

การวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อนของ
ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก
ENERGY GAP AND THERMAL DIFFUSIVITY
MEASUREMENT OF SILVER-DOPED ZINC OXIDE
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อนของ
ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก
ENERGY GAP AND THERMAL DIFFUSIVITY
MEASUREMENT OF SILVER-DOPED ZINC OXIDE
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



คทพญ.....
เลขทะเบียน 149465
วันเดือนปี ๒๘ ส.ค. 2561

b. 12884686
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในหอสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY GAP AND THERMAL DIFFUSIVITY
MEASUREMENT OF SILVER-DOPED ZINC OXIDE
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIRMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อนของ
ซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก
Energy Gap and Thermal Diffusivity Measurement of
Silver-Doped Zinc Oxide Using Photoacoustic
Technique

ชื่อนักศึกษา

นายสรารุท สะสม รหัสนักศึกษา 56051226
นายวิสิษฐ์ งามอาจ รหัสนักศึกษา 56051214

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์



ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิชานันท์ อิศเรษฐิโสภณ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ กรรมการ	
อ.ธนภรณ์ สีสาว์ฒานานนท์ กรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก
ชื่อนักศึกษา	นายสรารุช สะสม รหัสนักศึกษา 56051226 นายวิไลษฎ์ งามอาจ รหัสนักศึกษา 56051214
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ที่มีอัตราส่วนโมลเท่ากับ 1% ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก

จากการสังเคราะห์สารซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ผลลัพธ์ที่ได้คือซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์มีโซเดียมออกไซด์ปนอยู่ การศึกษาการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO พบว่ามีค่าเท่ากับ 3.2 eV ซึ่งเท่ากับซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ถูกโดปและไม่มีการปนเปื้อน ส่วนการศึกษาค่าการกระจายความร้อนพบว่า ZnAgO (1%) มีค่าการกระจายความร้อนเท่ากับ 13.5 mm²/s และเมื่อรวมกับข้อมูลของงานวิจัยก่อนหน้า จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับอัตราส่วนโมลเป็นรูปพาราโบลาหงายและจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับขนาดของอนุภาคพบว่า ค่าการกระจายความร้อนมีค่าแปรผันตามขนาดของอนุภาค ในช่วงประมาณ 600-800 นาโนเมตร

คำสำคัญ : ค่าช่องว่างแถบพลังงาน, ค่าการกระจายความร้อน, พาราโบลา, โฟโตอะคูสติก, วิธีตกตะกอนร่วม, อัตราส่วนโมล

Title	Energy Gap and Thermal Diffusivity Measurement of Silver-Doped Zinc Oxide Using Photoacoustic Technique
Students	Mr.Srawut Sasom Student ID 56051226 Mr.Wisit Ongoad Student ID 56051214
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof. Wichan Techitdheera

ABSTRACT

This special project involves studying energy gap and thermal diffusivity measurement of Silver-Doped Zinc Oxide (1% mole fraction) which is synthesized by co-precipitation method. The measuring technique is Photoacoustic technique.

From co-precipitation Ag-Doped Zinc Oxide (ZnAgO) synthesis , we got Sodium Oxide (Na₂O) contaminated ZnAgO and we found that its energy gap is equal to 3.2 eV which is equal to energy gap of undoped and uncontaminated ZnO. From thermal diffusivity experiment , we found that thermal diffusivity of ZnAgO (1%) is equal to 13.5 mm²/s and if we combine this result with the previous research[1], we will get the graph of thermal diffusivity and mole fraction relation which is similar to Parabola and from thermal diffusivity and particle size measurement, we found that the thermal diffusivity is proportional to particle size when the particle size is about 600 to 800 nm.

Keyword : Co-precipitation, Energy Gap, mole fraction, Parabola, Photoacoustic, Thermal Diffusivity

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคล ดังต่อไปนี้

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

ขอขอบพระคุณ ดร.วณิชยา เมฆประสาธ อาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดขนาดของอนุภาคด้วย Particle Analyzer

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา อาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารด้วยวิธี XRD (X-ray diffraction)

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานความถูกต้องงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความถูกต้องตามรูปแบบของงานวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการธุรการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้ร่วมแบ่งปันความรู้และประสบการณ์ในการทำงานวิจัย

นายสรารัฐ สะสม

นายวิสิษฐ์ องอาจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอนแบล็ค	3
2.1.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	3
2.1.2 ซิลเวอร์ (Ag)	5
2.1.3 คาร์บอนแบล็ค	5
2.2 คลื่นความร้อน	6
2.2.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน	6
2.2.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน	8
2.2.3 การแพร่กระจายความร้อน	11
2.3 ค่าการกระจายทางความร้อน และทฤษฎี Rosencwaig-Gersho	16
2.4 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)	21
2.5 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการกระจายทางความร้อน	22
2.5.1 แหล่งกำเนิดแสง	22
2.5.2 เครื่องแยกความยาวคลื่น (monochromator)	23
2.5.3 เครื่องตัดแสง	24
2.5.4 ระบบตรวจจับ	24
2.5.5 ระบบขยายสัญญาณ	25

เอกสารนี้เป็น 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	27
3.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ	27
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	28
3.3.1 สังเคราะห์สาร	28
3.3.2 อัดเม็ดสารซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์	30
3.3.3 การหาช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ 1 % โดยโมล	32
3.3.4 การหาการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์	33
3.4 การใช้งานอุปกรณ์และโปรแกรมเพื่อการทดลอง	34
3.4.1 การจักระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี	34
3.4.2 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมในการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 ผลการวัด XRD ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม	39
4.1 ผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO	40
4.2 ผลการหาค่าการกระจายทางความร้อนของ ZnAgO	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์	4
2.2 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิลเวอร์	5
3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ	27
6.1 แสดงแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆของคาร์บอนแบล็ค	52
6.2 แสดงแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆของ ZnAgO ที่ถูกบดต่างกัน 3 ระดับ	66
6.3 แสดงค่าตารางที่ 6.2 นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค	80
6.4 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่ยังไม่มีตัวอย่าง ที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง	96
6.5 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่ยังไม่บดที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง	98
6.6 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาทีที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง	100
6.7 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาทีที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง	102
6.8 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์ ที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง	104
6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่ยังไม่บด กับ ส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	108
6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที กับ ส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	110
6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที กับ ส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	112
6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ก. แสดงโครงสร้างเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์ (Hexagonal wurtzite)	4
ข. แสดงโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zincblend)	
2.2 แสดงภาพคาร์บอนแบล็คที่บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็ก	5
2.3 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก	8
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อน กับความลึกของพื้นผิวอินทรีย์	13
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ (nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์	14
2.6 แสดงโครงสร้างระบบของเซลล์โฟโตอะคูสติก	16
2.7 แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดขึ้นอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูง กำลังที่ได้สามารถให้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด	22
2.8 แสดงแหล่งกำเนิดแสง Xe lamp	22
2.9 แสดงภาพเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator)	23
2.10 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแยกความยาวคลื่น	23
2.11 แสดงภาพเครื่องตัดแสง	24
2.12 แสดงภาพโฟโตอะคูสติกเซลล์ ซึ่งเป็นระบบตรวจจับความร้อนโดย ใช้เทคนิคเสียงไมโครโฟนตรวจจับความดันที่เปลี่ยนไป	25
2.13 แสดงภาพ lock-in amplifier	25
3.1 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร	30
3.2 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก	30
3.3 แสดงขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ในการอัดเม็ดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	31
3.4 แสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี	34
3.5 แสดง icon โปรแกรม Measuring Energy Gap และ SR510 Lock-in Amp	35
3.6 แสดงการเลือก Port	35
3.7 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง	35
3.8 แสดงส่วนของการตั้งค่าความถี่ตัวตัดแสง	36
3.9 แสดงสวิตช์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม	36
3.10 แสดงการจัดวางหน้าจอของโปรแกรมต่างๆเพื่อใช้งาน	36
3.11 แสดงไอคอนของโปรแกรม SR510 Lock-in Amp	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แสดงการเลือก Port	37
3.13 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง	37
3.14 แสดงส่วนของการตั้งค่าความถี่ตัวตัดแสง	38
3.15 แสดงสวิตช์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม	38
3.16 แสดงปุ่มสำหรับเริ่มทำงานโปรแกรม	38
4.1 แสดงผลการวัด XRD ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม	39
4.2 แสดงผล XRD ของ ZnAgO ที่ Mole fraction ค่าต่างๆ ^[5]	39
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บัดและถูกนอมัลไลซ์ด้วย ข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง	40
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บัดแล้ว 10 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วย ข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง	41
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บัดแล้ว 20 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วย ข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง	42
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับค่าอัตราส่วนโมล	43
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับขนาดของอนุภาค	44
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์และ ถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	45
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บัดและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	45
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บัด 10 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 20 นาที่และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	46
6.1 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค	52
6.2 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บด	65
6.3 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที่	65
6.4 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที่	66
6.5 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ไม่บดถูกนอมัลไลซ์ ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค	79
6.6 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 10 นาที่ถูกนอมัลไลซ์ ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค	79
6.7 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 20 นาที่ถูกนอมัลไลซ์ ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค	79
6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของเซลล์ที่ยังไม่มีตัวอย่าง	93
6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่ยังไม่บด	93
6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที่	94
6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที่	94
6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูด สัญญาณโฟโตอะคูสติก(V) ของซิงค์ออกไซด์	95
6.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บดและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	106
6.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 10 นาที่และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติคของ ZnAgO ที่บด 20 นาที่และถุณอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของ เซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	107
6.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติคของซิงค์ออกไซด์ และถุณอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับ ส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง	107
6.17 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) iHR 320	116
6.18 แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน	116
6.19 แสดงไอคอนโปรแกรม	117
6.20 แสดงหน้าต่างกด OK	117
6.21 แสดงหน้าต่างหลังกด OK	118
6.22 แสดงโปรแกรมคำสั่งเลือกไปที่ IHR 320	118
6.23 แสดงโปรแกรมคำสั่งกด Next>	119
6.24 แสดงการตั้งชื่อตรงช่อง Device Display Name	119
6.25 แสดงหน้าต่าง Accessory information	120
6.26 แสดงหน้าต่าง Summary	120
6.27 แสดงหน้าต่างให้กด OK	121
6.28 แสดงหน้าต่างหลังกด OK	121
6.29 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer	122
6.30 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าหลังกด Initialize	122
6.31 แสดงหน้าต่างการตั้งค่า	123
6.32 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าการเลือกความยาวคลื่น	123
6.33 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของ LabView 2014	124
6.34 แสดงหน้าเว็บไซต์ในส่วนที่ใช้สำหรับดาวน์โหลดโปรแกรมเสริม	124
6.35 แสดง icon ของโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นที่มีชื่อว่า SR510 Lock-in Amp	125
6.36 แสดงส่วนแสดงกราฟของโปรแกรม	125
6.37 แสดงส่วนการกำหนดค่าแกน X และ Y	126

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.38 แสดงส่วนการกำหนดลักษณะการแสดงกราฟ	126
6.39 แสดงส่วนตั้งค่าเริ่มต้นและส่วนของการแสดงผล	127
6.40 แสดงส่วนของการตั้ง Serial port	127
6.41 แสดงส่วนของการแสดงข้อมูลการทดลอง	128
6.42 แสดงการบันทึกข้อมูลจากตารางเพื่อใช้สำหรับเปิดด้วยโปรแกรม Excel	128
6.43 แสดงการกำหนดค่า Initial Wavelength(nm)	129
6.44 แสดงค่าข้อมูลจาก Lock-in Amplifier (Output) และค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการวัดหลายๆ Loop (Average) และ แสดงลำดับของ loop ปัจจุบันที่โปรแกรมทำงานอยู่ (Loop)	129
6.45 แสดงส่วนการกำหนดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของตัวตัดแสง Chopper Fre.(Hz) แสดงค่าความถี่ตัวตัดแสงค่าปัจจุบัน Initial Fre.(Hz)	129
6.46 แสดงปุ่มสั่งการโปรแกรม Setting mode	130
6.47 แสดงหน้าต่างกำหนดการทำงานของ SR510 Lock-in Amplifier	130
6.48 ที่มุมซ้ายบนของโปรแกรมจะมีปุ่มลักษณะดังภาพ	130
6.49 แสดงเครื่อง Particle Analyzer ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น Delsa™Nano C	131
6.50 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่ยังไม่บด	132
6.51 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่บด 10 นาที	133
6.52 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่บด 20 นาที	134

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
Å	Angstrom
f_c	Characteristic frequency
ρ	Density
E_g	Energy band gap
PA	Photoacoustic
Ag	Silver
ZnAgO	Silver doped zinc oxide
AgNO ₃	Silver nitrate
Na ₂ CO ₃	Sodium carbonate
NaOH	Sodium hydroxide
Na ₂ O	Sodium Oxide
c	Specific heat capacity
K	Thermal conductivity
α	Thermal diffusivity
μ	Thermal diffusion length
ω	Chopper angular frequency
f	Chopper frequency
XRD	X-Ray Diffraction
ZnO	Zinc oxide
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	Zinc sulphate heptahydrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มี Energy Gap ประมาณ 3.2 eV ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) ซึ่งมีความอันตรายกว่ารังสีอัลตราไวโอเลตชนิดอื่น เพราะมีความเข้มสูงกว่ารังสีอัลตราไวโอเลตชนิดอื่น ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสารที่น่าจะมีความเหมาะสมในการทำฟิล์มป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต

เนื่องจากเมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตตกกระทบซิงค์ออกไซด์ พลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบการกระจายความร้อนของอุปกรณ์ที่ทำจากซิงค์ออกไซด์ การศึกษาการกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ของซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยก่อนหน้าพบว่าการใช้ซิลเวอร์ (Ag) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ได้ ดังนั้นการศึกษาซิลเวอร์โด๊ปซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ โดยเทคนิคที่นำมาตรวจวัดค่าการกระจายความร้อน คือ เทคนิคโฟโตอะคูสติก (Photoacoustic technique)

โฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง เครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) ใช้สำหรับเลือกความยาวคลื่นแสงแสงที่ถูกเลือกจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulated) ด้วยตัวตัดแสง (Chopper) เพื่อให้แสงตกกระทบวัตถุแบบเป็นคาบ ซึ่งการกล้ำสัญญาณแบบนี้จะช่วยให้ลดสัญญาณรบกวนภายนอกได้มากเมื่อใช้ร่วมกับ Lock-in Amplifier และเนื่องจากวัตถุที่ใช้จะเกิดการดูดกลืนแสงและการรวมตัวของพาหะแบบ non-radiative recombination ซึ่งเกิดเป็นความร้อน ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการขยายตัวของวัตถุส่งผลต่อความดันอากาศบริเวณรอบๆวัตถุ เกิดปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก (Photoacoustic effect) ไมโครโฟนจะตรวจวัดความดันที่เปลี่ยนไปของอากาศบริเวณรอบๆวัตถุแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะมี lock-in amplifier ช่วยขยายสัญญาณไฟฟ้าและส่งสัญญาณให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล นำไปสู่การหาค่าการกระจายความร้อน

เทคนิคนี้มีข้อดี คือ วิธีใช้งานไม่ซับซ้อน ไม่มีการสัมผัสวัตถุโดยตรงจึงไม่เกิดการทำลาย และสามารถตรวจวัดการเกิด non-radiative recombination ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการใช้งานระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี
- 2) เพื่อศึกษาการเตรียมสารซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 3) เพื่อวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก
- 4) เพื่อวัดค่าการกระจายความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก
- 5) เพื่อเขียนโปรแกรมบันทึกข้อมูลอัตโนมัติและควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้โปรแกรม LabView

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เตรียมสารซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยสารมีอัตราส่วนโมลของซิลเวอร์เท่ากับ 1% และทำการเผาสาร (sintering) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วนำสารมาอัดเม็ดที่น้ำหนัก 0.1g และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ทั้งหมด 3 เม็ด จากนั้นนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับค่าการกระจายความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถใช้งานระบบโฟโตอะคูสติกได้
- 2) สามารถเตรียมสารซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมได้
- 3) สามารถเขียนโปรแกรมที่ใช้ควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้โปรแกรม LabView ได้
- 4) สามารถวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์และวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ที่ขนาดของเกรนต่างกัน 3 ระดับได้
- 5) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารทดสอบอื่นๆ ได้
- 6) มีทักษะในการค้นคว้า และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค่าการกระจายความร้อนเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญทางความร้อน ขณะเดียวกันซิงค์ออกไซด์ก็เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีงานประยุกต์มากมาย ดังนั้นการศึกษาค่าการกระจายความร้อนของซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

จากงานวิจัยของ Ruby Chauhan, Ashavani Kumar and Ram Pal Chaudhary (Synthesis and characterization of silver doped ZnO nanoparticles)^[5] ทำให้เรารู้ว่า เราสามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ได้ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม และจากงานวิจัยของ S. Yun, H. Seo (Photoacoustic Measurements of Thermal Diffusivity or Thickness of Multi-layer solids)^[6] ทำให้เรารู้ว่า เราสามารถวัดค่าการกระจายความร้อนของสารได้ด้วยเทคนิคโพโตอะคูสติก และจากงานวิจัยของ กรกนก ทาสีขาว, คมสันต์ เย็นไธสง และพนิดา ปิ่นประเสริฐ (Thermal Diffusivity Measurement of Ag Doped ZnO Using Photoacoustic Technique)^[1] เป็นงานวิจัยที่วัดค่าการกระจายความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 3% , 5% และ 7%

ทั้งหมดนี้จึงนำไปสู่การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โดปซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 1% และความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับค่าการกระจายความร้อน

2.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอนแบล็ค

2.1.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

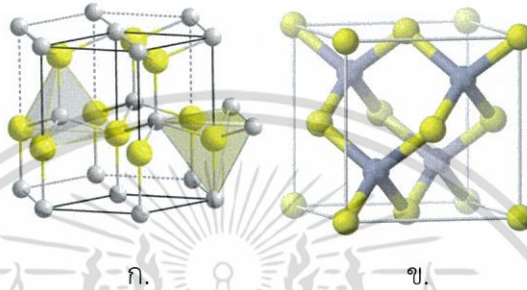
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ในกลุ่ม II-V มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบ direct band gap เท่ากับ 3.2 eV มีโครงสร้างผลึก 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซต์ และโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 อ้างอิงจาก Wikipedia.org

สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.38 g/mol
ลักษณะที่ปรากฏ	ของแข็งสีขาว
สัดส่วนน้ำหนักอะตอม	สังกะสี 65.7 % ออกซิเจน 34.3 %
ความหนาแน่น	5,606 kg/m ³
จุดหลอมเหลว	1,975 °C
จุดเดือด	2,360 °C
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	สังกะสี 2 ออกซิเจน 2
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.2 eV
โครงสร้าง	Zn เป็น hexagonal ทำพันธะ tetrahedral หรือ wurtzite กับ O a = b = 3.24 Å , c = 5.19 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ซิลเวอร์ (Ag)

ซิลเวอร์ (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 อ้างอิงจาก Wikipedia.org

สูตรโมเลกุล	Ag
มวลอะตอม	107.8682 g/mol
ลักษณะปรากฏ	ของแข็ง
ความหนาแน่น	10,500 kg/m ³
จุดหลอมเหลว	961.78 °C
จุดเดือด	2,162 °C
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	1
โครงสร้างผลึก	face center cubic $a = b = c = 4.08 \text{ \AA}$

2.1.3 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

คาร์บอนแบล็ค เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน มีหลายชนิด บางชนิดมีขนาดอยู่ในระดับนาโน บางชนิดเป็นส่วนผสมของอนุภาคนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่านาโน

คุณสมบัติที่น่าสนใจของคาร์บอนแบล็ค คือ สามารถดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น และสามารถปลดปล่อยแสงที่ดูดกลืนออกมาได้ทั้งหมด ด้วยเหตุนี้จึงนำคาร์บอนแบล็คมาเป็นสารอ้างอิง เพื่อหาสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดในระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.2 แสดงภาพคาร์บอนแบล็คที่บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็ก ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คลื่นความร้อน

2.2.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง สามารถถ่ายเทจากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อบริเวณสองบริเวณนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน และถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความลาดชันของอุณหภูมิ, Temperature different) รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแต่ละแบบจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้

การนำความร้อน (Heat conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ได้แก่ ของเหลวหรือของแข็งที่อยู่กับที่ มีทั้งถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุเดียวกัน หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน เช่น การจับที่พืโลหะในหม้อน้ำร้อนจะเกิดการนำความร้อนจากน้ำร้อนมาสู่มือของเรา โดยมีที่พืโลหะเป็นตัวกลาง แต่ที่พืโลหะไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงแบบเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นของแข็งที่บดแสง

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

สมการที่ (1) คือ กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of conduction) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน (q_{cd} มีหน่วยเป็น W/m^2) กับความลาดชันของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน ($\frac{\partial T}{\partial x}$ โดยที่ T มีหน่วยเป็น Kevin และ x มีหน่วยเป็น เมตร) จากที่กล่าวไว้ในตอนต้นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความลาดชันของอุณหภูมิ โดยสัมพันธ์การแปรผัน คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (k มีหน่วยเป็น $W/m.K$) จากสมการจะเห็นว่า ขวามือของสมการมีเครื่องหมายลบ เนื่องจากเมื่อระยะทางในการถ่ายเทความร้อน x เพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมিরะหว่าง 2 บริเวณจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งทำให้เทอม $\frac{\partial T}{\partial x}$ มีค่าติดลบ แต่จากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ นั่นคือการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปต่ำ คือ ความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกมีค่าบวก ฉะนั้น จึงต้องเติมเครื่องหมายลบทางขวามือของสมการ เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกตามทฤษฎีนั้นเอง ทั้งนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิเพียงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น รูปทรง ความหนาและชนิดของวัสดุที่ศึกษาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพาความร้อน (Heat convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสสารที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า) ก็จะมาแทนที่ เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเกิดลมบก คือ ในเวลากลางคืน พื้นดินคลายความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้อากาศเหนือพื้นดินมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำหรืออากาศเหนือพื้นดินมีความกดอากาศสูงกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำ เป็นผลให้อากาศเหนือพื้นดินที่มีความกดอากาศสูงกว่าเคลื่อนที่เข้าหาพื้นน้ำที่มีความกดอากาศต่ำกว่า หรือเกิดลมพัดจากบกออกสู่ฝั่งทะเลในเวลากลางคืน

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

สมการที่ (2) เป็นสมการการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อน (q_{cv} หน่วยเป็น W/m^2) กับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวกับของเหลว นั่นคือ หากอุณหภูมิของพื้นผิวกับอุณหภูมิของของเหลวต่างกันมาก ก็จะมีฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อนมากด้วย โดยสัมประสิทธิ์การแปรผัน คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h มีหน่วยเป็น $W/m^2.K$)

การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง ดังนั้น วัตถุที่อยู่บนโลก หรือในอวกาศก็สามารถแผ่รังสีได้เช่นเดียวกัน วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ โดยแผ่รังสีความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุที่มีอุณหภูมิสูง จะแผ่รังสีความร้อนออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น แต่ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิต่ำ จะแผ่รังสีความร้อนออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาว วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ สีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้ม จะดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน และผิววัตถุ วัตถุผิวขรุขระ จะดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและขัดมัน

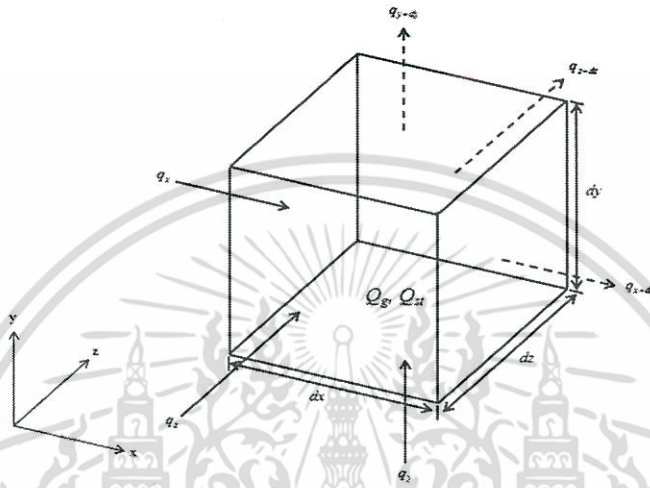
$$q_{rd} = \epsilon \sigma_{SB} T_s^4 \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) เป็นกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (q_{rd}) กับอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ โดย σ_{SB} คือค่าคงที่โบลทซ์-มานน์และ ϵ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุที่อุณหภูมิใดๆ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล จำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิในตัวกลางในเงื่อนไขต่างๆ เช่น การพิจารณากฎอนุรักษ์พลังงานในปริมาตรขนาดเล็ก dV เพื่อให้ทราบลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในตัวกลาง และการพิจารณาสมการอัตราการส่งผ่านความร้อน เพื่อให้ทราบกระบวนการส่งผ่านความร้อน เป็นต้น โดยการพิจารณาดังกล่าว จะทำให้สามารถกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ได้



รูปที่ 2.3 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบปิดฉาก

พิจารณาปริมาตร dV ที่มีขนาด dx , dy และ dz และมีฟลักซ์ของพลังงานความร้อนไหลเข้า-ออกจากริมาตร dV ดังนี้

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

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

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

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

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

เมื่อ Q_{in} คือ อัตราความร้อนที่ไหลเข้าไปในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

เมื่อ Q_g คือ อัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

เมื่อ \dot{g} คือ อัตราการกำเนิดพลังงานต่อ 1 หน่วยปริมาตรภายในตัวกลาง

เมื่อ Q_{out} คือ อัตราความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

เมื่อ Q_{st} คือ อัตราความร้อนที่สะสมอยู่ในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

เมื่อ ρ, c คือ ค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลาง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial(k dy dz \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} dx + \frac{\partial(k dx dz \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} dy + \frac{\partial(k dx dy \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} dz + g dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 α คือ ค่าการกระจายทางความร้อน (m^2/s) จาก $\frac{k}{\rho c}$ ทำให้ทราบว่าอัตราความร้อนจะแพร่เข้าไปในวัสดุได้ดีเพียงใด ขึ้นกับค่าการนำความร้อน (k) ความหนาแน่น (ρ) และความจุความร้อนจำเพาะของสาร (c)

กรณีที่ 2) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

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

กรณีที่ 3) เมื่อมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

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

กรณีที่ 4) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

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

2.2.3 การแพร่กระจายความร้อน

พิจารณาตัวกลางแบบ Isotropic homogeneous เมื่อมีความร้อนแพร่มาตกระทบ พื้นผิวเป็นจังหวะขึ้นกับเวลาแบบเป็นฟังก์ชัน Sinusoidal ในทิศ x โดยผ่านระนาบ yz ดังนี้

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

เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุมของคลื่นความร้อน มีหน่วยเป็น Hz

จากกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (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

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

กำหนดผลเฉลยของสมการที่ (24) เท่ากับ

$$T(x,t) = T(x)\exp(j\omega t) \quad (25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (25) ลงในสมการที่ (24) จะได้

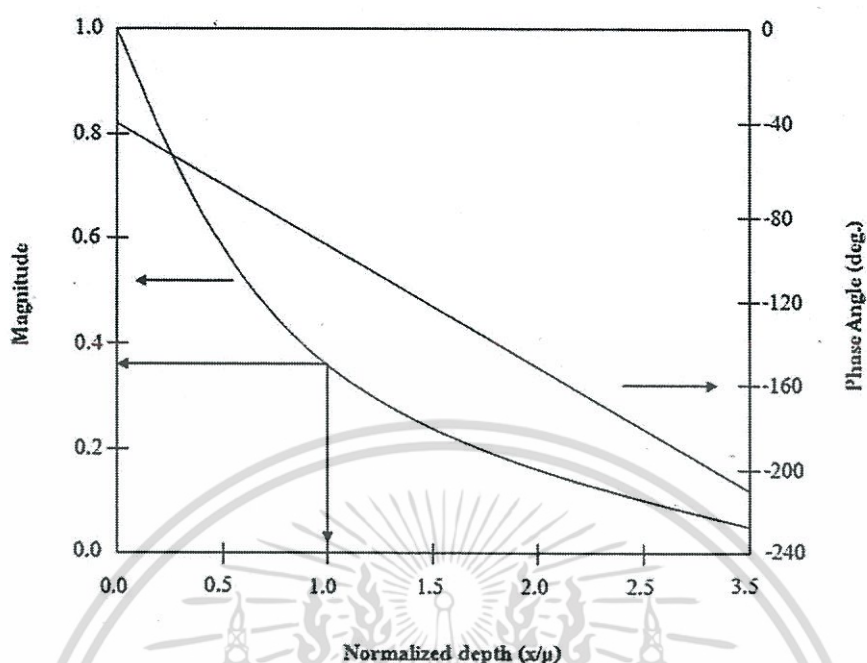
$$\exp(j\omega t) \left(\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(x) \right) = 0 \quad (26)$$

เมื่อรวมสมการ (23) – (26) จะได้

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

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

จากผลเฉลยนี้ แบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแอมพลิจูด และส่วนเฟส ซึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นที่ผิว (Normalized depth) จะพบว่า มีการลดลงแบบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับฟังก์ชันของระยะที่ลึกลงไปในพื้นที่ผิวจะพบว่า มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น นั่นคือ เมื่อมีคลื่นความร้อนแพร่กระจายลึกลงไปในพื้นที่ผิวของวัตถุ จะพบว่า บริเวณที่ลึกลงไปในพื้นที่ผิวจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณพื้นผิวนั่นเอง



