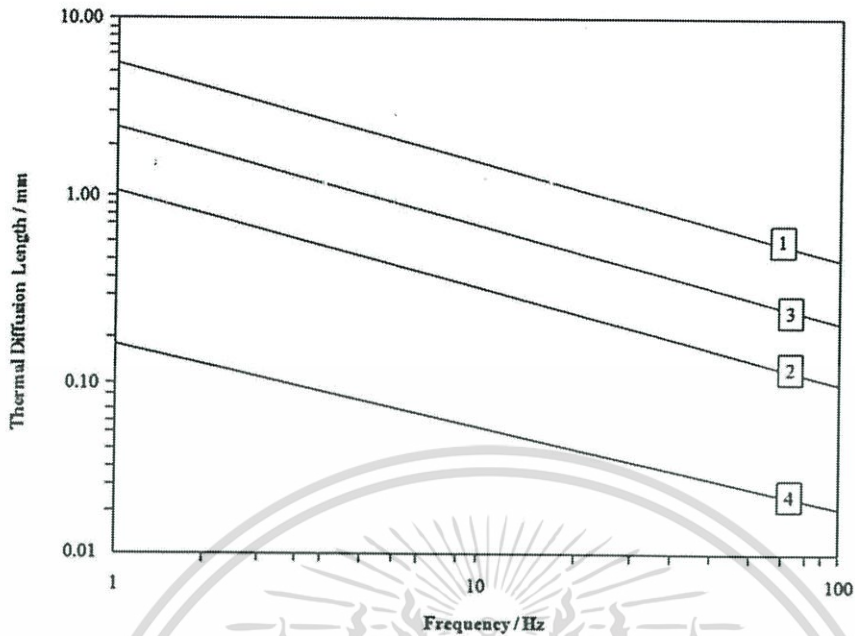
จากสมการที่(29) ทำให้ทราบว่า คลื่นความร้อนจะสามารถแพร่กระจายความร้อนลงไปได้ในวัตถุได้ลึก ก็ต่อเมื่อวัตถุนั้นมีค่าสภาพแพร่ทางความร้อน(Thermal diffusivity) สูงหรือเมื่อคลื่นความร้อนนั้นมีค่าความถี่ต่ำ(คลื่นความร้อนต้องมีความยาวคลื่นมากนั่นเอง)

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ความร้อน(Thermal diffusivity length, nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อนในช่วง 1-100 Hz ของ (1)อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส,

(3)อากาศ และ (4) เบกเกิลไลท์ จากกราฟ จะได้ว่า สภาพแพร่ทางความร้อนของวัสดุทั้ง 4 จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่ออื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ (mm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์ [1]

- 3) คลื่นความร้อนที่มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว  
ความเร็วเฟสของคลื่นความร้อน คือ

$$v = \omega\mu = \sqrt{2\alpha\omega} \quad (31)$$

จากสมการที่(30) จะเห็นได้ว่า ความถี่ของคลื่นความร้อนมีผลต่อความเร็วในการแพร่กระจายความร้อน คือ คลื่นความร้อนที่มีความถี่สูงจะแพร่กระจายความร้อนได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำ

- 4) การเปลี่ยนเฟสของคลื่นความร้อน

คลื่นความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีการเปลี่ยนเฟส ระหว่างตำแหน่งที่  $x = 0$  (พื้นผิววัตถุ) และที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\varphi = -\frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4} \quad (32)$$

จากสมการที่ (32) จะเห็นได้ว่า ถ้าพิจารณาที่  $x = 0$  (พื้นผิววัตถุ) คลื่นความร้อนที่พื้นผิววัตถุจะมีเฟสตามหลังคลื่นความร้อนที่แหล่งกำเนิดอยู่ -45 องศา

- 5) อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิที่บริเวณนั้นต่อความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน ดังสมการ

$$Z = \frac{1}{k\sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\rho ck}} \quad (33)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน เป็นปริมาณที่บอกถึงขนาดของความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุ

จากสมการที่(33) เทอม  $\sqrt{\rho ck}$  คือ Thermal effusivity หรือค่าความเฉื่อยทางความร้อน ถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเฉื่อยทางความร้อนมีค่าต่ำ จะทำให้ความร้อนที่พื้นผิวมีค่าสูง (คือ วัสดุมีการตอบสนองต่อความร้อนสูง พื้นผิวจึงมีความร้อนสูงนั่นเอง)โดยปกติแล้ววัสดุที่มีค่าสภาพแพร่ทางความร้อนสูง จะต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนสูงด้วย แต่ยกเว้นบางกรณี วัสดุยกเว้นที่น่าสนใจที่สุดคือ อากาศ เพราะมีค่าสภาพแพร่ทางความร้อนสูง แต่เนื่องจากมีค่าความนำความร้อนต่ำและมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อากาศมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำนั่นเอง ฉะนั้น วัสดุที่มีการตอบสนองต่อความร้อนได้ดีจึงต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนสูงนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการทำงานของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ และการดูดกลืนของแสงอินฟราเรด เพื่อใช้สำหรับการวัดคว้นและวัดสารตัวอย่างในรูปของแข็ง ซึ่งในงานวิจัย เรื่องของการวัดคว้น เราได้เลือกใช้วงจรรินฟราเรด เพื่อเป็นตัววัดการดูดกลืนของคว้น และในงานวิจัย เรื่องของการวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งอีกชนิดหนึ่ง โดยเราได้ทดสอบกับระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตสโกปี เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัดที่เราออกแบบและทดสอบหลักการทำงานของเฮล์มโฮลทซ์ที่มีผลต่อเครื่องมือวัดของเรา

ทั้งนี้การออกแบบเครื่องมือวัดนี้ก็เพื่อความเหมาะสมกับความต้องการของงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องมือวัด

1. พิสูจน์การคำนวณในการออกแบบเครื่องมือวัด
2. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัดคว้นโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด
  - 2.1 วัดค่าจากไมโครโฟนและแสงอินฟราเรดกับดีเทคเตอร์
    - ประเภท ไม่มีคว้น และ มีคว้น
  - 2.2 ทดสอบระบบจากวงจรเปรียบเทียบ
    - ประเภท ไม่มีคว้น และ มีคว้น
3. ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง
  - 3.1 วัดสารตัวอย่าง Carbon black เพื่อหาค่าโวลต์ โดยปรับค่าความถี่
    - ที่ความยาวคลื่น 360 nm
  - 3.2 วัดสารตัวอย่าง Zinc oxide เพื่อหาค่าโวลต์ โดยปรับค่าความถี่
    - ที่ความยาวคลื่น 360 nm
  - 3.3 วัดสารตัวอย่าง Carbon black เพื่อหาค่าโวลต์ โดยปรับค่าความยาวคลื่น
  - 3.3 วัดสารตัวอย่าง Zinc oxide เพื่อหาค่าโวลต์ โดยปรับค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1.1 ทฤษฎีเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

- หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์
- การคำนวณหาขนาดการออกแบบเครื่องมือวัด


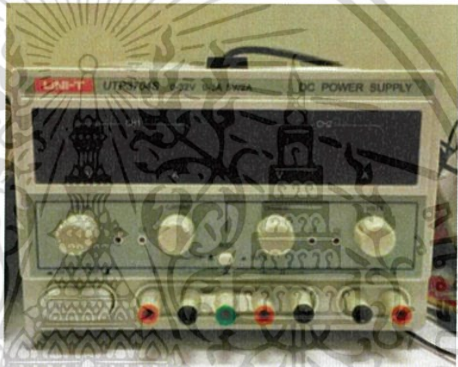
#### 3.1.3 การดูดกลืนแสง

- หลักการของการดูดกลืนแสง
- การคำนวณของการดูดกลืนแสง

### 3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

#### 3.2.1 เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

อุปกรณ์	รูปภาพ
1.) เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด	
2.) แสงอินฟราเรด	

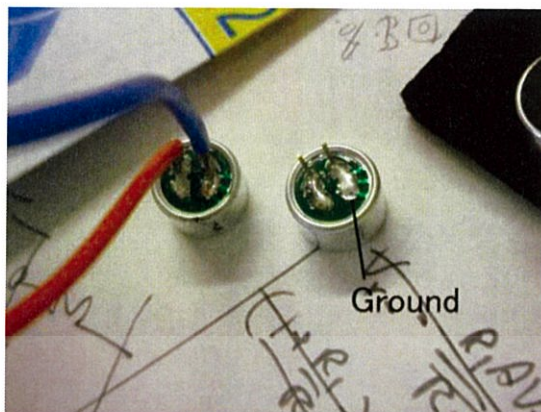
3.) ดีเทคเตอร์	
4.) power supply	

3.2.2 เครื่องมือวัดสัญญาณไฟโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

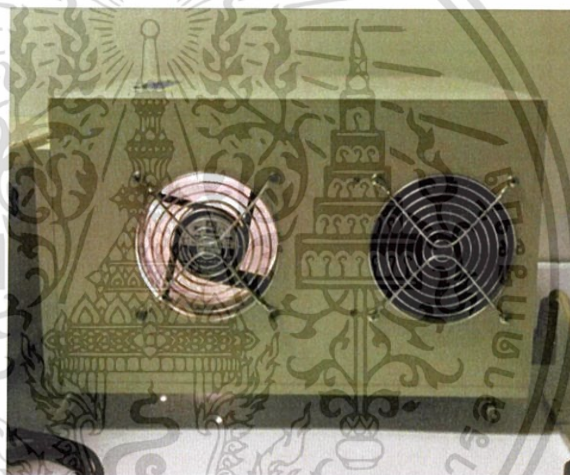
อุปกรณ์	รูปภาพ
1.)เครื่องมือวัดสัญญาณไฟโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ไมโครโฟน






3.) เครื่อง Xenon lamp  
ขนาด 450 วัตต์



4.) เครื่อง monocomator  
ตัวแยกความยาวคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) เครื่อง lock-in amplifier	
6.) Mechanical chopper	
7.) คอมพิวเตอร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สูตรการคำนวณการออกแบบเครื่องมือวัด

คำนวณหาค่าการออกแบบเครื่องมือวัดจากทฤษฎีเฮล์มโฮลทซ์

จาก 
$$f_0 = \frac{v\varphi}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{l} \frac{v_1+v_2}{v_1v_2}}$$

กำหนดให้  $f_0 =$  ความถี่  
 $v =$  ความเร็วในอากาศ  $330+0.6t$

$\varphi =$  เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเชื่อม

$l =$  ความยาวท่อเชื่อม

$v_1 =$  ปริมาตรท่อที่ 1

$v_2 =$  ปริมาตรท่อที่ 2

โดย  $v = 330+0.6t = 346.8\text{m/s}$

$\varphi = 1\text{ cm}$

$l = 4\text{ cm}$

$$v_1 = \pi r^2 h = \pi (1.25 \times 10^{-2})^2 \times (6.00 \times 10^{-2})$$

$$= 2.95 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

$$v_2 = \pi r^2 h = \pi (1.25 \times 10^{-2})^2 \times (3.00 \times 10^{-2})$$

$$= 1.47 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

วิธีทำ 
$$f_0 = \frac{v\varphi}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{l} \left( \frac{v_1+v_2}{v_1v_2} \right)}$$

$$f_0 = \frac{346.8 \times (2.95 \times 10^{-5})}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{4 \times 10^{-2}} \left( \frac{v_1+v_2}{v_1v_2} \right)}$$

$$f_0 = 0.276 \sqrt{\frac{\pi}{4 \times 10^{-2}} \times \left( \frac{2.95 \times 10^{-5} + 1.47 \times 10^{-5}}{(2.95 \times 10^{-5})(1.47 \times 10^{-5})} \right)}$$

$$f_0 = 0.276 \sqrt{\frac{\pi}{4 \times 10^{-2}} \times \left( \frac{4.42 \times 10^{-5}}{4.34 \times 10^{-10}} \right)}$$

$$f_0 = 0.276 \sqrt{25\pi \times 101925.5}$$

$$f_0 = 0.276 \sqrt{8001153}$$

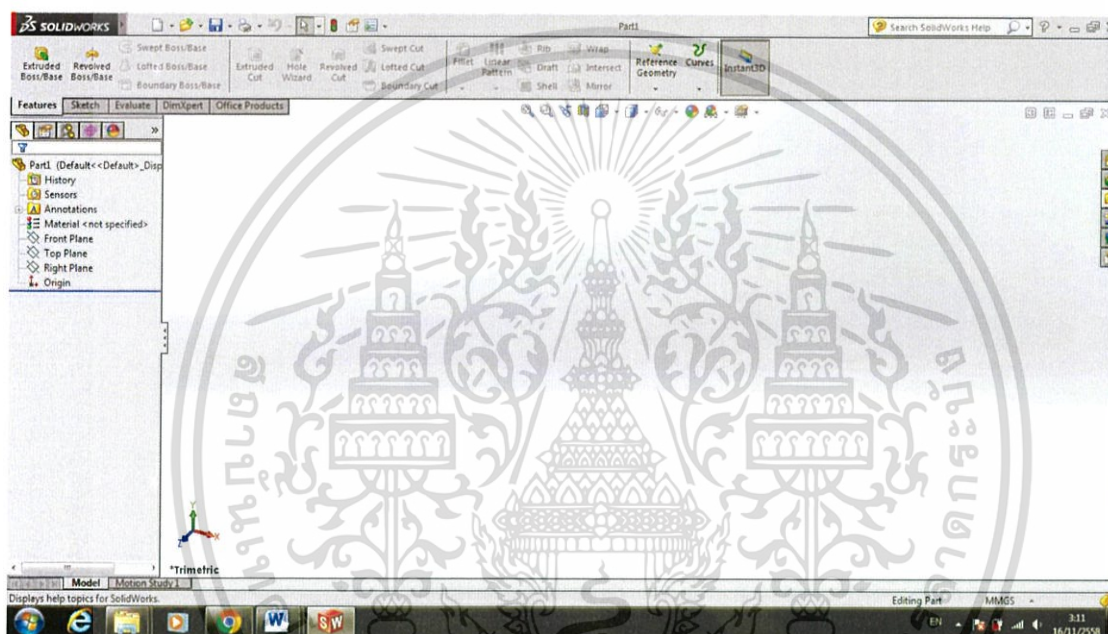
$$f_0 = 0.276 \times 2828.63$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  $f_0 \approx 780\text{ Hz}$  รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

#### 3.4.1 โปรแกรม Solid works

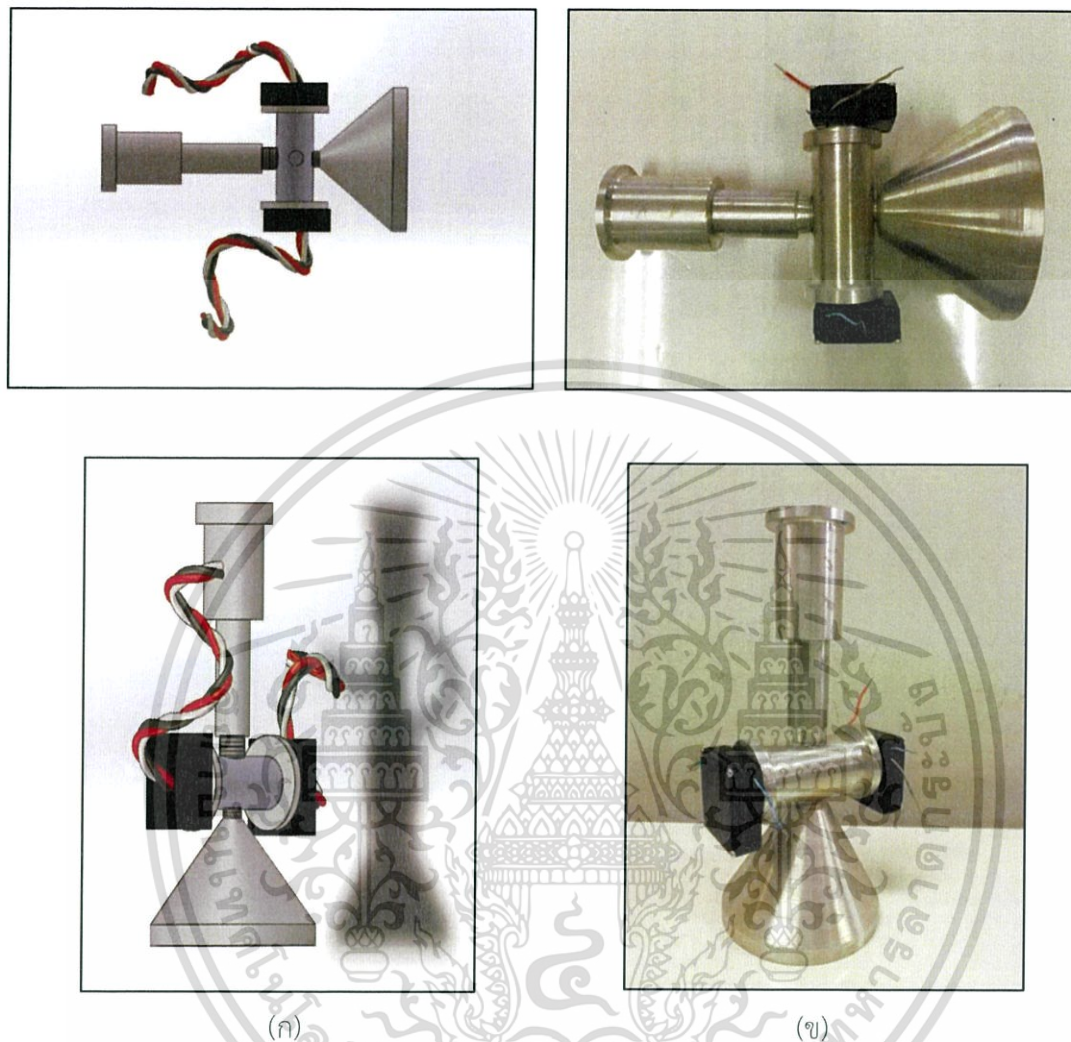
ในการออกแบบเครื่องมือวัด สำหรับวัดควันและของแข็งนั้น จะใช้โปรแกรม Solid works ออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมที่นำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องมือวัดควันและของแข็ง รวมทั้งยังออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ เพื่อให้เห็นองค์ประกอบโดยรวมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อีกด้วย โดยหน้าต่างของโปรแกรม Solid works ที่ใช้ในการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หน้าต่างของโปรแกรม solid works ที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การออกแบบเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

