

สมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์  $\text{WO}_3 : \text{Sb}^{3+}$   
NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF  $\text{WO}_3 : \text{Sb}^{3+}$  VARISTOR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

สมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์  $WO_3 : Sb^{3+}$

NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF  $WO_3 : Sb^{3+}$  VARISTOR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{WO}_3 : \text{Sb}^{3+}$ VARISTOR



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์  $WO_3 : Sb^{3+}$   
 NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF  $WO_3 : Sb^{3+}$  VARISTOR

ชื่อนักศึกษา นายณัฐศิษฏ์ ไชยมุติ รหัสนักศึกษา 54050520  
 นายสิทธิพร หาญยืน รหัสนักศึกษา 54050613

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
 ภาควิชา ฟิสิกส์  
 ปีการศึกษา 2557  
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
 ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของวาไรสเตอร์ $WO_3 : Sb^{3+}$
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐศิษฐ์ ไชยมุติ รหัสนักศึกษา 54050520 นายสิทธิพร หาญยืน รหัสนักศึกษา 54050613
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ร.ศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  และ  $Sb_2O_3$  ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของเม็ดเซรามิกได้รับการตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์แบบโมโนคลินิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะว่าไอออนของธาตุ  $Sb^{5+}$  เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมในโครงผลึกเจ้าบ้านของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกนี้ที่อุณหภูมิห้องโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  ที่เจือด้วยสารประกอบ  $Sb_2O_3$  นับว่าเป็นวัสดุชนิดใหม่สำหรับสิ่งประดิษฐ์คาปาซิเตอร์-วาไรสเตอร์แรงดันต่ำ

คำสำคัญ : เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ), XRD, SEM, อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

**Title** NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF  $WO_3 : Sb^{3+}$  VARISTOR  
**Students** Mr. Nutthasit Chaimut Student ID 54050520  
Mr. Sittaporn Hanyuen Student ID 54050613  
**Degree** Bachelor of Science in Applied Physics  
**Department** Physics  
**Academic Year** 2014  
**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

### ABSTRACT

In this special project,  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ceramics were fabricated by solid state reaction from starting materials  $WO_3$  and  $Sb_2O_3$  in powder form at  $1,000^\circ C$  for 48 h. The crystal structure and morphology of the ceramics were investigated by XRD and SEM, respectively. The increase of lattice parameters of the monoclinic unit cell with the increase of  $Sb_2O_3$  content was observed. This is probably related to the replacement of  $Sb^{5+}$  in  $WO_3$  host lattice. The non-linear coefficient of the current-voltage characteristics of the  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) decreases with the increasing of  $Sb_2O_3$  content. Complex impedance spectroscopy technique is used for studying of the ac electrical properties of the ceramics at room temperature.  $WO_3$  doped with  $Sb_2O_3$  is a new kind of low voltage capacitor-varistor material.

**Keywords** :  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ceramics, XRD, SEM, impedance spectroscopy

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึง การปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเครื่องมือเพื่อศึกษาลักษณะต่างๆของชิ้นงาน จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นาย ณัฐศิษฐ์ ไชยมุติ

นาย สิทธิพร หาญเย็น

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์	4
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	6
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	10
2.4.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร $RC$ ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	10
2.4.1.1 วงจร $RC$ ต่อแบบอนุกรม	10
2.4.1.2 วงจร $RC$ ต่อแบบขนาน	11
2.4.1.3 กราฟของโบท	15
2.4.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกเพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์	18
2.4.2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม	18
2.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $J$ กับ $V$ ในแบบขอตดกี	24
2.4.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พลู – เฟรนเคิล	26
2.4.3 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	27
2.4.3.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสกลาง	35
2.4.3.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล่งต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>46</b>
3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
3.1.3 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	49
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	50
3.2.1 การศึกษาสมบัติโครงสร้างผลึกทางจุลภาค	50
3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางมหภาค	50
3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิห้อง	50
3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี	50
3.2.5 การศึกษาความต้านทานเชิงแสง	50
3.2.6 การศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแอมโมเนีย	50
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>51</b>
4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
4.3.3 ผลการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	82
4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติของ ความหนาแน่นของกระแส กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	96
4.3.5 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	98
4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของ แก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	103
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	108
5.1 สรุปผลการวิจัย	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	110
เอกสารอ้างอิง	111
ภาคผนวก	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	116
ภาคผนวก ข	117
ภาคผนวก ค	118



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	43
2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	44
2.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโคปี ในช่วง ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	44
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	48
4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	58
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
4.4	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	86
4.5	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	87
4.6	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	88
4.7	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	89
4.8	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	90

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และ มีค่าพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกักตักประจุ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	95
4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	96
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น ที่ได้จากการปรับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพล็กซ์โพเนนเชียล ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	101
4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัด ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	102
4.13 แสดงค่าเวลาตอบสนอง เวลาคืนตัว และ ความไวต่อไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	104

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ $WO_3$ ที่เป็นแบบโมโนคลินิกในกรณีอุดมคติ	4
2.2	แสดงการเชื่อมต่อกันของพันธะเคมีแบบออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม และอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	4
2.3	แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ $WO_3$ ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเซลเซียส	5
2.4	แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ $WO_3$	6
2.5	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	7
2.6	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	9
2.7	แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร $RC$ ต่ออนุกรมอย่างง่าย ๆ	10
2.8	แสดงวงจร $RC$ ต่อแบบขนานอย่างง่าย	11
2.9	แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร $RC$ ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$	12
2.10	แสดงวงจร $RC$ ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก, ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข, จ) และแอตมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค, ฉ)	13
2.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉาก กับโคออร์ดิเนตเชิงซ้าย	16
2.12	ก. แสดงกราฟโนควิสต์และกราฟของโบริด ข. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร ที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	17
2.13	แสดงพื้นที่ผิวและความหนาของเม็ดเซรามิก	19
2.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\log J$ กับ $\log E$ ของวาริสเตอร์	20
2.15	แสดงขนาดของเกรน	20
2.16	แสดงรอยต่อแบบขอตต์กี 2 รอยต่อที่หันหน้าชนกัน	21
2.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขอบรอยต่อของเกรน กับ แรงดันไบแอส	22
2.18	แสดงการหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิก	23
2.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $J$ กับ $V$ ในแบบขอตต์กี	24
2.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln J_0$ กับ ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ	25
2.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ สภาพนำไฟฟ้า กับ ความถี่	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln J$ กับ $E^{1/2}$	26
2.23	แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{ie}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{ih}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	28
2.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	31
2.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	32
2.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของดับดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	35
2.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของดับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	36
2.28	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\ln_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	38
2.29	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\ln_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	38
2.30	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิเทียมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอคาลิเทียมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\ln_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	39
2.31	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิเทียมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\ln_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	39
2.32	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_x\text{WO}_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจประโยชน์ของการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.33	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
2.34	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิทีมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอคาลิทีมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
2.35	แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิทีมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	43
2.36	แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	45
3.1	แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	49
4.1	แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.2	แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
4.3	แสดงปริมาตรของหน่วยเซลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุม $\beta$ ของโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
4.5	แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
4.6	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแส กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57
4.8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิทิ้มของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอคาลิทิ้มของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57
4.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอคาลิทิ้มธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ รากที่สองของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	58
4.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
4.31	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
4.32	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	71
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	72
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	72
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	73
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	73
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	74
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.42	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	78
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	79
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	79
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	80
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	80
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	81
4.53 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	82
4.54 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.55 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.56 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.57 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.58 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.59 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85
4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	92
4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.62	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	93
4.63	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	93
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	94
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	94
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า กับ ปริมาณสารเจือของสารประกอบ $Sb_2O_3$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	97
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต กับ เวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	98
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอกาลิทึมธรรมชาติของกระแสไฟโต กับ เวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	99
4.69	แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.70	แสดงกราฟพิทกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสจอร์มีลไลซ์ขาลง กับ เวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	100
4.71	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	103
4.72	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความไวต่อไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย กับ ปริมาณสารเจือของสารประกอบ $Sb_2O_3$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	104
4.73	แสดงแบบจำลองของการเกิดบริเวณพร่องพาหะ และ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )	106

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารประกอบ  $WO_3$  ได้รับความสนใจกันอย่างมากเนื่องจากมีศักยภาพสูงในการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าและทางแสง ตัวอย่างเช่น สารประกอบ  $WO_3$  เป็นวัสดุอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic) ที่โดดเด่น สามารถประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ (smart windows) สำหรับบ้านและรถยนต์เพื่อการประหยัดพลังงาน (Richard and Edwards, 2003; Ramana et al., 2006) นอกจากนี้ฟิล์มบางของสารประกอบ  $WO_3$  ยังมีสมบัติตรวจจับไอสารเคมี เช่น  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  และ CO เป็นต้น (Khatko, 2005) ซึ่งสามารถประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ส่วนฟิล์มบางของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับประดิษฐ์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงและมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type)

ทังสเตนบรอนซ์ (tungsten bronzes) มีสูตรเคมีคือ  $M_xWO_3$  เมื่อ M คือ อะตอมของโลหะ สารประกอบนี้เกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ  $WO_3$  จับกันในแบบใช้มุมติดกัน (corner sharing) เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างข่ายอุโมงค์ (tunnel network) ในสามมิติเนื่องจากในอุโมงค์เป็น ที่ว่างดังนั้นจึงสามารถเติมอะตอมโลหะ M เข้าไปได้ รู้อุโมงค์อาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นหกเหลี่ยมก็ได้

เซรามิกของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ  $WO_3$  ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถประยุกต์เป็นวาริสเตอร์แรงดันต่ำ (low voltage varistor) เพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงดันไฟเกิน ชั่วขณะ (transient overvoltage) ได้มีการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (non-linear electrical properties) ของสารประกอบในระบบ  $WO_3-Na_2O$ ,  $WO_3-Al_2O_3$ ,  $WO_3-Co_3O_4$ ,  $WO_3-MnO_2$  ไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 (Makarov and Trontelj, 1996) ส่วนเซรามิกของสารประกอบ  $WO_3$  ที่เจือด้วยสารประกอบ  $Li_2O$ ,  $V_2O_5$ ,  $Co_2O_3$  และ  $La_2O_3$  ในปริมาณเล็กน้อยก็ได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 (Kaneki et al., 1976) เซรามิกของสารประกอบ  $WO_3$  ที่เจือด้วยสารประกอบ  $Gd_2O_3$  (Yang et al., 2004) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า เท่ากับ 2.56

ฟิล์มบางของสารประกอบ  $WO_3$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ได้มีการเตรียมและศึกษาสมบัติ การตรวจวัดก๊าซ  $NH_4OH$  แต่เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ยัง ไม่ได้มีผู้ศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ดังนั้นในโครงการพิเศษจึงน่าสนใจที่จะศึกษา สมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีปฏิบัติการ เกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  และ  $WO_3$  เพื่อเป็น ประโยชน์ในการประยุกต์เป็นวาริสเตอร์ชนิดแรงดันต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาสมบัติความไม่เชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
2. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และ ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
3. ศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
4. ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  และ  $WO_3$
2. ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
4. ทำการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
5. ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )

## 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลการวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
2. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  และ  $WO_3$
3. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP
5. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
6. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
7. ทำการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
8. ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
9. ทำการวิเคราะห์, สรุปผลการทดลอง และจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขของการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  และ  $WO_3$
2. ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมของสารเจือที่เป็นสารประกอบของ  $Sb_2O_3$  ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
3. ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมของสารเจือที่เป็นสารประกอบของ  $Sb_2O_3$  ที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำและสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
4. ทำให้ทราบถึงผลของสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )
5. ทำให้ทราบถึงผลของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )

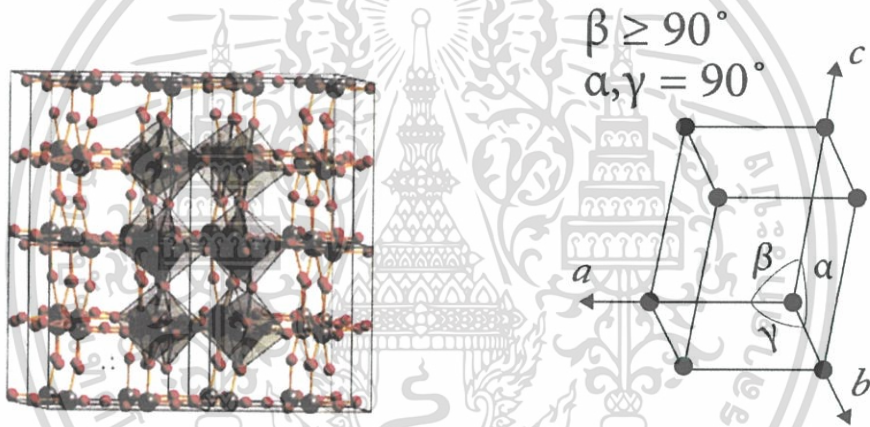
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

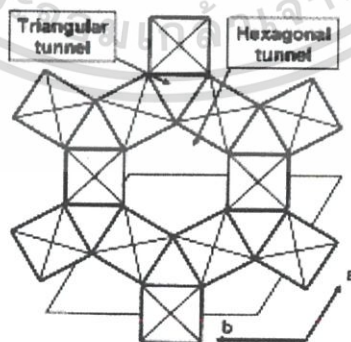
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ ( $WO_3$ ) (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550, ฐิตินัย, 2553; ฐิตินัย, 2556; อุปถัมภ์, 2548; Cullity, 1956; Kittel, 1971)

โครงสร้างผลึกของทั้งสแตนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมากซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะใช้มุมเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอมของธาตุ W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอมของธาตุ O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอุมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบเช่น อุมงค์รูปสามเหลี่ยม อุมงค์รูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นอุมงค์สามเหลี่ยมและอุมงค์หกเหลี่ยมที่เกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  ที่เป็นแบบโมโนคลินิกในกรณีอุดมคติ

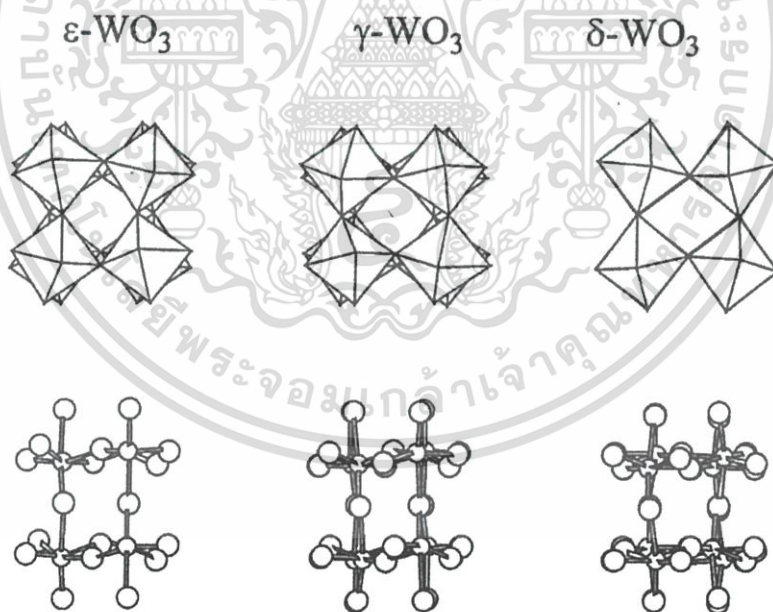


รูปที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อกันของพันธะเคมีแบบออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุมงค์รูปสามเหลี่ยมและอุมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ  $WO_3$  ในอุดมคติจะมีปริมาณของอะตอมของธาตุ O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่การเกิดแวนเดอวาล์วของออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่างๆ จำนวนมาก เช่น  $\alpha$ - $WO_x$  ( $2.98 < x < 3.00$ ),  $\beta$ - $WO_x$  ( $2.83 < x < 2.90$ ),  $\gamma$ - $WO_x$  ( $2.66 < x < 2.72$ ) และ  $WO_2$  โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ  $WO_3$  ในอุดมคติที่ไม่มีแวนเดอวาล์วของออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (สเปซกรุป  $P2_1/n$ ) ที่อุณหภูมิห้อง  $a = 7.297$  อังสตรอม,  $b = 7.539$  อังสตรอม,  $c = 7.688$  อังสตรอม,  $\beta = 90.91$  แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สารประกอบ  $WO_3$  มักจะเกิดเป็นเฟสโมโนคลินิกร่วมกับไตรคลินิก (triclinic) (Yang and Dong, 2004)

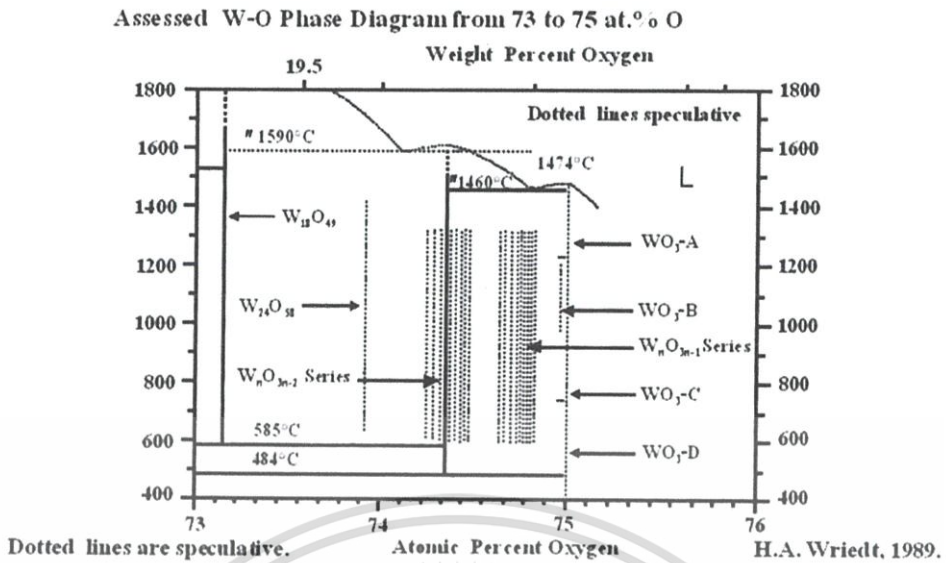
อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วยกล่าวคือ ในช่วงอุณหภูมิต่ำ 50 ถึง 17 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียส จะเป็นแบบโมโนคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัลจากข้อมูลล่าสุด (Salje et.al., 1997) พบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  ที่อุณหภูมิต่ำระดับ 5 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ 3 แบบ  $\epsilon$ - $WO_3$ ,  $\gamma$ - $WO_3$ ,  $\delta$ - $WO_3$  ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเอียงไปจากแนวแกนผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเซลเซียส

จากการที่อะตอมออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้างผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ  $WO_3$  ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นใช้ขอบของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟสอนสตอยคิโอเมตริกจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ  $WO_3$

## 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; งามนิตย์, 2553; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2554 Cullity, 1956; Kittel, 1971)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  และเมื่อรังสีเอกซ์ผ่านโครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริม โดยแบรกก์ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งเรียกว่า กฎของแบรกก์ ดังสมการ

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

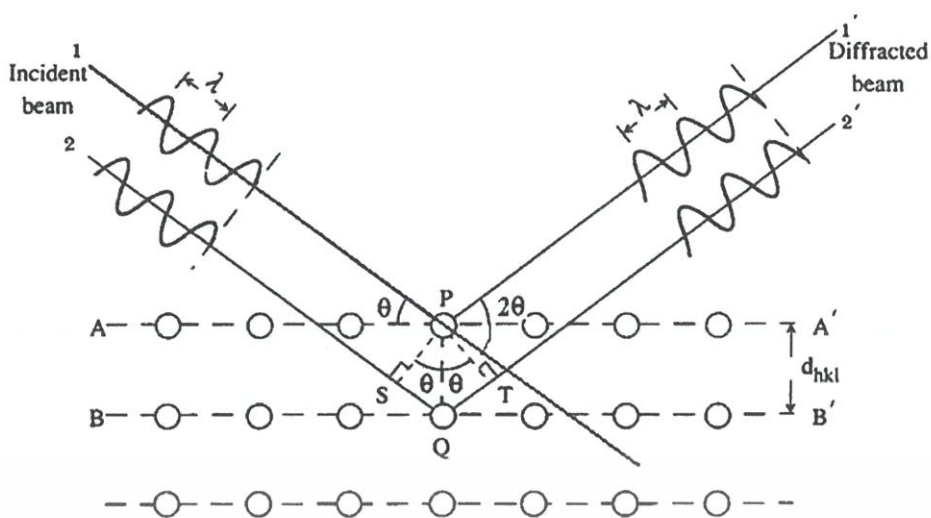
$n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน

$d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของ

ผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์จะเรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้ จากตำแหน่งพิกในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุ หรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

## 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2530; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2554; Cullity, 1956; Hearle, 1973; Kittel, 1971)

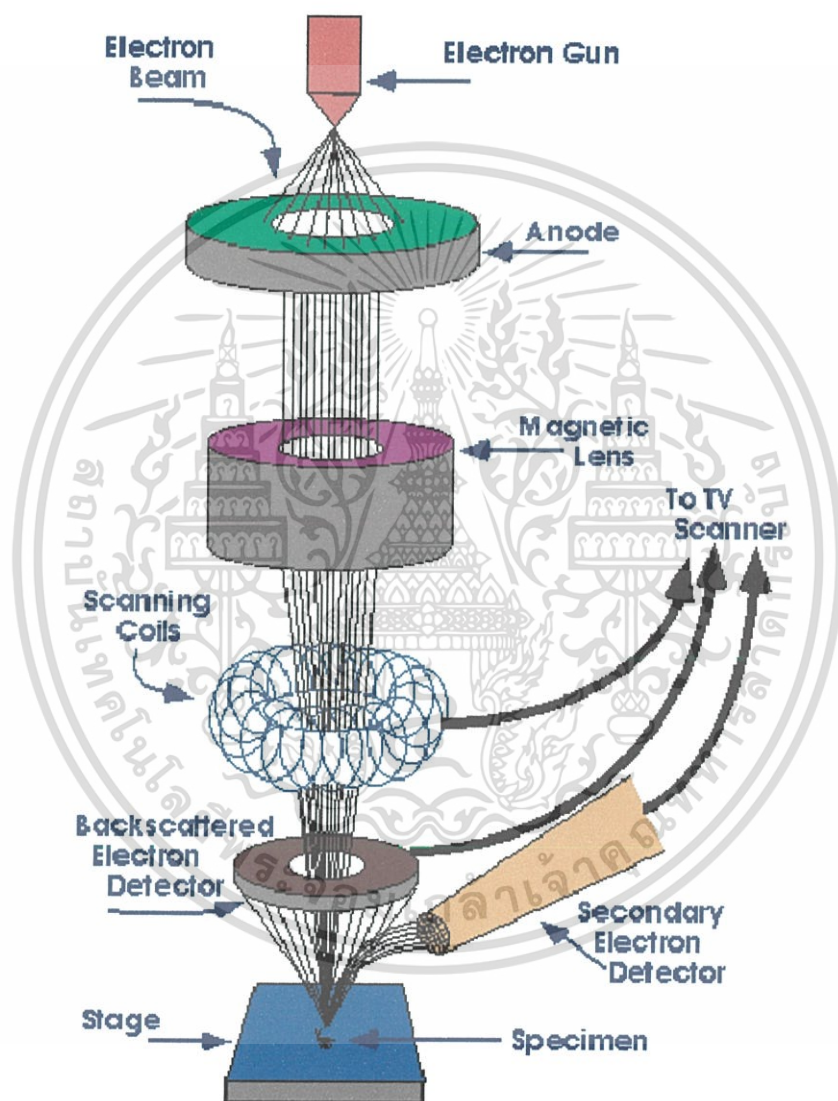
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียม เอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
- easy	5 $\mu\text{m}$	0 - 2 $\mu\text{m}$
- skilled	0 - 2 $\mu\text{m}$	10 nm
- special	0 - 1 $\mu\text{m}$	0 - 5 nm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
- transmission	Yes	Yes
- refraction	Yes	Yes
- diffraction	Yes	Yes
- other	Some	Many
Field of view	Small	Large enough
Signal	Only as image	Available for processing
Cost	Low	High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.11 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำโดยอิเล็กตรอนจะกระดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยชดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2554; ฐิตินัย, 2556; ดุสิต, 2535; ดุสิต, 2542; วีรชัย, 2547; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; อุปถัมภ์, 2548; Kittel, 1971; Runyan, 1975; van der Pauw, 1958; Sze, 1981)

#### 2.4.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

##### 2.4.1.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

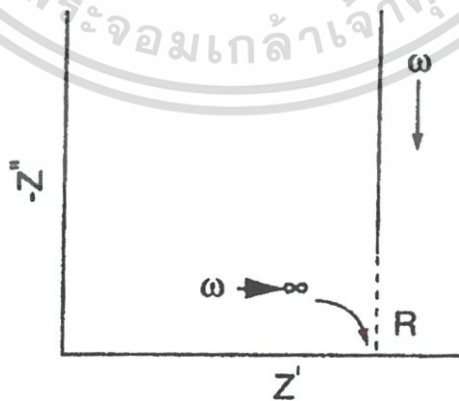
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.2)$$

อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น  $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$  และ  $Z_R = R_s$  แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_s - \frac{j}{\omega C} \quad (2.3)$$

โดย  $R_s$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน  $\frac{1}{\omega C}$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่ค่า  $R_s$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.8 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.4)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นสมการที่ ( 2.4 ) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.5)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.8 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $(1 - j\omega C)$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (1.6) จะได้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p (j\omega R_p C - 1)}$$

$$= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right]$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.7)$$

$$= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}$$

$$= \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.8)$$

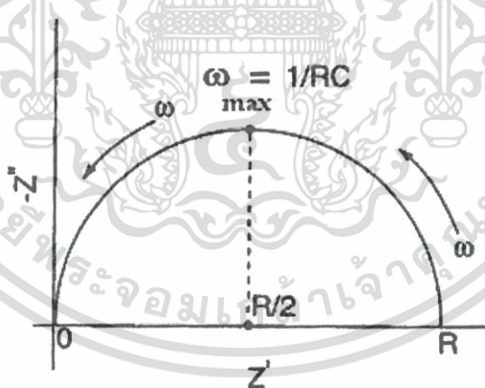
และ

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}$$

$$= R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\tau =$  ค่าคงตัวเวลา (time constant)  $= R_p C$

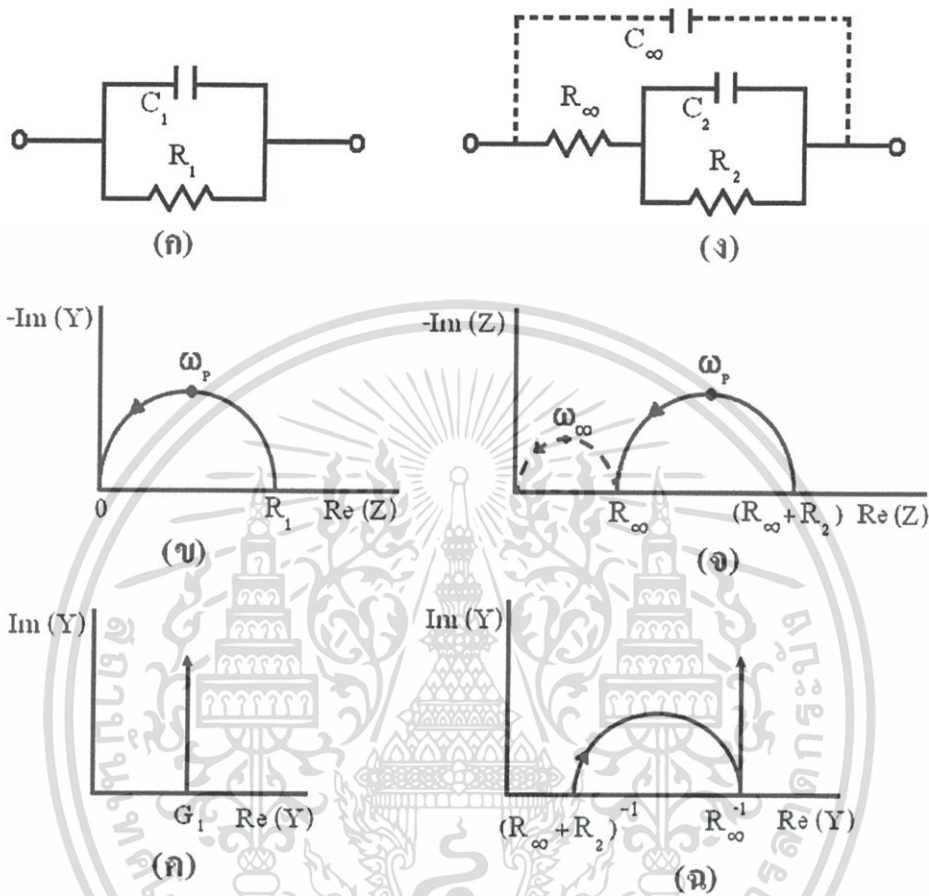
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega = \frac{1}{RC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก, ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข, จ) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค, ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.10 (ก) ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance :  $R_b$ ) ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุด คือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.10 (ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีอย่างไรก็ตามเมื่อลดคุณสมบัติของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญแต่ให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{\max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่เป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีนี้ที่  $R_1 = R_\infty$  และ  $C_1 = C_\infty$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร  $RC$  ของรูปที่ 2.10 (ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูป 2.10 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 รูป ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไขปลาตั้งรูปที่ 2.10 (จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร  $RC$  ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.10 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัทธิ คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $j\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.10)$$

กราฟของสมการที่ (2.10) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.10 (ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.10 (ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.11)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.11) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.10 (ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.10 (ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมาคือ แกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วไปทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับ  $C$  และ  $R$  ซึ่งทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า  $Z'$  กับ  $Z''$  มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'') - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.12)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'') + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.13)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $\frac{R}{2}$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.10 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

#### 2.4.1.3 กราฟของโบท (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinante) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.11 ดังนี้คือ

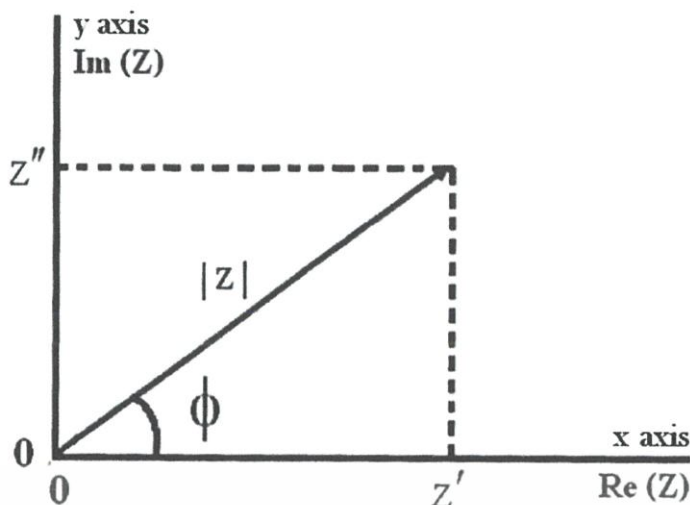
$$\begin{aligned} \text{Re}(Z) \equiv Z' &= |Z| \cos \phi \\ \text{และ} \quad \text{Im}(Z) \equiv Z'' &= |Z| \sin \phi \\ \phi &= \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\text{โดยที่โมดูลัสคือ} \quad |Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad (2.15)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

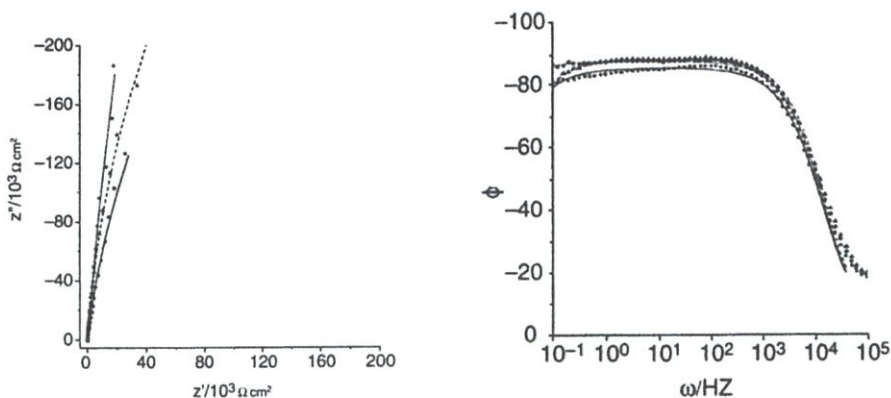
$$\text{ดังนั้น} \quad Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.16)$$