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนกับความลึกของพื้นผิวนอร์มัลไลซ์

นอกจากนี้ผลเฉลยของสมการการแพร่กระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ยังสามารถอธิบายในแนวทางอื่นได้อีก ดังนี้

1) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายเหมือนกับคลื่นทั่วไป

คลื่นความร้อนจะมีการสั่นโดยการสั่นของคลื่นความร้อนจะขึ้นกับรูปแบบของ $\exp(j\omega t)$ และมีเวกเตอร์คลื่น (Wave vector) คือ

$$\frac{1}{\mu} = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad \text{หรือ} \quad \mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (28)$$

เมื่อ μ คือ ระยะการแพร่ความร้อน มีหน่วยเป็น m^2/s

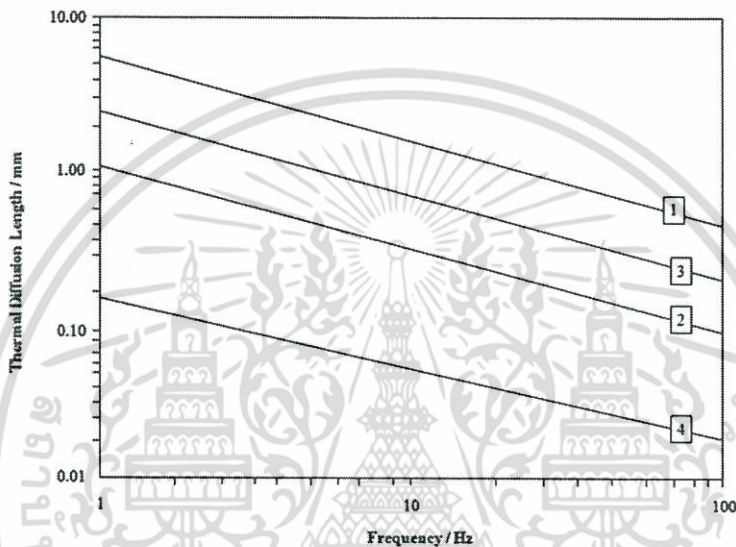
2) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายไม่เหมือนกับคลื่นทั่วไป

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (28) ทำให้ทราบว่า คลื่นความร้อนจะสามารถแพร่กระจายความร้อนลงไปในวัตถุได้ลึก ก็ต่อเมื่อวัตถุนั้นมีค่าการกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) สูง หรือเมื่อคลื่นความร้อนนั้นมีค่าความถี่ต่ำ (คลื่นความร้อนต้องมีความยาวคลื่นมากนั่นเอง)

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity length, nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อนในช่วง 1-100 Hz ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ (nm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลต์

3) คลื่นความร้อนที่มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว

ความเร็วเฟสของคลื่นความร้อน คือ

$$v = \omega\mu = \sqrt{2\alpha\omega} \quad \text{มีหน่วยเป็น m/s} \quad (29)$$

จากสมการที่ (29) จะเห็นได้ว่า ความถี่ของคลื่นความร้อนมีผลต่อความเร็วในการแพร่กระจายความร้อน คือ คลื่นความร้อนที่มีความถี่สูงจะแพร่กระจายความร้อนได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำ

4) การเปลี่ยนเฟสของคลื่นความร้อน

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

$$\varphi = -\frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4} \quad (30)$$

จากสมการที่ (30) จะเห็นได้ว่า ถ้าพิจารณาที่ $x=0$ (พื้นผิววัตถุ) คลื่นความร้อนที่พื้นผิววัตถุจะมีเฟสตามหลังคลื่นความร้อนที่แหล่งกำเนิดอยู่ -45 องศา

5) อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน

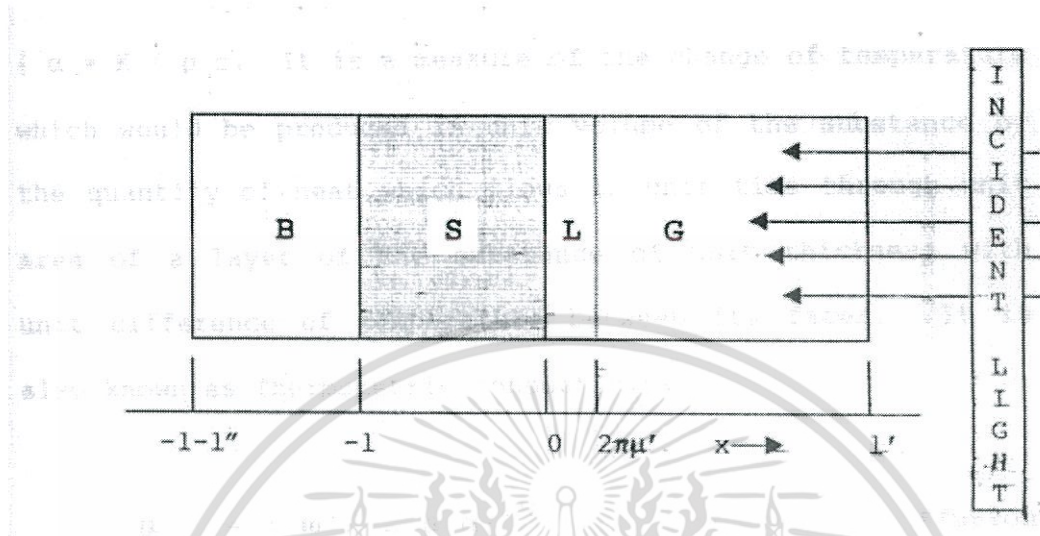
อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิที่บริเวณนั้นต่อความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน ดังสมการ

$$z = \frac{1}{k\sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\rho ck}} \quad (31)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน เป็นปริมาณที่บอกถึงขนาดของความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุจากสมการที่ (31) เทอม $\sqrt{\rho ck}$ คือ Thermal effusivity หรือค่าความเฉื่อยทางความร้อน ถ้าค่าความเฉื่อยทางความร้อนมีค่าต่ำ จะทำให้ความร้อนที่พื้นผิวมีค่าสูง (คือ วัสดุมีการตอบสนองต่อความร้อนสูง พื้นผิวจึงมีความร้อนสูงนั่นเอง) โดยปกติแล้ววัสดุที่มีค่าการกระจายทางความร้อนสูง จะต้องมีความเฉื่อยทางความร้อนสูงด้วย แต่ยกเว้นบางกรณี วัสดุยกเว้นที่น่าสนใจที่สุดคือ อากาศ เพราะมีค่าการกระจายทางความร้อนสูง แต่เนื่องจากมีค่าความนำความร้อนต่ำ และมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อากาศมีความเฉื่อยทางความร้อนต่ำนั่นเอง ฉะนั้น วัสดุที่มีการตอบสนองต่อความร้อนได้ดีจึงต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนสูงนั่นเอง

2.3 ทฤษฎี Rosencwaig-Gersho

ทฤษฎี Rosencwaig-Gersho เป็นทฤษฎีที่อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก โดยที่ระบบมีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังภาพ



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างระบบของเซลล์โฟโตอะคูสติก

โดยที่ B คือ สารที่เป็นฐานรองของตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ $1''$ มีหน่วยเป็น เมตร

S คือ สารตัวอย่างที่มีความหนา 1 มีหน่วยเป็น เมตร

L คือ ชั้นของก๊าซที่อยู่ใกล้กับผิวตัวอย่างและการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซบริเวณนี้มีผลอย่างยิ่งกับไมโครโฟน ซึ่งมีความหนา $2\pi\mu'$ เมื่อ μ' คือ Thermal diffusion length ของก๊าซ มีหน่วยเป็น เมตร

G คือ ก๊าซในชั้นถัดมามีความหนา $1' - 2\pi\mu'$ มีหน่วยเป็น เมตร

Photoacoustic technique เป็นเทคนิคที่วัดการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศบริเวณรอบๆสารตัวอย่าง ซึ่งทฤษฎี Rosencwaig-Gersho มีสมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศได้ โดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร ตามกฎของก๊าซ และกฎของอุณหพลศาสตร์ ในลำดับต่อไปนี้จะอธิบายที่มาของสมการการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซในในระบบของเซลล์โฟโตอะคูสติกโดยทฤษฎี Rosencwaig-Gersho พอสังเขป

จากโครงสร้างของระบบเราสามารถตั้งสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายระบบได้ดังนี้

1.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} A \exp(\beta x) (1 + \exp(j\omega t)) \quad \text{เมื่อ } -1 \leq x \leq 0 \quad (32)$$

โดยที่ $A = \frac{\beta I_0 \eta}{2K}$

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น Kelvin

β คือ Optical absorption length มีหน่วยเป็น เมตร

I_0 คือ Incident monochromatic light flux มีหน่วยเป็น W/m^2

η คือ ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงที่ดูดกลืนไปเป็นความร้อนด้วยกระบวนการ non-radiative recombination

K คือ thermal conductivity มีหน่วยเป็น $W/m.K$

2.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha''} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{เมื่อ } -1 \leq x \leq -l' \quad (33)$$

3.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq x \leq l' \quad (34)$$

เมื่อทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์แล้วจะได้ผลเฉลยเป็น

$$T(x,t) = T_0 \exp(\sigma' x) \exp(j\omega t) \quad (35)$$

โดยที่

$$T_0 = \left[\frac{\beta I_0}{2K(\beta^2 - \sigma^2)} \right] \left[(r-1)(b+1)e^{\sigma l'} - (r+1)(b-1)e^{-\sigma l'} + 2(b-r)e^{-\beta l'} \right] \left[(g+1)(b+1)e^{\sigma l'} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma l'} \right]^{-1}$$

$$b = \frac{K'' \mu}{\mu'' K}, \quad g = \frac{K' \mu}{\mu' K} \quad \text{และ} \quad r = \frac{(1-I_0)\beta\mu}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่เราสนใจคืออุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณผิวตัวอย่างดังนั้นเราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดย

$$\begin{aligned}\bar{T}(t) &= \left(\frac{1}{2\pi\mu'}\right) \int_0^{2\pi\mu'} T(x,t) dx \\ \bar{T}(t) &= \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{2}}\right) T_0 \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{4}))\end{aligned}\quad (36)$$

เนื่องจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเราสามารถให้ความสัมพันธ์ $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}$ เพื่อประมาณค่า กำหนดให้ T_0 คืออุณหภูมิห้อง V_0 คือปริมาตรของก๊าซที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเท่ากับ $2\pi\mu' A$ เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกในแบบจำลองและเนื่องจากเราสมมติให้ระบบเป็นรูปทรงกระบอกดังนั้นจะได้ว่า

$$\delta x(t) = \frac{2\pi\mu'\bar{T}(t)}{T_0} = \frac{\mu'T_0 \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{4}))}{\sqrt{2}T_0}\quad (37)$$

หลังจากนั้นสมมติให้การอัดและขยายตัวของก๊าซเป็นแบบ Adiabatic

$$PV^\gamma = \text{constant}$$

$$\delta P(t) = \gamma \left(\frac{P_0}{V_0}\right) \delta v = \gamma \left(\frac{P_0}{l}\right) \delta x(t)$$

$$\text{ดังนั้น } \delta P(t) = Q T_0 \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{4})) \quad (38)$$

$$\text{เมื่อ } Q = \frac{\gamma P_0 T_0}{l' T_0 \sqrt{2}}$$

ค่าความดันที่เปลี่ยนไปในความเป็นจริงคือส่วนจริง(real part) ของ $\delta P(t)$ คือ

$$\Delta P(t) = q \cos(\omega t - \psi - \frac{\pi}{4})\quad (39)$$

$$\text{เมื่อ } Q = Q_1 + jQ_2 = q \exp(j\psi)$$

$$Q = \left[\frac{\beta I_0 \gamma P_0}{2\sqrt{2} K \frac{l'}{\mu'} T_0 (\beta^2 - \sigma^2)} \right] [(r-1)(b+1)e^{\sigma l} - (r+1)(b-1)e^{-\sigma l}$$

$$2(b-r)e^{\beta l}] [(g+1)(b+1)e^{\sigma l} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma l}]^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของสัญญาณโฟโตอะคูสติกแปรผันตรงกับค่าความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติของสารตัวอย่างที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าขนาดของสัญญาณโฟโตอะคูสติกได้จากสมการข้างต้น

เนื่องจากปกติแล้วซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์เป็นของแข็งและทึบแสง (β มีค่ามาก ดังนั้น $e^{-\beta l} \approx 0$) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเราจะใช้ในการกำหนดค่าคงที่ต่างๆในสมการ และในงานวิจัยครั้งนี้เราจะแบ่งสมการออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 $\mu \gg l$ และ $\mu \gg l_\beta$

เงื่อนไขคือ $e^{-\beta l} \approx 0, e^{\pm \alpha l} \approx 1$ และ $|r| < 1$ จะได้ว่า

ดังนั้น
$$Q \approx \left[\frac{(1-j)\mu'}{2} \right] \left[\frac{\mu''}{K} \right] Y \quad (40)$$

เมื่อ
$$Y = \frac{I_0 \gamma P_0}{2\sqrt{2lT_0}} \quad \text{และ} \quad l_\beta = \frac{1}{\beta}$$

กรณีที่ 2 $\mu \ll l$ และ $\mu > l_\beta$

เงื่อนไขคือ $e^{-\beta l} \approx 0, e^{\pm \alpha l} \approx 0$ และ $|r| < 1$ จะได้ว่า

ดังนั้น
$$Q \approx \left[\frac{(1-j\beta)\mu'}{2} \right] \left[\frac{\mu}{K} \right] Y \quad (41)$$

กรณีที่ 1 คุณสมบัติทางความร้อนของฐานรองและสารตัวอย่างจะมีผลต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติก เป็นผลมาจากการที่คลื่นความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านสารตัวอย่างไปจนถึงฐานรองได้ หรือ μ มีค่ามากนั่นเอง

ส่วนในกรณีที่ 2 เฉพาะคุณสมบัติของสารตัวอย่างจะมีผลต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติกเท่านั้น เป็นผลมาจากการที่คลื่นความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไม่ ถึงฐานรอง หรือ μ มีค่าน้อยนั่นเอง

แต่จากทั้ง 2 กรณีเราจะพบว่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติกจะแปรผกผันกับความถี่ของการกล้ำสัญญาณ (frequency modulation) หมายความว่าหากเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณของโฟโตอะคูสติกกับส่วนกลับของความถี่ของการกล้ำสัญญาณจะได้กราฟเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าทั้ง 2 กรณีจะได้กราฟเส้นตรงแต่จะได้กราฟสร้างตรงที่มีความชันแตกต่างกัน ธรรมชาติที่ทำให้ระบบเปลี่ยนจากกรณีที่ 1. มาเป็นกรณีที่ 2 เรียกว่า Characteristic frequency (f_c) และ ธรรมชาตินี้ μ ต้องมีค่าเท่ากับความหนาของสารตัวอย่าง(1) และ จาก $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$

$$\text{ดังนั้น } \alpha = \pi \times l^2 \times f_c$$

เมื่อ α คือ Thermal diffusivity (mm²/s)

l คือ ความหนาของตัวอย่าง (mm)

f_c คือ Characteristic frequency (Hz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)

แบบจำลองแถบพลังงานคือ แบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็ง โดยระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอมจะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงาน (energy band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap หรือ band gap; E_g) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำ อะตอมสร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็นโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนแถบพลังงานชั้นนอกจะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า แถบนำไฟฟ้า (conduction band) แบบจำลองแถบพลังงานสามารถนำมาใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารนำไฟฟ้า (conductor) เช่น โลหะ (metal) ฉนวน (insulator) และสารกึ่งตัวนำ

แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของโลหะจะอยู่ใกล้กันมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแคบหรือซ้อนทับกัน ฉนวนมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้าง สารกึ่งตัวนำจะมีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy band) อยู่ระหว่างโลหะและฉนวน

ดังนั้นการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะข้ามไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับค่า Energy band หรือ Energy Gap (E_g) หากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจากแสง หรือ Photon ความยาวคลื่นแสงที่อิเล็กตรอนจะรับพลังงาน หรือดูดกลืนได้ จะต้องมีความยาวคลื่น

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.626×10^{-34} J/s)

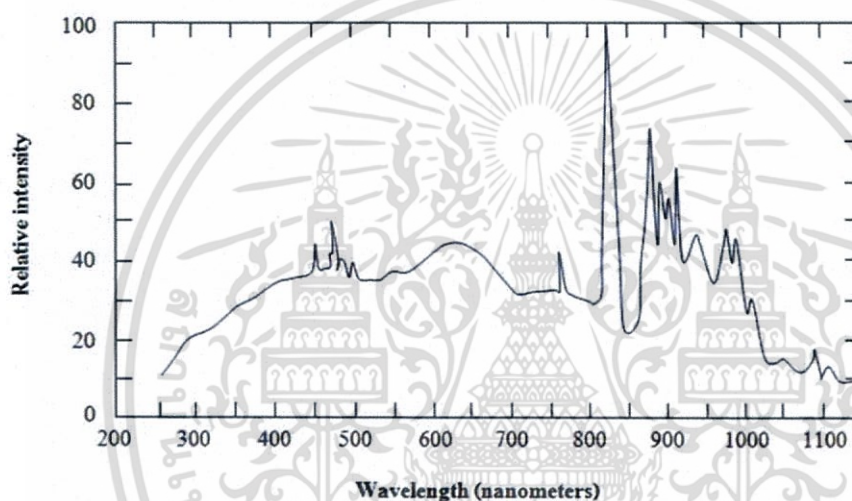
c คือ ค่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ (299,792,458 m/s)

E_g คือ ค่า Energy Gap ของสารใดๆ (J)

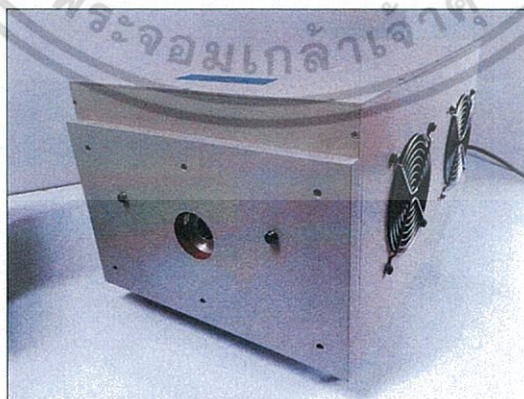
2.5 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการกระจายทางความร้อน

2.5.1 แหล่งกำเนิดแสง

ในการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโทสโกปี ใช้หลอดปล่อยประจุซีนอนขนาด 450 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง 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 2.7 แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดซีนอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูงกำลังที่ได้สามารถให้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด



รูปที่ 2.8 แสดงแหล่งกำเนิดแสง Xe lamp

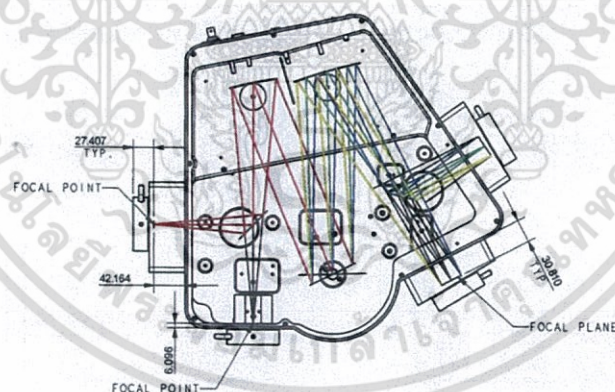
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator)



รูปที่ 2.9 แสดงภาพเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator)

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



ภาพที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแยกความยาวคลื่น

โดยแสงจะออกจากแหล่งกำเนิดแสงแล้วเข้าสู่ entrance slit แล้วตกกระทบที่กระจก และสะท้อนไปยังเกรตติง เกรตติงจะทำหน้าที่แยกแสงและได้แสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมค่าหนึ่ง แสงความยาวคลื่นเดียวนี้จะตกกระทบกระจกและสะท้อนออกมาทาง exit slit ดังนั้น เครื่องแยกความยาวคลื่นนี้จึงต้องมีโปรแกรมควบคุมเพื่อสะดวกต่อการใช้งาน โดยโปรแกรมจะสามารถกำหนดขนาดของ entrance-exit slit ได้ ซึ่งควรมีค่าน้อย เพราะจะทำให้แสงที่ออกมามีความคม และโปรแกรมจะสามารถเลือกความยาวคลื่นของแสงได้ โดยจะไปสั่งการให้เกรตติงหมุนจนได้แสงที่มี

เอกส ความยาวคลื่นตรงตามที่ต้องการนั่นเองงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เครื่องตัดแสง

เครื่องตัดแสง เป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเป็นวงล้อใบพัดแยกเป็นส่วนๆ เป็นวิธีมอดูเลตแสงที่ง่าย มีประสิทธิภาพ ปรับความเร็วได้ และมีสัญญาณรบกวนในการสั้นของแสงที่โดนตัดต่ำ 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



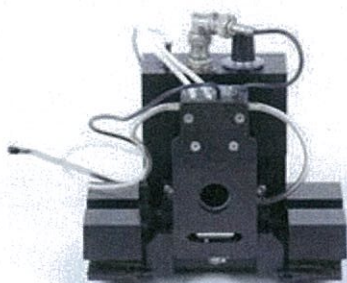
รูปที่ 2.11 แสดงภาพเครื่องตัดแสง

2.5.4 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือที่ปรึกษาในเพื่อนหรือที่ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



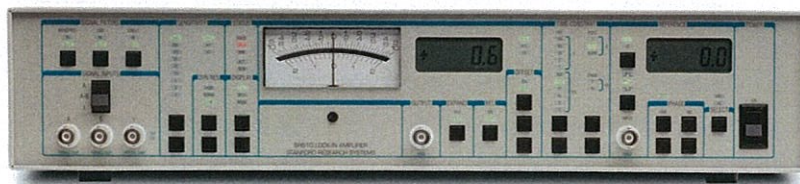
รูปที่ 2.12 แสดงภาพโฟโตอะคูสติกเซลล์ ซึ่งเป็นระบบตรวจจับความร้อนโดยใช้เทคนิคเสียงมี ไมโครโฟนตรวจจับความดันที่เปลี่ยนไป

2.5.5 ระบบขยายสัญญาณ

ตัวขยายสัญญาณ หรือวงจรขยายสัญญาณ (Electronic Amplifier or Amplifier) หรือเรียกสั้นๆ ว่า Amp เป็นอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณ โดยการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟและการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีรูปร่างเหมือนสัญญาณ อินพุตแต่มีขนาดใหญ่กว่า คือ ตัวขยายสัญญาณ ทำการกล้ำสัญญาณ (modulate) เอาต์พุตของ แหล่งจ่ายไฟ

เครื่องขยายสัญญาณลือคอินจะถูกนำมาใช้ในการลดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนการ วัด เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์มีขนาดเล็กมากในระดับไมโครโวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องขยายสัญญาณลือคอินที่มีการวัดสัญญาณด้วยวิธี Phase-Sensitive Detection (PSD) ที่ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณด้วย Bandwidth ที่แคบมากๆ เราจึงสามารถวัดสัญญาณ ได้อย่างแม่นยำ

จากรูปที่ 2.18 สัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์จะถูกต่อเข้ากับ อินพุตของเครื่องขยายสัญญาณลือคอิน ผ่านโวลต์เตจอินพุตแบบซิงเกิลเอนด์ที่มีสัญญาณ A บน แผนหน้าเครื่อง (Single Ended, A) จากนั้นเราจะปรับให้สัญญาณผ่านตัวกรองสัญญาณทั้งแบบ Band pass Auto tracking และ Notch ต่อมาสัญญาณจะผ่านส่วนขยายสัญญาณก่อนจะเข้าสู่ส่วน Phase-Sensitive Detection ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่มีเฟสหรือความถี่เดียวกับสัญญาณ อ้างอิงเพื่อทำการบวกหรือลบสัญญาณ สัญญาณลัพท์ที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของกระแสตรงก่อน ผ่านวงจรกรองแบบ Low pass และจะขยายสัญญาณอีกครั้ง โดยสัญญาณเอาต์พุตสามารถอ่านได้จากหน้าจอแอลซีดี



รูปที่ 2.13 แสดงภาพ lock-in amplifier

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก^[1] โดย กรรณก ทาสีขาว, คมสันต์ เย็นไรสง และ พนิดา ปิ่นประเสริฐ เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์และการวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ

2. Synthesis and characterization of silver doped ZnO nanoparticles โดย Ruby Chauhana, Ashavani Kumar and Ram Pal Chaudhary^[5] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์และสมบัติบางประการของซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์

3. Photoacoustic Measurements of Thermal Diffusivity or Thickness of Multi-layer Solids โดย S. Yun และ H. Seo^[6] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าการกระจายความร้อนของโลหะด้วยวิธีการโฟโตอะคูสติก

4. Photoacoustic Effect in Condensed Media-Theory เนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของ Rosencwaig-Gersho ซึ่งเป็นทฤษฎีที่มีความสำคัญต่อการทดลองใดๆที่เกี่ยวกับโฟโตอะคูสติก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีโฟโตอะคูสติก การเตรียมสารซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์ซิลเวอร์และคาร์บอนแบล็ค
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาและทดลองใช้งานระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี
- ขั้นตอนที่ 3 เตรียมซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 1% และเขียนโปรแกรมควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้ LabView
- ขั้นตอนที่ 4 วัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและวัดค่าการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์ไดโพลิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปีที่ขนาดของเกรนต่างกัน 3 ระดับ
- ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ขั้นตอนที่	มิ.ย. - ก.ค. 2559	ส.ค. 2559	ก.ย. 2559 – ม.ค. 2560	ก.พ. – มี.ค. 2560	เม.ย. 2560
1					
2					
3					
4					
5					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์สาร

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

3.3.1 สังเคราะห์สาร

1. นำ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 14.23323g และ $AgNO_3$ 0.08495g 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
3. นำสารละลายในข้อ 1. ปริมาตร 50 ml ไปใส่ในปีกเกอร์ แล้วคนด้วยเครื่องคนสารที่หมุนด้วยความเร็วต่ำและทำงานที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 2. ปริมาตร 50 ml ลงไปจนเกิดการอิมตัวของปฏิกิริยาและได้ตะกอนสีขาวขุ่น โดยให้เครื่องคนสารทำงานต่อเป็นเวลา 2 ชม.
4. นำสารละลายที่อิมตัวในข้อ 3. มากรองเอาตะกอน แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ประมาณ 1- 2 L
5. นำกระดาษกรองใส่ plate แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ $110^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชม.
6. นำตะกอนมาใส่ crucible ปิดฝาให้มิดชิด แล้วนำไปเผาด้วยเตาหลอมที่อุณหภูมิ $500^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชม.
7. แบ่งผงของซิลเวอร์ไดโอบซิงค์ออกไซด์ที่เผาแล้วออกเป็น 2 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ส่วนที่ 1 เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธี XRD เพื่อตรวจสอบว่าสารทดสอบที่ได้ คือ ซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์หรือไม่
9. ส่วนที่ 2 นำมาแบ่งอีกเป็น 3 ส่วนย่อย แล้วนำแต่ละส่วนย่อยๆ ไปบดด้วยครก เพื่อให้มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ระดับ
10. นำส่วนที่ 2 ทั้งหมดไปวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Analyzer เพื่อเป็นการยืนยันว่าแต่ละส่วนย่อยมีขนาดที่ต่างกันจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 อัดเม็ดสารซิลเวอร์ไดโบลิงค์ออกไซด์

เนื่องจากซิลเวอร์ไดโบลิงค์ออกไซด์เป็นผง จึงต้องมีขั้นตอนการอัดเม็ดสารทดสอบ เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบโฟโตอะคูสติกได้ง่าย บล็อกอัดสารที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย อุปกรณ์และวิธีใช้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร



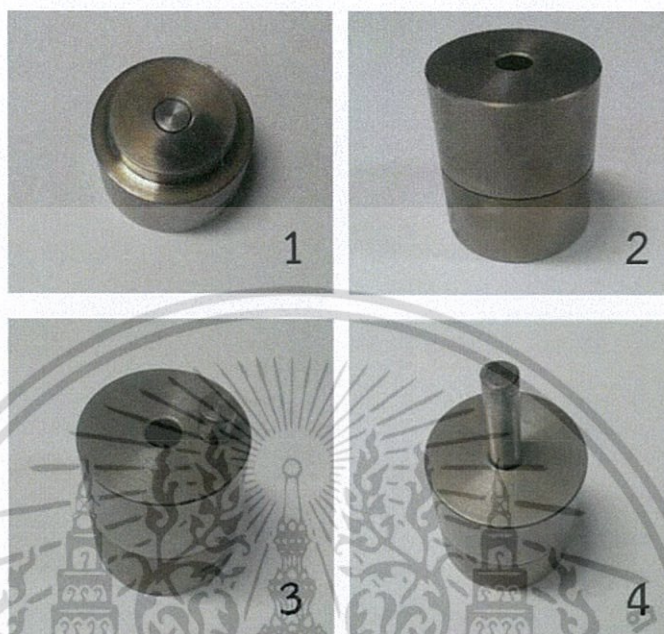
รูปที่ 3.2 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก

นำส่วนที่ 2 จากขั้นตอนการสังเคราะห์สารมาอัดเม็ด ซึ่งแต่ละส่วนมีน้ำหนัก 0.1 กรัม และถูกบดด้วยครกที่ระยะเวลาต่างกัน ส่วนที่ 1 ไม่ทำการบด ส่วนที่ 2 ทำการบด 10 นาที และส่วนที่ 3 ทำการบด 20 นาที แล้วนำผงทั้ง 3 ส่วนไปอัดเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการอัดสาร

ทำการวางอุปกรณ์ดังภาพแล้วใส่สารที่ต้องการจะอัดลงไป ในขั้นตอนที่ 2 เมื่อจัดอุปกรณ์จนถึงขั้นตอนที่ 4 แล้วให้ทำไปอัดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ในการอัดเม็ดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

ทำการอัดเม็ดซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิก 5 ตัน โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ตัน ทิ้งไว้ครั้งละ 1 นาที รวมเวลาในการอัดเม็ดทั้งสิ้น 5 นาที (เวลาในการอัดนี้ หมายถึง เวลาที่กระบอกสูบของเครื่องอัดไฮดรอลิกกดทับบล็อกอัดสารก่อนที่จะคลายออก)

3.3.3 การหาช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ 1% โดยโมล

1. ทำการติดตั้งระบบโฟโตอะคูสติคตามภาพที่ 3.4
2. นำคาร์บอนแบล็คใส่ในโฟโตอะคูสติคเซลล์ เพื่อทำการวัดสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดแสง
3. เปิดสวิตช์ของอุปกรณ์ทุกเครื่อง เปิดพัดลมของแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อระบายความร้อนให้กับแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นเปิดสวิตช์หลอดไฟทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ระบบเตรียมความพร้อม แล้วจึงเปิดโปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น (เวลาปิดให้ปิดไฟก่อน แล้วปล่อยให้พัดลมระบายความร้อนต่อไปอย่างน้อย 30 นาทีจึงปิดได้)
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติคจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 nm - 740 nm โดยเพิ่มครั้งละ 1 nm และให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz
5. เปลี่ยนจากคาร์บอนแบล็คเป็นซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ โดยให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz
6. นำผลการทดลองที่ได้จากซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ไป normalized กับผลการทดลองที่ได้จากคาร์บอนแบล็ค แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและแอมพลิจูดของสัญญาณโฟโตอะคูสติคที่นอร์มัลไลซ์แล้ว
7. พิจารณาความยาวคลื่นแสงที่ซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์เริ่มไม่ดูดกลืน นำค่าความยาวคลื่นนี้มาคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน

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

3.3.4 การหาการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์โตนิงค์ออกไซด์

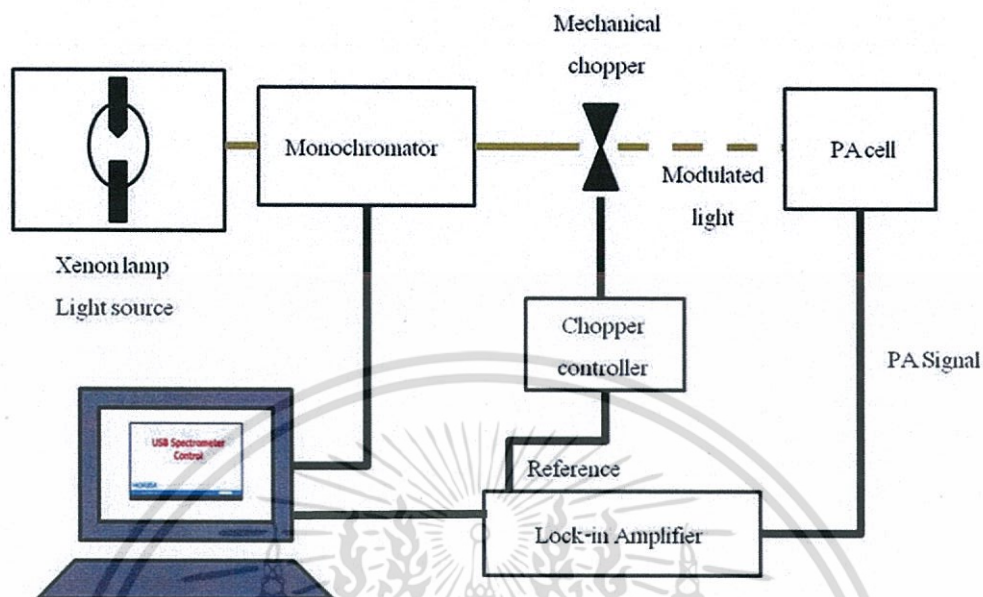
1. ทำการติดตั้งระบบโพโตอะคูสติกตามภาพที่ 3.4
2. ขั้นแรกทำการทดลองโดยยังไม่ใส่ซิลเวอร์โตนิงค์ออกไซด์
3. ใช้โปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น ปรับให้แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 390 nm เพราะมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืน และเกิดปรากฏการณ์โพโตอะคูสติก
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ความถี่ของตัวตัดแสงตั้งแต่ 5 - 50 Hz โดยเพิ่มครั้งละ 1 Hz
5. นำซิลเวอร์โตนิงค์ออกไซด์ใส่ในโพโตอะคูสติกเซลล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 3 - 4 อีกครั้ง
6. นำข้อมูลของซิลเวอร์โตนิงค์ออกไซด์มา Normalize ด้วยข้อมูลการทดลองตอนที่ยังไม่ใส่ซิลเวอร์โตนิงค์ออกไซด์
7. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูก Normalized แล้ว (แกน Y) กับ ส่วนกลับของความถี่ (แกน X)
8. พิจารณาหาจุดเปลี่ยนความชันของกราฟเส้นตรงค่า ความถี่ ณ จุดนั้นคือ Characteristic frequency (f_c)
9. นำ f_c ที่ได้ไปคำนวณหาค่าการกระจายทางความร้อนของแต่ละตัวอย่าง

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

เมื่อ l คือ ความหนาของสารตัวอย่าง ที่วัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

3.4 การใช้งานอุปกรณ์และโปรแกรมเพื่อการทดลอง

3.4.1 การจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี

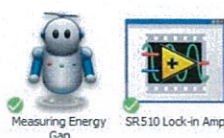
การจัดระบบ จะเป็นดังรูปที่ 3.4 ดังนี้

แหล่งกำเนิดแสงจะต่อเข้ากับเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) เครื่องแยกความยาวคลื่นจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมเพื่อเลือกความยาวคลื่นของแสงที่ออกมา โดยแสงที่ออกมาจะถูกมอดูเลตแสงด้วยตัวตัดแสงเชิงกล (Mechanical chopper) ซึ่งตัวตัดแสงจะถูกควบคุมความถี่ในการตัดแสงด้วย Chopper controller และแสงที่ถูกมอดูเลตนี้จะเข้าไปตกกระทบสารทดสอบภายใน Photoacoustic cell ความดันที่เปลี่ยนไปภายใน Photoacoustic cell จะถูกตรวจจับได้โดยไมโครโฟน, Reference ของ Lock-in Amplifier จะต่อเข้ากับ Chopper controller เพื่อรับสัญญาณอ้างอิงจาก Chopper ส่วน input ของ Lock-in Amplifier จะต่อเข้ากับ Photoacoustic cell เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณความดันและแสดงผลออกมาทางหน้าจอแอลซีดี และ Port RS-232 ของ Lock-in Amplifier จะต่อเข้ากับ Computer เพื่อใช้งานโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดย LabView เพื่อควบคุมและบันทึกค่าจาก Lock-in Amplifier

3.4.2 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมในการทดลอง

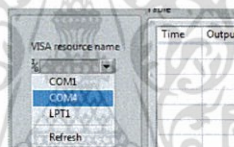
การทดลองเพื่อหาค่า Energy Gap

1. ตั้งค่าโปรแกรม HJY Spectrometer ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่นแสง ตามที่เขียนไว้ในภาคผนวกและกำหนดความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ 340 nm
2. เปิดโปรแกรม Measuring Energy Gap และ SR510 Lock-in Amp



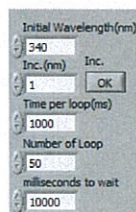
รูปที่ 3.5 แสดง icon โปรแกรม Measuring Energy Gap และ SR510 Lock-in Amp

3. เลือก Port ให้ตรงกับ Lock-in Amplifier ตรงหัวข้อ VISA resource name (ณ ที่นี้คือ COM4)



รูปที่ 3.6 แสดงการเลือก Port

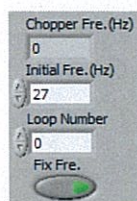
4. ตั้งค่าความยาวคลื่นแสงเริ่มต้น (Initial Wavelength) ในการทดลอง ค่าความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้เพิ่ม (increasing) ในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น (ณ ที่นี้กำหนดให้ Initial Wavelength = 340 และ Inc. = 1) และรูปแบบการเก็บข้อมูล Time per loop คือ ช่วงเวลาระหว่างการเก็บค่าแต่ละครั้ง หน่วยเป็น millisecond ส่วน Number of Loop คือ จำนวนครั้งในการเก็บข้อมูลสำหรับความยาวคลื่นหนึ่งๆ และ milliseconds to wait คือระยะเวลาพักการเก็บค่าหลังจากมีการเปลี่ยนความยาวคลื่น (ณ ที่นี้ กำหนดให้ Time per loop = 1000 , Number of Loop = 50 และ milliseconds to wait = 10000)



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง

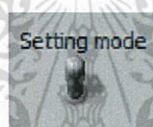
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งค่าความถี่ chopper ให้เหมาะสม (ณ ที่นี้จะตั้งค่าความถี่ chopper เท่ากับ 27 Hz) และกดปุ่ม Fix Fre. เพื่อไม่ให้ความถี่เปลี่ยนแปลงอัตโนมัติ



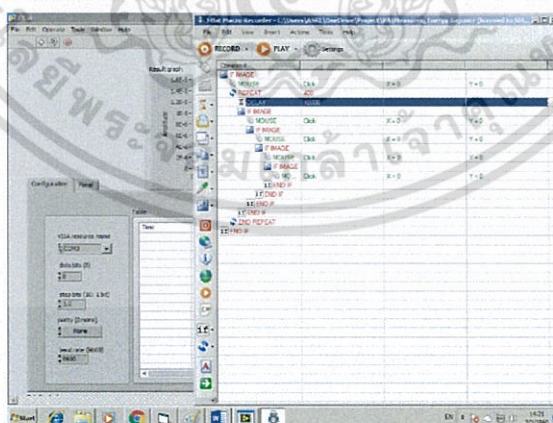
รูปที่ 3.8 แสดงส่วนของการตั้งค่าความถี่ตัวตัดแสง

6. ทำการกดตรงปุ่ม Setting mode ให้เป็นดังภาพที่ปรากฏ เพื่อให้โปรแกรม SR510 Lock-in Amp ไม่ทำงานอัตโนมัติและทำงานร่วมกับ Measuring Energy Gap ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.9 แสดงสวิตซ์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม

7. จัดวางหน้าจอของโปรแกรมต่างๆที่เข้าร่วมกันดังภาพ โปรแกรม Measuring Energy Gap อยู่บนสุดลงลงมาคือ SR510 Lock-in Amp และสุดท้ายคือ HJY Spectrometer



รูปที่ 3.10 แสดงการจัดวางหน้าจอของโปรแกรมต่างๆเพื่อใช้งาน

8. ทำการกดปุ่ม Play ในโปรแกรม Measuring Energy Gap เมื่อพร้อมเริ่มการทดลอง โดยที่โปรแกรมจะทำการบันทึก Output ของ Lock-in Amplifier ในช่วงความยาวคลื่นแสง 340 ถึง 740 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

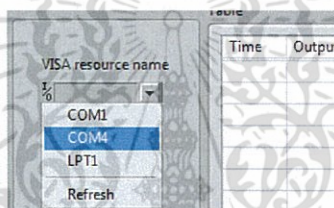
การทดลองเพื่อหาค่า Thermal diffusivity

1. ตั้งค่าโปรแกรม HJY Spectrometer ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่นแสง ตามที่เขียนไว้ในภาคผนวกและกำหนดความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ 340 nm
2. เปิดโปรแกรม SR510 Lock-in Amp



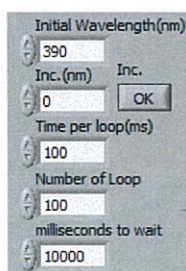
รูปที่ 3.11 แสดงไอคอนของโปรแกรม SR510 Lock-in Amp

3. เลือก Port ให้ตรงกับ Lock-in Amplifier ตรงหัวข้อ VISA resource name (ณ ที่นี้คือ COM4)



รูปที่ 3.12 แสดงการเลือก Port

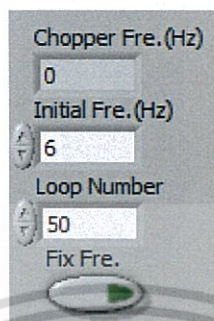
4. ตั้งค่าความยาวคลื่นแสงเริ่มต้น (Initial Wavelength) ในการทดลอง ค่าความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้เพิ่ม (increasing) ในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น (ณ ที่นี้กำหนดให้ Initial Wavelength = 390 และ Inc. = 0) และรูปแบบการเก็บข้อมูล Time per loop คือ ช่วงเวลาระหว่างการเก็บค่าแต่ละครั้ง หน่วยเป็น millisecond ส่วน Number of Loop คือ จำนวนครั้งในการเก็บข้อมูล ณ ความถี่ของตัวตัดแสงค่าใดค่าหนึ่ง และ milliseconds to wait คือ ระยะเวลาพักการเก็บค่าหลังจากมีการเปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสง (ณ ที่นี้ กำหนดให้ Time per loop = 100 , Number of Loop = 100 และ milliseconds to wait = 10000)



รูปที่ 3.13 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งค่าความถี่ chopper เริ่มต้น ให้เหมาะสม (ณ ที่นี้ Initial Fre. เท่ากับ 6 Hz) และไม่กดปุ่ม Fix Fre. เพื่อให้ความถี่เปลี่ยนแปลงอัตโนมัติ และกำหนดจำนวนรอบการในเพิ่มความถี่ Chopper (รอบละ 1 Hz ณ ที่นี้กำหนดเท่ากับ 50 รอบ)



รูปที่ 3.14 แสดงส่วนของการตั้งค่าความถี่ตัวตัดแสง

6. ทำการกดปุ่ม Setting mode ให้เปิดดังภาพที่ปรากฏ เพื่อให้โปรแกรม SR510 Lock-in Amp ทำงานเองอัตโนมัติ



รูปที่ 3.15 แสดงสวิตซ์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม

7. กดปุ่มลูกศรสีขาวตรงมุมซ้ายบนของโปรแกรมเพื่อเริ่มทำการบันทึกค่า

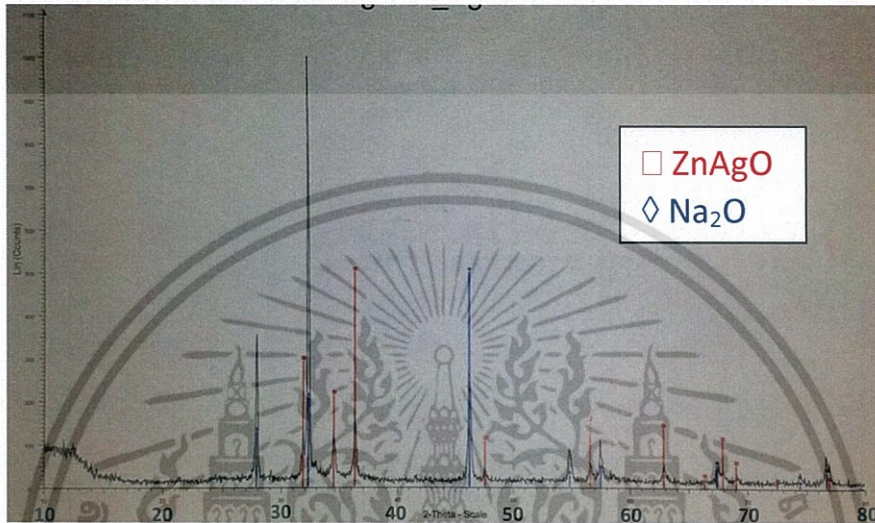


รูปที่ 3.16 แสดงปุ่มสำหรับเริ่มทำงานโปรแกรม

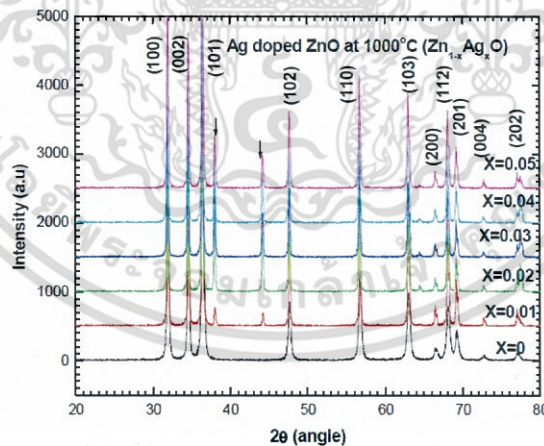
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวัด X-ray diffraction ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม



รูปที่ 4.1 แสดงผลการวัด XRD ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม



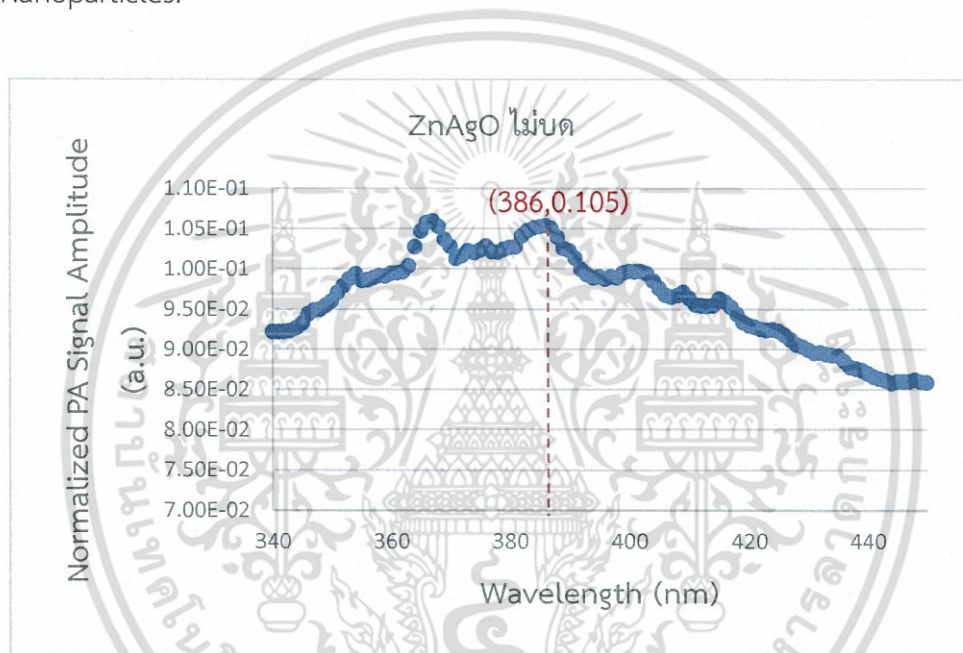
รูปที่ 4.2 แสดงผล XRD ของ ZnAgO ที่ Mole fraction ค่าต่างๆ^[5]

จากผล XRD พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนร่วม คือ $Zn_{0.99}Ag_{0.01}O$ และ Na_2O ซึ่งสาร Na_2O ไม่ใช่สารที่ผู้วิจัยสนใจศึกษา แต่เป็นสารที่ปนเปื้อนมาจากขั้นตอนการสังเคราะห์ เนื่องจากสารตั้งต้นมีสาร $NaHO$ และ $NaCO_3$ อยู่ ดังนั้นหากกรองไม่ดีพอ สารประกอบของ Na อาจจะหลงเหลืออยู่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO

จากการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO ได้ผลลัพธ์ประมาณ 3.2 eV เนื่องจากสารตัวอย่างมี Na₂O ปนเปื้อน และเราคาดการณ์ว่า Na₂O น่าจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เราจึงคาดการณ์การที่มีสารที่เป็นฉนวนปนอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่สนใจจะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยเทคนิคโฟโตอะคูสติก ดังนั้นเราอาจจะสรุปได้ว่าค่าวัดได้เป็นค่าของซิลเวอร์ไดโปกิ้งออกไซด์ ดังนั้นการโดปซิลเวอร์ในซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนโมลน้อยๆไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Sánchez Zeferino, M. Barboza Flores, และ U. Pal ในหัวข้อเรื่อง Photoluminescence and Raman Scattering in Ag-doped ZnO Nanoparticles.^[8]



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บดและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง

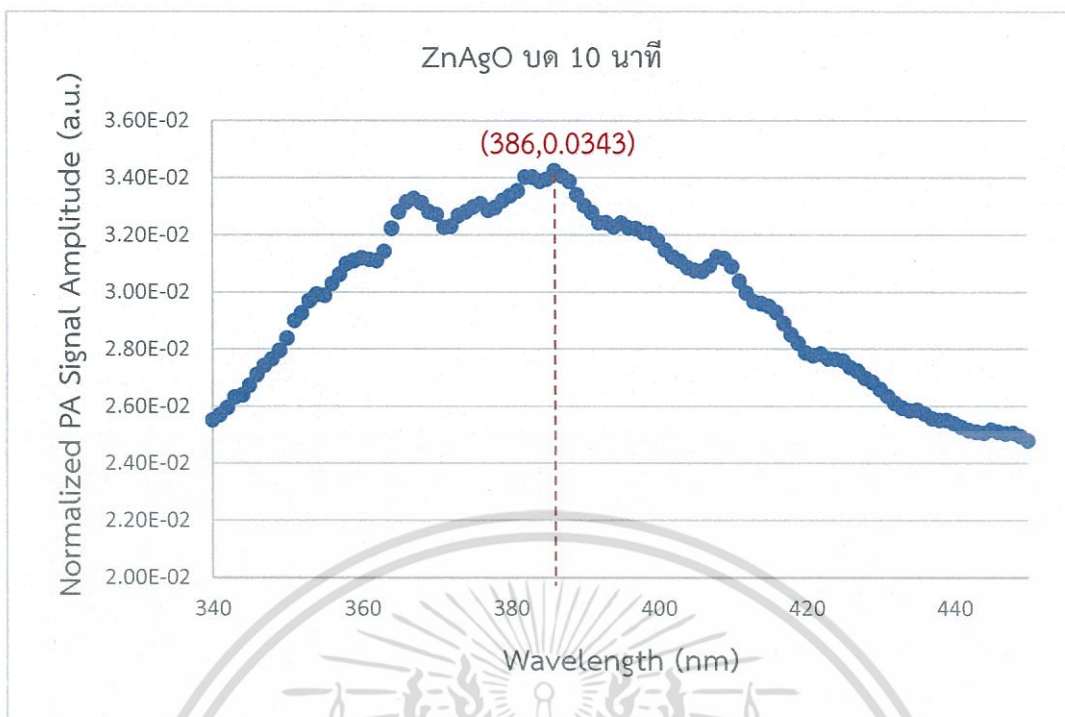
จากความสัมพันธ์

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

$$E = \frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (299,792,458)}{(386 \times 10^{-9}) \times (1.60217662 \times 10^{-19})}$$

$$E = 3.21 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาทีและถูกนอมีลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง

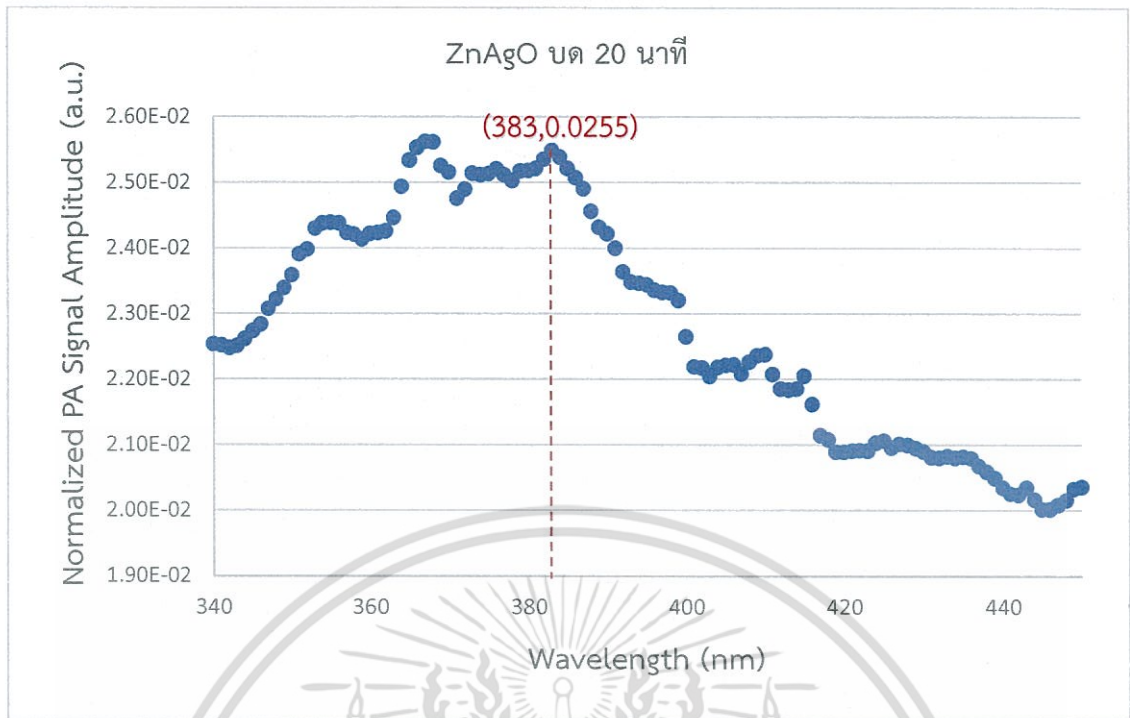
จากความสัมพันธ์

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

$$E = \frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (299,792,458)}{(386 \times 10^{-9}) \times (1.60217662 \times 10^{-19})}$$

$$E = 3.21 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติคของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง

จากความสัมพันธ์

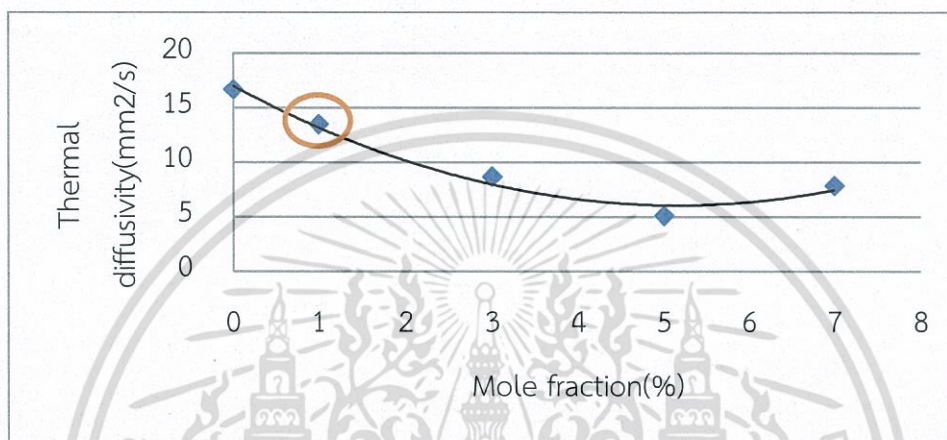
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = \frac{(6.626 \times 10^{-34}) \times (299,792,458)}{(383 \times 10^{-9}) \times (1.60217662 \times 10^{-19})}$$

$$E = 3.24 \text{ eV}$$

4.2 ผลการวัดค่าการกระจายทางความร้อนของ ZnAgO

ในการทดลองเกี่ยวกับค่าการกระจายความร้อนพบว่า หากนำข้อมูลค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดออกไซด์ (ปนเปื้อนด้วย Na_2O) ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 0%, 3%, 5% และ 7% ของงานวิจัยก่อนหน้า^[2] มาสร้างกราฟพร้อมกับค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์ไดออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 1% ของการทดลองนี้ พบว่าค่าจากการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าการทดลองก่อนหน้าและกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลาหงาย ซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 5%