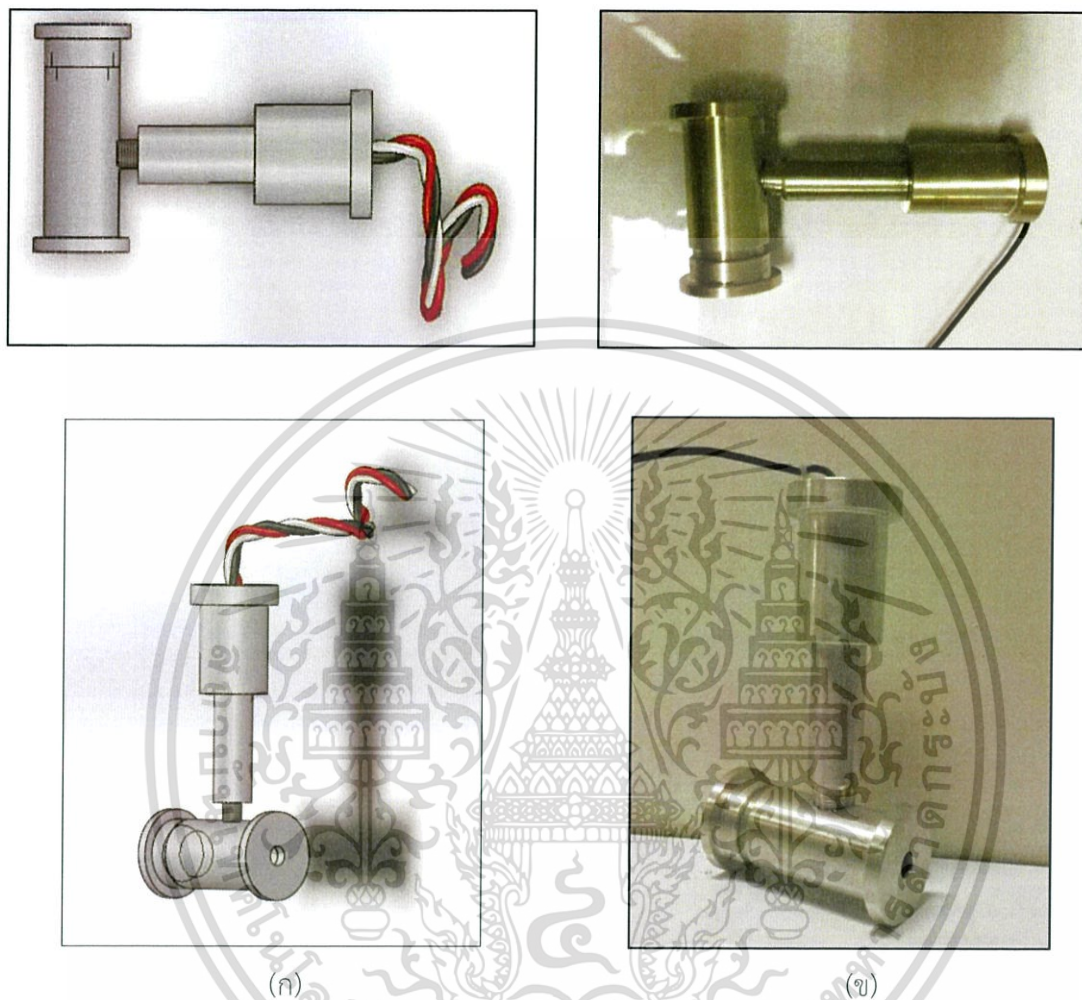


รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องมือวัดที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid works

(ข) เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด ที่สร้างขึ้นมาตามที่ออกแบบ

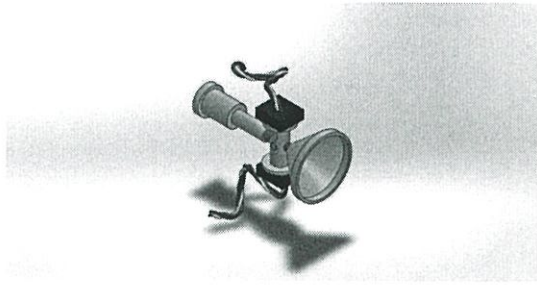
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การออกแบบเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง



รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัด สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid works  
 (ข) เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัด สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งที่สร้างขึ้นมาตามที่ออกแบบ

### 3.4.4 เครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด ในแนวนอน



(a) Isometric



(b). Diametric



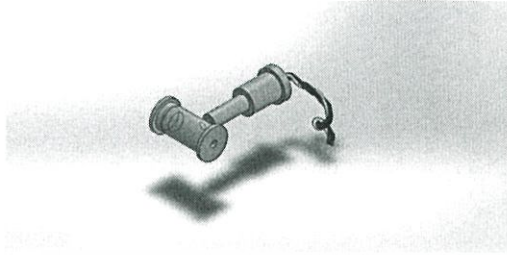
(C) Trimetric

(d) Top

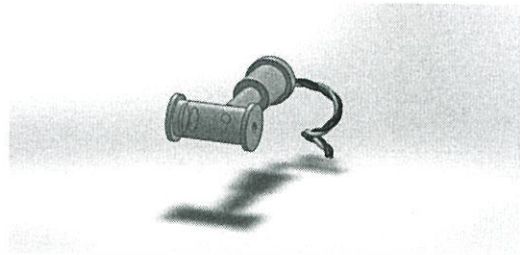
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด ชนิดแนวนอนในมุมมองวัดต่างๆ (a) มุมมอง Isometric ,(b) มุมมอง Diametric ,(c) มุมมอง Trimetric และ (d) Top ( มุมมองด้านบน )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 เครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์  
สำหรับวัด สาระตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ในแนวนอน



(a) Isometric



(b). Diametric



(C) Trimetric

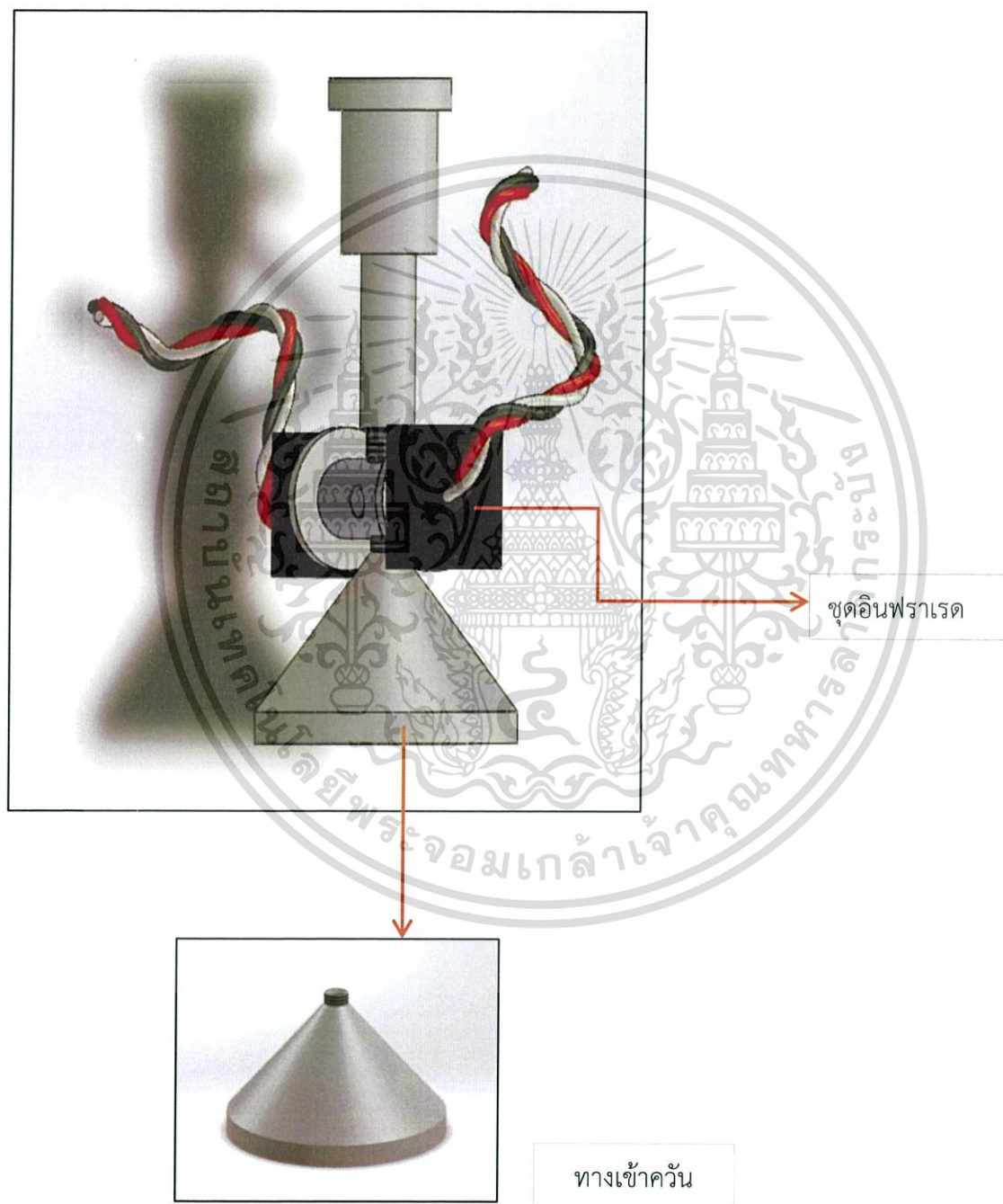
(d) Top

รูปที่ 3.5 โครงสร้างของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์  
สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งชนิดแนวนอน ในมุมมองวัดต่างๆ  
(a) มุมมอง Isometric ,(b) มุมมอง Diametric ,(c)มุมมอง Trimetric  
และ (d) Top ( มุมมองด้านบน )

ซึ่งโครงสร้างของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- 1) เครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด
- 2) ไมโครโฟน
- 3) ชุดแสงอินฟราเรด

โดยส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

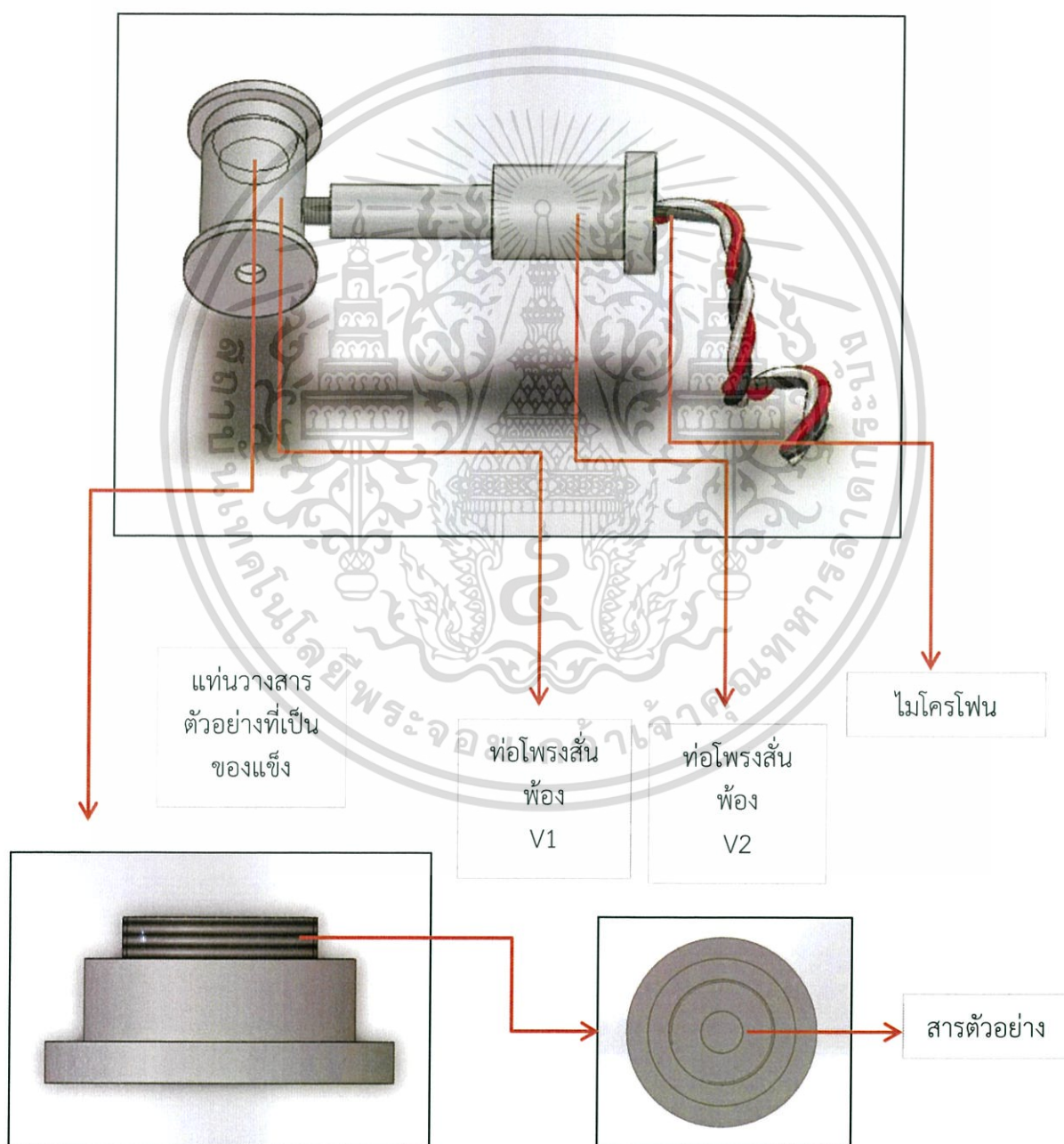


รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโครงสร้างของเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- 1) เครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง
- 2) แท่นวางสารตัวอย่างชนิดของแข็ง
- 3) ไมโครโฟน

โดยส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง



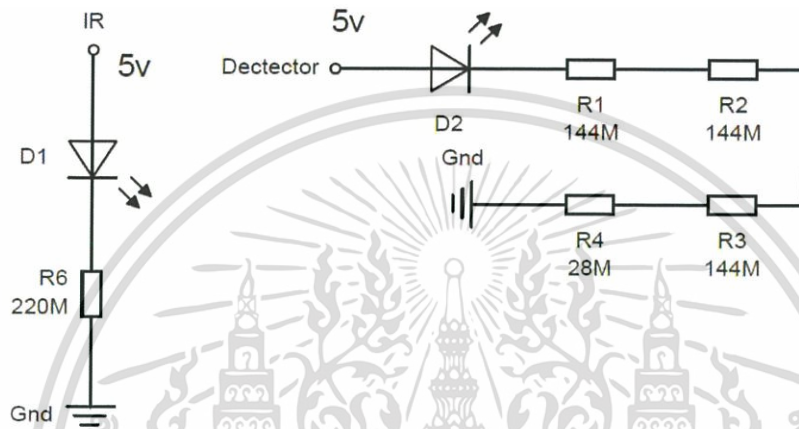
รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 วิธีการดำเนินงาน

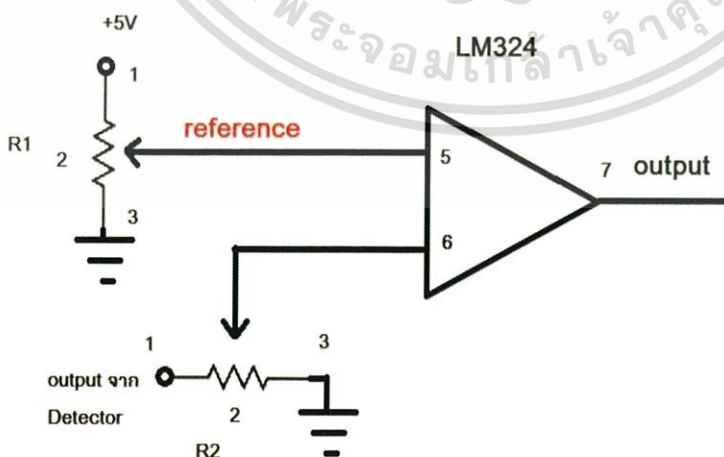
การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การคำนวณสูตรออกแบบเครื่องมือวัด อุปกรณ์ที่จะใช้ในเครื่องมือวัด และวงจรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องมือวัด

