

การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์  
โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก

THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF  
Ag DOPED ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโอปซิงค์ออกไซด์  
โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก

THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF  
Ag DOPED ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



b.00265625  
i.....

TB00153

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2558  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF  
Ag DOPED ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ

การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์  
โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก  
THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF Ag DOPED  
ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกรรณก ทาสีขาว รหัสนักศึกษา 55051443  
นายคมสันต์ เย็นไธสง รหัสนักศึกษา 55051460  
นางสาวพนิดา ปิ่นประเสริฐ รหัสนักศึกษา 55051559

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์



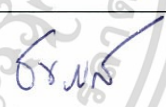

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. พิษานันท์ อีเศรษฐ์โสภณ ประธานกรรมการ	
ดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	
อ. ธนภรณ์ สิวพัฒนานนท์ กรรมการ	
รศ. วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกรรณก ทาสีขาว	รหัสนักศึกษา 55051443
	นายคมสันต์ เย็นโรสง	รหัสนักศึกษา 55051460
	นางสาวพนิดา ปิ่นประเสริฐ	รหัสนักศึกษา 55051559
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. วิชาญ เตชิตธีระ	

### บทคัดย่อ

จากงานวิจัยเรื่อง การหาค่าการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก ได้ทำการทดลอง 2 ตอน ตอนที่ 1 หาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ซิงค์ออกไซด์ ตอนที่ 2 หาค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ และซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล ผลการทดลองพบว่า ตอนที่ 1 ช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ที่วัดด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติกและวัดด้วยเทคนิค UV-Visible มีค่าเท่ากับ 3.09 eV และ 3.35 eV ตามลำดับ ตอนที่ 2 ค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ และซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล มีค่าเท่ากับ  $16.66 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $8.65 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $5.08 \text{ mm}^2/\text{s}$  และ  $7.84 \text{ mm}^2/\text{s}$  ตามลำดับ โดยสารมีความหนา 0.70 mm, 0.52 mm, 0.46 mm และ 0.52 mm ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ค่าการกระจายทางความร้อน ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซิงค์ออกไซด์ เทคนิคโฟโตอะคูสติก

<b>Title</b>	THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF Ag DOPED ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE		
<b>Students</b>	Miss Kornkanok Tasikhaow	Student ID 55051443	
	Mr. Khomsan Yenthaisong	Student ID 55051460	
	Miss Panida Pinprasert	Student ID 55051559	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)		
<b>Department</b>	Physics		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof. Wichan Techitdheera		

### ABSTRACT

In this research we report two methods of experiment. The first one to find the energy band gap of zinc oxide and the second one to find the thermal diffusivity of zinc oxide and silver doped zinc oxide when concentration of silver are 3%mol, 5%mol and 7%mol using photoacoustic technique. The result show energy band gap of zinc oxide was measured by photoacoustic technique and UV-Visible technique are 3.09 eV and 3.35 eV respectively. Thermal diffusivity of zinc oxide and silver doped zinc oxide when concentration of silver are 3%mol, 5%mol and 7%mol are 16.66 mm<sup>2</sup>/s, 8.65 mm<sup>2</sup>/s, 5.08 mm<sup>2</sup>/s and 7.84 mm<sup>2</sup>/s respectively and they have thickness equal 0.70 mm, 0.52 mm, 0.46 mm and 0.52 mm respectively.

**Keyword :** energy gap, photoacoustic technique, thermal diffusivity, zinc oxide

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคล ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. วิชาญ เตชิตธีระ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิด เสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจทานความถูกต้องของงานวิจัยฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อ. สาหรัย เล็กข่อม อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานความถูกต้องของงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความถูกต้องตามรูปแบบของงานวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษาโครงผลึกของสารด้วยวิธี XRD (X-ray diffraction)

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการธุรการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้ร่วมแบ่งปันความรู้และประสบการณ์ในการทำงานวิจัย

นางสาวกรรณก ทาสีขาว

นายคมสันต์ เย็นไธสง

นางสาวพนิดา ปิ่นประเสริฐ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>	<b>4</b>
2.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิลเวอร์ (Ag)	4
2.1.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	4
2.1.2 ซิลเวอร์ (Ag)	6
2.2 คลื่นความร้อน	7
2.2.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน	7
2.2.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน	9
2.2.3 การแพร่กระจายความร้อน	12
2.3 ค่าการกระจายทางความร้อน และทฤษฎี Rosencwaig-Gersho	17
2.4 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการกระจายทางความร้อน	19
2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง	19
2.4.2 เครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator)	21
2.4.3 เครื่องตัดแสง	22
2.4.4 ระบบตรวจจับ	23
2.4.5 ระบบขยายสัญญาณ	24
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ</b>	<b>25</b>
3.1 การจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่น	26
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	34
3.3.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black)	34
3.3.2 ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์ (Silver doped Zinc oxide)	34
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	38
3.4.1 ตอนที่ 1 : การหาช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์	38
3.4.2 ตอนที่ 2 : การหาการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>39</b>
4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, $E_g$ ) ของซิงค์ออกไซด์	39
4.1.1 หาช่องว่างแถบพลังงานด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก	39
4.1.1.1 คาร์บอนแบล็ค	39
4.1.1.2 ซิงค์ออกไซด์	47
4.1.2 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-Visible	65
4.2 การหาค่าการกระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity, $\alpha$ ) ของซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์	66
4.2.1 ซิงค์ออกไซด์ ความหนา 0.70 mm	66
4.2.2 ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm	69
4.2.3 ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm	72
4.2.4 ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7% ความหนา 0.52 mm	75
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>79</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>81</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>82</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ	3
2.1 สมบัติทางกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์	5
2.2 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิลเวอร์	6
2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนในวัสดุบางชนิด	16
2.4 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในการศึกษาโฟโตเทอร์มอล	19
4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค	39
4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์	47
4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว	55
4.4 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์	66
4.5 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ โตะซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%	69
4.6 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ โตะซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5%	72
4.7 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ โตะซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7%	75

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์ (Hexagonal wurtzite) และแสดงโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zincblend)	4
2.2 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก	9
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนกับฟังก์ชันความลึกของพื้นผิวออร์มัลไลซ์	13
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ (nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของอะลูมิเนียม, สแตนเลส, อากาศ และเบกเกิลไลต์	14
2.5 แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดขึ้นอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูงกำลังที่ได้สามารถให้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด	20
2.6 แสดงแหล่งกำเนิดแสง Xe lamp	20
2.7 แสดงภาพเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator)	21
2.8 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแยกความยาวคลื่น	21
2.9 แสดงภาพเครื่องตัดแสง	22
2.10 แสดงภาพโฟโตอะคูสติกเซลล์ซึ่งเป็นระบบตรวจจับความร้อนโดยใช้เทคนิคเสียงมีไมโครโฟนตรวจจับความดันที่เปลี่ยนไป	23
2.11 แสดงภาพ lock-in amplifier	24
3.1 แสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี	25
3.2 แสดงส่วนประกอบของเครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator iHR 320)	26
3.3 แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน	26
3.4 แสดงไอคอนโปรแกรม	27
3.5 แสดงหน้าต่างกด OK	27
3.6 แสดงหน้าต่างหลังกด OK	28
3.7 แสดงโปรแกรมคำสั่งเลือกไปที่ IHR 320	28
3.8 แสดงโปรแกรมคำสั่งกด Next>	29
3.9 แสดงการตั้งชื่อตรงช่อง Device Display Name	29
3.10 แสดงหน้าต่าง Accessory information	30
3.11 แสดงหน้าต่าง Summary	30
3.12 แสดงหน้าต่างให้กด OK	31
3.13 แสดงหน้าต่างหลังกด OK	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer	32
3.15 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าหลังกด Initialize	32
3.16 แสดงหน้าต่างการตั้งค่า	33
3.17 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าการเลือกความยาวคลื่น	33
3.18 แสดงภาพคาร์บอนแบล็ค	34
3.19 แสดงภาพซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์	34
3.20 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร	36
3.21 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก	36
3.22 แสดงขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ในการอัดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	37
4.1 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค	46
4.2 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์	54
4.3 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว	63
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสง (nm) และ diff ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่นอร์มัลไลซ์แล้ว	63
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นแสง (nm)	65
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ยของซิงค์ออกไซด์ ( $\mu\text{V}$ ) ความหนา 0.70 mm	67
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความถี่ตัวตัดแสง กับ diff log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์ความหนา 0.70 mm	68
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ยของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ ( $\mu\text{V}$ ) เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm	70
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความถี่ตัวตัดแสง กับ diff log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm	71
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm	73
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความถี่ตัวตัดแสง กับ diff log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm	74
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7%	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสง กับ  $\text{diff } \log$  ของแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7% ความหนา 0.52 mm 77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
$\text{\AA}$	Angstrom
$f_c$	Characteristic frequency
$\rho$	Density
$E_g$	Energy band gap
PA	Photoacoustic
Ag	Silver
AgZnO	Silver doped zinc oxide
AgNO <sub>3</sub>	Silver nitrate
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sodium carbonate
NaOH	Sodium hydroxide
C	Specific heat capacity
k	Thermal conductivity
$\alpha$	Thermal diffusivity
$\mu$	Thermal diffusion length
XRD	X-Ray Diffraction
ZnO	Zinc oxide
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	Zinc sulphate heptahydrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีพลังงานเหมาะสมมากระดับหนึ่งจะสามารถทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เร่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย้อมได้จากงานวิจัยพบว่าหากโดปซิลเวอร์ (Ag) ลงในซิงค์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้นได้

ด้วยเหตุนี้ ซิงค์ออกไซด์ที่โดปด้วยซิลเวอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญและน่าสนใจ จึงควรศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ ของซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ (AgZnO) คือ ค่าการกระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity ;  $\alpha$ ) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

ค่าการกระจายทางความร้อน คือ ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการแพร่กระจายความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิ ชนิดของวัสดุ ความหนา เป็นต้น ช่วยให้สามารถเลือกวัสดุไปใช้ในงานต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยเทคนิคที่นำมาตรวจวัดค่าการกระจายทางความร้อน คือ เทคนิคโฟโตอะคูสติก (Photoacoustic technique)

โฟโตอะคูสติกสเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง มีเครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator) ในการเลือกความยาวคลื่นแสงแสงที่ออกมาจะถูกตัดด้วยตัวตัดแสง (chopper) เพื่อให้แสงตกกระทบวัตถุแบบเป็นช่วงๆ เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดการดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนระดับพลังงานแล้วปลดปล่อยพลังงานแบบ non-radiative recombination ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศรอบวัตถุ เกิดปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก (Photoacoustic effect) ไมโครโฟนจะตรวจวัดความดันที่เปลี่ยนไปออกมาในรูปของคลื่นเสียง ซึ่งมี lock-in amplifier ในการแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณโฟโตอะคูสติกและความถี่ของตัวตัดแสง จะนำไปสู่การหาค่าการกระจายทางความร้อนได้จากสเปกตรัมโฟโตอะคูสติก เทคนิคนี้มีข้อดี คือ วิธีใช้งานไม่ซับซ้อน ไม่มีการสัมผัสวัตถุโดยตรงจึงไม่เกิดการทำลาย และสามารถตรวจวัดการเกิด non-radiative recombination ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคนิคนี้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1880 โดย Graham Bell แต่ถูกอธิบายอย่างสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 1970 โดย Rosencwaig-Gersho และได้ตั้งทฤษฎี Rosencweig-Gersho ขึ้น เพื่ออธิบายปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการใช้งานระบบไฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี
- 2) เพื่อศึกษาการเตรียมสารซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอน
- 3) เพื่อวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ และวัดค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคไฟโตอะคูสติค

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) เตรียมซิงค์ออกไซด์มาอัดเม็ดที่น้ำหนัก 0.2g จากนั้นนำมาหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายทางความร้อน ด้วยเทคนิคไฟโตอะคูสติค
- 2) เตรียมสารซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน โดยสารมีความเข้มข้นของซิลเวอร์เท่ากับ 3%, 5% และ 7% โดยโมล และทำการเผาสาร (sintering) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วนำสารมาอัดเม็ดที่น้ำหนัก 0.1g จากนั้นนำไปหาค่าการกระจายทางความร้อน

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้
  - ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีไฟโตอะคูสติค การเตรียมสารซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์ ซิลเวอร์ และคาร์บอนแบล็ค
  - ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาและทดลองใช้งานระบบไฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี
  - ขั้นตอนที่ 3 เตรียมซิงค์ออกไซด์ และซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล
  - ขั้นตอนที่ 4 วัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ และวัดค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์ไดโบบซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคไฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี
  - ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## 2. ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ขั้นตอนที่	มี.ย. - ก.ค. 2558	ส.ค. 2558	ก.ย. 2558 - ก.พ. 2559	มี.ค. - เม.ย. 2559	พ.ค. 2559
1					
2					
3					
4					
5					

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถใช้งานระบบไฟโตอะคูสติคได้
- 2) สามารถเตรียมสารซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ ด้วยวิธีตกตะกอนได้
- 3) สามารถวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ และวัดค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ได้
- 4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารทดสอบอื่นๆ ได้
- 5) มีทักษะในการค้นคว้า และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินการทดลองได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิลเวอร์ (Ag)

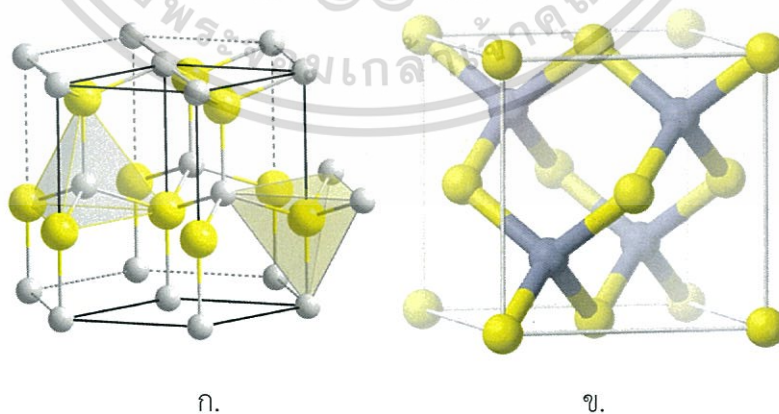
##### 2.1.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ในกลุ่ม II-V มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบ direct band gap เท่ากับ 3.2 eV มีโครงสร้างผลึก 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์ (Hexagonal wurtzite) และโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zincblend)

เฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์เป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่เสถียรที่สุด เป็นโครงสร้างพื้นฐานโดยซิงค์จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (Hexagonal closed pack : hcp) และมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions :  $O^{2-}$ ) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc ions :  $Zn^{2+}$ ) ซึ่งทำพันธะไอออนิกแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) หรือเวิร์ทไซต์ (Wurtzite) คือ ไอออนบวกทำการโคออร์ดิเนต (coordinate) กับไอออนลบ โดยไอออนชนิดหนึ่งถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้าม 4 ไอออน มีเลขโคออร์ดิเนตเท่ากับ 4:4

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ซิงค์มีโครงสร้างแบบคิวบิก โดยซิงค์กับออกซิเจนจะมีพันธะไอออนิกแบบเตตระฮีดรอล

สารซิงค์ออกไซด์หรือคาลาไมน์ เป็นสารที่นำศึกษาเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่ในชีวิตประจำวันโดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น แป้งทาหน้า หรือครีมกันแดด เป็นต้น มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมยาง และใช้ผลิตน้ำหอม เครื่องสำอาง ยา เป็นสารยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรีย สารระงับกลิ่นกาย เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B และระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์



รูปที่ 2.1 ก. แสดงโครงสร้างเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์ (Hexagonal wurtzite)  
ข. แสดงโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zincblend)

โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ แสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์

สูตรโมเลกุล	ZnO
เลขอะตอม	สังกะสี 30 ออกซิเจน 8
มวลโมเลกุล	81.38 g/mol
ลักษณะที่ปรากฏ	ของแข็งผงอสัณฐาน (amorphous) สีขาว
รัศมีอะตอม	สังกะสี 1.53 Å ออกซิเจน 0.65 Å
สัดส่วนน้ำหนักอะตอม	สังกะสี 65.7 % ออกซิเจน 34.3 %
ความหนาแน่น	5,606 kg/m <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	420 °C
จุดเดือด	906 °C
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	สังกะสี 2 ออกซิเจน 2
ค่าการกระจายทางความร้อน	$24.5 \times 10^{12}$ mm <sup>2</sup> /s
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.2 eV
โครงสร้าง	Zn เป็น hexagonal ทำพันธะ tetrahedral หรือ wurtzite กับ O $a = b = 3.24 \text{ \AA}, c = 5.19 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ซิลเวอร์ (Ag)

ซิลเวอร์ (Silver : Ag) เป็นธาตุในกลุ่มโลหะทรานซิชัน (Transition metal) มีผิวมันวาว สีขาวเงิน มีเลขอะตอม 47 มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face center cubic : FCC) คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีมาก และไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารและกรดอินทรีย์ ในสมัยโบราณ จึงได้นำซิลเวอร์มาใช้ทำเป็นภาชนะกักเก็บน้ำเพื่อกำจัดเชื้อโรค

นอกจากนี้ ซิลเวอร์ยังมีประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ การบัดกรี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร อุตสาหกรรมการถ่ายรูปและใช้ทำสารเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิลเวอร์

สูตรโมเลกุล	Ag
เลขอะตอม	47
มวลอะตอม	107.8682 g/mol
ลักษณะปรากฏ	ของแข็ง
รัศมีอะตอม	1.75 Å
ความหนาแน่น	10,500 kg/m <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	961.93 °C
จุดเดือด	2,212 °C
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	1
ค่าการนำความร้อน <a href="http://www.espimetals.com">http://www.espimetals.com</a>	429 W/m·K ที่ 298.2 K
ความร้อนจำเพาะ <a href="http://environmentalchemistry.com">http://environmentalchemistry.com</a>	235 J/kg·K ที่ 298 K
ค่าการกระจายทางความร้อน <a href="http://www.wikipedia.org">www.wikipedia.org</a>	174 mm <sup>2</sup> /s ที่ 300 K
โครงสร้างผลึก	face center cubic a = b = c = 4.08 Å

## 2.2 คลื่นความร้อน

### 2.2.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง สามารถถ่ายเทจากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้ เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อบริเวณ 2 บริเวณนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน และถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความลาดชันของอุณหภูมิ, Temperature different) รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแต่ละแบบจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้

#### การนำความร้อน (heat conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ได้แก่ ของเหลวหรือของแข็งที่อยู่กับที่ มีทั้งถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุเดียวกัน หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน เช่น การจับทัพพีโลหะในหม้อน้ำร้อน จะเกิดการนำความร้อนจากน้ำร้อนมาสู่มือของเรา โดยมีทัพพีโลหะเป็นตัวกลาง แต่ทัพพีโลหะไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงแบบเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นของแข็งที่บดแสง

$$q_{cd} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

สมการที่ (1) คือ กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $q_{cd}$ ) กับความลาดชันของอุณหภูมิในทิศทางไหลของความร้อน ( $\frac{\partial T}{\partial x}$ ) จากที่กล่าวไว้ในตอนต้นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความลาดชันของอุณหภูมิ โดยสัมพันธ์การแปรผัน คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal conductivity,  $k$ ) จากสมการจะเห็นว่า ขวามือของสมการมีเครื่องหมายลบ เนื่องจากเมื่อระยะทางในการถ่ายเทความร้อน  $x$  เพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 บริเวณจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งทำให้เทอม  $\frac{\partial T}{\partial x}$  มีค่าติดลบ แต่จากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ นั่นคือการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปต่ำ คือ ความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกมีค่าบวก ฉะนั้น จึงต้องเติมเครื่องหมายลบทางขวามือของสมการ เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกตามทฤษฎีนั้นเอง ทั้งนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิเพียงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น รูปทรง ความหนาและชนิดของวัสดุที่ศึกษาด้วย