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับค่าอัตราส่วนโมล

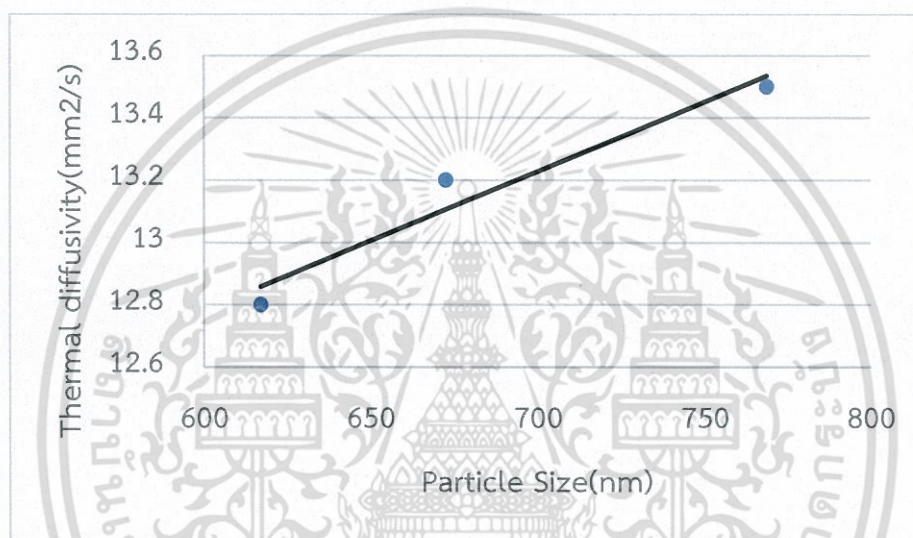
ส่วนในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับค่าการกระจายความร้อนพบว่า ค่าการกระจายความร้อนมีค่าแปรผันตามขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุได้ดังนี้ จากสมการของค่าการกระจายความร้อน

$$\alpha = \frac{K}{\rho c}$$

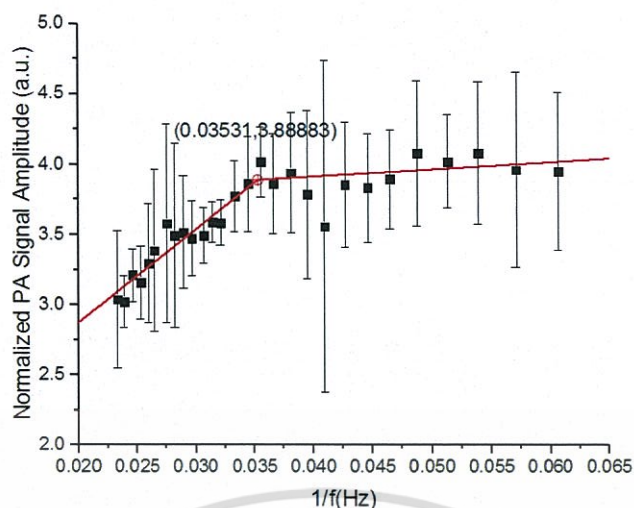
และสมมติว่าการบดแล้วอัดสารให้แน่นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสาร ผู้วิจัยจึงคาดว่าในงานวิจัยนี้ความหนาแน่นของสารเป็นค่าคงที่ และจากงานวิจัยของ Ghanshyam R. Patel, Nilesch A. Thakar และ Tushar C. Pandya ในหัวข้อเรื่อง Effect of Size on Specific Heat and Debye Temperature of Nanomaterials^[9] ทำให้ทราบว่าวัสดุที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 100 nm ค่าความจุความร้อนจำเพาะจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น และจากการวัด Particle Size ทำให้ทราบว่าในการทดลองนี้ขนาดของอนุภาคมีค่าอยู่ในช่วง 600 ถึง 800 nm ดังนั้นค่าความจุความร้อนจำเพาะในสมการค่าการกระจายความร้อน α อุณหภูมิคงที่จะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะเหลือเพียงค่าการนำความร้อนเท่านั้นที่ต้องพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราตั้งสมมติฐานว่าการบดทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงแล้วส่งผลทำให้เกิด defect (Grain boundary) มากขึ้น ซึ่งเมื่อมี defect มาก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะที่นำความร้อน ก็จะยากลำบากมากขึ้นจึงทำให้การนำความร้อนได้แยลงตามขนาดของอนุภาคที่เล็กลงเมื่อพิจารณา ร่วมกับงานวิจัยของ Vangala Dhanunjana Chari, Deepala VSGK Sharma, Pinnelli SR Prasad และ S Ramana Murthy ในหัวข้อเรื่อง Dependence of Thermal Conductivity in micro to nano silica^[10] ทำให้ทราบว่าสำหรับซิลิกาแล้วค่าการนำความร้อนแปรผันตามขนาดของอนุภาค เป็นไปได้ว่าค่าการนำความร้อนของสารอื่นๆรวมถึง ZnAgO จะมีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นค่าการกระจายความร้อนของ ZnAgO จึงแปรผันตามขนาดของอนุภาค



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับขนาดของอนุภาค



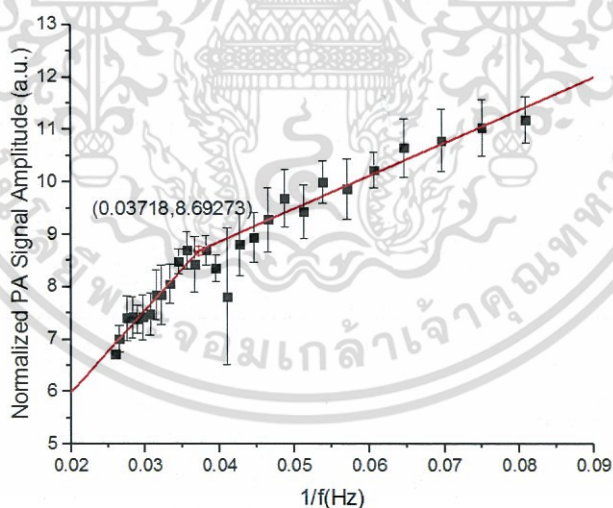
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

$$f_c = \frac{1}{0.03531} = 28.3$$

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c$$

$$\alpha = 0.40^2 \times \pi \times 28.3$$

$$\alpha = 14.2 \text{ mm}^2/\text{s}$$



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บดและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

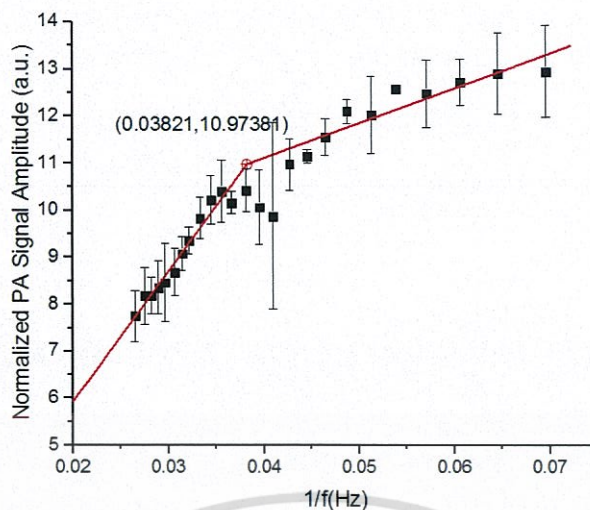
$$f_c = \frac{1}{0.0345} = 26.9$$

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c$$

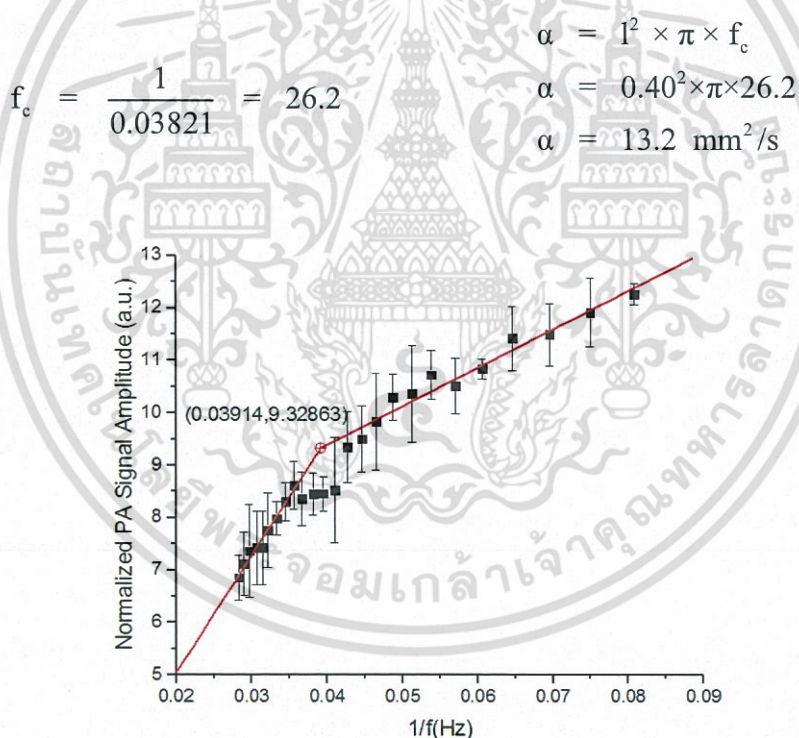
$$\alpha = 0.40^2 \times \pi \times 26.9$$

$$\alpha = 13.5 \text{ mm}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 10 นาทีและถูก นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บด 20 นาทีและถูก นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

$$f_c = \frac{1}{0.03914} = 25.5$$

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c$$

$$\alpha = 0.40^2 \times \pi \times 25.5$$

$$\alpha = 12.8 \text{ mm}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผลจากการวิจัยทำให้เราทราบค่าการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO ที่มีการปน-เปื้อนของ Na₂O เท่ากับ 3.2 eV และจากการคาดการณ์ Na₂O น่าจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เราจึงคาดว่า Na₂O ที่ปนอยู่จะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นเราคาดว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.2 eV ซึ่งจะใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น^[8] ดังนั้นจากผลการทดลองทำให้ทราบว่าซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์ด้วยซิลเวอร์ในอัตราส่วนโมลน้อยๆไม่ทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์ไดโปกซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง^[8]

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมลกับค่าการกระจายความร้อน พบว่าเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้รวมกันกับการทดลองที่มีมาก่อนหน้า^[1] จะได้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์เป็นแบบพาราโบลาหงาย

ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคในช่วง 600 ถึง 800 nm และค่าการกระจายความร้อนมีลักษณะแปรตามกัน กล่าวคือ เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ค่าการกระจายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน ถ้าขนาดอนุภาคเล็กลง ค่าการกระจายความร้อนก็จะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากข้อคาดการณ์ที่ว่าความหนาแน่นของสารมีค่าคงที่ การทดลองที่อุณหภูมิคงที่จึงทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารมีค่าคงที่^[9] และการแปรผันตามของค่าการนำความร้อนกับขนาดของอนุภาค^[10] จึงทำให้ค่าการกระจายความร้อนแปรผันตามขนาดของอนุภาค

5.2 ข้อเสนอแนะ

สาเหตุของการปนเปื้อนของ Na₂O ผู้วิจัยคาดว่าเกิดขึ้นในขั้นตอนการกรอง ผู้ทดลองควรใช้น้ำ DI อุ่นๆ มากกว่าที่จะใช้น้ำ DI ในอุณหภูมิห้องในการล้างสารบนกระดาษกรอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมที่ใช้สำหรับความคุมการทำงาน Lock-in Amplifier และ Optical Chopper โปรแกรมนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานไม่สามารถใช้งาน Lock-in Amplifier ได้ทุกฟังก์ชันการทำงาน เพราะฟังก์ชันทำงานบางอย่างไม่จำเป็นต้องการทดลอง ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Lock-in Amplifier ใช้เป็น Serial Port RS-232 จึงมีข้อจำกัดในการส่งข้อมูล และอัลกอริทึมของโปรแกรมยังออกแบบได้ไม่ดีพอ

นอกจากนี้ จากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของตัวซอปรอยยังพบการเปลี่ยนแปลงของ

สัญญาณที่ผิดปกติที่บริเวณ $\frac{1}{f} \approx 0.04$ ซึ่งควรมีการตรวจสอบว่าเกิดจากการเป็นครึ่งหนึ่งของไฟ

บ้าน(50Hz) หรือเกิดจากเหตุอื่น หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นางสาวกรรณก ทาสีขาว, นายคมสันต์ เย็นไธสง และนางสาวพนิดา ปิ่นประเสริฐ. 2559. THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF Ag DOPED ZnO USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] นางสาวมนฤทัย กกฟ้า, นางสาวมูทิตา มาตยาขัน และนายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์. 2559. THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF Cds USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] วิกิพีเดีย. 2559. การนำความร้อน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/การนำความร้อน>.
- [4] DARRYL ALMOND, and PRAVIN PATEL. *Photothermal Science and Techniques*. London : CHAPMAN & HALL, 1996.
- [5] 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.
- [6] S. Yun, H. Seo. 1983. Photoacoustic measurements of thermal diffusivity or thickness of multi-layer solids. *Journal de Physique Colloques*, 44 (C6), pp.C6-459-C6-462. <10.1051/jphyscol:1983673>. <jpa-00223232>.
- [7] Anderson Janotti and Chris G Van de Walle. 2009. *Fundamentals of zinc oxide as a Semiconductor*. IOP Publishing.
- [8] R. Sánchez Zeferino, M. Barboza Flores, and U. Pal. 2011. Photoluminescence and Raman Scattering in Ag-doped ZnO Nanoparticles. *Journal of Applied Physics* 109, 014308(2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Ghanshyam R. Patel, Nilesh A. Thakar and Tushar C. Pandya³. 2016. Effect of size on specific heat and Debye temperature of nanomaterials. American Institute of Physics.
- [10] Vangala Dhanunjana Chari, Deepala VSGK Sharma, Pinnelli SR Prasad and S Ramana Murthy. 2013. Dependence of Thermal Conductivity in micro to nano silica. Indian Academy of Sciences.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวอย่างการเตรียมสาร

1.1 การเตรียมสารละลาย $Zn_{(1-x)}Ag_xO$ ด้วยวิธี %mol

ตัวอย่างการคำนวณ $ZnAgO$ 1%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
(99%) ของ	0.1	M	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	หนัก	$\frac{99}{100} \times 28.754$ g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
ดังนั้นต้องเตรียม			$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	=	28.46646 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
หรือ			$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	=	14.23323 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
(1%) ของ	0.1	M	$AgNO_3$	หนัก	$\frac{1}{100} \times 16.987$ g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
ดังนั้นต้องเตรียม			$AgNO_3$	=	0.1699 g	ในน้ำกลั่น 1,000 ml
หรือ			$AgNO_3$	=	0.08495 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

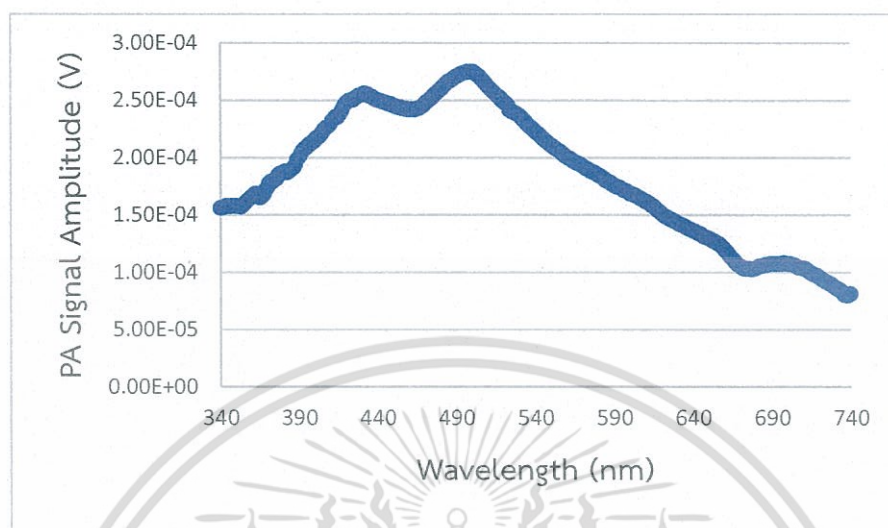
2.2) เตรียม 0.1M Na_2O_3

	1	mol	Na_2O_3	หนัก	105.99 g	
	0.1	mol	Na_2O_3	หนัก	10.599 g	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลอื่นๆจากการทดลอง

2.1 สเปกตรัมคาร์บอนแบล็ค



รูปที่ 6.1 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

ตารางที่ 6.1 แสดงแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆของคาร์บอนแบล็ค

λ (nm)	Photoacoustic Signal (V)
340	1.55E-04
341	1.56E-04
342	1.56E-04
343	1.56E-04
344	1.57E-04
345	1.57E-04
346	1.57E-04
347	1.57E-04
348	1.57E-04
349	1.57E-04
350	1.57E-04
351	1.57E-04
352	1.57E-04
353	1.57E-04
354	1.57E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

355	1.59E-04
356	1.60E-04
357	1.61E-04
358	1.62E-04
359	1.64E-04
360	1.65E-04
361	1.66E-04
362	1.68E-04
363	1.68E-04
364	1.66E-04
365	1.65E-04
366	1.65E-04
367	1.66E-04
368	1.68E-04
369	1.71E-04
370	1.73E-04
371	1.77E-04
372	1.78E-04
373	1.78E-04
374	1.79E-04
375	1.80E-04
376	1.81E-04
377	1.84E-04
378	1.85E-04
379	1.86E-04
380	1.86E-04
381	1.87E-04
382	1.87E-04
383	1.87E-04
384	1.88E-04
385	1.89E-04
386	1.90E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

387	1.91E-04
388	1.94E-04
389	1.97E-04
390	1.99E-04
391	2.01E-04
392	2.04E-04
393	2.06E-04
394	2.07E-04
395	2.08E-04
396	2.10E-04
397	2.11E-04
398	2.12E-04
399	2.13E-04
400	2.14E-04
401	2.16E-04
402	2.17E-04
403	2.18E-04
404	2.20E-04
405	2.22E-04
406	2.23E-04
407	2.25E-04
408	2.26E-04
409	2.27E-04
410	2.28E-04
411	2.31E-04
412	2.33E-04
413	2.34E-04
414	2.35E-04
415	2.35E-04
416	2.37E-04
417	2.39E-04
418	2.42E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

419	2.45E-04
420	2.47E-04
421	2.48E-04
422	2.49E-04
423	2.49E-04
424	2.50E-04
425	2.50E-04
426	2.51E-04
427	2.52E-04
428	2.53E-04
429	2.54E-04
430	2.54E-04
431	2.55E-04
432	2.55E-04
433	2.55E-04
434	2.55E-04
435	2.53E-04
436	2.53E-04
437	2.52E-04
438	2.51E-04
439	2.50E-04
440	2.50E-04
441	2.49E-04
442	2.49E-04
443	2.48E-04
444	2.48E-04
445	2.47E-04
446	2.47E-04
447	2.47E-04
448	2.46E-04
449	2.46E-04
450	2.45E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

451	2.45E-04
452	2.44E-04
453	2.44E-04
454	2.43E-04
455	2.43E-04
456	2.43E-04
457	2.42E-04
458	2.42E-04
459	2.42E-04
460	2.42E-04
461	2.41E-04
462	2.42E-04
463	2.42E-04
464	2.42E-04
465	2.42E-04
466	2.42E-04
467	2.43E-04
468	2.44E-04
469	2.45E-04
470	2.46E-04
471	2.47E-04
472	2.48E-04
473	2.50E-04
474	2.51E-04
475	2.52E-04
476	2.53E-04
477	2.55E-04
478	2.56E-04
479	2.57E-04
480	2.59E-04
481	2.60E-04
482	2.62E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

483	2.63E-04
484	2.64E-04
485	2.66E-04
486	2.66E-04
487	2.66E-04
488	2.68E-04
489	2.69E-04
490	2.70E-04
491	2.71E-04
492	2.71E-04
493	2.72E-04
494	2.73E-04
495	2.73E-04
496	2.74E-04
497	2.74E-04
498	2.74E-04
499	2.74E-04
500	2.74E-04
501	2.74E-04
502	2.73E-04
503	2.72E-04
504	2.71E-04
505	2.70E-04
506	2.69E-04
507	2.67E-04
508	2.65E-04
509	2.64E-04
510	2.62E-04
511	2.61E-04
512	2.59E-04
513	2.58E-04
514	2.56E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

515	2.55E-04
516	2.54E-04
517	2.53E-04
518	2.52E-04
519	2.50E-04
520	2.49E-04
521	2.48E-04
522	2.46E-04
523	2.45E-04
524	2.41E-04
525	2.40E-04
526	2.39E-04
527	2.39E-04
528	2.38E-04
529	2.37E-04
530	2.36E-04
531	2.35E-04
532	2.34E-04
533	2.32E-04
534	2.31E-04
535	2.29E-04
536	2.28E-04
537	2.27E-04
538	2.25E-04
539	2.24E-04
540	2.23E-04
541	2.22E-04
542	2.21E-04
543	2.19E-04
544	2.18E-04
545	2.16E-04
546	2.15E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

547	2.14E-04
548	2.13E-04
549	2.12E-04
550	2.11E-04
551	2.10E-04
552	2.09E-04
553	2.08E-04
554	2.07E-04
555	2.06E-04
556	2.05E-04
557	2.04E-04
558	2.03E-04
559	2.01E-04
560	2.00E-04
561	1.99E-04
562	1.99E-04
563	1.98E-04
564	1.97E-04
565	1.96E-04
566	1.95E-04
567	1.95E-04
568	1.94E-04
569	1.93E-04
570	1.93E-04
571	1.92E-04
572	1.91E-04
573	1.90E-04
574	1.89E-04
575	1.88E-04
576	1.88E-04
577	1.87E-04
578	1.86E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

579	1.85E-04
580	1.85E-04
581	1.84E-04
582	1.83E-04
583	1.82E-04
584	1.81E-04
585	1.80E-04
586	1.79E-04
587	1.79E-04
588	1.78E-04
589	1.77E-04
590	1.76E-04
591	1.75E-04
592	1.74E-04
593	1.74E-04
594	1.73E-04
595	1.72E-04
596	1.71E-04
597	1.71E-04
598	1.70E-04
599	1.70E-04
600	1.69E-04
601	1.68E-04
602	1.67E-04
603	1.67E-04
604	1.67E-04
605	1.66E-04
606	1.65E-04
607	1.64E-04
608	1.63E-04
609	1.62E-04
610	1.62E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

611	1.61E-04
612	1.60E-04
613	1.59E-04
614	1.58E-04
615	1.57E-04
616	1.56E-04
617	1.55E-04
618	1.54E-04
619	1.53E-04
620	1.51E-04
621	1.50E-04
622	1.49E-04
623	1.48E-04
624	1.47E-04
625	1.46E-04
626	1.46E-04
627	1.45E-04
628	1.44E-04
629	1.44E-04
630	1.43E-04
631	1.42E-04
632	1.42E-04
633	1.41E-04
634	1.40E-04
635	1.40E-04
636	1.39E-04
637	1.38E-04
638	1.37E-04
639	1.37E-04
640	1.36E-04
641	1.35E-04
642	1.35E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

643	1.34E-04
644	1.34E-04
645	1.33E-04
646	1.32E-04
647	1.31E-04
648	1.30E-04
649	1.30E-04
650	1.29E-04
651	1.29E-04
652	1.28E-04
653	1.27E-04
654	1.26E-04
655	1.25E-04
656	1.25E-04
657	1.24E-04
658	1.23E-04
659	1.21E-04
660	1.19E-04
661	1.18E-04
662	1.17E-04
663	1.15E-04
664	1.13E-04
665	1.12E-04
666	1.11E-04
667	1.09E-04
668	1.07E-04
669	1.06E-04
670	1.05E-04
671	1.04E-04
672	1.03E-04
673	1.03E-04
674	1.03E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปทำประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

675	1.03E-04
676	1.03E-04
677	1.02E-04
678	1.02E-04
679	1.03E-04
680	1.03E-04
681	1.04E-04
682	1.04E-04
683	1.05E-04
684	1.05E-04
685	1.06E-04
686	1.06E-04
687	1.06E-04
688	1.06E-04
689	1.07E-04
690	1.07E-04
691	1.07E-04
692	1.07E-04
693	1.07E-04
694	1.07E-04
695	1.07E-04
696	1.07E-04
697	1.08E-04
698	1.08E-04
699	1.07E-04
700	1.07E-04
701	1.07E-04
702	1.07E-04
703	1.06E-04
704	1.06E-04
705	1.06E-04
706	1.05E-04

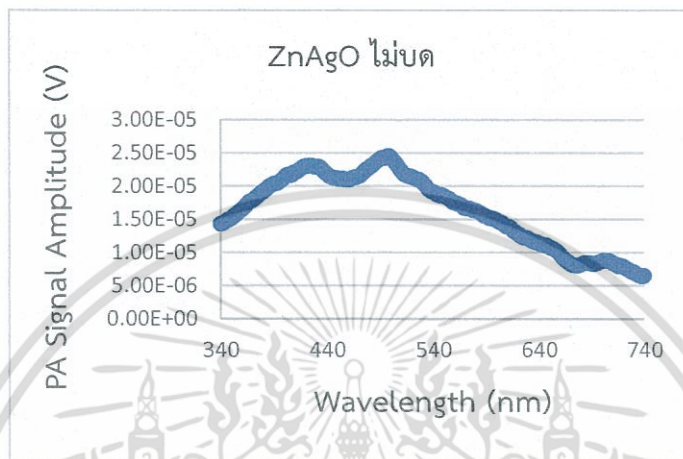
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

707	1.04E-04
708	1.04E-04
709	1.03E-04
710	1.03E-04
711	1.03E-04
712	1.02E-04
713	1.01E-04
714	1.00E-04
715	9.92E-05
716	9.82E-05
717	9.74E-05
718	9.70E-05
719	9.64E-05
720	9.52E-05
721	9.43E-05
722	9.35E-05
723	9.23E-05
724	9.17E-05
725	9.10E-05
726	9.01E-05
727	8.99E-05
728	8.89E-05
729	8.78E-05
730	8.70E-05
731	8.61E-05
732	8.50E-05
733	8.43E-05
734	8.35E-05
735	8.16E-05
736	8.01E-05
737	7.99E-05
738	7.95E-05

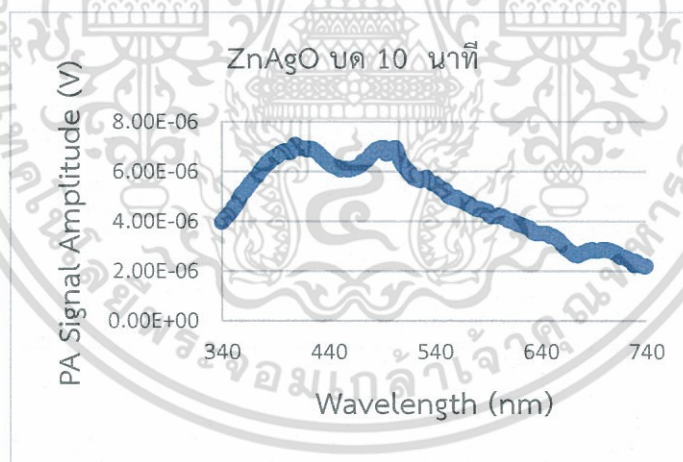
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

739	7.99E-05
740	8.08E-05

2.2 สเปกตรัม ZnAgO

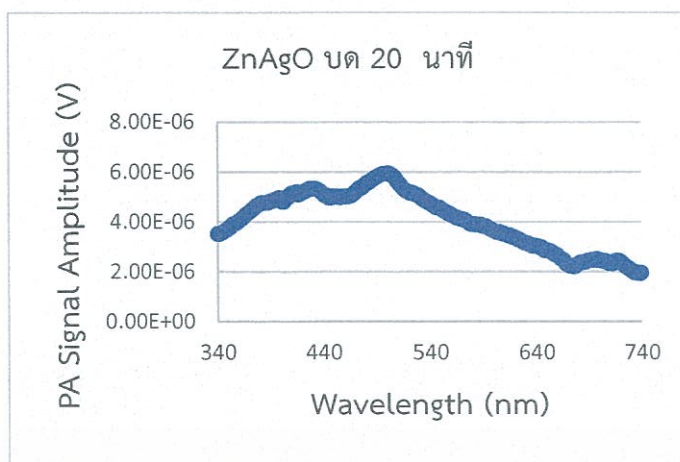


รูปที่ 6.2 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่อบ



รูปที่ 6.3 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่อบแล้ว 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที

ตารางที่ 6.2 แสดงแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ความยาวคลื่นต่างๆของ ZnAgO ที่ถูกบดต่างกัน 3 ระดับ

λ (nm)	Photoacoustic Signal ไม่บด (V)	Photoacoustic Signal บด 10 นาที (V)	Photoacoustic Signal บด 20 นาที (V)
340	1.43E-05	3.96E-06	3.50E-06
341	1.43E-05	4.00E-06	3.50E-06
342	1.44E-05	4.04E-06	3.51E-06
343	1.44E-05	4.11E-06	3.52E-06
344	1.46E-05	4.15E-06	3.55E-06
345	1.47E-05	4.20E-06	3.57E-06
346	1.48E-05	4.25E-06	3.58E-06
347	1.49E-05	4.31E-06	3.63E-06
348	1.49E-05	4.35E-06	3.65E-06
349	1.50E-05	4.40E-06	3.68E-06
350	1.51E-05	4.46E-06	3.71E-06
351	1.52E-05	4.55E-06	3.75E-06
352	1.54E-05	4.59E-06	3.77E-06
353	1.55E-05	4.65E-06	3.81E-06
354	1.56E-05	4.71E-06	3.84E-06
355	1.57E-05	4.76E-06	3.88E-06
356	1.58E-05	4.85E-06	3.90E-06
357	1.60E-05	4.94E-06	3.91E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

358	1.61E-05	5.03E-06	3.93E-06
359	1.63E-05	5.10E-06	3.96E-06
360	1.64E-05	5.15E-06	4.00E-06
361	1.66E-05	5.18E-06	4.03E-06
362	1.67E-05	5.22E-06	4.07E-06
363	1.69E-05	5.28E-06	4.11E-06
364	1.70E-05	5.34E-06	4.13E-06
365	1.72E-05	5.40E-06	4.17E-06
366	1.74E-05	5.46E-06	4.21E-06
367	1.76E-05	5.53E-06	4.26E-06
368	1.77E-05	5.56E-06	4.30E-06
369	1.77E-05	5.61E-06	4.32E-06
370	1.78E-05	5.67E-06	4.36E-06
371	1.79E-05	5.72E-06	4.39E-06
372	1.81E-05	5.76E-06	4.44E-06
373	1.82E-05	5.82E-06	4.48E-06
374	1.83E-05	5.88E-06	4.50E-06
375	1.84E-05	5.95E-06	4.53E-06
376	1.86E-05	6.00E-06	4.57E-06
377	1.88E-05	6.05E-06	4.62E-06
378	1.89E-05	6.11E-06	4.64E-06
379	1.90E-05	6.16E-06	4.67E-06
380	1.91E-05	6.22E-06	4.69E-06
381	1.93E-05	6.28E-06	4.72E-06
382	1.94E-05	6.35E-06	4.73E-06
383	1.95E-05	6.35E-06	4.75E-06
384	1.97E-05	6.35E-06	4.76E-06
385	1.99E-05	6.41E-06	4.76E-06
386	2.00E-05	6.50E-06	4.76E-06
387	2.01E-05	6.51E-06	4.76E-06
388	2.01E-05	6.57E-06	4.76E-06
389	2.02E-05	6.59E-06	4.80E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