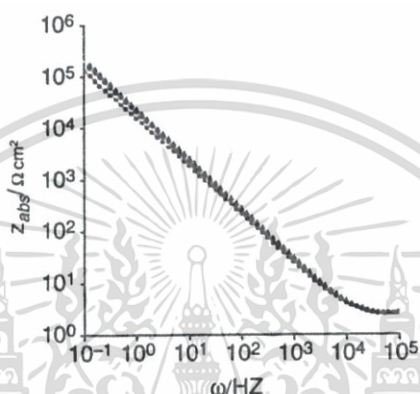
รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉาก กับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

มุมเฟสระหว่างทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบรูณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส =  $-90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของในควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบรูณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส =  $-90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบรูณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element : *CPE*) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.12 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบรูณ์ของผลึกพหุพันธ์



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 2.12 ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด

ข. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร ที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ *CPE* จะนิยามโดยค่าของ *P* และ *n* เมื่อ *P* คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน *n* เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 \leq n \leq 1$  แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ  $Z(CPE)$  จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน (resistance) และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \quad (2.17)$$

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double-layer capacitance :  $C_{dl}$ ) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = \sqrt{\frac{P}{R_s^{(n-1)}}} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์  $n$  จะสัมพันธ์กับมุมเฟส  $\phi$  ดังนี้คือ  $\phi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$  ถ้ามุมเฟส  $\phi$  เข้าใกล้ 1 ก็  
จะประพุดตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสที่หน่วยเป็นเรเดียน

## 2.4.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกเพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์

### 2.4.2.1. การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม

จะแสดงดังสมการ

$$J = kV^\alpha \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\alpha$  = สัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear coefficient) โดย  $\alpha$  จะหาได้  
จากสมการ

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\log\left(\frac{J_2}{J_1}\right)}{\log\left(\frac{E_2}{E_1}\right)} \\ &= \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1} \end{aligned} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $J_1 = 1$  มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ  $J_2 = 10$  มิลลิแอมป์ต่อตาราง  
เซนติเมตร  
ส่วน  $E_1$  และ  $E_2$  คือ สนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับ  $J_1$  และ  $J_2$  ตามลำดับตั้งนั้นสมการ  
ที่ (2.20) จะกลายเป็น

$$\alpha = \frac{1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (2.21)$$

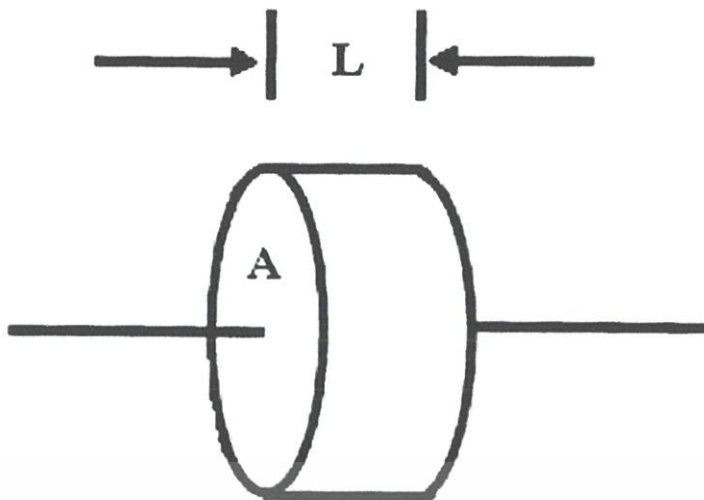
สนามไฟฟ้า  $E$  จะหาได้จาก

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $V$  คือ แรงดันที่ป้อนให้ชิ้นงานและ  $L$  คือ ความหนาของเซรามิกถ้ำรัศมีของเซรา  
มิกส์กับเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร แล้วพื้นที่

$$\begin{aligned} A &= \pi(0.5)^2 \\ &= 0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงพื้นที่ผิวและความหนาของเม็ดเซรามิก

ถ้า  $A = 0.785$  ตารางเซนติเมตร

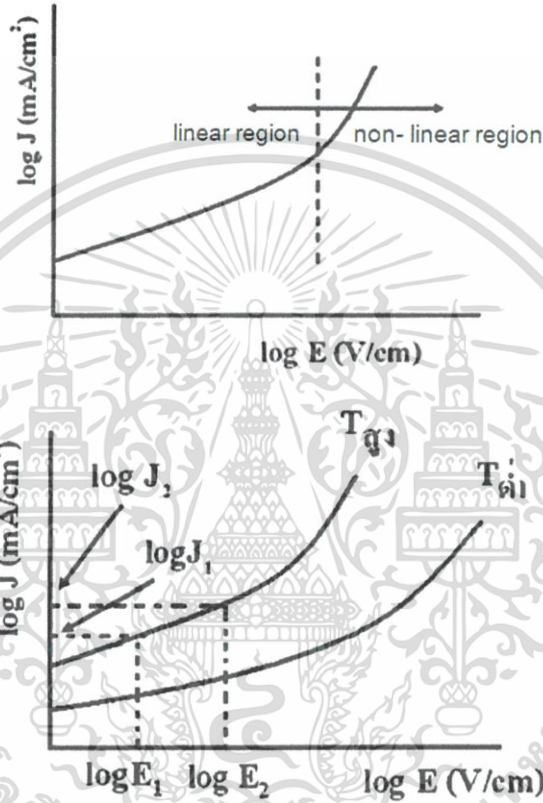
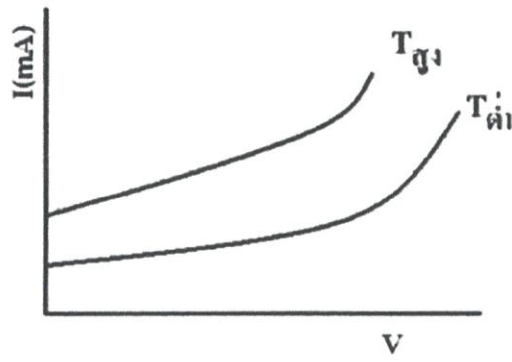
$$J_1 = \frac{I_1}{A}$$

$$I_1 = J_1 A = (1 \text{ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร})(0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}) = 0.785 \text{ มิลลิแอมป์}$$

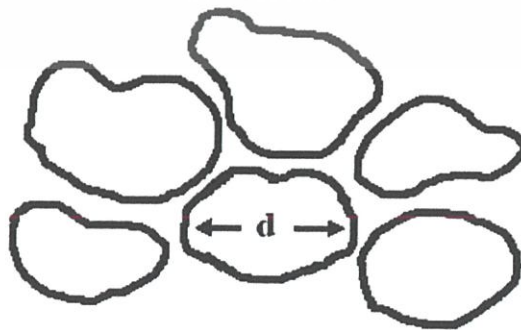
$$I_2 = J_2 A = (10 \text{ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร})(0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}) = 7.85 \text{ มิลลิแอมป์}$$

สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field :  $E_b$ ) พิจารณาที่  $J_1 = 1$  มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยที่  $E_b$  มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร หรือบางครั้งใช้โวลต์ต่อมิลลิเมตร ส่วนกระแสรั่ว (leakage current :  $I_L$ ) จะพิจารณาที่สนามไฟฟ้า เท่ากับ  $0.8 E_b$  ในเนื้อเซรามิกจะมีขอบของเกรน (grain boundary) และเนื้อเกรน (bulk) ประมาณว่าขนาดของเกรน (grain size) มีค่าเท่ากับ  $d$  ซึ่งหาได้จาก SEM หรือ XRD ที่บริเวณขอบของเกรน มักจะมีสถานะผิวรอยต่อ (interface state) เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นเสมือนกับมีกำแพงศักย์เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของเกรนคล้ายกับรอยต่อขอตติ์กี 2 รอยต่อมาหันหน้าชนกันดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

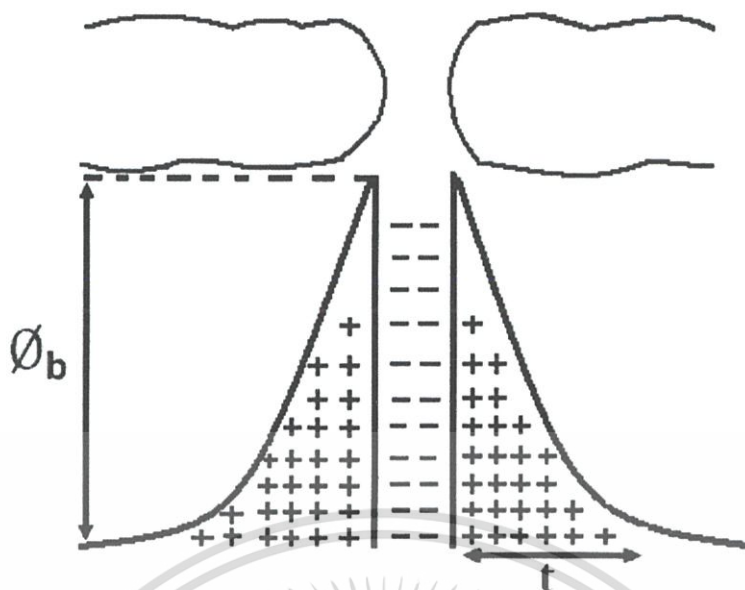


รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\log J$  กับ  $\log E$  ของวาริสเตอร์



รูปที่ 2.15 แสดงขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงรอยต่อแบบชอตต์กี 2 รอยต่อที่หันหน้าชนกัน

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (density of interface state :  $N_t$ ) หาได้จาก  
ความสัมพันธ์

$$N_t = \left( \frac{2\varepsilon_s N_d \phi_b}{q} \right)^{1/2} \quad (2.23)$$

$N_t$  มีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อ  $N_d$  = ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (density of donor) มีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\varepsilon_s$  = permittivity ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ ( $\varepsilon_s = \varepsilon_r \varepsilon_0$ )

$\varepsilon_0$  = permittivity ของสุญญากาศ =  $8.85 \times 10^{-14}$  ฟารัดต่อเซนติเมตร

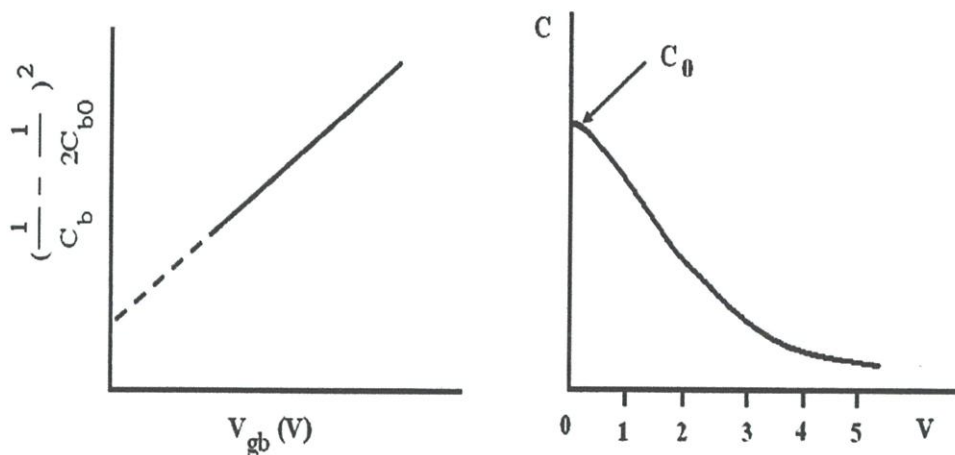
$\varepsilon_r$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารประกอบ  $WO_3 = 100$

$t$  = ความหนาของชั้นพร่องพาหะ หรือความหนาของกำแพงศักย์

$$t = \frac{N_t}{N_d} \quad (2.24)$$

ที่บริเวณขอบของเกรนจะมีความจุไฟฟ้าปรากฏอยู่ขณะที่ทำการวัด  $C-V$  วัดที่  $f = 1$  เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะเป็นดังความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขอบรอยต่อของเกรน กับ แรงดันไบแอส

$$\left( \frac{1}{C_b} - \frac{1}{2C_{b0}} \right)^2 = \frac{2n}{A^2 q \epsilon_s N_d} (n\phi_b + V) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $C_b$  = ความจุไฟฟ้าที่แต่ละขอบของเกรน (capacitance per grain boundary)

$C_{b0}$  = ความจุต่อจำนวนขอบของเกรนที่แรงดัน = 0 ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร

$V_{gb}$  = แรงดันไบแอสที่แต่ละขอบของเกรน (applied voltage per grain boundary)

$C_b$  จะหาได้จาก  $C$  ที่วัดได้หารด้วยจำนวนของเกรน ( $n$ ) ดังสมการ

$$C_b = \frac{C}{n} \quad (2.26)$$

$$n = \frac{L}{d} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $d$  = ขนาดของเกรน

และ 
$$C_{b0} = \frac{C_0}{n} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N_d$  จะหาได้จากความชัน

$$\text{ความชัน} = \frac{2n}{A^2 q \epsilon_s N_d} \quad (2.29)$$

และ  $\phi_b$  จะหาได้จากจุดตัดแกน  $y$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{2n^2 \phi_b}{A^2 q \epsilon_s N_d} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $E_b$  = สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field)

$V_b$  = แรงดันตกคร่อมขอบของเกรน (voltage barrier)

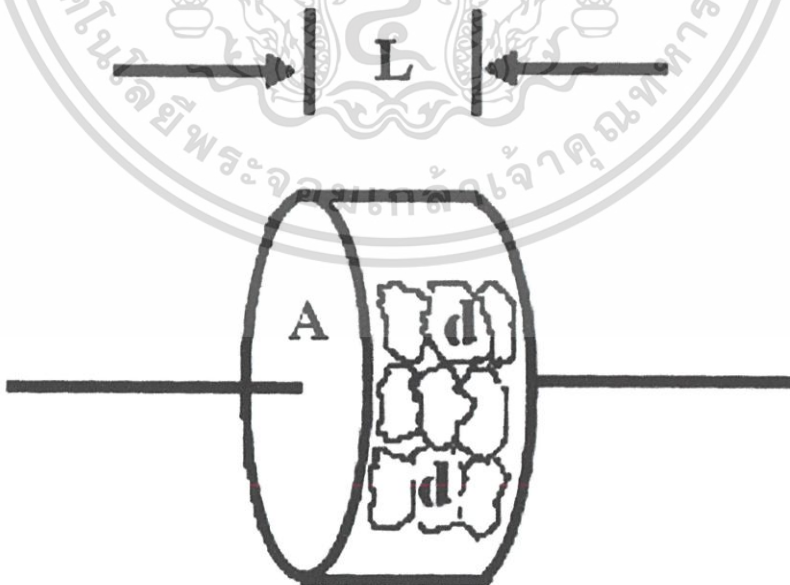
$\sigma_0$  = ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductivity)

จะวัดที่สนามไฟฟ้า  $E = 1$  โวลต์ต่อมิลลิเมตร

โดยที่  $\sigma_0 = \frac{L}{RA} \quad (2.31)$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.32)$$

ซึ่ง  $V$  จะสอดคล้องกับ  $E = 1$  โวลต์ต่อมิลลิเมตร

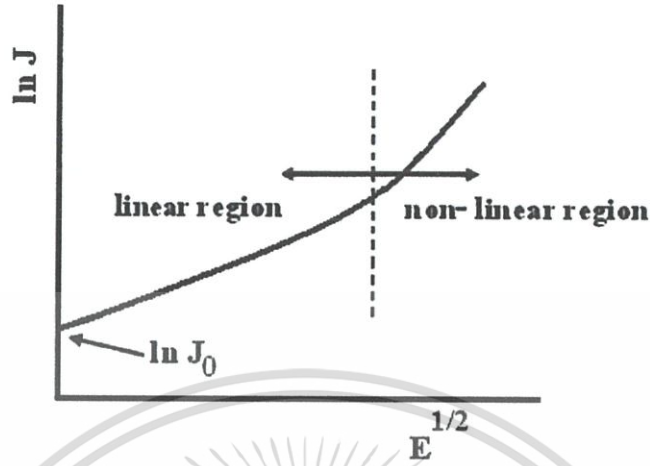


รูปที่ 2.18 แสดงการหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.2. ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $J$ กับ $V$ ในแบบชอตต์กี

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $J$  กับ  $V$  ในแบบชอตต์กีของวาริสเตอร์ คือ



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $J$  กับ  $V$  ในแบบชอตต์กี

$$J = A^* T^2 \exp \left[ \frac{-(\phi_b - \beta E^{1/2})}{kT} \right] \quad (2.33)$$

$$= A^* T^2 \exp \left[ \frac{\beta E^{1/2} - \phi_b}{kT} \right]$$

$$\ln J = \ln A^* T^2 + \frac{\beta E^{1/2} - \phi_b}{kT}$$

$$= \left( \frac{\beta}{kT} \right) E^{1/2} + \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT}$$

เทียบสมการของกราฟเส้นตรง

$$y = mx + c$$

$$\text{ความชัน} = \frac{\beta}{kT}$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT} \quad (2.34)$$

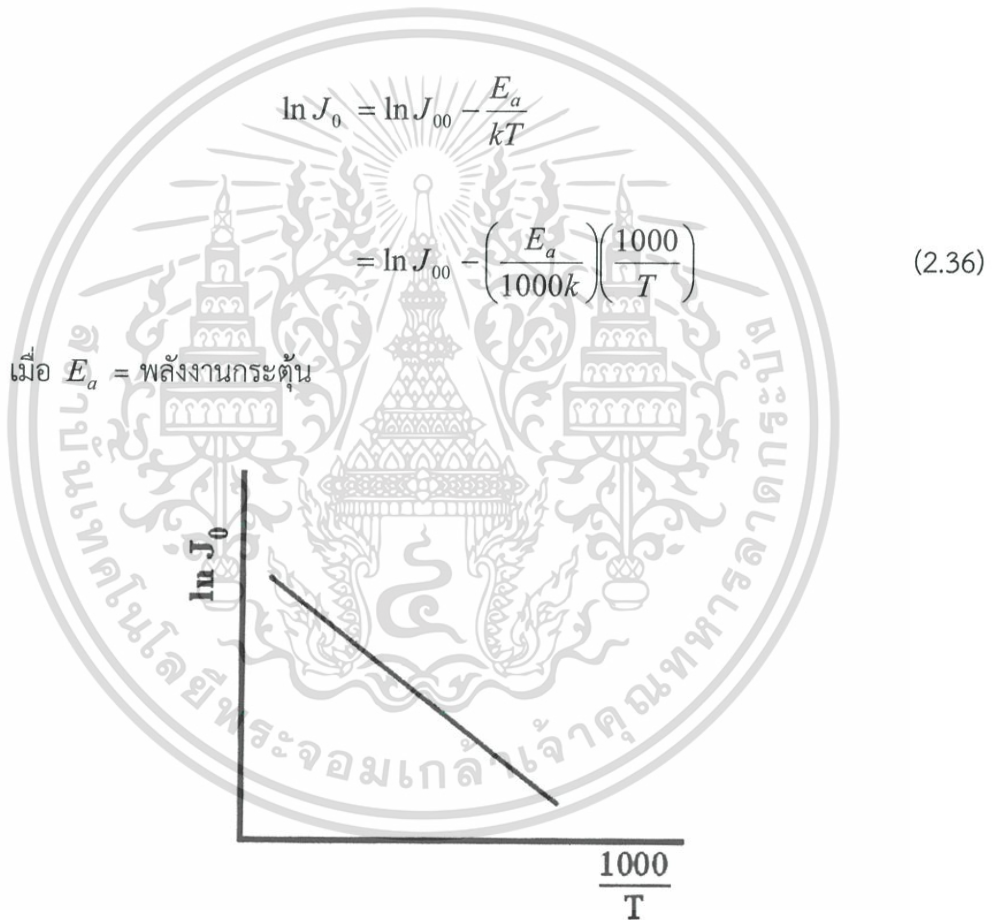
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.33) จะสามารถหาค่า  $\beta$  ได้ซึ่ง

$$\beta = \left(\frac{1}{e}\right) \left[ \left(\frac{1}{nt}\right) \left(\frac{2e^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}\right) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

ถ้าลากเส้นส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเส้นตรง (linear region) ไปตัดแกน  $E^{1/2}$  ก็จะได้ค่า  $\ln J_0$  ซึ่งคำนวณหาค่า  $J_0$  ได้ ซึ่งกระแส  $J_0$  จะเกิดจากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้

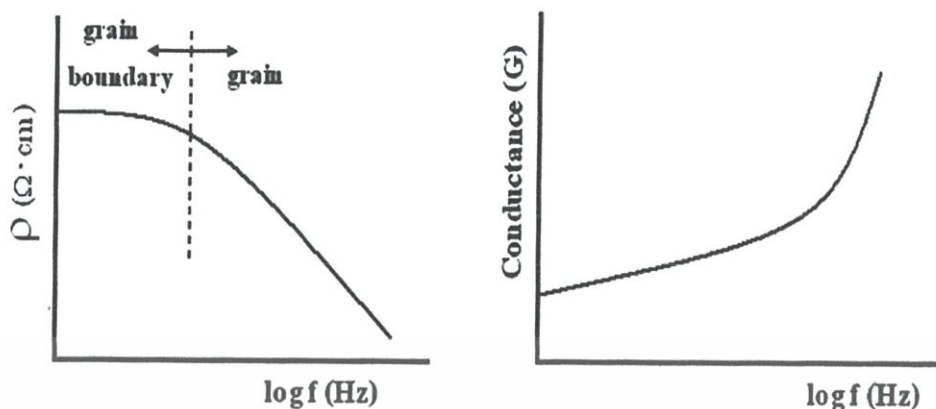
$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$$



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln J_0$  กับ ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

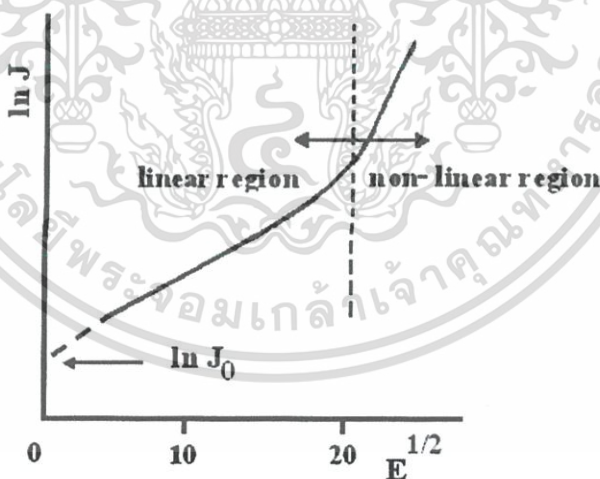
สภาพต้านทานทางไฟฟ้า ( $\rho$ ) จะเปลี่ยนไปตามความถี่ดังนี้



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ สภาพนำไฟฟ้า กับ ความถี่

#### 2.4.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พูลู - เฟรนเคิล (Poole - Frenkel type)

พลังงานความร้อนจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสถานะพลังงานของอะตอมของผู้รับ (acceptor states) ที่อยู่สถานะฉนวนรอยต่อจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.37)



รูป 2.22 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln J$  กับ  $E^{1/2}$

$$J_{pf} = cE \exp\left[\frac{-(\phi_b - 2\beta E^{1/2})}{kT}\right] \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln J_{pf} = \ln \left( cE - \frac{\phi_b}{kT} \right) + \left( \frac{2\beta}{kT} \right) E^{1/2}$$

$$\ln J_{pf} = \left( \frac{2\beta}{kT} \right) E^{1/2} + c \ln - \frac{\phi_b}{kT}$$

$$\text{ความชัน} = \frac{2\beta}{kT} \quad (2.38)$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = c \ln E - \frac{\phi_b}{kT} \approx \frac{-\phi_b}{kT} \quad (2.39)$$

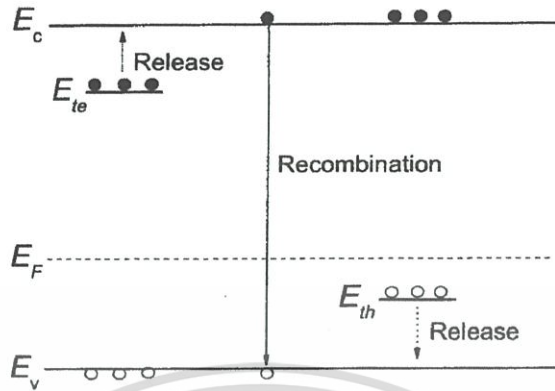
จากค่าความชันของกราฟ จะหาค่า  $\beta$  ได้ และจากจุดตัดแกน  $y$  จะหาค่า  $\phi_b$  ได้

#### 2.4.3 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2554; ฐิตินัย, 2556; Kiltel, 1971; Sze, 1981)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.23 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_h$ ) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_e$ ) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานสิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสไฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลาที่ยังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อื้อ (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.23 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{th}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชิ้นสารมีความกว้าง  $w$  ความหนา  $d$  และยาว  $l$  ให้กระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  $wd$  กระแสไฟฟ้า  $I$  จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.40)$$

และจากความสัมพันธ์  $\mu = \frac{v}{\xi}$  และ  $\xi = \frac{V_a}{l}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.41)$$

แทนสมการที่ (2.41) ลงในสมการที่ (2.40) จะได้

$$I = en\mu V_a \frac{wd}{l} \quad (2.42)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่  $i$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ ( 2.43 ) ลงในสมการที่ ( 2.42 ) จะได้ว่า กระแส  $I_i$  ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด  $i$  คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left( \frac{wd}{l} \right) \exp\left( \frac{-t}{\tau_i} \right) \quad (2.44)$$

กระแสรวมทั้งหมด  $I$  ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left[ N_{ii} \exp\left( \frac{-t}{\tau_i} \right) \right] \quad (2.45)$$

เมื่อ  $N_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \left( \frac{l}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.46)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา  $d$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.42) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left( \frac{w}{l} \right) ndV_a \\ &= e\mu \left( \frac{w}{l} \right) \sigma_{ii} V_a \end{aligned} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $\sigma_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม ( $I$ ) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left[ \sigma_{ii} \exp\left( \frac{-t}{\tau_i} \right) \right] \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\sigma_{ii}$  คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \left( \frac{l}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.49)$$

โดยที่  $V_a$  คือ แรงดันแรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์

$\mu$  คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $w$  คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร  
 $l$  คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร  
 $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร  
 $I$  คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา  $t$  ใดๆ  
 $\tau_r$  คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)  
 $N_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะในชิ้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $\sigma_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาช่วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1000)k} \left(\frac{1000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ ความชัน  $= \frac{E_t}{1000k}$

ดังนั้น  $E_t = \frac{(1000)k(\text{ความชัน})}{q}$

$$= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.51)$$

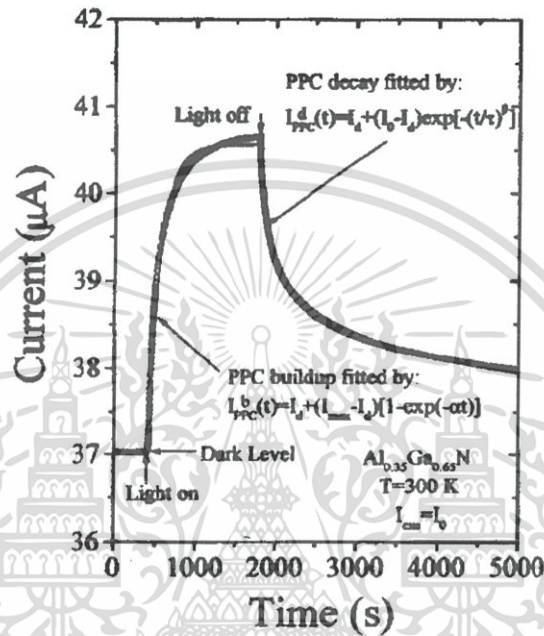
ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต ( $I_p$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา ( $t$ ) ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $I_0$  คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ  $t = 0$ ) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา ( $t$ ) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.53)$$



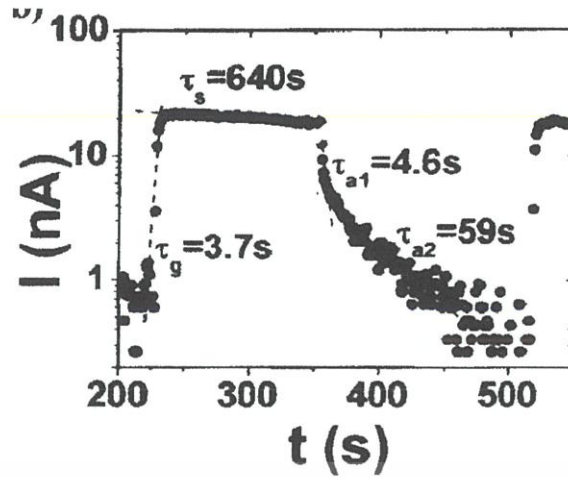
รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.52) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.54)$$

ความชันของกราฟ คือ  $\frac{1}{\tau_d}$  ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  (ดังรูปที่ 2.25) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมิได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโต ขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.48) และ สมการที่ (2.53) ดังนี้ คือ (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu\left[\frac{w}{l}\right]V_a\sigma_{n2}\exp\left(\frac{-t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.55)$$

เพื่อให้  $\tau_{d1}$  และ  $\tau_{d2}$  มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.54) ให้อยู่ในรูปของ ฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu\left[\frac{w}{l}\right]V_a\sigma_{n2}\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.56) สามารถที่จะหาค่า  $\sigma_{n1}$  และ  $\sigma_{n2}$  ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.49) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a}\right)\left(\frac{1}{w}\right)\exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.57)$$

$$\sigma_{n2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a}\right)\left(\frac{1}{w}\right)\exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสค่าเริ่มต้น ( $t = 0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{i1} = \left( \frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{1}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{i2} = \left( \frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{1}{w} \right)$$

สมการที่ (2.56) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.59)$$

เมื่อ  $A_1$  และ  $A_2$  คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่  $A_1 + A_2 = 1$  (Lin, 2012; Lin, 2013; Ren, 2012) ซึ่งค่า  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ  $\beta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตอร์ตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.60)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เม็ดเซรามิก กระแสโตะขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.45) และสมการที่ (2.56) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{i1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.61) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{i1} = \left( \frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.62)$$

$$N_{i2} = \left( \frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.63)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสเริ่มต้น ( $t = 0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$N_{i1} = \left( \frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right)$$

$$N_{i2} = \left( \frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right)$$

สมการที่ ( 2.61 ) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน ( normalization ) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1'' \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + A_2'' \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.64)$$

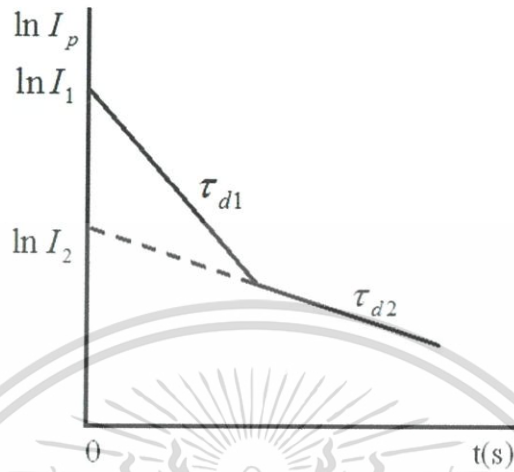
ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาซีน ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[ 1 - \exp\left( \frac{-t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2''' \left[ 1 - \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \right] \quad (2.65)$$

### 2.4.3.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสชาลงจะอาศัยกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$

ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสชาลง

ค่า  $\tau_{d1}$  หาค่าได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.66)$$

เราสามารถหาค่า  $I_1$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  คือ  $(\ln I_1)$  และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพของฟิล์มบางได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \left( \frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.67)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ  $\log I_p$  แทน  $\ln I_p$  โดยที่  $\ln I_p = 2.3 \log I_p$

ในทำนองเดียวกัน  $\tau_{d2}$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.68)$$

เราสามารถหาค่า  $I_2$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  คือ  $(\ln I_2)$  และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพของฟิล์มบางได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{i2} = \left( \frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.69)$$

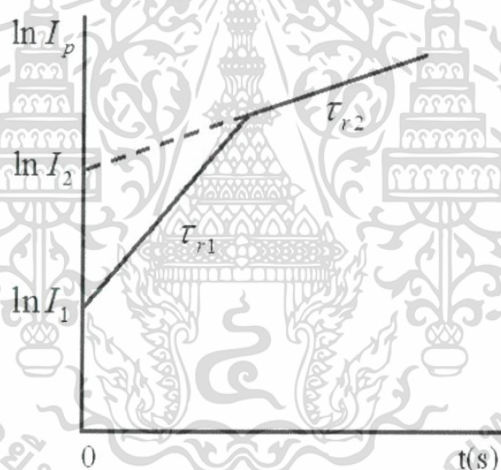
สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิกก็สามารถใช้สูตร

$$N_{i1} = \left( \frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.70)$$

$$N_{i2} = \left( \frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.71)$$

#### 2.4.3.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของดับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.72)$$

$$\frac{I}{I_{\max}} = 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right)$$