#### 3.5.1. วงจรอินฟราเรดดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.8 วงจรอินฟราเรดดีเทคเตอร์ แบบ Schematic

#### 3.5.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

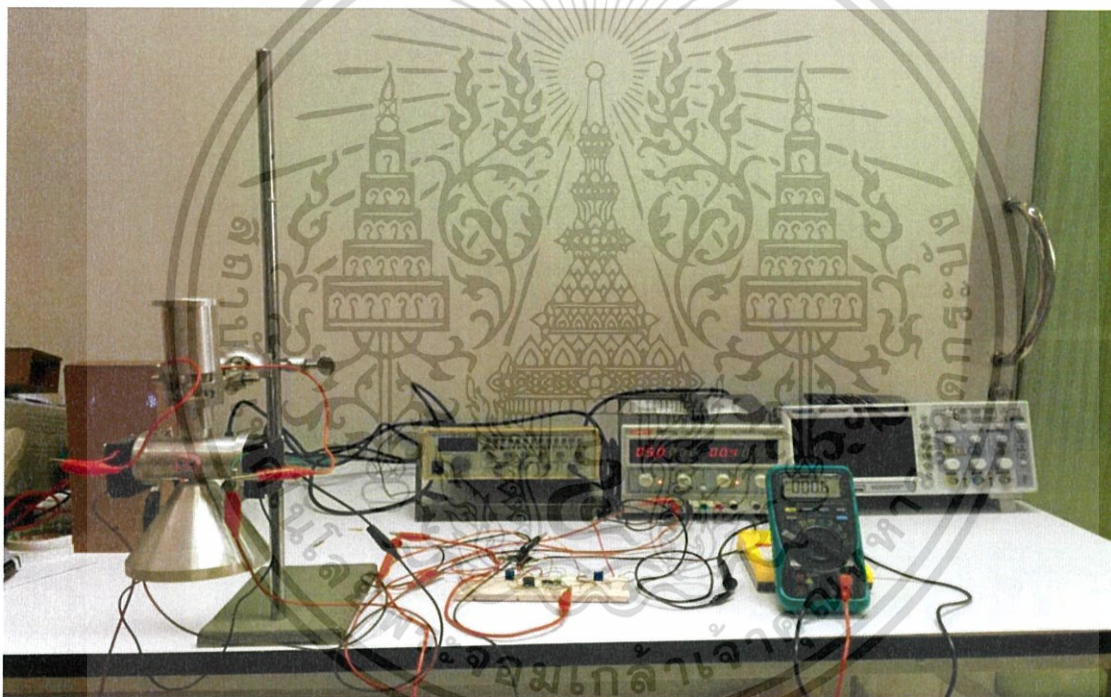


รูปที่ 3.9 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน แบบ Schematic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การทดสอบเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

เราทำการทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดว่าสามารถที่จะใช้งานได้ตามปกติ เราทำการวัดแสงอินฟราเรด ในลักษณะมีควันทันหรือไม่มีควันทัน เพื่อดูประสิทธิภาพของเสียงอินฟราเรดว่ามีผลต่อการวัดควันทันหรือไม่มีควันทันอย่างไร โดยอันดับแรกทำการวัดค่าแสงอินฟราเรดเมื่อจ่ายไฟและไม่จ่ายไฟว่ามีค่าโวลต์เท่าไร หลังจากนั้นทำการเช็คตัวดีเทคเตอร์เมื่อจ่ายไฟและไม่จ่ายไฟว่ามีค่าโวลต์เท่าไร หลังจากนั้นนำทั้งสองตัวมาวางในลักษณะที่แสงอินฟราเรดส่งและตัวดีเทคเตอร์รับ และทำการเช็คค่าชุดแสงอินฟราเรดสามารถใช้งานได้ โดยนำกระดาษมาตัดผ่านตัวรับและตัวส่ง เพื่อดูค่า output ที่ออกว่ามีปริมาณของโวลต์ลดหรือเพิ่ม เมื่อได้ค่าที่ต้องการนำไปใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบมา โดยเช็คว่ามีควันทันและไม่มีควันทันมีผลอย่างไร



รูปที่ 3.10 การทำงานของเครื่องมือวัดควันทันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

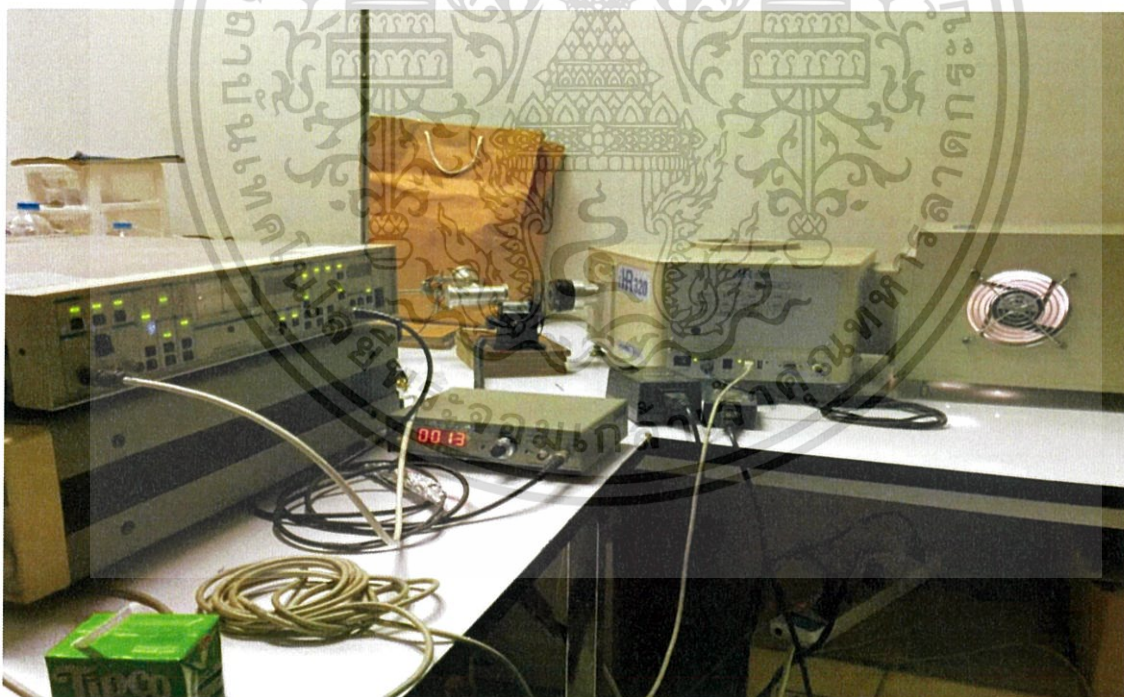
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ผลการทดสอบเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์ เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

เราได้ทำการทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดว่าสามารถที่จะใช้งานได้ตามปกติ โดยเราทำการวัดสารตัวอย่าง สองชนิด คือ Carbon black และ Zinc oxide ซึ่งทำการทดลองในชุดของการวัดค่าการดูดกลืนของแสง โดยหลักการทำงานเราจะทำการเปิดเครื่อง โดยแสงจะมาจากเครื่อง Xenon lamp ผ่านเครื่อง Monochromator และ chopper จะเป็นตัวตัดแสง ให้แสงเข้าที่เครื่องมือวัดของเรา ที่มีสารตัวอย่างอยู่ภายใน หลังจากนั้นไมโครโฟนจะส่งสัญญาณเข้าที่เครื่อง Lock-in amplifier และค่า reference จะเข้าที่เครื่อง chopper และหลังจากนั้นเราจะทำการวัดข้อมูลจากโปรแกรมที่คอมพิวเตอร์

อันดับแรกเราจะทำการปรับค่าความถี่ เพื่อหาค่าโวลต์ โดยการกำหนดค่าความยาวคลื่นให้คงที่ ทำการวัดสารทั้งสองเพื่อหาตำแหน่งที่ความถี่ให้ค่าโวลต์สูงสุด

อันดับที่สองเราจะทำการปรับค่าความยาวคลื่น เพื่อหาค่าโวลต์ โดยการกำหนดค่าความถี่ให้คงที่ ทำการวัดสารทั้งสองเพื่อหาตำแหน่งที่ความยาวคลื่นสูงสุด



รูปที่ 3.11 การทำงานของเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์ เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

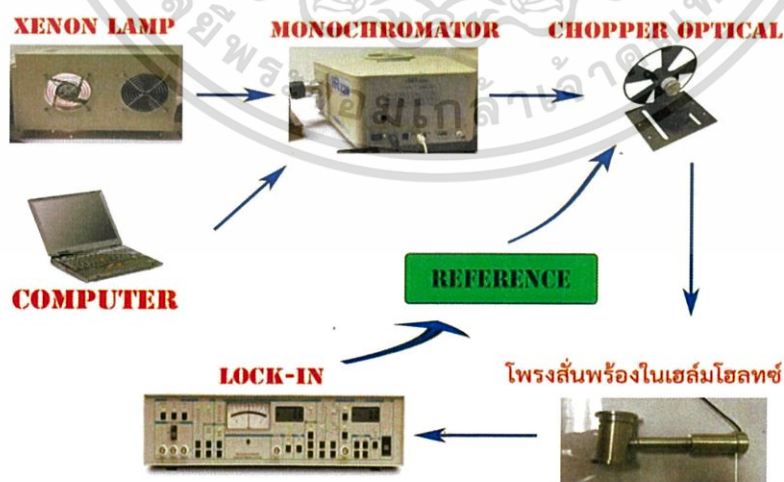
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8. การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดคว้นโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด และเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์

เครื่องมือวัดที่เราออกแบบทั้งวัดคว้นและสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาสำหรับศึกษาการหาค่าการดูดกลืนแสงและหาสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัด ว่าระบบของเราใช้งานได้ โดยเราได้ทำการตรวจสอบระบบของเครื่องมือสำหรับวัดคว้นและสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เครื่องมือที่ใช้วัดคว้นเราได้ทดสอบกับคว้นรูป ว่ามีผลต่อการดูดกลืนแสงของอินฟราเรดหรือไม่ และเรายังทำการตรวจสอบระบบของเครื่องมือวัดสำหรับวัดของแข็งโดยทดสอบกับสารตัวอย่าง คือ Carbon black และ Zinc oxide โดยทดสอบกับระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.12 แผนภาพระบบการทำงานของเครื่องมือวัดคว้นโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด



รูปที่ 3.13 แผนภาพระบบการทำงานของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในส่วนของการออกแบบและทดลองศึกษาหลักการของเซลล์โพลโทเรโซเนเตอร์และการดูดกลืนของแสง โดยการออกแบบเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดควันและสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปพัฒนางานวิจัยของเรา โดยเราพบว่าการออกแบบเครื่องมือวัดโดยใช้สูตรการคำนวณค่าที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องที่ออกแบบ ซึ่งเราได้ออกแบบเครื่องมือเป็นเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและแบบวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

โดยในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องวัดในโพรงสั่นพ้องของเซลล์โพลโทเร ได้แบ่งการทดสอบออกเป็นดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบระบบการทำงานของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืน

##### อินฟราเรด

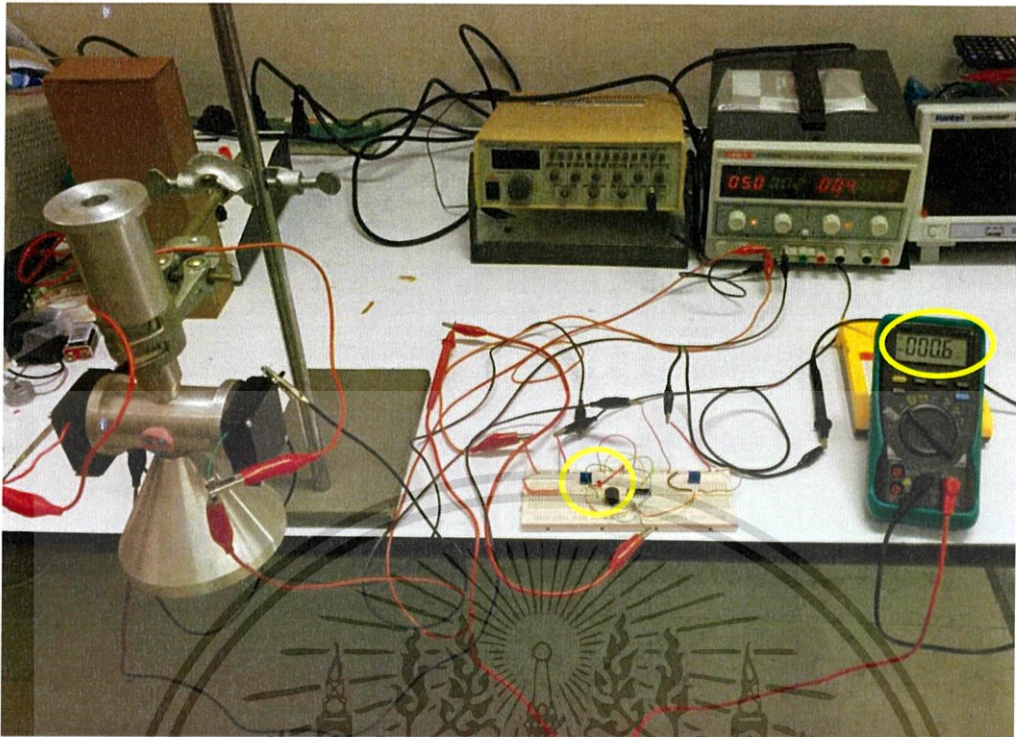
เราจะทำการทดลองโดยนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบมาใช้งานจริง โดยการพิสูจน์หลักการของการดูดกลืนแสงของแสงอินฟราเรด พบว่า ถ้าหากมีควันเข้าไปในระบบจะส่งผลให้เกิดเสียงเป็นสัญญาณเตือนให้รู้ว่ามีควันเข้าไปในระบบ

เมื่อระบบยังไม่มีควัน เราจะกำหนดค่า standard ไว้ค่านึง โดยค่านั้นต้องเท่ากับค่าของโวลต์ที่ใส่เข้าไปในวงจรเปรียบเทียบกับหรือค่าโวลต์สูงสุดที่ระบบวัดได้ พบว่าเมื่อมีควันเข้ามาในระบบ จะทำให้วงจรเปรียบเทียบทำงาน ค่าโวลต์จากดีเทคเตอร์ที่ได้รับ มีค่าน้อยลง ส่งผลให้วงจรเปรียบเทียบทำงานทำให้เกิดเสียงสัญญาณจากวงจร เป็นจากเตือนว่ามีควันเข้ามาในระบบ

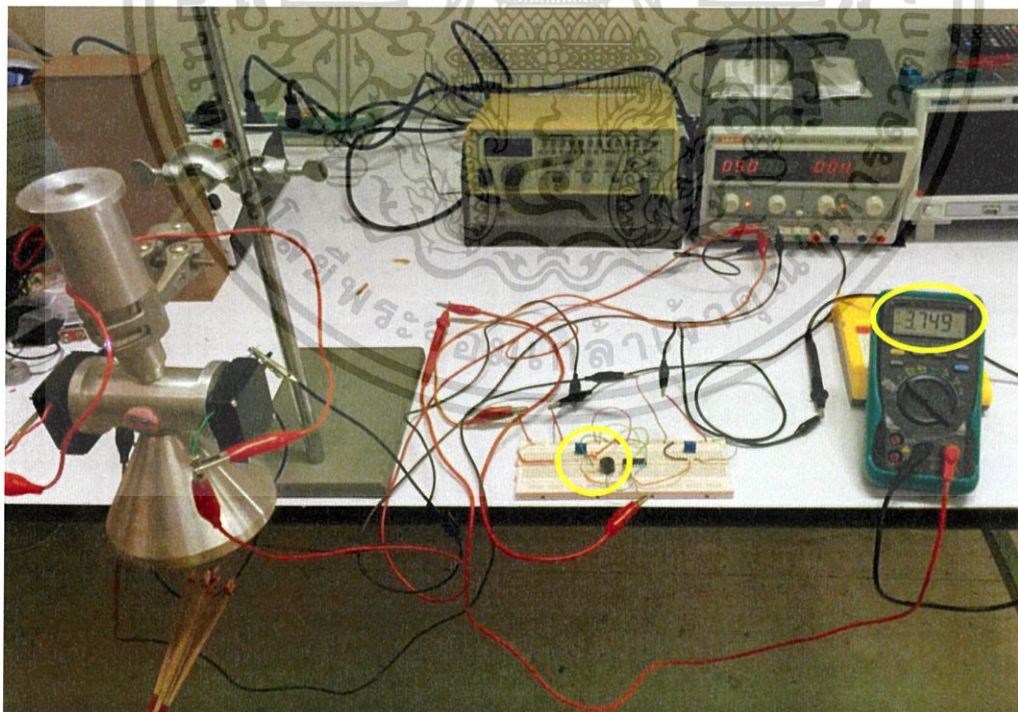
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกการเกิดเสียงของเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรด

เครื่องมือวัดแบบวัดควัน	Output (V)
ไม่มีควัน	โวลต์สูงกว่า 5.02 V
มีควัน	โวลต์ต่ำกว่า 5.02 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการติดไฟ LED ของระบบเมื่อไม่มีควีน



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการติดไฟ LED ของระบบเมื่อมีควีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2. ผลการทดสอบระบบการทำงานของเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

### 4.2.1 วัดสารตัวอย่าง Carbon black โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง

ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์

กำหนดให้ความยาวคลื่น 360 nm

Sensitivity 200  $\mu\text{V}$

Time 100 s

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความถี่ (Hz) และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า (V) จากสารตัวอย่าง carbon black ที่ความยาวคลื่น 360 nm

ความถี่ (Hz)	ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
600	16.5
610	18.2
620	17.7
630	18.7
640	20.7
650	21.5
660	22.4
670	24.6
680	25.3
690	26.3
700	27.5
710	29.2
720	30.6
730	36.7
740	37.8
750	41.1
760	46.7
770	57.7
780	70.8
790	86.5
800	112.3
809	136.1
810	144.6
811	145.7
814	146.6

817	147.3
820	151.7
822	155.5
827	109.5
830	73.7



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ  
ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ในสารตัวอย่าง Carbon Black ที่ความยาวคลื่น 360 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 วัดสารตัวอย่าง Zinc oxide โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง

ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์

กำหนดให้ความยาวคลื่น 360 nm

Sensitivity 200  $\mu\text{V}$

Time 100 s

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าความถี่ (Hz) และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า (V) จากสารตัวอย่าง

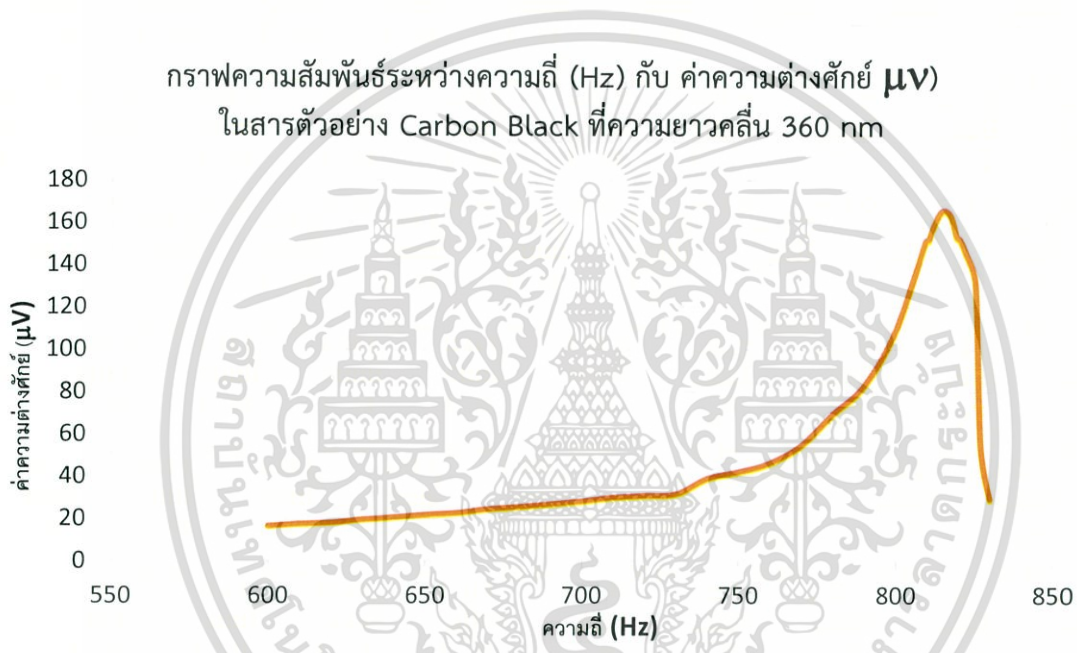
Zinc oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm

ความถี่ (Hz)	ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
600	17.3
610	18.3
620	18.9
630	20.4
640	21.5
650	22.8
660	23.7
670	25.4
680	26.6
690	27.9
700	29.3
710	31.1
720	32.1
730	32.8
740	40.1
750	43.4
760	47.6
770	56.3
780	71.1
790	84.9
800	111.5
809	152.5
810	153.1
811	157.6
814	166.6
817	165.0
819	154.8
820	153.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

822	146.8
825	132.5
827	55.7
830	30.6



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ  
 ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ในสารตัวอย่าง Zinc oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 วัดสารตัวอย่าง Carbon black โดยปรับค่าความยาวคลื่น จาก 350 – 410 nm  
 โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 814 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap  
 กำหนดให้ความถี่ 814 Hz  
 Sensitivity 200  $\mu\text{V}$   
 Time 100 s

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความยาวคลื่น (nm) และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า (V) จากสารตัวอย่าง Carbon black ที่ความถี่ 814 Hz

ความยาวคลื่น(nm)	ค่าเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
360.0	151.3
360.5	151.6
361.0	146.9
361.5	148.0
362.0	147.2
362.5	150.4
363.0	148.1
363.5	150.2
364.0	148.9
364.5	151.1
365.0	149.1
365.5	151.5
366.0	149.7
366.5	148.1
367.0	149.0
367.5	144.9
368.0	148.1
368.5	144.4
369.0	146.8
369.5	149.8
370.0	146.7
370.5	144.1
371.0	148.2
371.5	145.2
372.0	143.9
372.5	143.1
373.0	143.8
373.5	144.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

374.0	144.5
374.5	143.6
375.0	146.2
375.5	145.8
376.0	146.3
376.5	145.2
377.0	143.1
377.5	144.5
378.0	141.5
378.5	145.4
379.0	145.7
379.5	143.7
380.0	144.6
380.5	158.7
381.0	156.1
381.5	157.8
382.0	156.4
382.5	155.7
383.0	156.0
383.5	157.1
384.0	155.9
384.5	157.4
385.0	157.1
385.5	153.9
386.0	152.1
386.5	155.1
387.0	156.2
387.5	154.1
388.0	157.2
388.5	157.1
389.0	154.2
389.5	155.3
390.0	152.0
390.5	156.1
391.0	153.9
391.5	157.4
392.0	153.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

392.5	156.1
393.0	154.5
393.5	152.9
394.0	152.7
394.5	152.7
395.0	149.7
395.5	152.1
396.0	152.8
396.5	152.1
397.0	154.1
397.5	155.8
398.0	156.9
398.5	156.5
399.0	158.1
399.5	155.9
400.0	155.4
400.5	150.7
401.0	152.7
401.5	156.9
402.0	156.9
402.5	156.7
403.0	154.9
403.5	152.3
404.0	152.8
404.5	153.2
405.0	154.7
405.5	155.1
406.0	152.6
406.5	149.4
407.0	155.2
407.5	156.8
408.0	155.2
408.5	154.2
409.0	153.8
409.5	153.9
410.0	150.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 วัดสารตัวอย่าง Zinc Oxide โดยปรับค่าความยาวคลื่น จาก 350 – 410 nm  
โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 814 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap

กำหนดให้ความถี่ 814 Hz

Sensitivity 200  $\mu\text{V}$

Time 100 s

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าความยาวคลื่น (nm) และค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า (V) จากสารตัวอย่าง Zinc oxide ที่ความถี่ 814 Hz

ความยาวคลื่น(nm)	ค่าเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
360.0	157.9
360.5	158.7
361.0	158.1
361.5	161.3
362.0	159.6
362.5	154.8
363.0	159.4
363.5	157.3
364.0	156.6
364.5	160.4
365.0	160.5
365.5	159.7
366.0	162.3
366.5	159.7
367.0	157.3
367.5	159.3
368.0	156.4
368.5	152.3
369.0	155.9
369.5	160.6
370.0	155.1
370.5	155.7
371.0	157.5
371.5	156.6
372.0	156.2
372.5	156.1
373.0	155.5
373.5	154.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

374.0	154.6
374.5	155.1
375.0	153.9
375.5	158.1
376.0	160.4
376.5	161.3
377.0	161.4
377.5	161.1
378.0	160.0
378.5	160.9
379.0	155.6
379.5	159.1
380.0	155.2
380.5	152.2
381.0	150.4
381.5	152.4
382.0	152.4
382.5	151.8
383.0	151.6
383.5	149.8
384.0	150.8
384.5	150.6
385.0	151.8
385.5	152.5
386.0	152.5
386.5	149.1
387.0	150.1
387.5	143.8
388.0	151.1
388.5	153.6
389.0	152.9
389.5	151.8
390.0	155.2
390.5	154.4
391.0	149.7
391.5	151.1
392.0	150.1

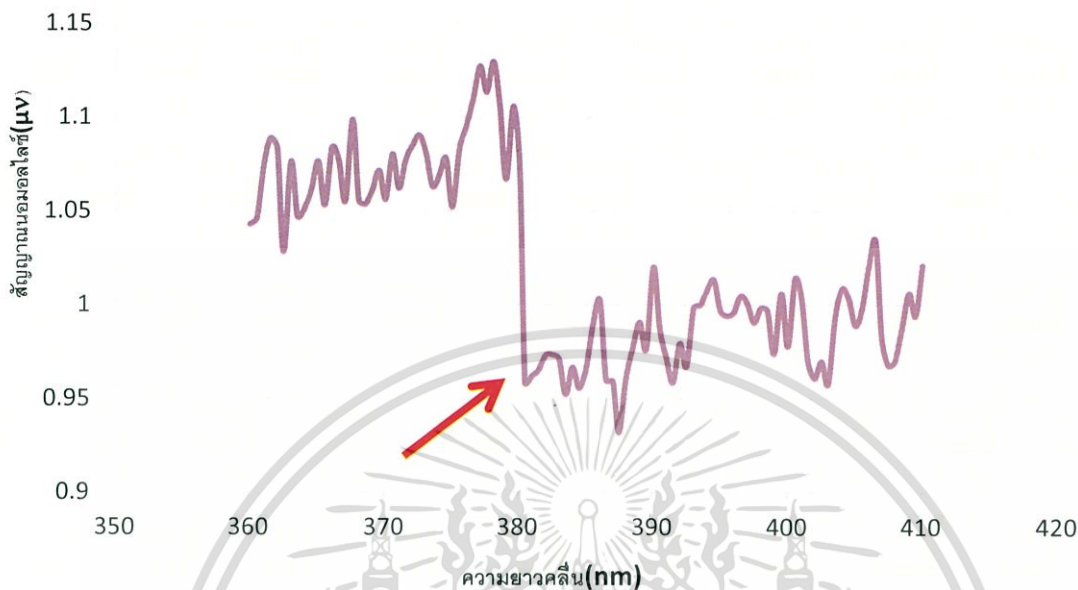
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

392.5	151.2
393.0	154.4
393.5	153.1
394.0	154.1
394.5	155.0
395.0	149.4
395.5	151.4
396.0	152.4
396.5	152.9
397.0	154.4
397.5	154.6
398.0	156.9
398.5	156.2
399.0	154.2
399.5	157.1
400.0	152.2
400.5	153.1
401.0	153.4
401.5	152.4
402.0	150.9
402.5	152.2
403.0	148.6
403.5	151.6
404.0	154.4
404.5	153.8
405.0	153.2
405.5	155.0
406.0	156.1
406.5	154.7
407.0	152.7
407.5	152.1
408.0	150.7
408.5	152.4
409.0	155.0
409.5	153.2
410.0	153.8

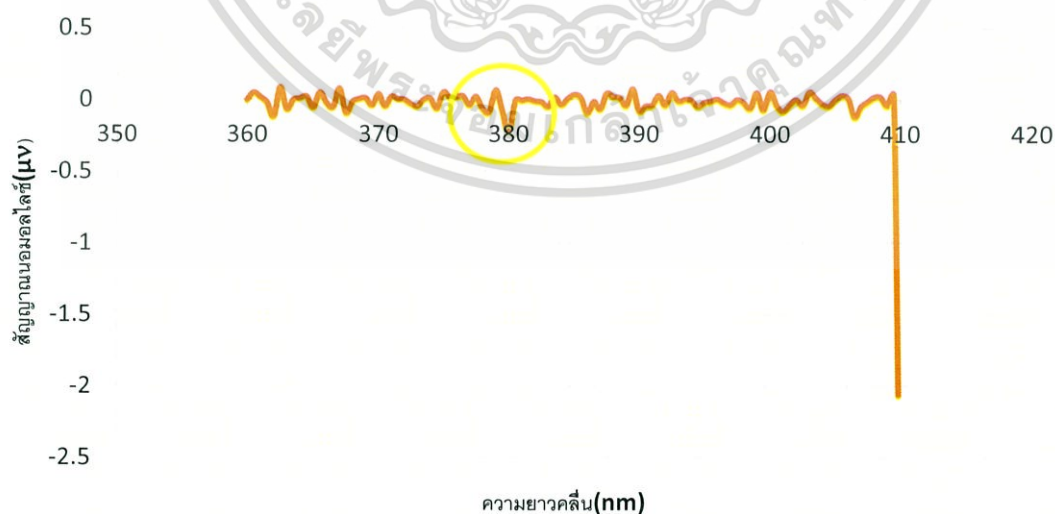
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )ของสาร  
ตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide ที่ความถี่ 814 Hz ในช่วงความยาวคลื่น  
350 – 410 nm

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide โดยการ Diff



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับสัญญาณนอร์มัลไลซ์( $\mu\text{V}$ )ของสาร

ตัวอย่าง Carbon black และ Zinc Oxide ที่ความถี่ 814 Hz ในช่วงความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบเครื่องมือวัดควันโดยใช้หลักการดูดกลืนอินฟราเรดและเครื่องมือวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลท์เรโซเนเตอร์ ในส่วนของการออกแบบเครื่องมือวัดสำหรับวัดของแข็งนั้นพบว่า ค่าความถี่ที่เราจะได้คือ  $f_0 = 780 \text{ Hz}$  และค่าของ  $v_1 = 2.95 \times 10^{-5} m^3$  ,  $v_2 = 1.47 \times 10^{-5} m^3$

หลังจากนั้นเราได้ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดว่ามีประสิทธิภาพสามารถตอบสนองความต้องการของงานวิจัยเราได้มากน้อยแค่ไหน โดยเราจะทำการทดสอบค่าของแสงอินฟราเรดและดีเทคเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบ โดยทำการวัดค่าโวลต์ อินฟราเรดและดีเทคเตอร์ที่ตอบสนองดีที่สุด หลังจากนั้นทำการทดสอบระบบ พบว่าเมื่อไม่มีควันค่าโวลต์จะคงที่ แต่เมื่อมีควันเข้าไปในระบบพบว่าค่าโวลต์จะค่อยๆลดลง จนเกือบคงที่ ซึ่งค่าโวลต์เมื่อไม่มีควันวัดได้ 5.02mV และเมื่อมีควันระบบวัดได้ต่ำสุดที่ 5.01mV โดย เมื่อสัญญาณมีควันกับไม่มีควันกำหนดให้ต่างกัน เนื่องจากพบว่ามีค่าความไวในการวัดที่เหมาะสม

เครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง พบว่ามีค่าความถี่กำหนดจากการทดลอง 814 Hz ในขณะที่จากการคำนวณ 780 Hz และเมื่อนำไปทดสอบสามารถวัดและพบค่าแถบพลังงานต้องห้ามของ ZnO เท่ากับ 380 nm หรือ 3.27 eV