390	2.03E-05	6.56E-06	4.81E-06
391	2.04E-05	6.58E-06	4.82E-06
392	2.04E-05	6.61E-06	4.82E-06
393	2.04E-05	6.68E-06	4.83E-06
394	2.05E-05	6.70E-06	4.87E-06
395	2.06E-05	6.75E-06	4.88E-06
396	2.07E-05	6.77E-06	4.90E-06
397	2.09E-05	6.80E-06	4.92E-06
398	2.10E-05	6.80E-06	4.95E-06
399	2.12E-05	6.83E-06	4.94E-06
400	2.14E-05	6.82E-06	4.86E-06
401	2.15E-05	6.81E-06	4.80E-06
402	2.17E-05	6.78E-06	4.82E-06
403	2.17E-05	6.77E-06	4.80E-06
404	2.16E-05	6.78E-06	4.87E-06
405	2.16E-05	6.82E-06	4.92E-06
406	2.16E-05	6.87E-06	4.97E-06
407	2.17E-05	6.95E-06	4.97E-06
408	2.18E-05	7.05E-06	5.03E-06
409	2.20E-05	7.07E-06	5.07E-06
410	2.20E-05	7.05E-06	5.11E-06
411	2.21E-05	7.02E-06	5.10E-06
412	2.22E-05	6.98E-06	5.08E-06
413	2.23E-05	6.95E-06	5.12E-06
414	2.25E-05	6.96E-06	5.14E-06
415	2.26E-05	6.93E-06	5.18E-06
416	2.27E-05	6.93E-06	5.11E-06
417	2.28E-05	6.92E-06	5.06E-06
418	2.29E-05	6.92E-06	5.11E-06
419	2.29E-05	6.92E-06	5.12E-06
420	2.30E-05	6.88E-06	5.16E-06
421	2.30E-05	6.89E-06	5.18E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

422	2.30E-05	6.92E-06	5.20E-06
423	2.30E-05	6.89E-06	5.21E-06
424	2.31E-05	6.90E-06	5.25E-06
425	2.31E-05	6.90E-06	5.27E-06
426	2.31E-05	6.88E-06	5.27E-06
427	2.30E-05	6.87E-06	5.30E-06
428	2.29E-05	6.82E-06	5.31E-06
429	2.29E-05	6.80E-06	5.31E-06
430	2.28E-05	6.76E-06	5.31E-06
431	2.28E-05	6.72E-06	5.31E-06
432	2.29E-05	6.67E-06	5.31E-06
433	2.28E-05	6.62E-06	5.31E-06
434	2.27E-05	6.58E-06	5.29E-06
435	2.26E-05	6.55E-06	5.27E-06
436	2.24E-05	6.50E-06	5.25E-06
437	2.22E-05	6.45E-06	5.22E-06
438	2.20E-05	6.41E-06	5.17E-06
439	2.19E-05	6.38E-06	5.13E-06
440	2.17E-05	6.34E-06	5.08E-06
441	2.16E-05	6.30E-06	5.05E-06
442	2.15E-05	6.26E-06	5.04E-06
443	2.14E-05	6.23E-06	5.05E-06
444	2.13E-05	6.21E-06	5.00E-06
445	2.13E-05	6.23E-06	4.95E-06
446	2.12E-05	6.20E-06	4.94E-06
447	2.12E-05	6.17E-06	4.95E-06
448	2.12E-05	6.17E-06	4.96E-06
449	2.11E-05	6.14E-06	5.00E-06
450	2.11E-05	6.08E-06	5.00E-06
451	2.10E-05	6.08E-06	4.98E-06
452	2.11E-05	6.09E-06	5.01E-06
453	2.11E-05	6.11E-06	5.00E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

454	2.12E-05	6.11E-06	4.99E-06
455	2.11E-05	6.11E-06	4.98E-06
456	2.10E-05	6.11E-06	4.97E-06
457	2.10E-05	6.11E-06	4.98E-06
458	2.10E-05	6.07E-06	5.00E-06
459	2.10E-05	6.07E-06	5.00E-06
460	2.10E-05	6.08E-06	5.00E-06
461	2.10E-05	6.11E-06	4.99E-06
462	2.10E-05	6.12E-06	5.00E-06
463	2.11E-05	6.12E-06	5.01E-06
464	2.12E-05	6.13E-06	5.01E-06
465	2.13E-05	6.15E-06	5.01E-06
466	2.13E-05	6.15E-06	5.03E-06
467	2.13E-05	6.17E-06	5.06E-06
468	2.14E-05	6.20E-06	5.08E-06
469	2.14E-05	6.22E-06	5.11E-06
470	2.14E-05	6.25E-06	5.16E-06
471	2.16E-05	6.27E-06	5.20E-06
472	2.17E-05	6.40E-06	5.23E-06
473	2.19E-05	6.36E-06	5.27E-06
474	2.20E-05	6.40E-06	5.32E-06
475	2.22E-05	6.43E-06	5.35E-06
476	2.23E-05	6.45E-06	5.35E-06
477	2.25E-05	6.52E-06	5.38E-06
478	2.26E-05	6.56E-06	5.43E-06
479	2.27E-05	6.61E-06	5.46E-06
480	2.28E-05	6.68E-06	5.50E-06
481	2.30E-05	6.71E-06	5.54E-06
482	2.31E-05	6.76E-06	5.57E-06
483	2.32E-05	6.82E-06	5.57E-06
484	2.33E-05	6.85E-06	5.61E-06
485	2.35E-05	6.88E-06	5.63E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

486	2.36E-05	6.86E-06	5.67E-06
487	2.38E-05	6.84E-06	5.70E-06
488	2.39E-05	6.89E-06	5.72E-06
489	2.40E-05	6.96E-06	5.75E-06
490	2.41E-05	6.92E-06	5.78E-06
491	2.42E-05	6.94E-06	5.81E-06
492	2.43E-05	6.82E-06	5.82E-06
493	2.42E-05	6.94E-06	5.85E-06
494	2.42E-05	6.72E-06	5.87E-06
495	2.43E-05	6.72E-06	5.89E-06
496	2.45E-05	6.75E-06	5.92E-06
497	2.45E-05	6.75E-06	5.92E-06
498	2.46E-05	6.76E-06	5.92E-06
499	2.44E-05	6.80E-06	5.92E-06
500	2.42E-05	6.84E-06	5.92E-06
501	2.41E-05	6.87E-06	5.92E-06
502	2.39E-05	6.95E-06	5.91E-06
503	2.37E-05	6.95E-06	5.89E-06
504	2.35E-05	6.83E-06	5.87E-06
505	2.33E-05	6.71E-06	5.83E-06
506	2.31E-05	6.57E-06	5.81E-06
507	2.28E-05	6.46E-06	5.76E-06
508	2.26E-05	6.37E-06	5.69E-06
509	2.23E-05	6.29E-06	5.62E-06
510	2.22E-05	6.22E-06	5.56E-06
511	2.19E-05	6.18E-06	5.51E-06
512	2.18E-05	6.12E-06	5.48E-06
513	2.17E-05	6.08E-06	5.42E-06
514	2.16E-05	6.07E-06	5.36E-06
515	2.16E-05	5.99E-06	5.31E-06
516	2.16E-05	5.93E-06	5.29E-06
517	2.15E-05	5.93E-06	5.26E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับป้ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำงไปใช้หรือเผยแพร่บนด้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

518	2.15E-05	5.86E-06	5.23E-06
519	2.14E-05	5.80E-06	5.21E-06
520	2.14E-05	5.74E-06	5.20E-06
521	2.13E-05	5.73E-06	5.16E-06
522	2.12E-05	5.73E-06	5.14E-06
523	2.11E-05	5.73E-06	5.15E-06
524	2.11E-05	5.71E-06	5.13E-06
525	2.10E-05	5.67E-06	5.13E-06
526	2.10E-05	5.64E-06	5.09E-06
527	2.09E-05	5.70E-06	5.07E-06
528	2.08E-05	5.71E-06	5.08E-06
529	2.07E-05	5.68E-06	5.05E-06
530	2.06E-05	5.70E-06	5.01E-06
531	2.03E-05	5.73E-06	4.98E-06
532	2.01E-05	5.76E-06	4.95E-06
533	2.00E-05	5.70E-06	4.90E-06
534	1.97E-05	5.65E-06	4.87E-06
535	1.96E-05	5.61E-06	4.83E-06
536	1.94E-05	5.57E-06	4.81E-06
537	1.93E-05	5.53E-06	4.79E-06
538	1.92E-05	5.52E-06	4.77E-06
539	1.91E-05	5.52E-06	4.75E-06
540	1.91E-05	5.51E-06	4.73E-06
541	1.90E-05	5.50E-06	4.70E-06
542	1.89E-05	5.45E-06	4.67E-06
543	1.87E-05	5.40E-06	4.63E-06
544	1.87E-05	5.37E-06	4.62E-06
545	1.86E-05	5.33E-06	4.57E-06
546	1.86E-05	5.29E-06	4.55E-06
547	1.86E-05	5.27E-06	4.56E-06
548	1.86E-05	5.26E-06	4.56E-06
549	1.85E-05	5.25E-06	4.55E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

550	1.85E-05	5.25E-06	4.52E-06
551	1.84E-05	5.16E-06	4.50E-06
552	1.83E-05	5.05E-06	4.46E-06
553	1.82E-05	4.99E-06	4.43E-06
554	1.81E-05	4.97E-06	4.41E-06
555	1.80E-05	4.98E-06	4.37E-06
556	1.79E-05	4.98E-06	4.34E-06
557	1.77E-05	4.98E-06	4.32E-06
558	1.76E-05	4.93E-06	4.31E-06
559	1.75E-05	4.90E-06	4.30E-06
560	1.75E-05	4.92E-06	4.26E-06
561	1.74E-05	4.95E-06	4.23E-06
562	1.73E-05	4.88E-06	4.20E-06
563	1.73E-05	4.85E-06	4.18E-06
564	1.73E-05	4.85E-06	4.18E-06
565	1.72E-05	4.83E-06	4.15E-06
566	1.71E-05	4.82E-06	4.14E-06
567	1.69E-05	4.81E-06	4.13E-06
568	1.68E-05	4.77E-06	4.11E-06
569	1.67E-05	4.75E-06	4.10E-06
570	1.67E-05	4.72E-06	4.08E-06
571	1.67E-05	4.73E-06	4.07E-06
572	1.66E-05	4.71E-06	4.06E-06
573	1.67E-05	4.69E-06	4.05E-06
574	1.66E-05	4.63E-06	4.01E-06
575	1.65E-05	4.61E-06	3.99E-06
576	1.65E-05	4.58E-06	3.97E-06
577	1.64E-05	4.54E-06	3.94E-06
578	1.63E-05	4.51E-06	3.92E-06
579	1.63E-05	4.51E-06	3.88E-06
580	1.63E-05	4.48E-06	3.90E-06
581	1.62E-05	4.48E-06	3.88E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

582	1.62E-05	4.50E-06	3.90E-06
583	1.60E-05	4.50E-06	3.90E-06
584	1.60E-05	4.48E-06	3.88E-06
585	1.59E-05	4.45E-06	3.87E-06
586	1.58E-05	4.43E-06	3.87E-06
587	1.56E-05	4.43E-06	3.87E-06
588	1.55E-05	4.42E-06	3.87E-06
589	1.55E-05	4.42E-06	3.83E-06
590	1.54E-05	4.41E-06	3.83E-06
591	1.54E-05	4.30E-06	3.80E-06
592	1.53E-05	4.22E-06	3.79E-06
593	1.52E-05	4.20E-06	3.81E-06
594	1.52E-05	4.20E-06	3.78E-06
595	1.51E-05	4.20E-06	3.74E-06
596	1.51E-05	4.21E-06	3.72E-06
597	1.50E-05	4.20E-06	3.69E-06
598	1.50E-05	4.21E-06	3.68E-06
599	1.49E-05	4.22E-06	3.65E-06
600	1.48E-05	4.23E-06	3.63E-06
601	1.47E-05	4.22E-06	3.60E-06
602	1.46E-05	4.19E-06	3.58E-06
603	1.45E-05	4.20E-06	3.57E-06
604	1.45E-05	4.20E-06	3.56E-06
605	1.44E-05	4.17E-06	3.56E-06
606	1.42E-05	4.13E-06	3.56E-06
607	1.41E-05	4.11E-06	3.54E-06
608	1.40E-05	4.09E-06	3.51E-06
609	1.39E-05	4.05E-06	3.50E-06
610	1.39E-05	4.03E-06	3.50E-06
611	1.39E-05	4.02E-06	3.48E-06
612	1.38E-05	4.01E-06	3.45E-06
613	1.37E-05	4.01E-06	3.44E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

614	1.35E-05	4.00E-06	3.43E-06
615	1.33E-05	3.97E-06	3.43E-06
616	1.32E-05	3.96E-06	3.41E-06
617	1.31E-05	3.94E-06	3.38E-06
618	1.30E-05	3.90E-06	3.37E-06
619	1.29E-05	3.88E-06	3.37E-06
620	1.27E-05	3.87E-06	3.35E-06
621	1.26E-05	3.86E-06	3.33E-06
622	1.26E-05	3.84E-06	3.31E-06
623	1.25E-05	3.82E-06	3.28E-06
624	1.24E-05	3.81E-06	3.27E-06
625	1.23E-05	3.81E-06	3.26E-06
626	1.22E-05	3.78E-06	3.23E-06
627	1.22E-05	3.77E-06	3.21E-06
628	1.22E-05	3.75E-06	3.19E-06
629	1.22E-05	3.72E-06	3.15E-06
630	1.21E-05	3.72E-06	3.13E-06
631	1.20E-05	3.68E-06	3.12E-06
632	1.18E-05	3.62E-06	3.13E-06
633	1.18E-05	3.56E-06	3.12E-06
634	1.17E-05	3.56E-06	3.08E-06
635	1.17E-05	3.53E-06	3.06E-06
636	1.16E-05	3.51E-06	3.03E-06
637	1.16E-05	3.52E-06	3.02E-06
638	1.15E-05	3.52E-06	3.01E-06
639	1.15E-05	3.50E-06	3.02E-06
640	1.14E-05	3.51E-06	3.02E-06
641	1.13E-05	3.52E-06	3.01E-06
642	1.12E-05	3.52E-06	3.00E-06
643	1.12E-05	3.51E-06	2.97E-06
644	1.11E-05	3.50E-06	2.96E-06
645	1.11E-05	3.50E-06	2.96E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

646	1.11E-05	3.48E-06	2.89E-06
647	1.10E-05	3.49E-06	2.87E-06
648	1.10E-05	3.44E-06	2.85E-06
649	1.09E-05	3.41E-06	2.84E-06
650	1.07E-05	3.41E-06	2.83E-06
651	1.07E-05	3.41E-06	2.83E-06
652	1.06E-05	3.40E-06	2.82E-06
653	1.05E-05	3.36E-06	2.81E-06
654	1.05E-05	3.33E-06	2.80E-06
655	1.04E-05	3.31E-06	2.77E-06
656	1.03E-05	3.28E-06	2.71E-06
657	1.01E-05	3.26E-06	2.68E-06
658	9.97E-06	3.20E-06	2.66E-06
659	9.82E-06	3.15E-06	2.67E-06
660	9.69E-06	3.08E-06	2.64E-06
661	9.46E-06	3.05E-06	2.60E-06
662	9.26E-06	3.01E-06	2.56E-06
663	9.09E-06	2.95E-06	2.52E-06
664	8.96E-06	2.91E-06	2.50E-06
665	8.84E-06	2.89E-06	2.47E-06
666	8.70E-06	2.83E-06	2.44E-06
667	8.58E-06	2.82E-06	2.39E-06
668	8.48E-06	2.77E-06	2.31E-06
669	8.34E-06	2.76E-06	2.27E-06
670	8.24E-06	2.71E-06	2.26E-06
671	8.17E-06	2.68E-06	2.23E-06
672	8.11E-06	2.66E-06	2.22E-06
673	8.12E-06	2.66E-06	2.21E-06
674	8.05E-06	2.65E-06	2.21E-06
675	8.04E-06	2.64E-06	2.21E-06
676	7.99E-06	2.65E-06	2.20E-06
677	7.97E-06	2.65E-06	2.21E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

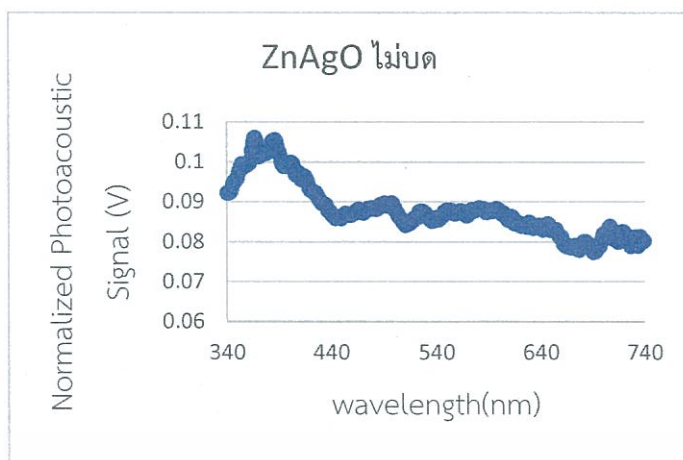
678	8.06E-06	2.67E-06	2.22E-06
679	8.12E-06	2.71E-06	2.26E-06
680	8.18E-06	2.72E-06	2.28E-06
681	8.27E-06	2.74E-06	2.31E-06
682	8.32E-06	2.76E-06	2.34E-06
683	8.37E-06	2.77E-06	2.37E-06
684	8.40E-06	2.78E-06	2.36E-06
685	8.38E-06	2.81E-06	2.37E-06
686	8.42E-06	2.82E-06	2.37E-06
687	8.38E-06	2.83E-06	2.39E-06
688	8.39E-06	2.83E-06	2.39E-06
689	8.40E-06	2.87E-06	2.42E-06
690	8.32E-06	2.85E-06	2.43E-06
691	8.27E-06	2.83E-06	2.43E-06
692	8.27E-06	2.83E-06	2.44E-06
693	8.28E-06	2.82E-06	2.45E-06
694	8.34E-06	2.83E-06	2.45E-06
695	8.41E-06	2.83E-06	2.46E-06
696	8.41E-06	2.83E-06	2.46E-06
697	8.48E-06	2.83E-06	2.47E-06
698	8.57E-06	2.87E-06	2.48E-06
699	8.63E-06	2.87E-06	2.46E-06
700	8.73E-06	2.87E-06	2.45E-06
701	8.75E-06	2.85E-06	2.43E-06
702	8.72E-06	2.87E-06	2.43E-06
703	8.76E-06	2.87E-06	2.42E-06
704	8.76E-06	2.85E-06	2.40E-06
705	8.72E-06	2.83E-06	2.40E-06
706	8.73E-06	2.83E-06	2.40E-06
707	8.70E-06	2.81E-06	2.37E-06
708	8.61E-06	2.78E-06	2.34E-06
709	8.46E-06	2.77E-06	2.33E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

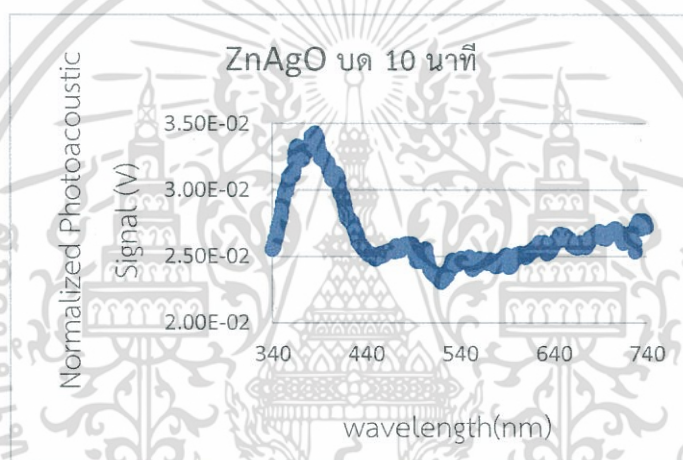
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

710	8.32E-06	2.76E-06	2.33E-06
711	8.29E-06	2.73E-06	2.32E-06
712	8.20E-06	2.71E-06	2.30E-06
713	8.09E-06	2.69E-06	2.30E-06
714	8.02E-06	2.62E-06	2.37E-06
715	7.93E-06	2.58E-06	2.41E-06
716	7.89E-06	2.57E-06	2.43E-06
717	8.01E-06	2.57E-06	2.44E-06
718	7.95E-06	2.56E-06	2.41E-06
719	7.90E-06	2.56E-06	2.40E-06
720	7.85E-06	2.53E-06	2.38E-06
721	7.74E-06	2.51E-06	2.35E-06
722	7.59E-06	2.50E-06	2.30E-06
723	7.48E-06	2.47E-06	2.26E-06
724	7.46E-06	2.45E-06	2.22E-06
725	7.39E-06	2.43E-06	2.20E-06
726	7.28E-06	2.42E-06	2.17E-06
727	7.08E-06	2.33E-06	2.12E-06
728	7.05E-06	2.25E-06	2.11E-06
729	7.01E-06	2.39E-06	2.08E-06
730	7.02E-06	2.38E-06	2.06E-06
731	6.95E-06	2.37E-06	2.02E-06
732	6.89E-06	2.35E-06	2.01E-06
733	6.73E-06	2.30E-06	1.97E-06
734	6.59E-06	2.26E-06	1.95E-06
735	6.55E-06	2.22E-06	1.97E-06
736	6.51E-06	2.21E-06	1.94E-06
737	6.40E-06	2.21E-06	1.93E-06
738	6.35E-06	2.19E-06	1.93E-06
739	6.42E-06	2.18E-06	1.92E-06
740	6.47E-06	2.20E-06	1.93E-06

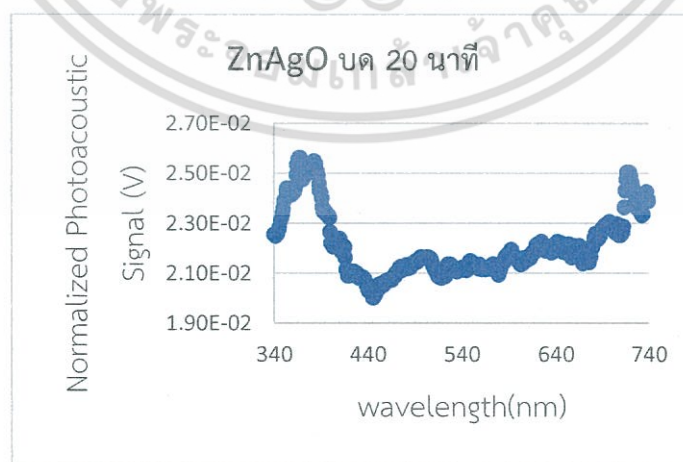
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ถูกนอม่ลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็คที่ไม่บด



รูปที่ 6.6 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ถูกนอม่ลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็คที่บด 10 นาที



รูปที่ 6.7 แสดงข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ถูกนอม่ลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็คที่บด 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าตารางที่ 6.2 นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค

λ (nm)	Normalized Photoacoustic Signal ไม่บด (V)	Normalized Photoacoustic Signal บด 10 นาที (V)	Normalized Photoacoustic Signal บด 20 นาที (V)
340	0.092154401	2.55E-02	2.25E-02
341	0.092183133	2.57E-02	2.25E-02
342	0.092170316	2.59E-02	2.25E-02
343	0.09229218	2.63E-02	2.25E-02
344	0.092656464	2.64E-02	2.26E-02
345	0.093265865	2.67E-02	2.27E-02
346	0.094356997	2.71E-02	2.28E-02
347	0.094863962	2.74E-02	2.31E-02
348	0.095004449	2.76E-02	2.32E-02
349	0.095441831	2.80E-02	2.34E-02
350	0.095978638	2.84E-02	2.36E-02
351	0.097003185	2.90E-02	2.39E-02
352	0.097889476	2.93E-02	2.40E-02
353	0.098738825	2.97E-02	2.43E-02
354	0.099361378	2.99E-02	2.44E-02
355	0.098543537	2.99E-02	2.44E-02
356	0.09865262	3.03E-02	2.44E-02
357	0.098869059	3.06E-02	2.42E-02
358	0.099183787	3.10E-02	2.42E-02
359	0.099125213	3.11E-02	2.41E-02
360	0.099406654	3.12E-02	2.42E-02
361	0.09947419	3.11E-02	2.42E-02
362	0.099600453	3.11E-02	2.43E-02
363	0.100371814	3.14E-02	2.45E-02
364	0.102730756	3.22E-02	2.49E-02
365	0.10464728	3.28E-02	2.53E-02
366	0.105749568	3.31E-02	2.55E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

367	0.105932994	3.33E-02	2.56E-02
368	0.105244964	3.31E-02	2.56E-02
369	0.103657931	3.28E-02	2.53E-02
370	0.102820476	3.27E-02	2.52E-02
371	0.101269931	3.23E-02	2.48E-02
372	0.101598878	3.23E-02	2.49E-02
373	0.102231704	3.27E-02	2.51E-02
374	0.102031193	3.28E-02	2.51E-02
375	0.102329645	3.30E-02	2.51E-02
376	0.102842962	3.31E-02	2.52E-02
377	0.102122917	3.29E-02	2.51E-02
378	0.102109921	3.30E-02	2.50E-02
379	0.102409801	3.32E-02	2.52E-02
380	0.102666166	3.34E-02	2.52E-02
381	0.102783857	3.35E-02	2.52E-02
382	0.104058111	3.40E-02	2.54E-02
383	0.104767648	3.40E-02	2.55E-02
384	0.105077063	3.39E-02	2.54E-02
385	0.105203644	3.40E-02	2.52E-02
386	0.105349523	3.43E-02	2.51E-02
387	0.105011378	3.41E-02	2.49E-02
388	0.103947063	3.39E-02	2.46E-02
389	0.10257937	3.34E-02	2.43E-02
390	0.10231499	3.30E-02	2.42E-02
391	0.101341664	3.28E-02	2.40E-02
392	0.099970559	3.24E-02	2.36E-02
393	0.099288369	3.24E-02	2.35E-02
394	0.09887941	3.23E-02	2.35E-02
395	0.098999424	3.24E-02	2.34E-02
396	0.098765962	3.22E-02	2.34E-02
397	0.099018353	3.22E-02	2.33E-02
398	0.098877967	3.21E-02	2.33E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

399	0.099466861	3.21E-02	2.32E-02
400	0.099666527	3.18E-02	2.26E-02
401	0.099620879	3.15E-02	2.22E-02
402	0.099709925	3.12E-02	2.22E-02
403	0.099440033	3.11E-02	2.20E-02
404	0.098509297	3.08E-02	2.22E-02
405	0.097547659	3.08E-02	2.22E-02
406	0.096753261	3.07E-02	2.22E-02
407	0.096506511	3.09E-02	2.21E-02
408	0.09670135	3.12E-02	2.23E-02
409	0.097104613	3.12E-02	2.24E-02
410	0.096400263	3.09E-02	2.24E-02
411	0.095569894	3.04E-02	2.21E-02
412	0.095414007	3.00E-02	2.19E-02
413	0.095351121	2.97E-02	2.18E-02
414	0.095467494	2.96E-02	2.19E-02
415	0.096276981	2.95E-02	2.21E-02
416	0.095924321	2.93E-02	2.16E-02
417	0.09524406	2.89E-02	2.11E-02
418	0.094366546	2.85E-02	2.11E-02
419	0.09335236	2.82E-02	2.09E-02
420	0.092979508	2.79E-02	2.09E-02
421	0.09280397	2.78E-02	2.09E-02
422	0.092501508	2.78E-02	2.09E-02
423	0.092389974	2.77E-02	2.09E-02
424	0.092435443	2.76E-02	2.10E-02
425	0.092246465	2.76E-02	2.11E-02
426	0.091763279	2.74E-02	2.10E-02
427	0.091167317	2.72E-02	2.10E-02
428	0.090578908	2.70E-02	2.10E-02
429	0.090317554	2.68E-02	2.09E-02
430	0.089919521	2.66E-02	2.09E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

431	0.089507952	2.64E-02	2.08E-02
432	0.089585373	2.61E-02	2.08E-02
433	0.089365207	2.59E-02	2.08E-02
434	0.089261508	2.59E-02	2.08E-02
435	0.089176694	2.59E-02	2.08E-02
436	0.088498674	2.57E-02	2.08E-02
437	0.08781575	2.56E-02	2.07E-02
438	0.087594801	2.55E-02	2.06E-02
439	0.087371072	2.55E-02	2.05E-02
440	0.087032479	2.54E-02	2.03E-02
441	0.086577127	2.53E-02	2.03E-02
442	0.086354137	2.52E-02	2.02E-02
443	0.086117713	2.51E-02	2.03E-02
444	0.085810865	2.51E-02	2.02E-02
445	0.086004569	2.52E-02	2.00E-02
446	0.086001741	2.51E-02	2.00E-02
447	0.086011476	2.50E-02	2.01E-02
448	0.086175096	2.51E-02	2.02E-02
449	0.085922824	2.49E-02	2.03E-02
450	0.085848499	2.48E-02	2.04E-02
451	0.08599951	2.48E-02	2.03E-02
452	0.086504488	2.50E-02	2.05E-02
453	0.086695411	2.51E-02	2.05E-02
454	0.086976811	2.51E-02	2.05E-02
455	0.086760291	2.51E-02	2.05E-02
456	0.086559195	2.52E-02	2.05E-02
457	0.08672486	2.52E-02	2.06E-02
458	0.086674516	2.51E-02	2.07E-02
459	0.086654131	2.51E-02	2.07E-02
460	0.086748758	2.52E-02	2.07E-02
461	0.086824884	2.53E-02	2.07E-02
462	0.08694284	2.53E-02	2.07E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษารายงาน ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

