

อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของเซรามิก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  CERAMICS



นายวิระ น้อยหว้า

นายอดิศักดิ์ กन्हหนองบัว

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเซรามิก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$   
IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  CERAMICS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ CERAMICS




**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเซรามิก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$   
IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  CERAMICS

ชื่อนักศึกษา นายชिरะ น้อยหว่า  
นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว  
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
ประยุกต์ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริเกษเกียรติ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาดาวิทย์	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเซรามิก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$
ชื่อนักศึกษา	นายวชิระ น้อยหว่า นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.จิตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมผลึกพหุพันธ์ของเม็ดเซรามิก สารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{SnO}$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยวิธีปฏิบัติกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นในครกอาเททให้ละเอียดและคลุกเคล้าให้เข้ากันดี จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปโดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องไฮโดรลิกความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง ผงผลึกที่อัดเป็นเม็ดแล้วจะนำไปเผาภายใต้บรรยากาศด้วยความดันปกติที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกพหุพันธ์ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพคล่องของฮอลล์ และความหนาแน่นของพาหะอิสระ คำนวณได้จากการวัดโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้องและ ได้ทำการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ความนำไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุ Sn สามารถคำนวณได้จากข้อมูลของการทดลอง

**คำสำคัญ:** เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ , สมบัติทางไฟฟ้า, อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Impedance Spectroscopy of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ Ceramics
<b>Student</b>	Mr.Wachira Noywa Mr.Adisak Khonnongbua
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. thitinai Gaewdang

### ABSTRACT

In this special project, polycrystalline of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) semiconducting compound were prepared by a solid state reaction method. The mixture of high purity of  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{SnO}$  powder was ground and then pressed by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at  $1,100^\circ\text{C}$  for 48 h. The crystal structure of polycrystalline of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) semiconducting compound was checked X-ray diffraction method. Surface morphology of sample was observed by scanning electron microscope (SEM). Electrical resistivity, Hall mobility and carrier concentration of the as-sintered pellet were obtained from van der Pauw configuration at room temperature. The variation of impedance spectroscopy as a function of Sn concentration was investigated. Important parameters such as complex impedance, conductance and capacitance were calculated from the experimental results.

**Keywords :**  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ceramic, electrical properties, impedance spectroscopy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริกันท์เกียรติและ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึง การปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นายชिरะ น้อยหว่า

นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	21
2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	22
2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก	24
2.2.2 การวัดความต้านทานและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	27
2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	29
2.2.4 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	30
2.2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์	32
2.2.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	36
2.3 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	38
2.3.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	38
2.3.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	39
2.3.3 กราฟของโบด	44
2.4 ปรากฏการณ์เชิงแสง	46
2.4.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสกลาง	53
2.4.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น	54
2.5 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกที่อุณหภูมิต่างๆ	55
2.5.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกในช่วงอุณหภูมิสูง	56
2.5.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกในช่วงอุณหภูมิต่ำ	57
2.5.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่	58
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.3	วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
3.2	การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
3.2.1	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	70
3.2.2	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	70
3.2.3	การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	70
3.2.4	การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี	70
3.2.5	การศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสง	70
3.2.6	การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	70
3.3	วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	71
3.4	วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	73
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย</b>		
4.1	การศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.1.1	เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.1.2	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.1.3	การศึกษาศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการถ่ายภาพที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและ ปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสาร กึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	79
4.3 การศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 2 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่ เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็ง	80
4.4 การศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสง (ขาขึ้น - ขาลง) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้องที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผง ผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	88
4.5 การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็ง	91
4.4.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Seto)	91
4.4.2 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH)	92
4.4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงตามแบบจำลอง ซีโด	93
4.4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์กลไกการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดใน ระยะไม่คงที่ (VRH)	96
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลองของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่ เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็ง	98
5.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	98

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.1.2 การศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพ คล่องของฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq$ $0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของโดยวิธีปฏิบัติการเกิด เป็นสารละลายของแข็ง	99
5.1.3 การศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของ โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	99
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก	105
ประวัติผู้เขียน	108

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และจุดตัดแกนผลึก (x, y, z)	10
2.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
4.1 ค่าคงที่โครงผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและ ปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	79
4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	87
4.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	90
4.5 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตเม็ทเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $x=0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	93
4.6 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบ VRH ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $x=0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	93

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	10
2.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	11
2.4 โครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์การจัดเรียงของอะตอมแบบบรมโบฮีดรัล 3R	12
2.5 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	14
2.6 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	14
2.7 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	14
2.8 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	15
2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	17
2.11 วิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	18
2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	25
2.14 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	28
2.15 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	28
2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	29
2.17 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	30
2.18 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.19 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	33
2.20 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	36
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )	37
2.22 กราฟของไนกวิสตีที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	38

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	39
2.24 กราฟของในควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลม เกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$	40
2.25 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (ข,จ) แอตมิตแตนซ์ สเปกโตรสโคปี (ค,ฉ)	41
2.26 วงจรสมมูลในการอธิบายอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$	41
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์โคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้ว	44
2.28 ก. กราฟในควิสต์และกราฟของโบด ข. กราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ตีตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ติดกับ ขั้วอิเล็กโทรด	45
2.29 ระดับพลังงานของกักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_c$ ) และกักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_v$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทน อิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ	46
2.30 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	49
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ $t$ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและ ช่วงกระแสขาลง	50
2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นกับกักพาหะใน ช่วงกระแสขาลง	53
2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะ ในช่วงกระแสขาขึ้น	54
2.34 แบบจำลองตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ ก) ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์ ข) การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน ค) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน	55
3.1 การวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	71
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{43}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )	72
3.3 วิธีการต่อวงจรเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	73
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )	74

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	75
4.2 ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	76
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	77
4.4 ภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่น โหล์ และสภาพคล่องพาหะของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	79
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	80
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	80
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียการเป็นฉนวนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์กับความถี่ในช่วง 20เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ )ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	82
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	82
4.12 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.000$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.13 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.005$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.14 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.15 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.015$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
4.16 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.020$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85
4.17 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Sn_xO_2$ ( $x = 0.025$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	86
4.19 ความสัมพันธ์ความต้านทานของเกรน ความต้านทานของขอบเกรนและความต้านทานรวมที่ขึ้นกับปริมาณของสารเจือ	86
4.20 ปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	88
4.21 ปรากฏการณ์เชิงแสงขาขึ้นกับเวลาในช่วง 0 วินาที ถึง 200 วินาที ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	89
4.22 ปรากฏการณ์เชิงแสงขาลงกับเวลาในช่วง 0 วินาที ถึง 200 วินาที ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	89
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	91
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีวัสดุ ทำให้เกิดวัสดุแปลกใหม่ขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับกับสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด โปร่งแสง (transparent electronics) หรือสิ่งประดิษฐ์ อิเล็กทรอนิกส์ล่องหน (invisible electronics) ซึ่งได้รับการสนใจในการพัฒนากันอย่างกว้างขวาง (Kawazoe; et.al,1997) สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวนี้จะต้องมีสมบัติโปร่งแสงในย่านตามองเห็น แต่สามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดีสภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงและต้องมีชนิดการนำไฟฟ้า เป็นได้ ทั้งชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type)

สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ล่องหนนี้จะสามารถปกป้องรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ รวมทั้ง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้หลังจากที่ดูดกลืนคลื่นแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต ตัวนำ ไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ZnO, SnO<sub>2</sub> และ In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยวัสดุเหล่านี้เป็นสาร กึ่งตัวนำชนิดเอ็นและค่อนข้างนำไปใช้ประโยชน์ได้ในวงจำกัด เมื่อไม่นานมานี้ คาวาโซเอะและ เพื่อนร่วมงานได้รายงานว่าสามารถประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ชนิดพีโดยระเหย ด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (pulse laser deposition: PLD) หลังจากนั้นงานวิจัยฟิล์มบางของ อุปกรณ์นำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพีที่เป็นสารประกอบออกไซด์ก็ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นกลุ่มสารประกอบเดลตาฟอสไซด์ (delafossite) และกลุ่มอื่นๆที่ไม่ใช่กลุ่มเดลตาฟอสไซด์ ได้มีการผลิตให้เป็นรอยต่อ p-i-n และหัวต่อ p-n ทั้งในแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และ รอยต่ออวิวิพันธ์ (heterojunction) ซึ่งพบว่า มีสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่เหมาะสมที่นำไปทำเป็น สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงแบบต่างๆ เช่น จอแสดงผลแบบจอแบน ไดโอดเปล่งแสง และ เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้นสารประกอบในกลุ่มเดลตาฟอสไซด์ (delafossite) เช่น CuAlO<sub>2</sub>, CuFeO<sub>2</sub> และ CuCrO<sub>2</sub> ได้รับความสนใจมากทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนับตั้งแต่ได้มีการค้นพบ ตัวนำชนิดพีขึ้นในฟิล์มบางโปร่งแสงของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเชิง ไฟฟ้าของกลุ่มสารประกอบนี้ยังไม่ดีเท่ากลุ่มของสารประกอบตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิด สารประกอบออกไซด์ (TCO) ชนิดเอ็น เช่น อลูมิเนียมเจือด้วยสังกะสี (AZO) หรือ อินเดียมเจือด้วย ดีบุก (ITO) เนื่องจากว่าสภาพคล่องตัวของพาหะของสารประกอบกลุ่มเดลตาฟอสไซด์มีค่าที่ต่ำ เมื่อเอาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับชนิดพีรวมกันทำให้เกิดเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด โปร่งแสงและอ็อบโตอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นอย่างมากมาย ทำให้ได้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไดโอดเปล่งแสง, ทรานซิสเตอร์, UV-LEDs เป็นต้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> เตรียมได้

จากหลายวิธี เช่น การเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (PLD) การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีสปัตเตอร์ริงและพัลส์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (pulse magnetron sputtering) นอกจากนี้ฟิล์มบางยังสามารถเตรียมได้จากกระบวนการทางเคมีเช่นการจุ่มเคลือบในสารละลายที่เป็นโซล-เจล (sol-gel) ฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีเคลือบฟิล์มบางด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (PLD) มีชนิดการนำไฟฟ้าที่เป็นพี ความหนาแน่นของโฮลมีค่าประมาณ  $1 \times 10^{17}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สภาพต้านไฟฟ้ามีค่าประมาณ 11 โอห์ม-เซนติเมตร และมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้จากวิธีเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีสปัตเตอร์ริงก็ให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือความหนาแน่นของโฮล มีค่าประมาณ  $4 \times 10^{17}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สภาพต้านไฟฟ้าประมาณ 10 โอห์ม-เซนติเมตร สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้องมีค่าสูงประมาณ 230 ไมโครโวลต์ต่อเคลวิน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทายามา-โยชิเดะ (Katayama-Yoshida) เสนอว่าสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  สามารถที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงได้ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจจะเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ทั้งในรูปของเซรามิกและฟิล์ม หนาในราว 2-3 ไมโครเมตร เพื่อนำไปประยุกต์ให้เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CdTe และ nCdS/pCu (In,Ga)Se<sub>2</sub> กันอย่างกว้างขวางโดยที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ในระดับ 15 และ 17.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInSe<sub>2</sub> และ CuGaSe<sub>2</sub> ต่างเป็นวัสดุมีราคาแพง แต่ถ้าใช้สารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  แทน CdTe ได้จะทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้

เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ได้มีการเจือด้วยธาตุต่างๆ เช่น Mg, Fe และ Cr เป็นต้น ซึ่งทำการเตรียมสาร โดยวิธีเทปแคสติง (tap casting method) โดยพาร์กและเพื่อนร่วมงาน (Park, 2005-2006) เสนอว่าสาร Mg จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมทองแดงแทนที่จะเป็น  $\text{Al}^{3+}$  ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการเจือ Fe และ Cr สภาพคล่องตัวลดลงแต่สารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดพีเนื่องจากแวนเดอวัลส์ของ Cu ( $V_{\text{Cu}}$ ) โดเด่นกว่าอินเตอร์สติเชียลของออกซิเจน ( $\text{O}_i$ ) สภาพนำไฟฟ้าในระนาบ ab จะมากกว่าในแนวแกน c ประมาณ 25 เท่า เนื่องจากชั้น  $\text{AlO}_2$  เป็นฉนวนไฟฟ้าและไม่ยอมให้พาหะอิสระไหลในแนวแกน c ได้สะดวกในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมสารและศึกษาสมบัติของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เจือด้วยธาตุต่างๆในรูปแบบของเซรามิก เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางไฟฟ้าเชิงความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SnO}$  ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยการวัดสภาพความต้านไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.5 ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.6 ศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสง ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.7 ศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SnO}$  ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$  เท่ากับ 1.5418อังสตรอม เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
- 1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยการวัดสภาพความต้านไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.5 ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง

- 1.3.6 ศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.7 ศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีหลักการและรวบรวมข้อมูลผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่
- 1.4.2 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SnO}$  ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.4.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$  เท่ากับ 1.5418 อังสตรอม เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยการวัดสภาพความต้านไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.6 ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.7 ศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.8 ศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )
- 1.4.9 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.10 จัดทำรูปเล่มโครงการงานพิเศษ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบวิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SnO}$  ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของการเจืออะตอมของธาตุ Sn ที่มีต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )
- 1.5.3 ทำให้ทราบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค, โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )
- 1.5.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )
- 1.5.5 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.5.6 ทำให้ทราบถึงปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.5.7 ทำให้ทราบถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ )

## บทที่ 2

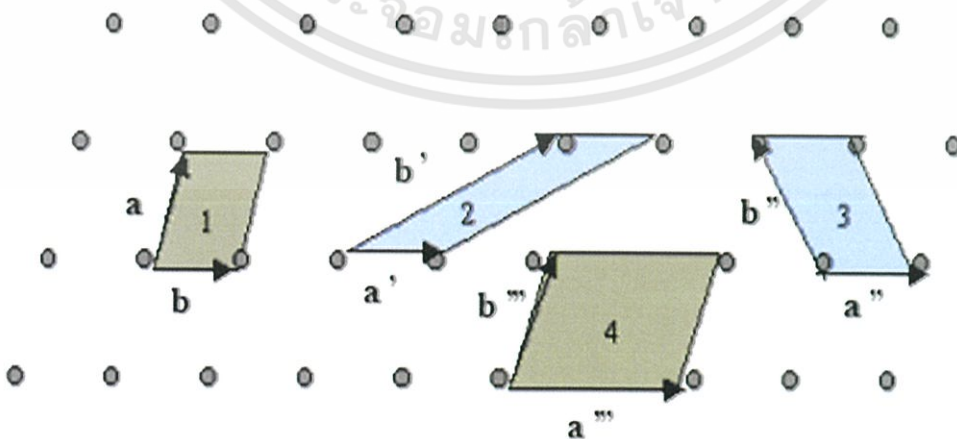
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

#### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2531 ; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้อีกมีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

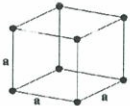
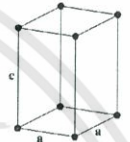
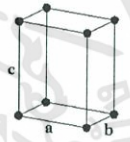

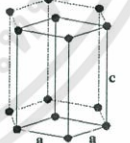
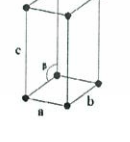
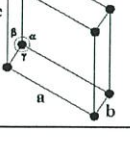
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	มุม (องศา)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60 องศา (60° rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  และ  $\bar{c}$  และมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย,2549; จูตินัย,2550; งามนิตย์,2551; จูตินัย,2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลัง ศึกษาอยู่นั้น

### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

#### การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่า ตัวอย่าง จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x = 1, y = 2$  และ  $z = 3$  การบอกตำแหน่ง

2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มี เครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}2\bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(h\ k\ l)$  ให้สังเกตดูการใช้วงเล็บและไม่มี เครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบน ตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

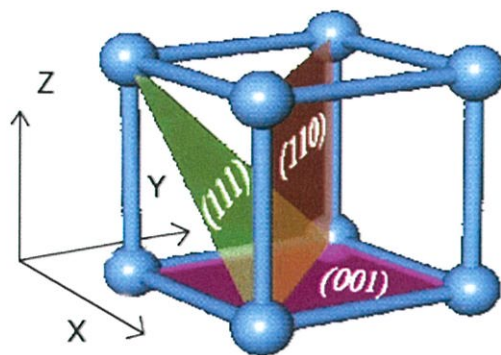
ค่า  $hkl$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น  $(x,y,z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใด ให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่ เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะ ตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก		ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
	$\frac{1}{x}$	$\frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	$0, 1, 0$	(010)
-1, 1, 1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	$-1, 1, 1$	$(\bar{1}11)$
-1, -1, -1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$	$-1, -1, -1$	$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$
0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$	$2, 2, 4$	(224)
0.5, 0.5, $\infty$	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	$2, 2, 0$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

$$l = -(h+k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ(110) จะเรียกว่า  $(11\bar{2}0)$  ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนี

เหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

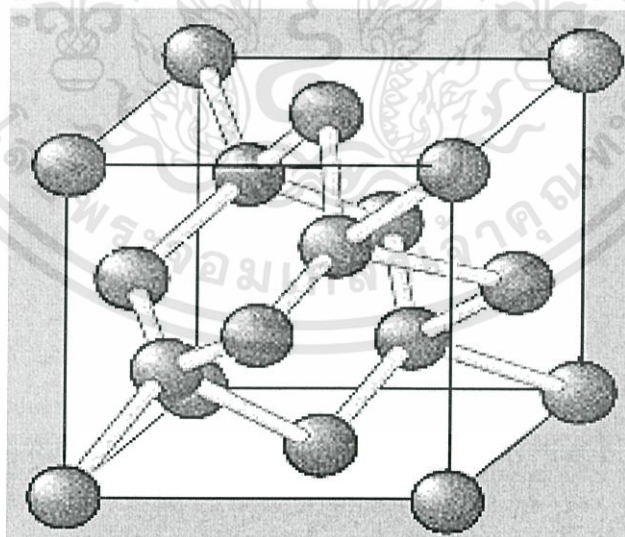
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกนั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้น (crystal structure) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ไม่เหมือนกัน เช่น สมบัติเชิงแสง ช่องว่างแถบพลังงาน สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure)

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และ II-VI เช่น GaAs, GaSb, InSb เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างผลึกแบบเพชรได้จากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก 2 โครง มีค่าคงที่โครงสร้างผลึก  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา มาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $1/4$  ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอมและอะตอมของโครงสร้างทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากัน ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดกลมบับซึ่งกันและกันทุกทิศทางนอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงสร้างผลึกจึงสมมาตรมากที่สุดในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้

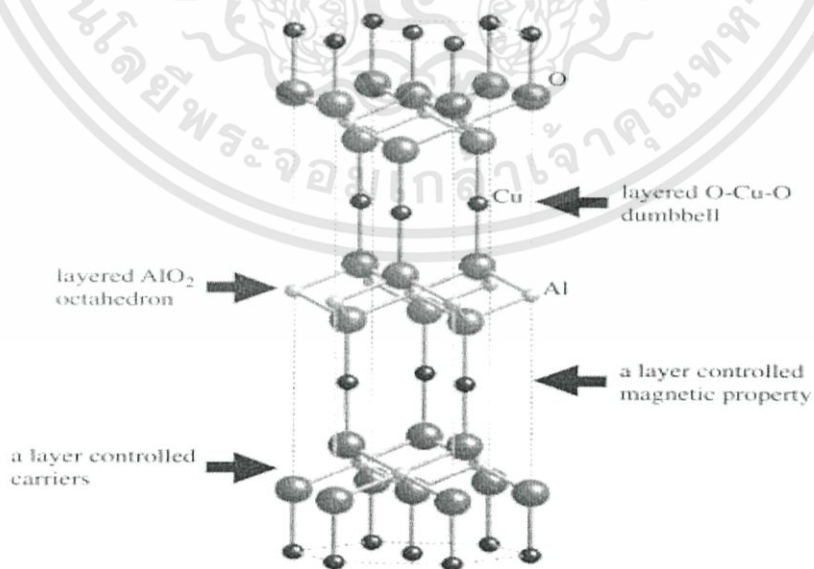


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

### 2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเดลลาฟอสไซต์ (delafossite structure)

(จูตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

สารประกอบเดลลาฟอสไซต์จัดรูป จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบออกไซด์เชิงสาม โดยมีสูตรโมเลกุล คือ  $ABO_2$  โดยที่ A เป็นอะตอมที่มีประจุ +1 เช่น ทองแดง (Cu), เงิน (Ag) หรือ พาราเดียม (Pd) เป็นต้น ซึ่งจะมีพันธะยึดเหนี่ยวกับอะตอมของออกซิเจนสองอะตอมในแบบเชิงเส้น (linear) โดยที่ระยะทางระหว่างอะตอม A จะอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 3.0 อังสตรอม ในตำแหน่งของอะตอม B จะเป็นอะตอมที่มีประจุเป็น +3 โดยที่อะตอม B จะมีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบ 6 อะตอม หรือเรียกว่าการจับพันธะแบบออกตะฮีดรัล (octahedral) โดยที่อะตอมของออกซิเจนร่วมกับอะตอม B ข้างเคียง ตัวอย่างของอะตอมในตำแหน่ง B ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และแลนทานัม (La) เป็นต้น โครงสร้างเดลลาฟอสไซต์ประกอบด้วยชั้นหลักสองชั้นที่เรียงสลับสับเปลี่ยนกันไปซึ่งประกอบด้วยชั้นระนาบของอะตอม A ซึ่งสามารถจับกับออกซิเจนในแนวแกน c และชั้นของอะตอม B ซึ่งสามารถจับกับออกซิเจนแบบออกตะฮีดรัลหรือ  $BO_2$  โดยโครงสร้างเดลลาฟอสไซต์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ 2 ชนิดโดยขึ้นกับทิศทางในการจัดเรียงของแต่ละชั้นในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABAB.. โดยมีทิศต่างกัน 180 องศา จะเรียกรวมการจัดเรียงโครงสร้างแบบ เฮกซะโกนัล 2H ซึ่งอยู่ในสเปซกรุป (space group) แบบ  $P63/mmc$  ถ้าในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABCABC... โดยที่ AB มีทิศทางเดียวกันแต่ C ทิศต่างออกไป การจัดเรียงตัวแบบนี้ เรียกว่า รอมโบฮีดรัล  $3R$  ซึ่งมีสเปซกรุปแบบ  $R\bar{3}m$  โครงสร้างเดลลาฟอสไซต์ในตำแหน่งของอะตอม A จะมีอะตอมที่ใช้ได้ในตำแหน่งนี้แล้วเกิด ความเสถียรเพียงสี่อะตอมเท่านั้น แต่ในตำแหน่งของอะตอม B นั้นจะมีอะตอมที่มีความเหมาะสมอยู่หลายชนิด



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเดลลาฟอสไซต์ การจัดเรียงของอะตอมแบบรอมโบฮีดรัล  $3R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์,2545; จูตินัย,2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์,2551; จูตินัย,2551)

ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตาม โครงสร้างผลึก ในอุดมคติทั้งหมด โดยเฉพาะ โครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอ แล้วความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่ง ตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) – ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

#### 2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

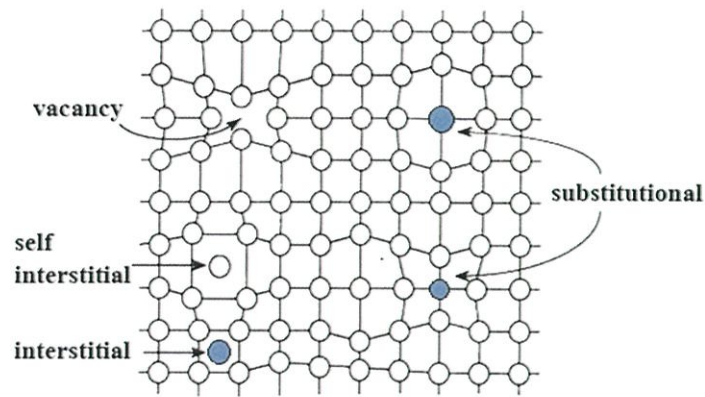
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.5 นี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมใน โครงสร้างผลึก

ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออน หลุดหายไปโดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายจากตำแหน่งของ โครงที่ผลึกอยู่ในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)

ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบาง อะตอมหรือ ไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของ โครงผลึกแต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็น ที่ว่างของ โครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีของอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของ อะตอมหลัก

ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนเคิล (Frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออน หลุดหายไปจากตำแหน่งของ โครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็น ที่ว่างของ โครงผลึก

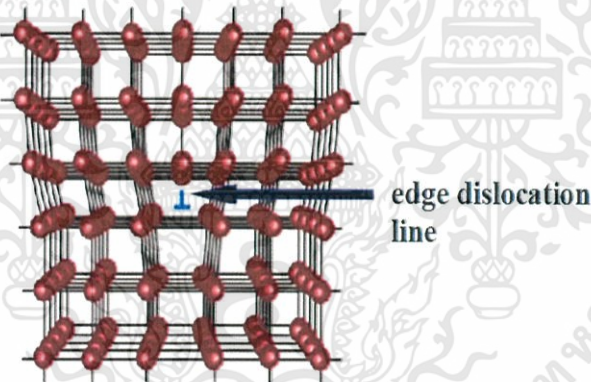
ง) การผิดรูปของ โครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของ อะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไปเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ โครงผลึกทำให้ลักษณะของ โครงผลึกนั้น ไม่ เป็นระเบียบ



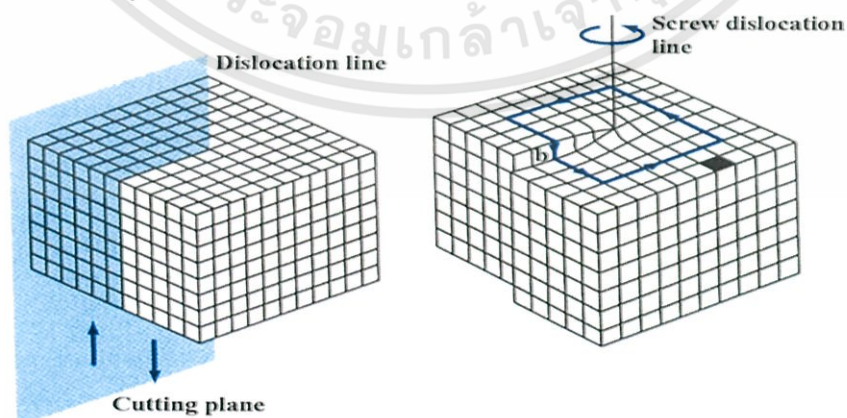
รูปที่ 2.5 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ

#### 2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกชื่อว่า ดิสโลเคชัน (dislocations) เกิดจากความผิดปกติแบบจุด โครงสร้างผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติกของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.6 และ ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



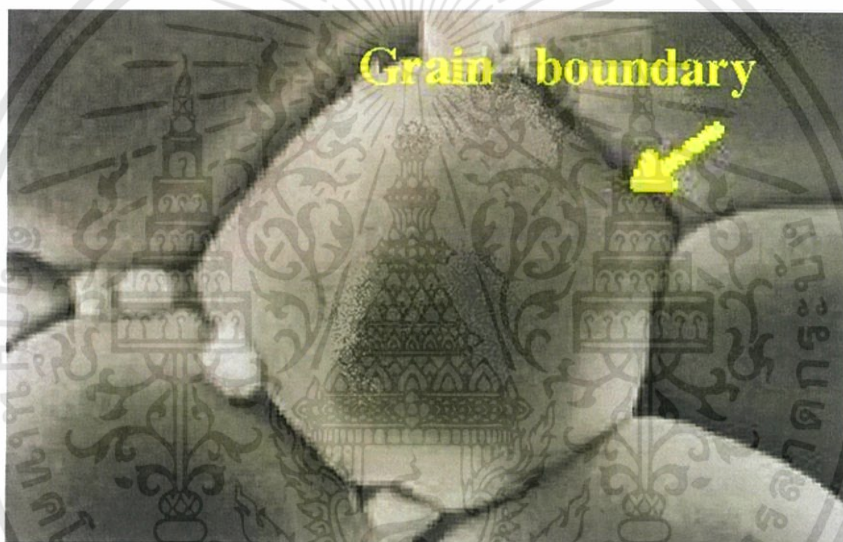
รูปที่ 2.7 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), ตลอดจนเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรนซึ่งเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.8 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity,1956;Kittel, 1971;งามนิศย์,2545;ฐิตินัย,2549;ฐิตินัย,2550;งามนิศย์,2551;ฐิตินัย,2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและ แทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

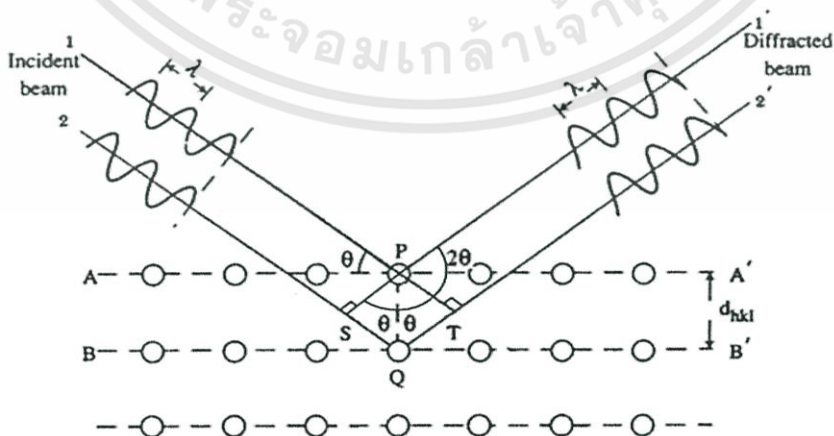
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

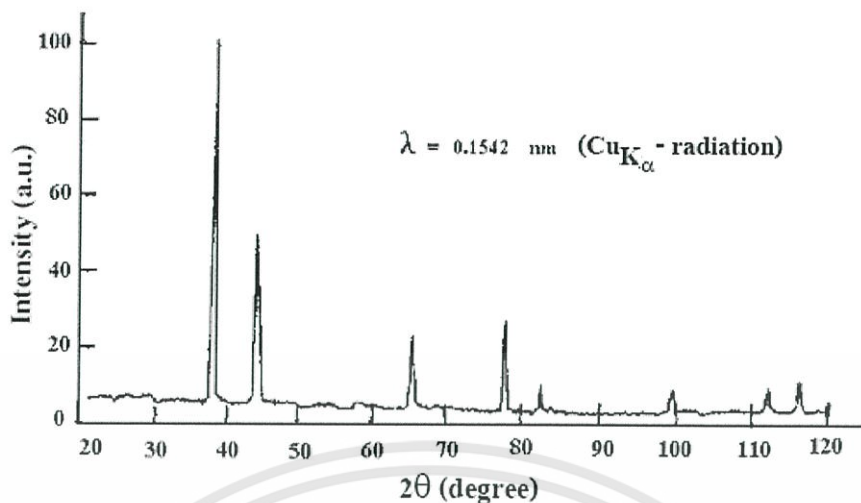
$n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

รูปที่ 2.10 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ต่างกัน สังเกตได้จากพีก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ (2.3)

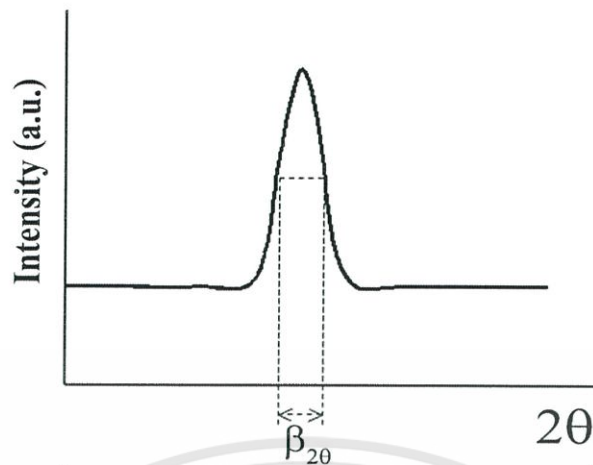
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการ (2.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

$h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.11 วิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารูปที่ 2.11 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) และค่าความเครียด (strain) ได้จากสมการ

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + \frac{\epsilon \sin \theta}{\lambda} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน

$\beta_{2\theta}$  คือ ระยะเวลากว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด  
(full width at half-maximum of the diffraction peak)

$\epsilon$  คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในผลึก

### 2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

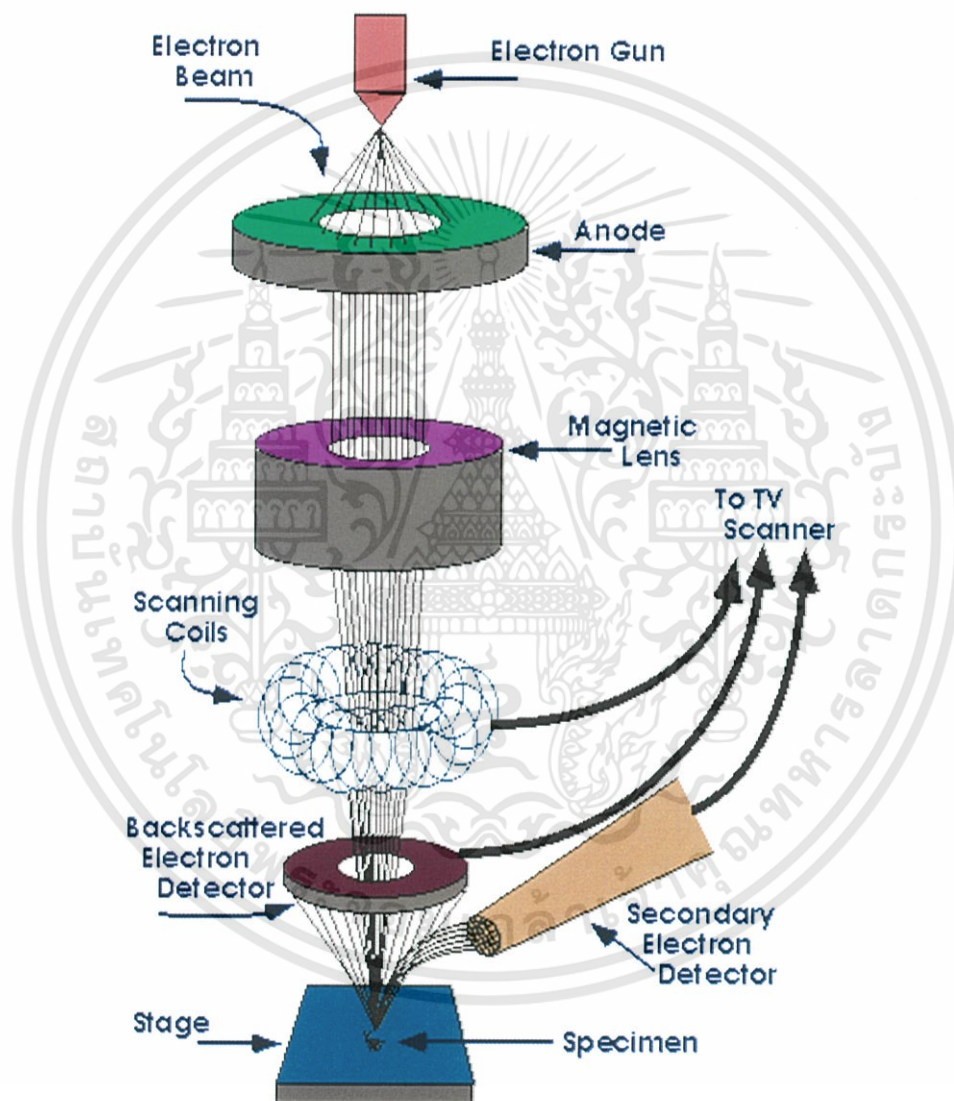
ส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551; Hearle, 1973)

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

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำโดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขาดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบ เอกซ์-เวฟ เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิศย์,2545; จูตินัย,2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551; Kittel,1971; Runyan,1975; van der Pauw L.J., 1958; วีรชัย, 2547; สุกฤษฏ์,2547; อุปถัมภ์,2548; สมเกียรติ, 2542; คูสิต, 2535; คูสิต, 2542; Sze, 1981)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนการกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันของการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.6)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ในระดับพลังงาน  $E$  ที่ อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)

$k$  คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant)  $= 1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

### 2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_C(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิใด ๆ คือ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (2.7)$$