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาวิธีการใช้งานของระบบและอุปกรณ์ที่มีอยู่ก่อนลงมือปฏิบัติจริง เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการออกแบบเครื่องมือ หากต้องการที่จะนำงานวิจัยไปพัฒนาต่อควรที่จะใช้กับแสงชนิดอื่น หรือแหล่งกำเนิดความถี่แบบอื่น ไมโครโฟนที่ใช้ก็ควรดูคุณสมบัติของมันให้ดีว่าควรใช้กับงานแบบไหน เพื่อไม่ให้เกิดการเสียเวลาในการหาอุปกรณ์ และเมื่อทดลองก็ควรที่จะเตรียมแผนสำรองเอาไว้เผื่อการการผิดพลาดจากการทำงาน และควรออกแบบเครื่องมือในลักษณะที่สามารถใช้งานได้ง่ายมากกว่านี้เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรรณก ทาสีขาว.ค.ม.สันต์ เย็นไธสง. พนิดา ปิ่นประเสริฐ. 2558. “การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์นาโนพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก”.private commucation
- [2] ศิริเดช บุญแสง. 2551. “การพัฒนาวิธีโฟโตอะคูสติกแบบโดเมนความถี่สำหรับการหาค่าคุณสมบัติทางแสงของเนื้อเยื่อ”
- [3] ทศนีย์ มณีทุม. ธันย์ชนก ฟิงสุวรรณ. 2554. “เฮล์มโฮลทซ์เรโซเนเตอร์”
- [4] X. D. Wang, Y. J. Pang, G. Ku, X. Y. Xie, G. Stoica, and L. H. V. Wang, “Noninvasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional in vivo imaging of the brain” Nature Biotechnology, vol. 21, pp. 803-806, 2003.
- [5] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sander, “Fundamentals of Acoustics” Wiley, New York ,1982.
- [6] M. W. Sigrist, “Laser Generation of Acoustic-Waves in Liquids and Gases” Journal of Applied Physics, vol. 60, pp. R83-R121, 1986
- [7] P.C. Beard, F. Perennes, E. Draguioni, T. N. Mills, “Optical fiber photoacoustic photothermal probe” Optics Letters, vol. 23, pp. 1235-1237, 1998.
- [8] Q. X. Chen, A. Davies, R. J. Dewhurst, and P. A. Payne, “Photoacoustic Probe for Intra-arterial Imaging and Therapy”, Electronics Letters, vol. 29, pp. 1632-1633, 1993.
- [9] R. O. Esenaliev, A. A. Karabutov, and A. A. Oraevsky, “Sensitivity of laser optoacoustic imaging in detection of small deeply embedded tumors” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 5, pp. 981-988, 1999.
- [10] Ratchathewi, Applied Optics Group. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic\\_laser2.htm](http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser2.htm)
- [11] T. Starecki, “Windowless Open Photoacoustic Helmholtz Cell”, Institute of Electronic Systems, Warsaw University of Technology Nowowiejska, vol.114, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบเครื่องมือวัดสัญญาณโพโตอะคูสติคที่ใช้หลักการของเฮล์มโฮลท์  
เรโซเนเตอร์ สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

- 1.) วัดสารตัวอย่าง Carbon Black โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง  
ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์

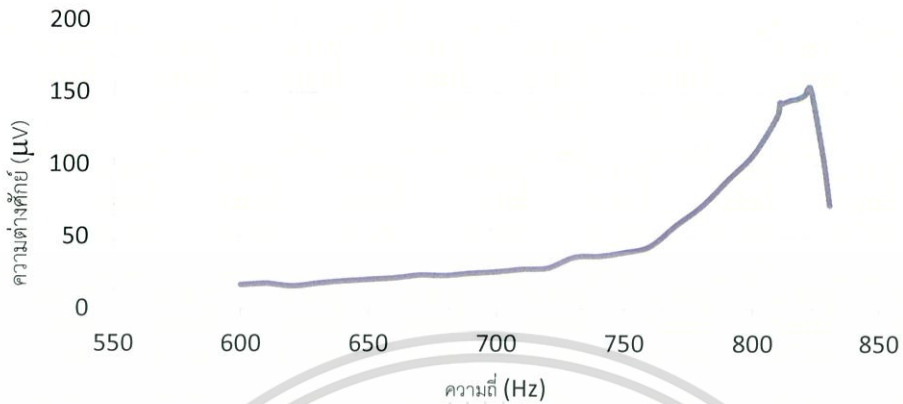
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ความถี่ (Hz)	ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )	ความต่างศักย์ $\mu$ (V)	ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
600	17.7	14.4	17.5
610	18.5	18.0	18.3
620	16.8	18.3	18.0
630	18.8	18.1	19.2
640	20.3	20.3	21.5
650	21.5	21.9	21.3
660	22.5	22.1	22.6
670	24.5	24.4	24.9
680	24.3	25.0	26.7
690	26.0	26.4	26.6
700	27.1	27.8	27.0
710	28.8	29.3	29.5
720	29.8	31.1	31.0
730	37.2	36.3	36.7
740	38.0	37.7	37.8
750	40.6	42.7	40.1
760	44.8	47.7	47.7
770	59.4	56.1	57.7
780	72.9	69.5	70.0
790	91.2	83.4	85.0
800	109.1	111.3	116.5
809	135.5	134.9	137.7
810	145.3	145.5	143.0
811	144.5	145.9	146.7
814	146.7	145.9	147.3
817	147.7	148.5	145.9
820	150.7	152.0	152.5
822	155.5	154.3	156.9
827	110.2	109.7	108.6
830	74.0	70.2	77.0

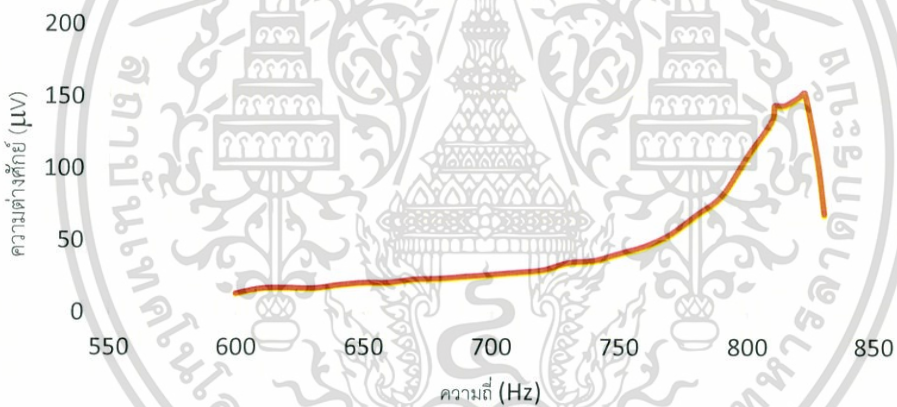
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

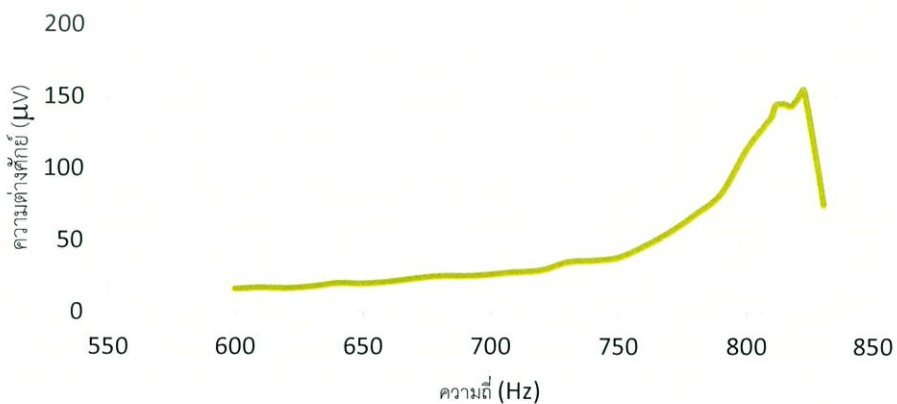
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )  
ในสารตัวอย่าง Carbon Black ที่ความยาวคลื่น 385 nm ครั้งที่ 1



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )  
ในสารตัวอย่าง Carbon Black ที่ความยาวคลื่น 385 nm ครั้งที่ 2



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )  
ในสารตัวอย่าง Carbon Black ที่ความยาวคลื่น 385 nm ครั้งที่ 3

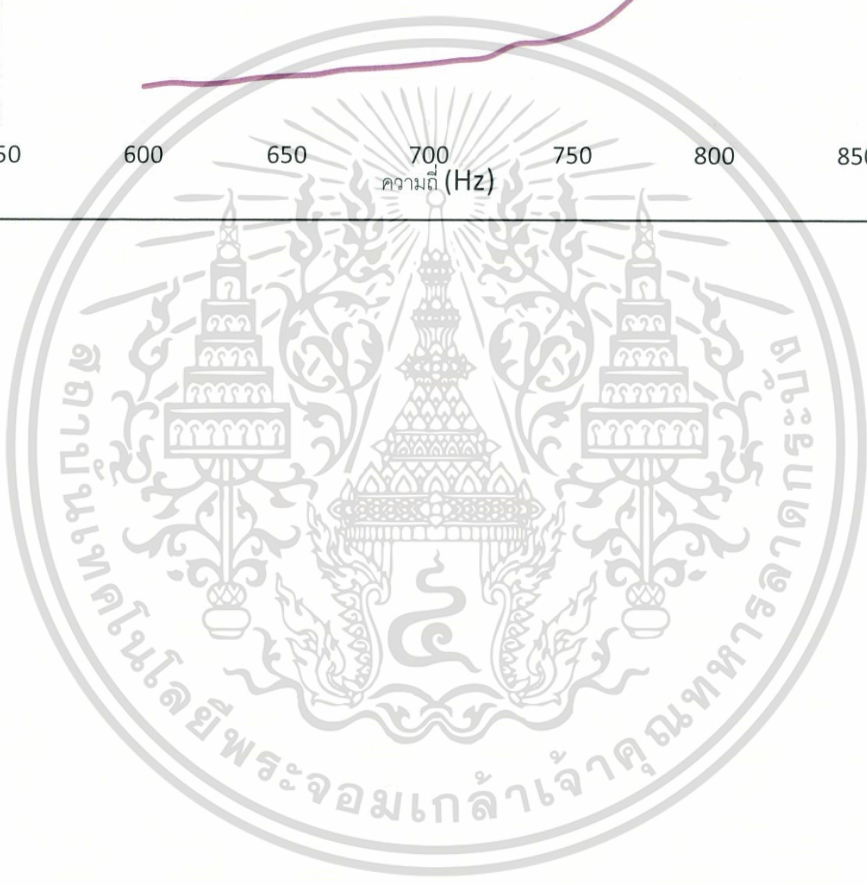
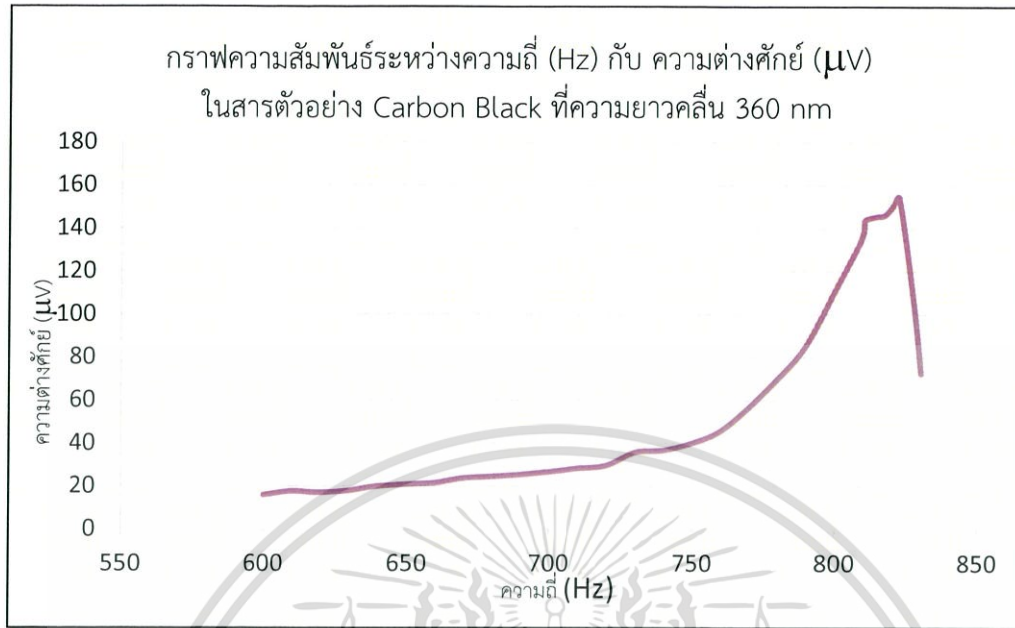


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ย

ความถี่ (Hz)	ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ ( $\mu V$ )
600	16.5
610	18.2
620	17.7
630	18.7
640	20.7
650	21.5
660	22.4
670	24.6
680	25.3
690	26.3
700	27.5
710	29.2
720	30.6
730	36.7
740	37.8
750	41.1
760	46.7
770	57.7
780	70.8
790	86.5
800	112.3
809	136.0
810	144.6
811	145.7
814	146.6
817	147.3
820	151.7
822	155.5
827	109.5
830	73.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) วัดสารตัวอย่าง Zinc Oxide โดยปรับค่าความถี่ของตัวตัดแสง  
ซึ่งคงค่าความยาวคลื่นไว้ที่ 360 nm เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์

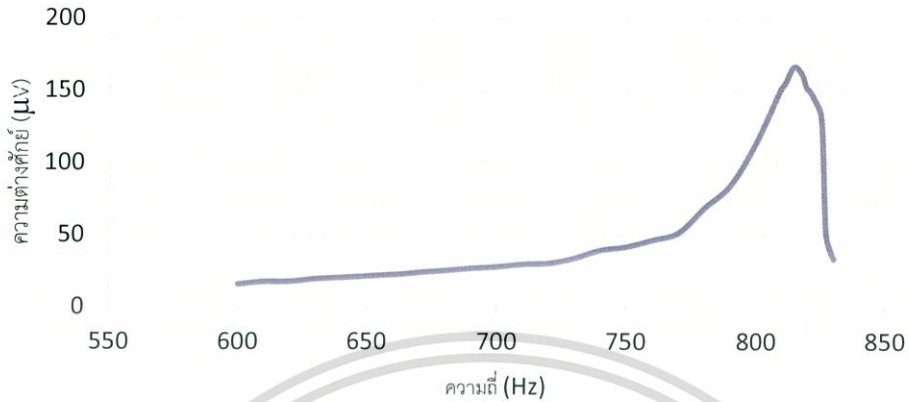
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ความถี่ (Hz)	ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )	ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )	ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )
600	16.8	17.5	17.6
610	18.5	18.1	18.3
620	18.7	19.3	18.9
630	20.6	20.2	20.5
640	21.5	21.4	21.6
650	22.6	23.6	22.3
660	23.6	23.7	23.8
670	25.2	25.6	25.6
680	26.6	26.5	26.7
690	28.1	27.6	28.1
700	29.3	29.4	29.3
710	31.1	31.0	31.2
720	31.8	32.2	32.2
730	35.3	36.5	26.8
740	40.8	39.4	40.3
750	43.3	43.5	43.5
760	48.1	47.2	47.7
770	53.1	58.1	57.7
780	70.5	72.5	70.3
790	86.5	83.3	85.0
800	116.9	101.2	116.5
809	152.5	151.9	153.1
810	155	154.8	149.6
811	157.9	157.6	157.5
814	168.2	165.4	166.3
817	164.3	164.8	165.9
819	154.3	155.3	154.9
820	152.3	154.7	153.7
822	146.5	146.7	147.4
825	132.2	132.4	132.9
827	53.5	54.2	59.4
830	35.0	30.0	27.0

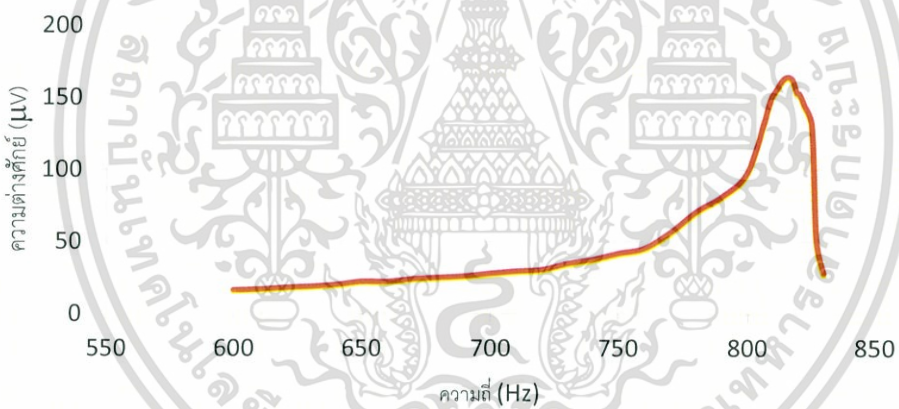
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

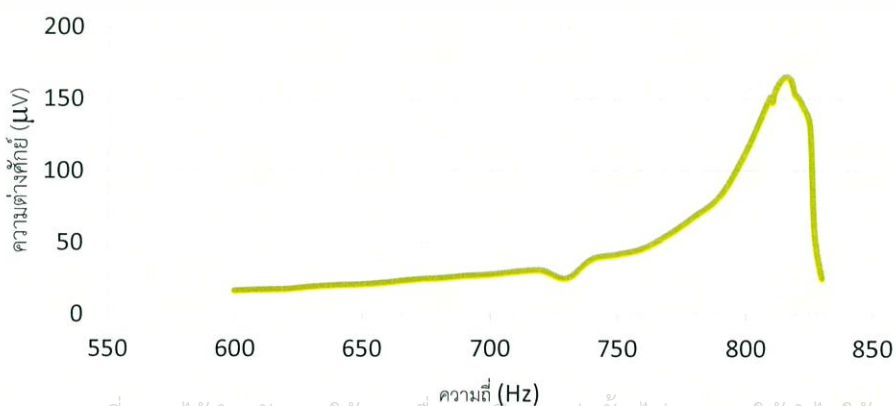
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu V$ )  
ในสารตัวอย่าง Zinc Oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm ครั้งที่ 1