463	0.087227833	2.53E-02	2.07E-02
464	0.087666356	2.54E-02	2.07E-02
465	0.087848787	2.54E-02	2.07E-02
466	0.088020317	2.54E-02	2.08E-02
467	0.087884219	2.54E-02	2.08E-02
468	0.087651814	2.54E-02	2.09E-02
469	0.087324289	2.54E-02	2.09E-02
470	0.087234432	2.54E-02	2.10E-02
471	0.087163883	2.54E-02	2.10E-02
472	0.087510319	2.58E-02	2.11E-02
473	0.087739479	2.55E-02	2.11E-02
474	0.087831563	2.55E-02	2.12E-02
475	0.088174562	2.55E-02	2.12E-02
476	0.088108343	2.54E-02	2.11E-02
477	0.088234717	2.56E-02	2.11E-02
478	0.088388371	2.57E-02	2.12E-02
479	0.088243188	2.57E-02	2.12E-02
480	0.088195935	2.58E-02	2.13E-02
481	0.088401501	2.58E-02	2.13E-02
482	0.088186824	2.59E-02	2.13E-02
483	0.08809551	2.59E-02	2.12E-02
484	0.088184465	2.59E-02	2.12E-02
485	0.08836478	2.59E-02	2.12E-02
486	0.088759064	2.58E-02	2.13E-02
487	0.089198672	2.56E-02	2.14E-02
488	0.089317142	2.57E-02	2.14E-02
489	0.089350543	2.59E-02	2.14E-02
490	0.089427974	2.56E-02	2.14E-02
491	0.089583102	2.57E-02	2.15E-02
492	0.089397066	2.51E-02	2.15E-02
493	0.08897687	2.55E-02	2.15E-02
494	0.088822472	2.46E-02	2.15E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

495	0.089088312	2.46E-02	2.16E-02
496	0.089410474	2.47E-02	2.16E-02
497	0.089545073	2.46E-02	2.16E-02
498	0.089577824	2.46E-02	2.16E-02
499	0.089000128	2.48E-02	2.16E-02
500	0.088462871	2.50E-02	2.16E-02
501	0.087861198	2.51E-02	2.16E-02
502	0.087399601	2.54E-02	2.16E-02
503	0.087048049	2.55E-02	2.16E-02
504	0.086559437	2.52E-02	2.16E-02
505	0.086233896	2.49E-02	2.16E-02
506	0.085862345	2.44E-02	2.16E-02
507	0.085523927	2.42E-02	2.16E-02
508	0.085113397	2.40E-02	2.14E-02
509	0.084750744	2.39E-02	2.13E-02
510	0.084594842	2.37E-02	2.12E-02
511	0.084074124	2.37E-02	2.11E-02
512	0.084123218	2.36E-02	2.12E-02
513	0.084284744	2.36E-02	2.10E-02
514	0.084430787	2.37E-02	2.09E-02
515	0.084597286	2.35E-02	2.08E-02
516	0.085045439	2.34E-02	2.09E-02
517	0.085101665	2.35E-02	2.08E-02
518	0.08529938	2.33E-02	2.08E-02
519	0.085852399	2.32E-02	2.09E-02
520	0.085940296	2.31E-02	2.09E-02
521	0.085998062	2.31E-02	2.08E-02
522	0.086047739	2.32E-02	2.09E-02
523	0.086003098	2.34E-02	2.10E-02
524	0.087430266	2.37E-02	2.13E-02
525	0.087437814	2.36E-02	2.13E-02
526	0.087604722	2.36E-02	2.13E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

527	0.087557121	2.39E-02	2.12E-02
528	0.087361032	2.40E-02	2.13E-02
529	0.087139816	2.40E-02	2.13E-02
530	0.086977944	2.41E-02	2.12E-02
531	0.086534898	2.44E-02	2.12E-02
532	0.086230891	2.47E-02	2.12E-02
533	0.086174132	2.46E-02	2.11E-02
534	0.085483766	2.45E-02	2.11E-02
535	0.08521472	2.44E-02	2.11E-02
536	0.085101298	2.44E-02	2.11E-02
537	0.085189681	2.44E-02	2.11E-02
538	0.085203753	2.45E-02	2.11E-02
539	0.085285788	2.46E-02	2.12E-02
540	0.085807596	2.47E-02	2.12E-02
541	0.085903859	2.48E-02	2.12E-02
542	0.085817613	2.47E-02	2.12E-02
543	0.085503809	2.46E-02	2.11E-02
544	0.085798599	2.47E-02	2.12E-02
545	0.086015392	2.46E-02	2.11E-02
546	0.086349162	2.46E-02	2.12E-02
547	0.086984572	2.46E-02	2.13E-02
548	0.087449459	2.47E-02	2.14E-02
549	0.08754103	2.48E-02	2.15E-02
550	0.087814887	2.49E-02	2.14E-02
551	0.087660791	2.46E-02	2.14E-02
552	0.087759743	2.42E-02	2.14E-02
553	0.087765023	2.40E-02	2.13E-02
554	0.087771838	2.40E-02	2.13E-02
555	0.087569497	2.42E-02	2.12E-02
556	0.087327346	2.43E-02	2.12E-02
557	0.087068035	2.45E-02	2.12E-02
558	0.087003753	2.44E-02	2.13E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

559	0.087054502	2.43E-02	2.13E-02
560	0.087271729	2.46E-02	2.12E-02
561	0.087438887	2.48E-02	2.12E-02
562	0.087296835	2.46E-02	2.12E-02
563	0.087645646	2.45E-02	2.11E-02
564	0.087713415	2.46E-02	2.12E-02
565	0.087578416	2.46E-02	2.12E-02
566	0.087451051	2.47E-02	2.12E-02
567	0.086868946	2.47E-02	2.12E-02
568	0.086707883	2.46E-02	2.12E-02
569	0.086503321	2.45E-02	2.12E-02
570	0.086463358	2.45E-02	2.12E-02
571	0.086877167	2.47E-02	2.12E-02
572	0.087162481	2.47E-02	2.13E-02
573	0.087721516	2.47E-02	2.14E-02
574	0.08796507	2.45E-02	2.12E-02
575	0.087913168	2.45E-02	2.12E-02
576	0.08776	2.44E-02	2.12E-02
577	0.087674823	2.43E-02	2.11E-02
578	0.087768857	2.42E-02	2.10E-02
579	0.088061351	2.43E-02	2.09E-02
580	0.088113233	2.43E-02	2.11E-02
581	0.088407928	2.44E-02	2.11E-02
582	0.088407898	2.46E-02	2.13E-02
583	0.088112176	2.47E-02	2.14E-02
584	0.088207847	2.47E-02	2.14E-02
585	0.08816356	2.47E-02	2.15E-02
586	0.087895779	2.47E-02	2.16E-02
587	0.087577709	2.48E-02	2.17E-02
588	0.087208943	2.48E-02	2.17E-02
589	0.087572524	2.50E-02	2.17E-02
590	0.087816609	2.51E-02	2.18E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

591	0.087774286	2.46E-02	2.17E-02
592	0.08749283	2.42E-02	2.17E-02
593	0.087483804	2.42E-02	2.19E-02
594	0.087562103	2.43E-02	2.18E-02
595	0.087754628	2.44E-02	2.17E-02
596	0.087923945	2.46E-02	2.17E-02
597	0.088040996	2.46E-02	2.16E-02
598	0.08819624	2.47E-02	2.16E-02
599	0.088051167	2.48E-02	2.15E-02
600	0.087939266	2.51E-02	2.15E-02
601	0.087562515	2.51E-02	2.14E-02
602	0.087207288	2.51E-02	2.14E-02
603	0.08692533	2.51E-02	2.13E-02
604	0.087126961	2.52E-02	2.14E-02
605	0.087029503	2.51E-02	2.15E-02
606	0.086424996	2.51E-02	2.16E-02
607	0.086042187	2.51E-02	2.16E-02
608	0.085978188	2.51E-02	2.15E-02
609	0.085428853	2.50E-02	2.16E-02
610	0.085663947	2.49E-02	2.16E-02
611	0.086133632	2.49E-02	2.16E-02
612	0.086247385	2.51E-02	2.16E-02
613	0.086180139	2.52E-02	2.16E-02
614	0.085161392	2.53E-02	2.17E-02
615	0.084589705	2.53E-02	2.18E-02
616	0.084441387	2.53E-02	2.18E-02
617	0.084745817	2.54E-02	2.18E-02
618	0.084801146	2.54E-02	2.19E-02
619	0.084377868	2.54E-02	2.21E-02
620	0.084023512	2.56E-02	2.21E-02
621	0.083874938	2.57E-02	2.21E-02
622	0.084429611	2.57E-02	2.22E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังสื่อออนไลน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

623	0.084358013	2.58E-02	2.21E-02
624	0.083898995	2.59E-02	2.22E-02
625	0.083980334	2.60E-02	2.23E-02
626	0.083799534	2.59E-02	2.21E-02
627	0.083687016	2.59E-02	2.21E-02
628	0.084116161	2.60E-02	2.21E-02
629	0.084652828	2.59E-02	2.19E-02
630	0.084663586	2.60E-02	2.19E-02
631	0.084169218	2.59E-02	2.20E-02
632	0.083618711	2.55E-02	2.21E-02
633	0.083427822	2.52E-02	2.21E-02
634	0.083671215	2.54E-02	2.19E-02
635	0.08381594	2.53E-02	2.20E-02
636	0.083750676	2.53E-02	2.18E-02
637	0.083911752	2.55E-02	2.18E-02
638	0.083990973	2.56E-02	2.19E-02
639	0.083980387	2.56E-02	2.21E-02
640	0.083571612	2.58E-02	2.22E-02
641	0.083340714	2.60E-02	2.22E-02
642	0.082912355	2.61E-02	2.23E-02
643	0.08340849	2.62E-02	2.22E-02
644	0.083408793	2.62E-02	2.22E-02
645	0.083231191	2.63E-02	2.22E-02
646	0.084079866	2.64E-02	2.20E-02
647	0.084408088	2.67E-02	2.19E-02
648	0.084373321	2.64E-02	2.19E-02
649	0.083717707	2.63E-02	2.19E-02
650	0.082794702	2.63E-02	2.18E-02
651	0.082843727	2.65E-02	2.20E-02
652	0.083123583	2.66E-02	2.21E-02
653	0.082923567	2.65E-02	2.21E-02
654	0.083036703	2.63E-02	2.22E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

655	0.082964558	2.64E-02	2.21E-02
656	0.082281067	2.63E-02	2.17E-02
657	0.081778226	2.63E-02	2.16E-02
658	0.081275209	2.61E-02	2.17E-02
659	0.081007592	2.60E-02	2.20E-02
660	0.0810562	2.58E-02	2.21E-02
661	0.080222109	2.59E-02	2.20E-02
662	0.079388429	2.58E-02	2.20E-02
663	0.079014599	2.57E-02	2.19E-02
664	0.079013544	2.57E-02	2.21E-02
665	0.078915663	2.58E-02	2.20E-02
666	0.078672879	2.56E-02	2.21E-02
667	0.078867092	2.59E-02	2.20E-02
668	0.078973834	2.58E-02	2.15E-02
669	0.078532058	2.60E-02	2.14E-02
670	0.078399201	2.58E-02	2.14E-02
671	0.078472989	2.58E-02	2.14E-02
672	0.078440855	2.57E-02	2.14E-02
673	0.078952233	2.59E-02	2.15E-02
674	0.078315421	2.58E-02	2.15E-02
675	0.078297935	2.57E-02	2.15E-02
676	0.077938094	2.58E-02	2.14E-02
677	0.077905954	2.60E-02	2.16E-02
678	0.078677476	2.61E-02	2.17E-02
679	0.079085859	2.64E-02	2.20E-02
680	0.079315029	2.64E-02	2.21E-02
681	0.079870538	2.65E-02	2.24E-02
682	0.079676276	2.64E-02	2.24E-02
683	0.079780796	2.64E-02	2.26E-02
684	0.079819392	2.65E-02	2.25E-02
685	0.079440758	2.67E-02	2.24E-02
686	0.079452701	2.66E-02	2.24E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

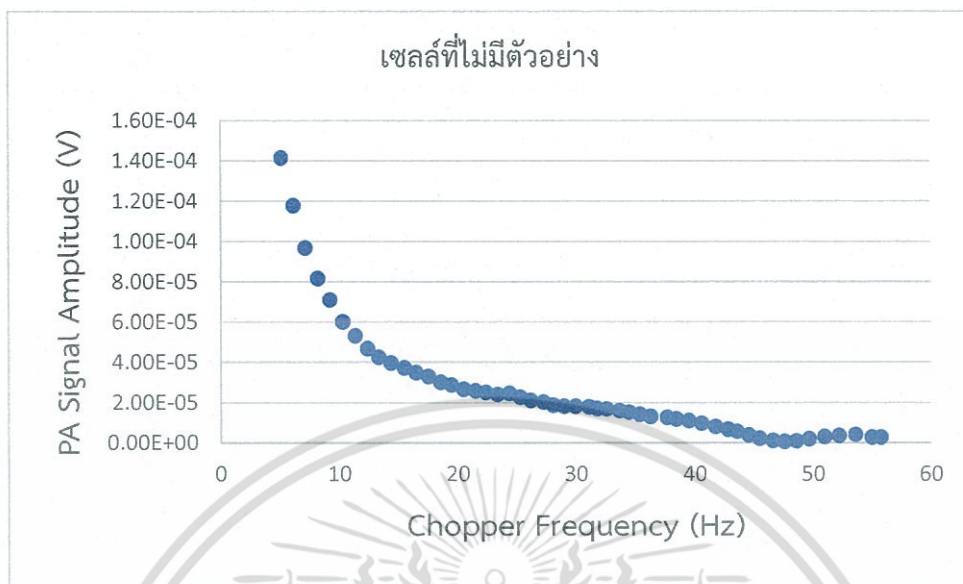
687	0.078924822	2.66E-02	2.25E-02
688	0.078885755	2.66E-02	2.25E-02
689	0.078692596	2.69E-02	2.27E-02
690	0.077991753	2.67E-02	2.28E-02
691	0.077357784	2.65E-02	2.27E-02
692	0.077411049	2.65E-02	2.28E-02
693	0.077456485	2.64E-02	2.29E-02
694	0.077850939	2.64E-02	2.29E-02
695	0.078528409	2.64E-02	2.30E-02
696	0.078507421	2.64E-02	2.30E-02
697	0.078846333	2.63E-02	2.30E-02
698	0.079613724	2.66E-02	2.31E-02
699	0.080435391	2.68E-02	2.29E-02
700	0.081560748	2.68E-02	2.29E-02
701	0.081903247	2.67E-02	2.28E-02
702	0.081684862	2.69E-02	2.28E-02
703	0.082321429	2.69E-02	2.27E-02
704	0.082448211	2.68E-02	2.26E-02
705	0.082569589	2.68E-02	2.27E-02
706	0.083459258	2.71E-02	2.30E-02
707	0.08373291	2.71E-02	2.28E-02
708	0.082999759	2.68E-02	2.25E-02
709	0.081990407	2.68E-02	2.26E-02
710	0.080640628	2.68E-02	2.25E-02
711	0.080695694	2.66E-02	2.26E-02
712	0.080613298	2.67E-02	2.26E-02
713	0.080290848	2.67E-02	2.29E-02
714	0.080110884	2.62E-02	2.36E-02
715	0.0799294	2.60E-02	2.43E-02
716	0.080367786	2.62E-02	2.48E-02
717	0.082246972	2.63E-02	2.50E-02
718	0.081940937	2.64E-02	2.49E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

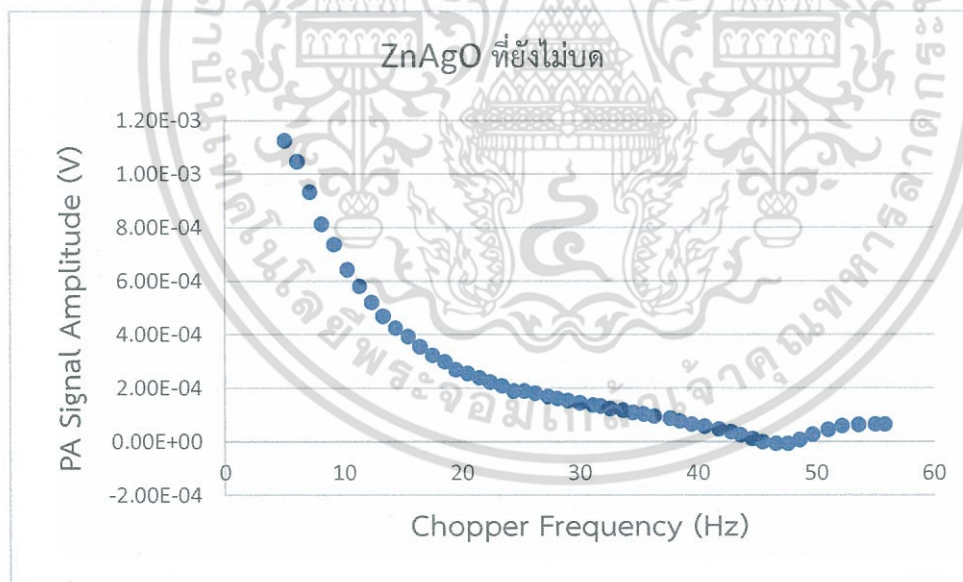
719	0.081921402	2.65E-02	2.49E-02
720	0.082472548	2.66E-02	2.50E-02
721	0.082077123	2.66E-02	2.49E-02
722	0.081188172	2.67E-02	2.46E-02
723	0.081079031	2.67E-02	2.44E-02
724	0.081293277	2.67E-02	2.42E-02
725	0.081174145	2.67E-02	2.42E-02
726	0.080753231	2.68E-02	2.40E-02
727	0.078842515	2.60E-02	2.36E-02
728	0.079358469	2.54E-02	2.37E-02
729	0.079866765	2.73E-02	2.36E-02
730	0.080626257	2.73E-02	2.37E-02
731	0.080755155	2.75E-02	2.35E-02
732	0.081049288	2.77E-02	2.36E-02
733	0.07983871	2.73E-02	2.33E-02
734	0.078961552	2.71E-02	2.34E-02
735	0.080211906	2.72E-02	2.41E-02
736	0.081256636	2.76E-02	2.42E-02
737	0.080122669	2.77E-02	2.41E-02
738	0.07985788	2.76E-02	2.43E-02
739	0.080398047	2.73E-02	2.40E-02
740	0.080148561	2.72E-02	2.39E-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สัญญาณโฟโตอะคูสติกจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ตัวตัดแสง

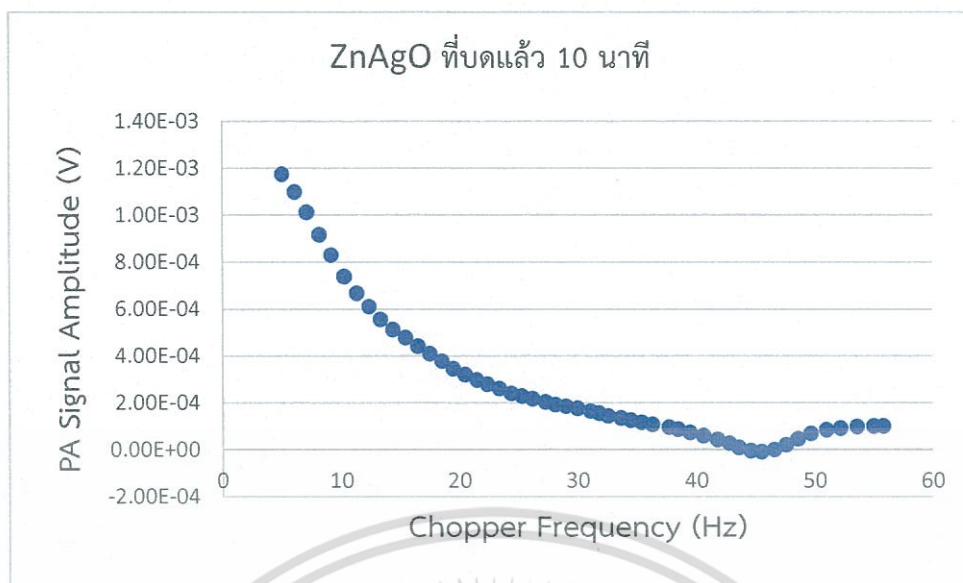


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก(V) ของเซลล์ที่ยังไม่มีตัวอย่าง

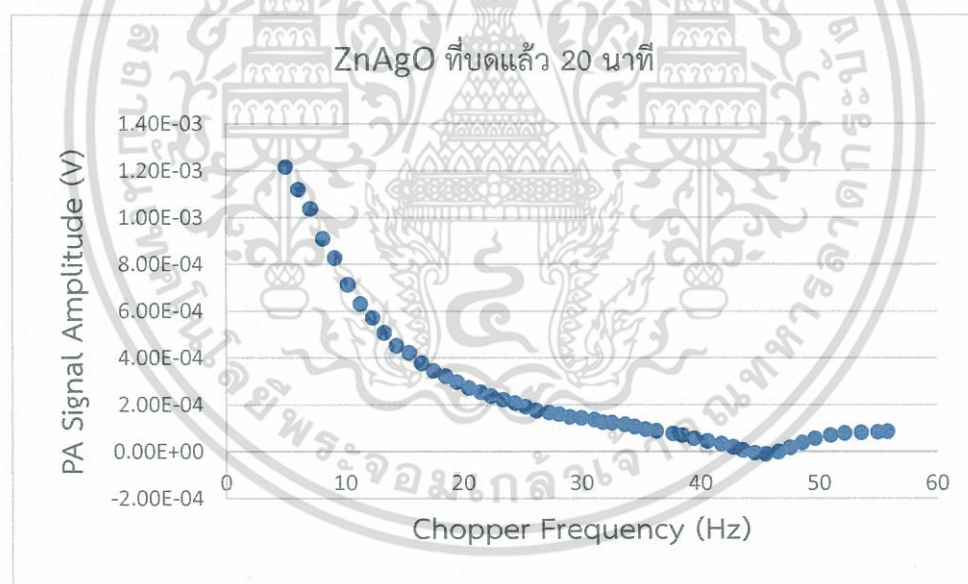


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่ยังไม่บด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

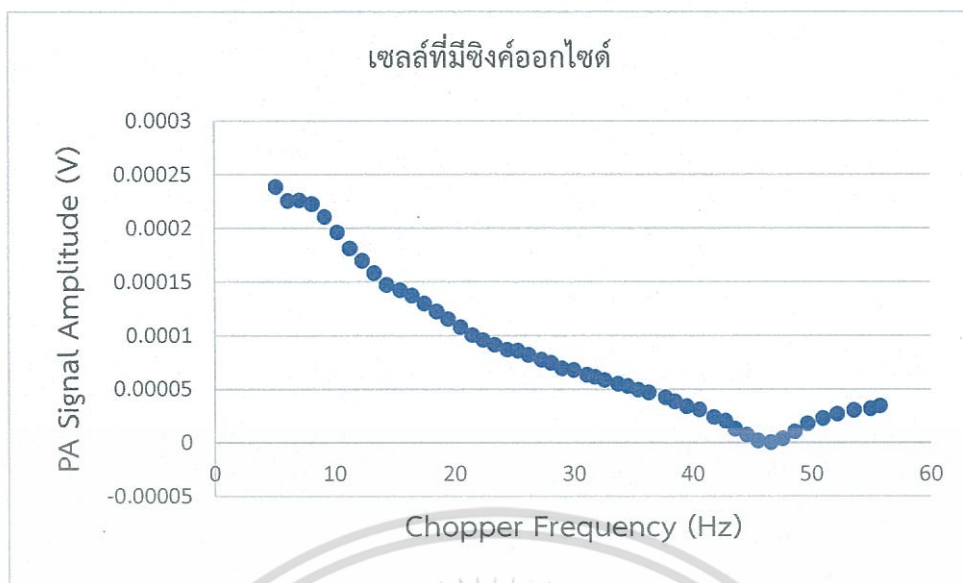


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก (V) ของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของตัวตัดแสง (Hz) และแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติก(V) ของซิงค์ออกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่ยังไม่มีตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆของตัวตัดแสง

Chopper Frequency (Hz)	PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่ยังไม่มีตัวอย่าง
5.09	0.000141
6.14	0.000117
7.15	9.67E-05
8.18	8.14E-05
9.21	7.07E-05
10.28	6E-05
11.32	5.3E-05
12.36	4.66E-05
13.33	4.24E-05
14.36	3.94E-05
15.47	3.7E-05
16.48	3.47E-05
17.51	3.27E-05
18.55	2.99E-05
19.48	2.86E-05
20.5	2.64E-05
21.5	2.57E-05
22.4	2.49E-05
23.4	2.37E-05
24.4	2.43E-05
25.3	2.25E-05
26.2	2.07E-05
27.3	1.99E-05
28.1	1.84E-05
29	1.79E-05
30	1.79E-05
31.1	1.75E-05
31.8	1.69E-05
32.6	1.66E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33.7	1.57E-05
34.5	1.49E-05
35.4	1.4E-05
36.3	1.3E-05
37.7	1.23E-05
38.5	1.15E-05
39.5	1.07E-05
40.6	9.44E-06
41.8	7.75E-06
42.8	6.53E-06
43.6	5.48E-06
44.6	3.64E-06
45.5	2.08E-06
46.6	9.44E-07
47.6	3.96E-07
48.6	6.57E-07
49.7	1.74E-06
51	2.67E-06
52.2	3.29E-06
53.6	3.85E-06
55	2.47E-06
55.8	2.57E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่ยังไม่บดที่ความถี่ต่างๆของตัว
ตัดแสง

Chopper Frequency (Hz)	PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิลเวอร์ไดโพลซิงค์ออกไซด์ที่ยังไม่บด
5.09	0.001124
6.14	0.001046
7.15	0.000932
8.18	0.000812
9.21	0.000737
10.28	0.000642
11.32	0.000581
12.36	0.000521
13.33	0.000468
14.36	0.000425
15.47	0.000394
16.48	0.000355
17.51	0.000323
18.55	0.000299
19.48	0.00027
20.5	0.000256
21.5	0.000239
22.4	0.000223
23.4	0.000208
24.4	0.00019
25.3	0.000189
26.2	0.00018
27.3	0.000168
28.1	0.00016
29	0.000152
30	0.000144
31.1	0.000138
31.8	0.000133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.6	0.000124
33.7	0.000117
34.5	0.00011
35.4	0.000104
36.3	9.6E-05
37.7	8.66E-05
38.5	7.73E-05
39.5	6.62E-05
40.6	5.74E-05
41.8	4.71E-05
42.8	3.63E-05
43.6	2.57E-05
44.6	1.15E-05
45.5	-4.9E-07
46.6	-7.8E-06
47.6	-6.4E-06
48.6	6.81E-06
49.7	2.64E-05
51	4.52E-05
52.2	5.9E-05
53.6	6.41E-05
55	6.55E-05
55.8	6.56E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บัดแล้ว 10 นาทีที่ความถี่ต่างๆ ของตัวตัดแสง

Chopper Frequency (Hz)	PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ที่บัดแล้ว 10 นาที
5.09	0.001172
6.14	0.001097
7.15	0.001012
8.18	0.000915
9.21	0.000828
10.28	0.000736
11.32	0.000666
12.36	0.000609
13.33	0.000555
14.36	0.00051
15.47	0.000477
16.48	0.000441
17.51	0.000408
18.55	0.000376
19.48	0.000344
20.5	0.000319
21.5	0.000297
22.4	0.000278
23.4	0.00026
24.4	0.00024
25.3	0.000227
26.2	0.000216
27.3	0.000203
28.1	0.000192
29	0.000183
30	0.000176
31.1	0.000164
31.8	0.000154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.6	0.000144
33.7	0.000133
34.5	0.000124
35.4	0.000115
36.3	0.000106
37.7	9.57E-05
38.5	8.5E-05
39.5	7.29E-05
40.6	5.82E-05
41.8	4.28E-05
42.8	2.65E-05
43.6	9.24E-06
44.6	-5.5E-06
45.5	-1.1E-05
46.6	-1.2E-06
47.6	1.95E-05
48.6	4.57E-05
49.7	6.78E-05
51	8.28E-05
52.2	9.15E-05
53.6	9.71E-05
55	0.000099
55.8	9.87E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาทีที่ความถี่ต่างๆ ของตัวตัดแสง

Chopper Frequency (Hz)	PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิลเวอร์ไดโปกิ้งค์ออกไซด์ที่บดแล้ว 20 นาที
5.09	0.00121443
6.14	0.00111799
7.15	0.0010377
8.18	0.00090982
9.21	0.00082576
10.28	0.00071255
11.32	0.00063127
12.36	0.00057183
13.33	0.00050573
14.36	0.00045253
15.47	0.00042212
16.48	0.00037584
17.51	0.00034379
18.55	0.00032063
19.48	0.0002962
20.5	0.00027185
21.5	0.00025272
22.4	0.00023691
23.4	0.00022112
24.4	0.00020702
25.3	0.00019075
26.2	0.00017526
27.3	0.00016678
28.1	0.00015851
29	0.00014897
30	0.00014306
31.1	0.00013611
31.8	0.00012577

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.6	0.00012311
33.7	0.00011586
34.5	0.00010593
35.4	9.6137E-05
36.3	8.7782E-05
37.7	7.7963E-05
38.5	6.9618E-05
39.5	5.6732E-05
40.6	4.6318E-05
41.8	3.4152E-05
42.8	2.0592E-05
43.6	6.475E-06
44.6	-0.00000584
45.5	-0.00000932
46.6	-7.4333E-07
47.6	1.7665E-05
48.6	3.8042E-05
49.7	5.6542E-05
51	7.0405E-05
52.2	7.8758E-05
53.6	8.2888E-05
55	8.5007E-05
55.8	8.5812E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