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = \frac{-t}{\tau_r} \quad (2.73)$$

จากสูตร

$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

ถ้า  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  สมการที่ (2.73) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.74)$$

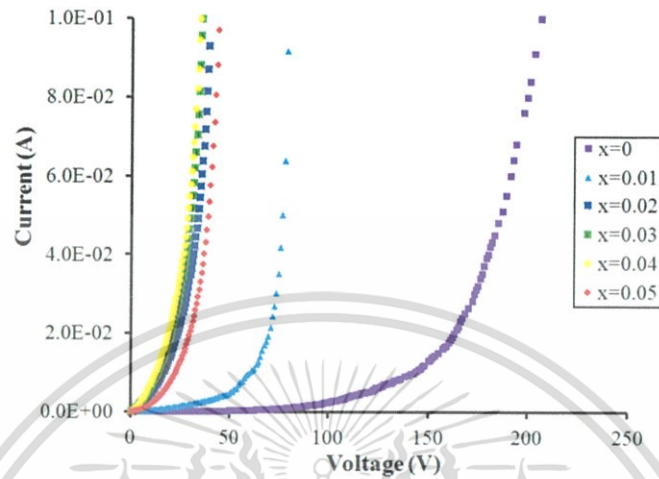
ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.74) จะใช้ได้จริงเมื่อ  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  ก็คือช่วงแรกของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจะใช้สมการที่ (2.68), (2.69), (2.70) และสมการที่ (2.71) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (งามนิตย์, 2556; ชโนดม, 2556; ฐิตินัย, 2549; นวนันต์, 2554; ปทุมทิพย์, 2554; ปณยานัฐ, 2555)

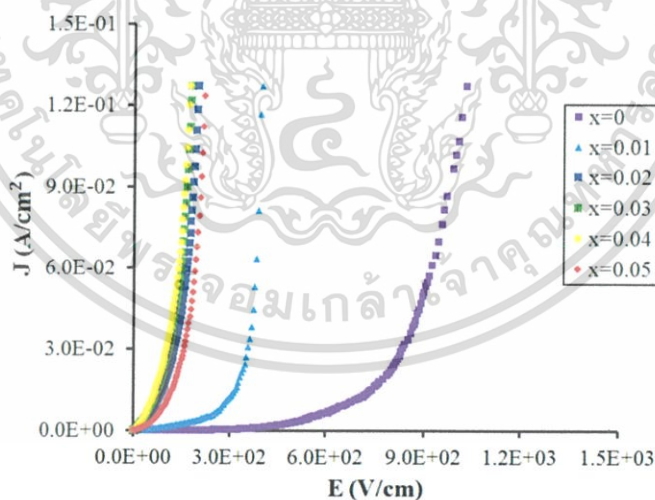
เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ  $\text{WO}_3$  ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถประยุกต์เป็นวาริสเตอร์แรงดันต่ำ (low voltage varistor) เพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงดันไฟเกินชั่วขณะ (transient overvoltage) ได้มีการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (non-linear electrical properties) ของสารประกอบในระบบ  $\text{WO}_3\text{-Na}_2\text{O}$ ,  $\text{WO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3\text{-Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{WO}_3\text{-MnO}_2$  ไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 (Makarov and Trontelj, 1996) ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{WO}_3$  ที่เจือด้วยสารประกอบ  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$  และ  $\text{La}_2\text{O}_3$  ในปริมาณเล็กน้อยก็ได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 (Kaneki et al., 1976) เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{WO}_3$  ที่เจือด้วยสารประกอบ  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  (Yang et al., 2004) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.56

เมื่อปี พ.ศ. 2554 ได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  (ปทุมทิพย์ บุญเสริม และ ปานจรี แจงบำรุง, 2554) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกได้  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส และ แรงดันไฟฟ้าพบว่าสนามไฟฟ้าพังทลาย ( $E_b$ ) และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\alpha$ ) มีค่าลดลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความสูงของกำแพง

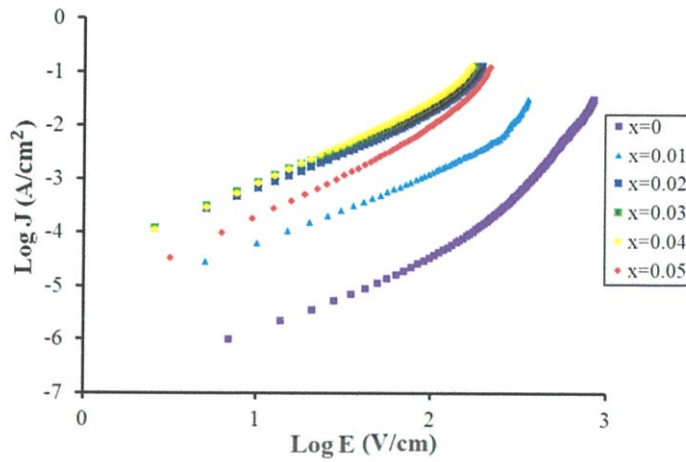
ศักย์ ( $\phi_b$ ) มีแนวโน้มลดลง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมีค่าอยู่ในช่วง  $2.54 \times 10^{11}$  –  $2.54 \times 10^{12}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ความหนาแน่นของกักประจุที่บริเวณของขอบเกรนมีค่าอยู่ในช่วง  $1.91 \times 10^{10}$  –  $6.68 \times 10^{10}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้น



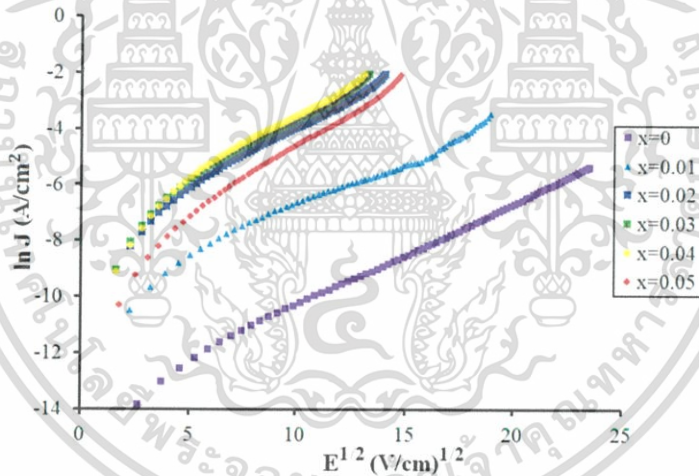
รูปที่ 2.28 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอการิทึมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง

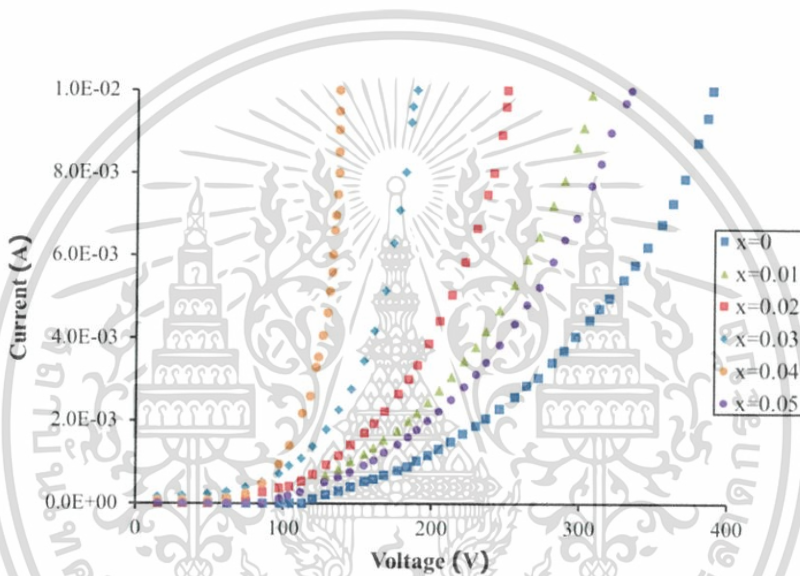
Composition (x)	$E_b$ (V/cm)	$\sigma_0$ (S/cm)	$\alpha$	$I_L$ (mA)
0.00	382	$2.26 \times 10^{-6}$	4.76	305.60
0.01	85.12	$3.69 \times 10^{-5}$	2.22	68.10
0.02	10.68	$5.50 \times 10^{-4}$	1.52	8.55
0.03	14.24	$2.67 \times 10^{-4}$	1.43	11.39
0.04	12.55	$2.10 \times 10^{-3}$	1.52	10.04
0.05	29.28	$1.17 \times 10^{-4}$	2.28	23.42

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง

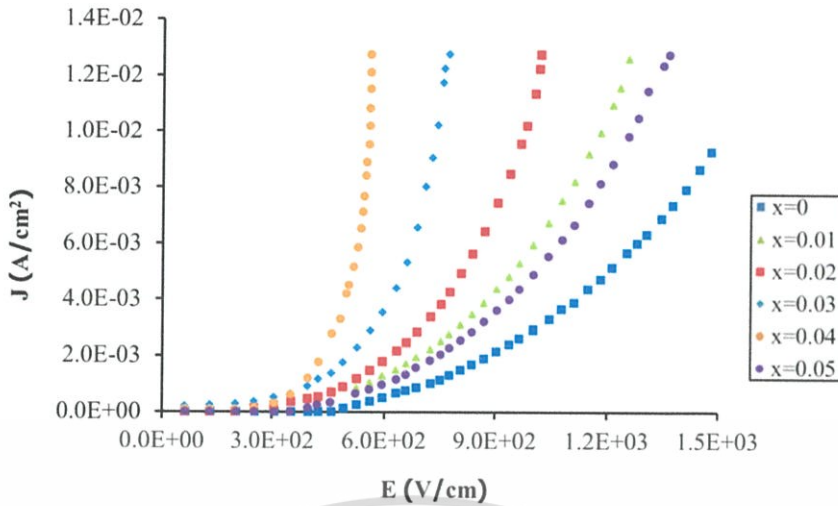
Composition (x)	$\phi_b$ (eV)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_f$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	t (nm)	d ( $\mu\text{m}$ )	$\beta$ ( $\text{V}^{1/2} \text{cm}^{1/2}$ )
0.00	0.796	$2.54 \times 10^{12}$	$6.68 \times 10^{10}$	2.09	5.00	$9.30 \times 10^{-3}$
0.01	0.685	$1.14 \times 10^{12}$	$4.16 \times 10^{10}$	3.00	10.00	$7.74 \times 10^{-3}$
0.02	0.640	$2.28 \times 10^{12}$	$5.69 \times 10^{10}$	1.46	20.00	$1.11 \times 10^{-2}$
0.03	0.648	$1.14 \times 10^{12}$	$4.04 \times 10^{10}$	1.46	15.00	$1.11 \times 10^{-2}$
0.04	0.649	$2.54 \times 10^{11}$	$1.91 \times 10^{10}$	1.43	15.00	$1.12 \times 10^{-2}$
0.05	0.681	$5.72 \times 10^{11}$	$2.94 \times 10^{10}$	1.08	15.00	$1.29 \times 10^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

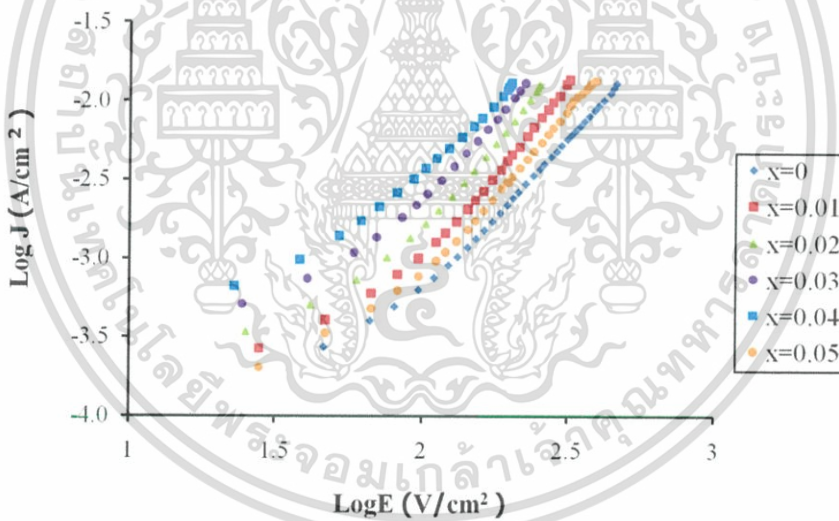
เมื่อปี พ.ศ. 2555 ได้มีการศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{WO}_3$  ที่เจือด้วยอะตอมธาตุ Cd (ปีฉนวนัฎฐ์, 2555) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบได้  $\text{Cd}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส และ แรงดันไฟฟ้าพบว่าค่าสนามไฟฟ้าพังทลาย ( $E_b$ ) และ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\alpha$ ) มีค่าลดลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_b$ ) มีแนวโน้มลดลง ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมีค่าอยู่ในช่วง  $1.59 \times 10^{14} - 1.73 \times 10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่บริเวณของขอบเกรนมีค่าอยู่ในช่วง  $4.64 \times 10^{10} - 2.28 \times 10^{11}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

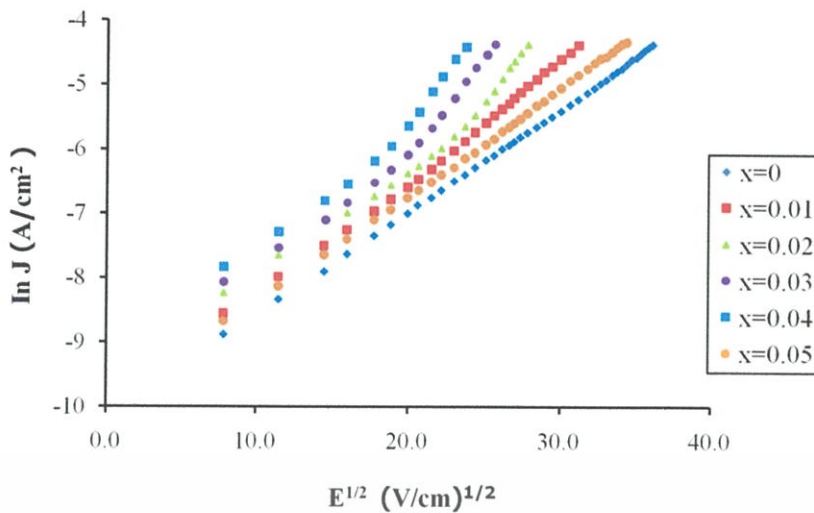


รูปที่ 2.33 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 2.34 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอการิทึมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	$E_b$ (V/cm)	$\sigma_0$ (S/cm)	$\alpha$	$\phi_b$ (eV)	$I_L$ (mA)
0.00	368	$1.56 \times 10^{-7}$	10.87	0.682	294.4
0.01	416	$6.62 \times 10^{-7}$	11.07	0.671	332.8
0.02	336	$6.49 \times 10^{-7}$	9.94	0.664	268.8
0.03	320	$1.09 \times 10^{-6}$	9.93	0.658	256.0
0.04	240	$2.18 \times 10^{-6}$	10.44	0.655	192.0
0.05	448	$3.90 \times 10^{-7}$	11.37	0.674	358.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

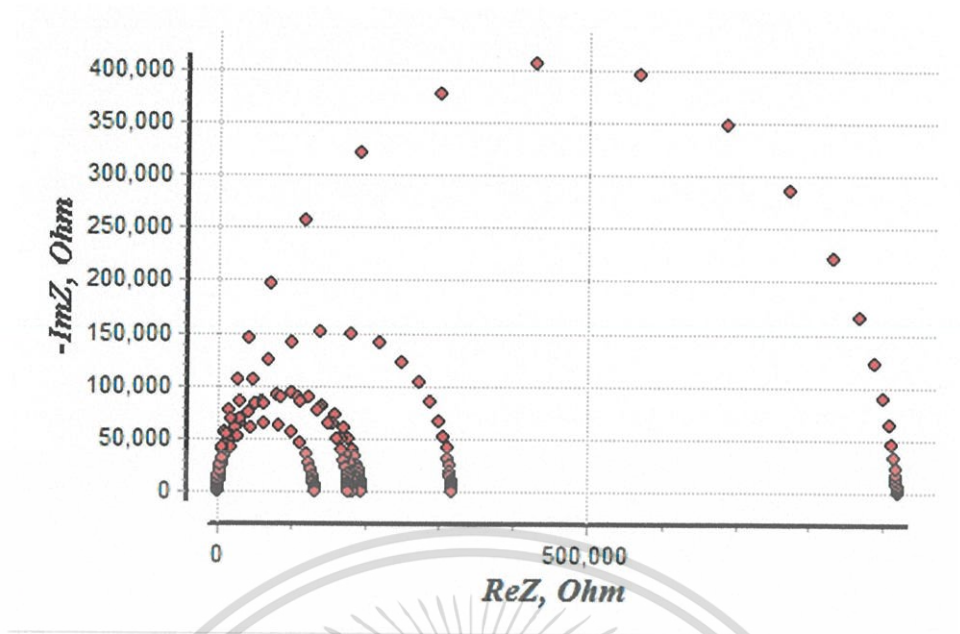
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง

Composition (x)	$\phi_b$ (eV)	$N_d$ ( $cm^{-3}$ )	$N_t$ ( $cm^{-2}$ )	t ( $\mu m$ )	d ( $\mu m$ )	$\beta$ ( $V^{1/2} cm^{1/2}$ )
0.00	0.350	$4.68 \times 10^{14}$	$1.35 \times 10^{11}$	2.88	6.00	$4.67 \times 10^{-2}$
0.01	0.203	$8.28 \times 10^{14}$	$1.35 \times 10^{11}$	1.63	8.00	$4.53 \times 10^{-2}$
0.02	0.264	$1.95 \times 10^{14}$	$4.64 \times 10^{10}$	2.34	10.00	$4.37 \times 10^{-2}$
0.03	0.270	$1.73 \times 10^{15}$	$2.28 \times 10^{11}$	1.32	11.00	$4.01 \times 10^{-2}$
0.04	0.350	$1.59 \times 10^{14}$	$7.84 \times 10^{10}$	4.93	12.00	$3.77 \times 10^{-2}$
0.05	0.084	$8.48 \times 10^{14}$	$8.66 \times 10^{10}$	1.02	14.00	$4.59 \times 10^{-2}$

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Parameters				
	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	$C_p$ (pF)	$f_{max}$ (Hz)	$\omega_{max} R_p C_p$
0.00	200	$9.21 \times 10^5$	$5.15 \times 10^{-11}$	3631	1.08
0.01	150	$1.95 \times 10^5$	$8.80 \times 10^{-11}$	8912	0.96
0.02	100	$1.84 \times 10^5$	$9.85 \times 10^{-10}$	1000	1.11
0.03	90	$1.78 \times 10^5$	$9.50 \times 10^{-10}$	954	1.01
0.04	70	$1.32 \times 10^5$	$8.74 \times 10^{-10}$	1445	1.04
0.05	50	$3.16 \times 10^5$	$8.73 \times 10^{-10}$	3623	0.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xWO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่าในวงจรมมูลไม่ปรากฏว่ามีค่าความจุไฟฟ้าของขอบเกรนปรากฏอยู่ อีกทั้งความสูงของขอบกำแพงศักย์ ( $\phi_b$ ) มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำเกิดจากกระแสอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงศักย์ต่ำสุด ในกรณีพิเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.04 จะมีค่ากำแพงศักย์และแรงดันไฟฟ้าพังทลายต่ำสุด จึงทำให้เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.04 มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดด้วย และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ คือความจุไฟฟ้าของเนื้อสารที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนปรากฏขึ้นมา และกลไกการนำกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอน อธิบายได้ดีด้วยกลไกของขอตติ่มากกว่ากลไกพูลเฟรนเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2556; ปทุมทิพย์, 2554; ปณยานัฐ, 2555)

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้น
  - ทังสเทน (VI) ออกไซด์ ( $WO_3$ )
  - แอนติโมนีไตรออกไซด์ ( $Sb_2O_3$ )
2. ครกอาเกต
3. เครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้สำหรับอัดเม็ดสารตั้งต้น
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
5. เตาเผาสาร
6. เตาอบ
7. ครูซิเบิลชนิดอลูมินา

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550; งามนิตย์, 2556)



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  และ  $Sb_2O_3$  จำนวน 3 กรัม ตามตารางที่ 3.1 บดให้คลุกเคล้าผสมกัน แล้วแบ่งเป็น 3 ส่วน เพื่ออัดเม็ดให้ได้ 3 เม็ด จากนั้นจึงทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี  $x = 0.00$

ใช้  $WO_3$  จำนวน 3 กรัม

กรณี  $x = 0.01$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } W_{0.99}Sb_{0.01}O_3 &= [(183.85 \times 0.99) + (121.75 \times 0.01) + (15.9994 \times 0.005)] \\ &= 231.2272 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $W_{0.99}Sb_{0.01}O_3$  จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 = \frac{(0.99)(231.8482)(3)}{231.2272}$$

$$= 2.9780 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } Sb_2O_3 = \frac{(0.01)(291.4982)(3)}{231.2272}$$

$$= 0.0378 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.02$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } W_{0.98}Sb_{0.02}O_3 &= [(183.85 \times 0.98) + (121.75 \times 0.02) + (15.9994 \times 0.005)] \\ &= 230.6062 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $W_{0.98}Sb_{0.02}O_3$  จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 = \frac{(0.98)(231.8482)(3)}{230.6062}$$

$$= 2.9558 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } Sb_2O_3 = \frac{(0.02)(291.4982)(3)}{230.6062}$$

$$= 0.0758 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.03$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } W_{0.97}Sb_{0.03}O_3 &= [(183.85 \times 0.97) + (121.75 \times 0.03) + (15.9994 \times 0.005)] \\ &= 229.9852 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $W_{0.97}Sb_{0.03}O_3$  จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 = \frac{(0.97)(231.8482)(3)}{229.9852}$$

$$= 2.9336 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } Sb_2O_3 = \frac{(0.03)(291.4982)(3)}{229.9852}$$

$$= 0.1141 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี  $x = 0.04$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของผงผลึก } W_{0.96}\text{Sb}_{0.04}\text{O}_3 &= [(183.85 \times 0.96) + (121.75 \times 0.04) + (15.9994 \times 0.005)] \\ &= 229.3642 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $W_{0.96}\text{Sb}_{0.04}\text{O}_3$  จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 = \frac{(0.96)(231.8482)(3)}{229.3642}$$

$$= 2.9112 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{Sb}_2\text{O}_3 = \frac{(0.04)(291.4982)(3)}{229.3642}$$

$$= 0.1525 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.05$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของผงผลึก } W_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{O}_3 &= [(183.85 \times 0.95) + (121.75 \times 0.05) + (15.9994 \times 0.005)] \\ &= 228.7432 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $W_{0.95}\text{Sb}_{0.05}\text{O}_3$  จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 = \frac{(0.95)(231.8482)(3)}{228.7432}$$

$$= 2.8887 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{Sb}_2\text{O}_3 = \frac{(0.05)(291.4982)(3)}{228.7432}$$

$$= 0.1912 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

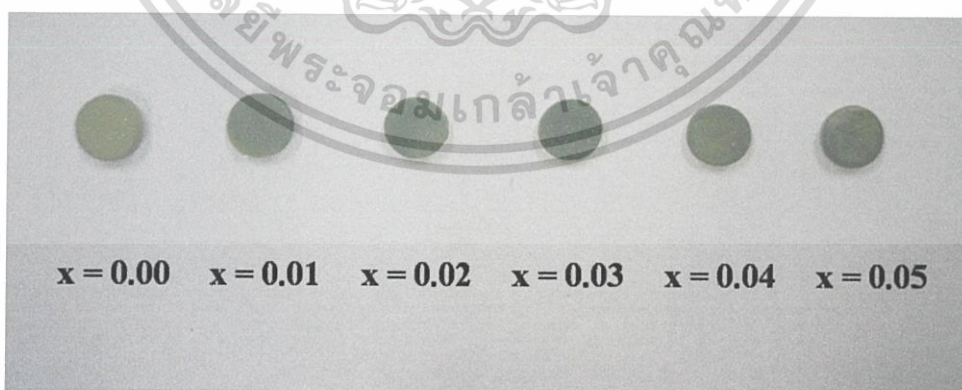
Composition (x)	WO <sub>3</sub> (g)	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)
0.00	3.0000	0.0000
0.01	2.9780	0.0378
0.02	2.9558	0.0758
0.03	2.9336	0.1141
0.04	2.9112	0.1525
0.05	2.8887	0.1912

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (งามนิตย์, 2556; รัฐินัย, 2550; รัฐินัย, 2553; รัฐินัย, 2556)

1. นำผงผลึกของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  และผงผลึกของสารประกอบ  $WO_3$  ตามปริมาณที่ต้องการ นำมาบดรวมกันในครกอากาศให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. การเจืออะตอมของธาตุ  $Sb_2O_3$  จะทำการเจือในปริมาณ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ แล้วอบในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 5 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 20 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 5 ตัน และตอนเอาเม็ดผงผลึกออกจากโม่อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
4. นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ครูซิเบิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
5. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตานำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้ขณะยังไม่เผาจะเป็นสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่ยังไม่มีการเจือจะเปลี่ยนสีเป็นเขียวอ่อน ส่วนที่มีการเติมสารเจือแล้วจะมีสีเขียวเข้ม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550)

#### 3.2.1 การศึกษาสมบัติโครงสร้างผลึกทางจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

#### 3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP

#### 3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิห้อง

- แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

#### 3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกะเฮิรตซ์และทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- สายไฟ

#### 3.2.5 การศึกษาความต้านทานเชิงแสง

- แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- หลอดไฟ ELH
- กาวเงินนำไฟฟ้า และ สายไฟ

#### 3.2.6 การศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแอมโมเนีย

- แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- แก๊สแอมโมเนีย
- ถังน้ำ 20 ลิตร
- กาวเงินนำไฟฟ้า และ สายไฟ

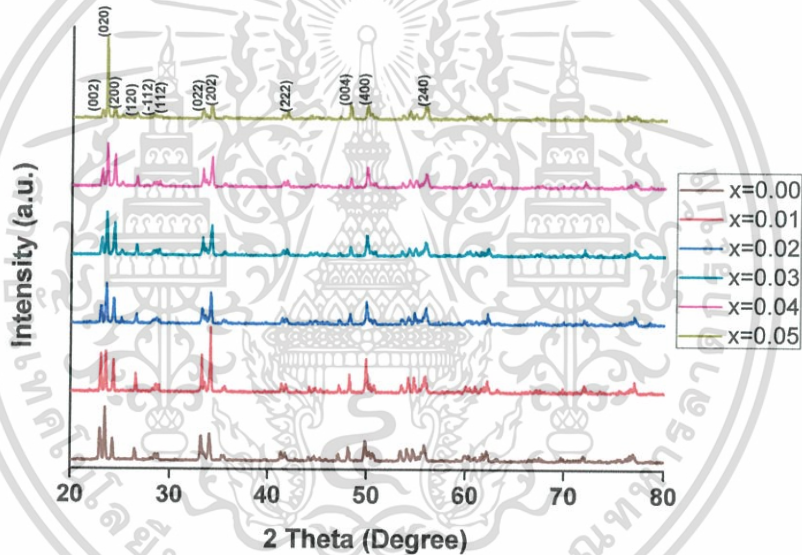
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

#### 4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.1 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากรูปที่ 4.1 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่าความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสารประกอบ  $Sb_2O_3$  เพิ่มขึ้น แต่โครงสร้างผลึกยังคงเป็นแบบโมนอคลินิกจากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมล  $x$  เพิ่มขึ้นค่าคงที่ผลึก  $a$ ,  $b$  และ  $c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่วนปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ลักษณะของโครงสร้างผลึก ของเม็ดเซรามิกสารของกึ่งตัวนำ  $WO_3$  จะเป็นแบบโมนอคลินิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าคงที่โครงสร้าง  $a$ ,  $b$  และ  $c$  สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left( \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2lh \cos \beta}{ac} \right)$$

และปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ ( $V$ ) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V = abc \sin \beta$$

ค่าคงที่ผลึก  $a$ ,  $b$  และ  $c$  รวมทั้งปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเศษส่วนโมล ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.05

จากการพิจารณาขนาดของไอออนของธาตุ  $Sb^{3+}$ ,  $Sb^{5+}$  และ  $W^{6+}$  มีค่าเท่ากับ 0.76, 0.60 และ 0.60 อังสตรอมตามลำดับ แสดงว่าไอออนของธาตุ  $Sb^{3+}$  มีโอกาสเข้ามาแทนที่ในตำแหน่งของไอออนของธาตุ  $W^{6+}$  ได้มากกว่าไอออนของธาตุ  $Sb^{5+}$  อีกทั้งไอออนของธาตุ  $Sb^{5+}$  สามารถสลายตัวกลายเป็นไอออนของธาตุ  $Sb^{3+}$  ที่อุณหภูมิสูงดังความสัมพันธ์



ดังนั้นไอออนของธาตุ  $Sb^{3+}$  จะเสถียรมากกว่าไอออนของธาตุ  $Sb^{5+}$  อีกทั้งอะตอมของธาตุ  $Sb$  อาจเข้าไปแทรกอยู่ในที่ว่างระหว่างอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก (interstitial) ซึ่งส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกัน

สามารถคำนวณหาขนาดของเกรนได้จากสูตร

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta}$$

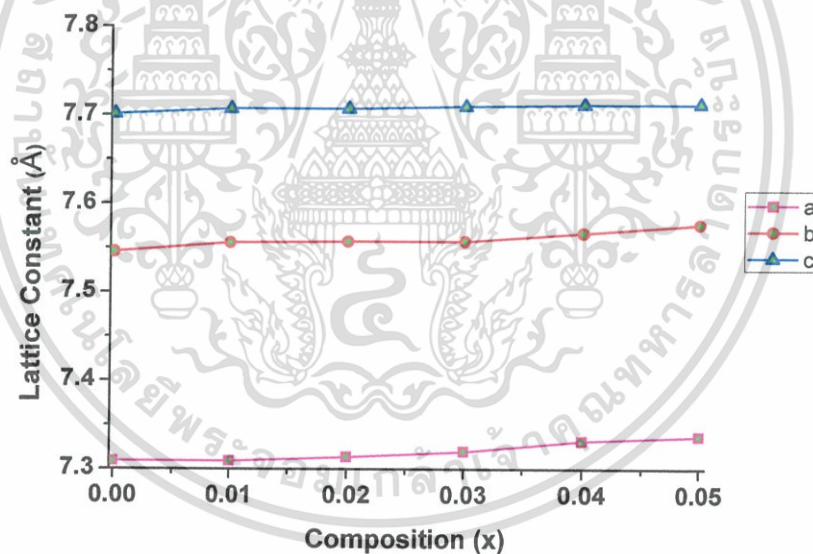
เมื่อ  $\lambda = 1.5406$  อังสตรอม

$\beta =$  ความกว้างของพีคที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูง (full width at half maximum of the diffraction peak)

ขนาดของเกรน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 4.1

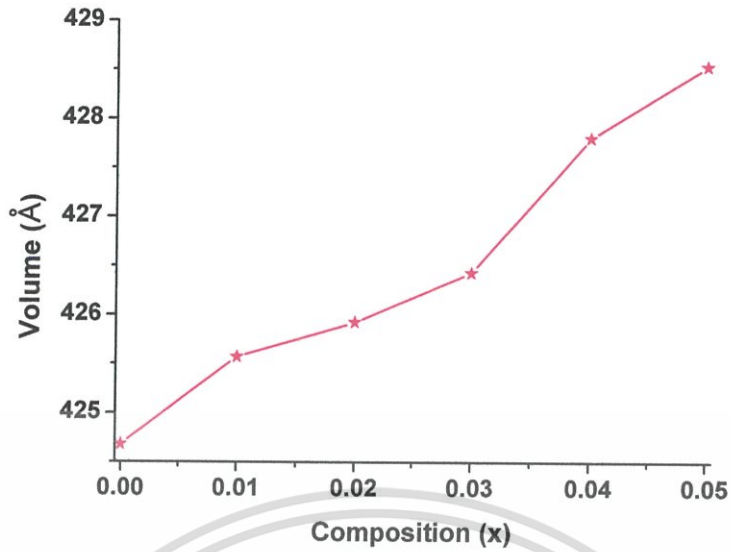
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Lattice Constant (Å)				Volume (Å) <sup>3</sup>	Grain Size (nm)
	a	b	c	$\beta$		
0.00	7.309	7.546	7.701	90.978	424.677	111.74
0.01	7.309	7.556	7.707	90.970	425.572	80.98
0.02	7.314	7.557	7.707	90.930	425.924	74.18
0.03	7.320	7.557	7.710	91.021	426.428	64.43
0.04	7.332	7.567	7.712	91.021	427.803	58.46
0.05	7.337	7.577	7.712	91.026	428.538	52.54