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu V$ )  
ในสารตัวอย่าง Zinc Oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm ครั้งที่ 2



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu V$ )  
ในสารตัวอย่าง Zinc Oxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm ครั้งที่ 3



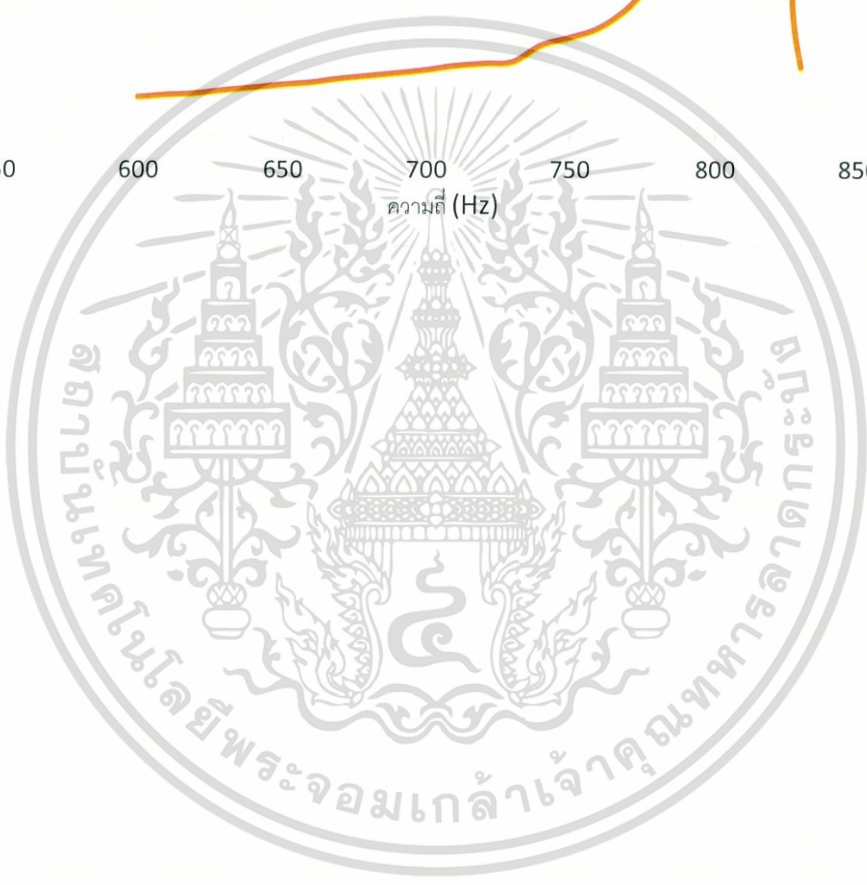
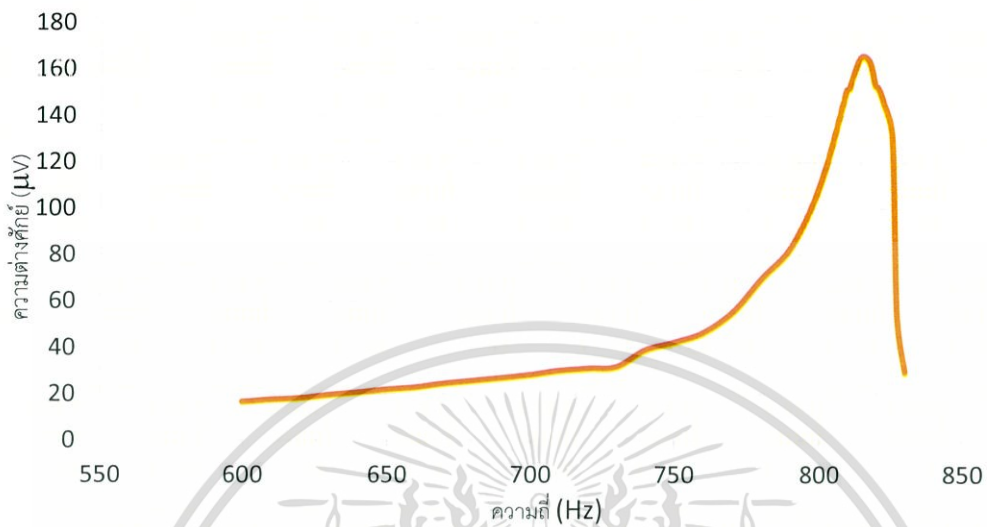
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค่าเฉลี่ย

ความถี่ (Hz)	ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ ( $\mu V$ )
600	17.3
610	18.3
620	18.9
630	20.4
640	21.5
650	22.8
660	23.7
670	25.4
680	26.6
690	27.9
700	29.3
710	31.1
720	32.1
730	32.8
740	40.1
750	43.4
760	47.6
770	56.3
780	71.1
790	84.9
800	111.5
809	152.5
810	153.1
811	157.6
814	166.6
817	165.0
819	154.8
820	153.5
822	146.8
825	132.5
827	55.7
830	30.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ ความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ )  
ในสารตัวอย่าง Zincoxide ที่ความยาวคลื่น 360 nm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) วัดสารตัวอย่าง Carbon black โดยปรับค่าความยาวคลื่น จาก 350 – 410 nm โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 814 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ความยาวคลื่น (nm)	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 1	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 2	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 3
360	151.5	150.5	151.9
360.5	155.5	148.4	150.9
361	150.7	144.4	145.8
361.5	149.7	145.6	148.9
362	150.5	144.5	146.7
362.5	154.2	146.3	150.9
363	153.3	143.2	147.6
363.5	159.3	145.3	145.9
364	154.3	143.6	148.9
364.5	160.3	145.3	147.8
365	155.0	146.2	145.9
365.5	156.4	148.7	149.6
366	155.2	145.9	147.9
366.5	155.5	142.5	146.5
367	156.1	141.6	149.3
367.5	153.0	139.6	142.1
368	154.3	141.3	148.5
368.5	147.0	142.5	143.8
369	150.7	144.4	145.3
369.5	152.0	148.2	149.2
370	147.7	146.8	145.6
370.5	141.6	145.3	145.3
371	148.5	147.2	148.9
371.5	145.7	144.6	145.5
372	146.2	141.1	144.4
372.5	147.5	139.9	141.8
373	145.7	142.3	143.4
373.5	146.5	143.6	144.5
374	147.3	142.5	143.9
374.5	145.6	141.5	143.9
375	151.3	144.3	142.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

375.5	149.3	143.3	145.0
376	148.5	141.5	148.9
376.5	147.3	142.6	145.7
377	148.5	138.8	142.0
377.5	147.2	140.6	145.8
378	143.2	140.2	141.2
378.5	151.8	140.8	143.8
379	149.8	142.6	144.7
379.5	146.3	137.1	147.9
380	145.5	145.3	143.2
380.5	163.0	154.7	158.4
381	161.0	152.3	155.2
381.5	157.9	154.5	161.0
382	157.2	154.4	157.7
382.5	158.5	152.9	155.9
383	159.5	156.3	152.2
383.5	159.0	155.8	156.7
384	157.0	152.5	158.2
384.5	159.3	156.0	157.1
385	161.5	151.2	158.4
385.5	158.2	150.5	153.2
386	152.5	153.5	150.2
386.5	151.0	156.5	157.9
387	156.0	157.5	155.2
387.5	152.3	155.9	154.3
388	152.5	160.1	159.2
388.5	155.2	158.7	157.4
389	153.0	156.2	153.5
389.5	152.0	155.8	158.2
390	153.0	151.5	151.5
390.5	154.2	157.5	156.8
391	154.4	155.2	152.3
391.5	159.9	152.6	159.7
392	155.8	150.3	153.2
392.5	156.5	155.3	156.6
393	152.2	157.5	153.9
393.5	149.2	158.5	151.2

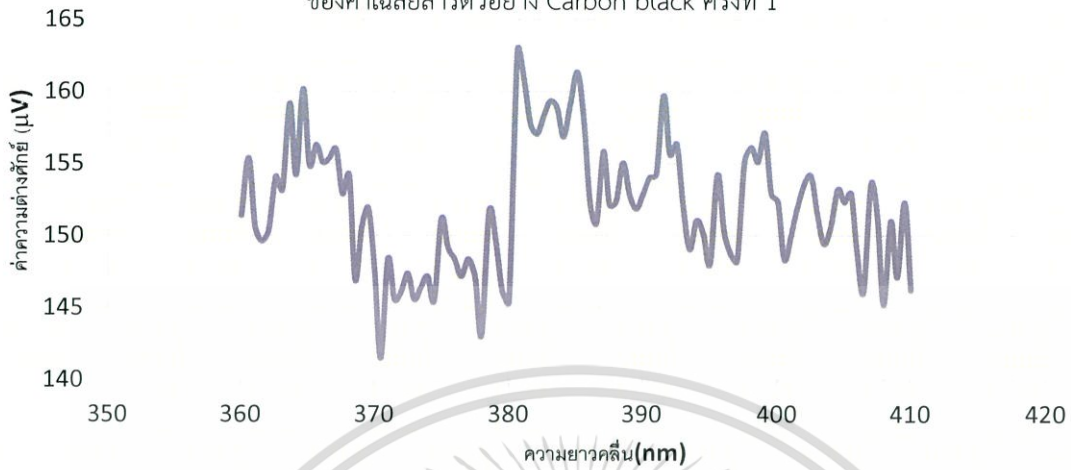
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

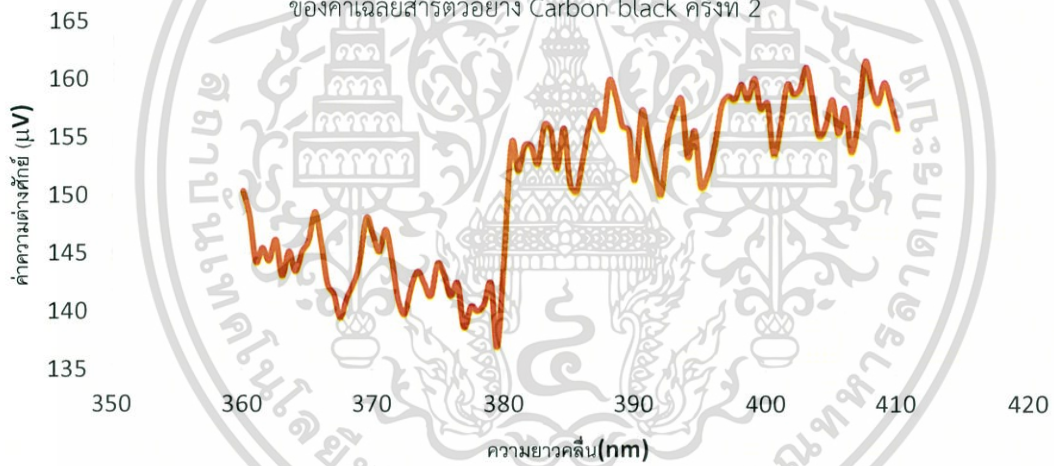
394	151.2	153.5	153.4
394.5	150.3	155.8	152.2
395	148.2	151.0	150.0
395.5	154.4	152.0	149.9
396	150.5	154.5	153.4
396.5	148.9	158.0	149.2
397	148.4	158.8	155.2
397.5	155.3	158.5	153.8
398	156.3	159.8	154.7
398.5	155.3	158.5	155.8
399	157.3	160.3	156.8
399.5	153.1	157.7	156.9
400	152.5	158.2	155.7
400.5	148.5	153.8	149.9
401	150.2	156.0	152.0
401.5	152.2	159.8	158.8
402	153.8	159.0	157.9
402.5	154.3	159.4	156.4
403	151.6	161.3	151.8
403.5	149.6	158.5	148.8
404	150.8	155.4	152.4
404.5	153.4	156.2	150.0
405	152.5	158.5	153.1
405.5	153.1	155.6	156.7
406	149.0	157.8	151.2
406.5	146.3	154.0	148.1
407	153.8	156.7	155.1
407.5	151.5	161.8	157.3
408	145.4	159.7	160.5
408.5	151.2	158.2	153.2
409	147.3	160.0	154.2
409.5	152.5	158.2	151.1
410	146.4	156.0	148.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

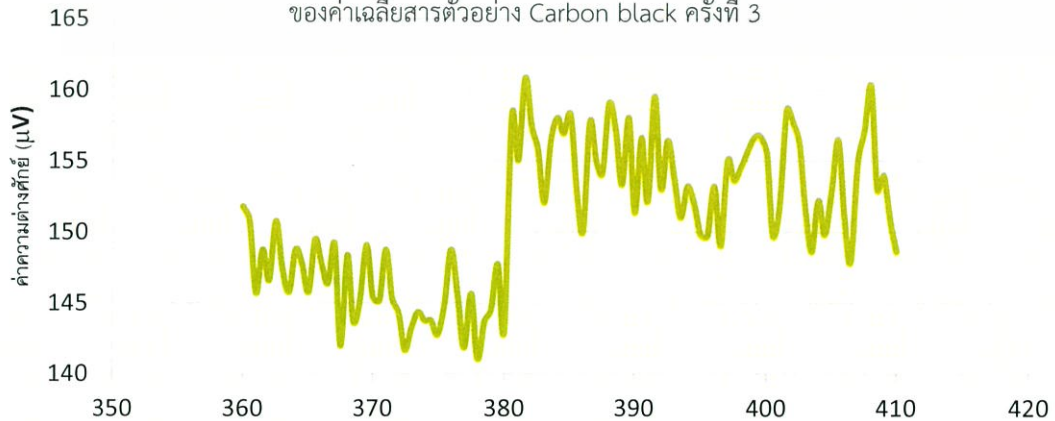
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black ครั้งที่ 1



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black ครั้งที่ 2



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black ครั้งที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ย

ความยาวคลื่น(nm)	ค่าเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ ( $\mu V$ )
360.0	151.3
360.5	151.6
361.0	146.9
361.5	148.0
362.0	147.2
362.5	150.4
363.0	148.1
363.5	150.2
364.0	148.9
364.5	151.1
365.0	149.1
365.5	151.5
366.0	149.7
366.5	148.1
367.0	149.0
367.5	144.9
368.0	148.1
368.5	144.4
369.0	146.8
369.5	149.8
370.0	146.7
370.5	144.1
371.0	148.2
371.5	145.2
372.0	143.9
372.5	143.1
373.0	143.8
373.5	144.8
374.0	144.5
374.5	143.6
375.0	146.2
375.5	145.8
376.0	146.3
376.5	145.2
377.0	143.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน 377.0 รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 143.1 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

377.5	144.5
378.0	141.5
378.5	145.4
379.0	145.7
379.5	143.7
380.0	144.6
380.5	158.7
381.0	156.1
381.5	157.8
382.0	156.4
382.5	155.7
383.0	156.0
383.5	157.1
384.0	155.9
384.5	157.4
385.0	157.1
385.5	153.9
386.0	152.1
386.5	155.1
387.0	156.2
387.5	154.1
388.0	157.2
388.5	157.1
389.0	154.2
389.5	155.3
390.0	152.0
390.5	156.1
391.0	153.9
391.5	157.4
392.0	153.1
392.5	156.1
393.0	154.5
393.5	152.9
394.0	152.7
394.5	152.7
395.0	149.7
395.5	152.1

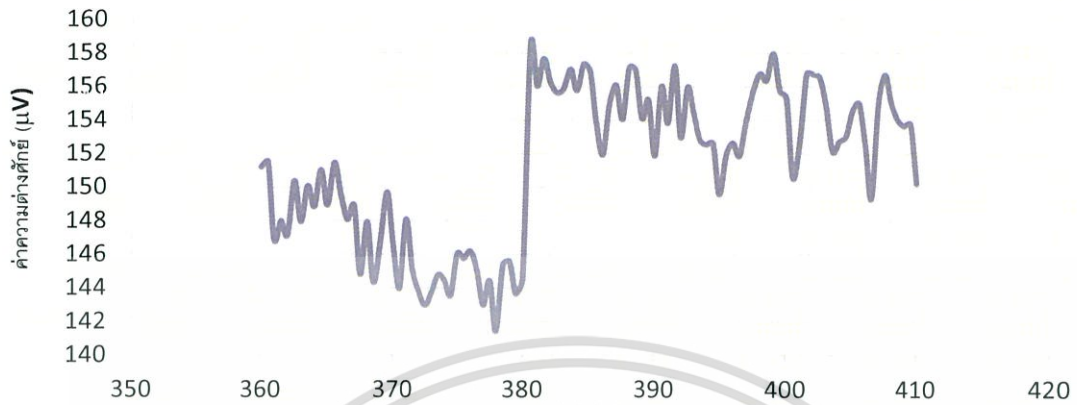
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

396.0	152.8
396.5	152.1
397.0	154.1
397.5	155.8
398.0	156.9
398.5	156.5
399.0	158.1
399.5	155.9
400.0	155.4
400.5	150.7
401.0	152.7
401.5	156.9
402.0	156.9
402.5	156.7
403.0	154.9
403.5	152.3
404.0	152.8
404.5	153.2
405.0	154.7
405.5	155.1
406.0	152.6
406.5	149.4
407.0	155.2
407.5	156.8
408.0	155.2
408.5	154.2
409.0	153.8
409.5	153.9
410.0	150.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Carbon black