#### การพาความร้อน (heat convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสสารที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า) ก็จะลงมาแทนที่ เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเกิดลมบก คือ ในเวลากลางคืน พื้นดินการคายรังสีความร้อนมากกว่าพื้นน้ำ จึงทำให้พื้นดินเย็นลงเร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้อากาศที่อยู่เหนือบพื้นดินเย็นลงและมีความหนาแน่นสูงจึงเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดิน ทำให้อากาศที่อยู่เหนือบพื้นน้ำถูกดันขึ้นและเคลื่อนที่ไปเหนือบพื้นดินแทนที่ อากาศที่เคลื่อนที่ไปเหนือบพื้นดินก็จะเย็นลงและเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินแทนที่ อากาศที่เคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินก็จะถูกดันขึ้นและเคลื่อนที่ไปเหนือบพื้นน้ำแทนที่ ทำให้อากาศเคลื่อนที่วนเป็นวงกลม

คลายความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้อากาศเหนือพื้นดินมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำหรืออากาศเหนือพื้นดินมีความกดอากาศสูงกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำ เป็นผลให้อากาศเหนือพื้นดินที่มีความกดอากาศสูงกว่าเคลื่อนที่เข้าหาพื้นน้ำที่มีความกดอากาศต่ำกว่า หรือเกิดลมพัดจากบกออกสู่ฝั่งทะเลในเวลากลางวัน

$$q_{cv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

สมการที่ (2) เป็นสมการการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลັกซ์ความร้อนของการพาความร้อน ( $q_{cv}$ ) กับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวกับของเหลว นั่นคือ หากอุณหภูมิของพื้นผิวกับอุณหภูมิของของเหลวต่างกันมาก ก็จะมีพลັกซ์ความร้อนของการพาความร้อนมากด้วย โดยสัมประสิทธิ์การแปรผัน คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ )

### การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง ดังนั้น วัตถุที่อยู่บนโลก หรือในอวกาศ ก็สามารถแผ่รังสีได้เช่นเดียวกัน วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ โดยแผ่รังสีความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุที่มีอุณหภูมิสูง จะแผ่รังสีความร้อนออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น แต่ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิต่ำ จะแผ่รังสีความร้อนออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาว วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

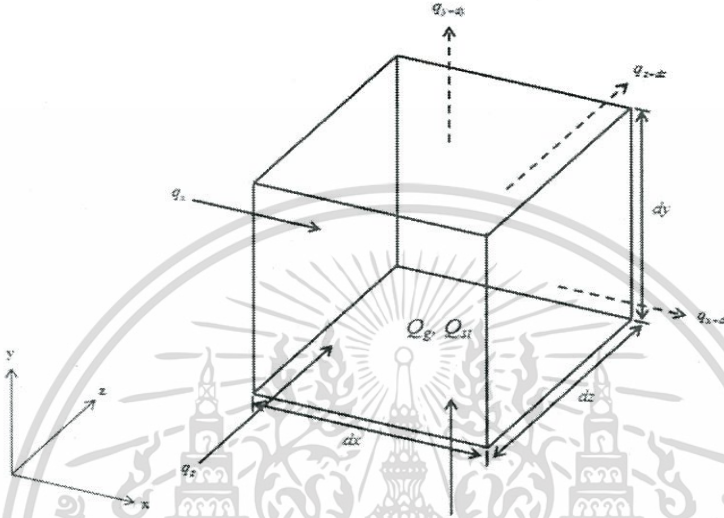
1. สีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้ม จะดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน
2. ผิววัตถุ วัตถุผิวขรุขระ จะดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและขัดมัน

$$q_{rd} = \varepsilon \sigma_{SB} T_s^4 \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) เป็นกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ ( $q_{rd}$ ) กับอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ โดย  $\sigma_{SB}$  คือค่าคงที่โบลทซ์มานน์ และ  $\varepsilon$  คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุที่อุณหภูมิใดๆ

## 2.2.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล จำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิในตัวกลางในเงื่อนไขต่างๆ เช่น การพิจารณาอุณหภูมิของพลังงานในปริมาตรขนาดเล็ก  $dV$  เพื่อให้ทราบลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในตัวกลาง และการพิจารณาสมการอัตราการส่งผ่านความร้อน เพื่อให้ทราบกระบวนการส่งผ่านความร้อน เป็นต้น โดยการพิจารณาดังกล่าว จะทำให้สามารถกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ได้



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก

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

$$Q_{in} + Q_g - Q_{out} = Q_{st} \quad (4)$$

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

$$Q_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (5)$$

เมื่อ  $Q_g$  คือ อัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตร  $dV$  และมีค่าเท่ากับ

$$Q_g = \dot{g} dx dy dz \quad (6)$$

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

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

$$Q_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (7)$$

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

$$Q_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (8)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการที่ (5)-(8) ลงในสมการที่ (4) จะได้ว่า

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q}dxdydz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (9)$$

นำกฎของ Fourier มาพิจารณาสมการที่ (5) จะได้ว่า ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าปริมาตร  $dV$  ในทิศทาง  $x, y$  และ  $z$  คือ  $q_x, q_y$  และ  $q_z$  เป็นดังนี้

$$q_x = -kdydz \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x \quad (10)$$

$$q_y = -kdx dz \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_y \quad (11)$$

$$q_z = -kdx dy \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_z \quad (12)$$

นำกฎของ Taylor expansion มาพิจารณาสมการที่ (7) คือ เมื่อฟลักซ์ความร้อนไหลเข้าแล้ว แพร่กระจายไปจนสุดขอบปริมาตร  $dV$  ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร  $dV$  จะเป็นดังนี้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (13)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (14)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (15)$$

แทนสมการที่ (13) - (15) ลงในสมการที่ (9) จะได้ว่า

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q}dxdydz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (16)$$

แทนสมการที่ (10) - (12) ในสมการที่ (16) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( kdydz \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left( kdx dz \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy + \frac{\partial}{\partial z} \left( kdx dy \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \dot{q}dxdydz \\ & = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \end{aligned} \quad (17)$$

สมการที่ (17) 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)

$$\text{จะได้} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{เมื่อ} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (18)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าการกระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) จาก  $\frac{k}{\rho c}$  ทำให้ทราบว่ายัตราความร้อนจะแพร่เข้าไปในวัสดุได้ดีเพียงใด ขึ้นกับค่าการนำความร้อนและพลังงานสะสมในวัสดุด้วย

กรณีที่ 2) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

การอธิบายนี้สามารถอ้างอิงถึงสมการ Fourier หรือสมการการกระจายความร้อน

กรณีที่ 3) เมื่อมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g(x,y,z)}{k} = 0 \quad (20)$$

ซึ่งก็คือสมการ Poisson

กรณีที่ 4) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

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

ซึ่งก็คือสมการ Laplace

### 2.2.3 การแพร่กระจายความร้อน

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

$$\left(\frac{Q_0}{2}\right) [1 + \cos(\omega t)] \quad (22)$$

จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction)

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

ถ้าพลังงานความร้อนที่มาตกระทบเป็นดังสมการที่ (22) จะได้ว่า

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{Q_0}{2} [1 + \cos(\omega t)] = \text{Re} \left\{ \frac{Q_0}{2} [1 + \exp(j\omega t)] \right\} \quad x = 0, t > 0 \quad (23)$$

จากสมการที่ (23) สามารถแบ่งพิจารณาได้ 2 เทอม

เทอมแรก คือ  $\frac{Q_0}{2}$  เป็นส่วนที่แสดงถึงการเพิ่มอุณหภูมิแบบคงที่

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

ซึ่งเราจะพิจารณาแค่เทอมที่ 2 เท่านั้น

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad x < 0, t > 0 \quad (24)$$

กำหนดผลเฉลยของสมการที่ (24) เท่ากับ

$$T(x, t) = \text{Re}(T(x) \exp(j\omega t)) \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ (25) ลงในสมการที่ (24) จะได้

$$e^{j\omega t} \left( \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(x) \right) = 0 \quad (26)$$

จะได้

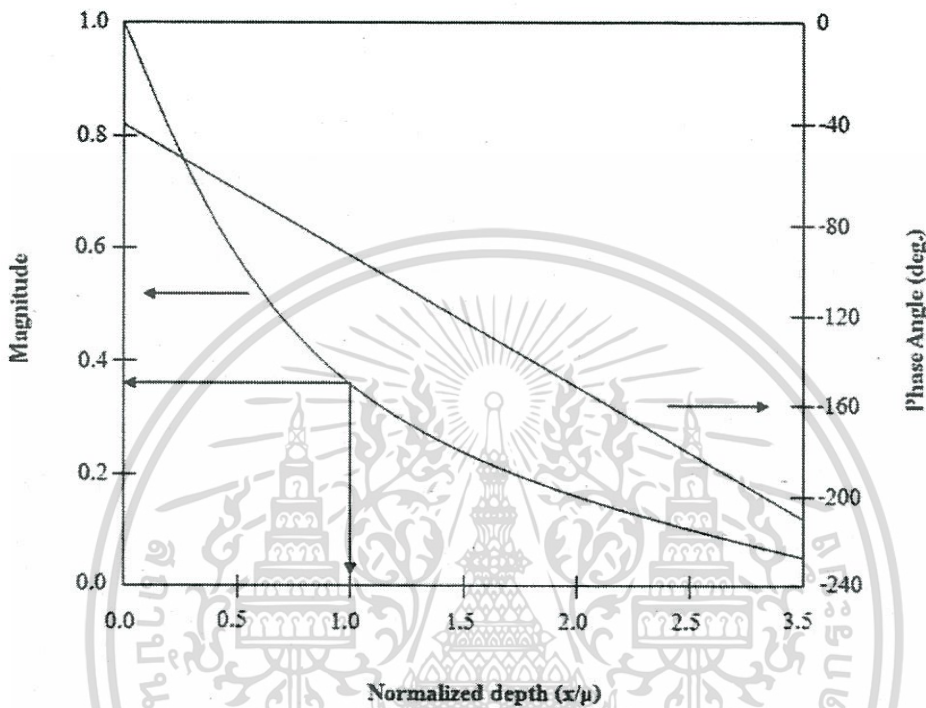
$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c k \omega}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \exp j \left( \omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (27)$$

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

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

จากผลเฉลยนี้ แบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแอมพลิจูด และส่วนเฟส ซึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นผิว (Normalized การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

depth) จะพบว่า มีการลดลงแบบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นที่ผิว (Normalized depth) จะพบว่า มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น นั่นคือ เมื่อมีคลื่นความร้อนแพร่กระจายลึกลงไปในพื้นที่ผิวของวัตถุ จะพบว่า บริเวณที่ลึกลงไปในพื้นที่ผิวจะมีความร้อนน้อยกว่าบริเวณพื้นผิวนั้นเอง



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนกับความลึกของพื้นผิวนอร์มัลไลซ์

นอกจากนี้ ผลเฉลยของสมการการแพร่กระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ยังสามารถอธิบายในแนวทางอื่นได้อีก ดังนี้

1) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายเหมือนกับคลื่นทั่วไป

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

$$\frac{1}{\mu} = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad \text{หรือ} \quad \mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (29)$$

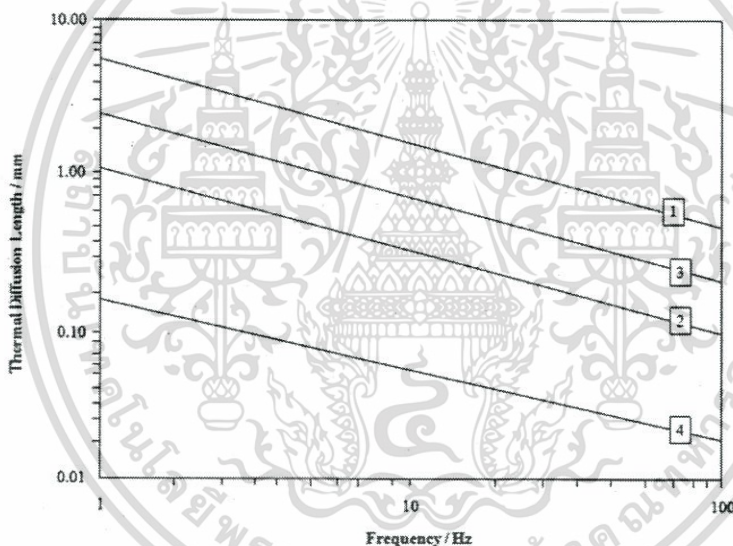
เมื่อ  $\mu$  คือ ระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusion length)

2) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายไม่เหมือนกับคลื่นทั่วไป

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

จากสมการที่ (29) ทำให้ทราบว่า คลื่นความร้อนจะสามารถแพร่กระจายความร้อนลงไป ในวัตถุได้ลึก ก็ต่อเมื่อวัตถุนั้นมีค่าการกระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity) สูง หรือเมื่อคลื่นความร้อนนั้นมีความถี่ต่ำ (คลื่นความร้อนต้องมีความยาวคลื่นมากนั่นเอง)

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity length, nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อนในช่วง 1-100 Hz ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์ จากกราฟ จะได้ว่า การกระจายทางความร้อนของวัสดุทั้ง 4 จะมีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ (nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์

3) คลื่นความร้อนที่มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว

ความเร็วเฟสของคลื่นความร้อน คือ

$$v = \omega\mu = \sqrt{2\alpha\omega} \quad (30)$$

จากสมการที่ (30) จะเห็นได้ว่า ความถี่ของคลื่นความร้อนมีผลต่อความเร็วในการแพร่กระจายความร้อน คือ คลื่นความร้อนที่มีความถี่สูงจะแพร่กระจายความร้อนได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำ

## 4) การเปลี่ยนเฟสของคลื่นความร้อน

คลื่นความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีการเปลี่ยนเฟสระหว่างตำแหน่งที่  $x = 0$  (พื้นผิววัตถุ) และที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\varphi = -\frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4} \quad (31)$$

จากสมการที่ (31) จะเห็นได้ว่า ถ้าพิจารณาที่  $x = 0$  (พื้นผิววัตถุ) คลื่นความร้อนที่พื้นผิววัตถุจะมีเฟสตามหลังคลื่นความร้อนที่แหล่งกำเนิดอยู่ -45 องศา

## 5) อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิที่บริเวณนั้น ต่อความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน ดังสมการ

$$Z = \frac{1}{k\sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\rho ck}} \quad (32)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน เป็นปริมาณที่บอกถึงขนาดของความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุ จากสมการที่ (32) เทอม  $\sqrt{\rho ck}$  คือ Thermal effusivity หรือค่าความเฉื่อยทางความร้อน ถ้าค่าความเฉื่อยทางความร้อนมีค่าต่ำ จะทำให้ความร้อนที่พื้นผิวมีค่าสูง (คือ วัสดุมีการตอบสนองต่อความร้อนสูง พื้นผิวจึงมีความร้อนสูงนั่นเอง) โดยปกติแล้ววัสดุที่มีการกระจายทางความร้อนสูง จะต้องมีความเฉื่อยทางความร้อนสูงด้วย แต่ยกเว้นบางกรณี วัสดุยกเว้นที่น่าสนใจที่สุดคือ อากาศ เพราะมีการกระจายทางความร้อนสูง แต่เนื่องจากมีค่าความนำความร้อนต่ำ และมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อากาศมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำนั่นเอง ฉะนั้น วัสดุที่มีการตอบสนองต่อความร้อนได้ดีจึงต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนสูงนั่นเอง

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนในวัสดุบางชนิด

Material	Density ( $kgm^{-3}$ )	Specific heat ( $jk g^{-1}K^{-1}$ )	Thermal conductivity ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )	Thermal diffusivity ( $Ws^{1/2}m^2K^{-1}$ )	Thermal effusively ( $Ws^{1/2}m^2K^{-1}$ )	Thermal diffusion length		
						mm	mm	mm
						1 Hz	25Hz	100 Hz
Metals								
Pure aluminum	2700	945	238	93.28	24642.9	5.4490	1.0898	0.5449
Al alloy 2024-T6	2770	875	177	73.03	20712.41	4.8213	0.9643	0.4821
Chromium	7160	449	93.7	29.15	17355.99	3.0459	0.6092	0.3046
Pure copper	8933	385	401	116.60	37136.52	6.0921	1.2184	0.6092
Bronze 90% Cu, 10%Al	8800	420	52	14.07	13863.33	2.1126	0.4232	0.2116
Gold	19300	129	317	127.32	28093.32	6.3662	1.2732	0.6366
Pure iron	7870	447	80.2	22.80	16796.87	2.6938	0.5388	0.2694
Steel AISI 1010	7832	434	63.9	18.80	14737.77	2.4462	0.4892	0.2446
Steel SIS 316	8238	468	13.4	3.48	7187.64	1.0518	0.2104	0.1052
Lead	11340	129	35.3	24.13	7186.03	2.7715	0.5543	0.2771
Magnesium	1740	1024	156	87.55	16671.97	5.2791	1.0558	0.5279
Molybdenum	10240	251	138	53.70	18833.30	4.1344	0.8269	0.4134
Pure nickel	8900	444	90.7	22.95	18931.72	2.7030	0.5406	0.2703
Inconel X-750	8510	439	11.7	3.13	6611.35	0.9984	0.1997	0.0998
Silver	10500	235	429	173.86	32535.48	7.4392	1.4878	0.7439
Titanium	4500	522	21.9	9.32	7172.38	1.7227	0.3445	0.1723
Tungsten	19300	132	174	68.30	21054.27	4.6627	0.9325	0.4663
Zinc	7140	389	116	41.76	17949.52	3.6461	0.7292	0.3646
Zirconium	6570	278	22.7	12.43	6438.99	1.9890	0.3978	0.1989
Non-metals								
Aluminium oxide	3970	765	46	15.15	11819.66	2.1957	0.4391	0.2196
Beryllium oxide	3000	1030	272	88.03	28991.03	5.2933	1.0587	0.5293
Diamond	3500	509	2300	1291.05	64001.33	20.272	4.0544	2.0272
Silicon carbide	3160	675	490	229.72	32329.09	8.5512	1.7102	0.8551
Silicon nitride	2400	691	16	9.65	5151.16	1.7524	0.3505	0.1752
Germanium	5360	322	59.9	34.71	10167.72	3.3237	0.6647	0.3329
Silicon	2330	712	148	89.21	15669.87	5.3289	1.0658	0.5329
Quartz glass	2210	730	1.4	0.87	1502.87	0.5256	0.1051	0.0526
Bakelite	1270	1590	0.23	0.11	681.50	0.1904	0.0381	0.0190
Rubber (soft)	1100	2010	0.13	0.06	536.12	0.1368	0.0274	0.0137
Wood (oak)	545	2385	0.17	0.13	470.07	0.2040	0.0408	0.0204
Lubricating	845	2020	0.14	0.08	488.84	0.1616	0.0323	0.0162
Air	1.16	1007	0.026	22.26	5.51	2.6618	0.5324	0.2662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 ค่าการกระจายทางความร้อน และทฤษฎี Rosencwaig-Gersho

จากทฤษฎี Rosencwaig -Gersho ความดัน  $Q$  ที่เปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง แบบ Optically thick จะขึ้นกับค่าการกระจายทางความร้อนของตัวอย่าง สามารถเขียนได้เป็น

$$Q = qe^{-j\phi} = BA \quad (33)$$

ซึ่ง  $q = |Q|$ ,  $\phi$  คือเฟสที่เปลี่ยนไประหว่าง  $Q$  กับแหล่งกระตุ้น โดย  $B$  และ  $A$  กำหนดได้เป็น

$$B = \left( \frac{P_0 \gamma W_a \sqrt{\alpha l}}{2lrT_0 K \sqrt{\alpha}} \right) \quad (34)$$

และ

$$A = \left( \frac{1+g(d^++d^-)}{d^+-d^-} \right) \left( \frac{g(d^++d^-)}{d^+-d^-} \right) \left( \frac{1}{\sigma l} \right)^2 \quad (35)$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} d^+ &= e^{\sigma l} \\ d^- &= e^{-\sigma l} \\ \sigma &= (1+i) \left( \frac{\pi f}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (36)$$

และ  $g$  คือ อัตราส่วนความเฉื่อยทางความร้อน (Thermal effusivity) ของวัสดุพื้นหลัง ( $e''$ ) กับตัวอย่าง ( $e$ ) เขียนเป็น

$$g = \frac{e''}{e} = \left( \frac{K''}{K} \right) \left( \frac{\alpha}{\alpha''} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

ในสมการข้างบน  $l, K$  และ  $\alpha$  คือความหนา, สภาพการนำความร้อนและค่าการกระจายทางความร้อนตามลำดับ,  $T_0$  และ  $P_0$  คือ อุณหภูมิสถิตย์ (Static temperature) และความดันสถิตย์ (Static pressure) ของแก๊ส,  $\gamma$  คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ (Ratio of specific heats),  $W_a$  คือ ปริมาณแสงที่ดูดกลืน, และ  $l'$  คือ ความหนา ค่าการกระจายทางความร้อนของแก๊ส ค่าความเฉื่อยทางความร้อนของแก๊สในเซลล์จะไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเฉื่อยทางความร้อนของตัวอย่าง เนื่องจากอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1% เสมอ เทอม  $A$  จะขึ้นกับความถี่มอดูเลตโดยตรง ซึ่งผลสามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma l = (i+j) \left( \frac{\pi f}{f_c} \right) \quad (38)$$

ซึ่ง  $f_c$  คือ Characteristic frequency ที่ได้จากสมการ (36) และ (38)

$$f_c = \frac{\alpha}{l^2} \quad (39)$$

ค่าการกระจายทางความร้อนสามารถหาได้โดยการวัดค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติค ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของตัวตัดแสง โดยปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติค ก็คือ ระยะเวลาแพร่ความร้อน หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu = \left(\frac{\alpha}{\pi f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

ซึ่ง  $f$  คือ ความถี่ของตัวตัดแสง เมื่อตัวอย่างเป็น Thermally thin ( $\mu > 1$ ) ค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่อยู่ด้านหลัง แต่เมื่อตัวอย่างเป็น Thermally thick ( $\mu < 1$ ) ค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกจะไม่ขึ้นกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่อยู่ด้านหลัง ในกรณีที่รู้ค่าความหนาของตัวอย่าง จะมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบ thermally thin ไปเป็นรูปแบบ thermally thick โดยการเพิ่มความถี่ตัวตัดแสง ดังนั้น หากเราพล็อต  $\log(\text{amplitude})$  กับ  $\log(\text{frequency})$  จะเห็นการเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งจุดนี้เราเรียกว่า Characteristic frequency ( $f_c$ ) เมื่อเรารู้ Characteristic และความหนาของตัวอย่าง ค่าการกระจายทางความร้อนก็สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\alpha = l^2 f_c \quad (41)$$



## 2.4 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการกระจายทางความร้อน

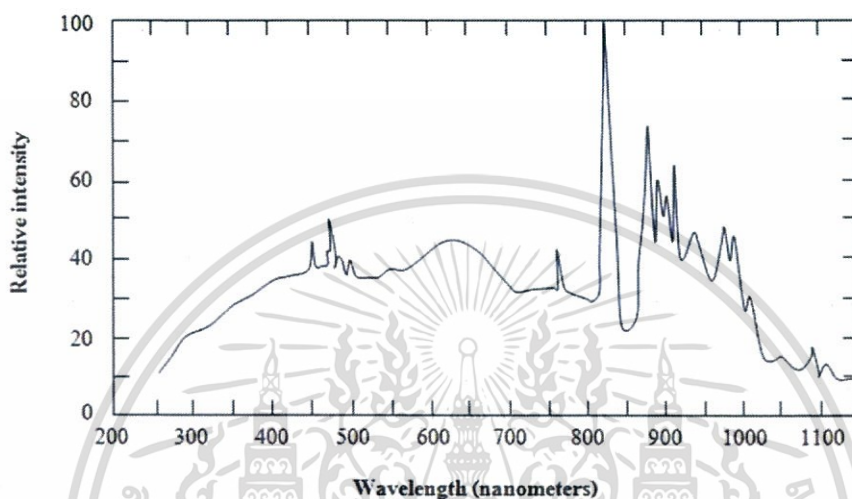
### 2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ 2.4 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในการศึกษาโฟโตเทอร์มอล

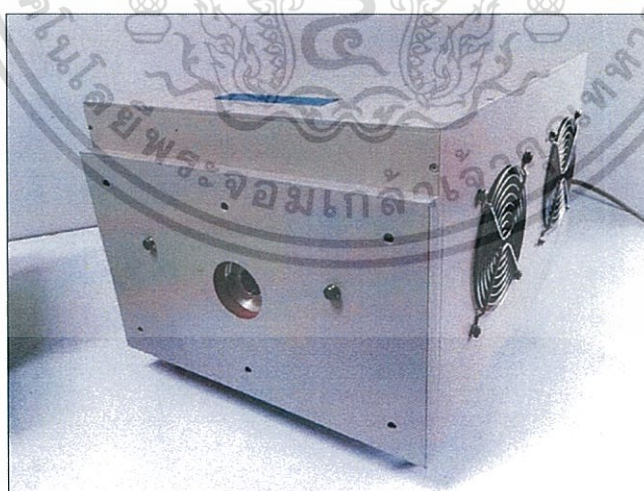
Optical source	Spectral range ( $\mu\text{m}$ )	Power ( $\text{Wmm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ )	comment
Incoherent sources			
Xenon-lamp	0.2-2.0	0.2	High pressure arc lamp Electric heated filament Electric heated
Globar	2-30		
Nernst	2-30		
Type	Wavelength	Power/Energy	comment
Coherent sources - lasers			
Helium-Neon (gas)	623.8nm	0.1-50 mW	Cw
Ruby (solid)	694.2 nm	0.03-100 J(per pulse)	pulsed
Carbon dioxide (gas)	10.6 $\mu\text{m}$	3-100 W	Cw
Nd:YAG (solid)	1.064 $\mu\text{m}$	0.04-600 W	Cw
Nd:glass (solid)	1.06 $\mu\text{m}$	0.15-100 J	Pulsed
Argon ion (gas)	488,514 $\mu\text{m}$	5 mW-20 W	Cw
Dye (liquid)	400-900 $\mu\text{m}$	2-800 mW	Cw/pulsed (pulsed by argon ion laser)
Argon fluoride (eximer)	193 $\mu\text{m}$	Up to 10 W	pulsed
Hydrogen fluoride (chemical)	2.6-3.0 $\mu\text{m}$	0.01-150 w cw or 2-600 mjper pulse	Cw/ pulsed
Gallium arsenide (semiconductor diode)	780-900 nm	1-40 mWcw or average per pulse	Cw/ pulsed
semiconductor diode array	780-900 nm	250 mW-10 W	cw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี ใช้หลอดปล่อยประจุซีนอนขนาด 450 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้ให้ความยาวคลื่นในช่วง 200 – 2500 nm จากการอาร์คระหว่างขั้วในหลอดที่บรรจุแก๊สซีนอนเอาไว้ภายใน หลอดปล่อยประจุชนิดความดันสูงประเภทซีนอน (Xe lamp) จะทำงานที่ความดันช่วง 50-70 บรรยากาศ และเป็นแหล่งกำเนิดที่มีประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความเข้มสูงจาก 230-2,000 nm สเปกตรัมการปลดปล่อยส่วนใหญ่จะเป็นแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงระหว่าง 800-1,000 nm จะมีความเข้มสูงสุด



รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดซีนอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูงกำลังที่ได้สามารถให้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด



รูปที่ 2.6 แสดงแหล่งกำเนิดแสง Xe lamp

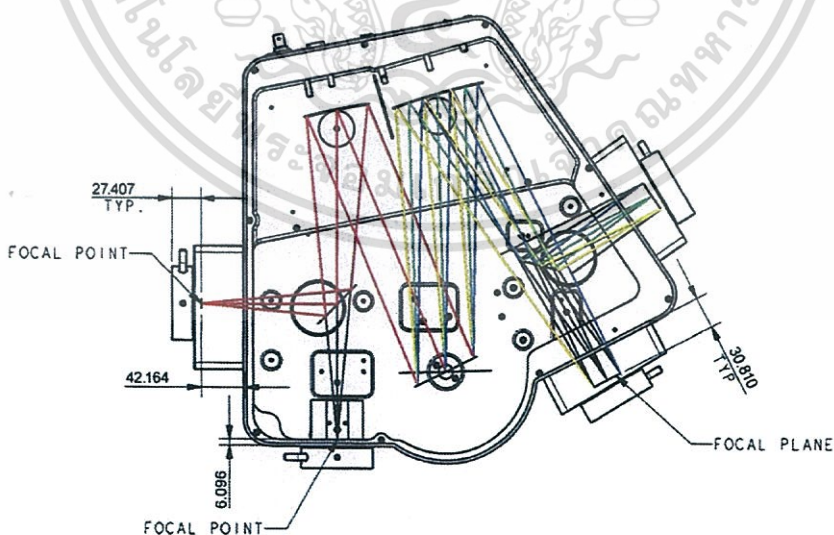
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 เครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator)



รูปที่ 2.7 แสดงภาพเครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมแสงโดยต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแสง ทำให้แสงจากแหล่งกำเนิดที่เป็นพอลิโครเมติกให้เป็นแสงโมโนโครเมติกซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ มีความยาวคลื่นเดียว ส่วนประกอบภายในของเครื่องแยกความยาวคลื่นประกอบด้วยกระจก, เกรตติงปรับได้ (grating), entrance slit, exit slit ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแยกความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 2.4.3 เครื่องตัดแสง

เครื่องตัดแสง เป็นเครื่องที่มีลักษณะเป็นวงล้อใบพัดแยกเป็นส่วนๆ เป็นวิธีมอดูเลตแสงที่ง่าย มีประสิทธิภาพ ปรับความเร็วได้ และมีสัญญาณรบกวนในการสั่นของแสงที่โดนตัดต่ำ จึงมีการนำมาใช้ในการค้าอย่างแพร่หลาย เครื่องตัดแสงมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปแบบการมอดูเลตและความถี่ คือ มันจะมอดูเลตแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และสามารถตัดแสงในย่านความถี่จาก 1 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์เท่านั้น (ความถี่ในการตัดแสงสูงสุดถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ ส่วนความถี่ในการตัดแสงค่าต่ำสุดมีผลมาจาก Phase jitter ที่สูง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำ มอเตอร์จะทำงานได้ไม่ดี เพราะต้องควบคุมการหมุนให้มีความเร็วต่ำ)

Mechanical Chopper ทำหน้าที่ให้การมอดูเลตแสง โดยใช้ใบพัดที่เป็นวงล้อในการตัดแสงเป็นช่วงๆ เพราะในการวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกจำเป็นต้องวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความดันในโฟโตอะคูสติกเซลล์ ซึ่งตัวตัดแสงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณอ้างอิงแก่เครื่องขยายสัญญาณ Lock-in Amplifier ด้วย



รูปที่ 2.9 แสดงภาพเครื่องตัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ระบบตรวจจับ

โดยทั่วไปการตรวจจับคลื่นความร้อนจะใช้เสียง, แสง และความร้อนเป็นตัวตรวจจับ หากใช้เทคนิคการตรวจจับด้วยเสียงจะใช้ไมโครโฟนสำหรับตรวจจับความดันที่เปลี่ยนแปลงในอากาศ หรือใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์เป็นตัวตรวจจับ Thermoelastic waves ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง หากใช้เทคนิคทางแสงจะใช้ Probe beams และ Photo detector เพื่อตรวจการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่าง ในกรณีตัวอย่างที่เป็นของไหลก็ใช้วิธีเดียวกัน เทคนิคทางแสงนี้ยังสามารถใช้ควบคุมการขยายความร้อนที่ถูกมอดูเลตโดยเทคนิค Probe beams displacement เทคนิคทางความร้อน (Interferometry) ตรวจจับความร้อนโดยตรง จะใช้ Thermocouple, Thermister, Infrared detector หรือ Pyroelectric transducer เพื่อตรวจจับคลื่นความร้อน

เมื่อแสงที่ผ่านการมอดูเลตเดินทางผ่านกระจกที่ทำจากควอตซ์เข้าสู่ห้องปิด และตกกระทบสารตัวอย่างที่อยู่ภายในเซลล์ สารตัวอย่างจะดูดกลืนแสง ทำให้เกิดคลื่นความร้อนขึ้นบริเวณพื้นผิว คลื่นความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบคาบตามแสงที่มอดูเลต และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องปิด และถูกตรวจจับด้วยไมโครโฟนด้านใน



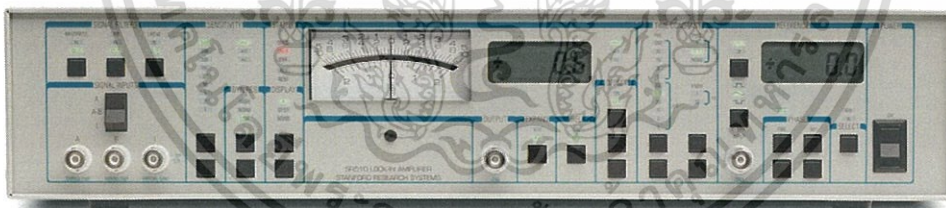
รูปที่ 2.10 แสดงภาพโฟโตอะคูสติคเซลล์ ซึ่งเป็นระบบตรวจจับความร้อนโดยใช้เทคนิคเสียง มีไมโครโฟนตรวจจับความดันที่เปลี่ยนไป

#### 2.4.5 ระบบขยายสัญญาณ

ตัวขยายสัญญาณ หรือวงจรขยายสัญญาณ (Electronic Amplifier or Amplifier) หรือเรียกสั้นๆ ว่า Amp เป็นอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณ โดยการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟและการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีรูปร่างเหมือนสัญญาณอินพุตแต่มีขนาดใหญ่กว่า คือ ตัวขยายสัญญาณ ทำการกรอกล้ำสัญญาณ (modulate) เอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟ

เครื่องขยายสัญญาณลอคอินจะถูกนำมาใช้ในการลดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนการวัด เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์มีขนาดเล็กมากในระดับไมโครโวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องขยายสัญญาณลอคอินที่มีการวัดสัญญาณด้วยวิธี Phase-Sensitive Detection (PSD) ที่ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณด้วย Bandwidth ที่แคบมากๆ เราจึงสามารถวัดสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

จากรูปที่ 2.18 สัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์จะถูกต่อเข้ากับอินพุตของเครื่องขยายสัญญาณลอคอิน ผ่านโวลต์เดจอินพุตแบบซิงเกิลเอนด์ที่มีสัญญาณ A บนแผงหน้าเครื่อง (Single Ended, A) จากนั้นเราจะปรับให้สัญญาณผ่านตัวกรองสัญญาณทั้งแบบ Band pass Auto tracking และ Notch ต่อมาสัญญาณจะผ่านส่วนขยายสัญญาณก่อนจะเข้าสู่ส่วน Phase-Sensitive Detection ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่มีเฟสหรือความถี่เดียวกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อทำการบวกหรือลบสัญญาณ สัญญาณลัพธ์ที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของกระแสตรงก่อนผ่านวงจรกรองแบบ Low pass และจะขยายสัญญาณอีกครั้ง โดยสัญญาณเอาต์พุตสามารถอ่านได้จากหน้าจอดีเอสซีที

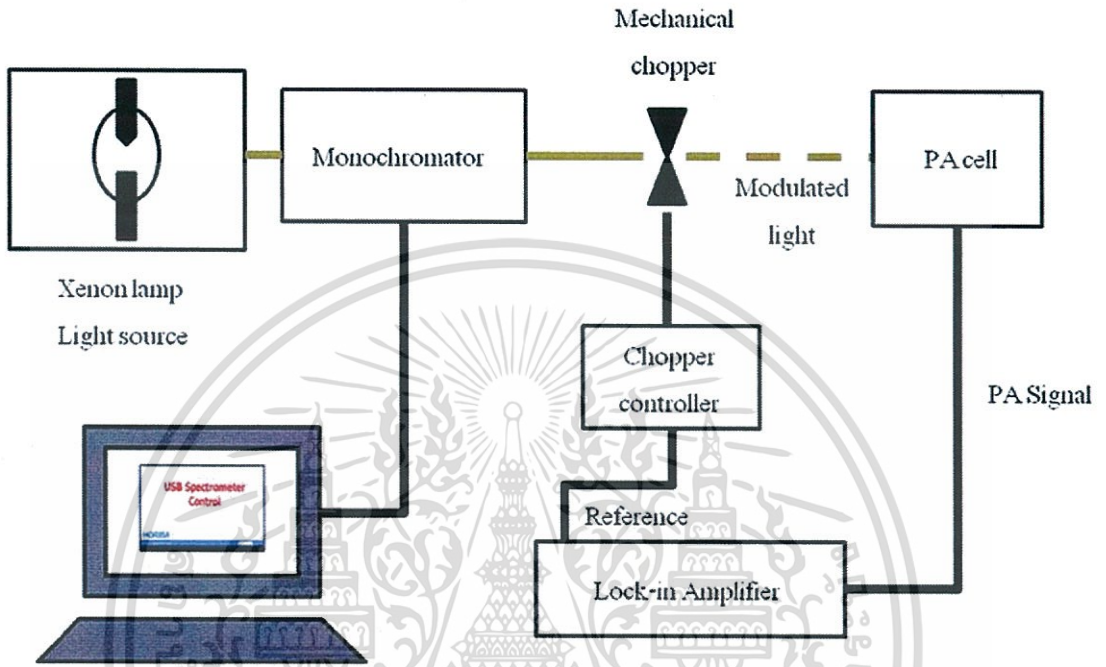


รูปที่ 2.11 แสดงภาพ lock-in amplifier

# บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินการ

### 3.1 การจัดระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโทรสโกปี



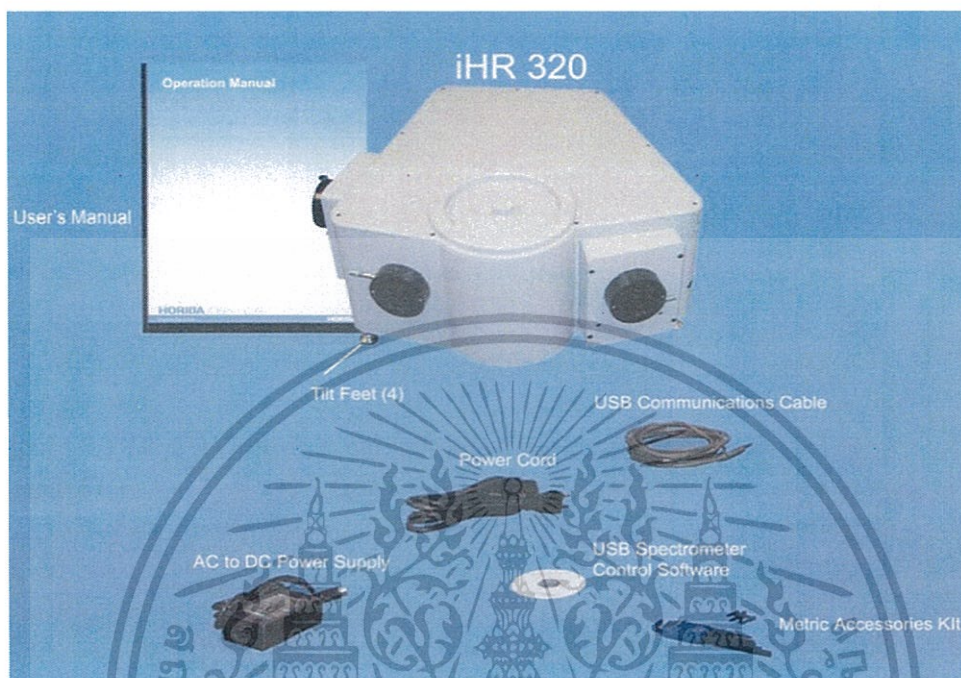
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโทรสโกปี

การจัดระบบ จะเป็นดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

แหล่งกำเนิดแสงจะต่อเข้ากับเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) เครื่องแยกความยาวคลื่นจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมเพื่อเลือกความยาวคลื่นของแสงที่ออกมา โดยแสงที่ออกมาจะถูกมอดูเลตแสงด้วยตัวตัดแสงเชิงกล (Mechanical chopper) ซึ่งตัวตัดแสงจะถูกควบคุมความถี่ในการตัดแสงด้วย Chopper controller และแสงที่ถูกมอดูเลตนี้จะเข้าไปตกกระทบบนสารทดสอบภายใน Photoacoustic cell ความดันที่เปลี่ยนแปลงภายใน Photoacoustic cell จะถูกตรวจจับได้โดยไมโครโฟน, Reference ของ Lock-in Amplifier จะต่อเข้ากับ Chopper controller เพื่อรับสัญญาณอ้างอิงจาก Chopper ส่วน input ของ Lock-in Amplifier จะต่อเข้ากับ Photoacoustic cell เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณความดันและแสดงผลออกมาทางหน้าจอแอลซีดี

### 3.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่น

เราทำการเชื่อมต่อโปรแกรมกับเครื่องแยกความยาวคลื่นโดยใช้สาย USB และทำการติดตั้งโปรแกรมด้วย USB Spectrometer Control software ดังรูป



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) iHR 320

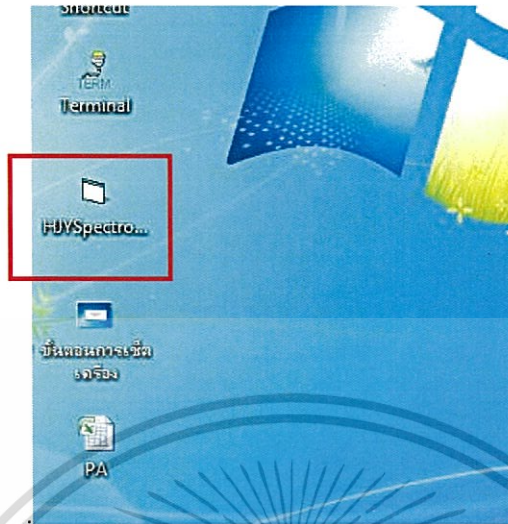


รูปที่ 3.3 แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

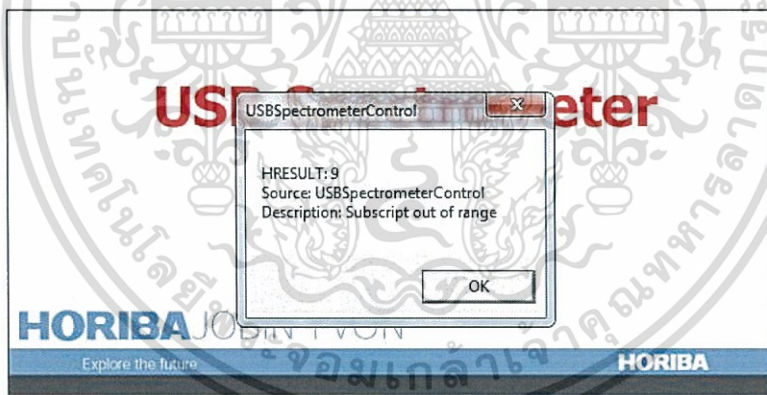
## ขั้นตอนการใช้โปรแกรม USB Spectrometer Control

### 1. เข้าสู่โปรแกรมคำสั่ง HJY Spectrometer



รูปที่ 3.4 แสดงไอคอนโปรแกรม

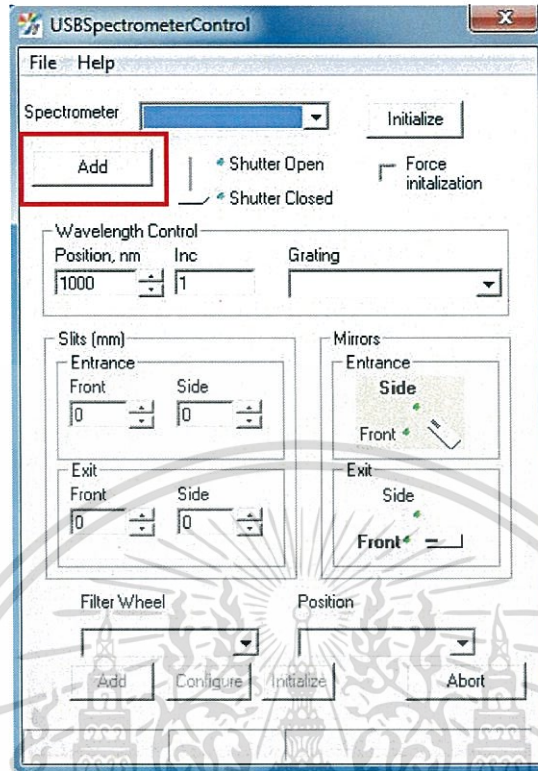
### 2. โปรแกรมคำสั่งจะปรากฏหน้าต่างดังนี้กด OK



รูปที่ 3.5 แสดงหน้าต่างกด OK

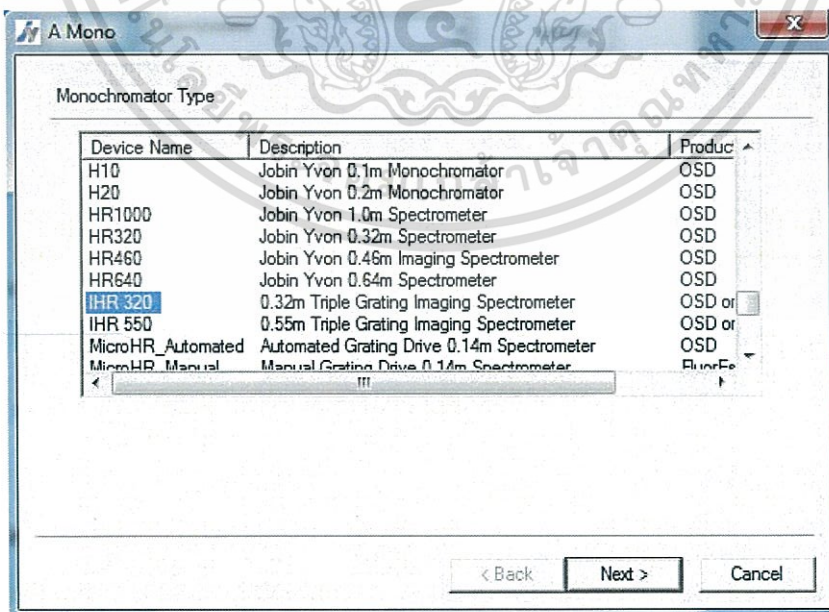
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากกด OK โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังนี้และให้กดที่ Add



รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างหลังกด OK

4. เมื่อกด Add เสร็จโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ให้เลือกไปที่ IHR 320

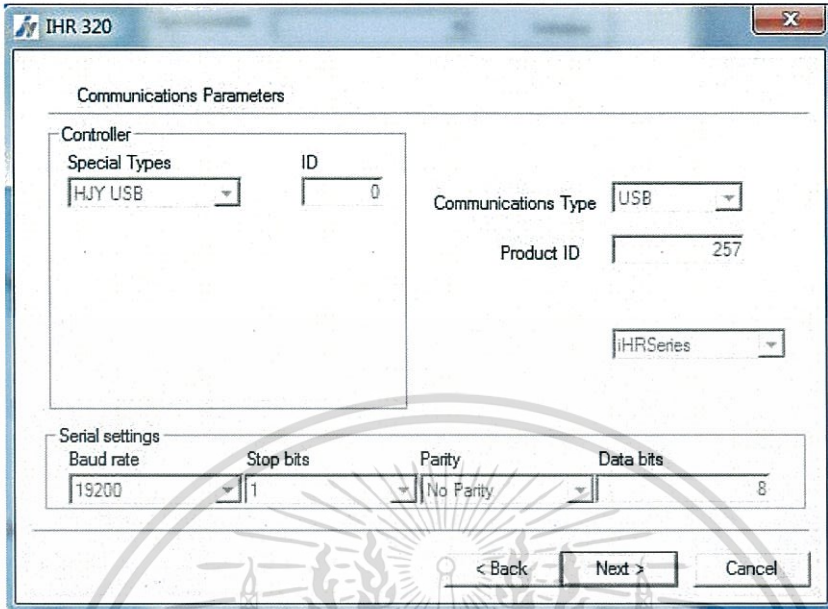


รูปที่ 3.7 แสดงโปรแกรมคำสั่งเลือกไปที่ IHR 320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

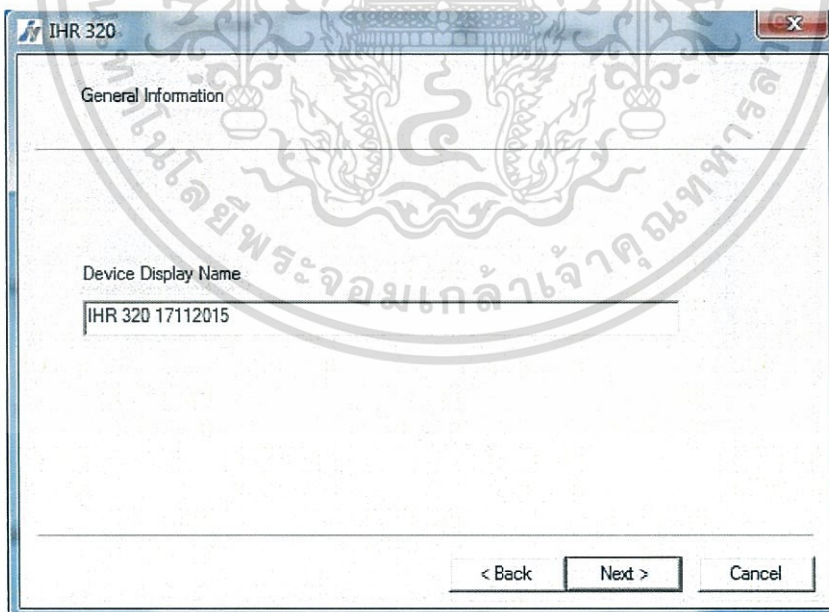
5. กด Next>

6. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ กด Next>



รูปที่ 3.8 แสดงโปรแกรมคำสั่งกด Next>

7. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง ให้ตั้งชื่อที่ช่อง Device Display Name

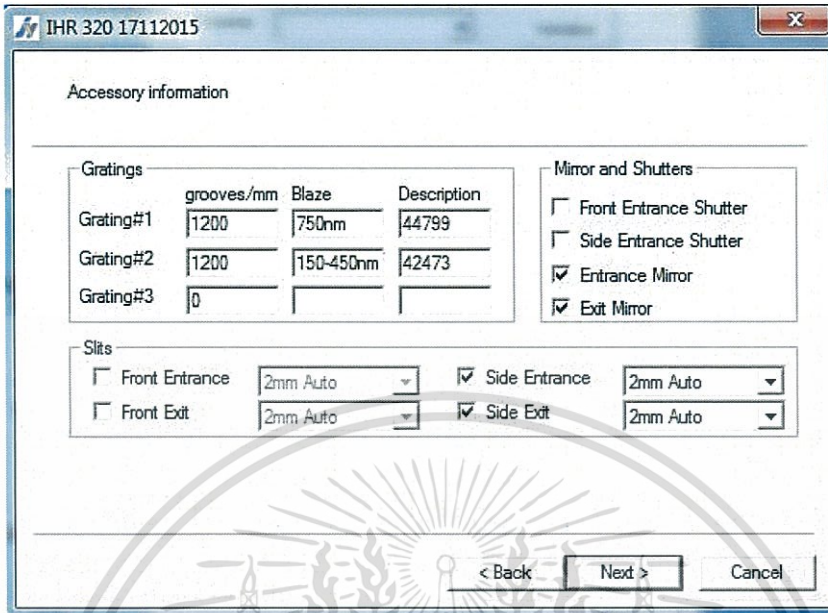


รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งชื่อตรงช่อง Device Display Name

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เมื่อตั้งชื่อเสร็จ กด Next>

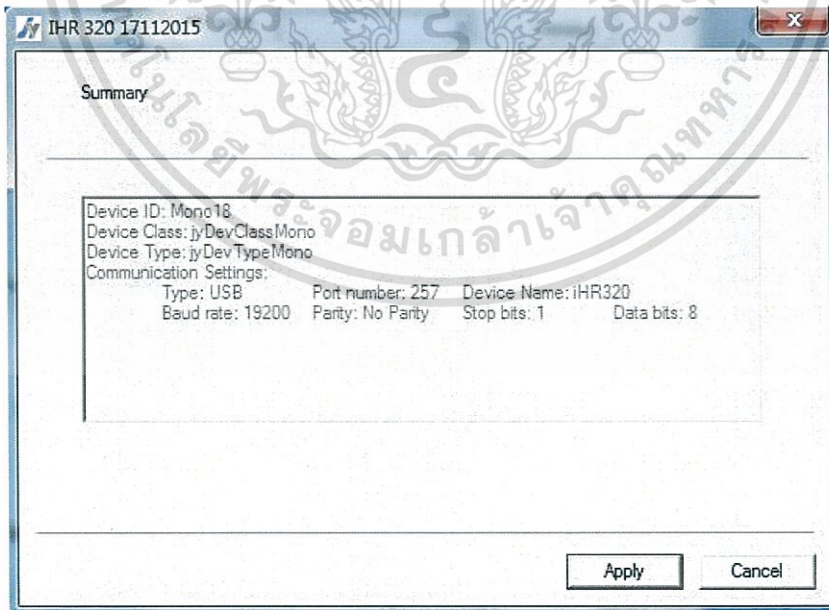
9. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Accessory information ดังนี้



รูปที่ 3.10 แสดงหน้าต่าง Accessory information

10. ตั้งค่าตามที่กำหนดในรูปที่ 3.19 แล้วกด Next>

11. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Summary ขึ้นมาดังนี้

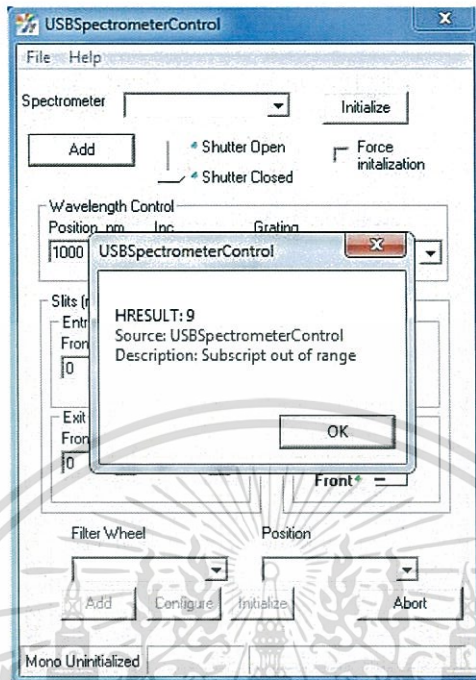


รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่าง Summary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

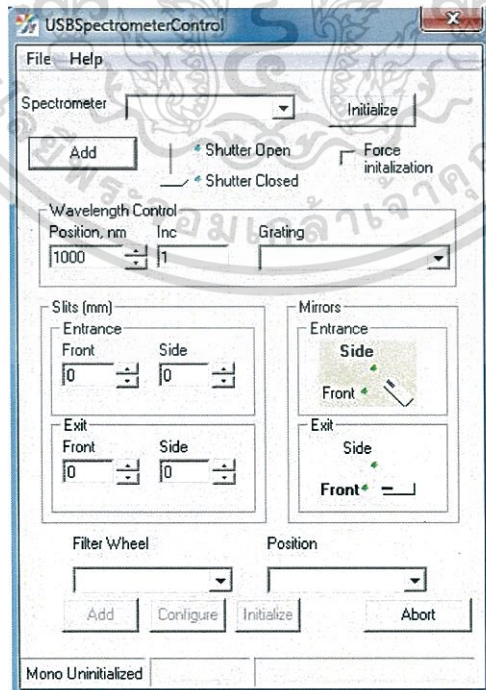
12. กด Apply

13. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ กด OK



รูปที่ 3.12 แสดงหน้าต่างให้กด OK

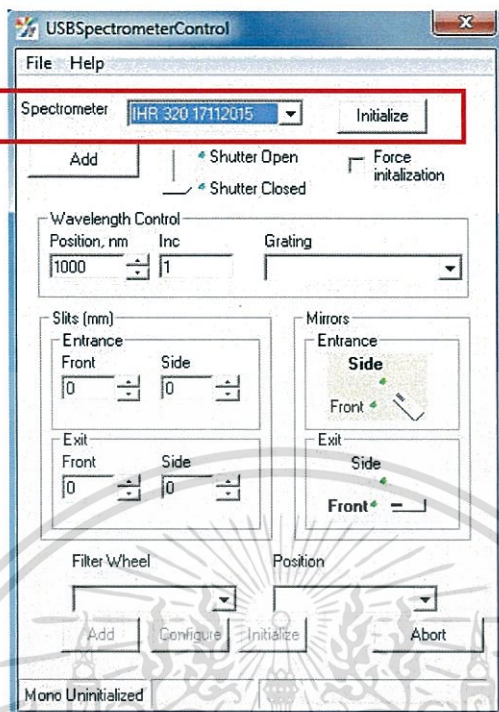
14. เมื่อทำการกด OK แล้ว จะเห็นหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าต่างหลังกด OK

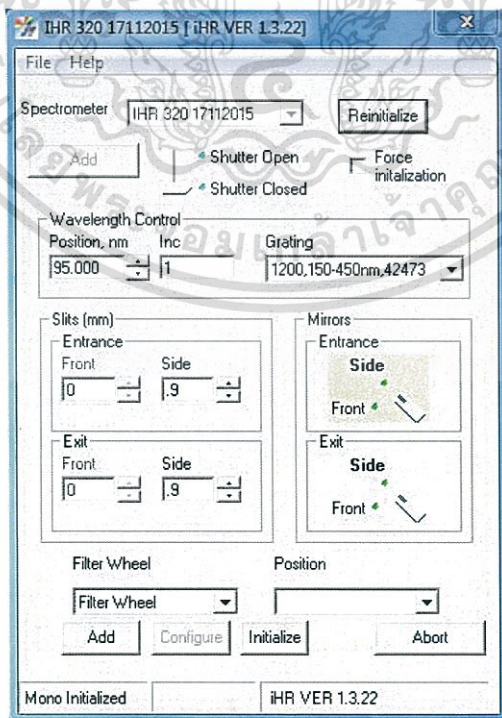
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer เป็นชื่อที่เราตั้งไว้แล้วกด Initialize



รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer

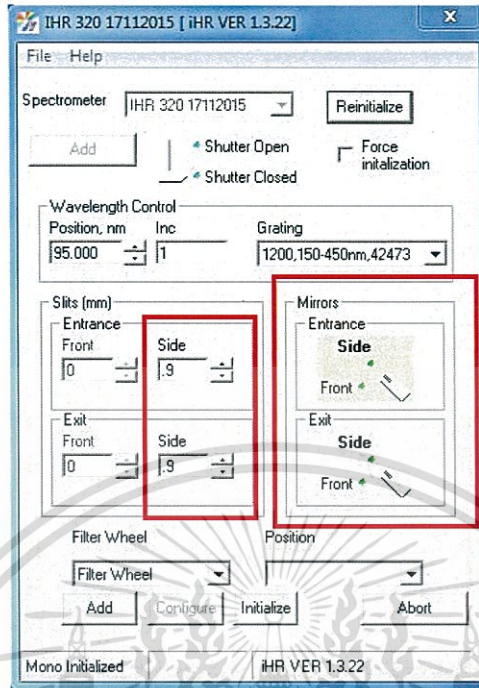
16. เมื่อกด Initialize แล้วโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างเดิมแต่ค่าต่างๆ จะเปลี่ยนไปดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าหลังกด Initialize

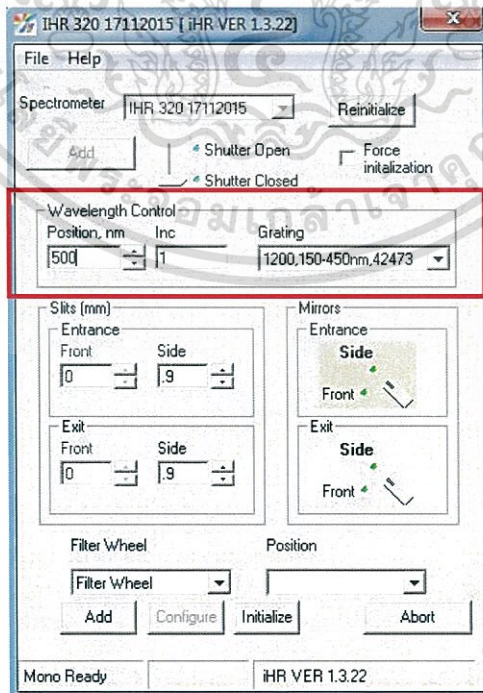
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. ตั้งค่าตามรูปดังนี้ โดยตั้งค่าช่อง Side เป็น 0.9 ทั้งคู่ และช่อง Mirrors ปรับเป็น Side ทั้งคู่



รูปที่ 3.16 แสดงหน้าต่างการตั้งค่า

18. เมื่อตั้งค่าเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยการใส่ค่าความยาวคลื่นลงไปใน Wavelength Control



รูปที่ 3.17 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าการเลือกความยาวคลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

#### 3.3.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black)

คาร์บอนแบล็ค เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน มีหลายชนิด บางชนิดมีขนาดอยู่ในระดับนาโน บางชนิดเป็นส่วนผสมของอนุภาคนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่านาโน

คุณสมบัติที่น่าสนใจของคาร์บอนแบล็ค คือ สามารถดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงที่ตามองเห็น และสามารถปลดปล่อยแสงที่ดูดกลืนออกมาได้ทั้งหมด ด้วยเหตุนี้จึงนำคาร์บอนแบล็คมาเป็นสารอ้างอิง เพื่อหาสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดในระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.18 แสดงภาพคาร์บอนแบล็ค

#### 3.3.2 ซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ (Silver doped Zinc oxide, $Ag_xZn_{1-x}O$ )

การเตรียมซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล



รูปที่ 3.19 แสดงภาพซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัสดุและอุปกรณ์

1. สารเคมี ได้แก่  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $AgNO_3$ ,  $Na_2CO_3$  และ  $NaOH$
2. อุปกรณ์พื้นฐาน ได้แก่ บีกเกอร์, หลอดหยด, แท่งคนสาร
3. น้ำกลั่น (Distilled water)
4. เครื่องชั่งสาร digital
5. เครื่องคนสาร และ magnetic bar
6. pH meter
7. กระจกกรองสาร และเครื่องช่วยดูด
8. ตู้อบลมร้อน
9. เตาหลอม และ crucible

## ขั้นตอนการเตรียมสาร

1. นำ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  13.9457g (5% = 13.6582g, 7% = 13.3706g) และ  $AgNO_3$  0.2548g (5% = 0.4247g, 7% = 0.5946g) มาผสมกันในน้ำกลั่น 500 ml
2. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.6 ดังนี้
  - เตรียม  $Na_2CO_3$  10.599g มาละลายในน้ำกลั่น 1,000 ml และเตรียม  $NaOH$  4g มาละลายในน้ำกลั่น 1,000 ml จะได้สารละลาย  $Na_2CO_3$  และ  $NaOH$  ที่ความเข้มข้น 0.1M
  - เตรียมสารละลาย HCl 36% ให้มีความเข้มข้น 1M โดยเตรียมน้ำกลั่น 50 ml แล้วค่อย ๆ หยด HCl ลงไป 5 ml จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปให้สารละลายทั้งหมดมีปริมาตร 60 ml
  - นำสารละลาย  $Na_2CO_3$  ปริมาตร 50 ml ผสมกับสารละลาย  $NaOH$  ปริมาตร 50 ml และใช้สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1M ที่เตรียมไว้มาปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 4.6 จะได้สารละลายบัฟเฟอร์
3. นำสารละลายในข้อ 1. ปริมาตร 50 ml ไปใส่ในบีกเกอร์ แล้วคนด้วยเครื่องคนสารที่หมุนด้วยความเร็วต่ำสุดและทำงานที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 2. ปริมาตร 50 ml ลงไปจนเกิดการอิมิตัวของปฏิกิริยาและได้ตะกอนสีขาวขุ่น โดยให้เครื่องคนสารทำงานต่อเป็นเวลา 2 ชม.
4. นำสารละลายที่อิมิตัวในข้อ 3. มากรองเอาตะกอน แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นประมาณ 1-2 L
5. นำกระจกกรองใส่ plate แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชม.
6. นำตะกอนมาใส่ crucible ปิดฝาให้มิดชิด แล้วนำไปเผาด้วยเตาหลอมที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชม.
7. จะได้ผงซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% โดยโมล (เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 ครั้ง จะได้ตะกอน 2 บีกเกอร์ ต้องได้ตะกอนทั้งสิ้นประมาณ 15 บีกเกอร์ จึงจะได้ปริมาณสารทดสอบ 0.1g)
8. นำผงซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธี XRD เพื่อตรวจสอบว่าสารทดสอบที่ได้ คือ ซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์หรือไม่

### การอัดเม็ดสารซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์

เนื่องจากซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์ ( $AgZnO$ ) เป็นผง จึงต้องมีขั้นตอนการอัดเม็ดสารทดสอบ เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบโฟโตอะคูสติกได้ บล็อกอัดสารที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย อุปกรณ์และวิธีใช้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.20 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร



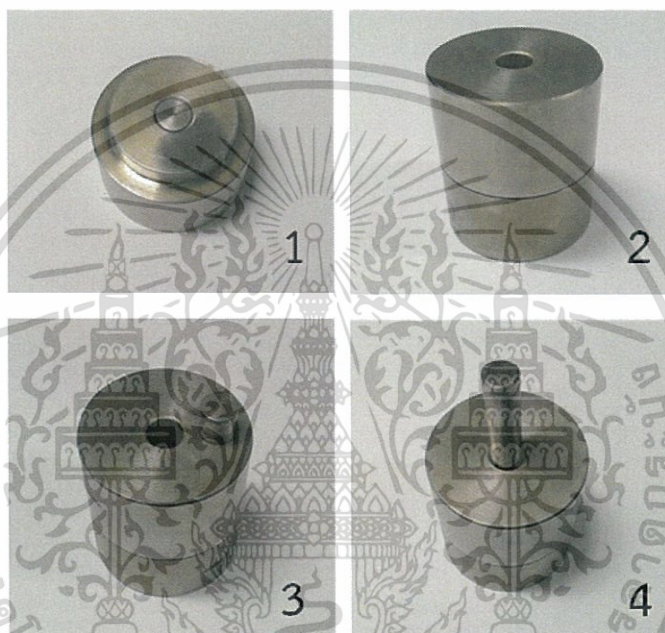
รูปที่ 3.21 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอัดเม็ดซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ทุกความเข้มข้นของซิลเวอร์ที่น้ำหนัก 0.1g ด้วยแรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิค 5 ตัน โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ตัน ทิ้งไว้ครั้งละ 1 นาที รวมเวลาในการอัดเม็ดทั้งสิ้น 5 นาที (เวลาในการอัดนี้ หมายถึง เวลาที่กระบอกสูบของเครื่องอัดไฮดรอลิค กดทับบล็อกอัดสารก่อนที่จะคลายออก) และอัดเม็ดซิงค์ออกไซด์ที่น้ำหนัก 0.2g ด้วยแรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิค 7 ตัน

### ขั้นตอนการอัดสาร

ทำการวางอุปกรณ์ดังภาพแล้วใส่สารที่ต้องการจะอัดลงไปนขั้นตอนที่ 2 เมื่อจัดอุปกรณ์จนถึงขั้นตอนที่ 4 แล้วให้ทำไปอัดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค



รูปที่ 3.22 แสดงขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ในการอัดเม็ดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.4.1 ตอนที่ 1 : การหาช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์

1. ทำการติดตั้งระบบโพโตอะคูสติคตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.1
2. นำคาร์บอนแบล็คใส่ในโพโตอะคูสติคเซลล์ เพื่อทำการวัดสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดแสง
3. เปิดสวิตช์ของอุปกรณ์ทุกเครื่อง เปิดพัลลมของแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อระบายความร้อนให้กับแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นเปิดสวิตช์หลอดไฟทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ระบบเตรียมความพร้อม แล้วจึงเปิดโปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น (เวลาปิดให้ปิดไฟก่อน แล้วปล่อยให้พัลลมระบายความร้อนต่อไปอย่างน้อย 30 นาทีจึงปิดได้)
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติคจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 nm - 750 nm โดยเพิ่มครั้งละ 2 nm และให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz
5. เปลี่ยนจากคาร์บอนแบล็คเป็นซิงค์ออกไซด์ โดยให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 12 Hz
6. นำผลการทดลองที่ได้จากซิงค์ออกไซด์ไป normalized กับผลการทดลองที่ได้จากคาร์บอนแบล็ค แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและแอมพลิจูดของสัญญาณโพโตอะคูสติคที่นอร์มัลไลซ์แล้ว
7. พิจารณาความยาวคลื่นแสงที่ซิงค์ออกไซด์เริ่มไม่ดูดกลืน นำค่าความยาวคลื่นนี้มาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

8. นำวงซิงค์ออกไซด์ไปวัดค่าการดูดกลืนจากเทคนิค UV-Visible และนำความยาวคลื่นแสงที่ซิงค์ออกไซด์ดูดกลืนมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากความสัมพันธ์ในข้อ 7.

#### 3.4.2 ตอนที่ 2 : การหาการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์โตนโซลซิงค์ออกไซด์

1. ทำการติดตั้งและเปิดระบบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.1
2. นำซิงค์ออกไซด์ใส่ในโพโตอะคูสติคเซลล์
3. ใช้โปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น ปรับให้แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 370 nm เพราะมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืน และเกิดปรากฏการณ์โพโตอะคูสติค
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติคจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ความถี่ของตัวตัดแสงตั้งแต่ 13 - 40 Hz โดยเพิ่มครั้งละ 1 Hz
5. เปลี่ยนจากซิงค์ออกไซด์เป็นซิลเวอร์โตนโซลซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล โดยปรับความถี่ของตัวตัดแสงตั้งแต่ 13 - 40 Hz, 13 - 40 Hz และ 12 - 40 Hz ตามลำดับ
6. นำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติคของตัวตัดแสง แล้วพิจารณาค่า Characteristic frequency ( $f_c$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาการกระจายทางความร้อนของแต่ละตัวอย่าง

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad \alpha = l^2 f_c$$

เมื่อ  $l$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง ที่วัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, $E_g$ ) ของซิงค์ออกไซด์

ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 nm - 750 nm โดยเพิ่มครั้งละ 2 nm แสงจะถูกตัดโดยตัวตัดแสงที่ความถี่ต่างกัน คือ คาร์บอนแบล็ค ตัวตัดแสงจะทำงานที่ความถี่ 27 Hz และซิงค์ออกไซด์ ตัวตัดแสงจะทำงานที่ความถี่ 12 Hz โดยความถี่เหล่านี้ พิจารณาจากความถี่ของตัวตัดแสงที่ทำให้สารทดสอบมีแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกสูงสุด ซึ่งจะเป็ความถี่ของตัวตัดแสงที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายความร้อนภายในเนื้อสารได้ดี

##### 4.1.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก

###### 4.1.1.1 คาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ สามารถดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น และสามารถปลดปล่อยแสงที่ดูดกลืนออกมาได้ทั้งหมด ด้วยเหตุนี้ จึงนำคาร์บอนแบล็คมาเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดในระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี เพื่อนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการนอร์มัลไลซ์ต่อไป

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
340	12.68
342	13.00
344	13.23
346	13.37
348	13.57
350	13.93
352	14.20
354	14.72
356	14.95
358	15.31
360	15.42
362	15.85
364	16.11
366	16.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
370	16.56
372	16.80
374	17.06
376	17.33
378	17.52
380	17.67
382	17.83
384	17.92
386	18.11
388	18.50
390	18.55
392	18.78
394	18.83
396	19.02
398	19.15
400	19.33
402	19.35
404	19.55
406	19.68
408	19.96
410	20.02
412	20.17
414	20.53
416	20.61
418	20.73
420	20.82
422	20.90
424	20.80
426	20.76
428	20.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
430	20.53
432	20.15
434	19.72
436	19.27
438	18.91
440	18.87
442	18.83
444	18.73
446	18.93
448	18.86
450	18.77
452	18.78
454	18.80
456	18.77
458	18.83
460	18.80
462	18.91
464	18.98
466	19.12
468	19.17
470	19.42
472	20.11
474	20.26
476	20.51
478	20.86
480	21.22
482	21.76
484	22.13
486	22.41
488	22.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
490	22.57
492	22.65
494	22.70
496	22.76
498	22.57
500	22.42
502	21.67
504	21.17
506	20.10
508	19.55
510	19.36
512	19.18
514	19.15
516	19.17
518	19.06
520	19.03
522	18.77
524	18.66
526	18.40
528	18.05
530	17.66
532	17.31
534	16.96
536	16.77
538	16.52
540	16.37
542	16.08
544	15.96
546	15.82
548	15.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu V$ )
550	15.47
552	15.30
554	15.10
556	14.95
558	14.78
560	14.66
562	14.31
564	14.32
566	14.16
568	14.03
570	13.86
572	13.70
574	13.60
576	13.47
578	13.22
580	13.10
582	12.93
584	12.85
586	12.66
588	12.57
590	12.41
592	12.31
594	12.18
596	12.03
598	12.01
600	11.80
602	11.72
604	11.67
606	11.52
608	11.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
610	11.27
612	11.17
614	11.00
616	10.81
618	10.56
620	10.42
622	10.22
624	9.91
626	9.82
628	9.95
630	9.87
632	9.82
634	9.82
636	9.77
638	9.67
640	9.40
642	9.30
644	9.26
646	9.12
648	9.05
650	8.81
652	8.67
654	8.32
656	8.05
658	7.76
660	7.53
662	7.17
664	6.86
666	6.57
668	6.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

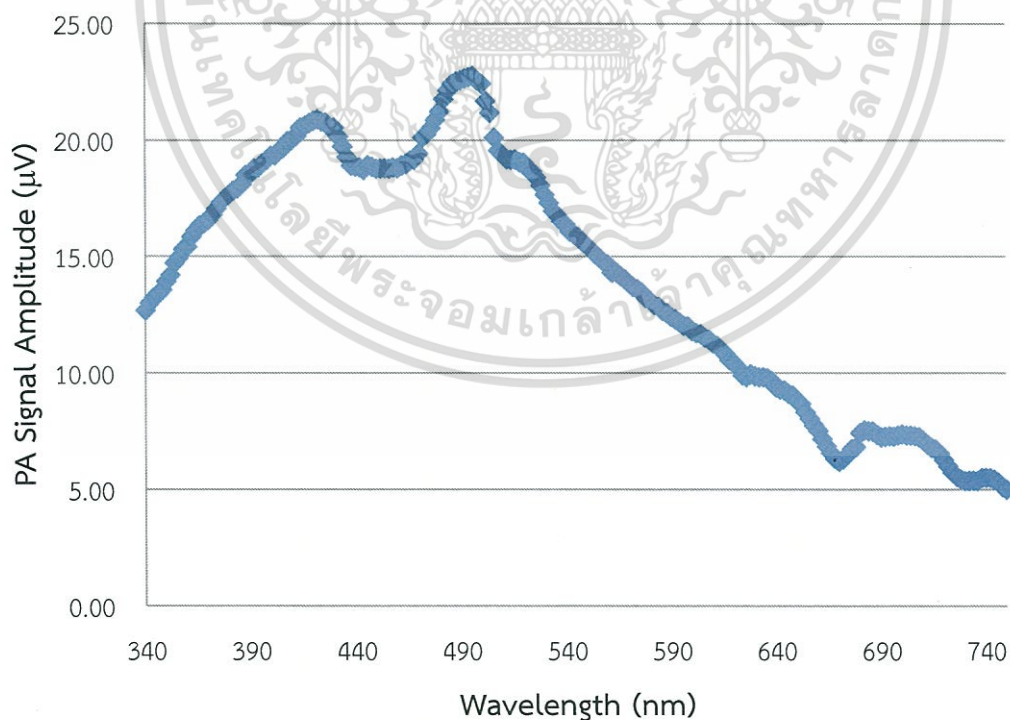
$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
670	6.20
672	6.31
674	6.50
676	6.75
678	6.83
680	7.43
682	7.55
684	7.51
686	7.50
688	7.36
690	7.25
692	7.27
694	7.30
696	7.28
698	7.33
700	7.38
702	7.33
704	7.32
706	7.30
708	7.25
710	7.11
712	6.95
714	6.81
716	6.73
718	6.55
720	6.27
722	6.00
724	5.73
726	5.57
728	5.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
730	5.37
732	5.38
734	5.39
736	5.37
738	5.50
740	5.51
742	5.51
744	5.43
746	5.33
748	5.13
750	5.01

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง (nm) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2 ซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
340	2.81
342	2.87
344	2.91
346	2.95
348	3.06
350	3.07
352	3.12
354	3.18
356	3.20
358	3.25
360	3.37
362	3.31
364	3.26
366	3.38
368	3.46
370	3.52
372	3.47
374	3.51
376	3.46
378	3.57
380	3.56
382	3.62
384	3.70
386	3.75
388	3.76
390	3.77
392	3.80
394	3.88
396	3.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
398	3.86
400	3.90
402	3.96
404	3.75
406	3.63
408	3.57
410	3.53
412	3.52
414	3.41
416	3.28
418	3.22
420	3.13
422	2.91
424	2.90
426	2.78
428	2.77
430	2.60
432	2.51
434	2.38
436	2.31
438	2.15
440	2.13
442	2.10
444	1.90
446	1.85
448	1.91
450	1.90
452	1.85
454	1.82
456	1.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu V$ )
458	1.78
460	1.87
462	1.76
464	1.72
466	1.76
468	1.78
470	1.72
472	1.81
474	1.87
476	1.78
478	1.88
480	1.87
482	2.02
484	1.98
486	1.97
488	2.07
490	1.96
492	1.97
494	2.16
496	2.15
498	1.93
500	1.81
502	1.76
504	1.72
506	1.68
508	1.66
510	1.61
512	1.37
514	1.15
516	1.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )
518	1.62
520	1.52
522	1.53
524	1.53
526	1.51
528	1.39
530	1.37
532	1.25
534	1.18
536	1.20
538	1.06
540	1.10
542	1.22
544	1.18
546	1.02
548	1.17
550	0.82
552	0.88
554	0.96
556	1.12
558	1.02
560	0.97
562	1.06
564	1.12
566	1.02
568	1.03
570	0.92
572	0.95
574	0.96
576	0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu V$ )
578	0.81
580	0.88
582	0.83
584	0.78
586	0.77
588	0.72
590	0.78
592	0.75
594	0.77
596	0.68
598	0.70
600	0.71
602	0.65
604	0.62
606	0.58
608	0.63
610	0.57
612	0.58
614	0.58
616	0.56
618	0.52
620	0.47
622	0.56
624	0.52
626	0.46
628	0.43
630	0.51
632	0.45
634	0.40
636	0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu V$ )
638	0.43
640	0.46
642	0.43
644	0.45
646	0.46
648	0.51
650	0.60
652	0.31
654	0.28
656	0.26
658	0.20
660	0.16
662	0.25
664	0.32
666	0.18
668	0.16
670	0.21
672	0.28
674	0.26
676	0.22
678	0.28
680	0.31
682	0.37
684	0.22
686	0.28
688	0.43
690	0.37
692	0.32
694	0.31
696	0.25

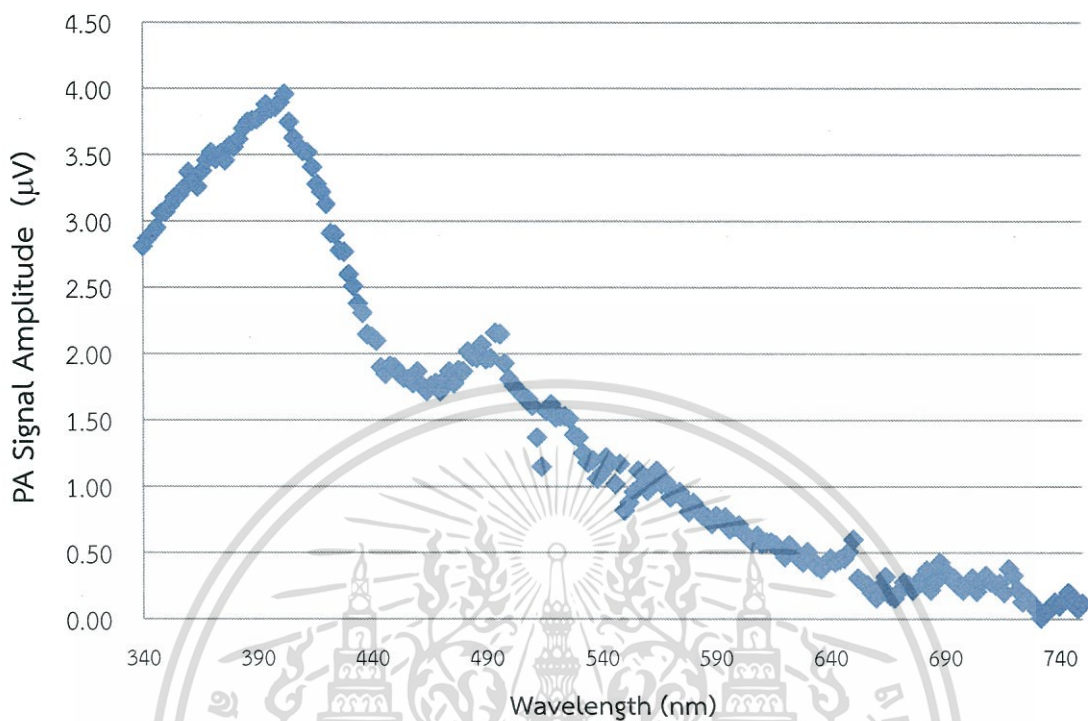
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Photoacoustic Signal ( $\mu V$ )
698	0.22
700	0.26
702	0.31
704	0.21
706	0.28
708	0.33
710	0.28
712	0.26
714	0.27
716	0.20
718	0.38
720	0.33
722	0.22
724	0.13
726	0.16
728	0.12
730	0.07
732	0.01
734	0.06
736	0.08
738	0.13
740	0.10
742	0.15
744	0.20
746	0.16
748	0.08
750	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง (nm) และแอมพลิจูดสัญญาณ  
โฟโตอะคูสติก จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็กและซิงค์ออกไซด์ที่อินอร์มัลไลซ์แล้ว

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu$ V)	zinc oxide PA Signal ( $\mu$ V)	Normalized PA Signal
340	12.68	2.81	0.2216
342	13.00	2.87	0.2208
344	13.23	2.91	0.2200
346	13.37	2.95	0.2206
348	13.57	3.06	0.2255
350	13.93	3.07	0.2204
352	14.20	3.12	0.2197
354	14.72	3.18	0.2160
356	14.95	3.20	0.2140
358	15.31	3.25	0.2123
360	15.42	3.37	0.2185
362	15.85	3.31	0.2088
364	16.11	3.26	0.2024
366	16.33	3.38	0.2070
368	16.43	3.46	0.2106
370	16.56	3.52	0.2126
372	16.80	3.47	0.2065
374	17.06	3.51	0.2057
376	17.33	3.46	0.1997
378	17.52	3.57	0.2038
380	17.67	3.56	0.2015
382	17.83	3.62	0.2030
384	17.92	3.70	0.2065
386	18.11	3.75	0.2071
388	18.50	3.76	0.2032
390	18.55	3.77	0.2032
392	18.78	3.80	0.2023
394	18.83	3.88	0.2061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็กและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
396	19.02	3.85	0.2024
398	19.15	3.86	0.2016
400	19.33	3.90	0.2018
402	19.35	3.96	0.2047
404	19.55	3.75	0.1918
406	19.68	3.63	0.1845
408	19.96	3.57	0.1789
410	20.02	3.53	0.1763
412	20.17	3.52	0.1745
414	20.53	3.41	0.1661
416	20.61	3.28	0.1591
418	20.73	3.22	0.1553
420	20.82	3.13	0.1503
422	20.90	2.91	0.1392
424	20.80	2.90	0.1394
426	20.76	2.78	0.1339
428	20.55	2.77	0.1348
430	20.53	2.60	0.1266
432	20.15	2.51	0.1246
434	19.72	2.38	0.1207
436	19.27	2.31	0.1199
438	18.91	2.15	0.1137
440	18.87	2.13	0.1129
442	18.83	2.10	0.1115
444	18.73	1.90	0.1014
446	18.93	1.85	0.0977
448	18.86	1.91	0.1013
450	18.77	1.90	0.1012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
452	18.78	1.85	0.0985
454	18.80	1.82	0.0968
456	18.77	1.81	0.0964
458	18.83	1.78	0.0945
460	18.80	1.87	0.0995
462	18.91	1.76	0.0931
464	18.98	1.72	0.0906
466	19.12	1.76	0.0921
468	19.17	1.78	0.0929
470	19.42	1.72	0.0886
472	20.11	1.81	0.0900
474	20.26	1.87	0.0923
476	20.51	1.78	0.0868
478	20.86	1.88	0.0901
480	21.22	1.87	0.0881
482	21.76	2.02	0.0928
484	22.13	1.98	0.0895
486	22.41	1.97	0.0879
488	22.52	2.07	0.0919
490	22.57	1.96	0.0868
492	22.65	1.97	0.0870
494	22.70	2.16	0.0952
496	22.76	2.15	0.0945
498	22.57	1.93	0.0855
500	22.42	1.81	0.0807
502	21.67	1.76	0.0812
504	21.17	1.72	0.0812
506	20.10	1.68	0.0836

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu$ V)	zinc oxide PA Signal ( $\mu$ V)	Normalized PA Signal
508	19.55	1.66	0.0849
510	19.36	1.61	0.0832
512	19.18	1.37	0.0714
514	19.15	1.15	0.0601
516	19.17	1.57	0.0819
518	19.06	1.62	0.0850
520	19.03	1.52	0.0799
522	18.77	1.53	0.0815
524	18.66	1.53	0.0820
526	18.40	1.51	0.0821
528	18.05	1.39	0.0770
530	17.66	1.37	0.0776
532	17.31	1.25	0.0722
534	16.96	1.18	0.0696
536	16.77	1.20	0.0716
538	16.52	1.06	0.0642
540	16.37	1.10	0.0672
542	16.08	1.22	0.0759
544	15.96	1.18	0.0739
546	15.82	1.02	0.0645
548	15.62	1.17	0.0749
550	15.47	0.82	0.0530
552	15.30	0.88	0.0575
554	15.10	0.96	0.0636
556	14.95	1.12	0.0749
558	14.78	1.02	0.0690
560	14.66	0.97	0.0662
562	14.31	1.06	0.0741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็กและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
564	14.32	1.12	0.0782
566	14.16	1.02	0.0720
568	14.03	1.03	0.0734
570	13.86	0.92	0.0664
572	13.70	0.95	0.0693
574	13.60	0.96	0.0706
576	13.47	0.90	0.0668
578	13.22	0.81	0.0613
580	13.10	0.88	0.0672
582	12.93	0.83	0.0642
584	12.85	0.78	0.0607
586	12.66	0.77	0.0608
588	12.57	0.72	0.0573
590	12.41	0.78	0.0629
592	12.31	0.75	0.0609
594	12.18	0.77	0.0632
596	12.03	0.68	0.0565
598	12.01	0.70	0.0583
600	11.80	0.71	0.0602
602	11.72	0.65	0.0555
604	11.67	0.62	0.0531
606	11.52	0.58	0.0503
608	11.43	0.63	0.0551
610	11.27	0.57	0.0506
612	11.17	0.58	0.0519
614	11.00	0.58	0.0527
616	10.81	0.56	0.0518
618	10.56	0.52	0.0492

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
620	10.42	0.47	0.0451
622	10.22	0.56	0.0548
624	9.91	0.52	0.0525
626	9.82	0.46	0.0468
628	9.95	0.43	0.0432
630	9.87	0.51	0.0517
632	9.82	0.45	0.0458
634	9.82	0.40	0.0407
636	9.77	0.38	0.0389
638	9.67	0.43	0.0445
640	9.40	0.46	0.0489
642	9.30	0.43	0.0462
644	9.26	0.45	0.0486
646	9.12	0.46	0.0504
648	9.05	0.51	0.0564
650	8.81	0.60	0.0681
652	8.67	0.31	0.0358
654	8.32	0.28	0.0337
656	8.05	0.26	0.0323
658	7.76	0.20	0.0258
660	7.53	0.16	0.0212
662	7.17	0.25	0.0349
664	6.86	0.32	0.0466
666	6.57	0.18	0.0274
668	6.32	0.16	0.0253
670	6.20	0.21	0.0339
672	6.31	0.28	0.0444
674	6.50	0.26	0.0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็กและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

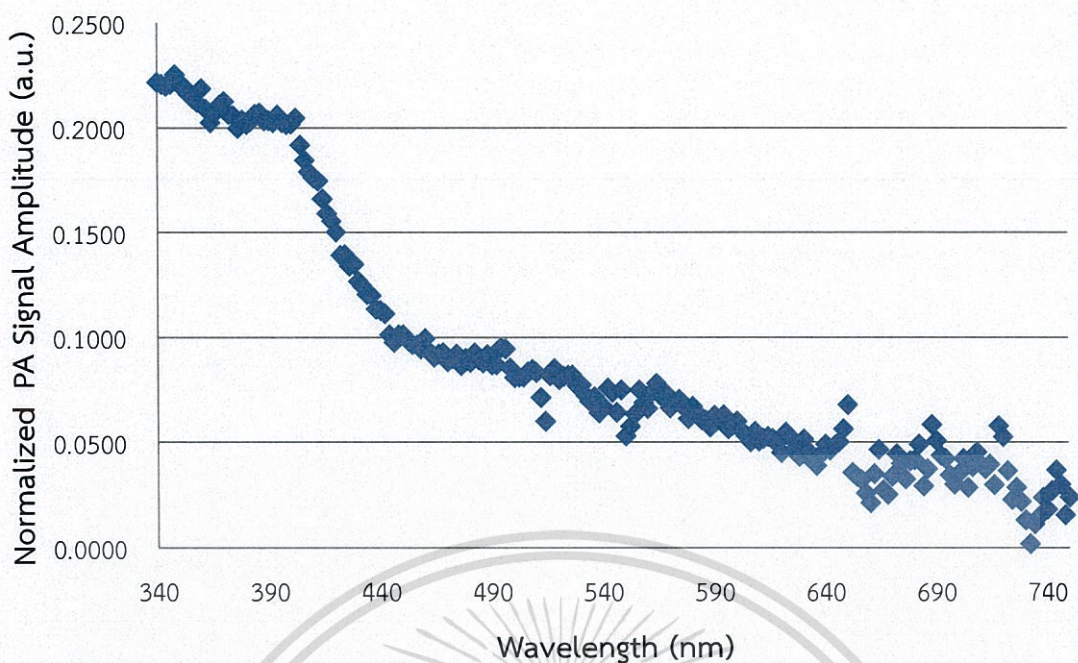
$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
676	6.75	0.22	0.0326
678	6.83	0.28	0.0410
680	7.43	0.31	0.0417
682	7.55	0.37	0.0490
684	7.51	0.22	0.0293
686	7.50	0.28	0.0373
688	7.36	0.43	0.0584
690	7.25	0.37	0.0510
692	7.27	0.32	0.0440
694	7.30	0.31	0.0425
696	7.28	0.25	0.0343
698	7.33	0.22	0.0300
700	7.38	0.26	0.0352
702	7.33	0.31	0.0423
704	7.32	0.21	0.0287
706	7.30	0.28	0.0384
708	7.25	0.33	0.0455
710	7.11	0.28	0.0394
712	6.95	0.26	0.0374
714	6.81	0.27	0.0396
716	6.73	0.20	0.0297
718	6.55	0.38	0.0580
720	6.27	0.33	0.0526
722	6.00	0.22	0.0367
724	5.73	0.13	0.0227
726	5.57	0.16	0.0287
728	5.45	0.12	0.0220
730	5.37	0.07	0.0130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

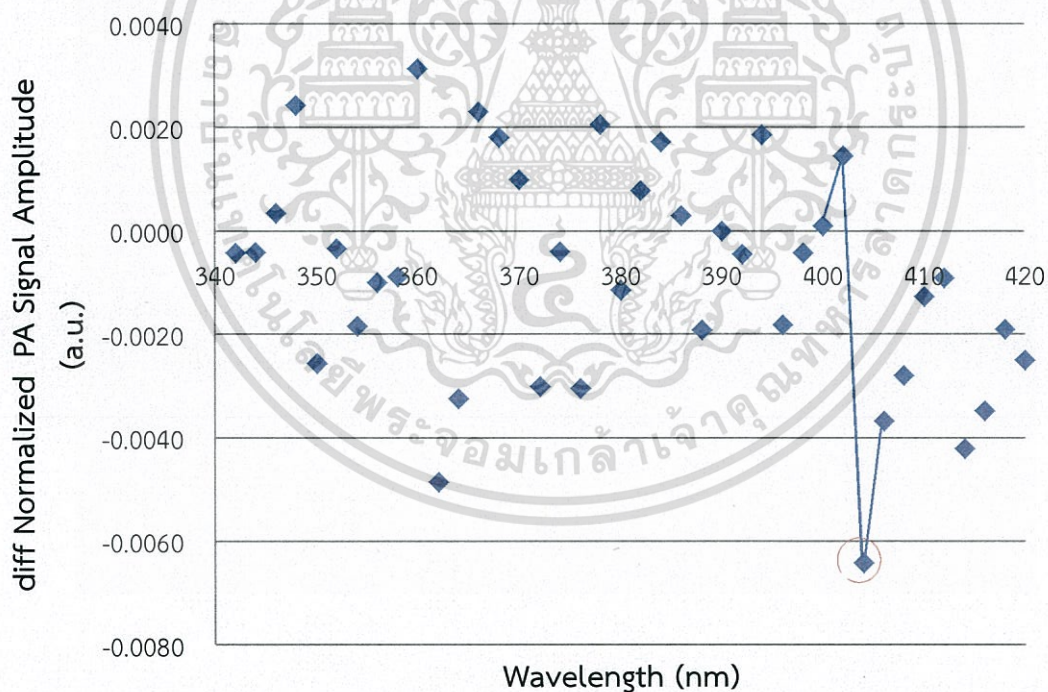
ตารางที่ 4.3 แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว  
(ต่อ)

$\lambda$ (nm)	Carbon black PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	zinc oxide PA Signal ( $\mu\text{V}$ )	Normalized PA Signal
732	5.38	0.01	0.0019
734	5.39	0.06	0.0111
736	5.37	0.08	0.0149
738	5.50	0.13	0.0236
740	5.51	0.10	0.0181
742	5.51	0.15	0.0272
744	5.43	0.20	0.0368
746	5.33	0.16	0.0300
748	5.13	0.08	0.0156
750	5.01	0.12	0.0240

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง (nm) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่นอร์มัลไลซ์กับคาร์บอนแบล็คแล้ว จะได้ดังรูปที่ 4.3 และเมื่อทำการ differentiate แกน y เทียบกับแกน x ( $dy/dx$ ) และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสง (nm) และ  $dy/dx$  จะได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสง (nm) และ diff ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่นอร์มัลไลซ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำรูปที่ 4.3 และ 4.4 มาพิจารณาร่วมกัน ดังนี้

จากรูปที่ 4.3 พบว่า แสงที่ซิงค์ออกไซด์เริ่มไม่ดูดกลืน คือ แสงความยาวคลื่น 404 nm (แต่ยังดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 402 nm) และจากรูปที่ 4.4 พบว่า แสงความยาวคลื่น 402 nm และ 404 nm มีการเปลี่ยนแปลงความชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (จุดบนกราฟแทนความชันของกราฟในรูปที่ 4.3 ในแต่ละช่วง) คือ ที่ความยาวคลื่นแสง 404 nm ความชันมีค่าติดลบสูง แสดงว่า กราฟแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติคมีการเปลี่ยนแปลงแบบลดลง นั่นคือ ช่วงที่ซิงค์ออกไซด์เริ่มไม่ดูดกลืนแสงแล้วนั่นเอง จึงสรุปได้ว่า แสงที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด (พลังงานน้อยสุด) ที่ซิงค์ออกไซด์ดูดกลืน คือ แสงที่มีความยาวคลื่น 402 nm นำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ ดังนี้

จากความสัมพันธ์

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

จะได้

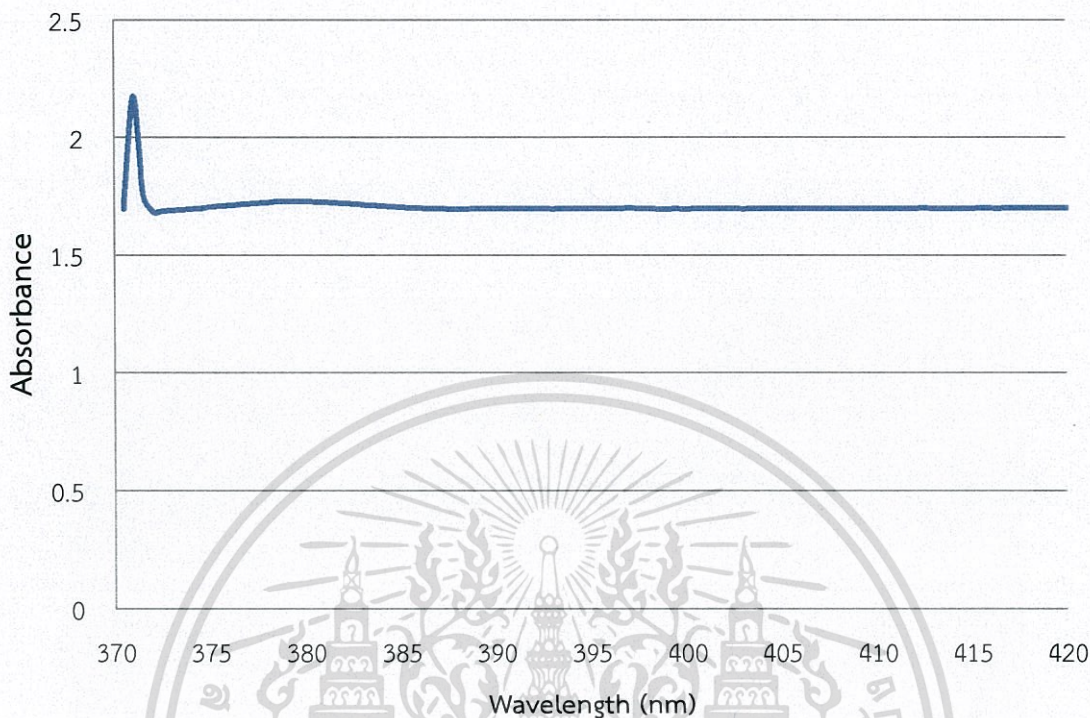
$$E(eV) = \frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(402 \times 10^{-9}) \times (1.6 \times 10^{-19})}$$

$$E(eV) = 3.09 \text{ eV}$$

ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.09 eV

#### 4.1.2 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-Visible

นำผงซิงค์ออกไซด์ไปวัดค่าการดูดกลืน (absorbance) ด้วยเทคนิค UV-Visible จะได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสง (nm) และค่าการดูดกลืนแสง

จากรูป จะเห็นว่า ซิงค์ออกไซด์ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 371 nm นำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ ดังนี้

จากความสัมพันธ์ 
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

จะได้ 
$$E(eV) = \frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(371 \times 10^{-9}) \times (1.6 \times 10^{-19})}$$

$$E(eV) = 3.35 eV$$

ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.35 eV

## 4.2 การหาค่าการกระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity , $\alpha$ ) ของซิลเวอร์ ไดโปกิ้งค์ออกไซด์

ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดของสัญญาณโฟโตอะคูสติกจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ความยาวคลื่น 370 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน เพื่อให้สารทดสอบเกิดการดูดกลืน เกิดปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อนนั่นเอง แสงจะถูกตัดด้วยตัวตัดแสงที่มีความถี่แตกต่างกัน คือ ซิงค์ออกไซด์ ซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล ตัวตัดแสงจะทำงานด้วยความถี่ในช่วง 13-40 Hz, 13-40 Hz, 13-40 Hz และ 12-40 Hz โดยเพิ่มครั้งละ 1 Hz

### 4.2.1 ซิงค์ออกไซด์ ความหนา 0.70 mm

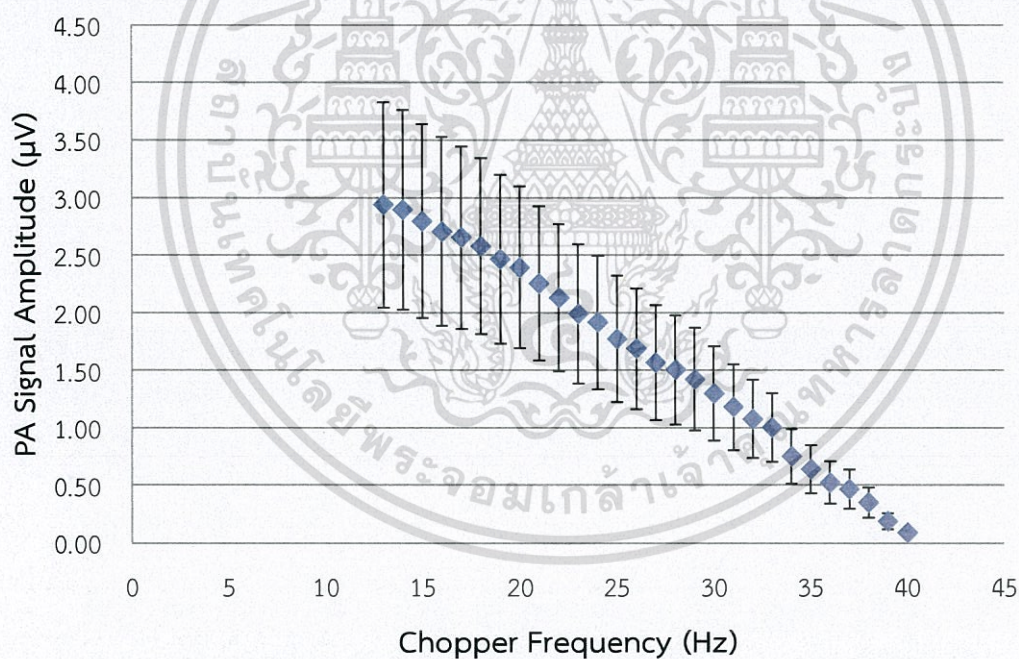
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์

f (Hz)	Photoacoustic Signal ( $\mu$ V)			
	1st	2nd	3rd	Average
13	2.90	2.76	3.15	2.9367
14	2.87	2.68	3.13	2.8933
15	2.85	2.63	2.91	2.7967
16	2.68	2.56	2.88	2.7067
17	2.63	2.52	2.81	2.6533
18	2.58	2.47	2.68	2.5767
19	2.51	2.38	2.51	2.4667
20	2.46	2.27	2.45	2.3933
21	2.32	2.12	2.32	2.2533
22	2.25	1.93	2.21	2.1300
23	2.12	1.88	1.97	1.9900
24	2.01	1.83	1.91	1.9167
25	1.90	1.72	1.70	1.7733
26	1.85	1.63	1.58	1.6867
27	1.72	1.53	1.45	1.5667
28	1.66	1.47	1.38	1.5033
29	1.56	1.45	1.26	1.4233
30	1.43	1.25	1.21	1.2967
31	1.28	1.18	1.08	1.1800
32	1.20	1.07	0.96	1.0767
33	1.16	1.03	0.81	1.0000

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ)

f (Hz)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )			
	1st	2nd	3rd	Average
34	0.87	0.95	0.43	0.7500
35	0.83	0.77	0.32	0.6400
36	0.71	0.65	0.21	0.5233
37	0.68	0.57	0.15	0.4667
38	0.57	0.5	-0.03	0.3467
39	0.33	0.31	-0.08	0.1867
40	0.18	0.20	-0.12	0.0867

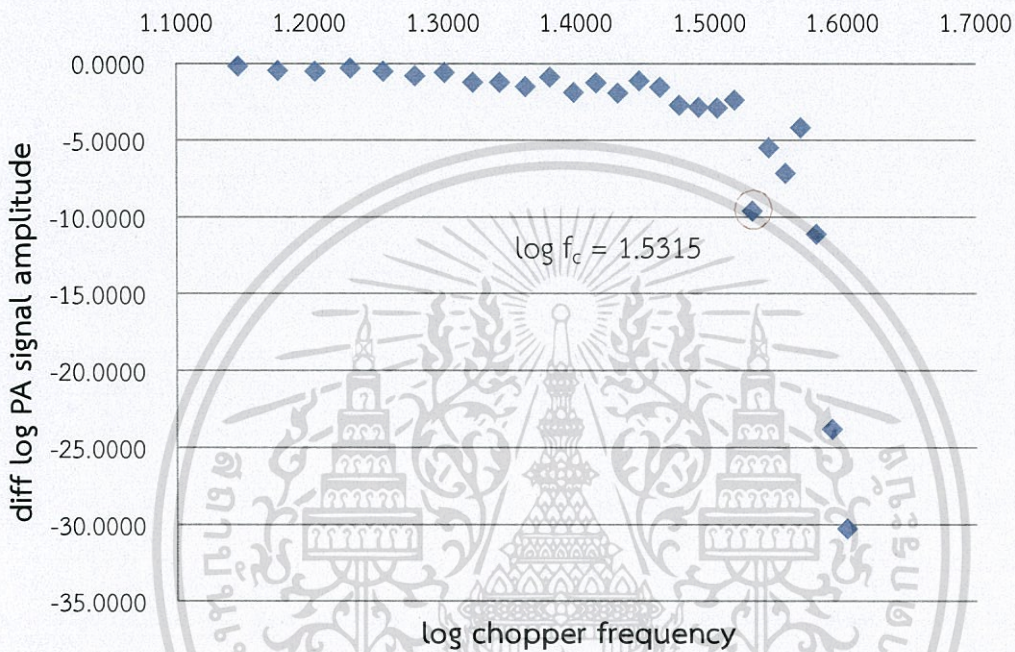
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ยของซิงค์ออกไซด์ ( $\mu\text{V}$ ) ความหนา 0.70 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการใส่  $\log$  ทั้งสองแกน และ differentiate แกน  $y$  เทียบกับแกน  $x$  ( $dy/dx$ ) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟอย่างชัดเจน จากนั้น สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสงและ  $dy/dx$  ( $\text{diff log PA signal amplitude}$ ) นำกราฟที่ได้มาหาค่า Characteristic Frequency ( $f_c$ ) เพื่อนำไปหาค่าการกระจายทางความร้อนต่อไป (จุดบนกราฟแทนความชันของกราฟ  $\log$  แอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกในแต่ละช่วง ดังนั้น ให้ทำการเลือกจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่สุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ความถี่ของตัวตัดแสงที่เคยทำให้คลื่นความร้อนแพร่กระจายในวัตถุได้ลึก (PA signal amplitude สูง) เปลี่ยนมาแพร่กระจายได้ไม่ลึก (PA signal amplitude ต่ำ) นั่นเอง)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสง และ  $\text{diff log}$  ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์ ความหนา 0.70 mm

จากค่า Characteristic Frequency จะทำให้สามารถหาค่าการกระจายทางความร้อนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha &= l^2 \times f_c \\ &= (0.70)^2 \times 34 \\ &= 16.66 \text{ mm}^2/\text{s}\end{aligned}$$

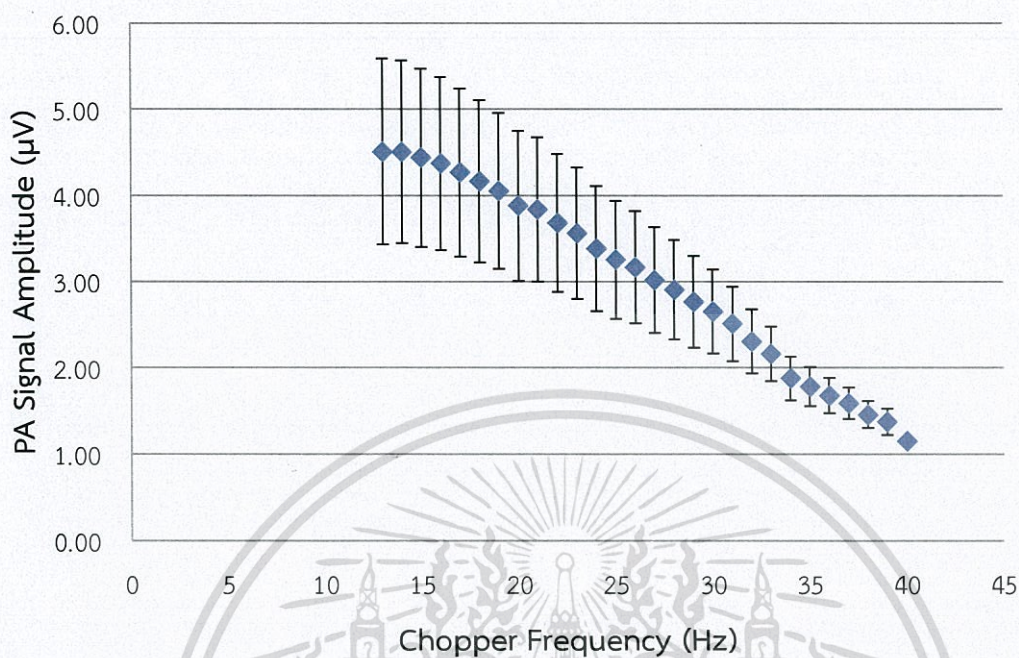
#### 4.2.2 ซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%

f (Hz)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )			
	1st	2nd	3rd	Average
13	4.70	4.38	4.45	4.5100
14	4.70	4.43	4.40	4.5100
15	4.60	4.36	4.35	4.4367
16	4.50	4.32	4.29	4.3700
17	4.40	4.20	4.20	4.2667
18	4.30	4.17	4.02	4.1633
19	4.10	4.12	3.94	4.0533
20	4.00	3.87	3.77	3.8800
21	3.90	3.85	3.76	3.8367
22	3.80	3.72	3.53	3.6833
23	3.60	3.58	3.51	3.5633
24	3.50	3.41	3.24	3.3833
25	3.40	3.15	3.21	3.2533
26	3.30	3.13	3.07	3.1667
27	3.20	2.97	2.89	3.0200
28	3.10	2.86	2.76	2.9067
29	3.00	2.60	2.70	2.7667
30	2.90	2.53	2.53	2.6533
31	2.80	2.27	2.46	2.5100
32	2.60	2.08	2.24	2.3067
33	2.50	1.87	2.12	2.1633
34	2.00	1.83	1.80	1.8767
35	1.90	1.76	1.69	1.7833
36	1.80	1.58	1.66	1.6800
37	1.70	1.46	1.60	1.5867
38	1.60	1.37	1.40	1.4567
39	1.50	1.26	1.36	1.3733
40	1.30	1.15	1.01	1.1533

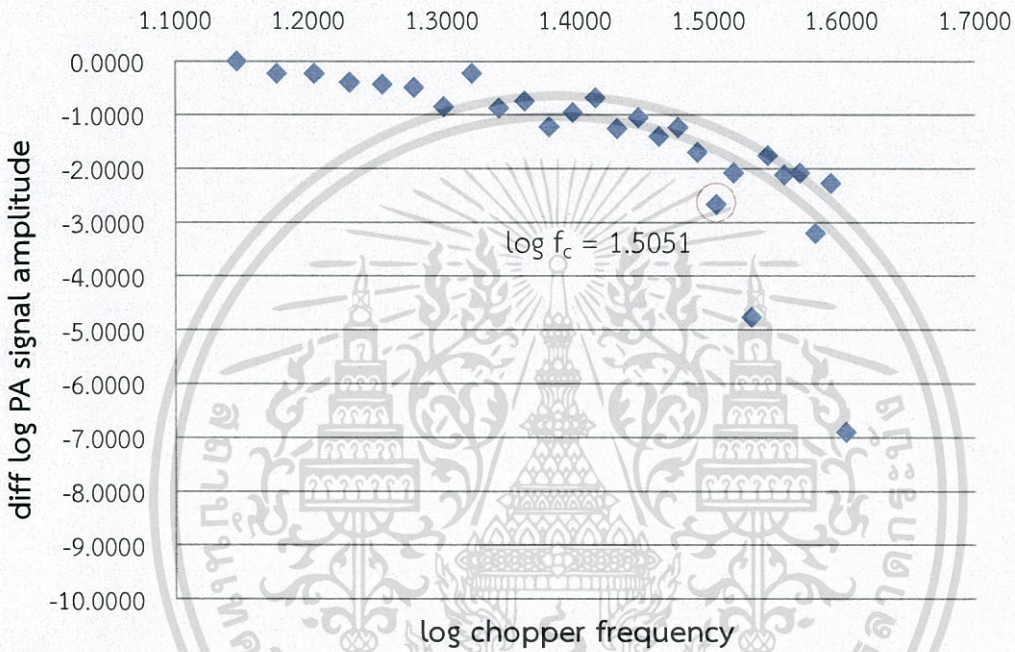
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ยของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ ( $\mu\text{V}$ ) เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm

ทำการใส่ log ทั้งสองแกน และ differentiate แกน y เทียบกับแกน x ( $dy/dx$ ) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟอย่างชัดเจน จากนั้น สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความถี่ตัวตัดแสงและ  $dy/dx$  (diff log PA signal amplitude) นำกราฟที่ได้มาหาค่า Characteristic Frequency ( $f_c$ ) เพื่อนำไปหาค่าการกระจายทางความร้อนต่อไป (จุดบนกราฟแทนความชันของกราฟ log แอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกในแต่ละช่วง ดังนั้นให้ทำการเลือกจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่สุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ความถี่ของตัวตัดแสงที่เคยทำให้คลื่นความร้อนแพร่กระจายในวัตถุได้ลึก (PA signal amplitude สูง) เปลี่ยนมาแพร่กระจายได้ไม่ลึก (PA signal amplitude ต่ำ) นั่นเอง)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความถี่ตัวตัดแสง และ diff log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3% ความหนา 0.52 mm

จากค่า Characteristic Frequency จะทำให้สามารถหาค่าการกระจายทางความร้อนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha &= l^2 \times f_c \\ &= (0.52)^2 \times 32 \\ &= 8.65 \text{ mm}^2/\text{s}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

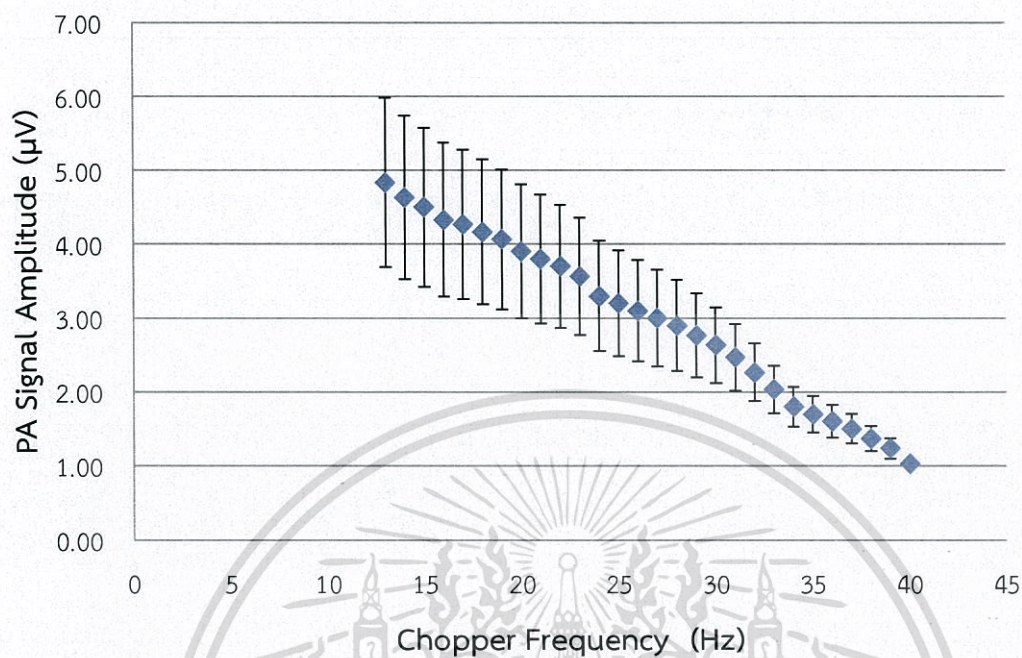
#### 4.2.3 ซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5%

f (Hz)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )			
	1st	2nd	3rd	Average
13	5.2	4.6	4.7	4.8333
14	4.8	4.5	4.6	4.6333
15	4.7	4.4	4.4	4.5000
16	4.4	4.3	4.3	4.3333
17	4.4	4.2	4.2	4.2667
18	4.3	4.1	4.1	4.1667
19	4.2	4.0	4.0	4.0667
20	4.0	3.8	3.9	3.9000
21	3.9	3.7	3.8	3.8000
22	3.8	3.6	3.7	3.7000
23	3.7	3.5	3.5	3.5667
24	3.4	3.2	3.3	3.3000
25	3.3	3.1	3.2	3.2000
26	3.2	3.0	3.1	3.1000
27	3.1	2.9	3.0	3.0000
28	3.0	2.8	2.9	2.9000
29	2.8	2.7	2.8	2.7667
30	2.6	2.6	2.7	2.6333
31	2.4	2.5	2.5	2.4667
32	2.3	2.2	2.3	2.2667
33	2.1	2.0	2.0	2.0333
34	1.8	1.7	1.9	1.8000
35	1.7	1.6	1.8	1.7000
36	1.6	1.5	1.7	1.6000
37	1.5	1.4	1.6	1.5000
38	1.4	1.3	1.4	1.3667
39	1.2	1.2	1.3	1.2333
40	1.0	1.1	1.0	1.0333

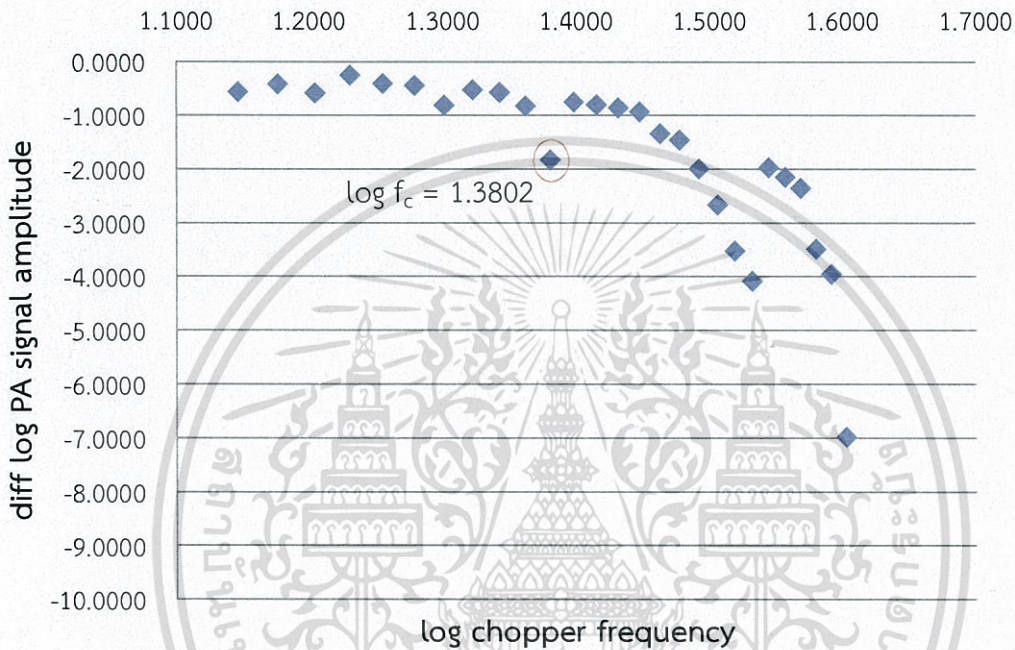
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm

ทำการใส่  $\log$  ทั้งสองแกน และ differentiate แกน  $y$  เทียบกับแกน  $x$  ( $dy/dx$ ) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟอย่างชัดเจน จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสงและ  $dy/dx$  (diff log PA signal amplitude) นำกราฟที่ได้มาหาค่า Characteristic Frequency ( $f_c$ ) เพื่อนำไปหาค่าการกระจายทางความร้อนต่อไป (จุดบนกราฟแทนความชันของกราฟ  $\log$  แอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกในแต่ละช่วง ดังนั้นให้ทำการเลือกจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่สุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ความถี่ของตัวตัดแสงที่เคยทำให้คลื่นความร้อนแพร่กระจายในวัสดุได้ลึก (PA signal amplitude สูง) เปลี่ยนมาแพร่กระจายได้ไม่ลึก (PA signal amplitude ต่ำ) นั่นเอง)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสง และ diff log ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 5% ความหนา 0.46 mm

จากค่า Characteristic Frequency จะทำให้สามารถหาค่าการกระจายทางความร้อนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha &= l^2 \times f_c \\ &= (0.46)^2 \times 24 \\ &= 5.08 \text{ mm}^2/\text{s}\end{aligned}$$

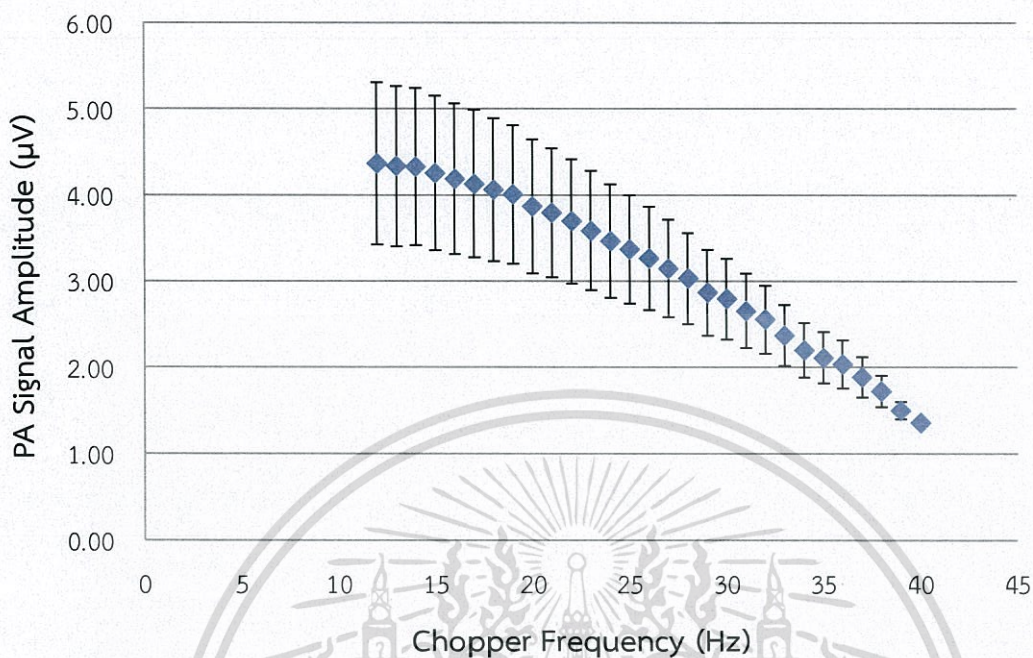
#### 4.2.4 ซิลเวอร์ไดโปกิ่งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7% ความหนา 0.52 mm

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความถี่ของตัวตัดแสงค่าต่างๆ ของซิลเวอร์ไดโปกิ่งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7%

f (Hz)	Photoacoustic Signal ( $\mu\text{V}$ )			
	1st	2nd	3rd	Average
12	4.37	4.35	4.38	4.3667
13	4.33	4.26	4.41	4.3333
14	4.30	4.24	4.44	4.3267
15	4.26	4.19	4.31	4.2533
16	4.17	4.18	4.21	4.1867
17	4.11	4.11	4.17	4.1300
18	4.05	4.08	4.06	4.0633
19	3.97	4.05	4.00	4.0067
20	3.83	3.89	3.88	3.8667
21	3.76	3.82	3.80	3.7933
22	3.65	3.71	3.72	3.6933
23	3.52	3.69	3.55	3.5867
24	3.43	3.55	3.41	3.4633
25	3.38	3.46	3.27	3.3700
26	3.25	3.33	3.21	3.2633
27	3.06	3.21	3.17	3.1467
28	2.95	3.14	3.00	3.0300
29	2.85	2.93	2.82	2.8667
30	2.77	2.89	2.72	2.7933
31	2.68	2.83	2.46	2.6567
32	2.56	2.72	2.38	2.5533
33	2.43	2.55	2.13	2.3700
34	2.16	2.36	2.08	2.2000
35	1.97	2.08	2.29	2.1133
36	1.75	2.26	2.10	2.0367
37	1.68	2.14	1.84	1.8867
38	1.62	1.86	1.69	1.7233
39	1.50	1.68	1.32	1.5000
40	1.46	1.39	1.22	1.3567

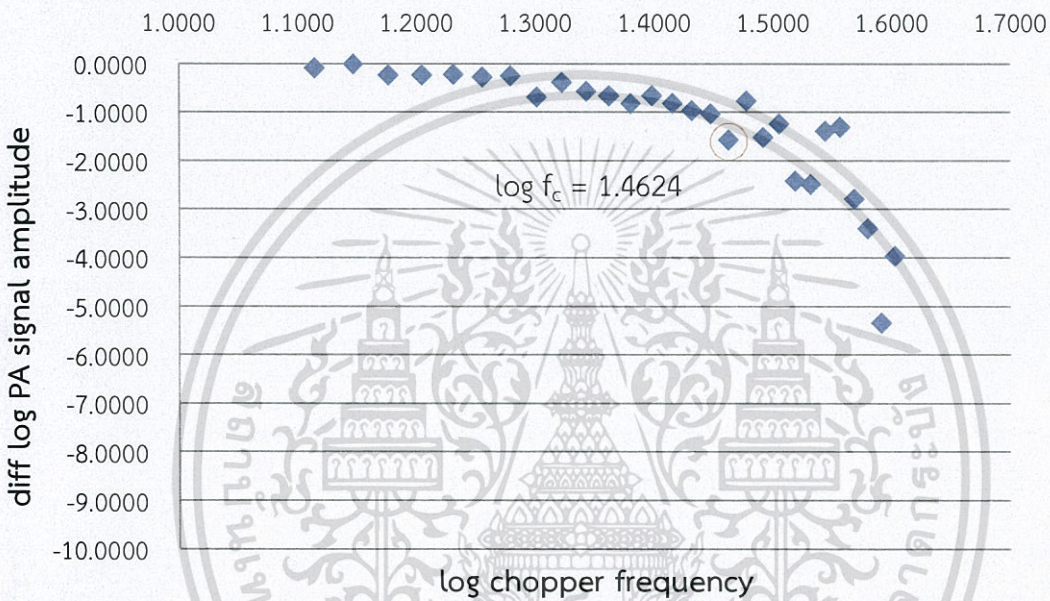
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกเฉลี่ย ( $\mu\text{V}$ ) ของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7% ความหนา 0.52 mm

ทำการใส่  $\log$  ทั้งสองแกน และ differentiate แกน  $y$  เทียบกับแกน  $x$  ( $dy/dx$ ) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟอย่างชัดเจน จากนั้น สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสงและ  $dy/dx$  (diff log PA signal amplitude) นำกราฟที่ได้มาหาค่า Characteristic Frequency ( $f_c$ ) เพื่อนำไปหาค่าการกระจายทางความร้อนต่อไป (จุดบนกราฟแทนความชันของกราฟ  $\log$  แอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกในแต่ละช่วง ดังนั้นให้ทำการเลือกจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่สุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ความถี่ของตัวตัดแสงที่เคยทำให้คลื่นความร้อนแพร่กระจายในวัตถุได้ลึก (PA signal amplitude สูง) เปลี่ยนมาแพร่กระจายได้ไม่ลึก (PA signal amplitude ต่ำ) นั่นเอง)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของความถี่ตัวตัดแสง และ  $\text{diff log}$  ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 7% ความหนา 0.52 mm

จากค่า Characteristic Frequency จะทำให้สามารถหาค่าการกระจายทางความร้อนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\alpha &= l^2 \times f_c \\ &= (0.52)^2 \times 29 \\ &= 7.84 \text{ mm}^2/\text{s}\end{aligned}$$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของตัวตัดแสง และ  $\text{diff log}$  ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ พบว่า จุดที่กราฟ  $\log$  ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่สุด คือ  $\log f = 1.5315$  หรือเท่ากับช่วงที่ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 34 Hz ในขณะที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log$  ของตัวตัดแสงและ  $\text{diff log}$  ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมลนั้น มีจุดที่กราฟ log ของแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนมากกว่า 1 จุด ได้แก่ จุดที่  $\log f = 1.5315$  (จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของซิงค์ออกไซด์) และอีกหนึ่งจุดคือจุดที่ได้รับผลกระทบจากการไดโพลซิลเวอร์นั่นเอง (จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 37-40 Hz ลักษณะการแพร่ของคลื่นความร้อนจะไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ Rosencwaig-Gersho)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาโครงการพิเศษเรื่อง การหาค่าการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์ โดปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 หาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เตรียมสารคาร์บอนแบล็คและซิงค์ออกไซด์ ให้แสงจากแหล่งกำเนิดที่ตกกระทบสารทดสอบ มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 – 750 nm เพิ่มขึ้นครั้งละ 2 nm โดยแสงถูกตัวตัดแสงตัดด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน นั่นคือ คาร์บอนแบล็ค ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz และซิงค์ออกไซด์ ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 13 Hz โดยความถี่เหล่านี้ เป็นความถี่ของตัวตัดแสงที่ทำให้เกิดแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกสูงที่สุดนั่นเอง เนื่องจากคุณสมบัติของคาร์บอนแบล็คที่สามารถดูดกลืนและปลดปล่อยแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงช่วงตามองเห็นได้ ดังนั้น สเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คจึงเป็นสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิงได้ จึงนำสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์มา normalize กับสเปกตรัมของคาร์บอนแบล็ค จะได้สเปกตรัมที่มีผลกระทบมาจากซิงค์ออกไซด์เท่านั้น พิจารณาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมโฟโตอะคูสติก ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสงและแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ normalize แล้ว และนำกราฟดังกล่าวมาทำการ differentiate เพื่อประกอบการพิจารณา พบว่า ซิงค์ออกไซด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.09 eV

นอกจากนี้ เมื่อนำซิงค์ออกไซด์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Visible พบว่าซิงค์ออกไซด์เกิดการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 371 nm นั่นคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.35 eV

ตอนที่ 2 หาค่าการกระจายทางความร้อน

ให้แสงที่ตกกระทบสารทดสอบมีความยาวคลื่น 370 nm คงที่ เนื่องจากเป็นแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืนและเกิดปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติกได้ โดยแสงจะถูกตัดด้วยตัวตัดแสงที่แตกต่างกัน คือ ซิงค์ออกไซด์ ตัวตัดแสงจะทำงานในช่วง 13-40 Hz ซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล ตัวตัดแสงจะทำงานในช่วง 13-40 Hz, 13-40 Hz และ 12-40 Hz ตามลำดับ

พิจารณาค่าการกระจายทางความร้อนจากสเปกตรัมโฟโตอะคูสติก ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสงและแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกด้วยวิธี differentiate พบว่า ซิงค์ออกไซด์มีค่าการกระจายทางความร้อนเท่ากับ  $16.66 \text{ mm}^2/\text{s}$  และซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล มีค่าการกระจายทางความร้อนเท่ากับ  $8.65 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $5.08 \text{ mm}^2/\text{s}$  และ  $7.84 \text{ mm}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ทั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงค์ออกไซด์มีความหนา 0.70 mm และซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์เมื่อซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3%, 5% และ 7% โดยโมล มีความหนา 0.52 mm, 0.46 mm และ 0.52 mm ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

นางสาวมนฤทัย กกฟ้า, นางสาวมูทิตา มาตยาขัน และนายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์. 2558. "THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF Cds USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE." สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิกิพีเดีย. 2558. **การนำความร้อน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%99%E0%B8%B3%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%99>.

DARRYL ALMOND, and PRAVIN PATEL. *Photothermal Science and Techniques*. London : CHAPMAN & HALL, 1996.

Kh. T. Igamberdiev, Sh. U. Yuldashev, S. S. Kurbanov, T. W. Kang, P. K. Khabibullaev, Sh. M. Rakhimova, V. O. Pelenovich, and A. G. Shashkov. 2010. "THERMAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR ZINC OXIDE NANOSTRUCTURES." *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 83(4) : 863-868.

T.A. El-Brolossy, O. Saber, and S.S. Ibrahim. 2013. "Determining the thermophysical properties of Al-doped ZnO nanoparticles by the photoacoustic technique." *Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd*. 22(7) : 074401-1-6.

Reza Zamiri, B.K. Singh, Dibakar Dutta, Avito Reblo, and J.M.F. Ferreira. 2013. "Electrical properties of Ag-doped ZnO nano-plates synthesized via wet chemical precipitation method." *CERAMICS INTERNATIONAL*. 40(2014) : 4471-4477.

Ruby Chauhan, Ashavani Kumar, and Ram Pal Chaudhary. 2010. "Synthesis and characterization of silver doped ZnO nanoparticles." *Archives of Applied Science Research*. 2(5) : 378-385.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การเตรียมสาร

### 1.1 การเตรียมสารละลาย $Ag_xZn_{(1-x)}O$ ด้วยวิธี %mol

ตัวอย่างการคำนวณ  $AgZnO$  3%mol

ต้องเตรียม 0.1M  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  และ 0.1M  $AgNO_3$



#### 1.1) เตรียม 0.1M $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$

	1	mol	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	หนัก	287.54 g	
	0.1	mol	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	หนัก	28.754 g	
(100%)	0.1	M	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	หนัก	28.754 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
(97%) ของ	0.1	M	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	หนัก	$\frac{97}{100} \times 28.754$ g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
ดังนั้นต้องเตรียม			$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	=	27.89138 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
หรือ			$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	=	13.94569 g	ในน้ำกลั่น 500 ml

#### 1.2) เตรียม 0.1M $AgNO_3$

	1	mol	$AgNO_3$	หนัก	169.87 g	
	0.1	mol	$AgNO_3$	หนัก	16.987 g	
(100%)	0.1	M	$AgNO_3$	หนัก	16.987 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
(3%) ของ	0.1	M	$AgNO_3$	หนัก	$\frac{3}{100} \times 16.987$ g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
ดังนั้นต้องเตรียม			$AgNO_3$	=	0.5096 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
หรือ			$AgNO_3$	=	0.2548 g	ในน้ำกลั่น 500 ml

### 1.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ต้องเตรียม 0.1M  $NaOH$  และ 0.1M  $Na_2O_3$

#### 2.1) เตรียม 0.1M $NaOH$

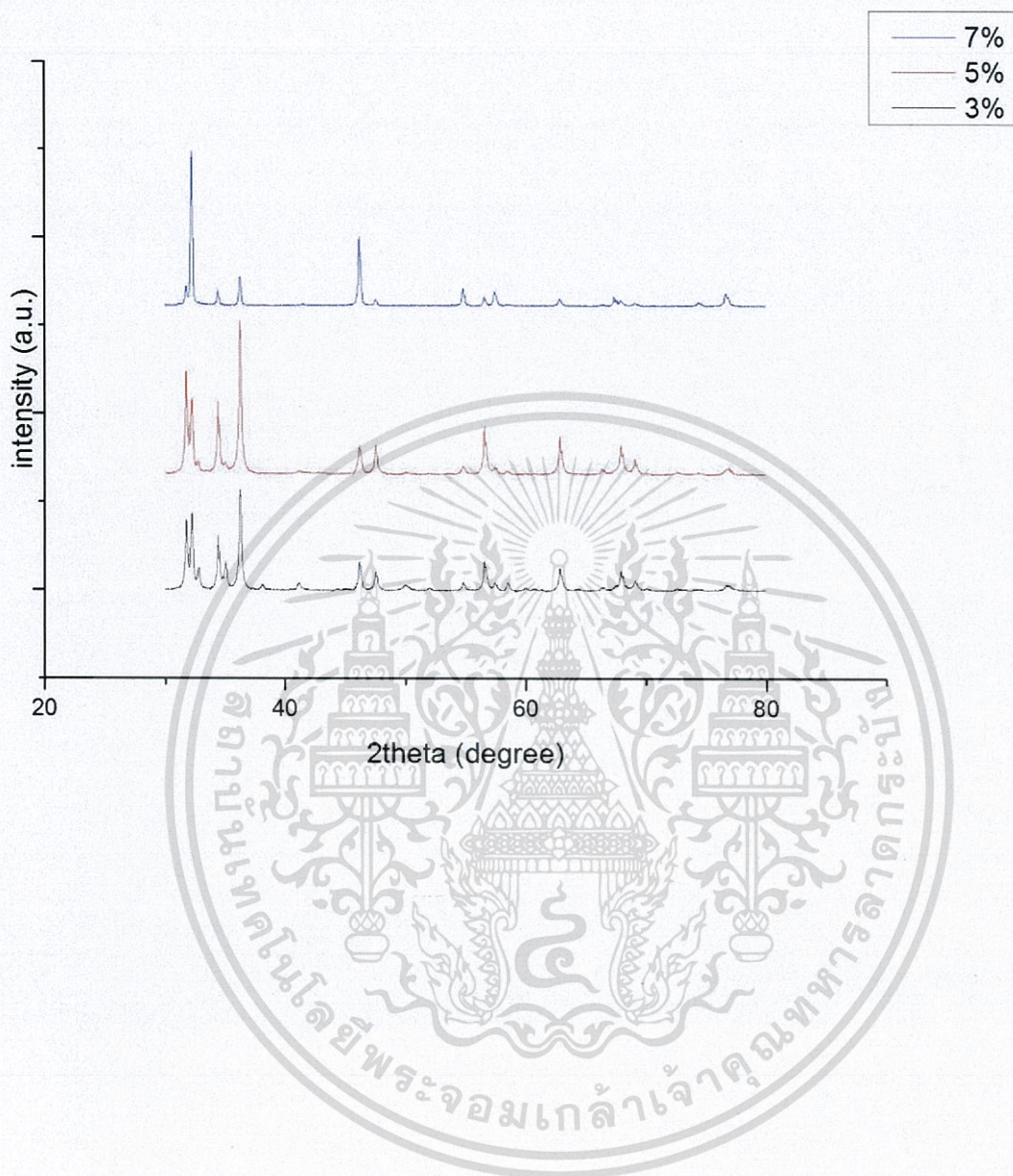
	1	mol	$NaOH$	หนัก	40 g	
	0.1	mol	$NaOH$	หนัก	4 g	
	0.1	M	$NaOH$	หนัก	4 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml

#### 2.2) เตรียม 0.1M $Na_2O_3$

	1	mol	$Na_2O_3$	หนัก	105.99 g	
	0.1	mol	$Na_2O_3$	หนัก	10.599 g	
	0.1	M	$Na_2O_3$	หนัก	10.599 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. XRD (X-ray Diffraction)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้