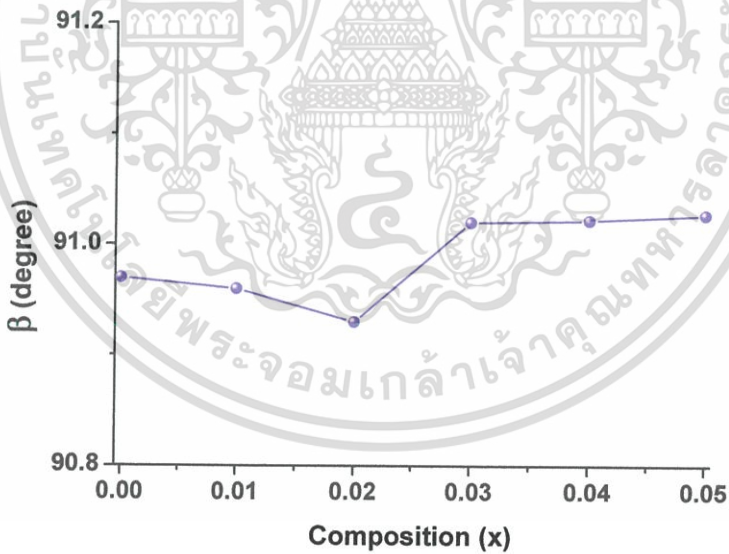


รูปที่ 4.2 แสดงค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



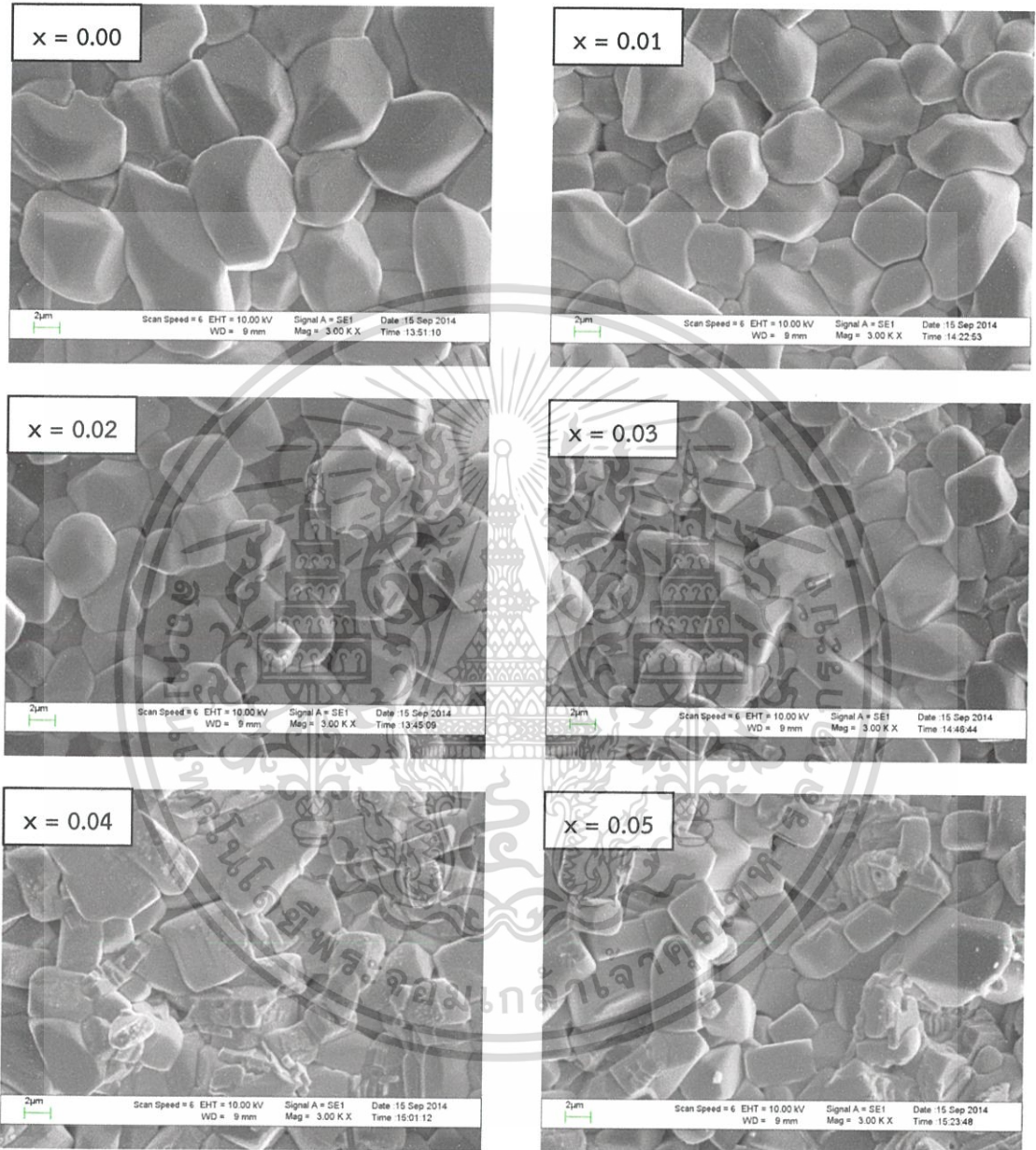
รูปที่ 4.3 แสดงปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุม  $\beta$  ของโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



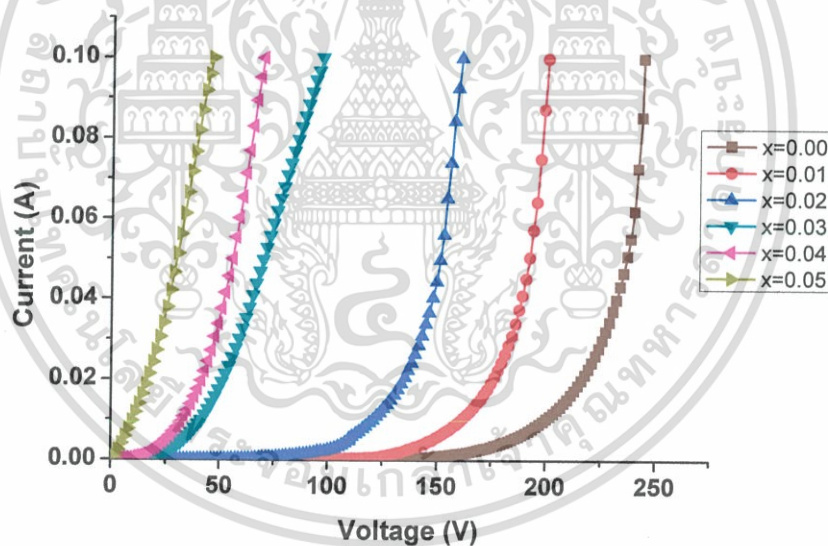
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

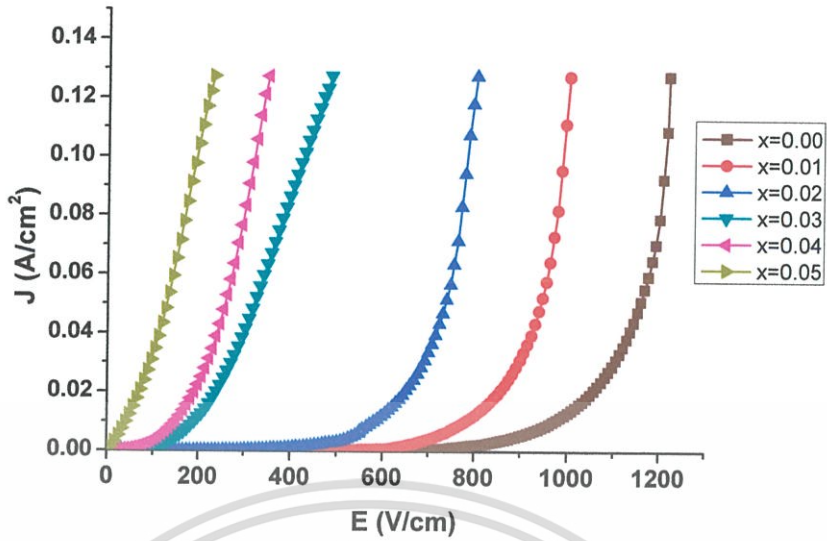
จากรูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือของอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีแนวโน้มเล็กลง เมื่อไม่มีการเจือด้วยสารประกอบ  $Sb_2O_3$  ผิวหน้าของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  จะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมล (x) มีค่าตั้งแต่ 0.03 ขึ้นไป เกรนจะมีรูปทรงเป็นแท่งสี่เหลี่ยม

#### 4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

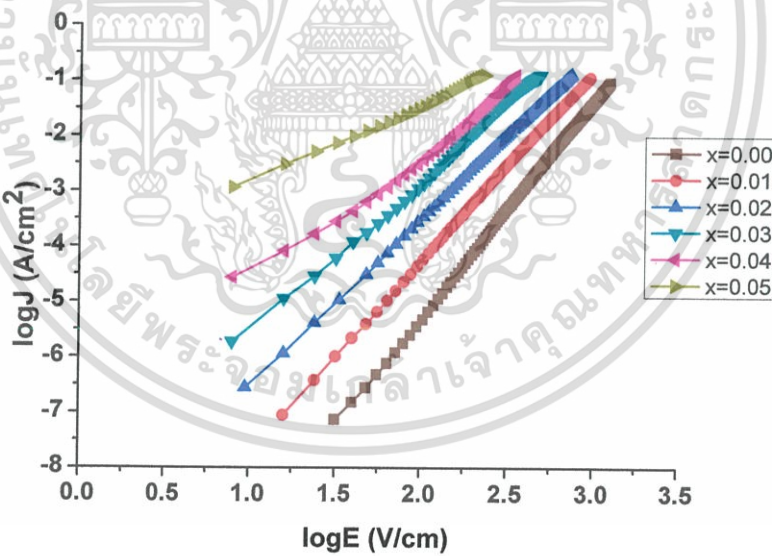
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแส กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

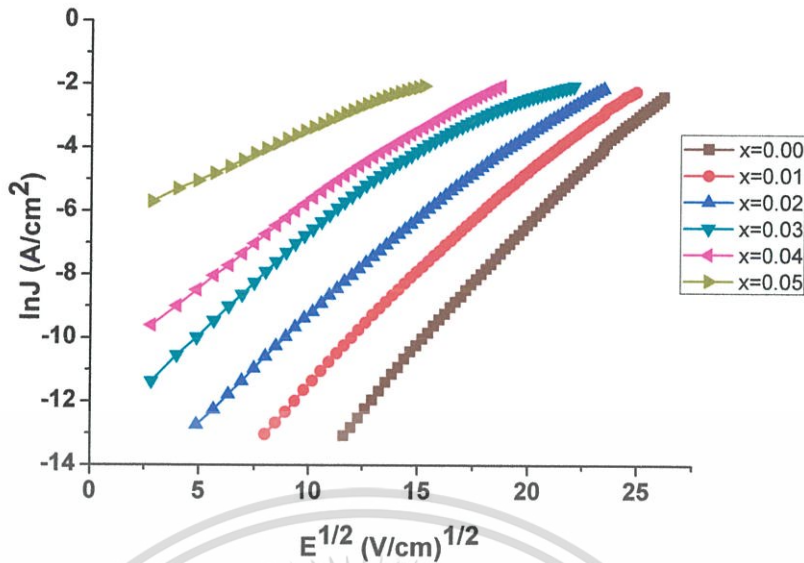


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ ค่าลอการิทึมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

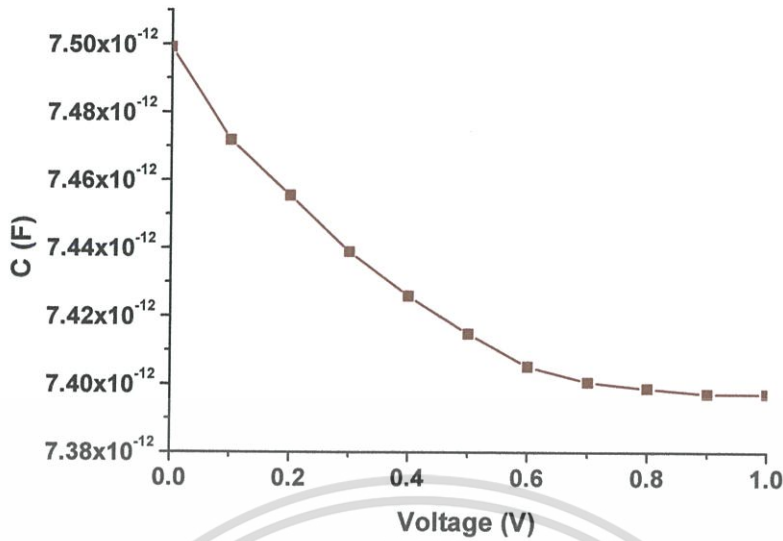


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า กับ รากที่สองของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

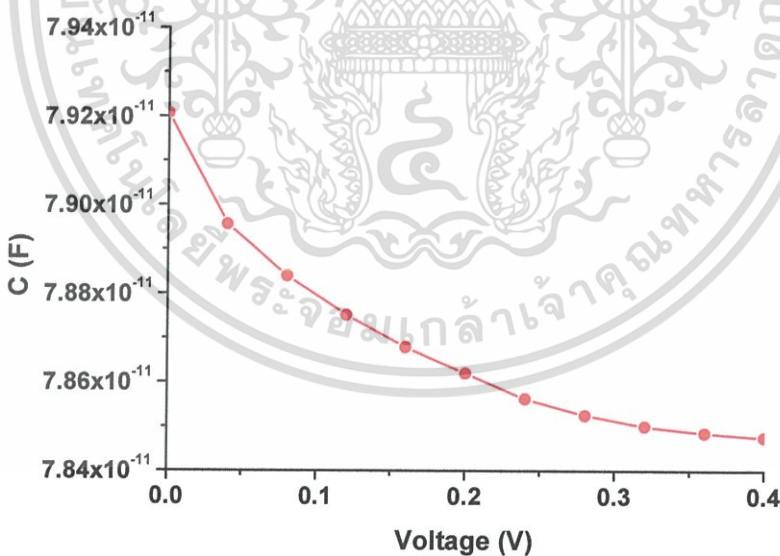
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	$E_b$ (V/cm)	$\sigma_0$ (S/cm)	$\alpha$	$I_L$ (mA)	$\phi_b$ (eV)	$\beta$ ( $V^{1/2} cm^{1/2}$ )
0.00	747.59	$4.76 \times 10^{-8}$	3.94	598.10	0.569	$18.90 \times 10^{-3}$
0.01	627.85	$3.56 \times 10^{-8}$	3.41	502.28	0.492	$16.30 \times 10^{-3}$
0.02	398.55	$3.08 \times 10^{-8}$	2.97	311.64	0.414	$14.60 \times 10^{-3}$
0.03	95.40	$1.86 \times 10^{-6}$	2.68	76.32	0.336	$12.60 \times 10^{-3}$
0.04	63.60	$5.44 \times 10^{-6}$	2.40	50.88	0.285	$12.10 \times 10^{-3}$
0.05	7.95	$2.40 \times 10^{-4}$	1.41	6.36	0.181	$8.71 \times 10^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

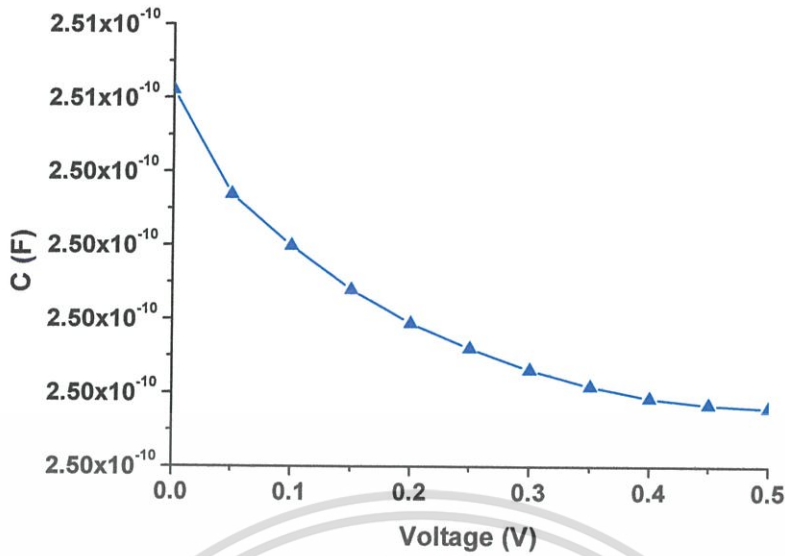


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

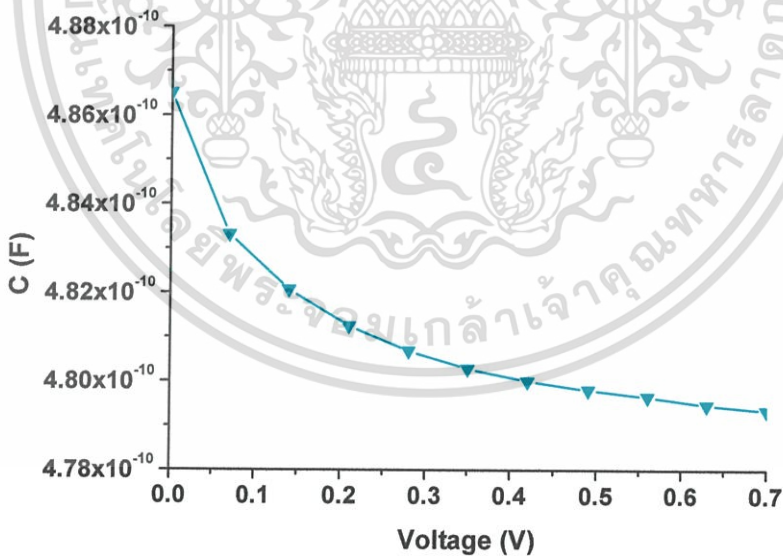


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

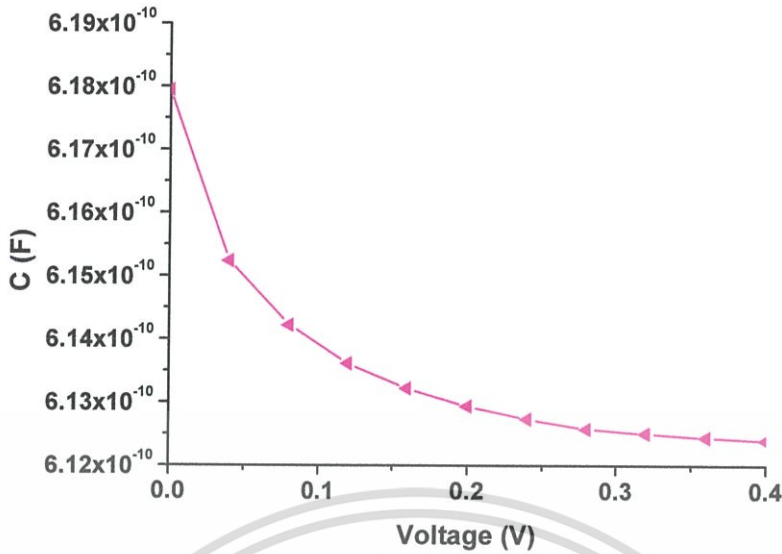


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

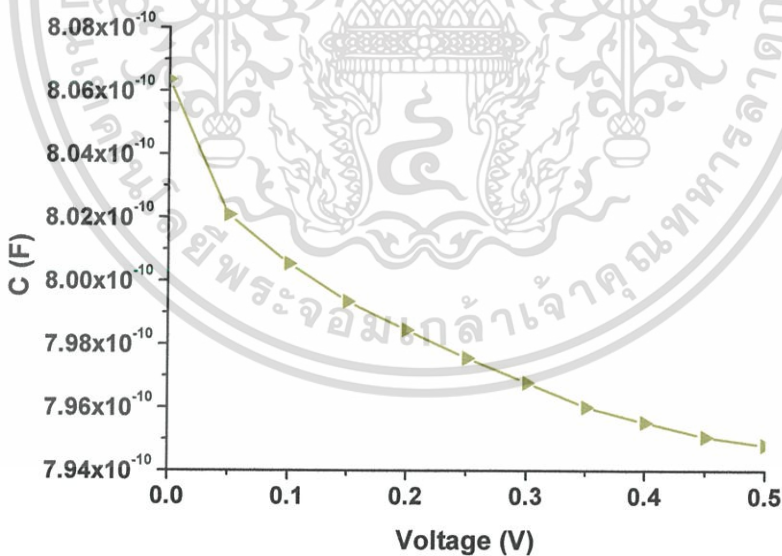


รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

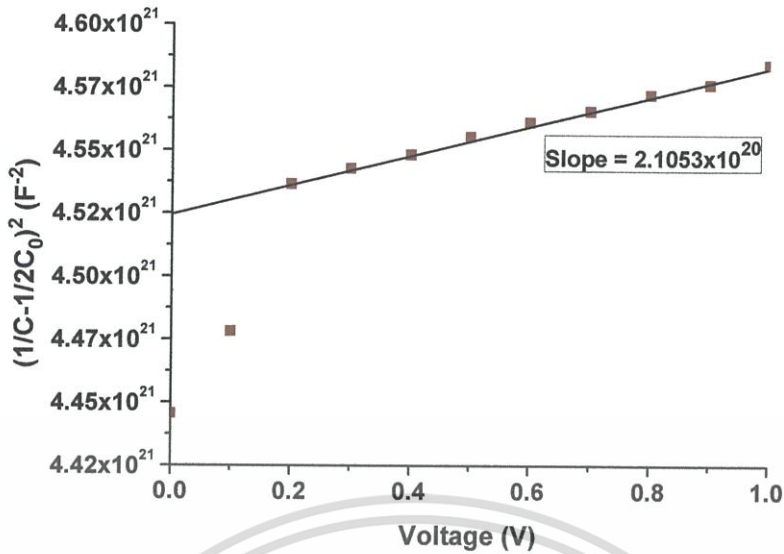


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

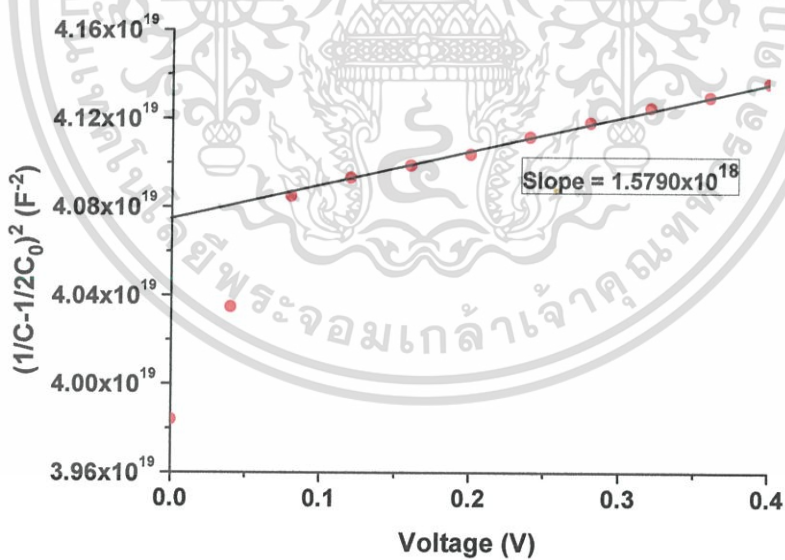


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

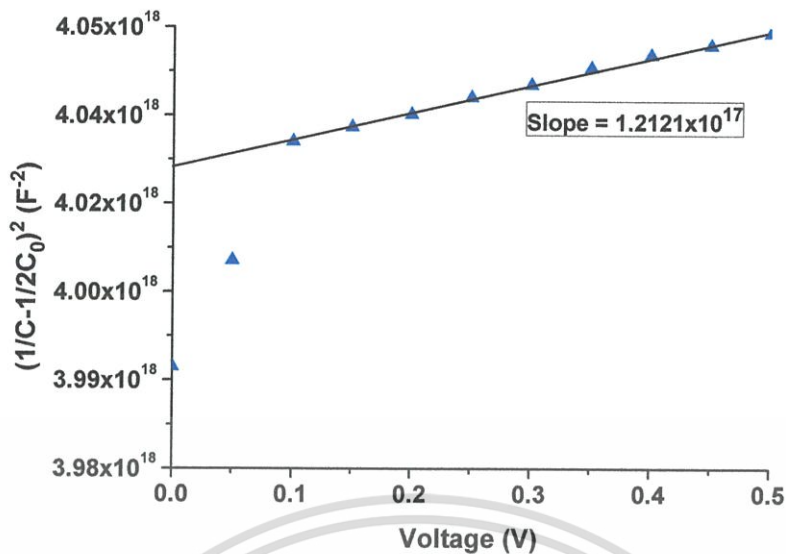


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

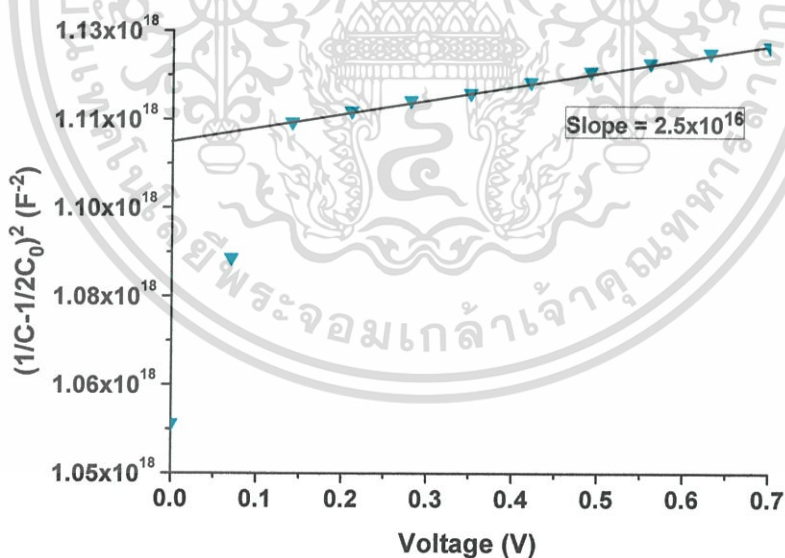


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

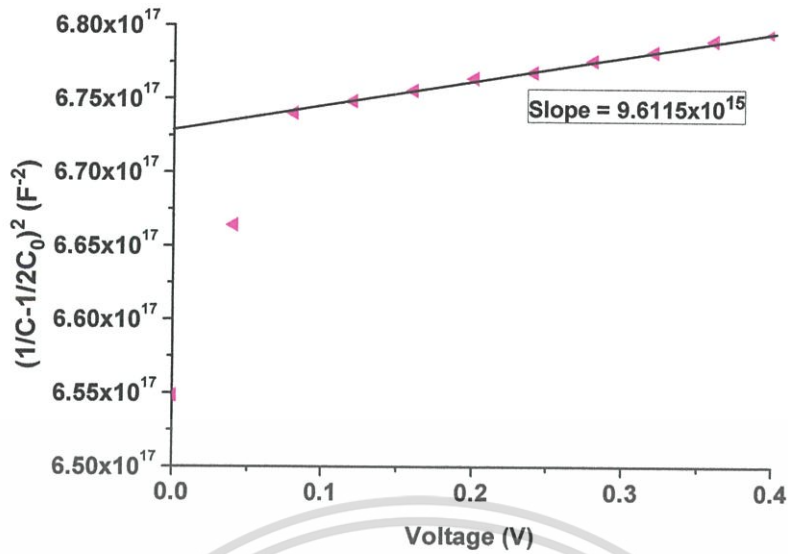


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

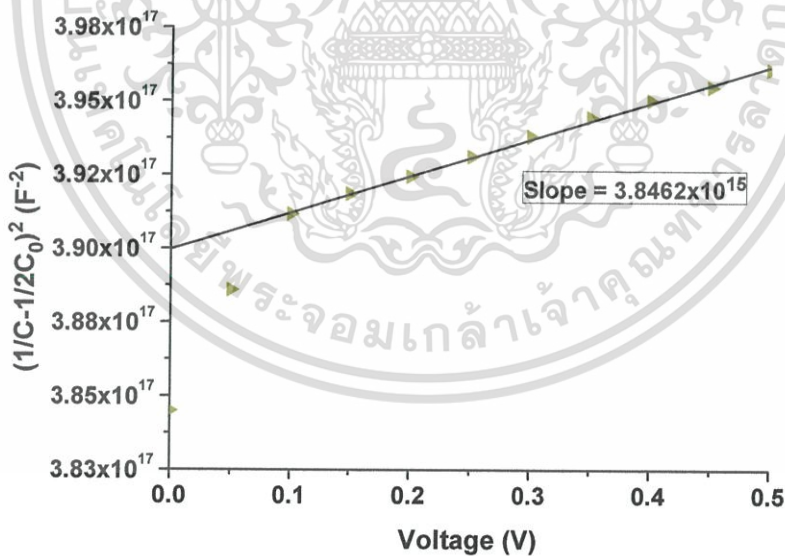


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(1/C - 1/2C_0)^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ของเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

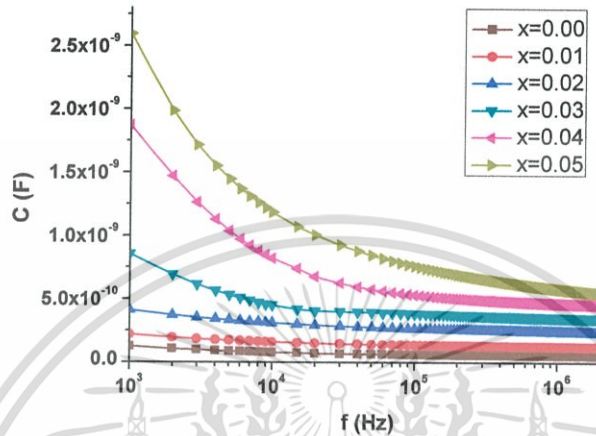
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการ เกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	$\phi_b$ (eV)	$N_d$ ( $cm^{-3}$ )	$N_t$ ( $cm^{-2}$ )	d ( $\mu m$ )	n
0.00	0.0759	$1.36 \times 10^{12}$	$5.03 \times 10^9$	7.2	277.78
0.01	0.0902	$9.05 \times 10^{13}$	$6.43 \times 10^{10}$	7.0	285.71
0.02	0.1123	$6.25 \times 10^{14}$	$2.63 \times 10^{11}$	6.8	294.12
0.03	0.1458	$2.14 \times 10^{15}$	$6.69 \times 10^{11}$	6.6	303.03
0.04	0.1614	$4.38 \times 10^{15}$	$1.36 \times 10^{12}$	4.6	434.78
0.05	0.2094	$8.54 \times 10^{15}$	$2.59 \times 10^{12}$	4.1	487.80