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) วัดสารตัวอย่าง Zinc Oxide โดยปรับค่าความ ยาวคลื่น จาก 350 – 410 nm  
โดยคงค่าความถี่การตัดแสงไว้ที่ 814 Hz เพื่อหาค่า Energy Gap

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ความยาวคลื่น (nm)	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 1	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 2	ค่าความต่างศักย์ ( $\mu\text{V}$ ) ครั้งที่ 3
360	157.7	158.1	157.9
360.5	160.2	158.2	157.8
361	158.7	157.2	158.4
361.5	160.1	161.8	162.1
362	159.3	159.5	160
362.5	148.2	158.5	157.8
363	159.3	159.0	160.0
363.5	154.9	158.7	158.5
364	155.5	157.2	157.3
364.5	161.4	160.0	160.0
365	163.3	158.7	159.6
365.5	159.4	159.3	160.5
366	158.6	163.6	164.7
366.5	159.7	158.8	160.6
367	157.0	159.0	156.0
367.5	160.3	156.7	161.0
368	159.0	155.3	154.9
368.5	154.8	151.5	150.6
369	158.8	153.2	155.8
369.5	167.2	155.8	158.9
370	157.0	151.3	156.9
370.5	156.5	155.0	155.8
371	159.0	154.7	158.9
371.5	155.5	156.5	157.9
372	158.5	155.3	155.0
372.5	157.2	152.3	158.9
373	160.4	153.7	152.6
373.5	158.2	150.3	154.0
374	156.7	153.2	154.0
374.5	155.2	154.0	155.9
375	154.7	154.2	152.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

375.5	158.1	157.8	158.5
376	162.4	158.9	160.0
376.5	162.2	160.0	161.8
377	160.2	161.3	162.9
377.5	162.9	160.4	159.9
378	160.8	159.3	160.0
378.5	159.8	161.5	161.5
379	154.2	155.8	156.9
379.5	157.7	159.7	160.0
380	155.8	156.0	154.0
380.5	152.2	153.4	151.2
381	149.3	151.7	150.2
381.5	151.5	154.6	151.3
382	152.0	152.7	152.5
382.5	150.8	151.3	153.3
383	151.3	152.2	151.5
383.5	149.7	151.7	148.1
384	151.3	151.2	150.1
384.5	150.7	150.5	150.7
385	152.5	151.3	151.6
385.5	152.1	152.9	152.5
386	151.7	153.7	152.3
386.5	146.6	152.5	148.2
387	150.6	149.5	150.0
387.5	139.0	152.3	140.2
388	145.9	155.4	152.2
388.5	151.5	156.2	153.3
389	151.9	155.8	151.2
389.5	149.8	157.6	148.1
390	151.8	157.7	156.2
390.5	152.5	158.3	152.4
391	154.5	139.5	155.3
391.5	155.6	140.4	157.2
392	154.7	142.6	153.1
392.5	156.7	147.8	149.1
393	157.9	153.0	152.4
393.5	152.4	154.0	153.0

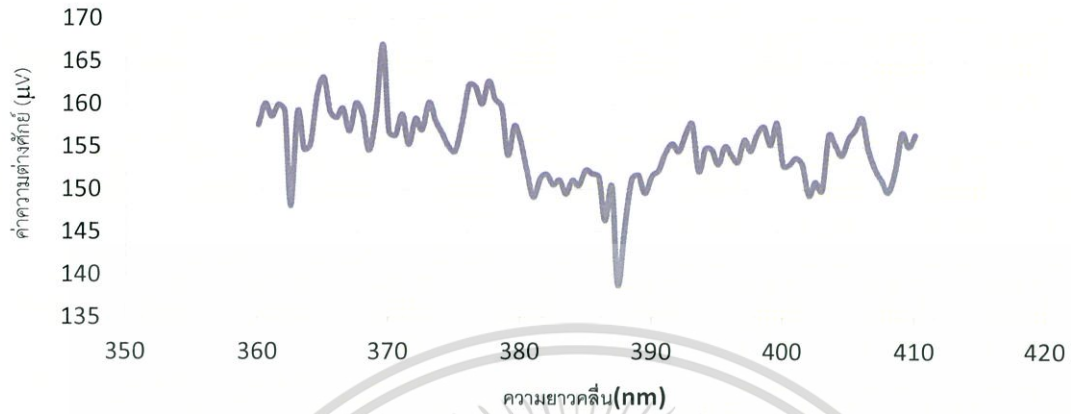
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

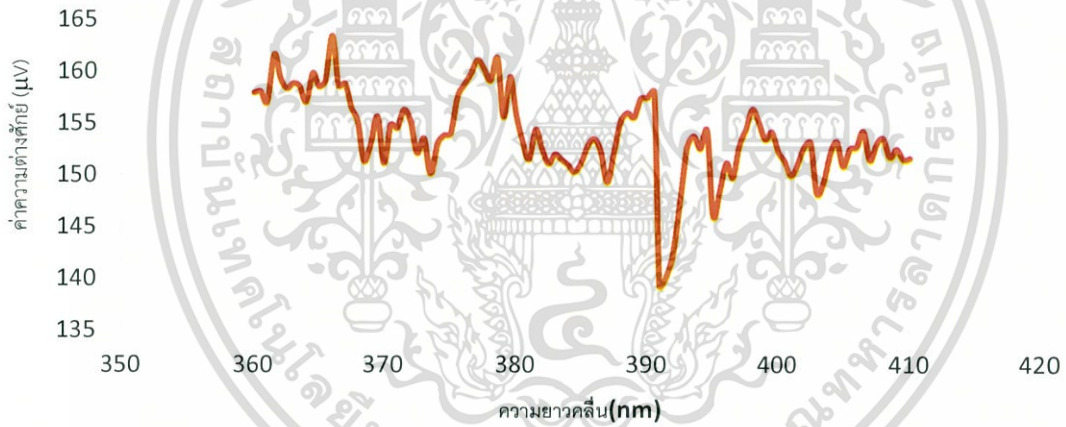
394	155.0	152.8	154.4
394.5	154.9	154.5	155.6
395	153.2	146.3	148.9
395.5	155.3	148.7	150.2
396	154.3	151.4	151.5
396.5	153.5	150.0	155.3
397	156.1	153.1	154.1
397.5	154.8	154.7	154.3
398	156.8	156.6	157.2
398.5	157.6	155.3	155.8
399	155.5	153.7	153.4
399.5	158.1	154.4	158.6
400	153.1	152.5	151.1
400.5	153.2	151.6	154.3
401	154.0	150.2	156.0
401.5	153.2	151.2	152.8
402	149.6	152.9	150.4
402.5	151.2	153.4	151.9
403	150.2	148.5	147.1
403.5	156.7	149.5	148.6
404	155.5	152.3	155.4
404.5	154.3	153.5	153.8
405	156.3	151.1	152.2
405.5	157.3	152.8	154.9
406	158.7	153.0	156.5
406.5	154.9	154.5	154.8
407	152.7	151.7	153.7
407.5	151.4	153.3	151.5
408	150.0	153.8	148.5
408.5	152.4	152.0	153.0
409	156.9	152.8	155.3
409.5	155.3	151.8	152.7
410	156.7	151.9	152.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

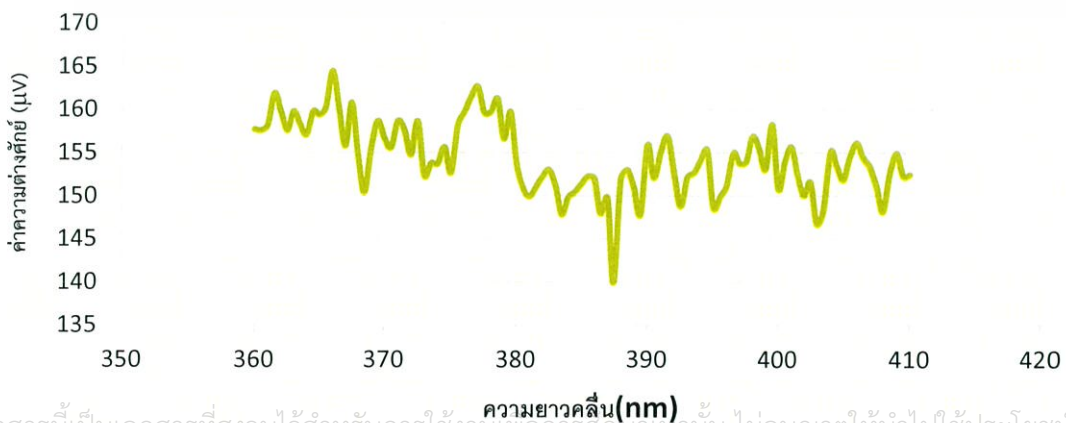
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Zinc Oxide ครั้งที่ 1



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Zinc Oxide ครั้งที่ 2



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Zinc Oxide ครั้งที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น(nm)	ค่าเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ ( $\mu V$ )
360.0	157.9
360.5	158.7
361.0	158.1
361.5	161.3
362.0	159.6
362.5	154.8
363.0	159.4
363.5	157.3
364.0	156.6
364.5	160.4
365.0	160.5
365.5	159.7
366.0	162.3
366.5	159.7
367.0	157.3
367.5	159.3
368.0	156.4
368.5	152.3
369.0	155.9
369.5	160.6
370.0	155.1
370.5	155.7
371.0	157.5
371.5	156.6
372.0	156.2
372.5	156.1
373.0	155.5
373.5	154.1
374.0	154.6
374.5	155.1
375.0	153.9
375.5	158.1
376.0	160.4
376.5	161.3
377.0	161.4
377.5	161.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

378.0	160.0
378.5	160.9
379.0	155.6
379.5	159.1
380.0	155.2
380.5	152.2
381.0	150.4
381.5	152.4
382.0	152.4
382.5	151.8
383.0	151.6
383.5	149.8
384.0	150.8
384.5	150.6
385.0	151.8
385.5	152.5
386.0	152.5
386.5	149.1
387.0	150.1
387.5	143.8
388.0	151.1
388.5	153.6
389.0	152.9
389.5	151.8
390.0	155.2
390.5	154.4
391.0	149.7
391.5	151.1
392.0	150.1
392.5	151.2
393.0	154.4
393.5	153.1
394.0	154.1
394.5	155.0
395.0	149.4
395.5	151.4
396.0	152.4

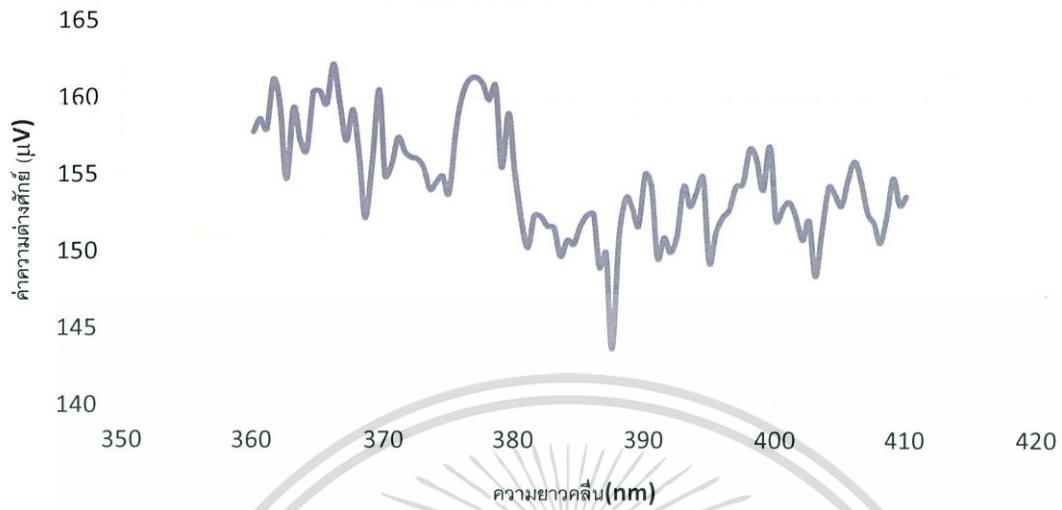
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

396.5	152.9
397.0	154.4
397.5	154.6
398.0	156.9
398.5	156.2
399.0	154.2
399.5	157.1
400.0	152.2
400.5	153.1
401.0	153.4
401.5	152.4
402.0	150.9
402.5	152.2
403.0	148.6
403.5	151.6
404.0	154.4
404.5	153.8
405.0	153.2
405.5	155.0
406.0	156.1
406.5	154.7
407.0	152.7
407.5	152.1
408.0	150.7
408.5	152.4
409.0	155.0
409.5	153.2
410.0	153.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่น(nm)กับค่าความต่างศักย์ ( $\mu V$ )  
ของค่าเฉลี่ยสารตัวอย่าง Zinc Oxide



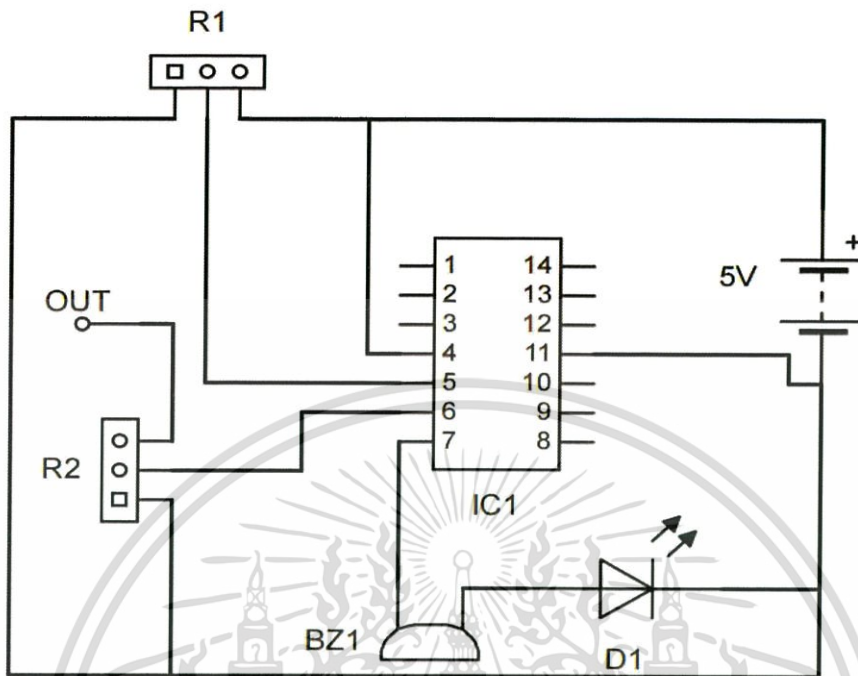
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



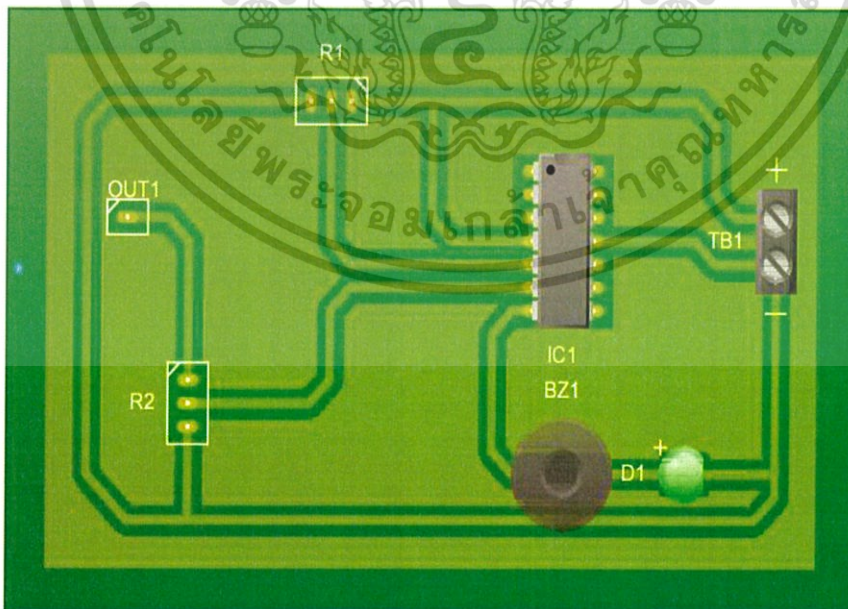
ภาคผนวก ข  
วงจรของตัวเปรียบเทียบการแบ่งแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน



วงจรเปรียบเทียบแรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## LM324

## LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

# QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

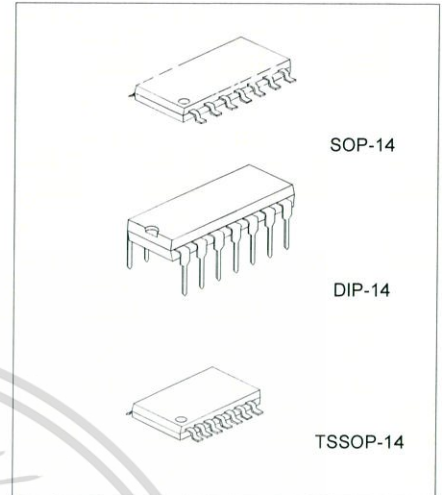
### DESCRIPTION

The UTC LM324 consists of four independent, high gain internally frequency compensated operational amplifiers which are designed specifically to operated from a single power supply over a wide voltage range. Operation from split power supplies is also possible. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP amp circuits which now can be easily implemented in single power supply system.