เมื่อ  $N_C$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว

$$N_C(E) = 2\pi \left( \frac{2m_c^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $m_c^*$  คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.8) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_i &= \int_0^{E_i} n(E)dE \\ &= \int_0^{E_i} N_C(E)f(E)dE \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมาก ๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานช้อน (non-degeneracy) และ  $n(E)d(E)$  มีค่าใกล้ศูนย์ที่าระดับพลังงานสูง ๆ สมการที่ (2.9) จึงสามารถขยายขอบเขต  $E_i$  ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.9) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_c^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^\infty \frac{E^{2/3}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.10)$$

เนื่องจาก  $\exp[(E-E_F)/kT] + 1 \gg 1$  นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.12)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.13)$$

โดย

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน  
 $m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์  
 $N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.15)$$

และ

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.16)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left( \frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right)^{3/4} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

### 2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสถานะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน และโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.18)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.19)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานช้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

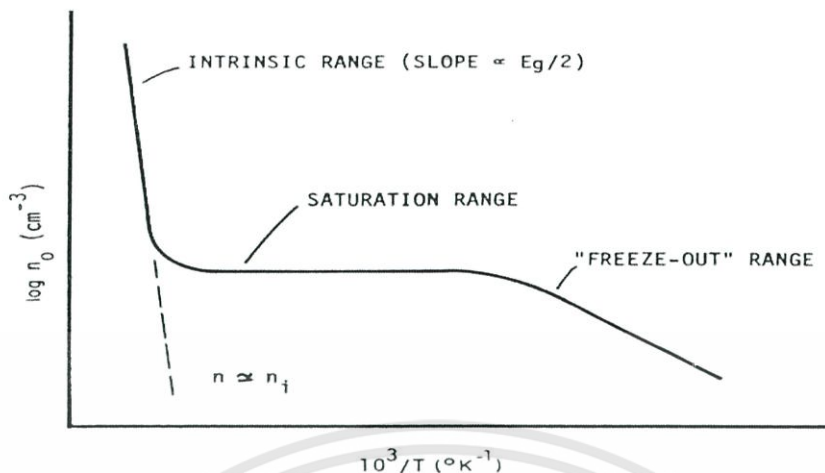
$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.20)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level:  $E_d$ ) และอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level:  $E_a$ ) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.21)$$

- เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ  
 $N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ  
 $n_d, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือ



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของอะตอมของสารเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงาน เนื่องจากความร้อนพาหะอิสระเกิดจากสองส่วนที่มาจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.23) ลดรูปได้เป็น

$$N = p + (N_d - N_a) \tag{2.22}$$

จากสมการที่ (2.23) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \tag{2.23}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \tag{2.24}$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือปนหลายๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมี การเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิต่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.23) และ (2.24) จะกลายเป็นสมการ อินทรินสิก

$$n = p = n_i \tag{2.25}$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ 0 เคลวิน จะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.14) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.26)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.27) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.27)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.18), (2.27) และ (2.28) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$N_c' = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.30)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N_c') + \frac{1}{2} \left[ (N_d + N_c')^2 + 4N_c'(N_d - N_a) \right]^{1/2} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $E_d \gg kT$  และ  $N_c'$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.31) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N'_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} + \dots$$

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.32)$$

ถ้า  $N_a \gg N'_c$  สมการที่ (2.32) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N'_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.33)$$

ถ้า  $N_a$  มีค่าน้อยมากนั่นคือ  $N_d \gg N'_c \gg N_a$  จะทำให้สมการที่ (2.33) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.34)$$

หรือ

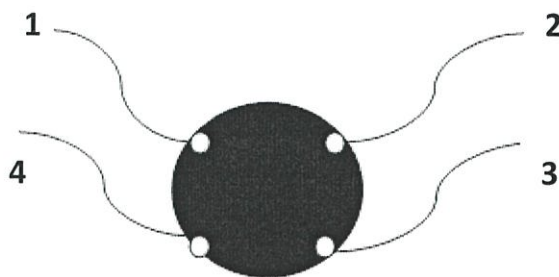
$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.35)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่า ย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.34) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $N_d < n < N_a$  และลดลงตามสมการที่ (2.35) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $n < N_d < N_a$

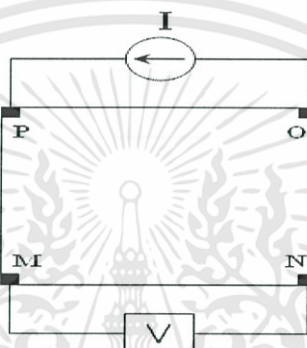
## 2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(จูตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.15 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.36)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.36)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.37)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.37)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย 
$$f = 1 \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.39)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

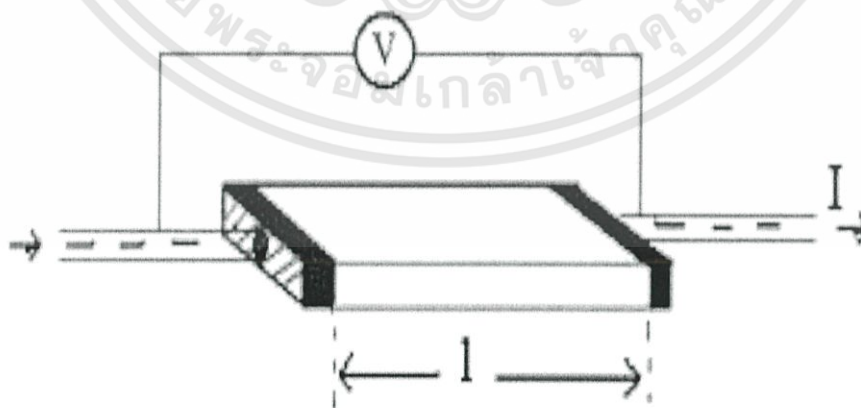
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.40)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

**2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)** (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.16 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

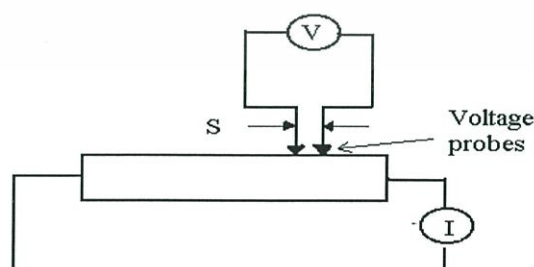
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.41)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.42)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัดหากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

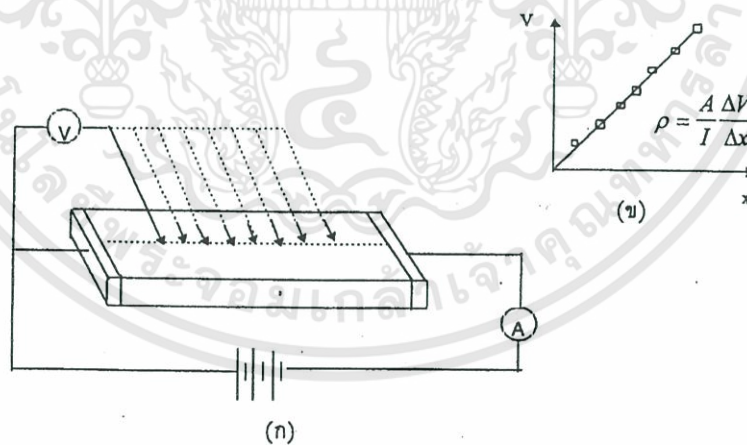
#### 2.2.4 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว (two point probes) (ฐิตินัย,2550; Runyan,1975; Elangovan,2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw,1958; คุณิต, 2535;Gangopadhyay,2004)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัด โดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง และนอกจากนี้ควรคำนึงถึง ความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมี มาตรการส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.30 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.18 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น  
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง  
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Kittel,2005; งามนิตย์,2530;ฐิตินัย,2531; งามนิตย์,2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ,2542; ฐิตินัย,2552; วีรัชย์,2547; คุสิต,2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.43)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.44)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ  
 $\mu_e, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.46) และ (2.47) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.46)$$

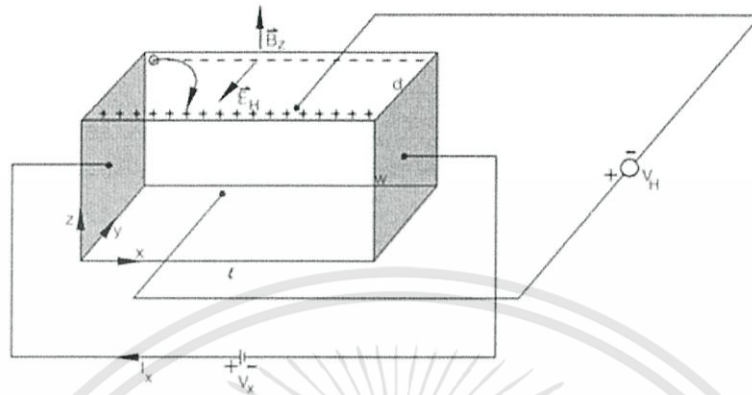
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.49)

จาก

$$I = nqvA \quad (2.48)$$

ดังนั้น

$$I_x = qnV_x \left( wd \right) \quad (2.49)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.50)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.51)$$

จากรูปที่ 2.19

$$A = w \cdot d \quad (2.52)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.50) และ (2.51) และ (2.52)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.53)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโซลเบียงเบนไปในทิศ  $-y$  ธรรมดาในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall voltage:  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโซลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.54)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโซลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โซลเคลื่อนที่ในทิศ  $x$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.55)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.91) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.56)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.57)$$

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.58)$$

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_z}{d} \end{aligned} \quad (2.59)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.60)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.61)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.62)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.63)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.64)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.65)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนในซึ่สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.66)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.63) และ (2.64) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.67)$$

$$\text{หรือ จากสมการที่ (2.61) และ (2.67)} \quad \mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{h}{B_x} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.68)$$

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อกำหนดความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.2.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; วีรัชย์, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สุกฤษฎ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; Tilley, 2004)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใด ๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.20 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม 
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.69)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.70)$$

เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก

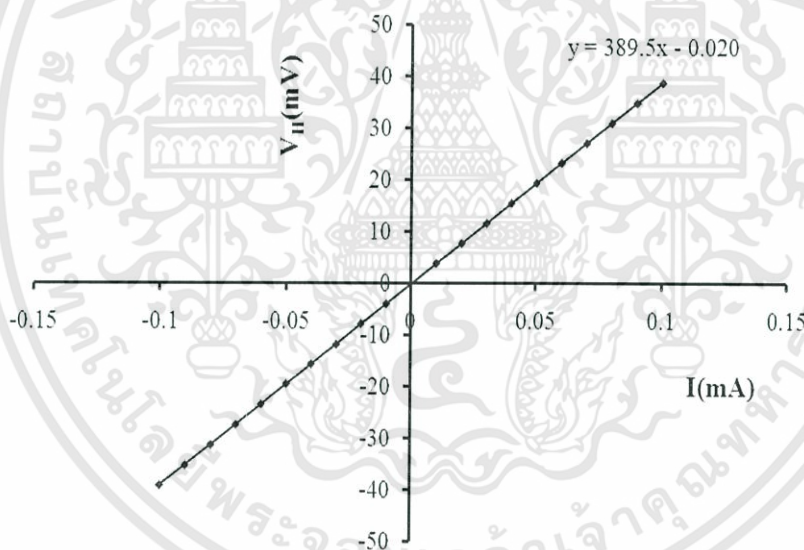
$D$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.70) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.71)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.21 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.72)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

### 2.3 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

(จิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958; คุณิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

#### 2.3.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

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

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \tag{2.74}$$

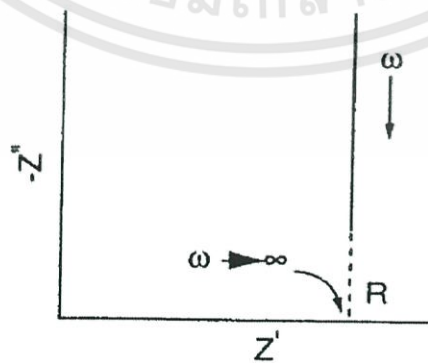
อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-1}{\omega C}$$

และ  $Z_R = R_s$  แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_s - \frac{j}{\omega C} \tag{2.75}$$

โดยที่  $R_s$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน  $\frac{1}{\omega C}$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่อำนาจ  $R_s$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.3.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

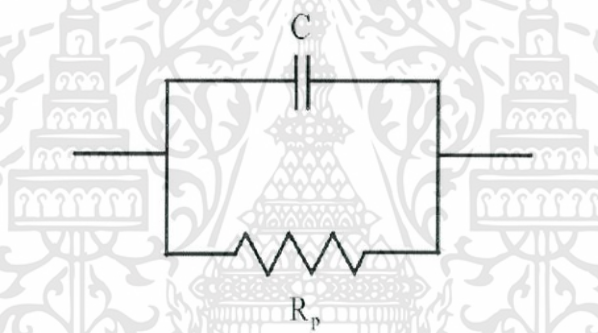
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.23 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.76)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.23 ดังนั้นสมการ (2.76) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.77)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.78)$$



รูปที่ 2.23 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $(1 - j\omega R_p C)$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.78) จะได้

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

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

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} \right] \quad (2.79)$$

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

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่  $Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 C + 1}$  (2.80)

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

$$= -(1 + \omega^2 C_p R_p^2)(C_p R_p^2) + (\omega C_p R_p^2)(2\omega C_p^2 R_p^2)$$

$$= -(C_p R_p^3) - (\omega^2 C_p^3 R_p^4) + (2\omega^2 C_p^3 R_p^4)$$

$1/C_p R_p^2$  คูณตลอด

$$= -1 - (\omega^2 C_p^2 R_p^2) + (2\omega^2 C_p^2 R_p^2)$$

$$1 = (-\omega^2 + 2\omega^2) C_p^2 R_p^2$$

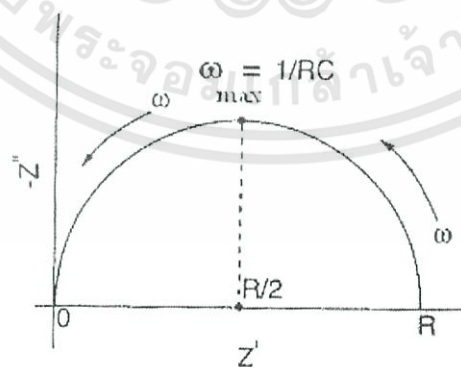
$$1 = \omega^2 C_p^2 R_p^2$$

$$\omega_{\max} = 1/C_p R_p$$

$$Z'' = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right]$$
 (2.81)

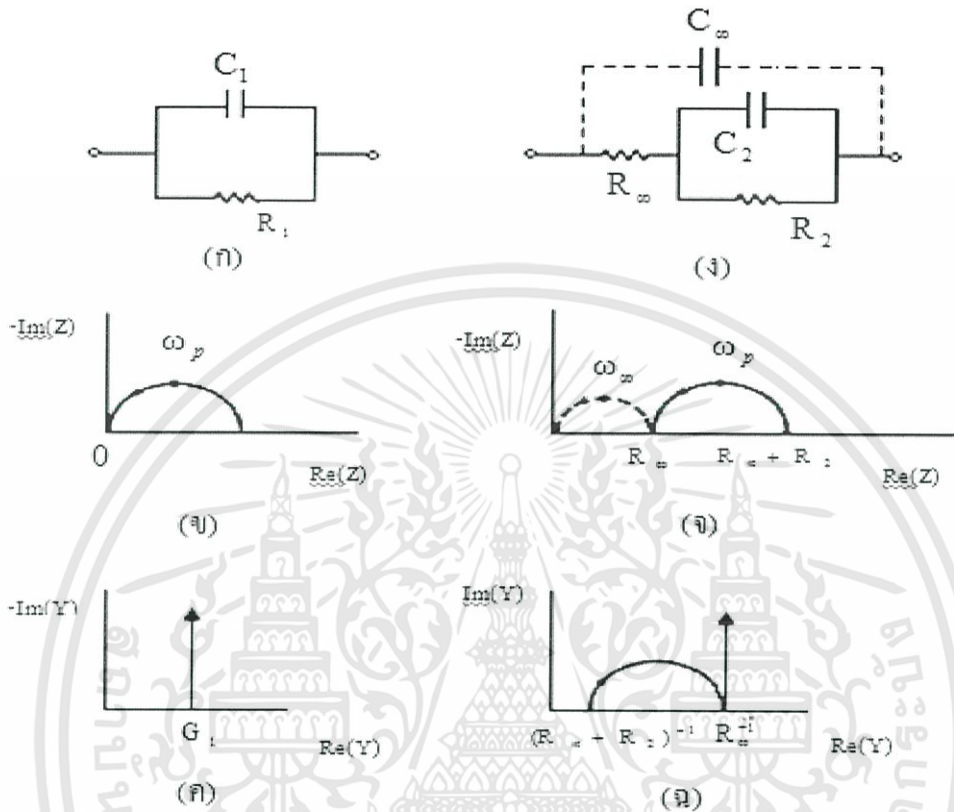
เมื่อ  $\tau =$  ค่าคงตัวเวลา (time constant)  $= R_p C$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.24



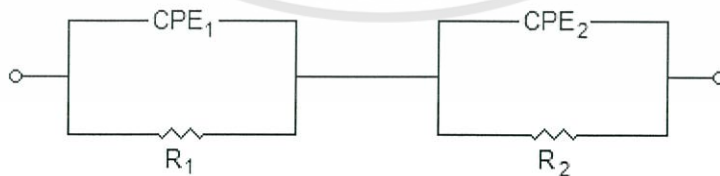
รูปที่ 2.24 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูป  
ครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (impedance spectroscopy) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (ข,จ) แอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (ค,ฉ)

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  จะแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงวงจรสมมูลในการอธิบายอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$

จากข้อมูลการทดลองจะทำให้รู้ค่า  $f_{\max}(\text{LF})$  ที่ความถี่ต่ำและจากจุดตัดแกน  $x$  จะได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  เราสามารถ คำนวณหาค่า  $C_2$  ได้จากสูตร

$$\omega_{\max} R_2 C_2 = 1$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_{\max} R_2} = \frac{1}{2\pi f_{\max}(\text{LF}) R_2} \quad (2.82)$$

โดยปกติค่า  $CPE_2$  จะมากกว่า  $C_2$  เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า  $C_2$  แล้วก็จะทราบค่า  $CPE_2$  อย่างคร่าวๆ ได้ แล้วจะนำค่าไปใส่โปรแกรม EIS เพื่อจำลองแบบต่อไป

ในทำนองเดียวกันที่ความถี่สูง เราจะได้ค่า  $R_1$  และจะรู้ค่า  $f_{\max}(\text{HF})$  อย่างคร่าวๆ ได้จากการจำลองแบบ ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่า  $C_1$  ได้จากสูตร

$$\omega_{\max} R_1 C_1 = 1$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_{\max} R_1} = \frac{1}{2\pi f_{\max}(\text{HF}) R_1} \quad (2.83)$$

โดยปกติค่า  $CPE_1$  จะมากกว่า  $C_1$  เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า  $C_1$  แล้วก็จะทราบค่า  $CPE_1$  อย่างคร่าวๆ ได้

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{\text{geo}}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  ซึ่งก็คือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.25 ส่วนค่าความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance :  $R_b$ ) ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty} C_{\infty} = R_1 C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุดคือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.25 (ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  s ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{\max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{\max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีอย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{\max} \tau_D \leq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือกราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้ศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีที่มี  $R_1 = R_\infty$  และ  $C_1 = C_\infty$  ซึ่งทำให้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ชิดกับขั้วอเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.25 (ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูปที่ 2.25 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 รูป ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไข่วางรูปที่ 2.25 (จ) ซึ่งมักจะเกิดที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแดนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรรูปที่ 2.25 (ก) ค่าแอดมิตแดนซ์ลัทซ์ คือ ผลรวมของแอดมิตแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.84)$$

กราฟของสมการที่ (2.82) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.25 (ค) ส่วนแอดมิตแดนซ์ของวงจรรูปที่ 2.25 (ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty} \quad (2.85)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.83) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.25 (ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือ แกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.86)$$

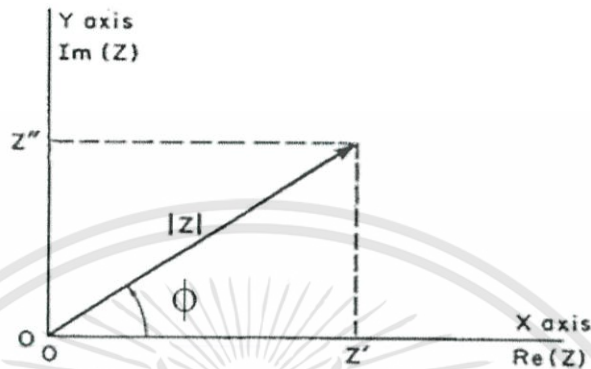
ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.87)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.24 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.3.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z^* = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในรูปแบบ โคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และ โคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.26 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

และ

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.88)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad (2.89)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

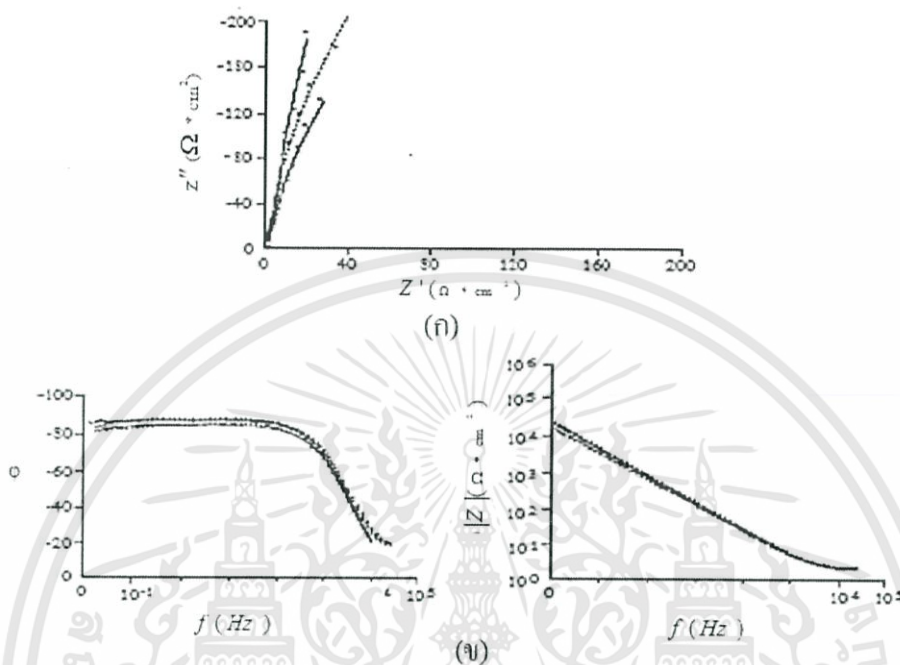
ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.90)$$

มุมเฟสระหว่างทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุ สมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่โดย แกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของในควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส  $\phi = -90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา

แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element, CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.26 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.28 ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด

ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

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

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \tag{2.91}$$

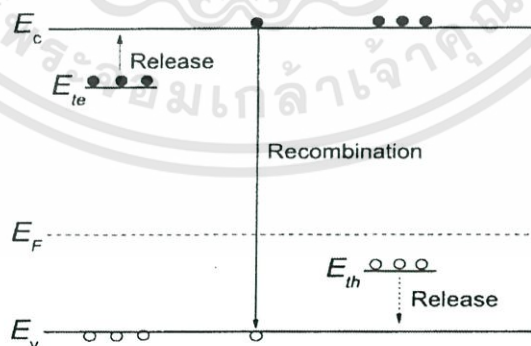
ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double - layer capacitance,  $C_{dl}$ ) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = n \sqrt[n]{\frac{P}{R_s^{(n-1)}}} \tag{2.92}$$

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

## 2.4 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิศย์, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.29 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_h$ ) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_e$ ) (Jiang, 2012) คำว่า การปลดปล่อย (Release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับ แถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (Recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮล อยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อยแต่เมื่อมีการฉายแสงลงบน สารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีความถี่สูงเพียงพอเมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้น ด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระใน แถบนำและ/หรือ โฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัว แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.29 ระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_e$ ) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_h$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจุดที่บและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.93)$$

และจากความสัมพันธ์  $\mu = v/\xi$  และ  $\xi = V_a/l$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.94)$$