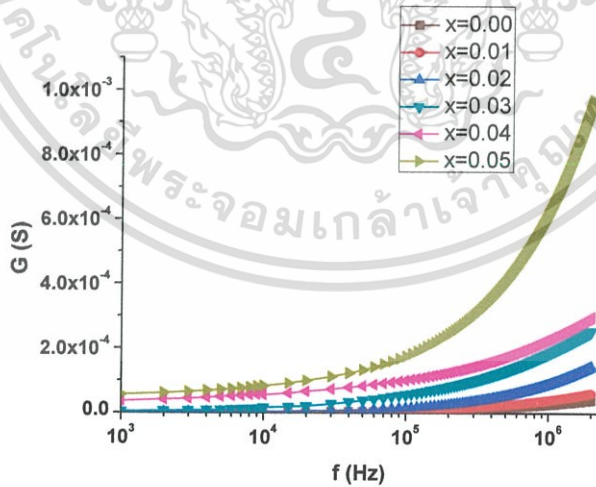


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

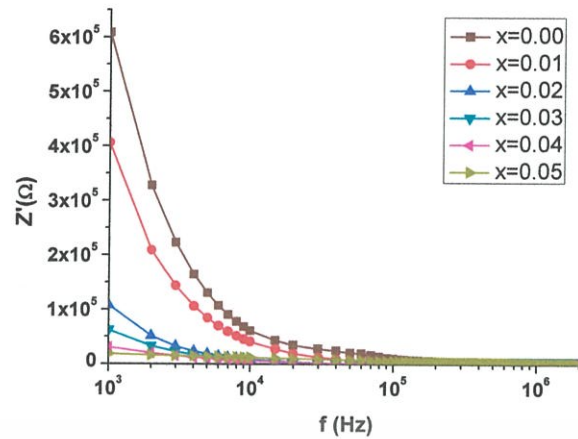


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

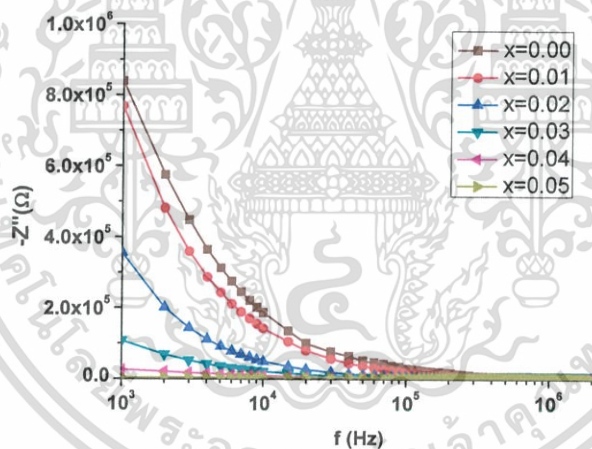


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

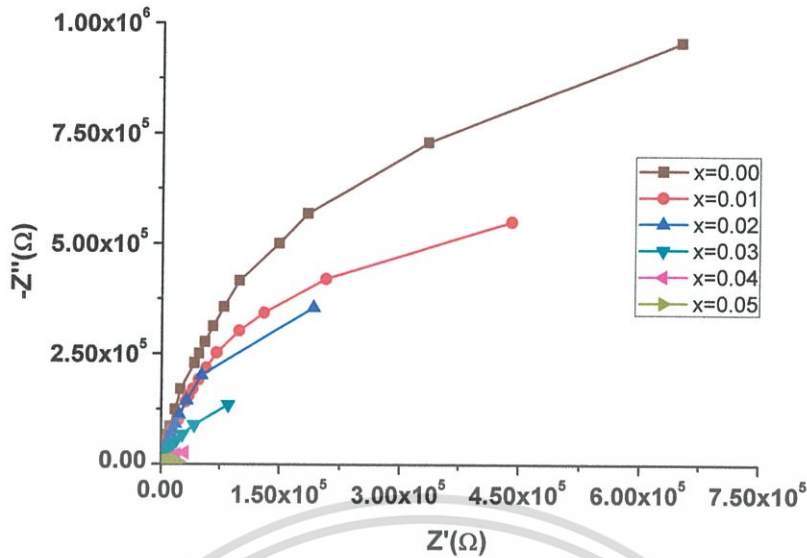


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ด เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผง ผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

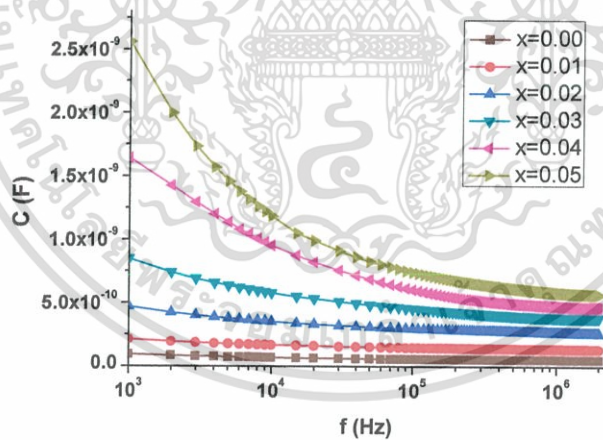


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ด เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผง ผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