### FEATURES

- \*Internally frequency compensated for unity gain.
- \*Large DC voltage gain :100dB.
- \*Wide operating supply range ( $V_{CC}=3V\sim 32V$ ).
- \*Input common-mode voltage includes ground.
- \*Large output voltage swing: From 0V to  $V_{CC}-1.5V$ .
- \*Power drain suitable for battery operation.

\*Pb-free plating product number: LM324L

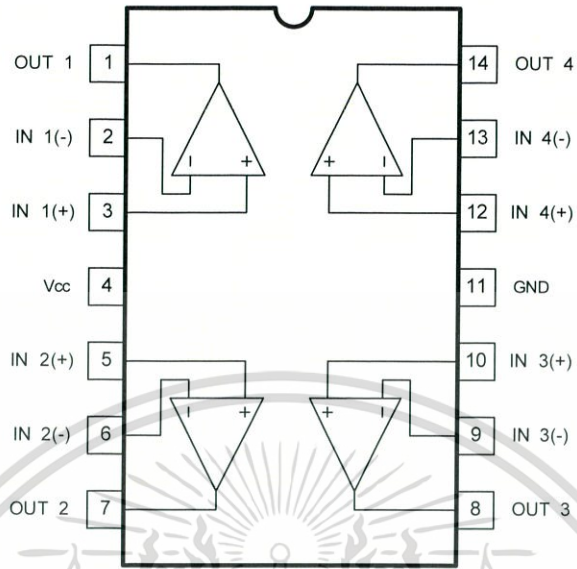


### ORDERING INFORMATION

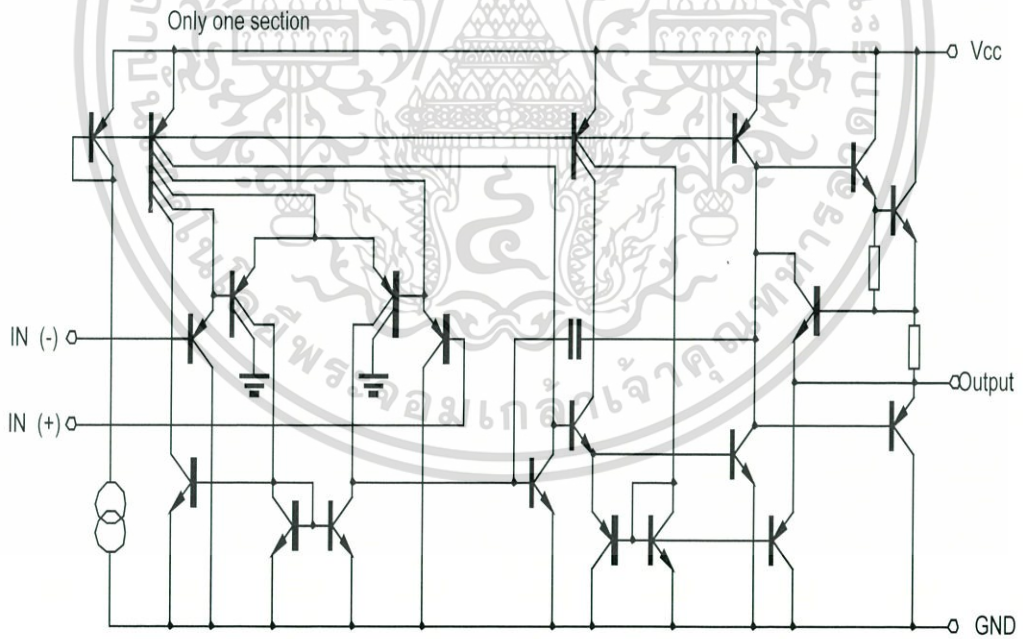
Ordering Number		Package	Packing
Normal	Lead Free Plating		
LM324-P14-R	LM324L-P14-R	TSSOP-14	Tape Reel
LM324-P14-T	LM324L-P14-T	TSSOP-14	Tube
LM324-S14-R	LM324L-S14-R	SOP-14	Tape Reel
LM324-S14-T	LM324L-S14-T	SOP-14	Tube
LM324-D14-T	LM324L-D14-T	DIP-14	Tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม้ว่ากรณีกดสั่งซื้อสินค้าที่ข้างบนนี้ให้ตัดนโยบายนี้และต้องอ้างถึงถึงว่าขอเอกสารหรือสั่งซื้อที่มีกรณำไปใช้

### ■ PIN DESCRIPTION



### ■ BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไปด้วยการดัดแปลง หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างถึงชื่อเอกสารหรือผู้ที่มีอำนาจไปใช้

### ■ ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

PARAMETER	SYMBOL	RATINGS	UNIT
Supply Voltage	$V_{CC}$	$\pm 18$	V
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$	32	V
Input Voltage	$V_I$	-0.3 ~ +32	V
Power Dissipation	$P_D$	570	mW
Operating Temperature Range	$T_{OPR}$	0 ~ +70	°C
Storage Temperature Range	$T_{STG}$	-40 ~ +150	°C

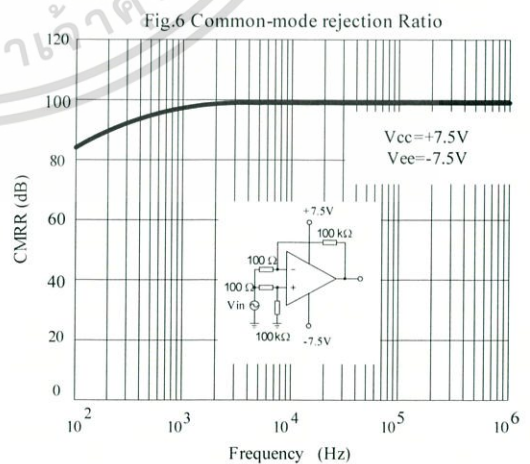
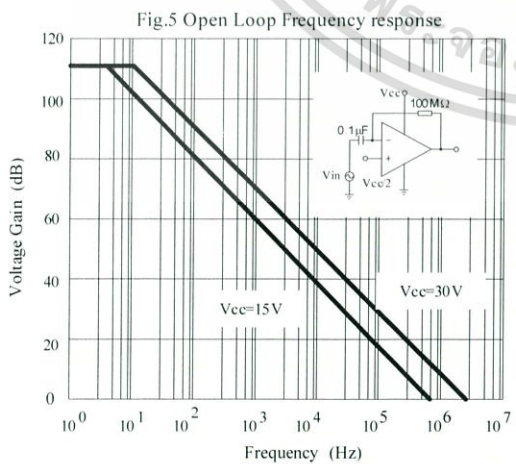
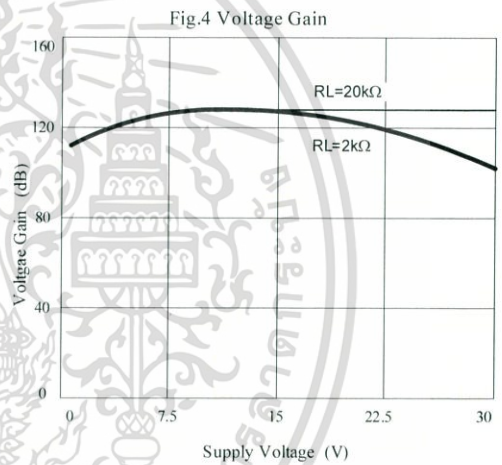
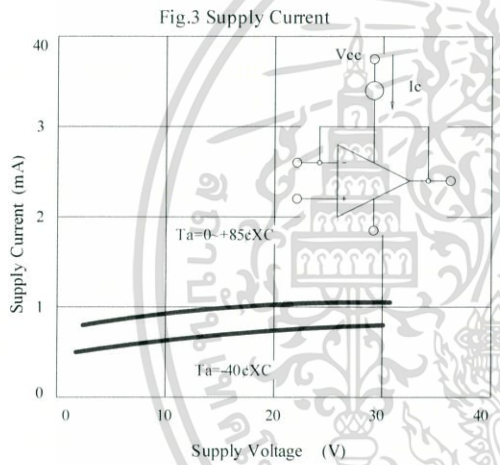
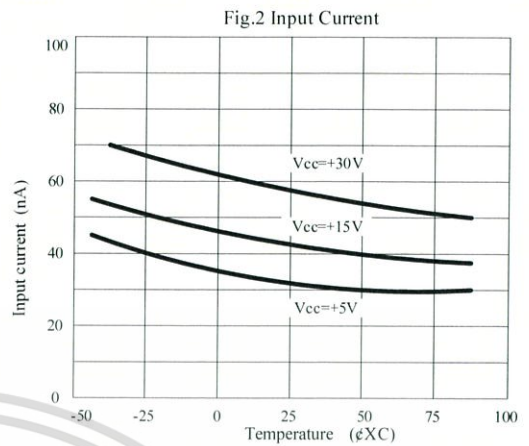
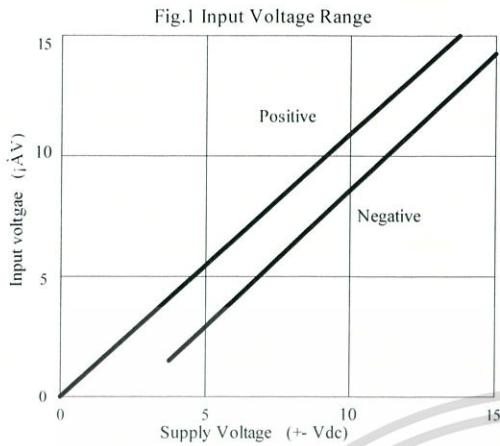
### ■ ELECTRICAL CHARACTERISTICS

( $V_{CC}=5.0V$ , All voltage referenced to GND unless otherwise specified.)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Input Offset Voltage	$V_{IO}$	$V_{CM}=0V$ to $V_{CC}-1.5V$ $V_{O(P)}=1.4V$ , $R_S=0\Omega$			7.0	mV
Input Offset Current	$I_{IO}$				50	nA
Input Bias Current	$I_{BIAS}$				250	nA
Input Common Mode Voltage	$V_{I(R)}$	$V_{CC}=30V$	0	$V_{CC}-1.5$		V
Power Supply Current	$I_{CC}$	$R_L=\infty$ , $V_{CC}=30V$		1.0	3.0	mA
		$V_{CC}=5V$		0.7	1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	$G_V$	$V_{CC}=15V$ , $R_L \geq 2K\Omega$ $V_{O(P)}=1V \sim 11V$	25	100		V/mV
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	$V_{CC}=30V$ , $R_L=2K\Omega$	26			V
		$V_{CC}=30V$ , $R_L=10K\Omega$	27	28		V
		$V_{CC}=5V$ , $R_L > 10K\Omega$		5	20	mV
Common Mode Rejection Ratio	CMRR		65	75		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR		65	100		dB
Channel Separation	CS	$f=1KHZ \sim 20KHZ$		120		dB
Short Circuit Current to Ground	$I_{SC}$			40	60	mA
Output Current	$I_{SOURCE}$	$V_I(+)=1V$ , $V_I(-)=0V$ $V_{CC}=15V$ , $V_{O(P)}=2V$	20	40		mA
	$I_{SINK}$	$V_I(+)=0V$ , $V_I(-)=1V$ $V_{CC}=15V$ , $V_{O(P)}=2V$	10	13		mA
	$I_{SINK}$	$V_I(+)=0V$ , $V_I(-)=1V$ $V_{CC}=15V$ , $V_{O(P)}=200mV$	12	45		mA
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$				$V_{CC}$	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้ผลิต และต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารหรือรุ่นที่มีการนำไปใช้

## TYPICAL CHARACTERISTICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้ขายและผู้ผลิต ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลที่มีอยู่

## ■ TYPICAL CHARACTERISTICS(cont.)

Fig.7

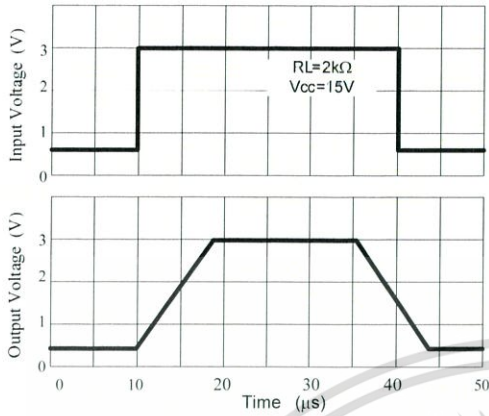


Fig.8 Voltage Follower pulse response (small signal)

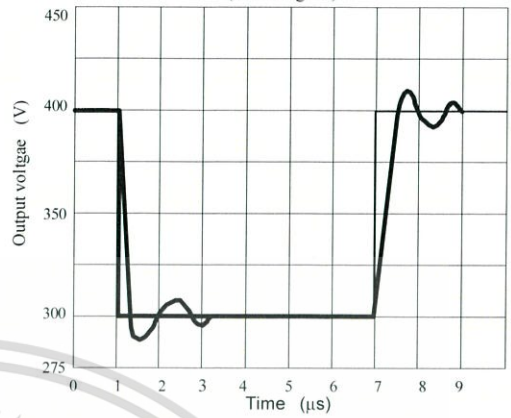


Fig.9 Large signal Frequency Response

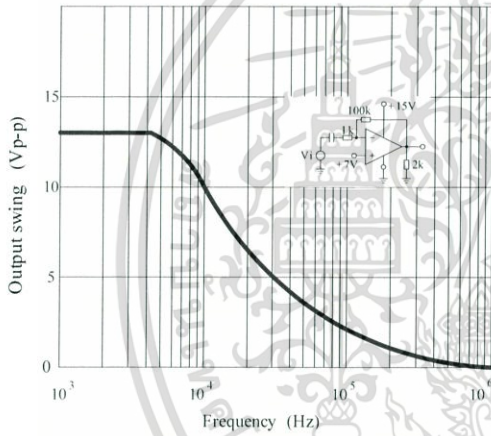


Fig.10 Output Characteristics current sourcing

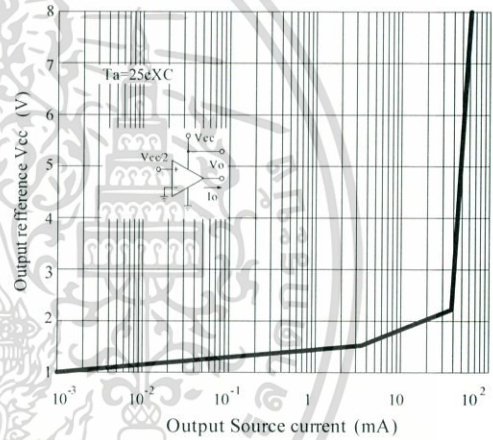


Fig.11 Output Characteristics Current sinking

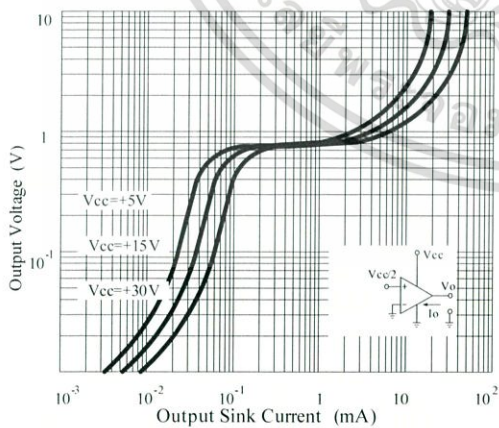
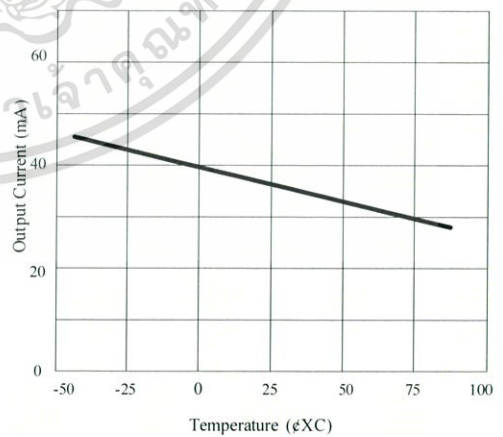


Fig.12 Current Limiting



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 1. วิศวกรที่คิดค้นชิ้นนี้ ลึกซึ้งยิ่งนักเป็นที่ยอมรับของทั่วโลก และต้องอึ้งถึงใจว่าผลงานของวิศวกรที่คิดค้นนี้ไปให้



UTC assumes no responsibility for equipment failures that result from using products at values that exceed, even momentarily, rated values (such as maximum ratings, operating condition ranges, or other parameters) listed in products specifications of any and all UTC products described or contained herein. UTC products are not designed for use in life support appliances, devices or systems where malfunction of these products can be reasonably expected to result in personal injury. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner. The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice.