

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดผลึกกับค่าการแพร่ความร้อน
ของซิลเวอร์ โด๊ปซิงค์ออกไซด์ โดยเทคนิค โฟ โดอะคูสติก

(The relation of crystalline size and thermal diffusivity of Ag doped ZnO
studied by photoacoustic technique)

โดย

รองศาสตราจารย์วิภาญ เตชิตธีระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดผลึกกับค่าการแพร่ความร้อน
ของซิลเวอร์โคปริงต์ออกไซด์โดยเทคนิคโฟโตอะคูสติก

(The relation of crystalline size and thermal diffusivity of Ag doped ZnO
studied by photoacoustic technique)

โดย

รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ

600267977
RC00109

รายงานการวิจัยนี้ เป็นรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็น
เจ้าของทุนสำหรับงานวิจัยแบบบูรณาการ ประจำปีงบประมาณ 2559 (1 ตุลาคม
2558 – 30 กันยายน 2559) แม้ว่าการวิจัยนี้จะสำเร็จล่าช้าเนื่องจากต้องใช้นักศึกษา
ถึงสองรุ่นในการทำการทดลอง แต่งานวิจัยก็สำเร็จเกินเป้าหมายที่ตั้งไว้แต่แรก



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เจริญธีระ)

หัวหน้าโครงการวิจัย

26 เมษายน 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เนื้อหา

หน้า

บทนำ

1

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

21

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

31

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

39

เอกสารอ้างอิง

41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 การศึกษาค่าการกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ของซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยก่อนหน้าพบว่าการใช้ซิลเวอร์ (Ag) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการกระจายทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ได้ ดังนั้นการศึกษาซิลเวอร์โคป ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ โดยเทคนิคที่นำมาตรวจวัดค่าการกระจายความร้อน คือ เทคนิคโฟโตอะคูสติก (Photoacoustic technique)

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

เทคนิคนี้มีข้อดี คือ วิธีใช้งานไม่ซับซ้อน ไม่มีการสัมผัสวัตถุโดยตรงจึงไม่เกิดการทำลาย และสามารถตรวจวัดการเกิด non-radiative recombination ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมสารซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 2) เพื่อวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก
- 3) เพื่อวัดค่าการกระจายความร้อนของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก กับขนาดของเกรน
- 4) เพื่อเขียน โปรแกรมบันทึกข้อมูลอัตโนมัติและควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้โปรแกรม LabView

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เตรียมสารซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยสารมีอัตราส่วน โมลของซิลเวอร์เท่ากับ 0% 1% 3% 5% และ 7% แล้วทำการเผาสาร (sintering) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วนำสารมาอัดเม็ดที่น้ำหนัก 0.1g และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ทั้งหมด 15 เม็ด จากนั้นนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าการกระจายความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับค่าการกระจายความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมสารซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมได้
- 2) สามารถเขียน โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้โปรแกรม LabView ได้
- 3) สามารถวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์และวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ที่ขนาดของเกรนต่างกัน 3 ระดับได้

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 เราสามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ได้ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม และจากงานวิจัยของ S. Yun, H. Seo (Photoacoustic Measurements of Thermal Diffusivity or Thickness of Multi-layer solids)^[6] ทำให้เรารู้ว่า เราสามารถวัดค่าการกระจายความร้อนของสารได้ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติก จึงนำไปสู่การวัดค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 0% 1% 3% 5% และ 7% นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับค่าการกระจายความร้อนของสารเหล่านี้อีกด้วย

2.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอนแบล็ค

2.1.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

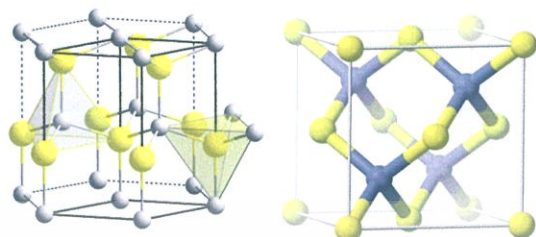
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ในกลุ่ม II-V มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบ direct band gap เท่ากับ 3.2 eV มีโครงสร้างผลึก 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างเฮกซะโกนอลเวอริทไซต์ และโครงสร้างคิวบิกซิงค์เบลนด์

เฮกซะโกนอลเวอริทไซต์เป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่เสถียรที่สุด เป็นโครงสร้างพื้นฐานโดยซิงค์จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลโคลอสแพค (Hexagonal closed pack : hcp) และมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions : O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc ions : Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะไอออนิกแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) หรือเวอริทไซต์ (Wurtzite) คือ ไอออนบวกทำการโคออร์ดิเนต (coordinate) กับไอออนลบ โดยไอออนชนิดหนึ่งถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้าม 4 ไอออน มีเลขโคออร์ดิเนตเท่ากับ 4:4 โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ซิงค์มีโครงสร้างแบบคิวบิก โดยซิงค์กับออกซิเจนจะมีพันธะไอออนิกแบบเตตระฮีดรอล

สารซิงค์ออกไซด์หรือคาลาไมน์ เป็นสารที่น่าสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสารที่มีใช้ในชีวิตประจำวัน โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น แป้งทาหน้า หรือครีมกันแดด เป็นต้น มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี

ในอุตสาหกรรมยางและใช้ผลิตน้ำหอม เครื่องสำอาง ยา เป็นสารยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารระงับกลืนกาย เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B และระงับกลืนอินไม่พึงประสงค์



ก.

ข.

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 $a = b = 3.24 \text{ \AA} , c = 5.19 \text{ \AA}$

2.1.2 ซิลเวอร์ (Ag)

ซิลเวอร์ (Ag) เป็นธาตุในกลุ่มโลหะทรานซิชัน (Transition metal) มีผิวมันวาว

สีขาวเงิน มีเลขอะตอม 47 มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face center cubic : FCC) ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีมาก และไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารและกรดอินทรีย์ ในสมัยโบราณ จึงได้นำซิลเวอร์มาใช้ทำเป็นภาชนะกักเก็บน้ำเพื่อกำจัดเชื้อโรค นอกจากนี้ ซิลเวอร์ยังมีประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ การบัดกรี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร อุตสาหกรรมการถ่ายรูปและใช้ทำสารเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

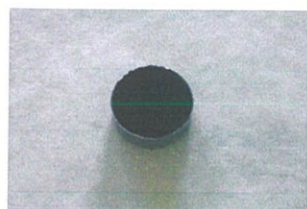
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพบางประการของซิลเวอร์ อ้างอิงจาก Wikipedia.org

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



รูปที่ 2.2 แสดงภาพคาร์บอนแบล็คที่บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กลั่นความร้อน

2.2.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง สามารถถ่ายเทจากบริเวณหนึ่ง ไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้ เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อบริเวณสองบริเวณนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน และถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความลาดชันของอุณหภูมิ, Temperature different) รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแต่ละแบบจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้

การนำความร้อน (Heat conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ได้แก่ ของเหลวหรือของแข็งที่อยู่กับที่ มีทั้งถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุเดียวกัน หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน เช่น การจับทัพพีโลหะในหม้อน้ำร้อนจะเกิดการนำความร้อนจากน้ำร้อนมาสู่มือของเรา โดยมีทัพพีโลหะเป็นตัวกลาง แต่ทัพพีโลหะไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงแบบเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นของแข็งที่บดแสง

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

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

การพาความร้อน (Heat convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสสารที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า) ก็จะลงมาแทนที่ เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเกิดลมบก คือ ในเวลากลางคืน พื้นดิน คลายความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้อากาศเหนือพื้นดินมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำหรือ อากาศเหนือพื้นดินมีความกดอากาศสูงกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำ เป็นผลให้อากาศเหนือพื้นดินที่มีความกดอากาศสูงกว่าเคลื่อนที่เข้าหาพื้นน้ำที่มีความกดอากาศต่ำกว่า หรือเกิดลมพัดจากบกออกสู่ ผังทะเลในเวลากลางคืน

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

สมการที่ (2) เป็นสมการการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อน (q_{cv} หน่วยเป็น W/m^2) กับผลต่าง ของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวกับของเหลว นั่นคือ หากอุณหภูมิของพื้นผิวกับอุณหภูมิของของเหลว ต่างกันมาก ก็จะมีฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อนมากด้วย โดยสัมพันธ์การแปรผัน คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h มีหน่วยเป็น $W/m^2.K$)

การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

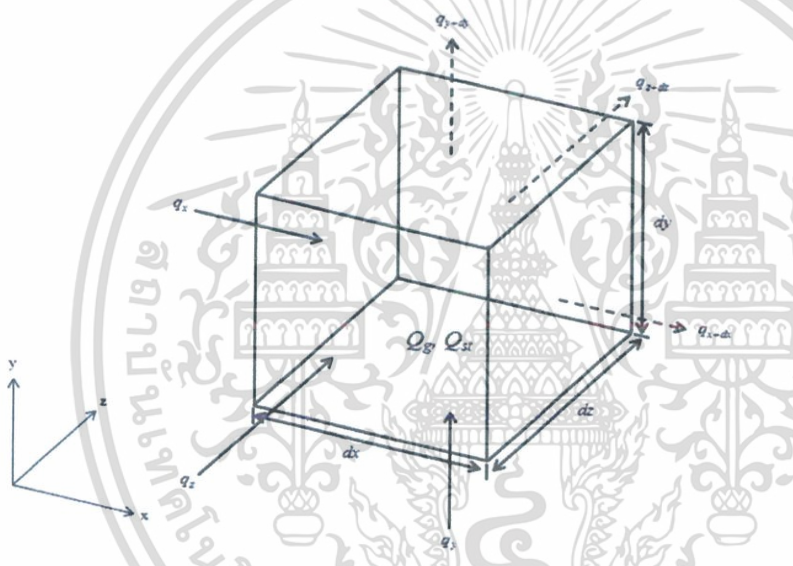
เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง ดังนั้น วัตถุที่อยู่บนโลก หรือในอวกาศ ก็สามารถแผ่รังสีได้เช่นเดียวกัน วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะสามารถแผ่รังสีความร้อน ได้ โดยแผ่รังสีความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้า วัตถุที่มีอุณหภูมิสูง จะแผ่รังสีความร้อน ออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น แต่ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิต่ำ จะแผ่รังสีความร้อน ออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาว วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจาก การแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ สีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้ม จะดูดกลืนความร้อนได้ ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน และผิววัตถุ วัตถุผิวขรุขระ จะดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบ และขี้ผึ้ง

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

จากสมการที่ (3) เป็นกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (q_{rd}) กับอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ โดย σ_{SB} คือค่าคงที่โบลทซ์มานน์และ \mathcal{E} คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุที่อุณหภูมิใดๆ

2.2.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล จำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิในตัวกลางในเงื่อนไขต่างๆ เช่น การพิจารณากฎอนุรักษ์พลังงานในปริมาตรขนาดเล็ก dV เพื่อให้ทราบลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในตัวกลาง และการพิจารณาสมการอัตราการส่งผ่านความร้อน เพื่อให้ทราบกระบวนการส่งผ่านความร้อน เป็นต้น โดยการพิจารณาดังกล่าว จะทำให้สามารถกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ได้



รูปที่ 2.3 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก

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

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

เมื่อ Q_{in} คือ อัตราความร้อนที่ไหลเข้าไปในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q_g คือ อัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ \dot{g} คือ อัตราการกำเนิดพลังงานต่อ 1 หน่วยปริมาตรภายในตัวกลาง

เมื่อ Q_{out} คือ อัตราความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ Q_{st} คือ อัตราความร้อนที่สะสมอยู่ในปริมาตร dV และมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ ρ, c คือ ค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลาง ตามลำดับ

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

สมการที่ (17) เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการการกระจายความร้อน (Heat diffusion equation) ในระบบพิกัดฉาก ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เรื่องการนำความร้อน สมการนี้อธิบายได้ว่า “อัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อน (โดยการนำความร้อน) เข้าไปในปริมาตร ร่วมกับ อัตราการเกิดพลังงานความร้อนในปริมาตร จะเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนสะสมภายในปริมาตรนั้น” และจากสมการการกระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ในระบบพิกัดฉาก เราสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1) ค่าการนำความร้อน (k) ของวัสดุเป็นแบบสมมาตร (Isotropic) จะได้

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

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

กรณีที่ 2) เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

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

การอธิบายนี้สามารถอ้างอิงถึงสมการ Fourier หรือสมการการกระจายความร้อน

กรณีที่ 3) เมื่อมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

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

ซึ่งก็คือสมการ Poisson

กรณีที่ 4) เมื่อ ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และอยู่ในสภาวะคงที่

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

ซึ่งก็คือสมการ Laplace

2.2.3 การแพร่กระจายความร้อน

พิจารณาตัวกลางแบบ Isotropic homogeneous เมื่อมีความร้อนแพร่มาตกกระทบพื้นผิว เป็นจังหวะขึ้นกับเวลาแบบเป็นฟังก์ชัน Sinusoidal ในทิศ x โดยผ่านระนาบ yz ดังนี้

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

เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุมของคลื่นความร้อน มีหน่วยเป็น Hz

จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction)

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

ถ้าพลังงานความร้อนที่มาตกกระทบเป็นคังสมการที่ (22) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

แทนค่าสมการที่ (25) ลงในสมการที่ (24) จะได้

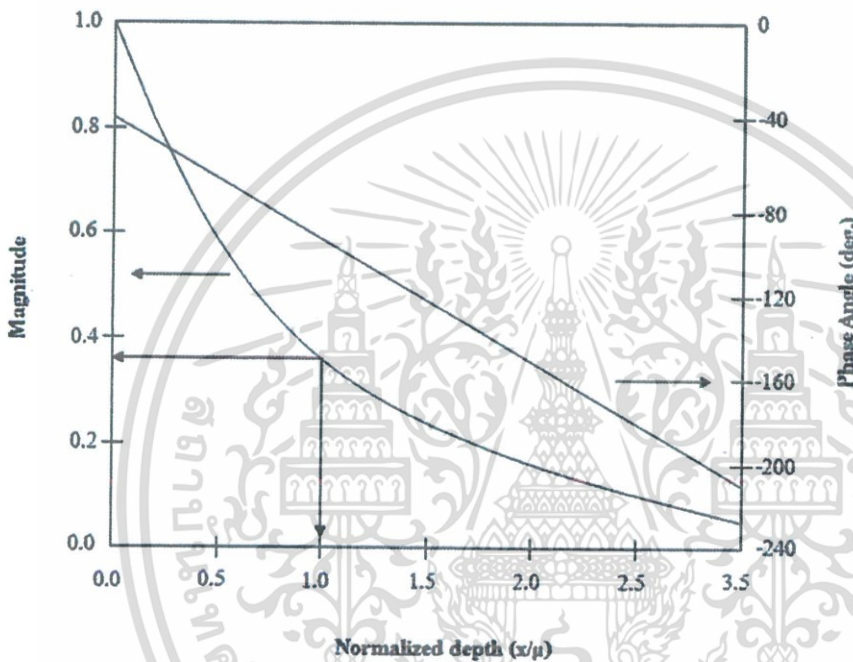
$$e^{j\omega t} \left(\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(x) \right) = 0 \quad (26)$$

เมื่อร่วมสมการ (23) – (26) จะได้

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

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

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



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนกับความลึกของพื้นผิวนอร์มัลไลซ์

นอกจากนี้ผลเฉลยของสมการการแพร่กระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ยังสามารถอธิบายในแนวทางอื่นได้อีก ดังนี้

1) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายเหมือนกับคลื่นทั่วไป

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

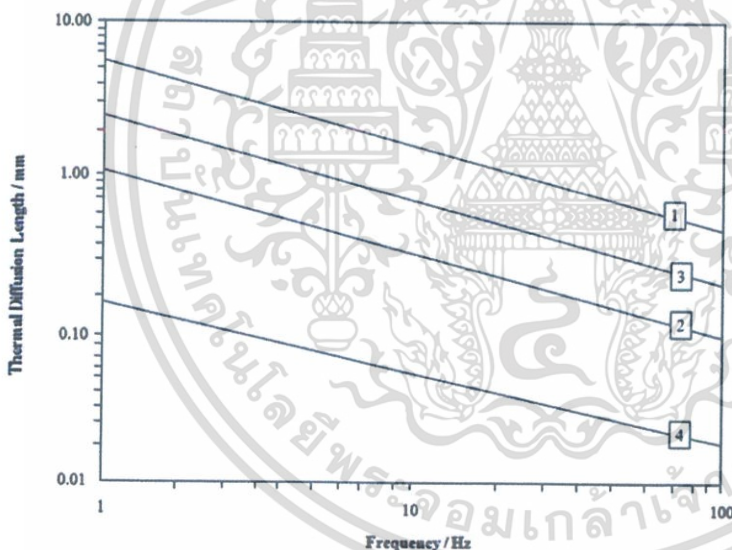
เมื่อ μ คือ ระยะเวลาแพร่ความร้อน มีหน่วยเป็น m^2/s

2) คลื่นความร้อนมีลักษณะการแพร่กระจายไม่เหมือนกับคลื่นทั่วไป

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

จากสมการที่ (28) ทำให้ทราบว่า คลื่นความร้อนจะสามารถแพร่กระจายความร้อนลงไป ในวัตถุได้ลึก ก็ต่อเมื่อวัตถุนั้นมีค่าการกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) สูง หรือ เมื่อคลื่นความร้อนนั้นมีค่าความถี่ต่ำ (คลื่นความร้อนต้องมีความยาวคลื่นมากนั่นเอง)

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity length, mm) กับความถี่ของคลื่นความร้อนในช่วง 1-100 Hz ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกตไลต์



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาแพร่ (mm) กับความถี่ของคลื่นความร้อน (Hz) ของ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกตไลต์

3) คลื่นความร้อนที่มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว

ความเร็วเฟสของคลื่นความร้อน คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

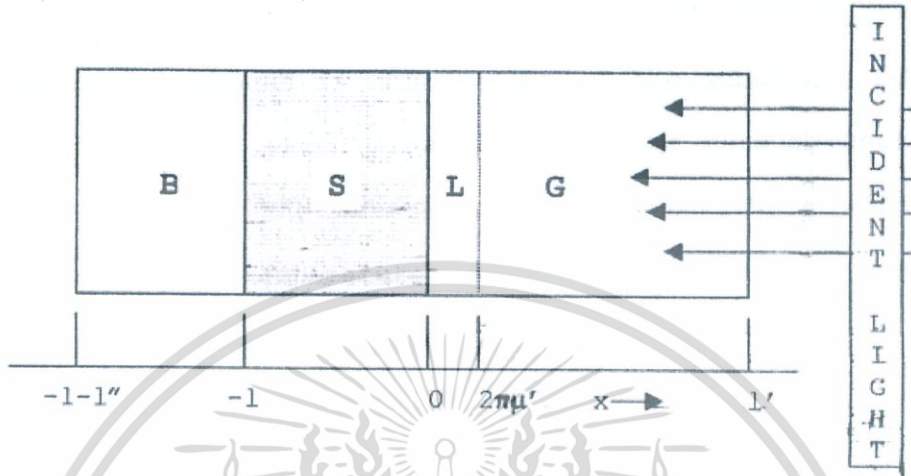
อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิที่บริเวณนั้นต่อความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน ดังสมการ

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

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน เป็นปริมาณที่บอกถึงขนาดของความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุ จากสมการที่ (31) เทอม $\sqrt{\rho c k}$ คือ Thermal effusivity หรือค่าความเฉื่อยทางความร้อน ถ้าค่าความเฉื่อยทางความร้อนมีค่าต่ำ จะทำให้ความร้อนที่พื้นผิวมีค่าสูง (คือ วัสดุมีการตอบสนองต่อความร้อนสูง พื้นผิวจึงมีความร้อนสูงนั่นเอง) โดยปกติแล้ววัสดุที่มีค่าการกระจายทางความร้อนสูง จะต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนสูงด้วย แต่ยกเว้นบางกรณี วัสดุยกเว้นที่น่าสนใจที่สุดคือ อากาศ เพราะมีค่าการกระจายทางความร้อนสูง แต่เนื่องจากมีค่าความนำความร้อนต่ำ และมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อากาศมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำนั่นเอง ฉะนั้น วัสดุที่มีการตอบสนองต่อความร้อนได้ดีจึงต้องมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำหรือมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนสูงนั่นเอง

2.3 ทฤษฎี Rosencwaig-Gersho

ทฤษฎี Rosencwaig-Gersho เป็นทฤษฎีที่อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก โดยที่ระบบมีลักษณะเป็นทรงกระบอกคังภาพ



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างระบบของเซลล์โฟโตอะคูสติก

โดยที่ B คือ สารที่เป็นฐานรองของตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ l'' มีหน่วยเป็น เมตร

S คือ สารตัวอย่างที่มีความหนา l มีหน่วยเป็น เมตร

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

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

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

จากโครงสร้างของระบบเราสามารถตั้งสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายระบบได้ดังนี้

1.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $A = \beta I_0 \eta / 2K$

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น kevin

β คือ Optical absorption length มีหน่วยเป็น เมตร

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

η คือ ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงที่ดูดกลืนไปเป็นความร้อนด้วย

กระบวนการ non-radiative recombination

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

2.

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

3.

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

เมื่อทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์แล้วจะได้ผลเฉลยเป็น

$$T(x, t) = T_0 e^{\sigma' x} e^{i\omega t} \quad (35)$$

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

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

แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่เราสนใจคืออุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณผิวตัวอย่างดังนั้นเราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดย

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

เนื่องจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเราสามารถให้ความสัมพันธ์ $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}$

เพื่อประมาณค่า กำหนดให้ T_0 คืออุณหภูมิห้อง V_0 คือปริมาตรของก๊าซที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง ซึ่งเท่ากับ $2\pi\mu'A$ เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกในแบบจำลองและ
เนื่องจากเราสมมติให้ระบบเป็นรูปทรงกระบอกดังนั้นจะได้ว่า

$$\delta x(t) = \frac{2\pi\mu\bar{T}(t)}{T_o} = \frac{\mu T_o e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2}T_o} \quad (37)$$

หลังจากนั้นสมมติให้การอัดและขยายตัวของก๊าซเป็นแบบ Adiabatic

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

$$\delta P(t) = \gamma \left(\frac{P_o}{V_o} \right) \delta V = \gamma \left(\frac{P_o}{V} \right) \delta x(t)$$

$$\text{ดังนั้น } \delta P(t) = QT_o e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (38)$$

$$\text{เมื่อ } Q = \frac{\gamma P_o T_o}{\frac{l}{\mu} T_o \sqrt{2}}$$

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

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

$$\text{เมื่อ } Q = Q_1 + iQ_2 = q e^{i\psi}$$

$$Q = \left[\frac{\beta I_o \gamma P_o}{2\sqrt{2}K \frac{l}{\mu} T_o (\beta^2 - \sigma^2)} \right] \left[(r-1)(b+1)e^{\sigma l} - (r+1)(b-1)e^{-\sigma l} \right. \\ \left. + 2(b-r)e^{-\beta l} \right] \left[(g+1)(b+1)e^{\sigma l} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma l} \right]^{-1}$$

ขนาดของสัญญาณ โฟโตะอะคูสติกแปรผันตรงกับค่าความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไป
ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติของสารตัวอย่างที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าขนาดของ
สัญญาณ โฟโตะอะคูสติกได้จากสมการข้างต้น

เนื่องจากปกติแล้วซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์เป็นของแข็งและทึบแสง (β มีค่ามาก ดังนั้น
 $e^{-\beta l} \approx 0$) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเราจะใช้ในการกำหนดค่าคงที่ต่างๆในสมการ และในงานวิจัย
ครั้งนี้เราจะแบ่งสมการออกเป็น 2 กรณี

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

กรณีที่ 1 คุณสมบัติทางความร้อนของฐานรองและสารตัวอย่างจะมีผลต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติก เป็นผลมาจากการที่คลื่นความร้อนสามารถคลื่นที่ผ่านสารตัวอย่างไปจนถึงฐานรองได้ หรือ μ มีค่ามากนั่นเอง

ส่วนในกรณีที่ 2 เฉพาะคุณสมบัติของสารตัวอย่างจะมีผลต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติกเท่านั้น เป็นผลมาจากการที่คลื่นความร้อนสามารถคลื่นที่ผ่านไปไม่ถึงฐานรอง หรือ μ มีค่าน้อยนั่นเอง