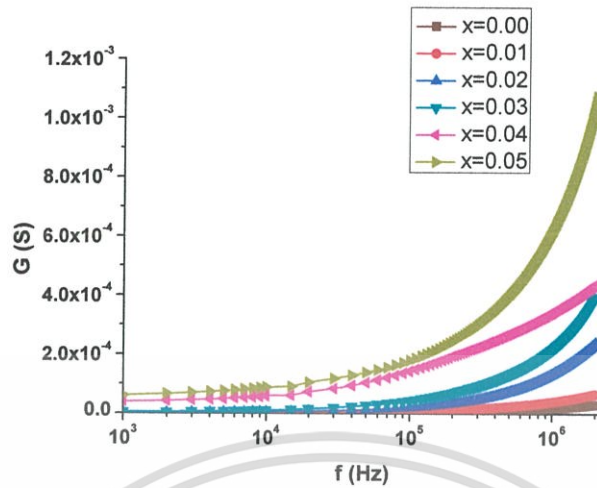


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

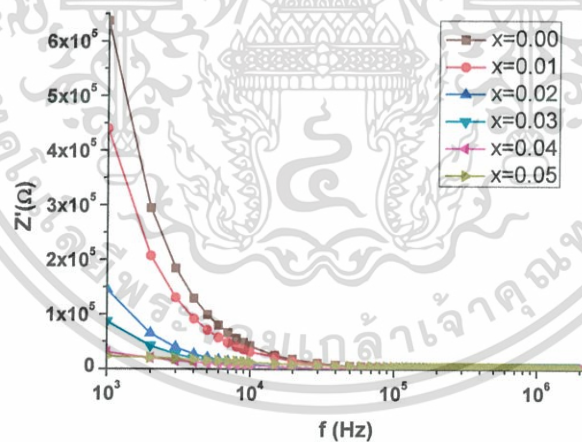


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

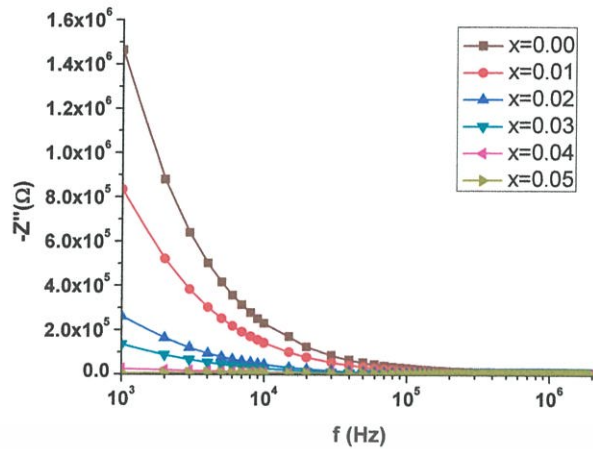


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

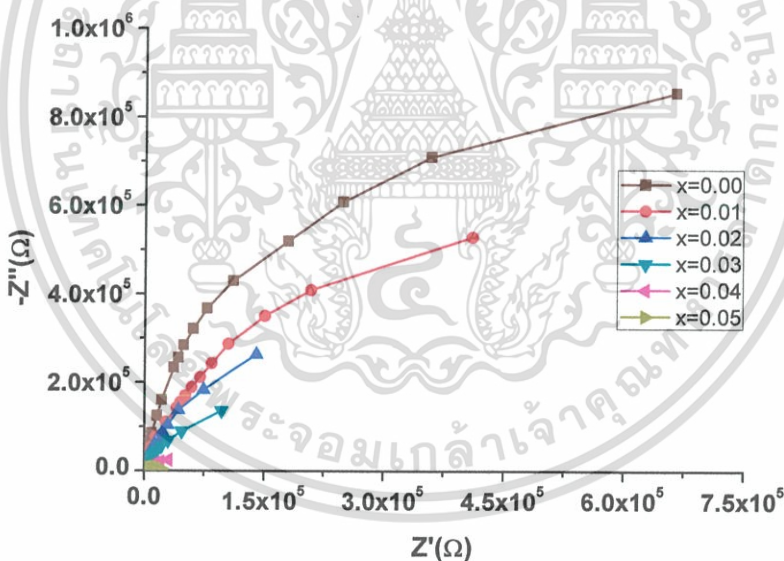


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

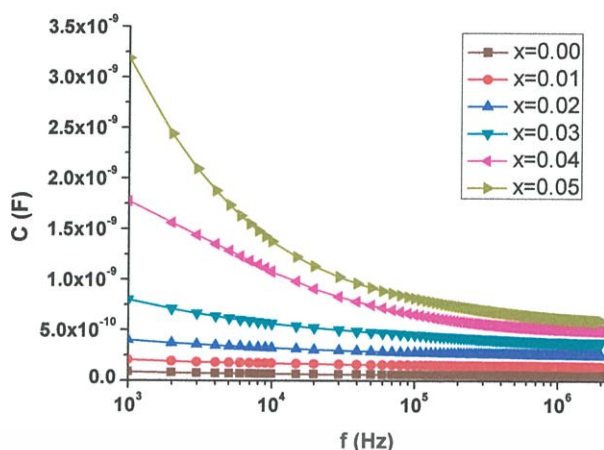


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

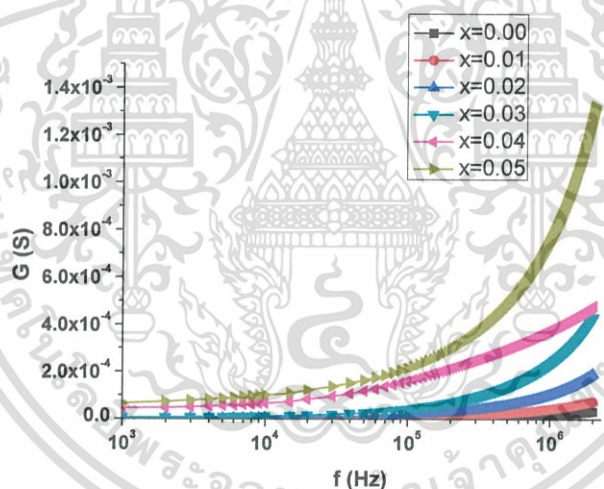


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

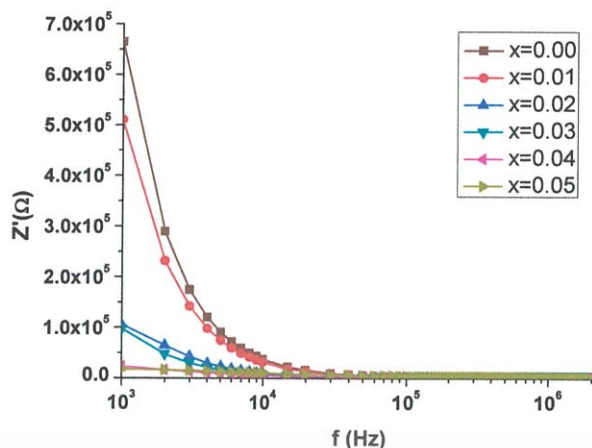


รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

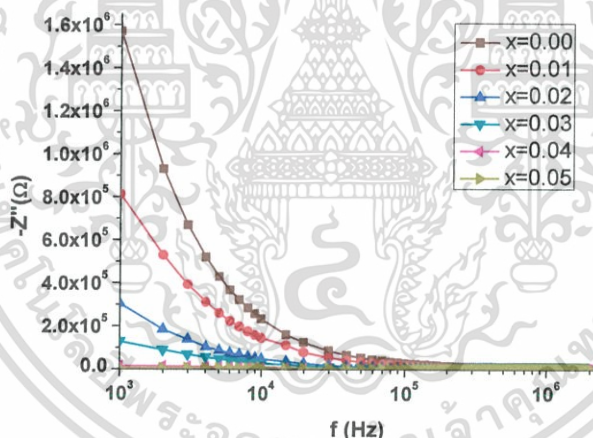


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

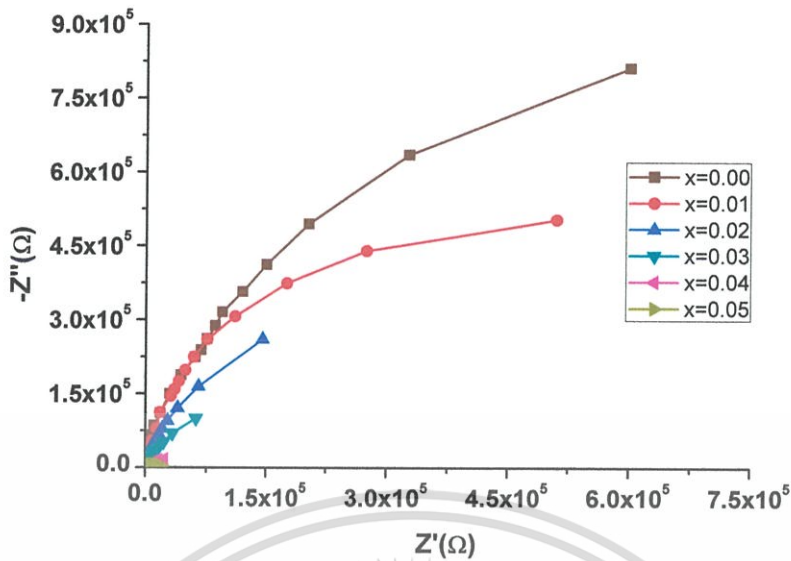


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

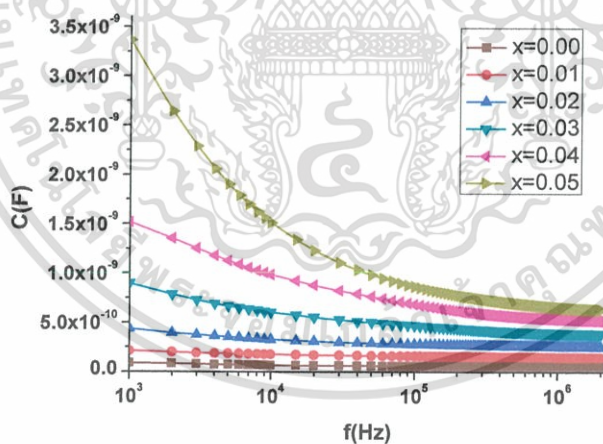


รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

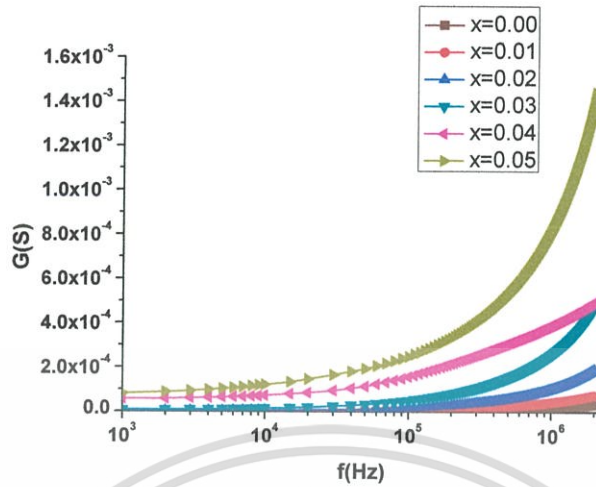


รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

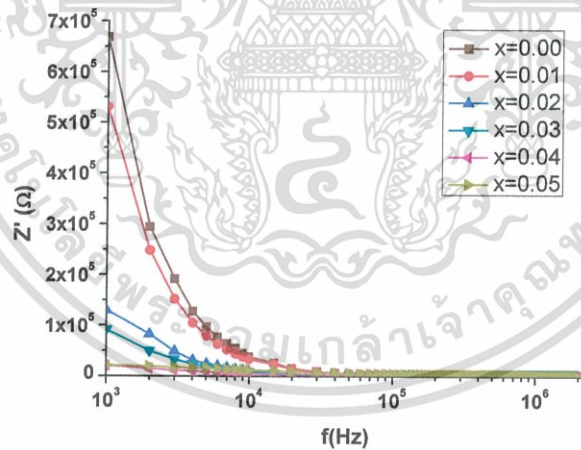


รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

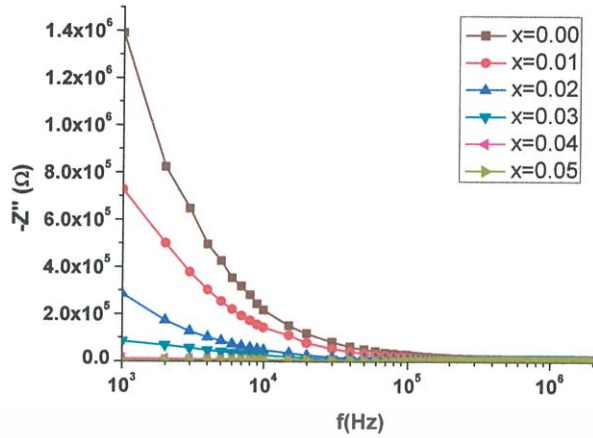


รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

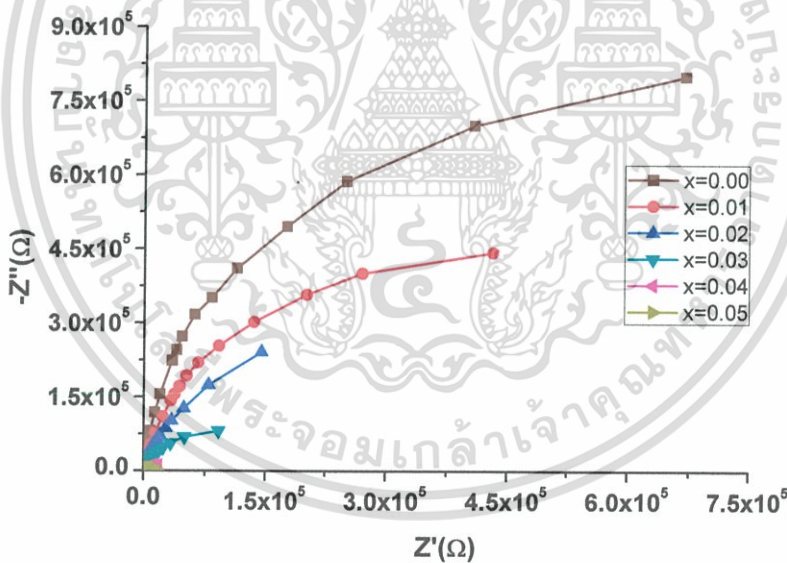


รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

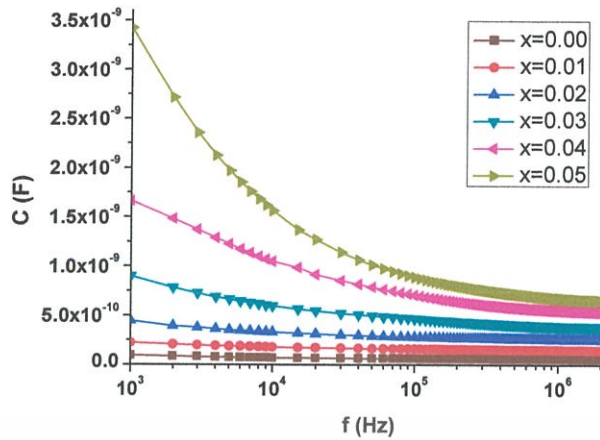


รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

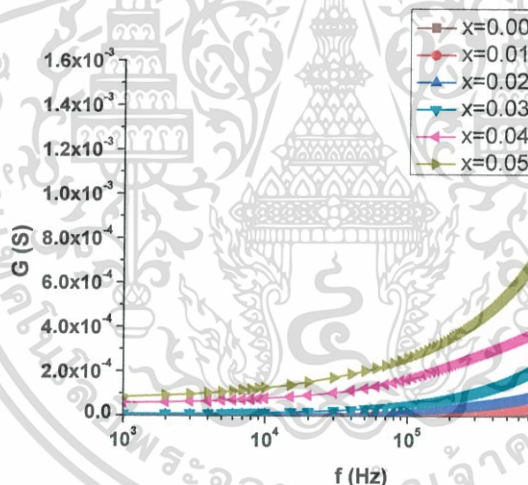


รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

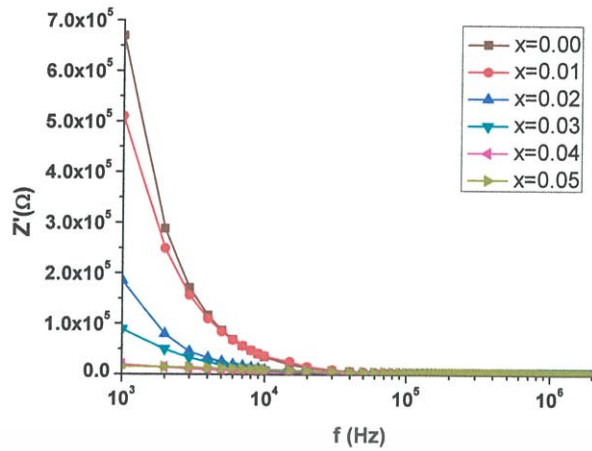


รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

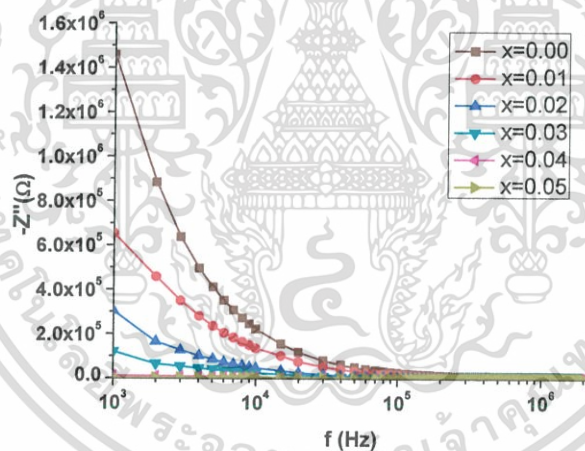


รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

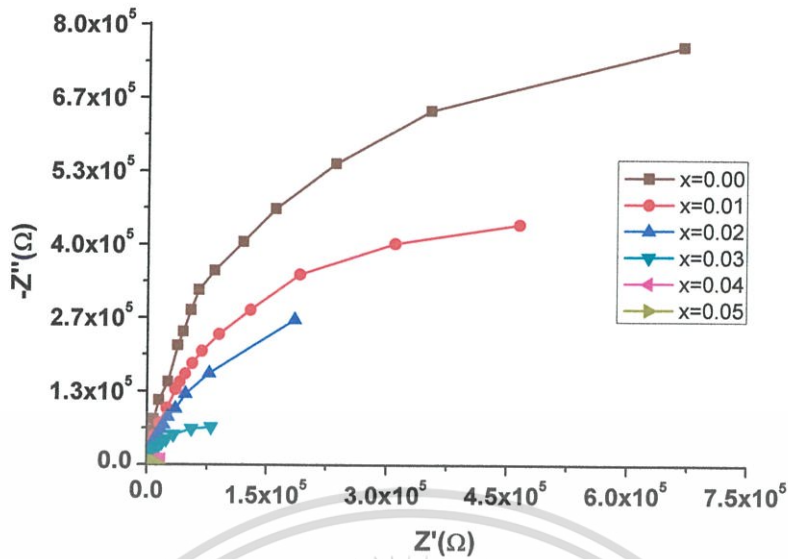


รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

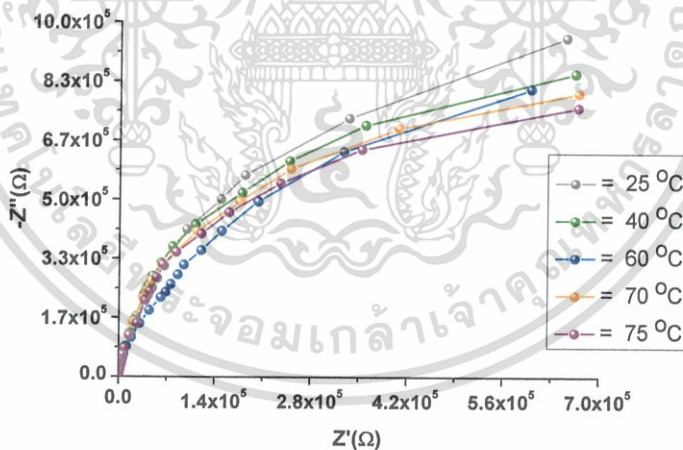


รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

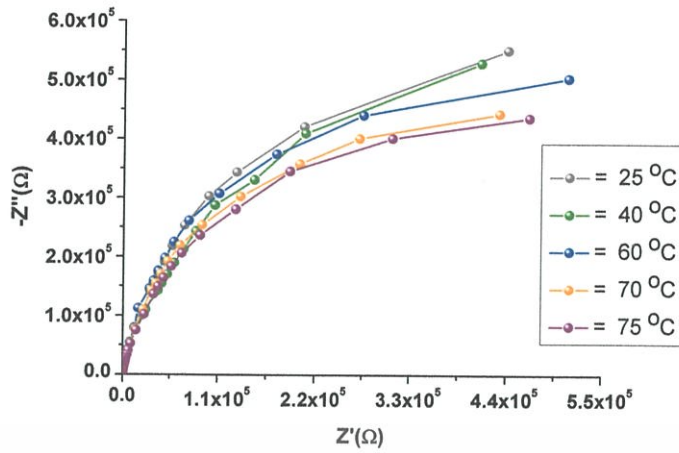


รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

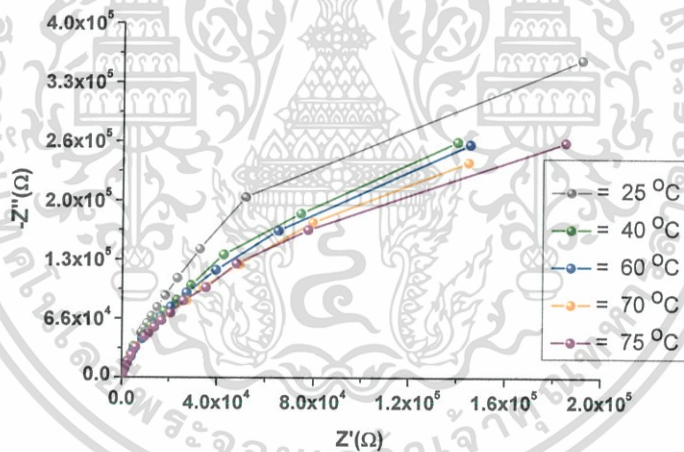


รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

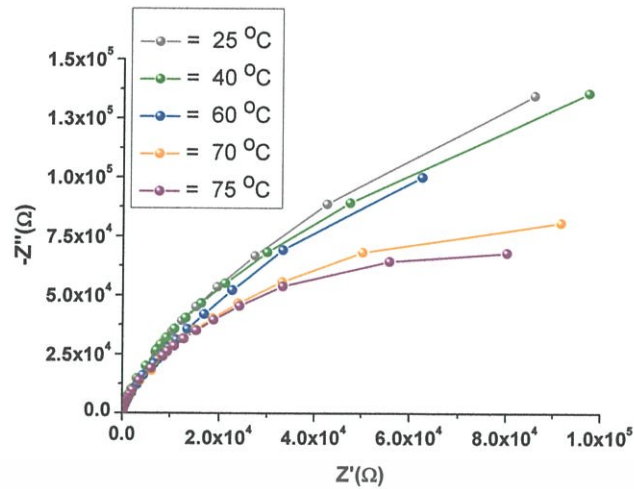


รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

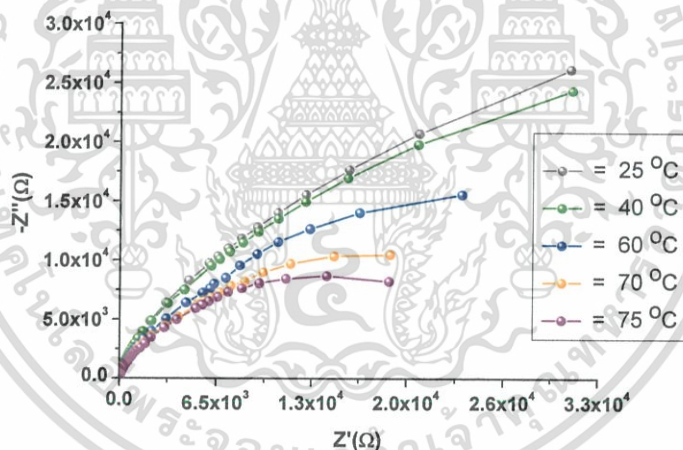


รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

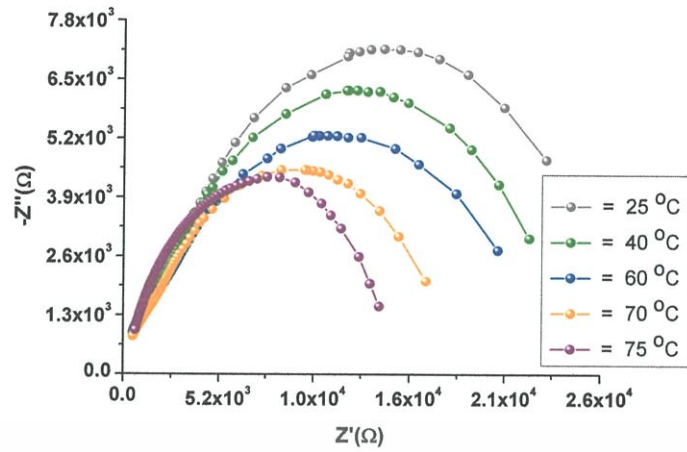


รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

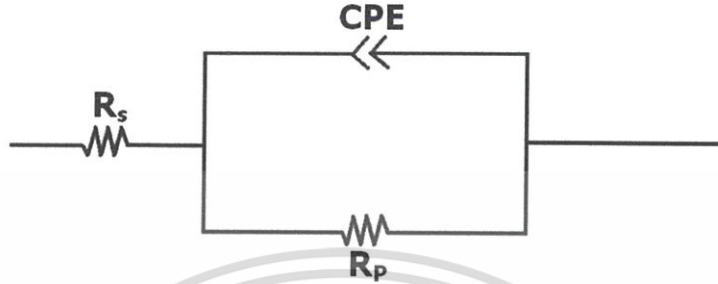


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

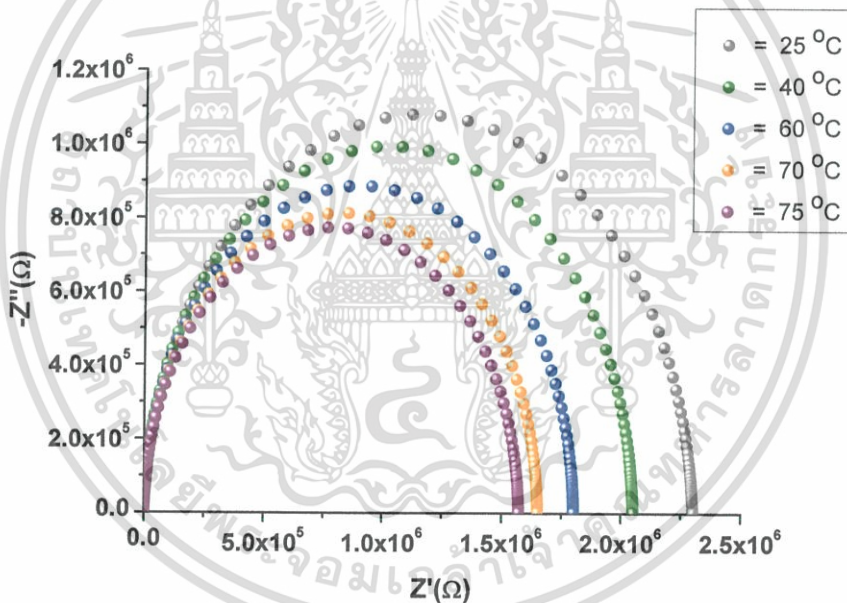


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

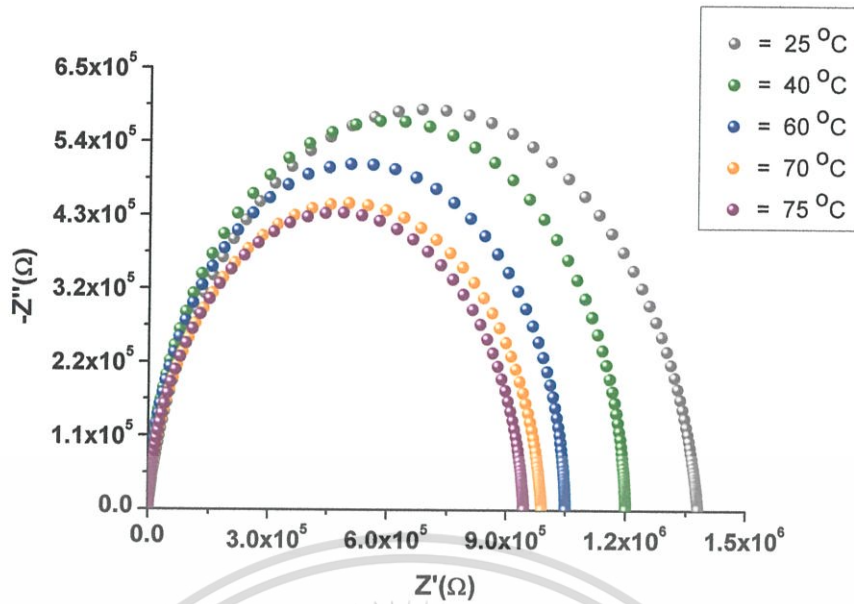


รูปที่ 4.53 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

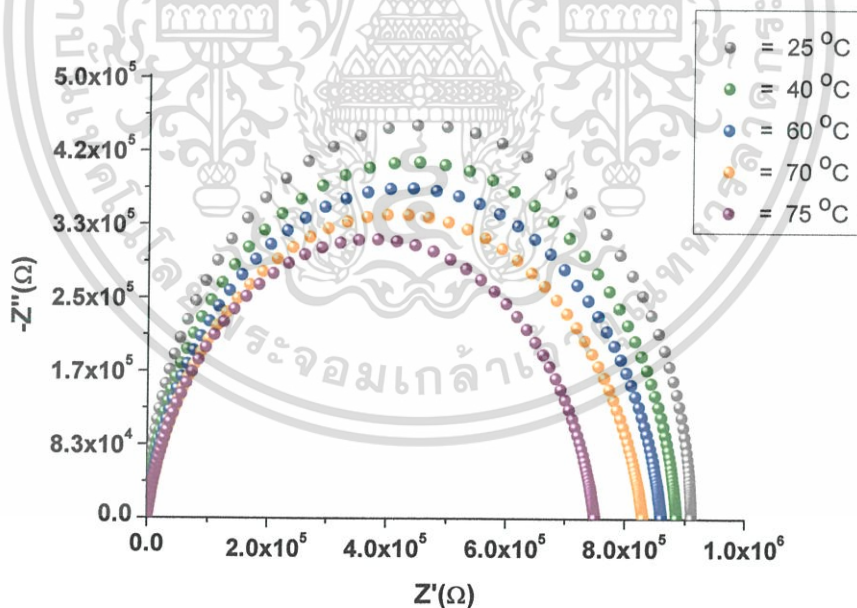


รูปที่ 4.54 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

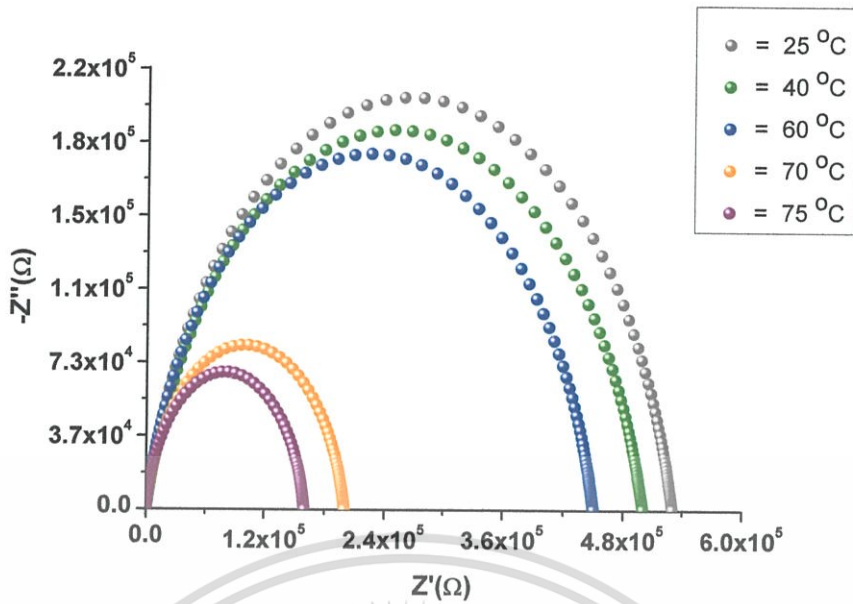


รูปที่ 4.55 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

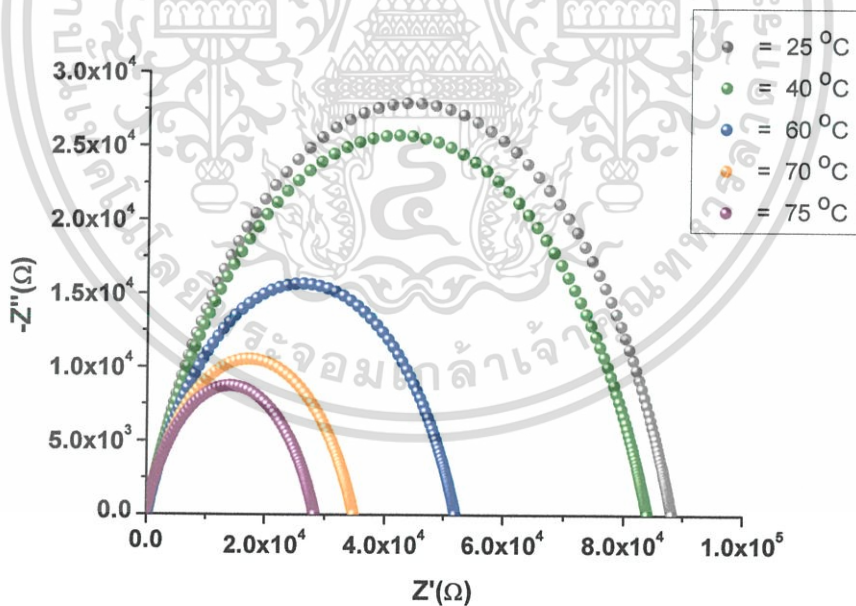


รูปที่ 4.56 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

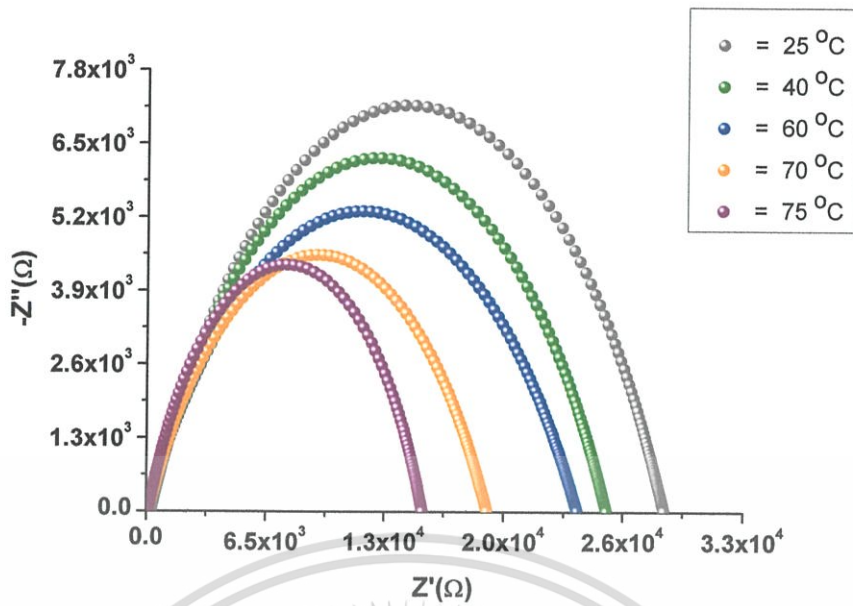


รูปที่ 4.57 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.58 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงการจำลองหา ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ด เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			C (F)	$\tau$ (s)	$f_{max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.00	CPE	R=150	$7.64 \times 10^{-9}$	$1.15 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^5$	$8.17 \times 10^5$	0.94
		P= $3.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.01	CPE	R=140	$9.00 \times 10^{-9}$	$1.26 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^5$	$8.49 \times 10^5$	1.07
		P= $3.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.02	CPE	R=130	$1.04 \times 10^{-8}$	$1.35 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^5$	$8.80 \times 10^5$	1.18
		P= $4.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.03	CPE	R=120	$1.17 \times 10^{-8}$	$1.40 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^5$	$9.11 \times 10^5$	1.28
		P= $4.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.04	CPE	R=110	$1.30 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^5$	$9.43 \times 10^5$	1.35
		P= $5.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.05	CPE	R=100	$1.43 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^5$	$9.74 \times 10^5$	1.40
		P= $5.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			C (F)	$\tau$ (s)	$f_{max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.00	CPE	R=145	$9.03 \times 10^{-9}$	$1.31 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^5$	$8.49 \times 10^5$	1.11
		P= $3.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.01	CPE	R=135	$1.04 \times 10^{-8}$	$1.40 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^5$	$8.80 \times 10^5$	1.23
		P= $4.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.02	CPE	R=125	$1.17 \times 10^{-8}$	$1.47 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^5$	$9.11 \times 10^5$	1.34
		P= $4.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.03	CPE	R=115	$1.31 \times 10^{-8}$	$1.50 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^5$	$9.43 \times 10^5$	1.42
		P= $5.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.04	CPE	R=105	$1.44 \times 10^{-8}$	$1.51 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^5$	$9.74 \times 10^5$	1.47
		P= $5.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.05	CPE	R=95	$1.57 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^5$	$1.01 \times 10^6$	1.50
		P= $6.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			C (F)	$\tau$ (s)	$f_{max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.00	CPE	R=140	$1.04 \times 10^{-8}$	$1.46 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^5$	$8.80 \times 10^5$	1.29
		P= $4.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.01	CPE	R=130	$1.18 \times 10^{-8}$	$1.53 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^5$	$9.11 \times 10^5$	1.40
		P= $4.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.02	CPE	R=120	$1.31 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^5$	$9.43 \times 10^5$	1.49
		P= $5.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.03	CPE	R=110	$1.45 \times 10^{-8}$	$1.59 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^5$	$9.74 \times 10^5$	1.55
		P= $5.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.04	CPE	R=100	$1.58 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^5$	$1.01 \times 10^6$	1.59
		P= $6.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.05	CPE	R=90	$1.70 \times 10^{-8}$	$1.53 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^5$	$1.04 \times 10^6$	1.59
		P= $6.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			C (F)	$\tau$ (s)	$f_{\max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.00	CPE	R=135	$1.18 \times 10^{-8}$	$1.60 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^5$	$9.11 \times 10^5$	1.46
		P= $4.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.01	CPE	R=125	$1.32 \times 10^{-8}$	$1.65 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^5$	$9.43 \times 10^5$	1.56
		P= $5.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.02	CPE	R=115	$1.45 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^5$	$9.74 \times 10^5$	1.63
		P= $5.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.03	CPE	R=105	$1.59 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^5$	$1.01 \times 10^6$	1.67
		P= $6.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.04	CPE	R=95	$1.71 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^5$	$1.04 \times 10^6$	1.69
		P= $6.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.05	CPE	R=85	$1.84 \times 10^{-8}$	$1.56 \times 10^{-6}$	$1.70 \times 10^5$	$1.07 \times 10^6$	1.67
		P= $7.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษา ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			C (F)	$\tau$ (s)	$f_{max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.00	CPE	R=130	$1.33 \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-6}$	$1.49 \times 10^5$	$9.37 \times 10^5$	1.61
		P= $5.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.01	CPE	R=120	$1.46 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-6}$	$1.54 \times 10^5$	$9.68 \times 10^5$	1.70
		P= $5.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.02	CPE	R=110	$1.59 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-6}$	$1.59 \times 10^5$	$9.99 \times 10^5$	1.75
		P= $6.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.03	CPE	R=100	$1.72 \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^5$	$1.03 \times 10^6$	1.78
		P= $6.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.04	CPE	R=90	$1.85 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^5$	$1.06 \times 10^6$	1.77
		P= $7.0 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					
0.05	CPE	R=80	$1.97 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.74 \times 10^5$	$1.09 \times 10^6$	1.73
		P= $7.5 \times 10^{-8}$					
		n=0.9					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$$

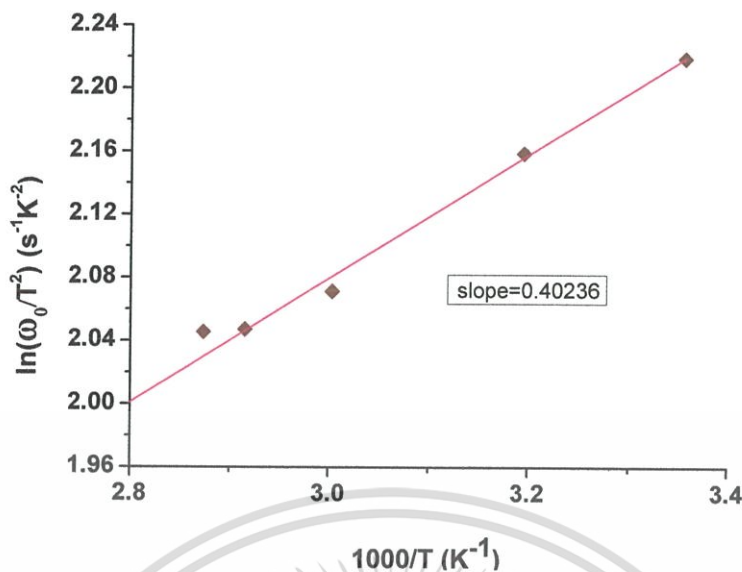
$$\ln(\omega_0 / T^2) = \left(\frac{-E_a}{1000}\right)\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \xi_0$$

ความชัน คือ  $\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$  ซึ่งจะสามารถนำไปหาค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$

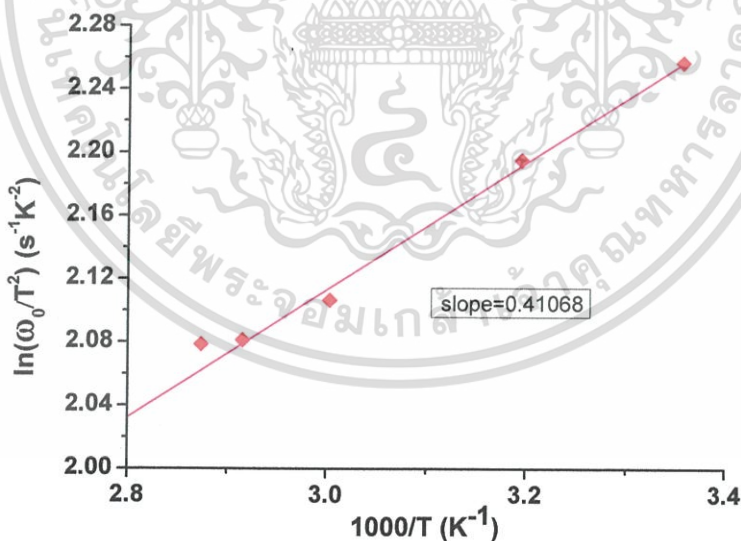
ได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}} \\ &= (0.086)(0.40236) \\ &= 0.035 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

ซึ่งค่าความถี่เฉพาะ  $\omega_0$  นี้จะสอดคล้องกับความถี่ที่พิกของกราฟสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจลนภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  มีค่าเท่ากับ 0.035 อิเล็กตรอนโวลต์ จากจุดตัดแกน y จะได้ค่า  $\xi_0$  มีค่าเท่ากับ 7.39 ต่อวินาทีต่อเคลวินยกกำลังสอง ซึ่งค่า  $\xi_0$  นี้คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับพารามิเตอร์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 4.9

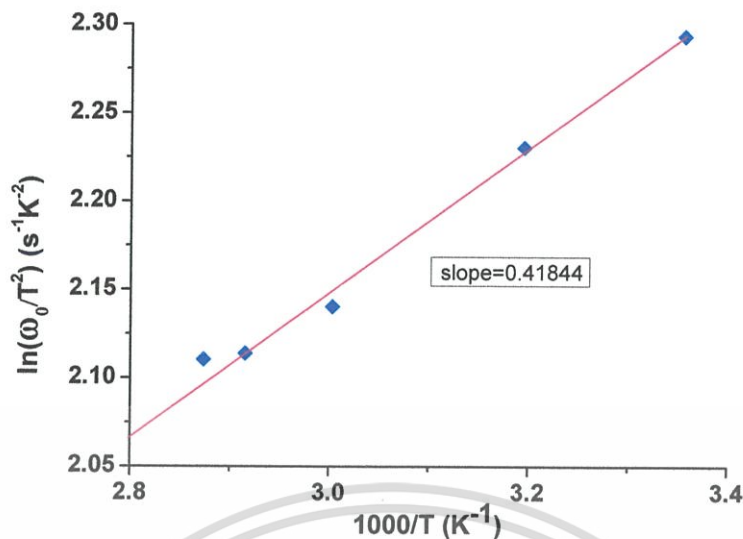


รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.00$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

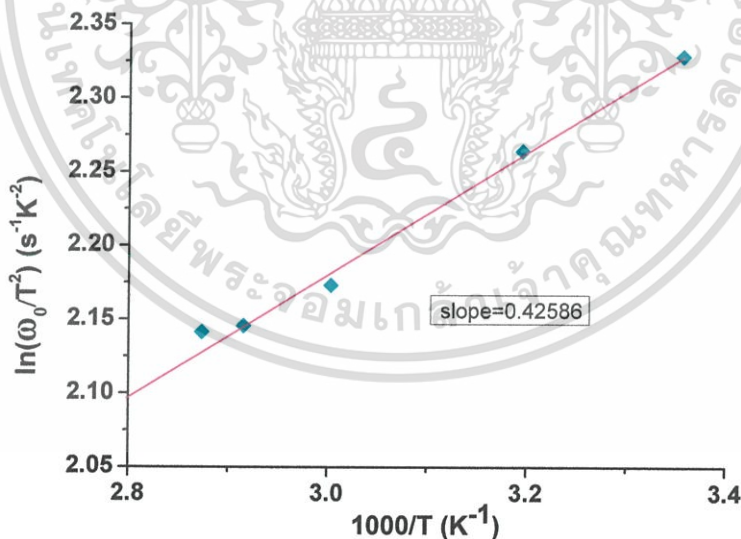


รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.01$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

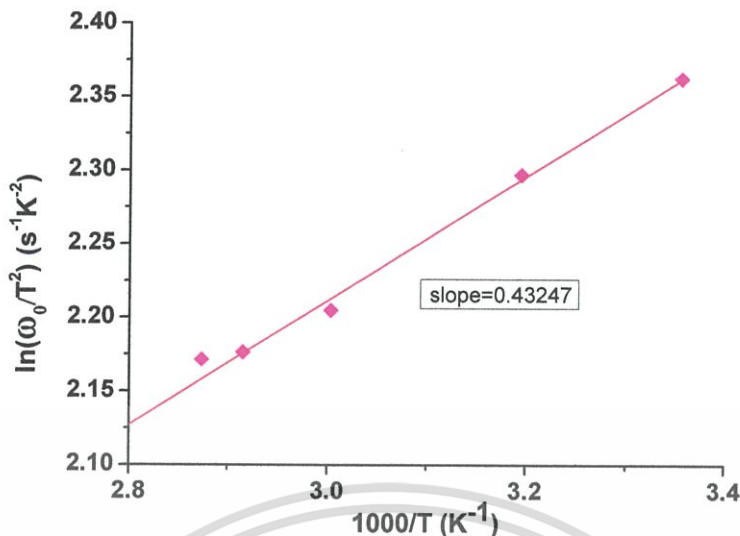


รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.02$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

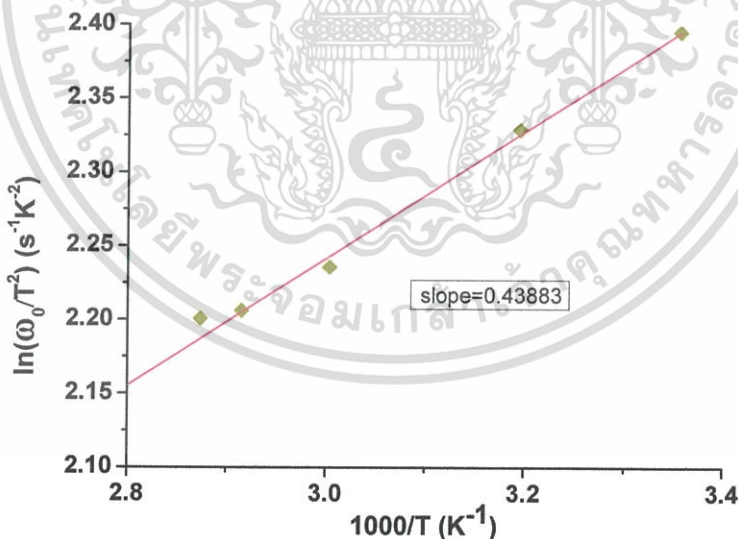


รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.03$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.04$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $x = 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอน ออกจากกับดักประจุ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	T (°C)	$\omega_0$ (rad/s)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ ( $s^{-1}K^{-2}$ )
0.00	25	$8.17 \times 10^5$	0.035	7.39
	40	$8.49 \times 10^5$		
	60	$8.80 \times 10^5$		
	70	$9.11 \times 10^5$		
	75	$9.37 \times 10^5$		
0.01	25	$8.49 \times 10^5$	0.035	7.61
	40	$8.80 \times 10^5$		
	60	$9.11 \times 10^5$		
	70	$9.43 \times 10^5$		
	75	$9.68 \times 10^5$		
0.02	25	$8.80 \times 10^5$	0.036	7.93
	40	$9.11 \times 10^5$		
	60	$9.43 \times 10^5$		
	70	$9.74 \times 10^5$		
	75	$9.99 \times 10^5$		
0.03	25	$9.11 \times 10^5$	0.037	8.13
	40	$9.43 \times 10^5$		
	60	$9.74 \times 10^5$		
	70	$1.01 \times 10^6$		
	75	$1.03 \times 10^6$		
0.04	25	$9.43 \times 10^5$	0.037	8.37
	40	$9.74 \times 10^5$		
	60	$1.01 \times 10^6$		
	70	$1.04 \times 10^6$		
	75	$1.06 \times 10^6$		
0.05	25	$9.74 \times 10^5$	0.038	8.63
	40	$1.01 \times 10^6$		
	60	$1.04 \times 10^6$		
	70	$1.07 \times 10^6$		
	75	$1.09 \times 10^6$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

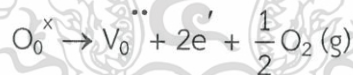
4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติของ ความหนาแน่นของกระแส กับ สนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่ เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) มีพื้นที่หน้าตัดเป็น  $A$  มีความหนา  $l$  มีความต้านทาน  $R$  และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

โดยที่  $R$  คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า และ สภาพต้านทานไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) เพิ่มขึ้นดังปรากฏในตารางที่ 4.10 จากการทดลองพบว่าชนิดการนำไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  เป็นชนิดเอ็น (n-type) แสดงว่าพาหะข้างมากคืออิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมของธาตุ Sb ที่แทรกเข้าไปอยู่ในที่ว่างระหว่างอะตอมที่อยู่ภายในในโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  ดังความสัมพันธ์



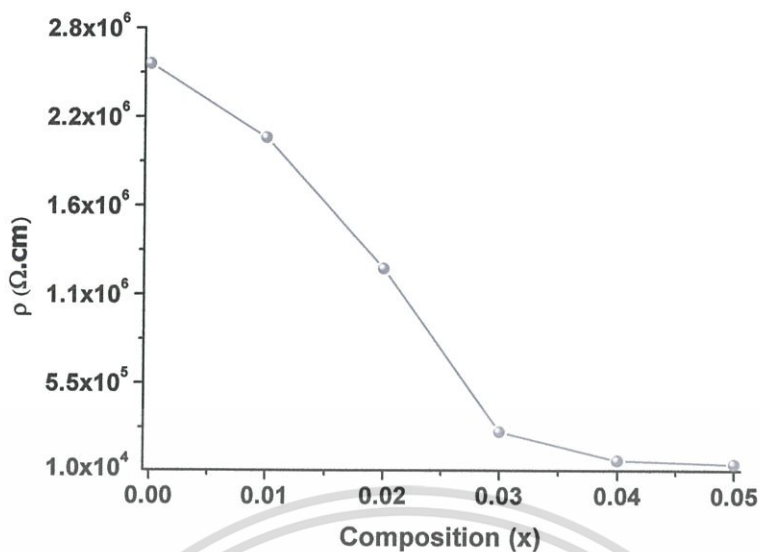
หรืออิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มขึ้นมาจากการเกิดแวนเดินซีของออกซิเจนในโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $WO_3$  ดังความสัมพันธ์



ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

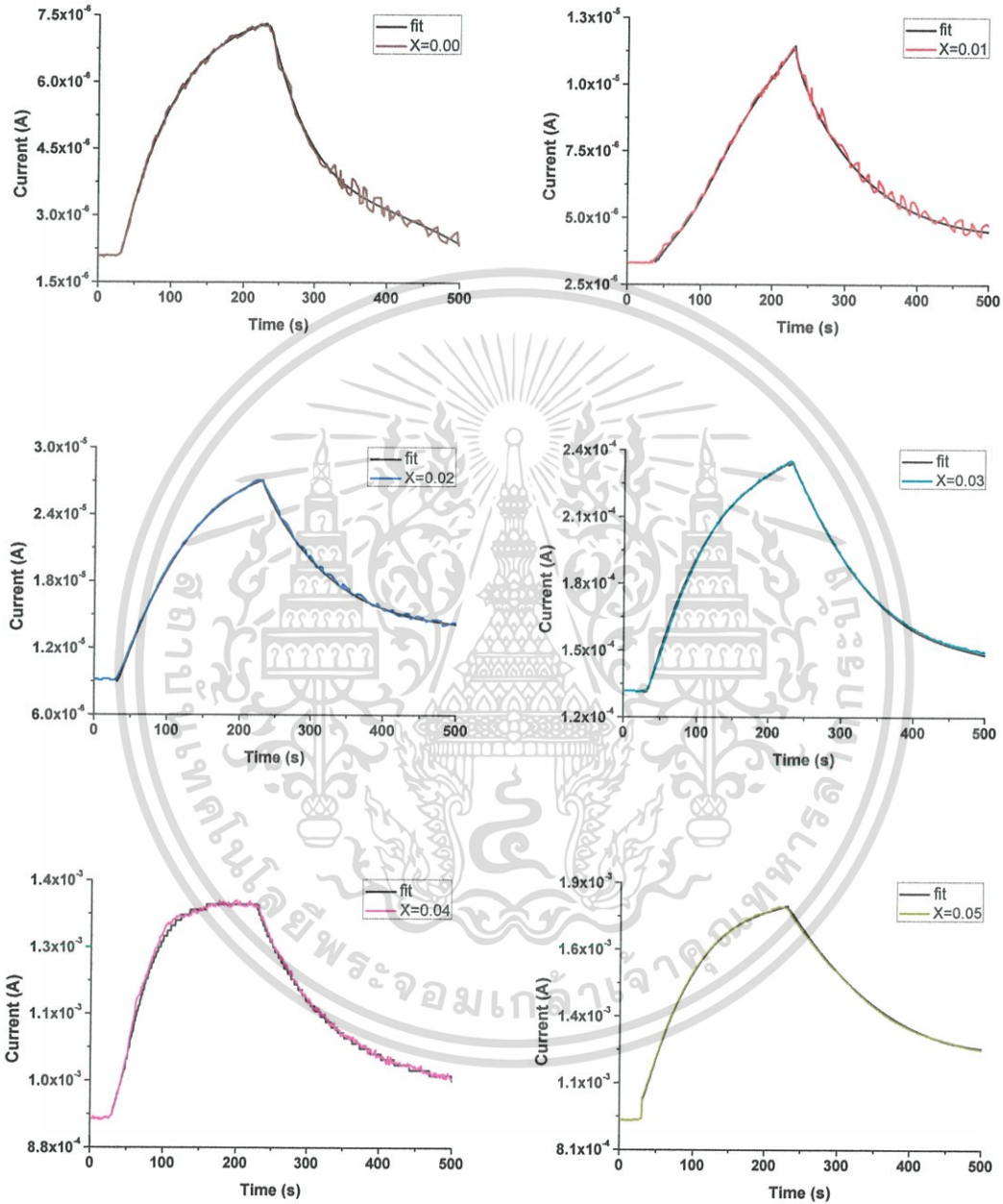
Composition (x)	Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
0.00	$2.53 \times 10^6$
0.01	$2.07 \times 10^6$
0.02	$1.26 \times 10^6$
0.03	$2.48 \times 10^5$
0.04	$7.04 \times 10^4$
0.05	$4.74 \times 10^4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



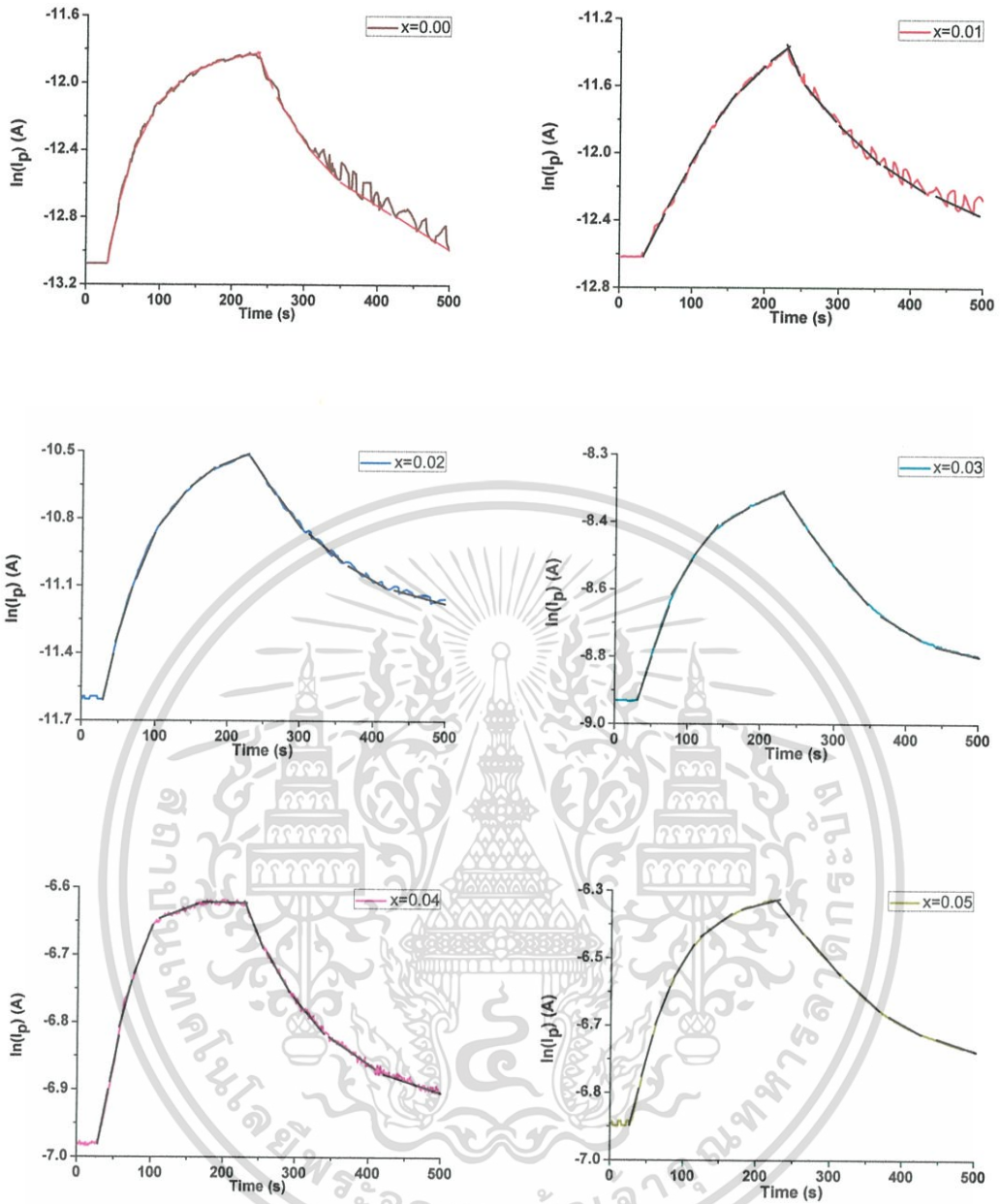
รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า กับ ปริมาณสารเจือของสารประกอบ  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{W}_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.3.5 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