แทนสมการที่ (2.94) ลงใน (2.93) จะได้

$$I = en\mu n_a \left( \frac{wd}{l} \right) \quad (2.95)$$

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

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.96)$$

แทนสมการที่ (2.41) ลงใน (2.40) จะได้ว่า กระแส  $I_i$  ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด  $i$  คือ

$$I_i = e\mu_{ii} V_a \left( \frac{wd}{l} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.97)$$

กระแสรวมทั้งหมด ( $I$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left( N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.98)$$

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

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu_{ii}} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.99)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา  $d$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.95) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left( \frac{w}{l} \right) (nd) V_a \\ &= e\mu \left( \frac{w}{l} \right) \sigma_t V_{av} \end{aligned} \quad (2.100)$$

เมื่อ  $\sigma_i$  คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากัมมันตภาพะมีหลายชนิด กระแสรวม ( $I$ ) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกัมมันตภาพะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sum_i \left( \sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.101)$$

เมื่อ  $\sigma_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu\mu_a} \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.102)$$

โดยที่

- $V_a$  คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์  
 $\mu$  คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น (เซนติเมตร)<sup>2</sup> ต่อ (โวลต์.วินาที)  
 $w$  คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร  
 $l$  คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร  
 $d$  คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร  
 $I$  คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา  $t$  ใดๆ  
 $\tau_i$  คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)  
 $N_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น (ต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)  
 $\sigma_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็น (ต่อตารางเซนติเมตร)

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_i = \tau_{i0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.103)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_i &= \ln \tau_{i0} + \left(\frac{E_t}{k}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{i0} + \frac{E_t}{(1,000k)} \left(\frac{1,000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ 
$$\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1,000)k}$$

ดังนั้น 
$$E_t = \frac{(1,000)k}{q} \times (\text{ความชัน})$$

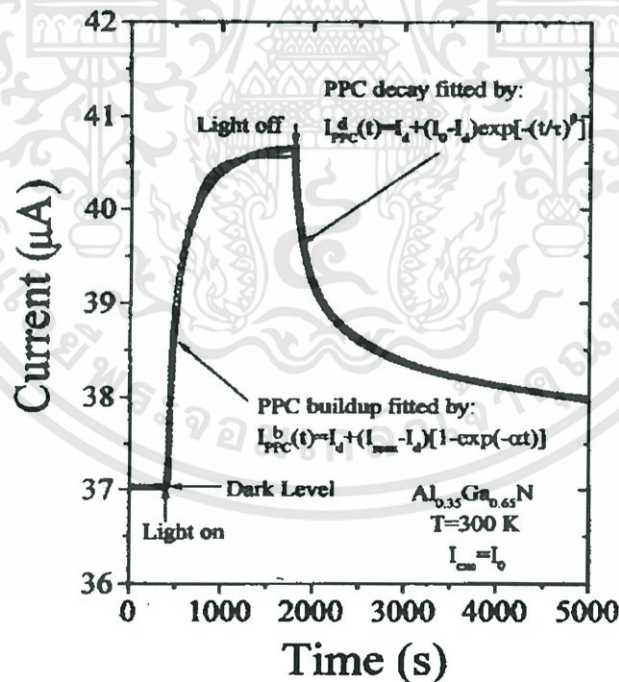
$$= (0.086) \times (\text{ความชัน}) \quad \text{อิเล็กตรอน โวลต์} \quad (2.104)$$

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

$$I_p = I_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.105)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ  $t = 0$ ) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา ( $t$ ) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.106)$$

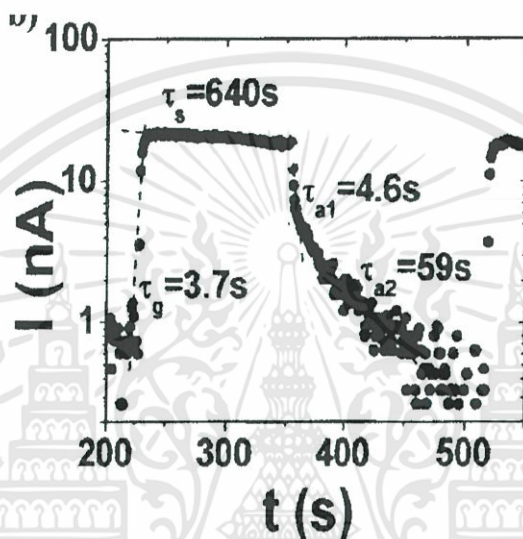


รูปที่ 2.30 แสดงกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.105) - สมการที่ (2.106) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.107)$$

ความชันของกราฟคือ  $\frac{1}{\tau_d}$  ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  (ดังรูปที่ 2.31) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I_p$  กับ  $t$  ของสเปกตรัมไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสดำขึ้นและช่วงกระแสดำลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.101) และสมการที่ (2.106) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.108)$$

เพื่อให้  $\tau_{d1}$  และ  $\tau_{d2}$  มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.108) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตเรตเอ็กซ์โพเนนเชียล(stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.109)$$

จากสมการที่ (2.109) สามารถที่จะหาค่า  $\sigma_{t1}$  และ  $\sigma_{t2}$  ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.102) ดังนี้ คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.110)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.111)$$

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

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right)$$

สมการที่ (2.109) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2 \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right)^\beta \right] \quad (2.112)$$

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{\tau_{r1}} \right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{r1}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.113)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.98) และ (2.109) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t1} \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t2} \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.114)$$

จากสมการที่ (2.114) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.115)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.116)$$

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

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right)$$

สมการที่ (2.114) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

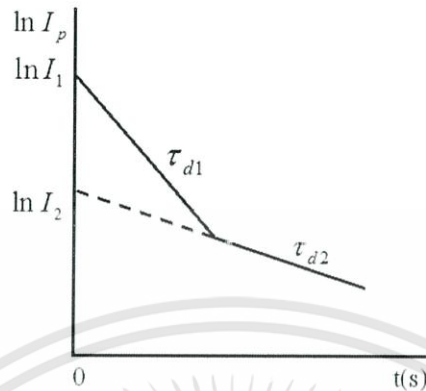
$$|I_p| = A_1'' \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2'' \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.117)$$

ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาจัน ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2''' \left\{ 1 - \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.118)$$

### 2.4.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า  $\tau_{d1}$  หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.119)$$

เราสามารถหาค่า  $I_1$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  (คือ  $\ln I_1$ ) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะของฟิล์มบาง ได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.120)$$

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

ในทำนองเดียวกัน  $\tau_{d2}$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.121)$$

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

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.122)$$

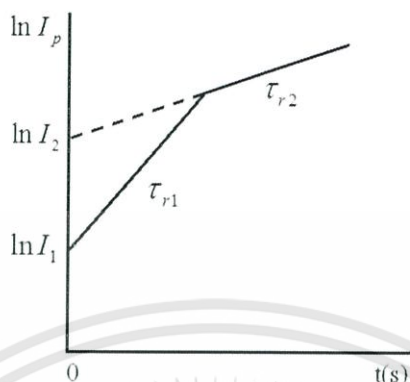
สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.123)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.124)$$

## 2.4.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.125)$$

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

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

$$\ln \left[ 1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -\frac{t}{\tau_r} \quad (2.126)$$

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 (2.126) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.127)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.127) จะใช้ได้จริงเมื่อ  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น

ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.121), (2.122), (2.123) และ (2.124) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

## 2.5 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกที่อุณหภูมิต่างๆ (งามนิศย์, 2556; จูตินัย, 2556)

เซโตะ (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหุประจุในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เซรามิก เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักประจุที่ขอบของเกรนร่วมกับกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ มีขนาด  $L$  ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)

2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ

3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้

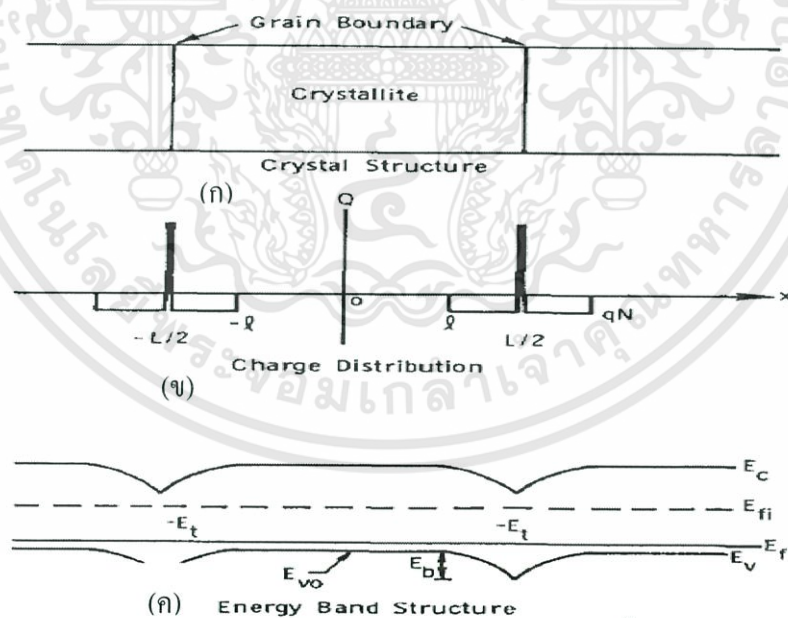
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเกรน

5. ขอบเกรนหรือผลึกถือว่าเป็นกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน โดยเริ่มแรกกับดักประจุจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่ออิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้วกับดักประจุกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักประจุมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น กับดักประจุจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับดักประจุจะเป็นผู้ให้ (donor)

7. ระดับพลังงานของกับดักประจุ ( $E_t$ ) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน

8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด



รูปที่ 2.34 แสดงแบบจำลองตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ

- ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
- การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
- โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด หรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ ( $N_a^*$ ) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.5.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซรามิกในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดย เบ็คคารินิ (Baccarini, 1978) เมื่อ  $N_a < N_a^*$  ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ระดับเฟอร์มิ ( $E_f$ ) จะอยู่ระดับเดียวกับ  $E_t$  สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a V_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.128)$$

เมื่อ

$$v_c = \left[ \frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

และ

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

สมการที่ (2.128) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1000k} \left( \frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

$$E_a = \frac{(1000k)}{1.8 \times 10^{-19}} \times (\text{ความชัน}) \quad \text{อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.129)$$

โดยที่  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้นมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์

สำหรับความหนาแน่นของกัปเจอร์ ( $N_t$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.128) เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของเกรน ( $L$ ) ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.130)$$

ส่วนความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (2.131)$$

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุ ( $E_c$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Sharma, 2012)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_c \quad (2.132)$$

### 2.5.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในเซมิคอนดักเตอร์ชนิด p-type

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วน ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $N_a > N_d^*$  สำหรับเงื่อนไขแรกคือ  $E_F - E_c \gg kT$  สภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[ \frac{L e^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.133)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า สมการที่ (2.133) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

$$E_a = \frac{(1000k)}{1.8 \times 10^{-19}} \times (\text{ความชัน}) \quad \text{อิเล็กตรอน โวลต์} \quad (2.134)$$

ซึ่ง  $E_a$  ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ( $E_b$ ) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (2.135)$$

$\epsilon_s$  คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของเซรามิก

จากสมการที่ (2.135) ค่า  $E_b$  จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) อยู่สูงกว่าระดับพลังงานกับดักพาหะ ( $E_t$ ) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมด จนเต็มส่งผลให้กับดักประจุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.136) รวมทั้งความยาวเดอบาย ( $L_D$ ) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$L_D = \left[ \frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.136)$$

สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ  $E_t + E_b - E_F \gg kT$  เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักพาหะ ( $E_t$ ) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) แสดงว่ากับดักพาหะบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้า ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_d^{-1} N_b)^{\frac{1}{2}} (kT N_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.137)$$

$$\text{ซึ่ง } E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t$$

### 2.5.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction : VRH), (งามนิตย์, 2555 ; จิตินัย, 2556)

การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำมากจะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (localized state) ซึ่งเป็นสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{hop}} &= \sigma = \frac{\sigma_0}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \\ \sigma T^{\frac{1}{2}} &= \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \\ \ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) &= -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln\sigma_0 \end{aligned} \quad (2.138)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.138) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยความชันของกราฟ คือ  $(-T_0)^{\frac{1}{4}}$  ส่วน  $\ln \sigma_0$  คือ จุดตัดแกน  $\ln \left( \sigma T^{\frac{1}{2}} \right)$  ที่จุด  $T^{-\frac{1}{4}} = 0$  โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.139)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.140)$$