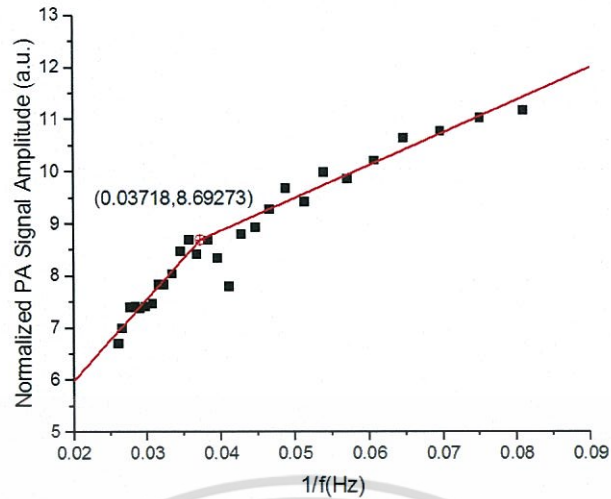
ตารางที่ 6.8 แสดง PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์ที่ความถี่ต่างๆของตัวดัดแสง

Chopper Frequency (Hz)	PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์
5.09	0.000238
6.14	0.000225
7.15	0.000226
8.18	0.000222
9.21	0.00021
10.28	0.000196
11.32	0.000181
12.36	0.00017
13.33	0.000158
14.36	0.000147
15.47	0.000142
16.48	0.000137
17.51	0.00013
18.55	0.000122
19.48	0.000115
20.5	0.000108
21.5	0.0001
22.4	9.56E-05
23.4	9.11E-05
24.4	8.64E-05
25.3	8.53E-05
26.2	8.17E-05
27.3	7.7E-05
28.1	7.4E-05
29	6.92E-05
30	6.76E-05
31.1	6.29E-05
31.8	6.08E-05
32.6	5.79E-05

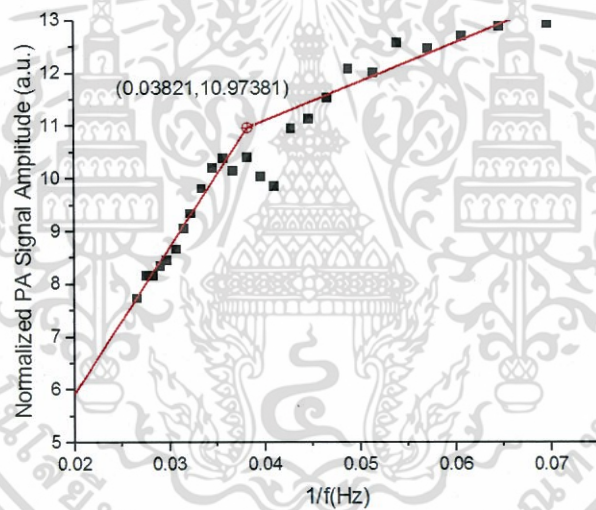
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33.7	5.47E-05
34.5	5.23E-05
35.4	4.9E-05
36.3	4.64E-05
37.7	4.18E-05
38.5	3.79E-05
39.5	3.37E-05
40.6	3.03E-05
41.8	2.34E-05
42.8	1.98E-05
43.6	1.26E-05
44.6	6.97E-06
45.5	1.38E-06
46.6	-3.9E-08
47.6	3.67E-06
48.6	1.03E-05
49.7	1.74E-05
51	2.25E-05
52.2	2.67E-05
53.6	3E-05
55	3.17E-05
55.8	3.41E-05

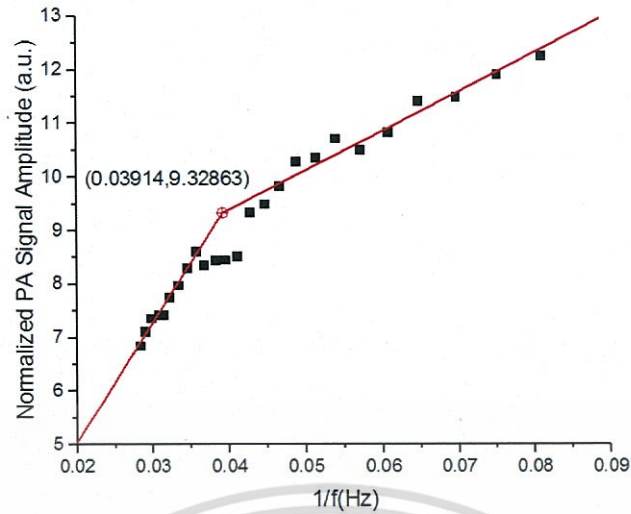
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



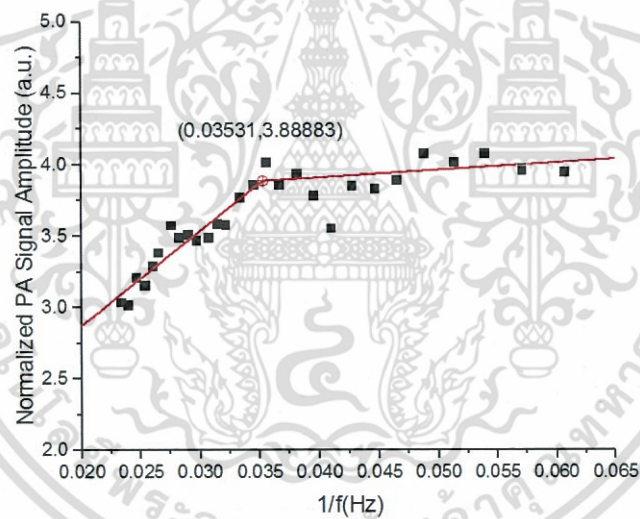
รูปที่ 6.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่ยังไม่บัดและถูก นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง



รูปที่ 6.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บัด 10 นาทีและถูก นอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง



รูปที่ 6.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติคของ ZnAgO ที่บิด 20 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง



รูปที่ 6.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติคของซิงค์ออกไซด์และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

ตารางที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V)

เซลล์ที่มี ZnAgO ที่ยังไม่บัด กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

1/f (1/Hz)	Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่ยังไม่บัด
0.196464	7.96E+00
0.162866	8.91E+00
0.13986	9.64E+00
0.122249	9.97E+00
0.108578	1.04E+01
0.097276	1.07E+01
0.088339	1.10E+01
0.080906	1.12E+01
0.075019	1.10E+01
0.069638	1.08E+01
0.064641	1.07E+01
0.06068	1.02E+01
0.05711	9.87E+00
0.053908	1.00E+01
0.051335	9.44E+00
0.04878	9.69E+00
0.046512	9.29E+00
0.044643	8.95E+00
0.042735	8.81E+00
0.040984	7.82E+00
0.039526	8.36E+00
0.038168	8.70E+00
0.03663	8.44E+00
0.035587	8.70E+00
0.034483	8.49E+00
0.033333	8.06E+00
0.032154	7.86E+00
0.031447	7.86E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.030675	7.48E+00
0.029674	7.43E+00
0.028986	7.38E+00
0.028249	7.42E+00
0.027548	7.41E+00
0.026525	7.01E+00
0.025974	6.72E+00
0.025316	6.20E+00
0.024631	6.08E+00
0.023923	6.08E+00
0.023364	5.55E+00
0.022936	4.69E+00
0.022422	3.16E+00
0.021978	-2.37E-01
0.021459	-8.21E+00
0.021008	-1.61E+01
0.020576	1.04E+01
0.020121	1.51E+01
0.019608	1.69E+01
0.019157	1.79E+01
0.018657	1.67E+01
0.018182	2.65E+01
0.017921	2.56E+01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

1/f (1/Hz)	Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที
0.196464	8.30E+00
0.162866	9.34E+00
0.13986	1.05E+01
0.122249	1.12E+01
0.108578	1.17E+01
0.097276	1.23E+01
0.088339	1.26E+01
0.080906	1.31E+01
0.075019	1.31E+01
0.069638	1.30E+01
0.064641	1.29E+01
0.06068	1.27E+01
0.05711	1.25E+01
0.053908	1.26E+01
0.051335	1.20E+01
0.04878	1.21E+01
0.046512	1.16E+01
0.044643	1.11E+01
0.042735	1.10E+01
0.040984	9.87E+00
0.039526	1.01E+01
0.038168	1.04E+01
0.03663	1.02E+01
0.035587	1.04E+01
0.034483	1.02E+01
0.033333	9.83E+00
0.032154	9.35E+00
0.031447	9.08E+00

0.030675	8.68E+00
0.029674	8.46E+00
0.028986	8.36E+00
0.028249	8.18E+00
0.027548	8.18E+00
0.026525	7.75E+00
0.025974	7.39E+00
0.025316	6.83E+00
0.024631	6.16E+00
0.023923	5.52E+00
0.023364	4.06E+00
0.022936	1.69E+00
0.022422	-1.52E+00
0.021978	-5.26E+00
0.021459	-1.28E+00
0.021008	4.93E+01
0.020576	6.96E+01
0.020121	3.89E+01
0.019608	3.11E+01
0.019157	2.78E+01
0.018657	2.52E+01
0.018182	4.01E+01
0.017921	3.85E+01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V)
เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

1/f (1/Hz)	Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มี ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาที
0.196464	8.60E+00
0.162866	9.52E+00
0.13986	1.07E+01
0.122249	1.12E+01
0.108578	1.17E+01
0.097276	1.19E+01
0.088339	1.19E+01
0.080906	1.23E+01
0.075019	1.19E+01
0.069638	1.15E+01
0.064641	1.14E+01
0.06068	1.08E+01
0.05711	1.05E+01
0.053908	1.07E+01
0.051335	1.04E+01
0.04878	1.03E+01
0.046512	9.83E+00
0.044643	9.50E+00
0.042735	9.35E+00
0.040984	8.52E+00
0.039526	8.46E+00
0.038168	8.46E+00
0.03663	8.36E+00
0.035587	8.61E+00
0.034483	8.30E+00
0.033333	7.98E+00
0.032154	7.76E+00
0.031447	7.42E+00

0.030675	7.42E+00
0.029674	7.36E+00
0.028986	7.12E+00
0.028249	6.85E+00
0.027548	6.78E+00
0.026525	6.31E+00
0.025974	6.05E+00
0.025316	5.32E+00
0.024631	4.91E+00
0.023923	4.41E+00
0.023364	3.15E+00
0.022936	1.18E+00
0.022422	-1.61E+00
0.021978	-4.49E+00
0.021459	-7.88E-01
0.021008	4.46E+01
0.020576	5.79E+01
0.020121	3.24E+01
0.019608	2.64E+01
0.019157	2.39E+01
0.018657	2.15E+01
0.018182	3.44E+01
0.017921	3.34E+01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized PA Signal Amplitude (V)

เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์ กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

1/f (1/Hz)	Normalized PA Signal Amplitude (V) เซลล์ที่มีซิงค์ออกไซด์
0.196464	1.687818
0.162866	1.918562
0.13986	2.337937
0.122249	2.729834
0.108578	2.976925
0.097276	3.262825
0.088339	3.408832
0.080906	3.640477
0.075019	3.721308
0.069638	3.737695
0.064641	3.845368
0.06068	3.951093
0.05711	3.96075
0.053908	4.0812
0.051335	4.020793
0.04878	4.079617
0.046512	3.893654
0.044643	3.834336
0.042735	3.85312
0.040984	3.557648
0.039526	3.783722
0.038168	3.941392
0.03663	3.862211
0.035587	4.017511
0.034483	3.859691
0.033333	3.77371
0.032154	3.583955
0.031447	3.589617

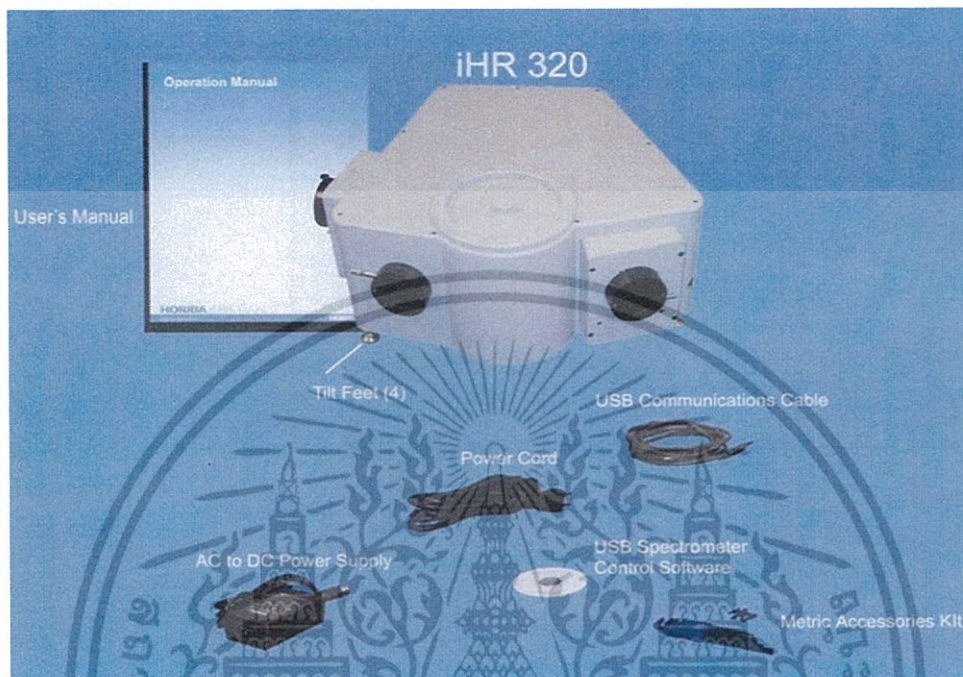
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.030675	3.492305
0.029674	3.473523
0.028986	3.515156
0.028249	3.490713
0.027548	3.577959
0.026525	3.38649
0.025974	3.293502
0.025316	3.159152
0.024631	3.212281
0.023923	3.021406
0.023364	3.037688
0.022936	2.303626
0.022422	1.91769
0.021978	0.665864
0.021459	-0.04167
0.021008	9.276094
0.020576	15.66286
0.020121	9.960634
0.019608	8.433544
0.019157	8.10312
0.018657	7.785878
0.018182	12.80739
0.017921	13.28097

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่น

เราทำการเชื่อมต่อโปรแกรมกับเครื่องแยกความยาวคลื่นโดยใช้สาย USB และทำการติดตั้งโปรแกรมด้วย USB Spectrometer Control software ดังรูป



รูปที่ 6.17 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) iHR 320

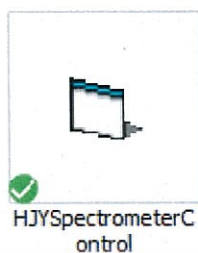


รูปที่ 6.18 แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

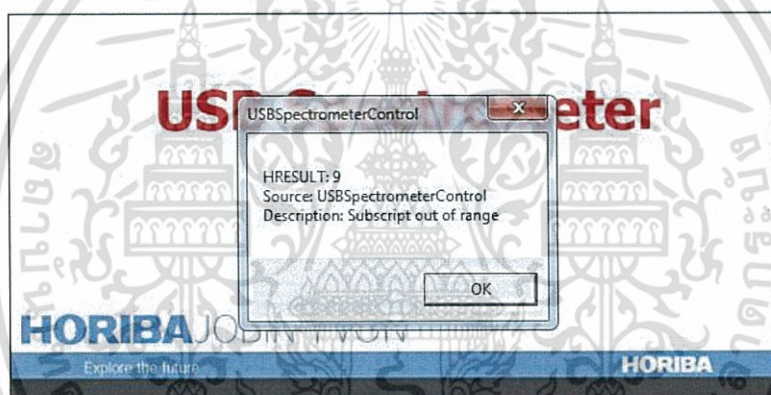
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม USB Spectrometer Control

1. เข้าสู่โปรแกรมคำสั่ง HJY Spectrometer



รูปที่ 6.19 แสดงไอคอนโปรแกรม

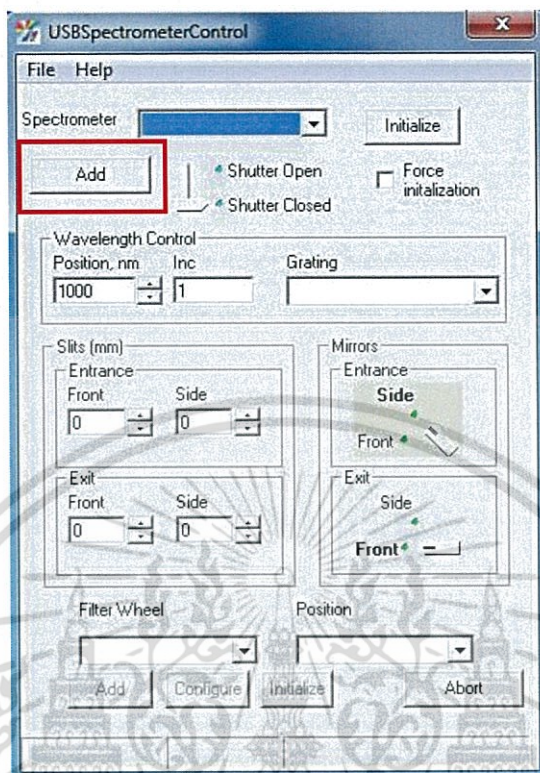
2. โปรแกรมคำสั่งจะปรากฏหน้าต่างดังนี้กด OK



รูปที่ 6.20 แสดงหน้าต่างกด OK

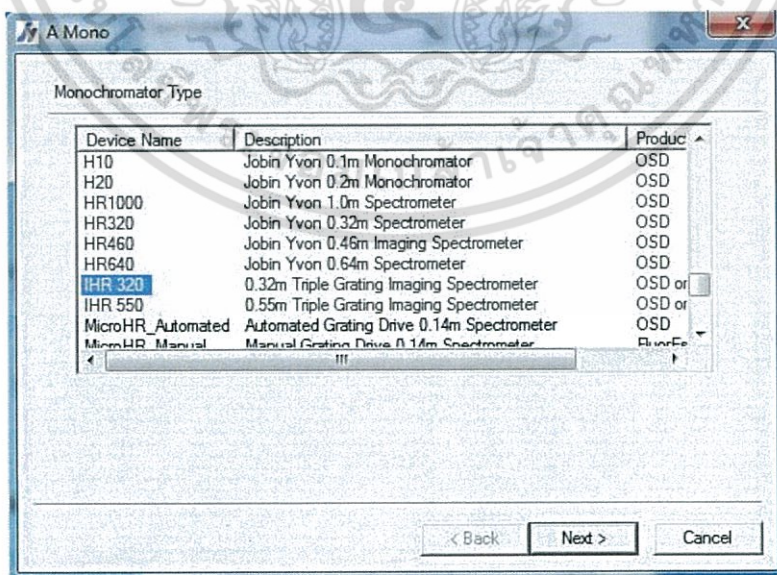
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากกด OK โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังนี้และให้กดที่ Add



รูปที่ 6.21 แสดงหน้าต่างหลังกด OK

4. เมื่อกด Add เสร็จโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ให้เลือกไปที่ IHR 320

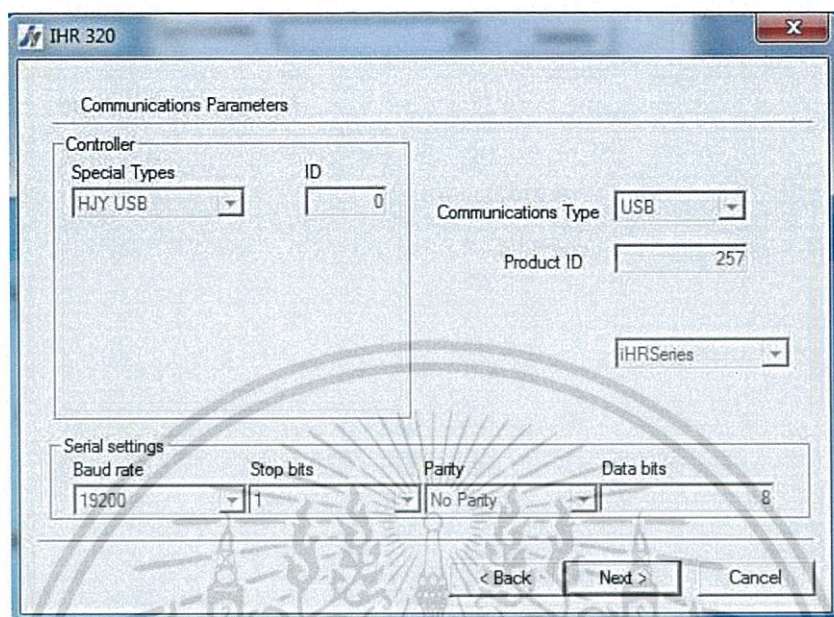


รูปที่ 6.22 แสดงโปรแกรมคำสั่งเลือกไปที่ IHR 320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

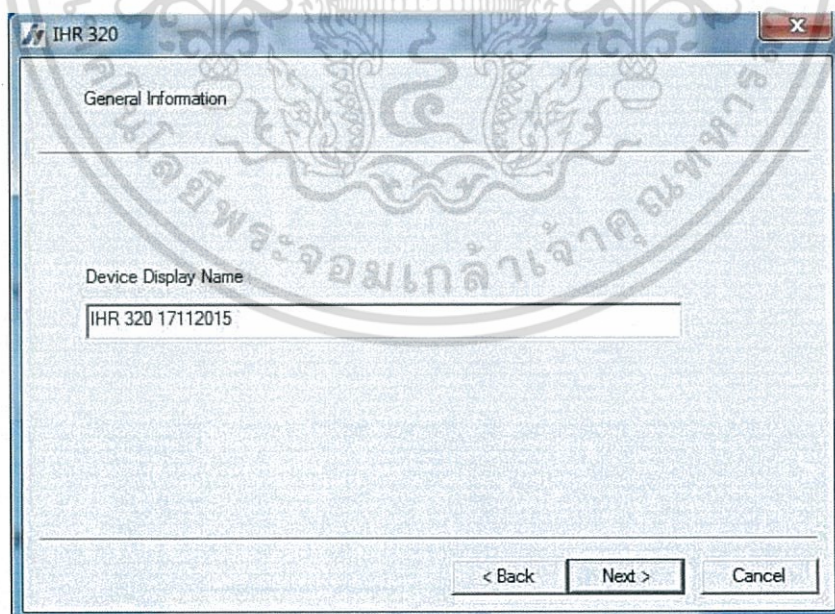
5. กด Next>

6. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ กด Next>



รูปที่ 6.23 แสดงโปรแกรมคำสั่งกด Next>

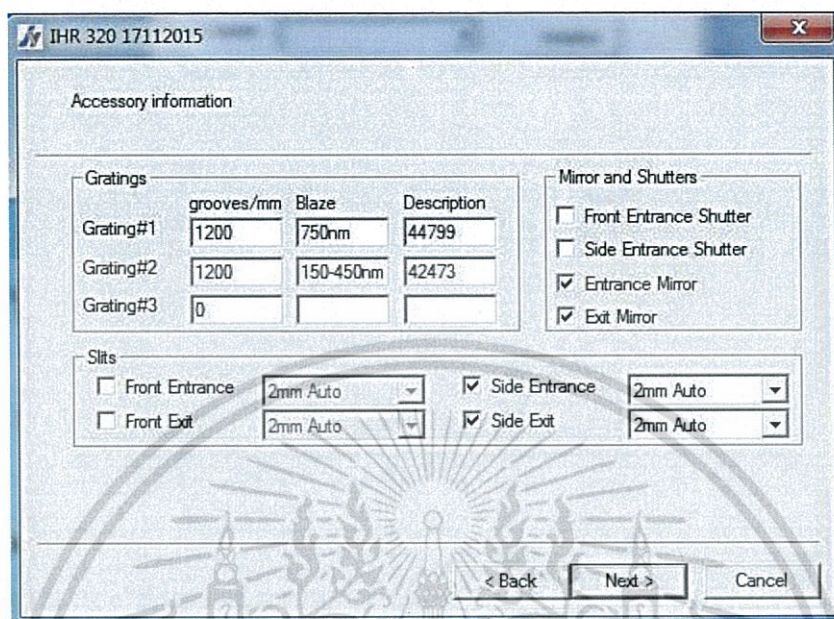
7. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง ให้ตั้งชื่อที่ช่อง Device Display Name



รูปที่ 6.24 แสดงการตั้งชื่อตรงช่อง Device Display Name

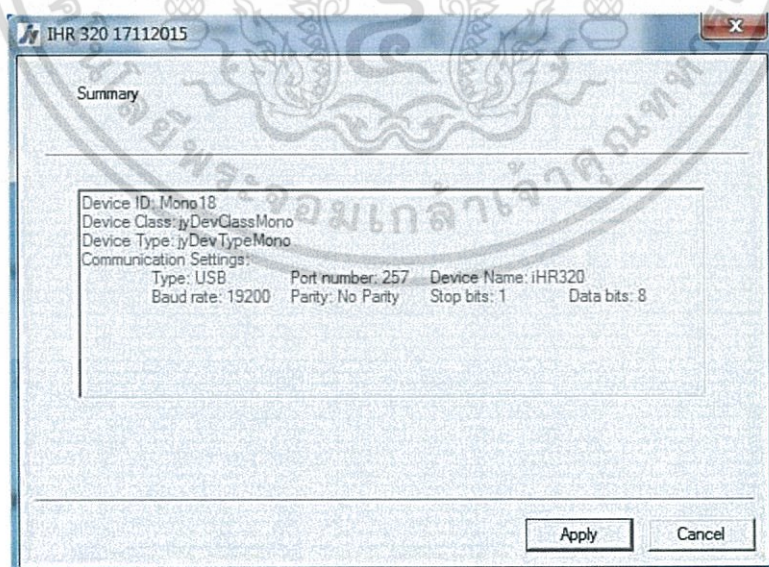
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เมื่อตั้งชื่อเสร็จ กด Next>
9. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Accessory information ดังนี้



รูปที่ 6.25 แสดงหน้าต่าง Accessory information

10. ตั้งค่าตามที่กำหนดในรูปที่ 3.19 แล้วกด Next>
11. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Summary ขึ้นมาดังนี้

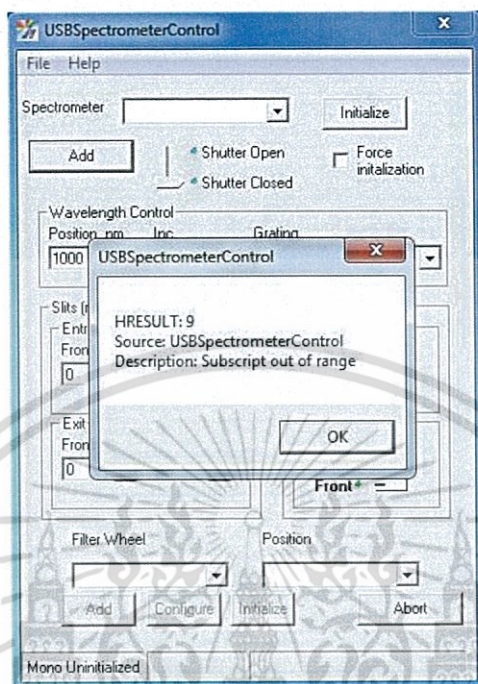


รูปที่ 6.26 แสดงหน้าต่าง Summary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

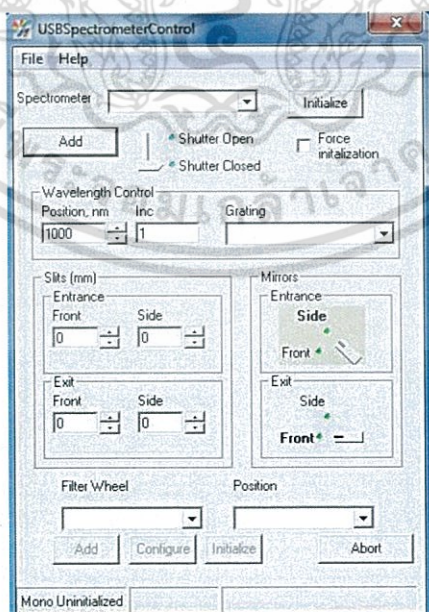
12. กด Apply

13. จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้ กด OK



รูปที่ 6.27 แสดงหน้าต่างให้กด OK

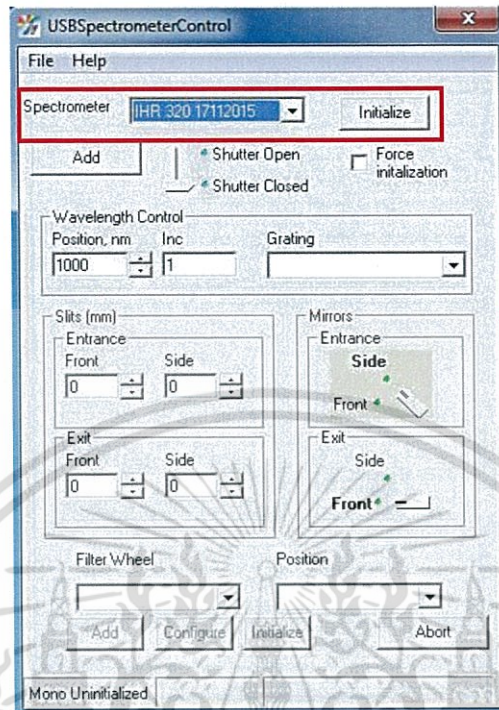
14. เมื่อทำการกด OK แล้ว จะเห็นหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 6.28 แสดงหน้าต่างหลังกด OK