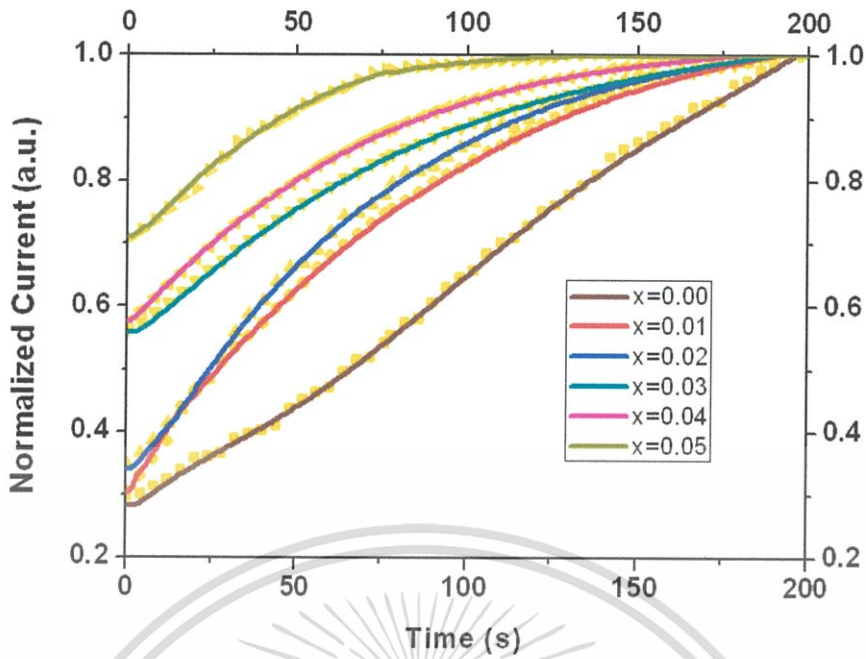
รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

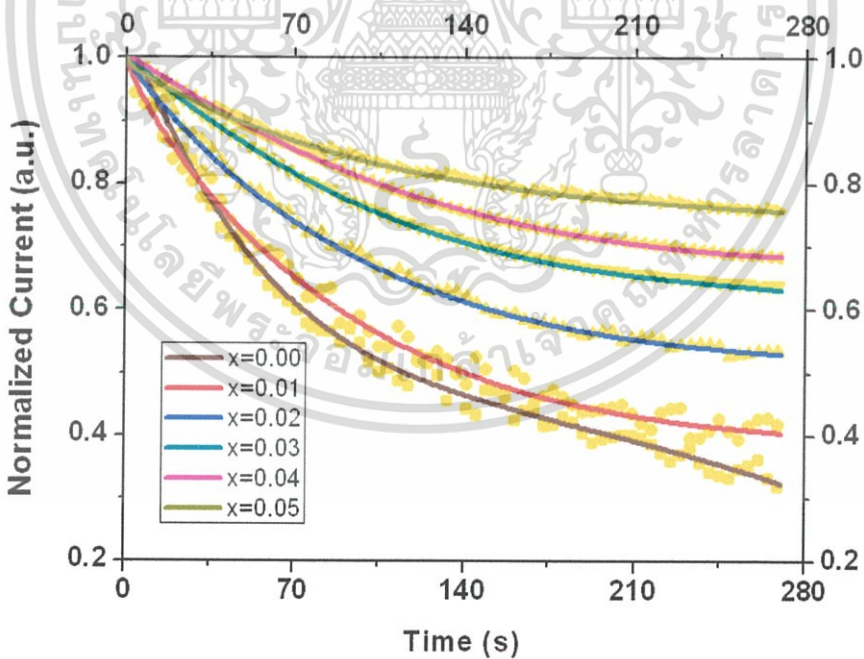


รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของกระแสไฟโต กับ เวลา ของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 แสดงการพิศกรรพควมสัมพันธ์ระหว่ง ค่ำกระแสนอร์มัลไลซ์ขำขึ้น กับ เวลขของเม็ดเซรำมิกของสรำกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจำกสรำตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยำการเกิดเป็นสรำละลายของแข็ง



รูปที่ 4.70 แสดงการพิศกรรพควมสัมพันธ์ระหว่ง ค่ำกระแสนอร์มัลไลซ์ขำลง กับ เวลขของเม็ดเซรำมิกของสรำกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจำกสรำตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยำการเกิดเป็นสรำละลายของแข็ง

เอกสรำนี้เป็นเอกสรำที่สงวนไว้สำหรับการใช้งำนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญำตให้ นำไปใช้ประโยชน์ด้ำนการค้ำไม่ว่ำกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกรั้หำมให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้ำอิงถึงเจ้ำของเอกสรำทุกครั้งที่มีกรำนำไปใช้

Composition (x)	Rise Time (s)						Decay Time (s)					
	1 <sup>st</sup> Term	2 <sup>nd</sup> Term	3 <sup>rd</sup> Term	4 <sup>th</sup> Term	5 <sup>th</sup> Term	6 <sup>th</sup> Term	1 <sup>st</sup> Term	2 <sup>nd</sup> Term	3 <sup>rd</sup> Term	4 <sup>th</sup> Term	5 <sup>th</sup> Term	
0.00	$\tau_{ri}$	45.87	69.93	120.48	200.00	384.62	1111.11	138.89	153.85	312.50	476.20	588.24
	$A_i$	3.73	-13.69	30.38	-35.43	14.10	-13.03	$3.45 \times 10^{-4}$	$-4.27 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$	$-0.74 \times 10^{-4}$	$3120.00 \times 10^{-4}$
	$\beta$						-0.29					$-0.01 \times 10^{-4}$
0.01	$\tau_{ri}$	112.36	131.58	142.86	153.85	188.68	285.71	136.99	232.56	400.00	454.55	625.00
	$A_i$	$283.00 \times 10^{-3}$	$3311.00 \times 10^{-3}$	$-2967.00 \times 10^{-3}$	$-769.00 \times 10^{-3}$	$143.00 \times 10^{-3}$	$0.04 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-5}$	$-0.93 \times 10^{-5}$	$-7.10 \times 10^{-5}$	$7.36 \times 10^{-5}$	$303.80 \times 10^{-3}$
	$\beta$						$-26.00 \times 10^{-3}$					$0.15 \times 10^{-5}$
0.02	$\tau_{ri}$	67.57	87.72	125.00	323.56	476.19	769.23	217.39	294.12	454.55	666.67	1250.00
	$A_i$	$-0.45 \times 10^{-4}$	$1.26 \times 10^{-4}$	$-1.06 \times 10^{-4}$	$0.98 \times 10^{-4}$	$-0.67 \times 10^{-4}$	$0.10 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$-2.81 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^{-4}$	$-0.26 \times 10^{-4}$	$67.40 \times 10^{-2}$
	$\beta$						$-21.15 \times 10^{-2}$					$0.17 \times 10^{-4}$
0.03	$\tau_{ri}$	153.84	172.41	256.41	434.78	769.23	1111.11	333.33	357.14	343.78	714.29	2000.00
	$A_i$	$-499.00 \times 10^{-3}$	$979.00 \times 10^{-3}$	$-1185.00 \times 10^{-3}$	$1444.00 \times 10^{-3}$	$872.00 \times 10^{-3}$	$0.20 \times 10^{-3}$	$193.00 \times 10^{-4}$	$-252.00 \times 10^{-4}$	$55.90 \times 10^{-4}$	$6.39 \times 10^{-4}$	$-315.00 \times 10^{-3}$
	$\beta$						$7.69 \times 10^{-3}$					$-0.13 \times 10^{-4}$
0.04	$\tau_{ri}$	119.05	147.06	232.56	434.78	833.33	2000.00	434.78	500.00	625.00	1000.00	1666.67
	$A_i$	$-60.40 \times 10^{-2}$	$183.00 \times 10^{-2}$	$-357.00 \times 10^{-2}$	$570.00 \times 10^{-2}$	$-427.00 \times 10^{-2}$	$0.10 \times 10^{-2}$	$80.70 \times 10^{-3}$	$128.90 \times 10^{-3}$	$45.64 \times 10^{-3}$	$4.58 \times 10^{-3}$	$477.00 \times 10^{-3}$
	$\beta$						$-50.00 \times 10^{-2}$					$0.27 \times 10^{-3}$
0.05	$\tau_{ri}$	181.82	140.86	312.50	833.33	2500.00	10000.00	416.67	588.24	1000.00	1428.57	2500.00
	$A_i$	-15.71	13.57	-7.88	18.34	4.89	-6.99	$38.70 \times 10^{-3}$	$-106.00 \times 10^{-3}$	$141.00 \times 10^{-3}$	$-72.50 \times 10^{-3}$	$436.00 \times 10^{-3}$
	$\beta$						-17.62					$0.19 \times 10^{-3}$

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงไดโอรัน ที่ได้จากการปรับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเทิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของมัลติเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงเล็กโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัด ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง  
 ดีอาร์รี่ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจาก  
 สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Decay Component									
	1 <sup>st</sup> Term		2 <sup>nd</sup> Term		3 <sup>rd</sup> Term		4 <sup>th</sup> Term		5 <sup>th</sup> Term	
	$I_0$ (A) ( $10^{-4}$ )	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{12}$ )	$I_0$ (A) ( $10^{-4}$ )	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{12}$ )	$I_0$ (A) ( $10^{-4}$ )	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{12}$ )	$I_0$ (A) ( $10^{-4}$ )	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{12}$ )	$I_0$ (A) ( $10^{-4}$ )	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{12}$ )
0.00	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
0.01	0.11	0.12	0.10	0.11	0.09	0.10	0.08	0.09	0.07	0.08
0.02	0.27	0.28	0.25	0.27	0.24	0.25	0.19	0.21	0.17	0.18
0.03	2.34	2.48	2.29	2.43	2.23	2.36	2.03	2.16	1.75	1.86
0.04	17.82	18.90	17.47	18.50	16.95	18.00	15.34	16.30	14.16	15.00
0.05	13.33	14.10	12.94	13.70	12.31	13.10	11.71	12.40	11.14	11.80

หมายเหตุ  $N_t$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์  $N_t = \left( \frac{I_0}{q\mu V_a} \right) \left( \frac{l}{wd} \right)$

แรงดันไฟฟ้า ( $V_a$ ) = 15 โวลต์

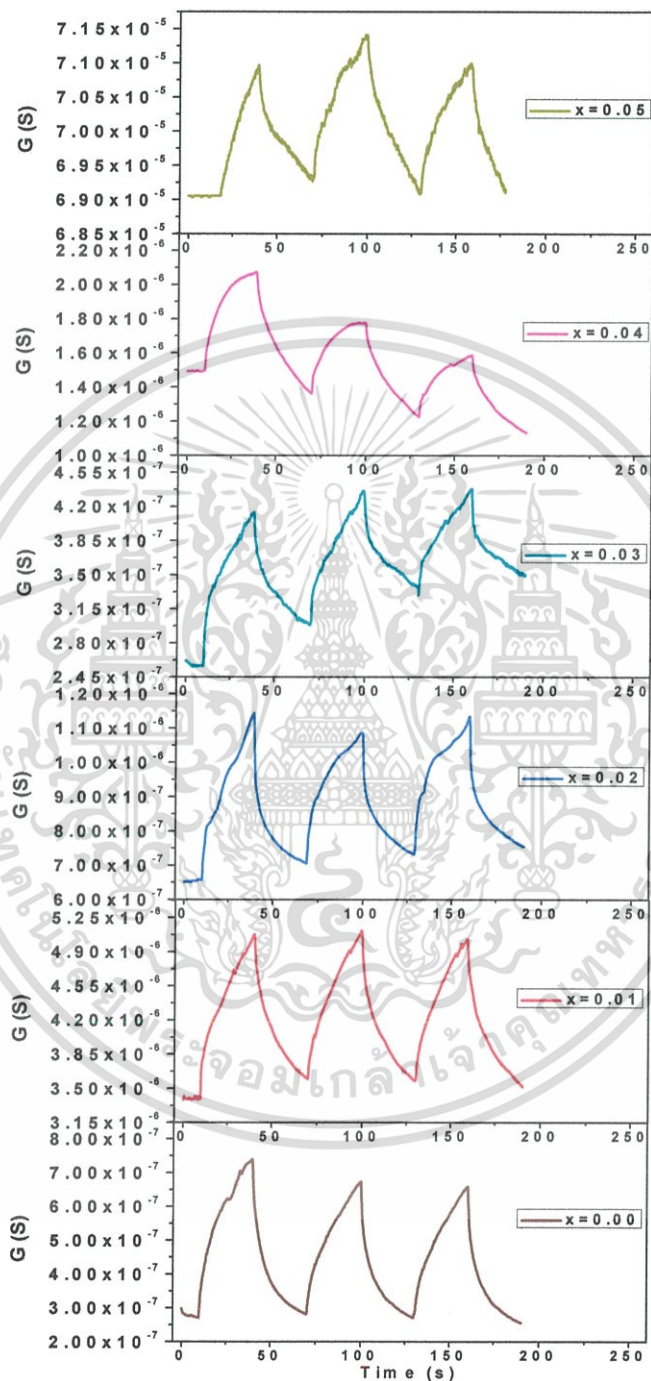
สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) ของ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  = 10 ตารางเซนติเมตร (โวลต์-วินาที)

พื้นที่หน้าตัดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ ( $wd$ ) =  $\pi^2 = \pi(0.5)^2$  ตารางเซนติเมตร

ความหนาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ = 0.2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของ แก๊สแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

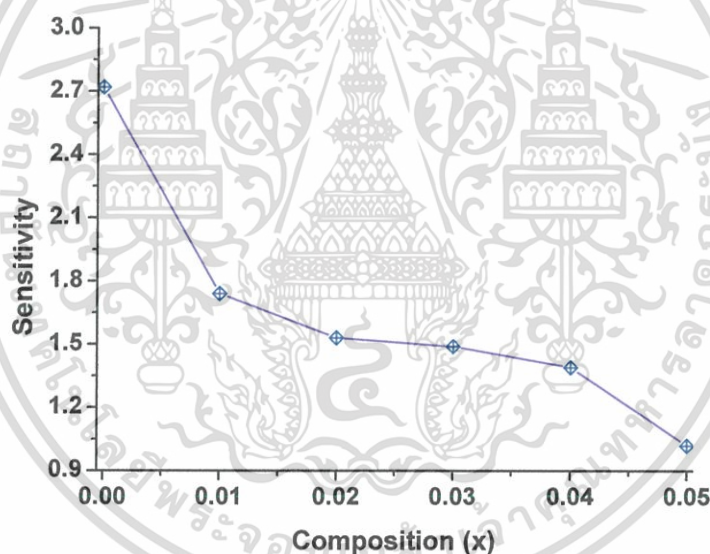


รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเวลาตอบสนอง เวลาคืนตัว และ ความไวต่อไอรระเหย ของแก๊สแอมโมเนีย ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	Sensitivity	Response Time (s)	Recovery Time (s)
0.00	2.72	22.2	17.2
0.01	1.49	25.4	21.4
0.02	1.74	25.4	14.8
0.03	1.53	22.6	20.8
0.04	1.39	17.0	23.4
0.05	1.02	27.2	25.2



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความไวต่อไอรระเหยของแก๊สแอมโมเนีย กับ ปริมาณสารเจือของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

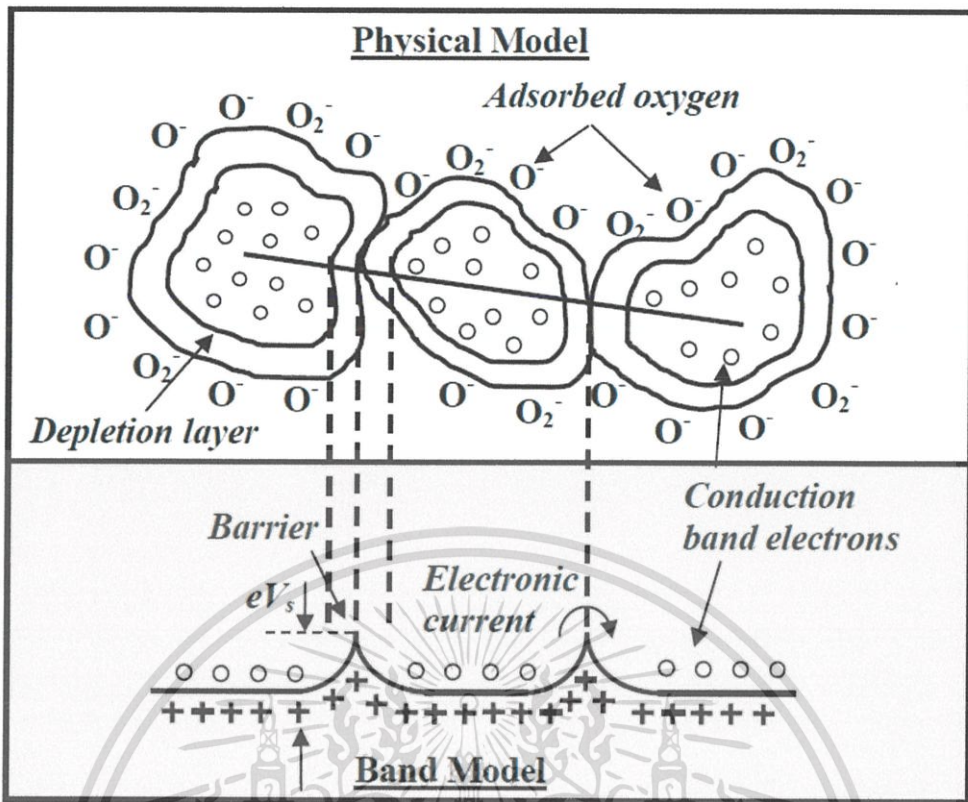
กลไกการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนียเป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อนโดนอยู่บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะถูกควบคุมโดยโมเลกุลของไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย และ อะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ โดยปกติโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจากอากาศจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิว และ บริเวณขอบรอยต่อของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  โดยจะกลายเป็นไอออนของธาตุ  $O^{2-}$ ,  $O^-$  หรือ  $O_2^-$  เป็นต้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิในขณะที่โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะดึงอิเล็กตรอนอิสระจากแถบนำกระแส ( $E_C$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  เพื่อกลายเป็นไอออนของธาตุ  $O^{2-}$ ,  $O^-$  หรือ  $O_2^-$  ซึ่งจะส่งผลให้เกิดบริเวณพร่องพาหะที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ เมื่อเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำอยู่ในบรรยากาศของไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย โมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ แล้วจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น  $NO$ ,  $N_2$  และ  $H_2O$

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการของการเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้คือ



โมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับไอออนของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระกลับคืนสู่แถบนำกระแส ( $E_C$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ นั่นคือเมื่อเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำอยู่ในบรรยากาศของไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นกว่าเมื่ออยู่ในอากาศปกติ

ความเร็วในการตอบสนองต่อไอระเหยแอมโมเนียของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จะนิยามจากค่าเวลาตอบสนอง (response time) และ ค่าเวลาคืนตัว (recovery time) โดยที่ ค่าเวลาตอบสนอง คือเวลาที่ตัวตรวจรู้สามารถจับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นไปถึงค่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุด ส่วนค่าเวลาคืนตัว คือเวลาที่สัญญาณลดลงจากค่าสัญญาณสูงสุด มาเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุด



รูปที่ 4.73 แสดงแบบจำลองของการเกิดบริเวณพร่องพาหะ และ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ )

#### วิธีคำนวณหาความเข้มข้นของไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย

จากนิยามที่ว่า 1 หนึ่งส่วนในล้านส่วน (part per million : ppm) คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าต้องการความเข้มข้นของไอระเหยของแอมโมเนียเท่ากับ 100 ppm แสดงว่าในภาชนะบรรจุก๊าซของเราต้องมีปริมาณแอมโมเนียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าภาชนะของเรามีปริมาตร 20 ลิตร ดังนั้น ความเข้มข้น 100 ppm ในภาชนะ 20 ลิตร ต้องมีปริมาณแอมโมเนียเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัม แต่ค่าความหนาแน่นของอะซีโตน คือ 0.904 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์จะได้ว่า

$$\text{มวลของแอมโมเนีย } 0.904 \text{ กรัม จะมีปริมาตร} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{มวลของแอมโมเนีย } 2,000 \text{ มิลลิกรัม จะมีปริมาตร} = \frac{(1)(2,000)(10^{-3})}{0.904}$$

$$= 2.21 \text{ มิลลิลิตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะต้องดวงแอมโมเนีย 2.21 มิลลิลิตร แล้วฉีดใส่เข้าไปในภาชนะโดยใช้หลอดฉีดยา เขย่า ภาชนะให้แอมโมเนียระเหยจนหมด จากนั้นจึงนำเอาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ใส่เข้าไปในระบบ เพื่อทำการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำทั้งสแตนแอนติโมนีออกไซด์  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาเป็นสารละลายของแข็งและได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ที่ปรากฏระนาบ (002), (020), (200), (120), (-112), (112), (022) และ (202) ตามลำดับ เมื่อปริมาณของสารประกอบ  $Sb_2O_3$  เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้หนึ่งหน่วยเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง, 40 องศาเซลเซียส, 60 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 75 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้นแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้ามีขนาดลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่  $x = 0.05$  และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าสนามไฟฟ้าพังทลาย ( $E_b$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\alpha$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลมาจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_b$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ มีค่าอยู่ในช่วง  $1.36 \times 10^{12} - 8.54 \times 10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรนมีค่าอยู่ในช่วง  $5.03 \times 10^9 - 2.59 \times 10^{12}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่าในวงจรมูลไม่ปรากฏว่ามีค่าความจุไฟฟ้าของขอบรอยต่อของเกรนปรากฏอยู่ อีกทั้งความสูงของขอบกำแพงศักย์ ( $\phi_b$ ) มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำเกิดจากกระแสอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงศักย์ต่ำสุด ในกรณีที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.05 จะมีค่ากำแพงศักย์ และ ค่าแรงดันพังทลายต่ำสุด จึงทำให้เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.05 มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดด้วย และจากการวัด ค่าความจุไฟฟ้า ที่เปลี่ยนไปตาม แรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ คือค่าความจุไฟฟ้าของเนื้อสารที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ไม่ได้เกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนปรากฏขึ้นมาและกลไกการนำกระแสของอิเล็กตรอน อธิบายได้ดีด้วยกลไกของขอตดก็มากกว่ากลไกพูล-เฟรนเคิล

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่ามีปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอริ้น กล่าวคือช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว (ในระดับหลายร้อยวินาที) ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักมีการจับพาหะ และ การ

ปล่อยพาหะ ค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตของพาหะสามารถหาได้จากการพิศกรรพของผลการทดลอง โดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน

จากการทดลองพบว่า เมื่อเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) อยู่ภายใต้บรรยากาศของไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง แสดงว่าพื้นที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียจนหมดสิ้น ปฏิกริยาเคมีจึงสิ้นสุดลง แต่เมื่อนำเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำกลับเข้าสู่อากาศความดันปกติ โมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียจะถูกปลดปล่อยออกจากพื้นที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นอะตอมของธาตุออกซิเจนจะถูกดูดซับไว้ในพื้นที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำอย่างเต็ม ปฏิกริยาเคมีจะเกิดซ้ำได้อีกเมื่อนำเอาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำใส่กลับเข้าไปในบรรยากาศไอระเหยของแก๊สแอมโมเนีย และพบว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $W_{1-x}Sb_xO_3$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบ  $Sb_2O_3$  จะมีความไวสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนพบว่าผลการทดลองอาจมีค่าคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำไม่เรียบสม่ำเสมอส่งผลให้มีประจุค้างระหว่างเนื้อสารกับอิเล็กทรอนิกส์
2. การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้ามีข้อจำกัดเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟให้แรงดันไม่เกิน 110 โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ซีลีไนด์." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. "ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) และการประยุกต์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชโนดม จันทร์สม และส่งศักดิ์ แสงโฮง. 2556. "การเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีซัลโฟโรเซชัน." โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. "การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. "การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. "การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยระเหิดในระยะเวลาประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2553. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. "การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. "การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ดุสิต เครื่องงาม. 2535. โขลิตสเดทฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดุสิต เครื่องงาม. 2542. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์เทคโนโลยี และการใช้งานเล่มที่**

1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นวรรตน์ โพธิ์หล้า และอมรรตน์ เกิดประดิษฐ์. 2554. "การศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_2$ ." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ปทุมทิพย์ บุญเสริม และปานจรี แจงบำรุง. 2554. "สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอินเดียม ทั้งสแตน." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ปณยานันท์ โยระชัย, พัชรียา แววงค์ และมณฑิรา คงเอียง. 2555. "ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิก  $\text{WO}_3$  ที่เจือด้วย Cd." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรรณนิศา สุขกรี, วลัยพัชร ใจเรื่อน และศวิตา ทศนิยม. 2556. "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วีระชัย ลิภา. 2547. "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วุฒิไกร คำอ่อน, ศตพล ศิวายพราหมณ์ และศุภฤกษ์ จันทะโบราณ. 2556. "สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุกฤษฎี เกิดแสง. 2557. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์.** กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อุปถัมภ์ นาครักษ์. 2548. "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวง ซึ่งเตรียมด้วยวิธีพ่นละอองสารเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Bouchard, R.J. and Gillson, J.L. 1968. "Hexagonal Indium Tungsten Bronze." *Inorganic Chemistry*. 7(5) : 969-972.

Cullity, B.D. 1956. **Element of X-Ray Diffraction.** Addison-Wesley Publishing Company.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Diot, N. Larcher, O. Marchand, R. Kempf, J.Y. and Macaudiere, P. 2001. "Rare Earth and Tungsten Oxynitrides with a Defect Fluorite-Type Structure as New Pigments." *J. Alloys Comp.* 323-324 : 45-48
- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors." *Appl. Phys. Lett.* 97 : 143510-1 - 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction." *App. Phys. Lett.* 90 : 243106-1 - 243106-3.
- Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors." *App. Phys. Lett.* 87 : 243512-1 - 243512-3.
- Gao, L. Wang, X. Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers." *App. Phys. Lett.* 102 : 072103-1 - 072103-3
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2010. "Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors." *App. Phys. Lett.* 99 : 113301-1 - 113301-3.
- Jiang, F. Shen, H. Liu, B. Lin, L. and Shen, Z. 2011. "Preparation and Properties of SnS Films Grown by Two-Stage Process." *Appl. Surf Sci.* 257 : 4901-4905
- Johnson, C. Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN." *App. Phys. Lett.* 68(13) : 1808-1810.
- Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley & Sons.
- Lin, J.H. Zeng, J.J. Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. "Current Transport Mechanism of Heterojunc Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si." *App. Phys. Lett.* 100 : 153509-1 - 153509-4.
- Lin, Y.J. Luo, J. and Hung, H.C. 2013. "Electronic Transport and Schottky Barrier Heights of p-CuAlO<sub>2</sub> Schottky Diodes." *App. Phys. Lett.* 102 : 193511-1 - 193511-3.
- Luo, J. Adler, A.U. Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis." *J. Appl. Phys.* 113 : 153709-1 - 153709-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ren, S.T. Zhao, F. and Chen Q. 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules." *Chin. Phys. B.* 21(3) : 038104-1 - 038140-7.
- Richard, A.P. and Edwards, D.D. 2004. "Sub solidus Phase Relation and Crystal Structures of the Mixed-Phases in the  $\text{In}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_3$  System." *J. Solid State Chem.* 177 : 2740-2748.
- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument.** 3<sup>rd</sup> ed. New York : Mc.Graw-Hill.
- van de Pauw, L.J. 1958. "A method of measuring specific resistivity and hall effect of arbitrary shape." *Philips Res. Reports.* 13 : 1-9.
- Studenikin, S.A. Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution." *J. Appl. Phys.* 83(4) : 2104-2111.
- Sze, S.M. 1981. **Physics of Semiconductor Devices.** 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley & Sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

Pattern : 83-950		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
W O <sub>3</sub>		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Tungsten Oxide		16 454	<-1	0	1	1	*63 282	5	3	1	4
		16 864	<-1	1	0	1	63 424	3	-3	4	4
		*16 864	<-1	1	1	0	64 215	<-1	1	1	3
		20 375	<-1	-1	1	1	*64 215	<-1	4	1	3
		20 591	<-1	1	1	1	64 338	<-1	4	3	1
		23 117	98	0	0	2	64 756	<-1	-5	0	1
		23 583	96	0	2	0	64 846	<-1	3	3	3
		24 367	100	2	0	0	65 172	<-1	6	0	1
		25 996	1	0	1	2	65 505	<-1	0	2	5
		26 693	19	1	2	0	65 979	1	-2	3	4
		28 614	17	-1	1	2	66 249	1	-3	2	4
		28 927	17	1	1	2	66 414	<-1	-2	4	3
		*28 927	17	-1	2	1	66 638	2	2	3	4
		29 698	<-1	-2	2	1	*66 638	2	-1	2	5
		33 251	38	0	2	2	67 099	3	-3	4	2
		33 565	24	-2	0	2	*67 099	3	1	2	5
		34 167	57	2	0	2	67 235	2	3	2	4
		*34 167	57	2	2	0	67 589	3	3	4	2
		35 390	6	-1	2	2	*67 589	3	-4	3	2
		35 650	7	1	2	2	68 031	1	1	5	2
		*35 650	7	-2	2	1	68 272	<-1	4	3	5
		36 036	<-1	-2	1	2	*68 272	<-1	-2	5	1
		36 185	1	2	1	2	68 437	<-1	2	5	1
		36 292	<-1	-2	2	1	68 915	1	5	2	0
		36 962	<-1	-1	0	3	69 394	1	-5	1	2
		37 018	<-1	0	1	3	69 835	1	0	4	4
		37 337	<-1	0	3	3	*70 397	1	5	2	2
		*37 337	<-1	0	3	1	70 397	1	5	1	2
		38 604	<-1	-3	0	1	70 548	2	-4	0	4
		38 908	<-1	3	1	0	*70 548	2	-2	2	5
		*38 908	<-1	-1	1	3	71 029	1	-1	4	4
		38 965	<-1	3	0	3	71 348	1	1	1	4
		39 257	<-1	3	3	3	*71 348	1	2	2	5
		39 729	<-1	1	3	1	71 822	2	4	0	4
		40 483	<-1	-3	1	1	*71 822	2	-2	5	2
		40 831	<-1	3	1	1	71 965	4	4	4	4
		41 432	13	-2	2	2	*71 965	4	4	4	0
		41 896	14	2	2	2	72 182	3	2	3	2
		42 824	<-1	4	3	3	*72 182	3	-2	3	4
		42 964	1	0	3	2	72 641	2	-3	3	4
		43 597	<-1	2	3	0	*72 641	2	0	5	3
		44 270	4	3	2	0	73 077	<-1	4	1	4
		*44 270	4	-1	2	3	73 077	<-1	-3	4	3
		44 698	4	1	2	3	73 380	1	-3	1	5
		*44 698	4	-1	3	2	73 380	1	-5	3	3
		44 912	4	1	3	2	73 587	2	-4	3	3
		45 384	6	-3	1	2	*73 587	2	3	3	4
		*45 384	5	-2	3	1	73 806	1	3	4	3
		45 737	<-1	-3	2	1	74 165	1	-5	0	3
		46 017	4	3	1	2	*74 165	1	-2	0	3
		*46 017	4	3	2	1	74 676	1	1	0	6
		47 250	9	0	0	4	75 141	1	0	1	1
		48 247	9	0	4	0	75 552	2	2	4	4
		48 858	1	0	1	4	*75 552	2	-4	2	4
		49 933	25	4	0	0	76 224	4	-5	3	1
		*49 933	25	4	0	0	76 224	4	-1	4	2
		50 230	5	2	3	2	76 434	4	-4	1	6
		*50 230	5	-3	2	2	76 690	5	1	1	6
		50 336	13	-1	1	4	76 794	3	4	2	4
		50 726	11	1	1	4	*76 794	3	-2	3	5
		50 816	7	3	2	2	76 936	6	1	6	0
		*50 816	7	3	2	2	77 054	4	-2	2	5
		51 374	<-1	-3	0	3	*77 054	4	-4	4	2
		*51 374	<-1	-1	4	1	77 611	<-1	2	3	5
		51 471	<-1	1	4	1	78 153	<-1	1	6	1
		*51 471	<-1	1	4	1	78 153	<-1	-2	5	3
		52 165	<-1	4	1	0	78 392	<-1	-3	5	0
		52 330	<-1	3	3	0	*78 392	<-1	6	0	2
		*52 330	<-1	-1	3	3	78 553	1	0	2	6
		52 616	<-1	1	3	3	*78 553	1	3	5	2
		52 745	<-1	-4	1	1	79 109	<-1	-5	2	3
		53 467	11	0	2	4	79 536	1	-2	3	2
		*53 467	11	-2	0	4	79 780	<-1	6	4	0
		53 690	6	-3	3	1	79 907	<-1	-1	2	6
		54 153	8	0	4	2	*79 907	<-1	-2	1	6
		54 235	6	2	0	4	80 302	1	5	3	2
		54 772	9	2	4	0	80 302	1	1	2	6
		54 962	5	-2	1	4	80 557	<-1	0	4	5
		55 343	8	-4	0	2	80 837	1	2	1	6
		55 621	7	-1	4	2	*80 837	1	0	5	4
		55 804	9	1	4	2	81 245	2	6	1	1
		55 933	16	4	2	0	81 245	2	-3	4	4
		56 074	13	4	0	2	81 543	<-1	-1	6	2
		*56 074	13	-2	4	1	81 696	3	-1	4	5
		56 259	4	-2	4	1	*81 696	3	1	4	6
		56 785	<-1	-4	1	2	81 925	2	-2	6	1
		56 888	<-1	-2	3	3	82 160	1	-1	5	4
		57 130	<-1	-4	2	1	82 160	1	3	4	4
		57 635	2	-3	3	2	82 421	1	1	5	4
		58 170	1	3	3	2	82 768	1	-6	0	2
		59 238	3	-2	2	4	82 874	1	4	3	4
		59 938	4	2	2	4	83 049	1	4	5	0
		60 055	5	-2	4	2	*83 049	1	4	4	3
		60 402	4	2	4	2	83 127	1	-3	3	5
		60 601	3	0	3	4					
		60 979	6	0	4	2					
		*60 979	6	-4	2	2					
		61 667	7	4	2	2					
		61 885	6	-1	3	4					
		62 264	12	3	4	0					
		*62 264	12	-3	1	1					
		63 282	5	-4	1	3					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