เมื่อ

$v$  คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (Debye temperature) จะมีค่า  $\approx 1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์  
 $N(E_F)$  คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)

$e$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์

$T_0$  คือ องศาของความไม่เป็นระบบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.139) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.141)$$

เอาสมการที่ (2.141) คูณกับสมการที่ (2.140) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2}$$

$$\alpha^2 = \left[ \frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0$$

$$\alpha = \left[ \frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.142)$$

เมื่อ ความถี่โฟนอน  $v \approx 1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.143)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.141) ลงในสมการที่ (2.143) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[ \frac{16\pi^{\frac{3}{2}} k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} = (2 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.144)$$

ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance :  $R$ ) มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy :  $W$ ) มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงความสัมพันธ์

$$R = \left[ \frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.145)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.146)$$

เมื่อทราบค่า  $N(E_F)$  และ  $N_a$  เราสามารถที่จะคำนวณหาค่า  $N_d$  ได้จากความสัมพันธ์

$$N(E_F) = \left( \frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^2 \left( 1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^3 \quad (2.147)$$

โดยที่  $N_d$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำ

ชนิดพี ซึ่งอัตราส่วน  $\frac{N_d}{N_a} = k$  และ  $k < 1$  เสมอ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  รวมกับผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยวิธีปฏิบัติการเกิด เป็นสารละลายของแข็งและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้ทั้งหมด ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้น

- คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ )
- อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}$ )

2. ครกอาเกต

3. ชุดเครื่องมืออัดเม็ด

4. เครื่องอัดไฮโดรลิก

5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร

6. เตาเผาสาร

7. ครุชิลเบลชนิดอลูมินา

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  รวมกับผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ดั่งสมการ



มวลอะตอมของ Cu , Al , Sn และ O มีค่าดังนี้คือ 63.5460 , 26.9815 , 118.7100 และ 15.9994 ตามลำดับ

ดังนั้นจะได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuO} = 63.5460 + 15.9994 = 79.545$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3 = 0.5[(26.9815)(2) + (3)(15.9994)] = 50.980$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2 = 63.5460 + 26.9815 + (2)15.9994 = 122.526$  กรัมต่อโมล

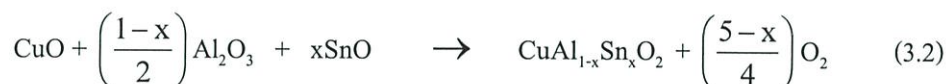
ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  จำนวน 79.5454 กรัม รวมกับผงผลึกของสารประกอบ  $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3$  จำนวน 50.9806 กรัม จะได้ ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  จำนวน 122.5263 กรัม แต่ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  จำนวน 3 กรัม เราต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  และ  $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3$

ดังนั้นคือ

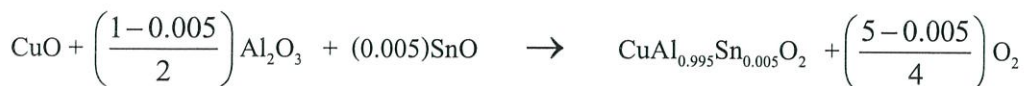
ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO} = 79.5454(3) / 122.5263 = 1.9476$  กรัม

ผงผลึกของสารประกอบ  $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3 = 50.9806(3) / 122.5263 = 1.2483$  กรัม

สำหรับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะแสดงการคำนวณหาผลของสารประกอบตั้งต้น โดยเริ่มจากกรณีเจืออะตอมของธาตุ Sn ในปริมาณค่า x ใดๆ โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ดังสมการ



กรณี  $x = 0.005$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.4975)\text{Al}_2\text{O}_3 = (0.4975)(101.9612) = 50.7257$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.005)\text{SnO} = (0.005)(134.7094) = 0.673547$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2 = 63.5460 + (0.995)26.9815 + (0.005)118.7100$   
 $+ (?)15.9994 = 122.9849$  กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติโดยตรงคือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 122.9849 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/122.9849 = 1.9404$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9404 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 122.9849 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4975)\text{Al}_2\text{O}_3 = (0.4975)(101.9612) = 50.7257$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4975)\text{Al}_2\text{O}_3 = 50.7257(3)/122.9849 = 1.2374$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.2374$  กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 122.9849 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.005)\text{SnO} = (0.005)(134.7094) = 0.673547$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.005)\text{SnO} = 0.673547(3)/122.9849 = 0.01643$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.01643 กรัม

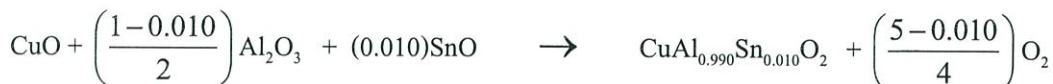
สรุปเขรามิกสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.995}\text{Sn}_{0.005}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้ คือ

ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9404 กรัม

ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.2374$  กรัม

ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.01643 กรัม

กรณี  $x = 0.010$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.4950)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.4950)(101.9612)$  = 50.4708 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.010)\text{SnO}$  =  $(0.010)(134.7094)$  = 1.3471 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  =  $63.5460 + (0.990)26.9815 + (0.010)118.7100$   
 $+ (2)15.9994$  = 123.4436 กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ คือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 123.4436 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/123.4436$  = 1.9332 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9332 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 123.4436 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4950)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.4950)(101.9612)$  = 50.4708 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4950)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $50.4708(3)/123.4436$  = 1.2266 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.2266 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 123.4436 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.010)\text{SnO}$  =  $(0.010)(134.7094)$  = 1.3471 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.010)\text{SnO}$  =  $1.3471(3)/123.4436$  = 0.0327 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0327 กรัม

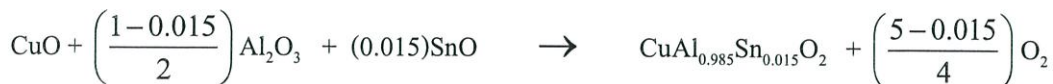
สรุปเขรามิกสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.990}\text{Sn}_{0.010}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้ คือ

ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9332 กรัม

ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.2266 กรัม

ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0327 กรัม

กรณี  $x = 0.015$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.4925)\text{Al}_2\text{O}_3 = (0.4925)(101.9612) = 50.2159$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.015)\text{SnO} = (0.015)(134.7094) = 2.0206$  กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2 = 63.5460 + (0.9850)26.9815 + (0.015)118.7100 + (2)15.9994 = 123.9022$  กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไครยางค์ คือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 123.9022 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/123.9022 = 1.9260$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9260 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 123.9022 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4925)\text{Al}_2\text{O}_3 = (0.4925)(101.9612) = 50.2159$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.4950)\text{Al}_2\text{O}_3 = 50.2159(3)/123.9022 = 1.2159$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.2159$  กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 123.9022 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.015)\text{SnO} = (0.015)(134.7094) = 2.0206$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.015)\text{SnO} = 2.0206(3)/123.9022 = 0.0489$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0489 กรัม

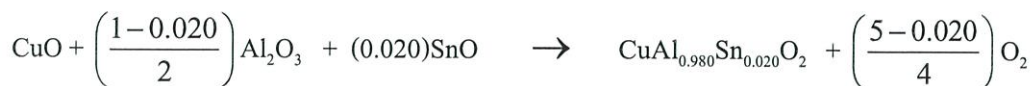
สรุปเราต้องการสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.985}\text{Sn}_{0.015}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้ คือ

ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9260 กรัม

ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.2159$  กรัม

ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0489 กรัม

กรณี  $x = 0.020$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.49)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.49)(101.9612)$  = 49.9609 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.020)\text{SnO}$  =  $(0.020)(134.7094)$  = 2.6942 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  =  $63.5460 + (0.98)26.9815 + (0.020)118.7100$   
+  $(2)15.9994$  = 124.3609 กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไครยางค์ คือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 124.3609 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/124.3609 = 1.9189$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9189 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 124.3609 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.49)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.49)(101.9612) = 49.9609$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.49)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $49.9609(3)/124.3609 = 1.2052$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.2052 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 124.3609 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.020)\text{SnO} = (0.020)(134.7094) = 2.6942$  กรัม

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ  $(0.020)\text{SnO} = 2.6942(3)/124.3609 = 0.0649$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0649 กรัม

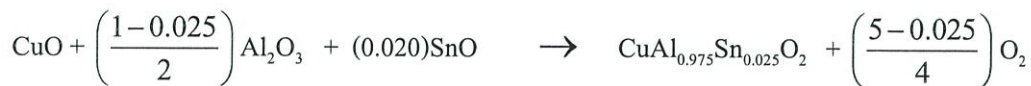
สรุปเขรามิกสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.980}\text{Sn}_{0.020}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้นดังนี้ คือ

ผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9189 กรัม

ผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.2052 กรัม

ผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0649 กรัม

กรณี  $x = 0.025$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.4875)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.4875)(101.9612)$  = 49.7061 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.025)\text{SnO}$  =  $(0.025)(134.7094)$  = 3.3678 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  =  $63.5460 + (0.975)26.9815 + (0.025)118.7100$   
 $+ (2)15.9994$  = 124.8195 กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไครยางค์ คือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 124.8195 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/124.8195$  = 1.9119 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9119 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 124.8195 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.4875)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.4875)(101.9612)$  = 49.7061 กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.4875)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $49.7061(3)/124.8195$  = 1.1947 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.1947 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 124.8195 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.025)\text{SnO}$  =  $(0.025)(134.7094)$  = 3.3678 กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.025)\text{SnO}$  =  $3.3678(3)/124.8195$  = 0.0809 กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0809 กรัม

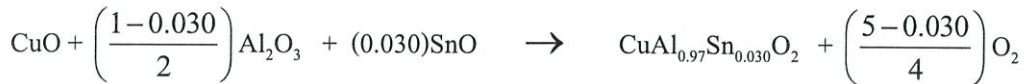
สรุปเราเริ่มการประกอบ  $\text{CuAl}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้นดังนี้ คือ

ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9119 กรัม

ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.1947 กรัม

ผงผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0809 กรัม

กรณี  $x = 0.030$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460 + 15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.485)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.485)(101.9612)$  = 49.4512 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $(0.030)\text{SnO}$  =  $(0.030)(134.7094)$  = 4.0413 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  =  $63.5460 + (0.97)26.9815 + (0.030)118.7100$   
+  $(2)15.9994$  = 125.2782 กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไครยางค์ คือ

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ CuO

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 125.2782 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 79.5454 กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO =  $79.5454(3)/125.2782 = 1.9049$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9049 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 125.2782 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.485)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $(0.485)(101.9612) = 49.4512$  กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.485)\text{Al}_2\text{O}_3$  =  $49.4512(3)/125.2782 = 1.1842$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.1842 กรัม

- สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ SnO

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 125.2782 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.030)\text{SnO}$  =  $(0.030)(134.7094) = 4.0413$  กรัม

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $(0.030)\text{SnO}$  =  $4.0413(3)/125.2782 = 0.0968$  กรัม

ดังนั้น จะใช้ผงผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0968 กรัม

สรุปเราต้องการสารประกอบ  $\text{CuAl}_{0.97}\text{Sn}_{0.030}\text{O}_2$  จะต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้นดังนี้ คือ

ผงผลึกของสารประกอบ CuO = 1.9049 กรัม

ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  = 1.1842 กรัม

ผงผลึกของสารประกอบ SnO = 0.0968 กรัม

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	CuO (g)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (g)	SnO (g)
0	1.9476	1.2483	0
0.005	1.9404	1.2374	0.0164
0.010	1.9332	1.2266	0.0327
0.015	1.9260	1.2159	0.0489
0.020	1.9189	1.2052	0.0649
0.025	1.9119	1.1947	0.0809
0.030	1.9049	1.1842	0.0968

3.1.3 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

- นำผงผลึกของสารประกอบ CuO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ SnO ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอาเททาให้เป็นผงคล้ายแป้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- นำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดผลึกโดยใช้แรงดันประมาณ 4 ตัน โดยเครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้แรงดันในการอัดครั้งละ 1 ตัน ใช้เวลาอัดแซ่ทั้งไว้ตันละ 10 วินาที และตอนเอาเม็ดออกจากโมลอัดเม็ดจะใช้แรงดันครั้งประมาณ 0.5 ตัน
- นำเอาเม็ดสารที่ได้นำมาใส่ในครุชเปิด ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
- ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำให้การเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1100 องศาเซลเซียส จึงแช่ทิ้งไว้วัน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา แล้วทิ้งให้เย็นลง นำออกมาวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์ต่อไป