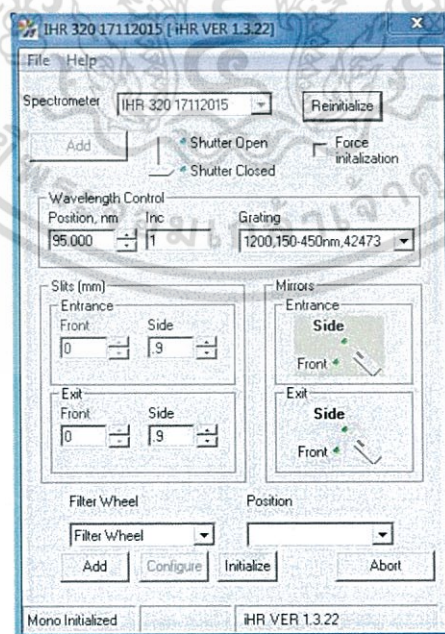
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer เป็นชื่อที่เราตั้งไว้แล้วกด Initialize



รูปที่ 6.29 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าโดยเลือกตรงช่อง Spectrometer

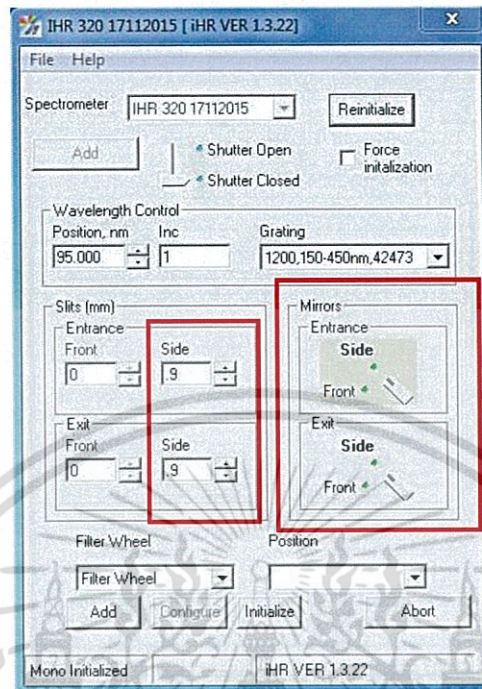
16. เมื่อกด Initialize แล้วโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างเดิมแต่ค่าต่างๆ จะเปลี่ยนไปดังนี้



รูปที่ 6.30 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าหลังกด Initialize

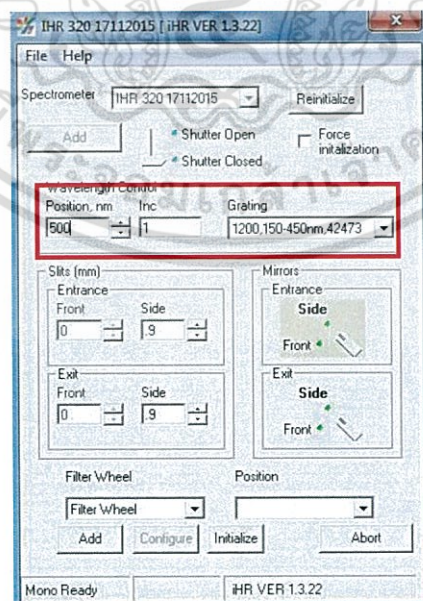
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. ตั้งค่าช่อง Side เป็น 0.9 ทั้งคู่ และช่อง Mirrors ปรับเป็น Side ทั้งคู่



รูปที่ 6.31 แสดงหน้าต่างการตั้งค่า

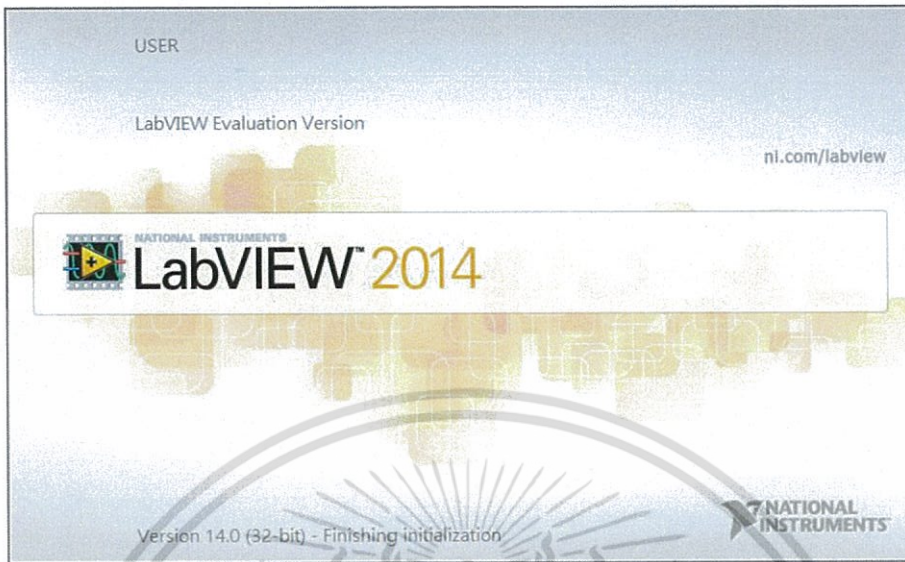
18. เมื่อตั้งค่าเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยการใส่ค่าความยาวคลื่นลงใน Wavelength Control



รูปที่ 6.32 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าการเลือกความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การใช้งานโปรแกรม SR510 Lock-in Amp



รูปที่ 6.33 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของ LabView 2014

โปรแกรม LabView ที่ใช้งานวิจัยครั้งนี้เป็น LabView 2014 และเนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นมีการใช้งาน Serial port ของคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องมีการลงโปรแกรมเสริมชื่อว่า NI-VISA ที่ย่อมาจาก National Instruments - The Virtual Instrument Software Architecture สามารถดาวน์โหลดได้ในเว็บไซต์ของ National Instruments



POPULAR SUPPORT PAGES

SOFTWARE

- LabVIEW
- DIAdem
- LabWindows™/CVI
- Measurement Studio
- Multisim
- TestStand

HARDWARE DRIVER

- NI-DAQmx
- NI-VISA
- NI-488.2
- Vision Acquisition Software
- NI-Motion

HARDWARE

- USB-6008
- cDAQ-9188
- cRIO-9074
- GPIB-USB-HS+
- NI 9237
- NI 9205

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 6.34 แสดงหน้าเว็บไซต์ในส่วนที่ใช้สำหรับดาวน์โหลดโปรแกรมเสริม ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

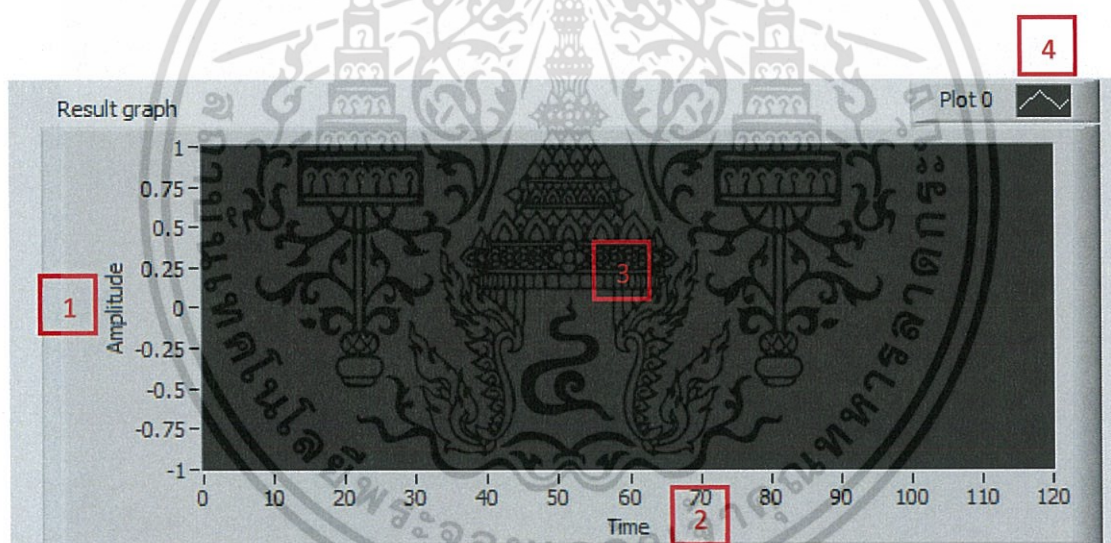
โปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นมีชื่อว่า “SR510 Lock-in Amp” หลังจากที่ติดตั้งโปรแกรม LabView 2014 และโปรแกรมเสริมเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถเปิดใช้งานโปรแกรมได้เลย



รูปที่ 6.35 แสดง icon ของโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นที่มีชื่อว่า SR510 Lock-in Amp

โปรแกรมประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก 1.ส่วนแสดงกราฟของข้อมูล 2.ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นและส่วนของการแสดงผล และ 3.ส่วนของการปรับค่าต่างๆของ Lock-in Amplifier

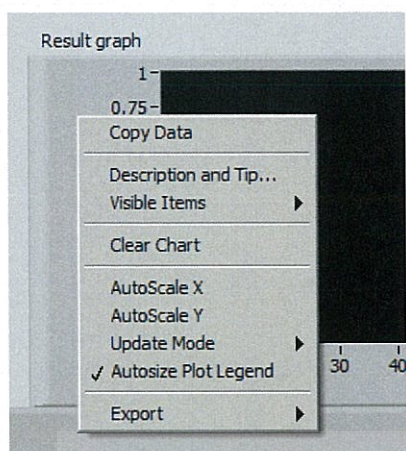
1.ส่วนแสดงกราฟของข้อมูล



รูปที่ 6.36 แสดงส่วนแสดงกราฟของโปรแกรม

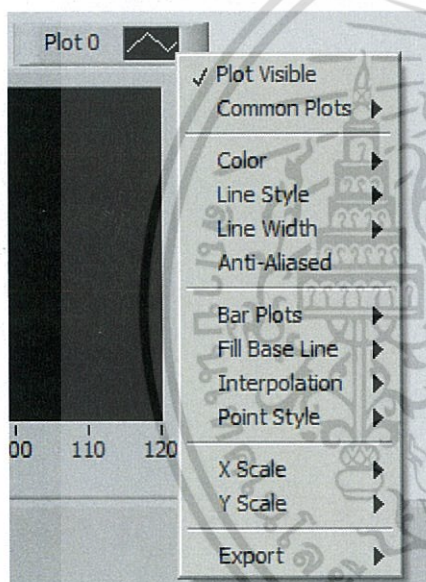
1. แกน Y แสดงถึงขนาดของสัญญาณจาก Lock-in Amplifier
2. แกน X แสดงถึงลำดับของข้อมูล
3. แสดงกราฟของสัญญาณ
4. ส่วนที่ใช้กำหนดลักษณะของการแสดงกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 แสดงส่วนการกำหนดค่าแกน X และ Y

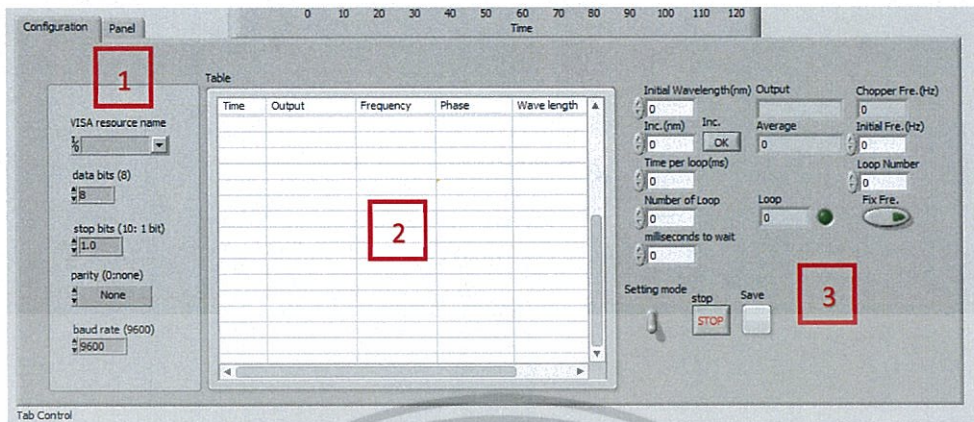
1.1 หากผู้ใช้ทำการคลิกขวาที่วางบริเวณแกน X หรือ แกน Y โปรแกรมจะปรากฏเมนูสำหรับดำเนินการต่างๆ กับส่วนแสดงกราฟ เช่น คัดลอกข้อมูล , ลบกราฟ , กำหนดการแสดงค่าแกน X แบบอัตโนมัติ หรือ กำหนดการแสดงค่าแกน Y แบบอัตโนมัติ เป็นต้น



รูปที่ 6.38 แสดงส่วนการกำหนดลักษณะการแสดงกราฟ

1.2 หากผู้ใช้คลิกขวาที่รูปภาพสามเหลี่ยมเล็กๆ มุมขวาบนของโปรแกรม โปรแกรมจะปรากฏเมนูสำหรับการตั้งค่าลักษณะการแสดงกราฟ เช่น สี , ลักษณะเส้นกราฟ , ความกว้างเส้นกราฟ หรือ ลักษณะของจุดข้อมูล เป็นต้น

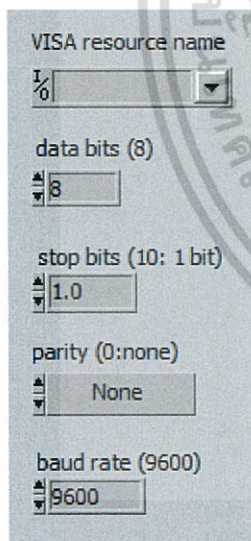
2. ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นและส่วนของการแสดงผล



รูปที่ 6.39 แสดงส่วนตั้งค่าเริ่มต้นและส่วนของการแสดงผล

ในส่วนของการตั้งค่าเริ่มต้น ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย คือ

1. ส่วนของการตั้ง Serial port
2. ส่วนของการแสดงข้อมูลการทดลอง
3. ส่วนการตั้งค่าการเก็บข้อมูล

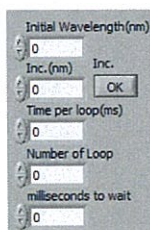


2.1 ส่วนของการตั้ง Serial port

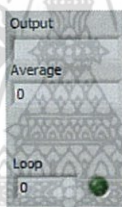
VISA resource name คือ ส่วนที่ผู้ใช้ต้องเลือก port ที่เชื่อมต่อกับ Lock-in Amplifier ให้ถูกต้อง

รูปที่ 6.40 แสดงส่วนของการตั้ง Serial port

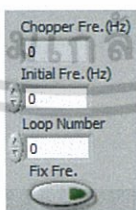
3. ส่วนการตั้งค่าการเก็บข้อมูล



รูปที่ 6.43 แสดงการกำหนดค่า Initial Wavelength(nm) คือ ความยาวคลื่นตั้งต้น Inc.(nm) คือ กำหนดการเพิ่มค่าความยาวคลื่นทุกครั้งที่มีการกด OK Time per loops(ms) คือ ระยะเวลาการพักการเก็บข้อมูลระหว่างการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง Number of Loop คือ จำนวนครั้งที่ต้องการเก็บข้อมูล milliseconds to wait คือ การพักการเก็บข้อมูลระหว่างความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (หมายเหตุ การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นในโปรแกรมนี้ ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงจริงๆ เป็นเพียงการเปลี่ยนค่าการแสดงผลเพื่อให้สอดคล้องกับโปรแกรมที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงเท่านั้น)

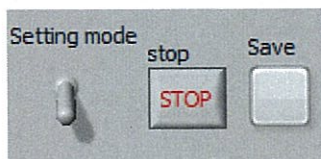


รูปที่ 6.44 แสดงค่าข้อมูลจาก Lock-in Amplifier (Output) และค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการวัดหลายๆ Loop (Average) และ แสดงลำดับของ loop ปัจจุบันที่โปรแกรมทำงานอยู่ (Loop)

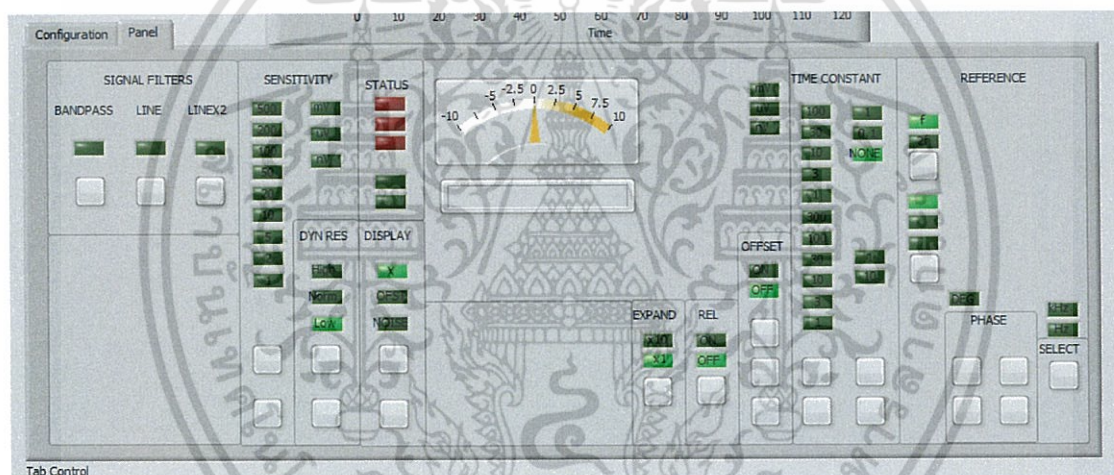


รูปที่ 6.45 แสดงส่วนการกำหนดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของตัวตัดแสง Chopper Fre.(Hz) แสดงค่าความถี่ตัวตัดแสงค่าปัจจุบัน Initial Fre.(Hz) คือ ส่วนกำหนดความถี่ของตัวตัดแสงตั้งต้น และ Loop Number คือ ความถี่ของตัวตัดแสงค่าสุดท้ายที่ต้องการวัดแล้วหยุดการทำงานโปรแกรม และ ปุ่ม Fix Fre. เมื่อถูกกดโปรแกรมจะทำงานโดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ตัวตัดแสง แต่ถ้าหากไม่ถูกกด โปรแกรมจะเพิ่มค่าความถี่ตัวตัดแสงครั้งละ 1 Hz ทุกครั้งที่โปรแกรมเก็บข้อมูลเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (หมายเหตุ การกำหนดค่าความถี่ตัวตัดแสงตรงนี้เป็นกรกำหนดค่าจริงๆกับตัวตัดแสง) ราค
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.46 แสดงปุ่มสั่งการโปรแกรม Setting mode เมื่อโดนโยกลงโปรแกรมจะเก็บข้อมูลอัตโนมัติ โดยที่ไม่รอการกดปุ่ม OK ในส่วนของการเพิ่มความยาวคลื่น ดังนั้นการโยกลงเหมาะสำหรับการวัด การตั้งค่า ที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น และทุกครั้งที่ต้องการตั้งค่าใดๆ Lock-in Amplifier ปุ่มต้องถูกโยกลงก่อนเสมอ เมื่อปุ่ม Setting mode ถูกโยกขึ้น โปรแกรมจะไม่ทำการเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ทุกครั้งที่เก็บข้อมูลเสร็จ โปรแกรมจะรอการกดปุ่ม OK เพื่อเริ่มทำการเก็บข้อมูลต่อไป ปุ่ม Stop คือปุ่มหยุดการทำงาน โปรแกรม และ ปุ่ม Save เป็นปุ่มใช้สำหรับบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel แต่ปุ่มในใช้ได้เฉพาะตอนที่โปรแกรมยังทำงานอยู่เท่านั้น เมื่อหยุดโปรแกรมไปแล้วปุ่มนี้จะไม่ทำงาน



รูปที่ 6.47 แสดงหน้าต่างกำหนดการทำงานของ SR510 Lock-in Amplifier ซึ่งทำงานเหมือนกับการกำหนดค่าโดยตรงกับเครื่อง



รูปที่ 6.48 ที่มุมซ้ายบนของโปรแกรมจะมีปุ่มลักษณะดังภาพ ปุ่มลูกศรตรงสีขาวซ้ายสุดคือปุ่มที่ใช้สำหรับสั่งโปรแกรมให้เริ่มทำงาน ปุ่มลูกศรวนสีขาวตรงกลางคือปุ่มสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำงานและทำงานวนซ้ำไปเรื่อยๆไม่มีการหยุดทำงาน ต่อให้โปรแกรมทำงานสิ้นสุดแล้วก็ให้เริ่มทำงานใหม่ทันที และปุ่มกลมสีแดง คือ ปุ่มที่ใช้หยุดการทำงานโปรแกรมฉุกเฉิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

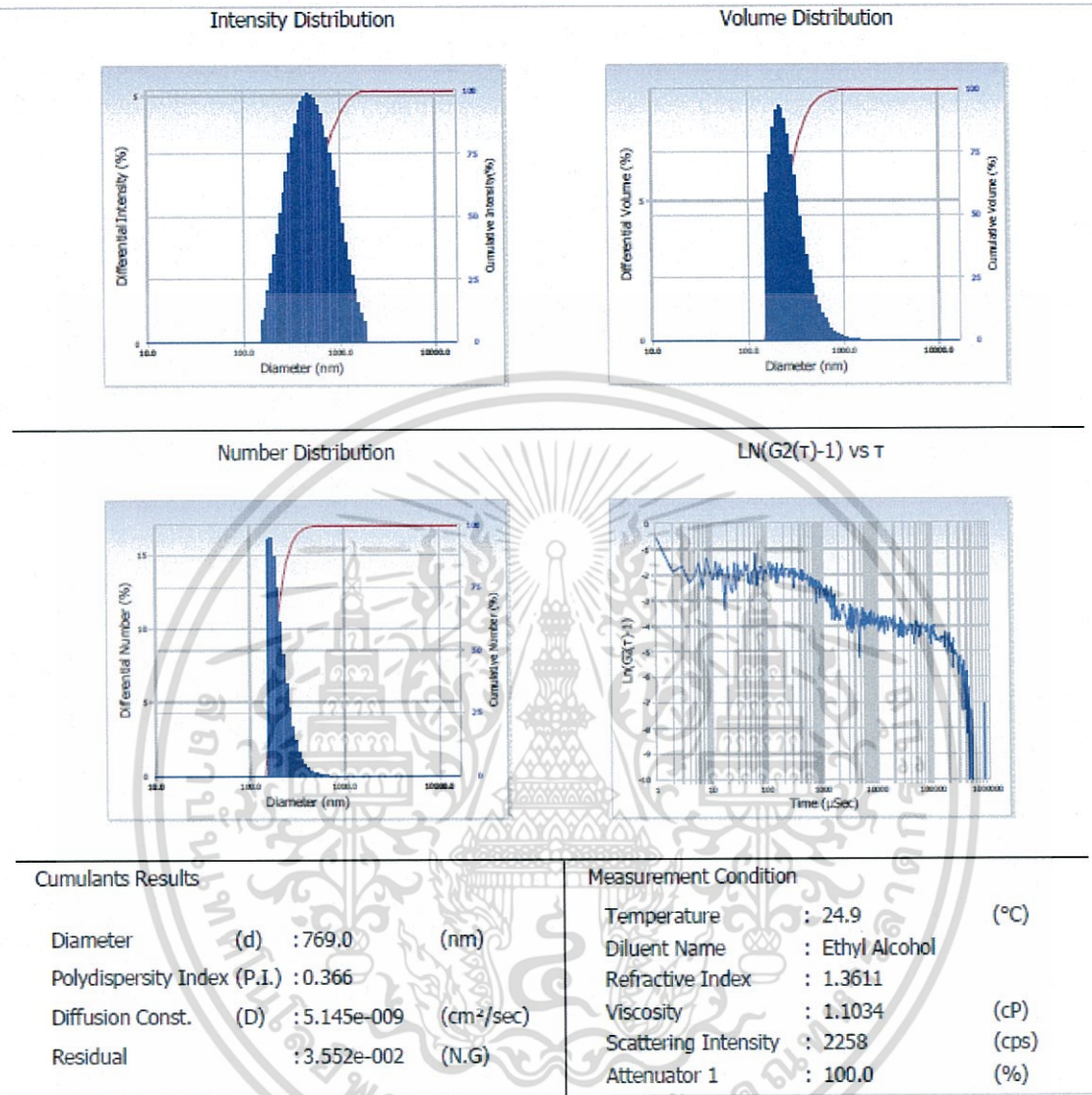
6. ภาพเครื่องมือ



รูปที่ 6.49 แสดงเครื่อง Particle Analyzer ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น Delsa™Nano C

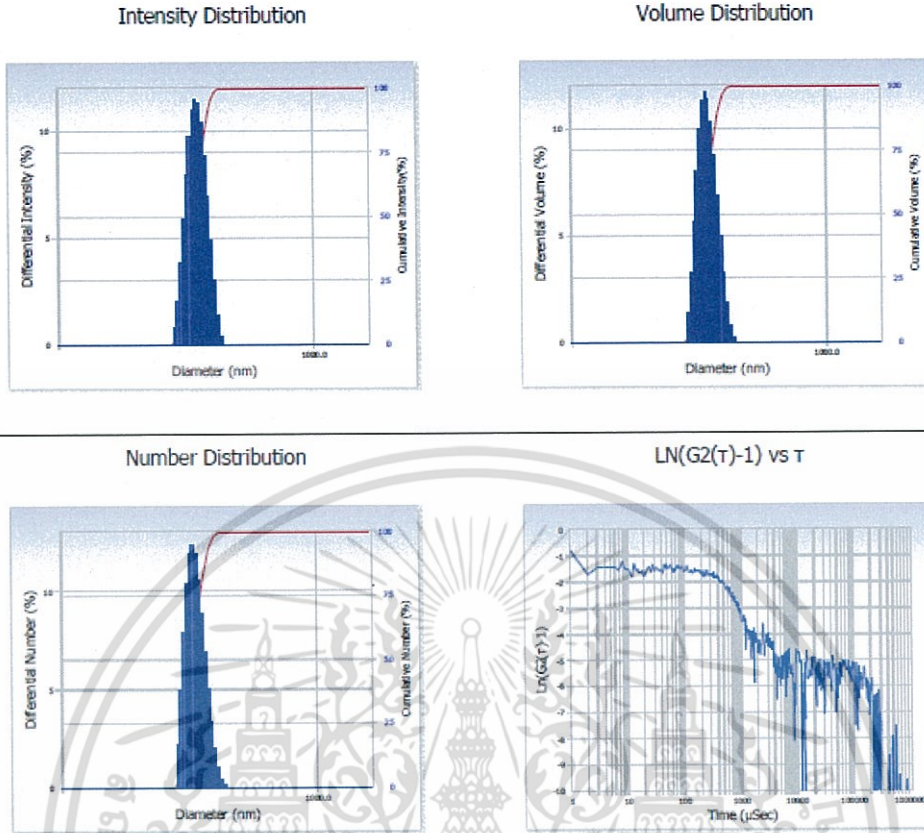
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลการวัด Particle Size



รูปที่ 6.50 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่ยังไม่บด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

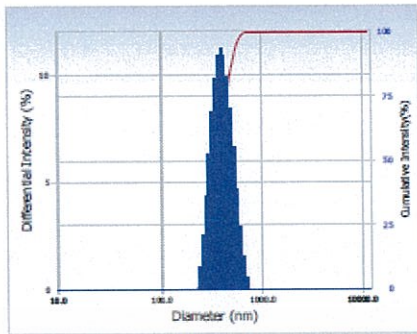


Cumulants Results		Measurement Condition	
Diameter (d)	: 672.7 (nm)	Temperature	: 25.0 (°C)
Polydispersity Index (P.I.)	: -5.741	Diluent Name	: Ethyl Alcohol
Diffusion Const. (D)	: 5.894e-009 (cm ² /sec)	Refractive Index	: 1.3611
Residual	: 2.257e-002 (N,G)	Viscosity	: 1.1015 (cP)
		Scattering Intensity	: 4748 (cps)
		Attenuator 1	: 100.0 (%)

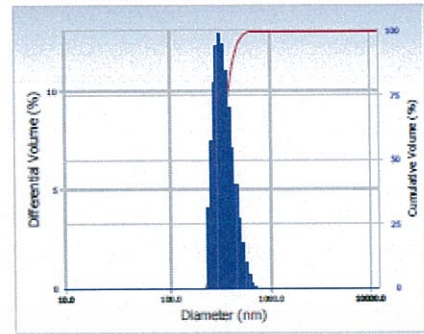
รูปที่ 6.51 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่บด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

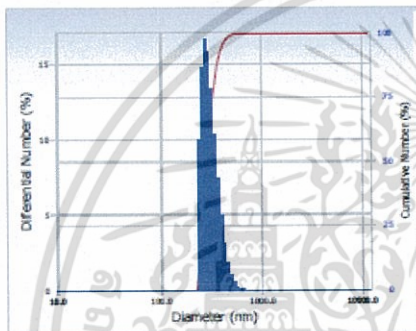
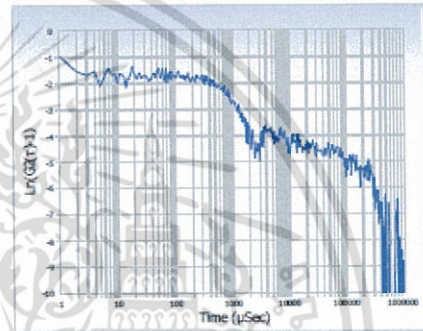
Intensity Distribution



Volume Distribution



Number Distribution

LN(G2(τ)-1) vs τ 

Cumulants Results

Diameter	(d)	: 617.0	(nm)
Polydispersity Index (P.I.)		: 0.300	
Diffusion Const.	(D)	: 6.426e-009	(cm ² /sec)
Residual		: 2.262e-002	(N.G)

Measurement Condition

Temperature	: 25.0	(°C)
Diluent Name	: Ethyl Alcohol	
Refractive Index	: 1.3611	
Viscosity	: 1.1015	(cP)
Scattering Intensity	: 3800	(cps)
Attenuator 1	: 100.0	(%)

รูปที่ 6.52 แสดงผลการวัดขนาดของอนุภาคของ ZnAgO ที่บด 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