สมการค่าความจุของกัปดักพาหะ

$$C = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}}$$

เมื่อ  $C$  = ความจุไฟฟ้า

$C_D$  = ความจุของบิรเวณพรองพาหะ

$C_{it}$  = ความจุของกัปดักพาหะที่บิรเวณรอยต่อ

$\tau_{it}$  = ค่าชีวิตของพาหะในกัปดัก

สมการของจอนเซอร์

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n$$

เมื่อ  $G$  = สภาพนำไฟฟ้า

$G_{dc}$  = สภาพนำไฟฟ้ากระแสตรง

$\omega$  = ความถี่เชิงมุม

$n$  = เลขยกกำลัง

สูตรคำนวณ ตารางที่ 4.4-4.8

$$C = \frac{1}{R} (PR)^n$$

$$\tau = RC$$

$$\omega = 2\pi f_{\max}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

Rise  $x = 0.00$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/45.87))+b*(1-\exp(-x/69.93))+c*(1-\exp(-x/120.48))+d*(1-\exp(-x/200))+f*(1-\exp(-x/384.62))+g*(1-\exp(-(x/1111.11)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 3.725 (-5.38, 12.83)$$

$$b = -13.69 (-58.38, 31)$$

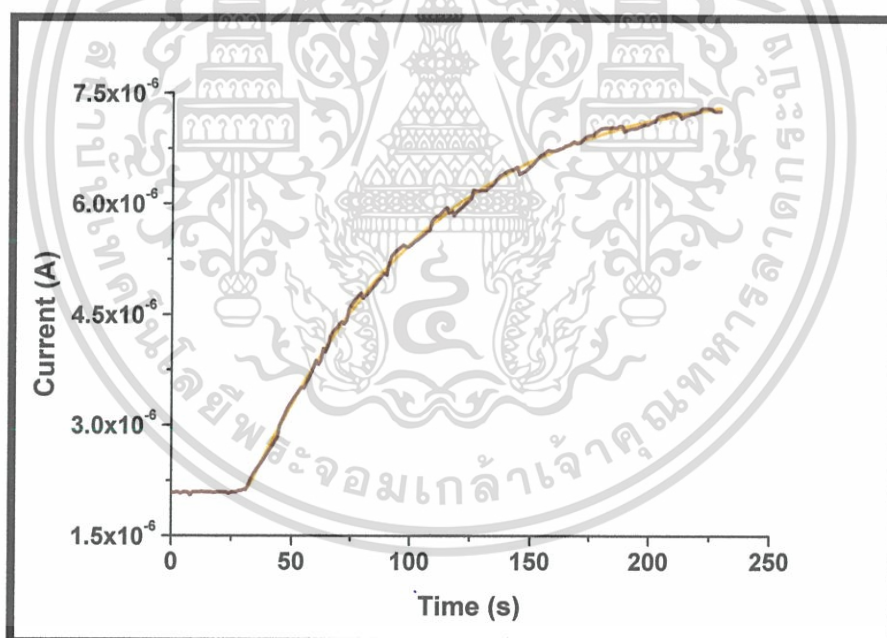
$$c = 30.38 (-104.8, 165.5)$$

$$d = -35.43 (-231.3, 160.5)$$

$$f = 14.1 (-103.3, 131.5)$$

$$g = -13.03 (-13.04, -13.02)$$

$$h = -0.291 (-0.3043, -0.2777)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise  $x = 0.01$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/112.36))+b*(1-\exp(-x/131.58))+c*(1-\exp(-x/142.86))+d*(1-\exp(-x/153.85))+f*(1-\exp(-x/188.68))+g*(1-\exp(-(x/285.71)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.2833 (0.1676, 0.399)$$

$$b = 3.311 (1.942, 4.679)$$

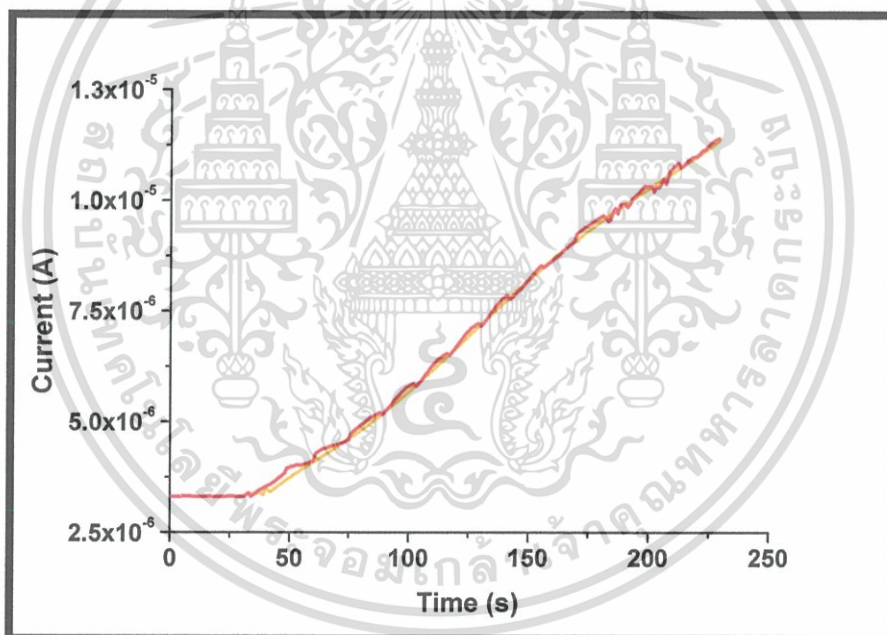
$$c = -2.967 (-4.189, -1.744)$$

$$d = -0.7697 (-1.091, -0.448)$$

$$f = 0.1431 (0.08249, 0.2036)$$

$$g = 4.478e-006 (4.245e-006, 4.711e-006)$$

$$h = -0.02642 (-0.05017, -0.002659)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise  $x = 0.02$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/67.57))+b*(1-\exp(-x/87.72))+c*(1-\exp(-x/125))+d*(1-\exp(-x/232.56))+f*(1-\exp(-x/476.19))+g*(1-\exp(-(x/769.231)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = -4.458e-005 \text{ } (-0.0004654, 0.0003762)$$

$$b = 0.0001263 \text{ } (-0.001497, 0.001749)$$

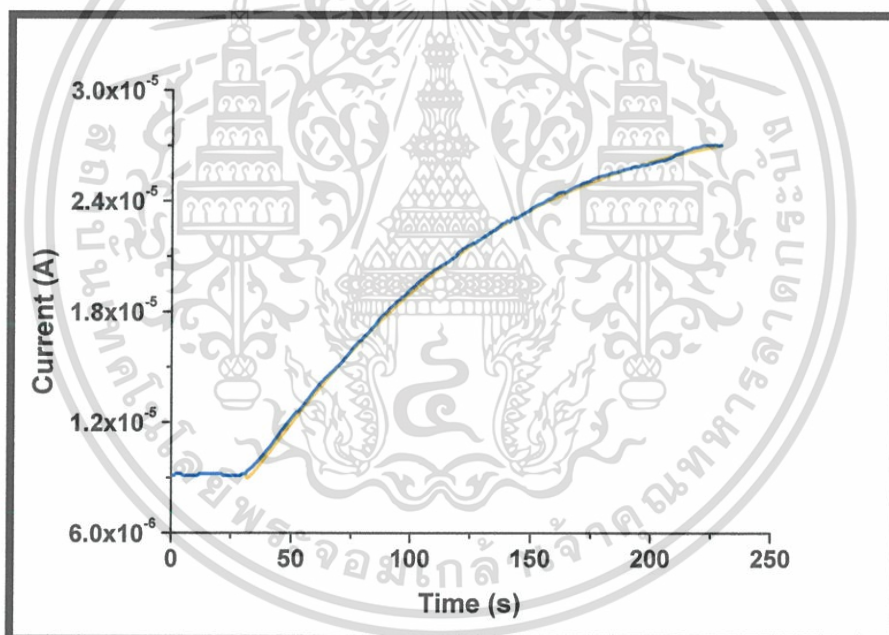
$$c = -0.0001058 \text{ } (-0.002651, 0.00244)$$

$$d = 9.83e-005 \text{ } (-0.002655, 0.002852)$$

$$f = -6.775e-005 \text{ } (-0.00186, 0.001725)$$

$$g = 9.478e-006 \text{ } (9.313e-006, 9.642e-006)$$

$$h = -0.2115 \text{ } (-0.2401, -0.1828)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise  $x = 0.03$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/153.84))+b*(1-\exp(-x/172.41))+c*(1-\exp(-x/256.41))+d*(1-\exp(-x/434.78))+f*(1-\exp(-x/769.23))+g*(1-\exp(-(x/1111.11)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = -0.4992 (-2.042, 1.043)$$

$$b = 0.9792 (-2.094, 4.052)$$

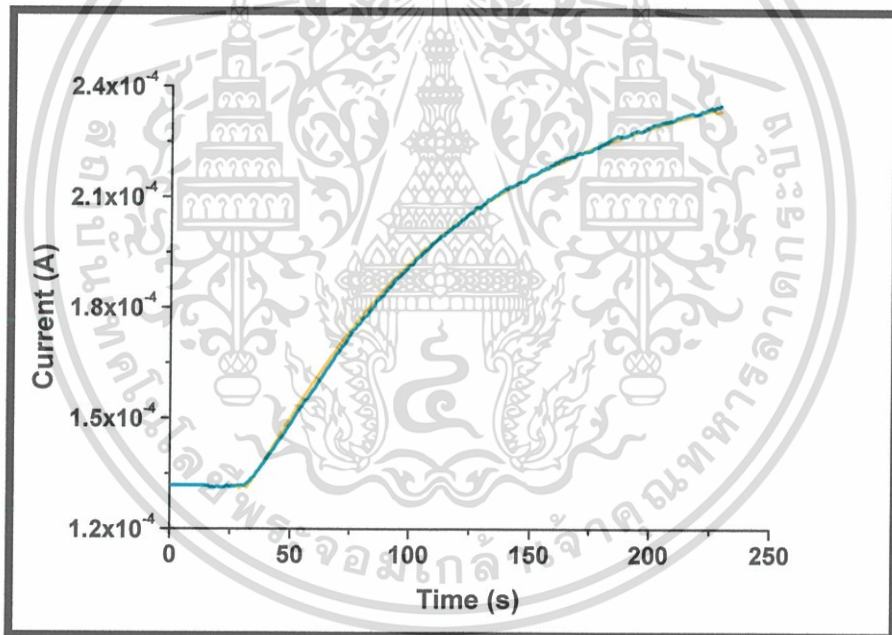
$$c = -1.185 (-5.076, 2.707)$$

$$d = 1.444 (-3.497, 6.384)$$

$$f = -0.8719 (-3.936, 2.192)$$

$$g = 0.0002017 (0.0001919, 0.0002115)$$

$$h = -0.007692 (-0.02448, 0.0091)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise  $x = 0.04$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/119.05))+b*(1-\exp(-x/147.06))+c*(1-\exp(-x/232.56))+d*(1-\exp(-x/434.78))+f*(1-\exp(-x/833.33))+g*(1-\exp(-(x/2000)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = -0.604 (-1.098, -0.11)$$

$$b = 1.831 (0.2955, 3.366)$$

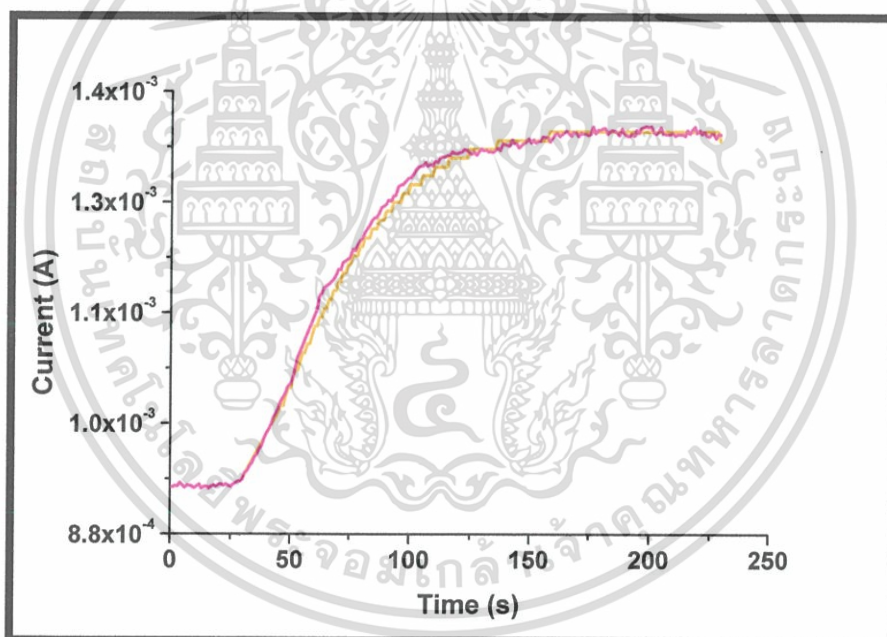
$$c = -3.573 (-6.704, -0.4416)$$

$$d = 5.705 (0.5305, 10.88)$$

$$f = -4.27 (-8.214, -0.3261)$$

$$g = 0.001007 (0.0009942, 0.00102)$$

$$h = -0.501 (-2.68, 1.678)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise  $x = 0.05$

General model :

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/181.82))+b*(1-\exp(-x/140.86))+c*(1-\exp(-x/312.5))+d*(1-\exp(-x/833.33))+f*(1-\exp(-x/2500))+g*(1-\exp(-(x/10000)^h))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = -15.71$$

$$b = 13.57$$

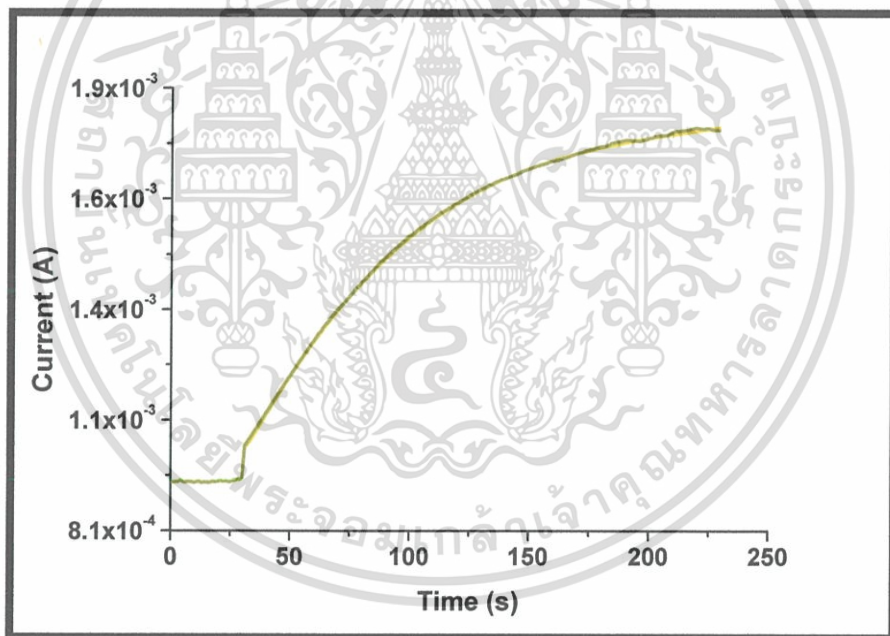
$$c = -7.879$$

$$d = 18.34$$

$$f = 4.887$$

$$g = -6.993$$

$$h = -17.62$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.00$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/138.89) + b \cdot \exp(-x/153.85) + c \cdot \exp(-x/312.50) + d \cdot \exp(-x/476.20) + g \cdot \exp(-x/588.24)^f$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.0003452 \quad (0.0002743, 0.0004161)$$

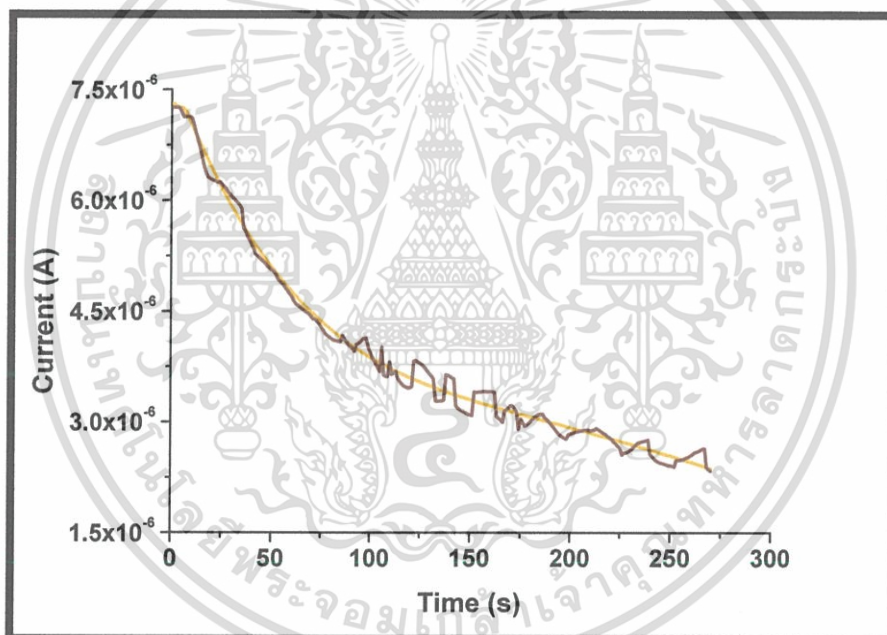
$$b = -0.0004273 \quad (-0.0005163, -0.0003383)$$

$$c = 0.000165 \quad (0.0001291, 0.0002008)$$

$$d = -7.409e-005 \quad (-9.016e-005, -5.803e-005)$$

$$f = 0.312 \quad (-0.127, 0.7511)$$

$$g = -1.476e-006 \quad (-3.967e-006, 1.016e-006)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.01$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/136.99) + b \cdot \exp(-x/232.56) + c \cdot \exp(-x/400) + d \cdot \exp(-x/454.55) + g \cdot \exp(-(x/625)^f)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 1.641e-005 \quad (-4.231e-006, 3.705e-005)$$

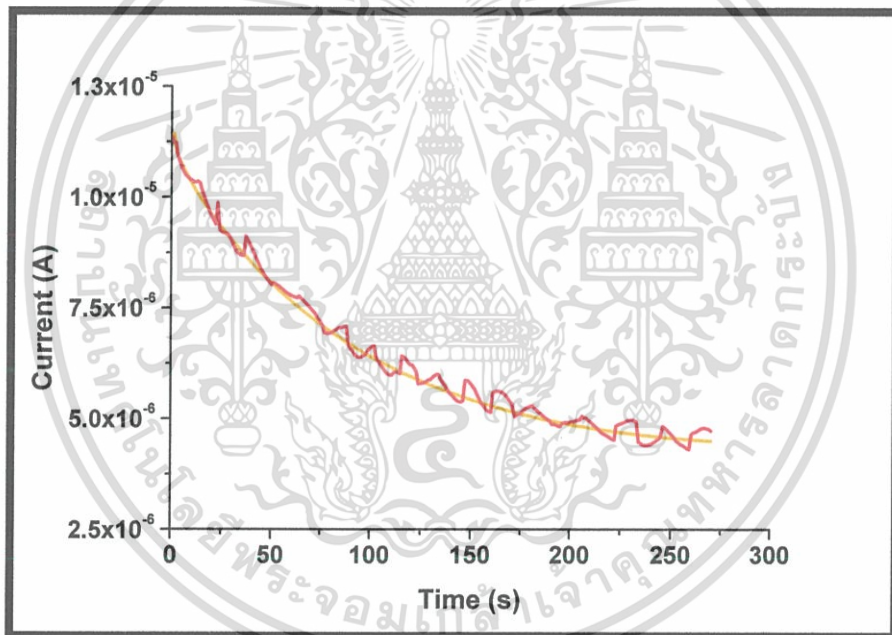
$$b = -9.322e-006 \quad (-9.153e-005, 7.288e-005)$$

$$c = -7.104e-005 \quad (-0.0003349, 0.0001928)$$

$$d = 7.361e-005 \quad (-0.0001262, 0.0002734)$$

$$f = 0.3038 \quad (-0.2494, 0.857)$$

$$g = 1.544e-006 \quad (-1.728e-006, 4.816e-006)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.02$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/217.39) + b \cdot \exp(-x/294.12) + c \cdot \exp(-x/454.55) + d \cdot \exp(-x/666.67) + g \cdot \exp(-(x/1250)^f)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.000164 \quad (-0.0001053, 0.0004334)$$

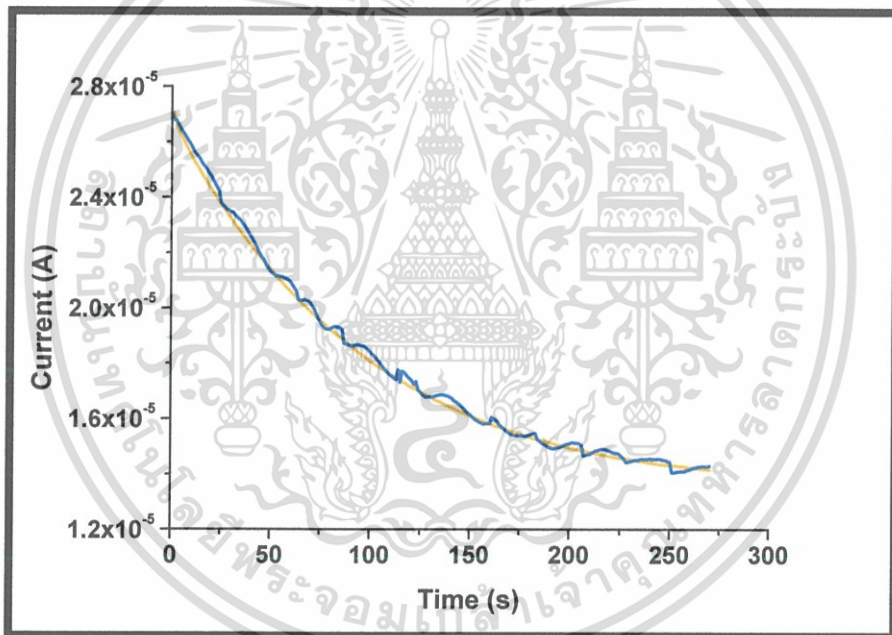
$$b = -0.000281 \quad (-0.0008743, 0.0003122)$$

$$c = 0.0001523 \quad (-0.0004411, 0.0007456)$$

$$d = -2.598e-005 \quad (-0.0005078, 0.0004558)$$

$$f = 0.674 \quad (-1.078, 2.426)$$

$$g = 1.743e-005 \quad (-0.0001834, 0.0002183)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.03$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/333.33) + b \cdot \exp(-x/357.14) + c \cdot \exp(-x/434.78) + d \cdot \exp(-x/714.29) + g \cdot \exp(-(x/2000)^f)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.01931 \text{ (0.003023, 0.03559)}$$

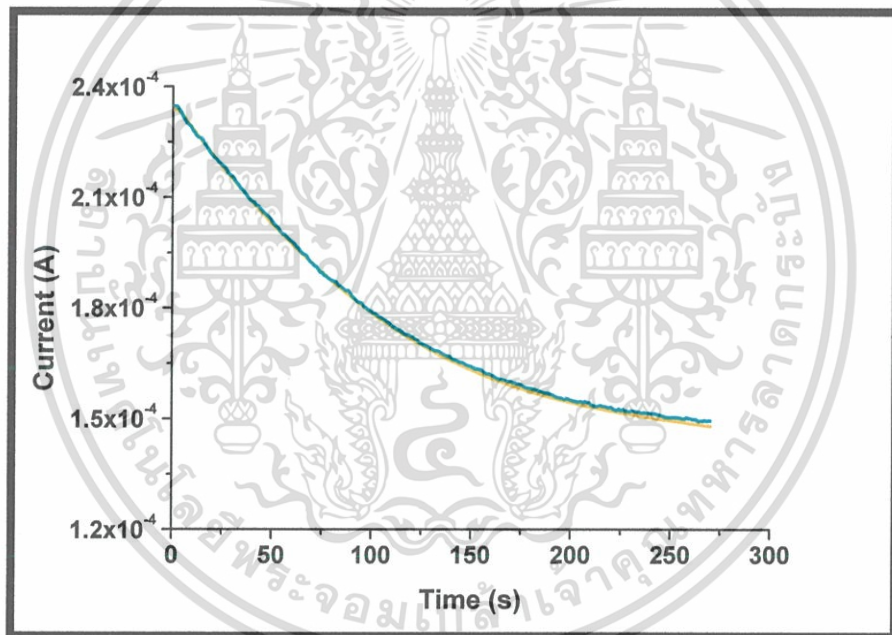
$$b = -0.02529 \text{ (-0.05045, -0.0001327)}$$

$$c = 0.005591 \text{ (-0.004639, 0.01582)}$$

$$d = 0.0006389 \text{ (-0.0006993, 0.001977)}$$

$$f = 0.315 \text{ (-0.08158, 0.7115)}$$

$$g = -1.286e-005 \text{ (-3.746e-005, 1.175e-005)}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.04$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/434.78) + b \cdot \exp(-x/500) + c \cdot \exp(-x/625) + d \cdot \exp(-x/1000) + g \cdot \exp(-x/1666.67)^f$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.0807 \text{ } (-0.1117, 0.2731)$$

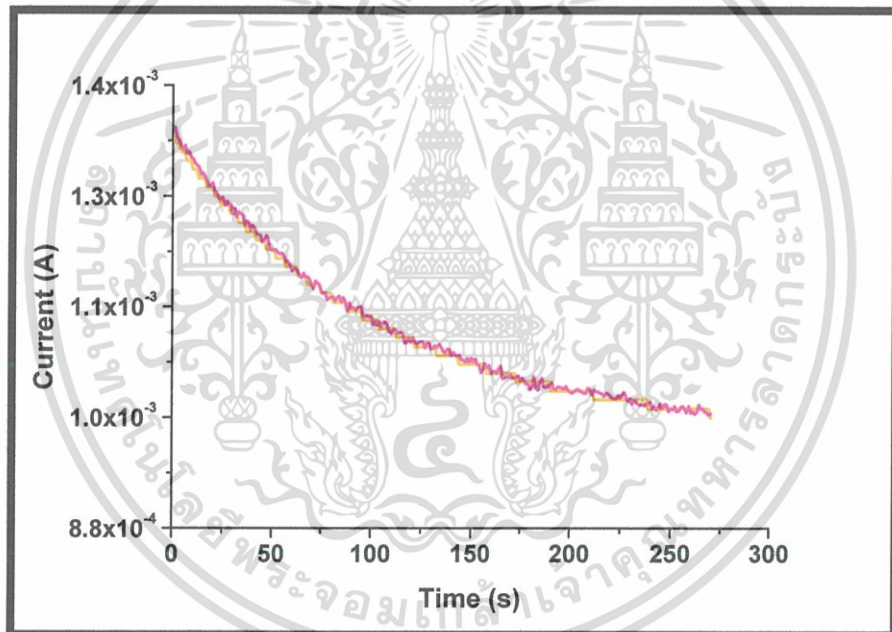
$$b = -0.1289 \text{ } (-0.5412, 0.2835)$$

$$c = 0.04564 \text{ } (-0.2261, 0.3174)$$

$$d = 0.004579 \text{ } (-0.04644, 0.0556)$$

$$f = 0.4777 \text{ } (-0.257, 1.212)$$

$$g = -0.0002729 \text{ } (-0.001326, 0.0007801)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay  $x = 0.05$

General model :

$$f(x) = a \cdot \exp(-x/416.67) + b \cdot \exp(-x/588.24) + c \cdot \exp(-x/1000) + d \cdot \exp(-x/1428.57) + g \cdot \exp(-(x/2500)^f)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds) :

$$a = 0.0387 \quad (0.02085, 0.05656)$$

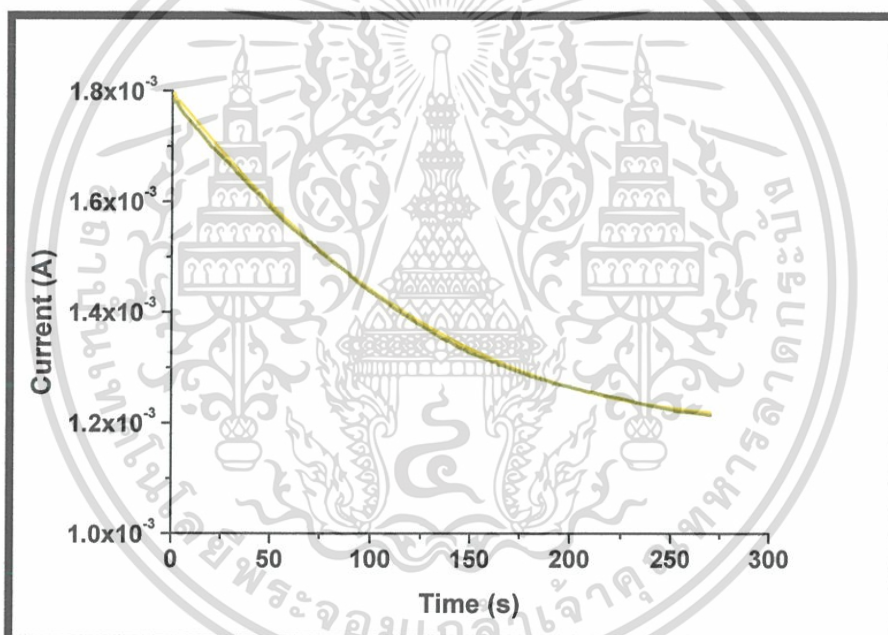
$$b = -0.1063 \quad (-0.1594, -0.05324)$$

$$c = 0.1413 \quad (0.06392, 0.2186)$$

$$d = -0.07252 \quad (-0.1142, -0.03081)$$

$$f = 0.4362 \quad (-0.09028, 0.9627)$$

$$g = 0.0001858 \quad (-0.0003469, 0.0007185)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย ณัฐศิษฐ์ ไชยมุติ  
 วัน-เดือน-ปีเกิด 1 ตุลาคม 2535  
 ภูมิลำเนา 305/370 รามอินทรา 123 ถนน รามอินทรา เขต มีนบุรี แขวง มีนบุรี  
 กรุงเทพมหานคร 10510  
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2542 เข้ารับการศึกษาระดับ ประถมศึกษา ที่โรงเรียน มีนบุรี  
 ปี พ.ศ. 2548 เข้ารับการศึกษาระดับ มัธยมศึกษา ที่โรงเรียน เศรษฐบุตรบำเพ็ญ  
 ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาระดับ อุดมศึกษา ที่สถาบันเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชา  
 ฟิสิกส์ประยุกต์

ชื่อ-นามสกุล นาย สิทธิพร หาญยืน  
 วัน-เดือน-ปีเกิด 25 กรกฎาคม 2535  
 ภูมิลำเนา 294/38 ร่มเกล้า 10 ถนน ร่มเกล้า เขต มีนบุรี แขวง มีนบุรี  
 กรุงเทพมหานคร 10510  
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2542 เข้ารับการศึกษาระดับ ประถมศึกษา ที่โรงเรียน มีนบุรี  
 ปี พ.ศ. 2548 เข้ารับการศึกษาระดับ มัธยมศึกษา ที่โรงเรียน เศรษฐบุตรบำเพ็ญ  
 ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาระดับ อุดมศึกษา ที่สถาบันเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชา  
 ฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้