แต่จากทั้ง 2 กรณีเราจะพบว่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปของก๊าซ หรือสัญญาณของโฟโตอะคูสติกจะแปรผกผันกับความถี่ของการกล้ำสัญญาณ (frequency modulation) หมายความว่า หากเราสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณของโฟโตอะคูสติกกับส่วนกลับของความถี่ของการกล้ำสัญญาณจะได้กราฟเส้นตรง

ถึงแม้ว่าทั้ง 2 กรณีจะได้กราฟเส้นตรงแต่จะได้กราฟสร้างตรงที่มีความชันแตกต่างกัน ฉะนั้นความถี่ที่ทำให้ระบบเปลี่ยนจากกรณีที่ 1 มาเป็นกรณีที่ 2 เรียกว่า Characteristic frequency (f_c)

และ ฉะนั้น μ ต้องมีค่าเท่ากับความหนาของสารตัวอย่าง (l) และ จาก $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$

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

เมื่อ α คือ Thermal diffusivity (mm^2/s)

l คือ ความหนาของตัวอย่าง (mm)

f_c คือ Characteristic frequency (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)

แบบจำลองแถบพลังงานคือ แบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็น โมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็ง 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 จะต้องมีค่าความยาวคลื่น $\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$

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)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีโฟโตอะคูสติก การเตรียมสารซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์ ซิลเวอร์และคาร์บอนแบล็ก

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาและทดลองใช้งานระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วน โมลเท่ากับ 0% 1% 3% 5% และ 7% แล้วเขียน โปรแกรมควบคุม Lock-in Amplifier โดยใช้ LabView

ขั้นตอนที่ 4 วัดค่าช่องว่างแถบพลังงานและวัดค่าการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปีที่ขนาดของเกรนต่างกัน 3 ระดับ

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ตุลาคม 2558 - กันยายน 2559

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์สาร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 สังเคราะห์สาร

1. นำ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 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 ไปใส่ในบีกเกอร์ 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 °C เป็นเวลา 2 ชม.
6. นำตะกอนมาใส่ crucible ปิดฝาให้มีฉีดยุติ แล้วนำไปเผาด้วยเตาหลอมที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชม.
7. แบ่งผงของซิลเวอร์ โคปริงค์ออกไซด์ที่เผาแล้วออกเป็น 2 ส่วน
8. ส่วนที่ 1 เพื่อนำไปตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธี XRD เพื่อตรวจสอบว่าสารทดสอบที่ได้ คือ ซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์หรือไม่
9. ส่วนที่ 2 นำมาแบ่งอีกเป็น 3 ส่วนย่อย แล้วนำแต่ละส่วนย่อยๆ ไปบดด้วยครกเพื่อให้มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ระดับ
10. นำส่วนที่ 2 ทั้งหมดไปวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Analyzer เพื่อเป็นการยืนยันว่าแต่ละส่วนย่อยมีขนาดที่ต่างกันจริง

3.3.2 อัดเม็ดสารซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์

เนื่องจากซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์เป็นผง จึงต้องมีขั้นตอนการอัดเม็ดสารทดสอบเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับระบบโฟโตอะคูสติกได้ง่าย บล็อกอัดสารที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย อุปกรณ์และวิธีใช้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร

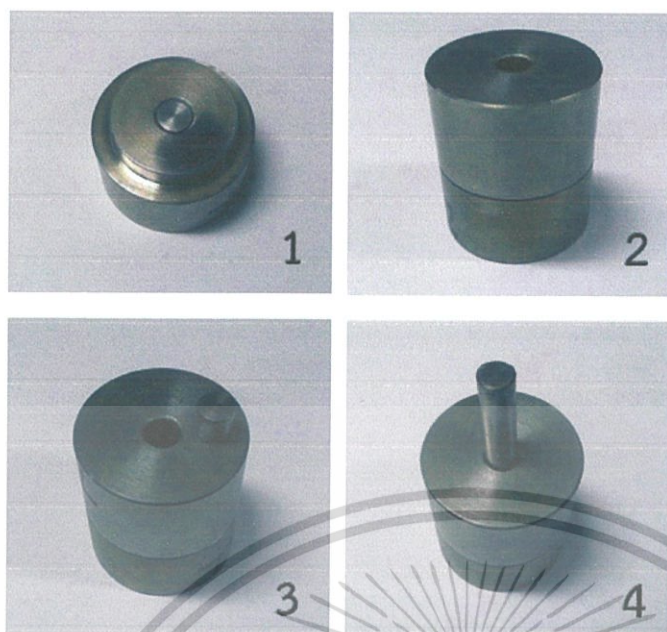


รูปที่ 3.2 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก

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

ขั้นตอนการอัดสาร

ทำการวางอุปกรณ์ดังภาพแล้วใส่สารที่ต้องการจะอัดลงไปไนขั้นตอนที่ 2 เมื่อจัดอุปกรณ์จนถึงขั้นตอนที่ 4 แล้วให้ทำไปอัดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ในการอัดเม็ดสารด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

ทำการอัดเม็ดซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ด้วยแรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิก 5 ตัน โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ตัน ทั้งไว้ครั้งละ 1 นาที รวมเวลาในการอัดเม็ดทั้งสิ้น 5 นาที (เวลาในการอัดนี้ หมายถึง เวลาที่กระบอกสูบของเครื่องอัดไฮดรอลิกกดทับบล็อกอัดสารก่อนที่จะคลายออก)

3.3.3 การหาช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ 1% โดยโมล

1. ทำการติดตั้งระบบโฟโตอะคูสติกตามภาพที่ 3.4
2. นำคาร์บอนแบล็คใส่ในโฟโตอะคูสติกเซลล์ เพื่อทำการวัดสเปกตรัมการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดแสง
3. เปิดสวิทช์ของอุปกรณ์ทุกเครื่อง เปิดพัลลมของแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อระบายความร้อนให้กับแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นเปิดสวิทช์หลอดไฟทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ระบบเตรียมความพร้อม แล้วจึงเปิดโปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น (เวลาปิดไฟก่อน แล้วปล่อยให้พัลลมระบายความร้อนต่อไปอย่างน้อย 30 นาทีจึงปิดได้)
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณ โฟโตอะคูสติกจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 nm - 740 nm โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 nm และให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz
5. เปลี่ยนจากคาร์บอนแบล็คเป็นซิลเวอร์โคปริงค์ออกไซด์ โดยให้ตัวตัดแสงทำงานที่ความถี่ 27 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำผลการทดลองที่ได้จากซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ไป normalized กับผลการทดลองที่ได้จากคาร์บอนแบล็ค แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและแอมพลิจูดของสัญญาณ โฟโตอะคูสติกที่เทอร์มัลไลซ์แล้ว

7. พิจารณาความยาวคลื่นแสงที่ซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์เริ่มไม่ดูดกลืน นำค่าความยาวคลื่นนี้มาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

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

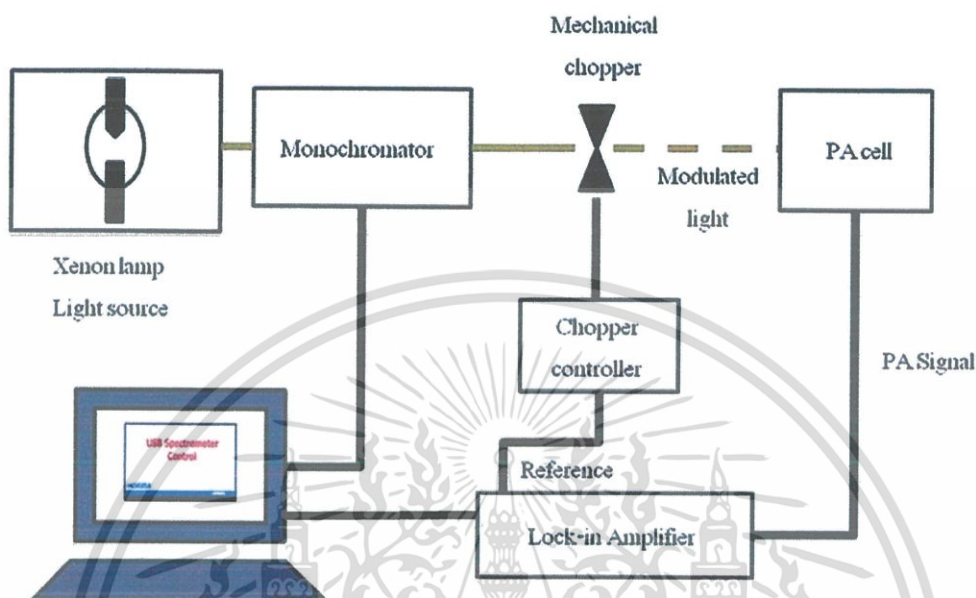
3.3.4 การหาการกระจายทางความร้อนของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์

1. ทำการติดตั้งระบบโฟโตอะคูสติกตามภาพที่ 3.4
2. ขั้นแรกทำการทดลองโดยยังไม่ใส่ซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์
3. ใช้โปรแกรมควบคุมเครื่องแยกความยาวคลื่น ปรับให้แหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 390 nm เพราะมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืน และเกิดปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติก
4. ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดสัญญาณ โฟโตอะคูสติกจากเครื่องขยายสัญญาณ lock-in amplifier ที่ความถี่ของตัววัดแสงตั้งแต่ 5 - 50 Hz โดยเพิ่มครั้งละ 1 Hz
5. นำซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ใส่ในโฟโตอะคูสติกเซลล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 3 - 4 อีกครั้ง
6. นำข้อมูลของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์มา Normalize ด้วยข้อมูลการทดลองตอนที่ยังไม่ใส่ซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์
7. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูก Normalized แล้ว (แกน Y) กับ ส่วนกลับของความถี่ (แกน X)
8. พิจารณาหาจุดเปลี่ยนความชันของกราฟเส้นตรงค่า ความถี่ ณ จุดนั้นคือ Characteristic frequency (f_c)
9. นำ f_c ที่ได้ไปคำนวณหาค่าการกระจายทางความร้อนของแต่ละตัวอย่าง

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

เมื่อ l คือ ความหนาของสารตัวอย่าง ที่วัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเบรอร์

3.4.1 การจักระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.4 แสดงการจักระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี

การจักระบบ จะเป็นดังรูปที่ 3.4 ดังนี้

แหล่งกำเนิดแสงจะต่อเข้ากับเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) เครื่องแยกความยาวคลื่นจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมเพื่อเลือกความยาวคลื่นของแสงที่ออกมา โดยแสงที่ออกมาจะถูกมอดูเลตแสงด้วยตัวตัดแสงเชิงกล (Mechanical chopper) ซึ่งตัวตัดแสงจะถูกควบคุมความถี่ในการตัดแสงด้วย Chopper controller และแสงที่ถูกมอดูเลตนี้จะเข้าไปตกกระทบบสารทดสอบภายใน Photoacoustic cell ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปภายใน 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 เพื่อใช้งาน โปรแกรมที่เขียนขึ้น โดย LabView เพื่อควบคุมและบันทึกค่าจาก Lock-in Amplifier

3.4.2 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมในการทดลอง

การทดลองเพื่อหาค่า Energy Gap

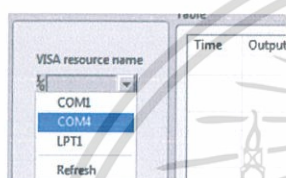
1. ตั้งค่าโปรแกรม HJY Spectrometer ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องแยกความยาวคลื่นแสง กำหนดความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ 340 nm ศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดโปรแกรม Measuring Energy Gap และ SR510 Lock-in Amp



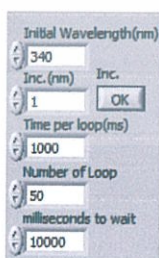
รูปที่ 3.5 แสดง icon โปรแกรม Measuring Energy Gap และ SR510 Lock-in Amp

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



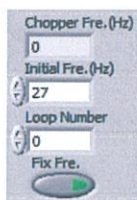
รูปที่ 3.6 แสดงการเลือก Port

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



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง

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



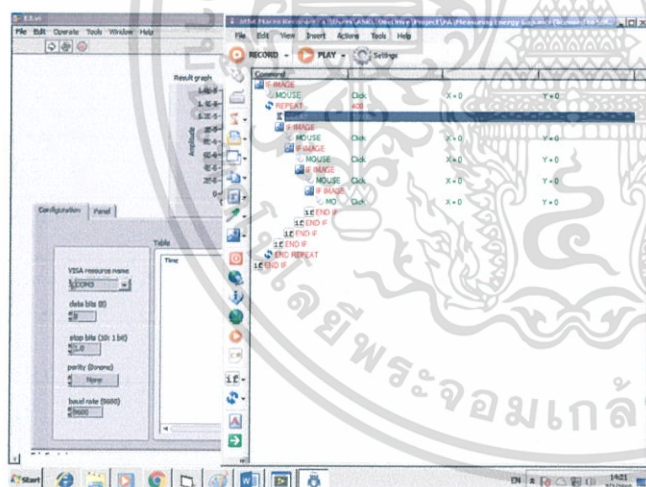
รูปที่ 3.8 แสดงส่วนของการตั้งค่าความถี่ตัวตัดแสง

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



รูปที่ 3.9 แสดงสวิตซ์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม

7. จัดวางหน้าจอของโปรแกรมต่างๆที่ใช้ร่วมกันดังภาพ โปรแกรม Measuring Energy Gap อยู่บนสุดลดลงมาคือ SR510 Lock-in Amp และสุดท้ายคือ HJY Spectrometer



รูปที่ 3.10 แสดงการจัดวางหน้าจอของโปรแกรมต่างๆเพื่อใช้งาน

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

การทดลองเพื่อหาค่า Thermal diffusivity

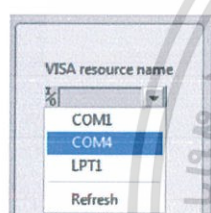
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



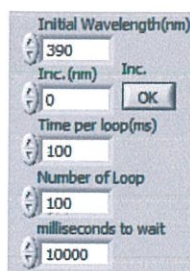
รูปที่ 3.11 แสดงไอคอนของโปรแกรม SR510 Lock-in Amp

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



รูปที่ 3.12 แสดงการเลือก Port

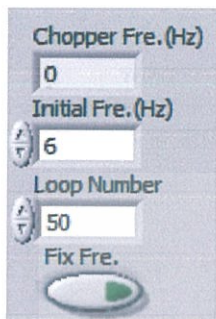
4. ตั้งค่าความยาวคลื่นแสงเริ่มต้น (Initial Wavelength) ในการทดลอง ค่าความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้เพิ่ม (increasing) ในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่น (ณ ที่นี้ กำหนดให้ Initial Wavelength = 390 และ Inc. = 0) และรูปแบบการเก็บข้อมูล Time per loop คือ ช่วงเวลา ระหว่างการเก็บค่าแต่ละครั้ง หน่วยเป็น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



รูปที่ 3.13 แสดงส่วนของการตั้งค่าความยาวคลื่นแสง

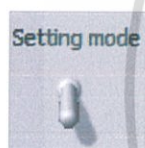
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. ทำการกดคีย์ปุ่ม Setting mode ให้เปิดดังภาพที่ปรากฏ เพื่อให้โปรแกรม SR510 Lock-in Amp ทำงานเองอัตโนมัติ



รูปที่ 3.15 แสดงสวิตซ์สำหรับกำหนดการทำงานอัตโนมัติของโปรแกรม

7. กดปุ่มลูกศรสีขาวตรงมุมซ้ายบนของ โปรแกรมเพื่อเริ่มทำการบันทึกค่า

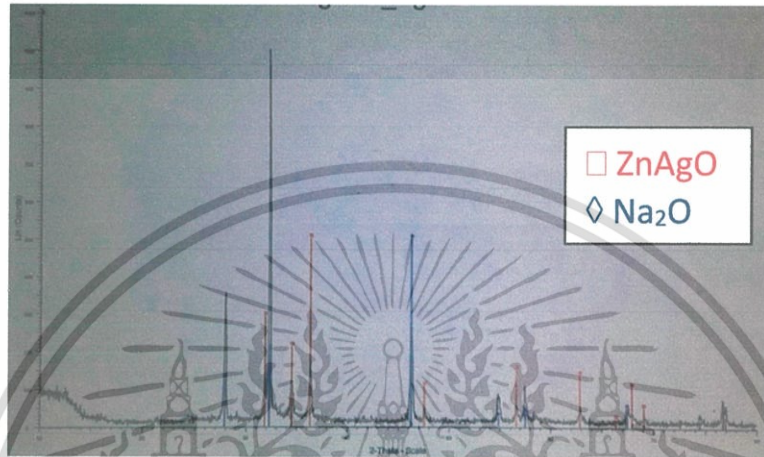


รูปที่ 3.16 แสดงปุ่มสำหรับเริ่มทำงาน โปรแกรม

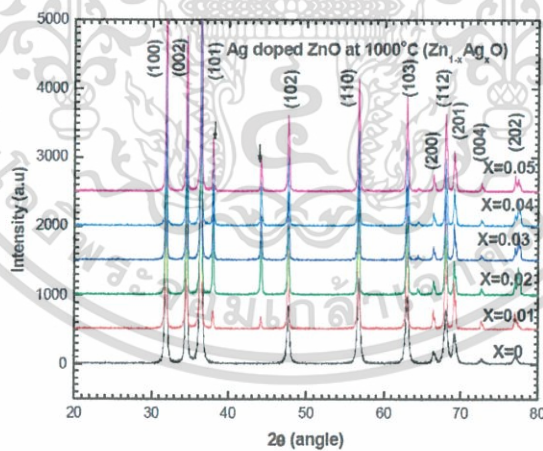
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.

4.1 ผลการวัด X-ray diffraction ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม



รูปที่ 4.1 แสดงผลการวัด XRD ของสารที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม



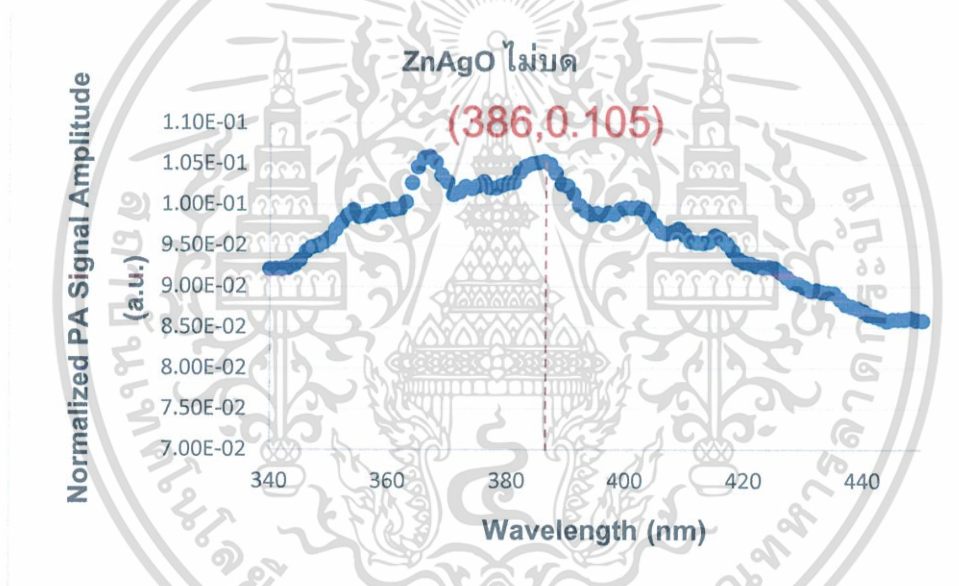
รูปที่ 4.2 แสดงผล XRD ของ ZnAgO ที่ Mole fraction ค่าต่างๆ^[5]

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 อาจหลงเหลืออยู่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO

จากการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO ได้ผลลัพธ์ประมาณ 3.2 eV เนื่องจากสารตัวอย่างมี Na₂O ปนเปื้อน และเรคาดการณ์ว่า Na₂O น่าจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เราจึงคาดว่า การที่มีสารที่เป็นฉนวนปนอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่สนใจจะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยเทคนิคโฟโตอะคูสติก ดังนั้นเราอาจจะสรุปได้ว่าค่าวัดได้เป็นค่าของซิลเวอร์โคปซิงออกไซด์ ดังนั้นการโคปซิลเวอร์ในซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วน โมลน้อยๆไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ 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(Ag 1%)

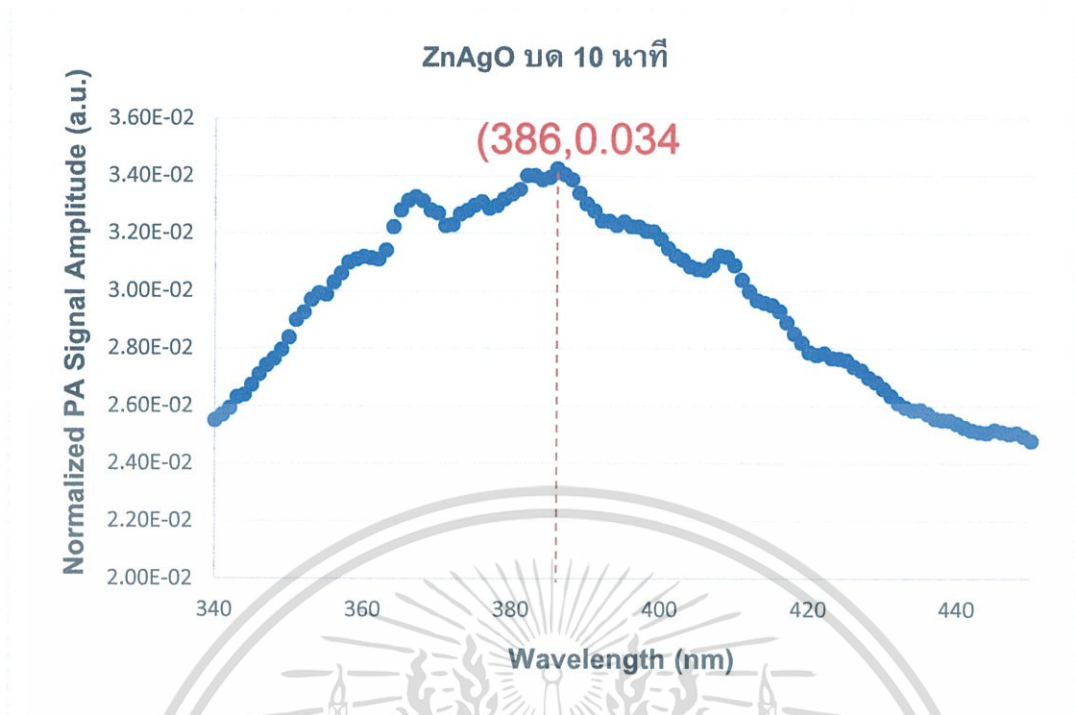
จากความสัมพันธ์

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO ที่บดแล้ว 10 นาที และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง (Ag 1%)

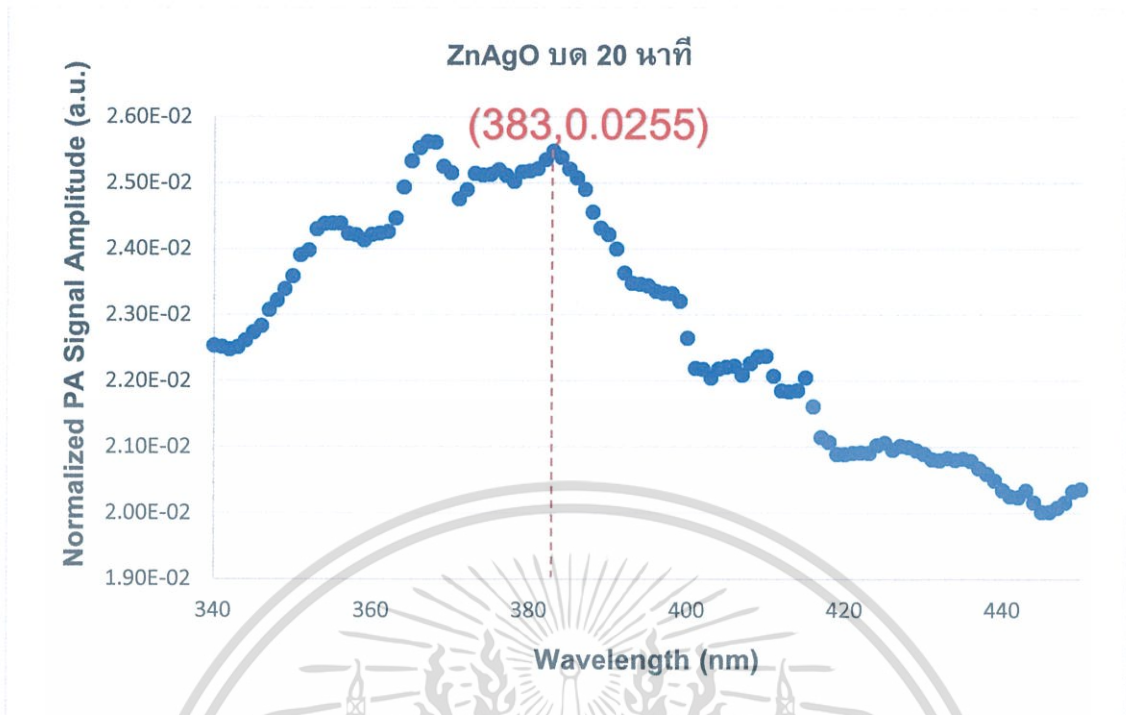
จากความสัมพันธ์

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะกนูตติคของ ZnAgO ที่บดแล้ว 20 นาทีและถูกนอมีกัลไลซ์ด้วยข้อมูลของคาร์บอนแบล็ค กับความยาวคลื่นแสง (Ag 1%)

จากความสัมพันธ์

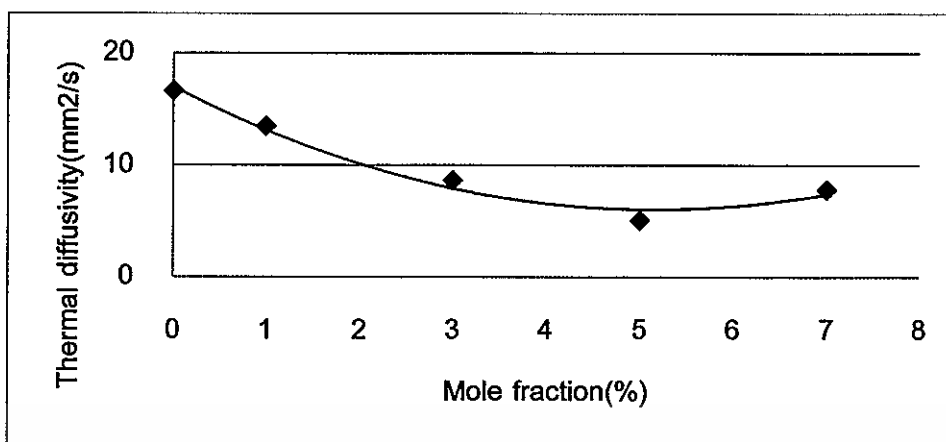
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

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

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

4.2 ผลการวัดค่าการกระจายทางความร้อนของ ZnAgO

ในการทดลองเกี่ยวกับค่าการกระจายความร้อนพบว่า หากนำข้อมูลค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โคปริงด์ออกไซด์ (ปนเปื้อนด้วย Na_2O) ที่อัตราส่วน โมลเท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% มาสร้างกราฟร่วมกับค่าการกระจายความร้อนของซิลเวอร์โคปริงด์ออกไซด์ พบว่าค่าจากการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าการทดลองก่อนหน้าและกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลาหงาย ซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน โมลเท่ากับ 5%



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับค่าอัตราส่วน โมล

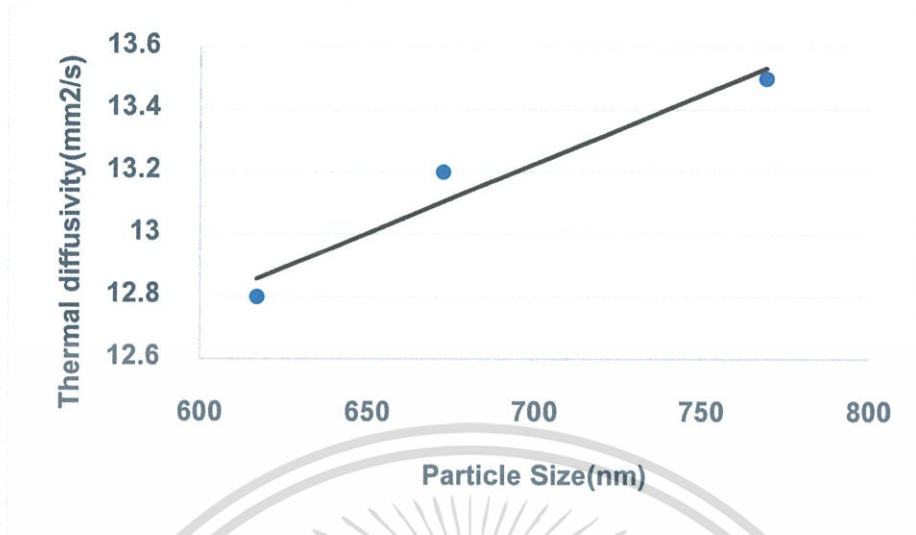
ส่วนในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับค่าการกระจายความร้อน พบว่า ค่าการกระจายความร้อนมีค่าแปรผันตามขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุได้ดังนี้ จากสมการของค่าการกระจายความร้อน

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

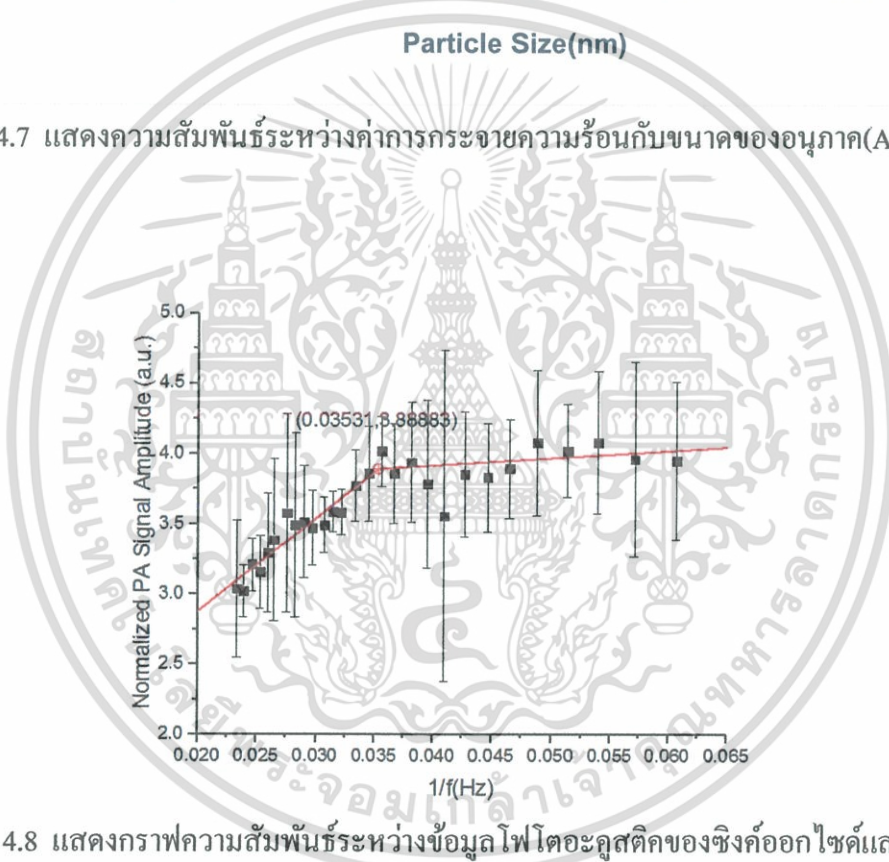
และสมมติว่าการบดแล้วอัสสารให้แน่นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสาร ผู้วิจัยจึงคาดว่าในงานวิจัยนี้ความหนาแน่นของสารเป็นค่าคงที่ และจากงานวิจัยของ Ghanshyam R. Patel, Nilesh A. Thakar และ Tushar C. Pandya ในหัวข้อเรื่อง Effect of Size on Specific Heat and Debye Temperature of Nanomaterials^[9] ทำให้ทราบว่าวัสดุที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า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

หากเราตั้งสมมติฐานว่าการบดทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงแล้วส่งผลทำให้เกิด defect (Grain boundary) มากขึ้น ซึ่งเมื่อมี defect มาก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะที่นำความร้อนก็จะยากลำบากมากขึ้นจึงทำให้การนำความร้อนได้แปรผันตามขนาดของอนุภาคที่เล็กลงเมื่อพิจารณา 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 ดังนั้นค่าการกระจายความร้อน

ของ ZnAgO จึงแปรผันตามขนาดของอนุภาค การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับขนาดของอนุภาค(Ag 1%)



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของซิงค์ออกไซด์และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

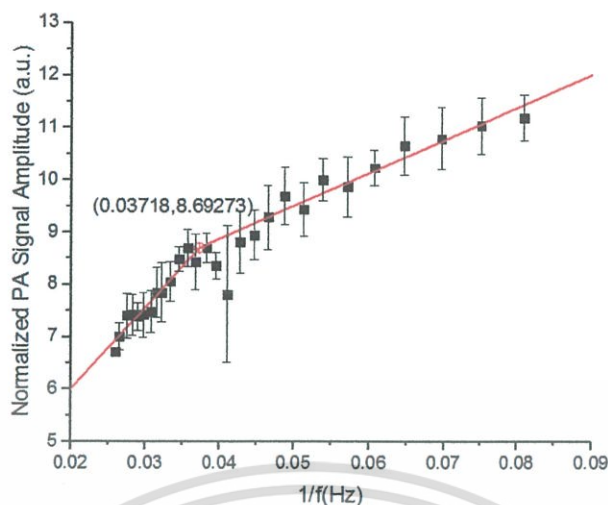
$$f_c = \frac{1}{0.03531} = 28.3 \text{ Hz}$$

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

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

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

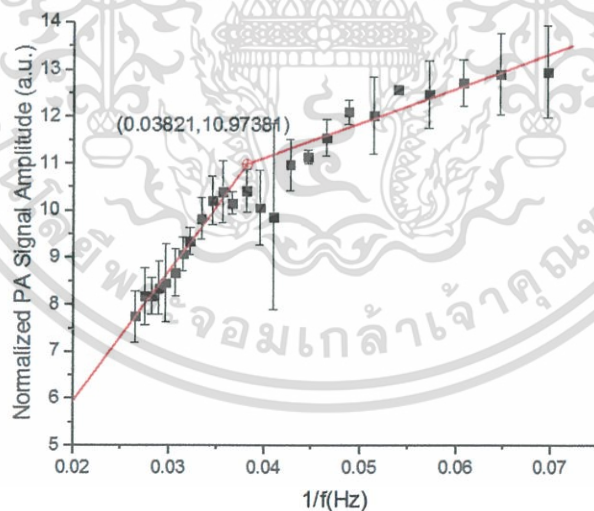
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO(Ag 1%) ที่ยังไม่บด และถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

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

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c = 0.40^2 \times \pi \times 26.9 = 13.5 \text{ mm}^2/\text{s}$$

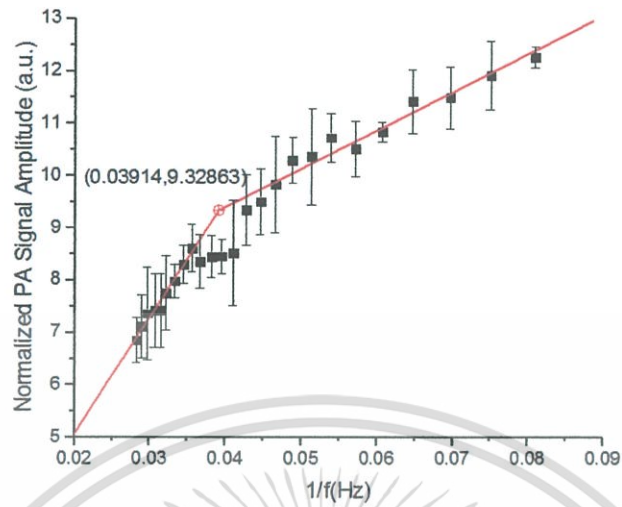


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO(Ag 1%) ที่บด 10 นาทีและถูกนอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

$$f_c = \frac{1}{0.03821} = 26.2 \text{ Hz}$$

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c = 0.40^2 \times \pi \times 26.2 = 13.2 \text{ mm}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโฟโตอะคูสติกของ ZnAgO(Ag 1%) ที่บด 20 นาที่และถุณอมัลไลซ์ด้วยข้อมูลของเซลล์ที่ยังไม่มีสารตัวอย่าง กับส่วนกลับของความถี่ตัวตัดแสง

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

$$\alpha = l^2 \times \pi \times f_c = 0.40^2 \times \pi \times 25.5 = 12.8 \text{ mm}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

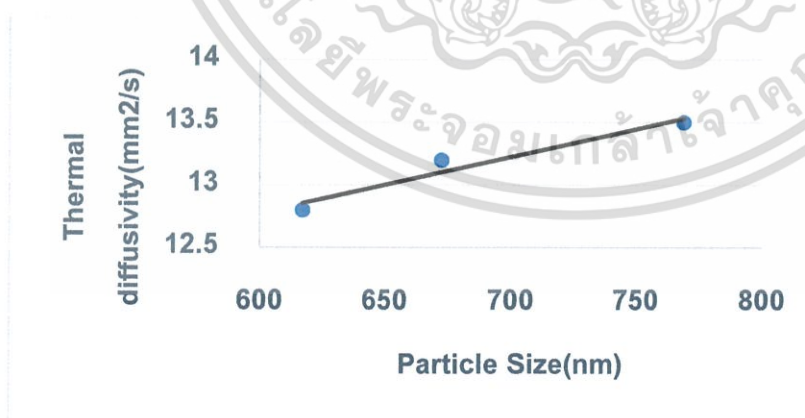
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผลจากการวิจัยทำให้เราทราบค่าการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnAgO (ที่มีการปนเปื้อนของ Na₂O) เท่ากับ 3.2 eV และจากการคาดการณ์ Na₂O น่าจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เราจึงคาดว่า Na₂O ที่ปนอยู่จะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นเราคาดว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.2 eV ซึ่งจะใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น^[8] ดังนั้นจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การโคปซิงค์ออกไซด์ด้วยซิลเวอร์ในอัตราส่วนโมลน้อยๆ ไม่ทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของซิลเวอร์โคปซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง^[8]

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมลกับค่าการกระจายความร้อน พบว่าเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้รวมกันกับการทดลองที่มีมาก่อนหน้า^[1] จะได้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์เป็นแบบพาราโบลาหงาย

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



ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายความร้อนกับขนาดของอนุภาค

5.2 ข้อเสนอแนะ

สาเหตุของการปนเปื้อนของ Na₂O ผู้วิจัยคาดว่าเกิดขึ้นในขั้นตอนการกรอง ผู้ทดลองควรใช้น้ำ DI อุ่นๆ มากกว่าที่จะใช้น้ำ DI ในอุณหภูมิห้องในการล้างสารบนกระดาษกรอง นอกจากนี้ควรใช้ถุงมือป้องกันอันตรายจากสารเคมี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เขียน โปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานและบันทึกผลของ SR510 Lock-in Amplifier และ SR540 Optical Chopper โปรแกรมนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานไม่สามารถใช้งาน Lock-in Amplifier ได้ทุกฟังก์ชันการทำงาน เพราะฟังก์ชันทำงานบางอย่างไม่จำเป็นต้องการทดลอง ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Lock-in Amplifier ใช้เป็น Serial Port RS-232 จึงมีข้อจำกัดในการส่งข้อมูล และอัลกอริทึมของโปรแกรมยังออกแบบได้ไม่ดีพอทำให้โปรแกรมมีปัญหาการรับคำสั่งซ้ำเมื่อมีการกดปุ่มหรือตั้งค่าต่างๆ

นอกจากนี้ จากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของตัวขอปเปอร์ยังพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ผิดปกติที่บริเวณ $\frac{1}{f} \approx 0.04$ ซึ่งควรมีการตรวจสอบว่าเกิดจากการเป็นครึ่งหนึ่งของไฟบ้าน(50Hz) หรือเกิดจากเหตุอื่น หรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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, นางสาวมุกิตา 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)
- [9] Ghanshyam R. Patel, Nilesh A. Thakar and Tushar C. Pandya. 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้