3.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (จิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

### 3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha} = 1.5406$  อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์แปร และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์  $\text{Cu}_{K\alpha}$

### 3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5410 LV ที่แรงดัน 15 กิโลโวลต์

### 3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ ของ Keithley รุ่น 236
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ FLUKE Model : 8808A
- กาวเงินนำไฟฟ้าที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรด โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟชนิดอ่อน

### 3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

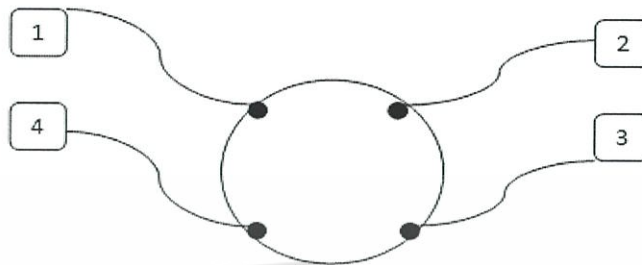
- เครื่อง precision LCR meter ของ agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์และใช้อุณหภูมิห้อง
- กาวเงินนำไฟฟ้าที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรด โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟชนิดอ่อน

### 3.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสง

### 3.2.6 การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.3 วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

จากหลักการของวิธีแวนเดอร์เพาว์เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.1 การวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

ตรวจสอบการเริ่มต่อขั้วไฟฟ้าว่าติดเข้ากับสารตัวอย่างดีหรือไม่โดยการวัดค่าความต่างศักย์ด้วยโอห์มมิเตอร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง ตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดยแหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 ในโหมดของกระแส ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{43}$  จะได้ความต่างศักย์ที่เป็นค่าบวก เลือกกระแสหลายๆค่า เช่น ในช่วง 0.1-1 มิลลิแอมแปร์ แต่ถ้าหากว่าไม่ได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวกให้เปลี่ยนกระแสไหลเข้าที่ขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา
2. จ่ายกระแส  $I_{12}$  แล้ววัดความต่างศักย์  $V_{43}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{12}$  แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{12}$  ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0. 1- 1 มิลลิแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
3. จ่ายกระแส  $I_{12}$  ที่เป็นค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{43}$  ที่เป็นค่าลบ ปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{12}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. ทำการเขียนกราฟระหว่าง  $I_{12}$  กับ  $V_{43}$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $I_{12}$  ส่วนแกน  $x$  เป็น  $V_{43}$  ความชันของกราฟคือค่า  $1/R_1$
5. จ่ายกระแส  $I_{23}$  ค่าต่างๆแล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{23}$  แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
6. จ่ายกระแส  $I_{23}$  ที่เป็นค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่มีค่าเป็นลบ ปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
7. ทำการเขียนกราฟระหว่าง  $I_{23}$  กับ  $V_{14}$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $I_{23}$  ส่วนแกน  $x$  เป็น  $V_{14}$  ความชันของกราฟคือค่า  $1/R_2$
8. เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van Der Pauw correction factor)

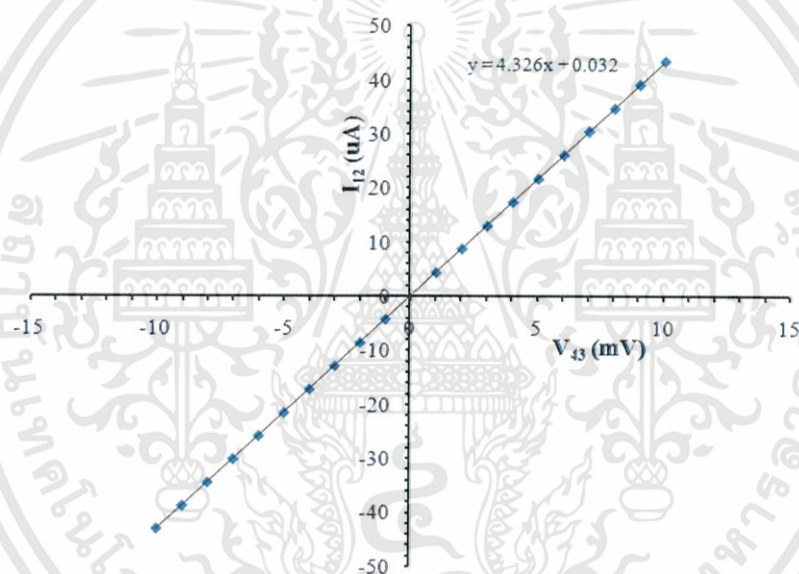
โดย

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (3.4)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (3.5)$$

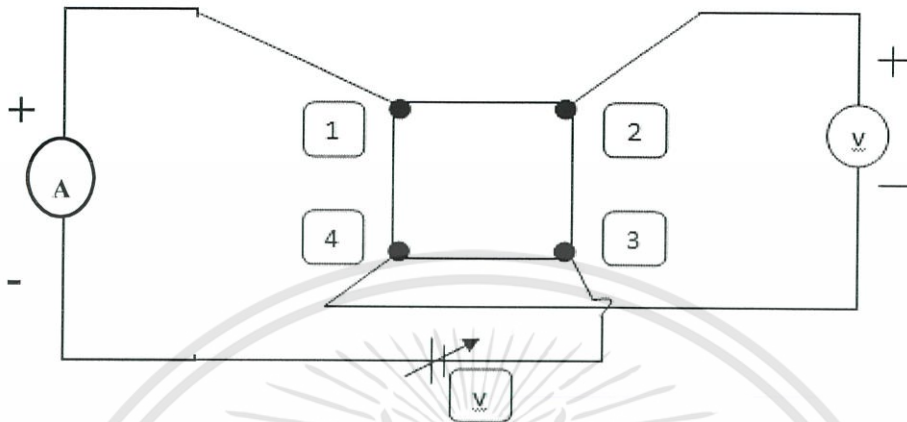
เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )

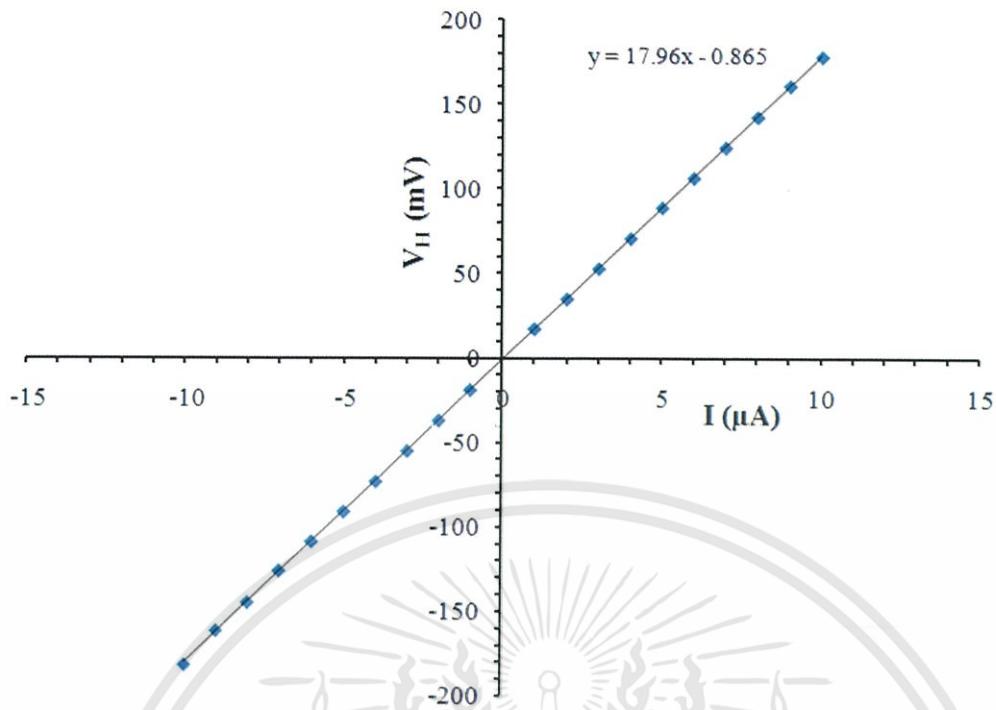
### 3.4 วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

จากปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ทำการจัดเตรียมขั้วไฟฟ้า และอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่างนี้แล้วจึงเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.3 วิธีการต่อวงจรเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

1. ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะทำการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{24}$  ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าไม่ได้เป็นเครื่องหมายบวก ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปตามเข็มนาฬิกา
2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก B ความต่างศักย์  $V_{24}$  ควรจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้เราเรียกว่า  $V'_{24}$  เนื่องจากมีผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์  $V_H$  เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย แต่ถ้า  $V'_{24}$  มีค่าลดลงแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี (p-type) ดังนั้นต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้ว 3 และไหลออกทางขั้ว 1 แล้ว  $V'_{24}$  ยังมีเครื่องหมายเป็นบวกเหมือนเดิม
3. จ่ายกระแส I ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V'_{24}$  ที่สอดคล้องกับกระแส I แต่ละค่า ปรับเปลี่ยนกระแส I ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0.01-0.10 มิลลิแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. จ่ายกระแส I ค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V'_{24}$  ที่เป็นค่าลบปรับเปลี่ยนกระแส I อย่างน้อย 10 ค่า
5. ความต่างศักย์  $V'_{24} = V_H + V_{24}$  ดังนั้นความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H = V'_{24} - V_{24}$
6. เขียนกราฟระหว่าง I กับ  $V_H$  โดยให้แกน y เป็น  $V_H$  และแกน x เป็น I ความชันของกราฟคือ  $R_H \left( \frac{d}{B} \right)$  เมื่อ B คือสนามแม่เหล็กและมีค่าเท่ากับ 1925 เกาส์ คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วย เป็นเซนติเมตร



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  จากสูตร

$$R_H = 10^6 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\frac{V_H}{I}$  คือ ความชันที่ได้จากกราฟ  $I$  กับ  $V_H$ ,  $R_H$  มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์,  $I$  มีหน่วยเป็นแอมแปร์,  $V_H$  มีหน่วยเป็นโวลต์,  $d$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและ  $B$  มีหน่วยเป็นเกาส์

ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{qR_H} \quad (3.7)$$

สภาพคล่องของฮอลล์ ( $\mu_H$ ) คือ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (3.8)$$

## บทที่ 4

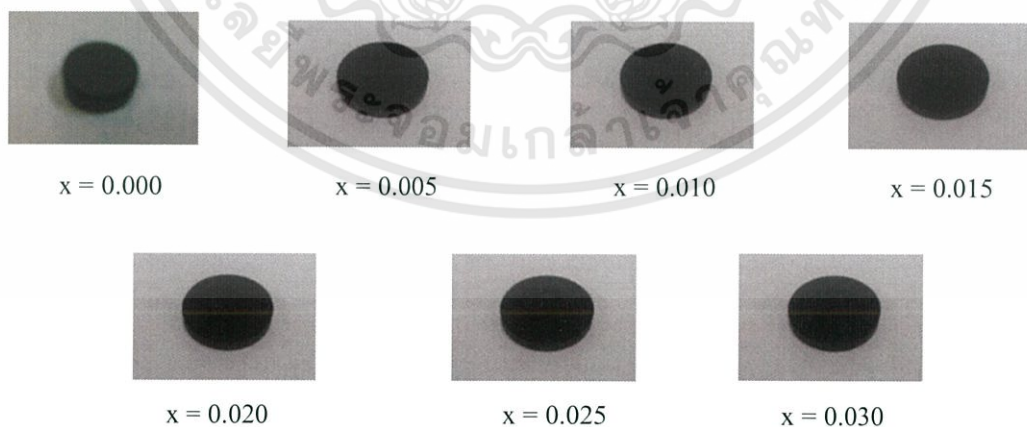
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้มีการศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและได้มีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำ โดยมีการเจืออะตอมของธาตุ Sn และมีการเพิ่มอะตอมของธาตุออกซิเจนเข้าไปโดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้า และเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากซึ่งก็คือโฮลนั่นเอง

#### 4.1 การศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

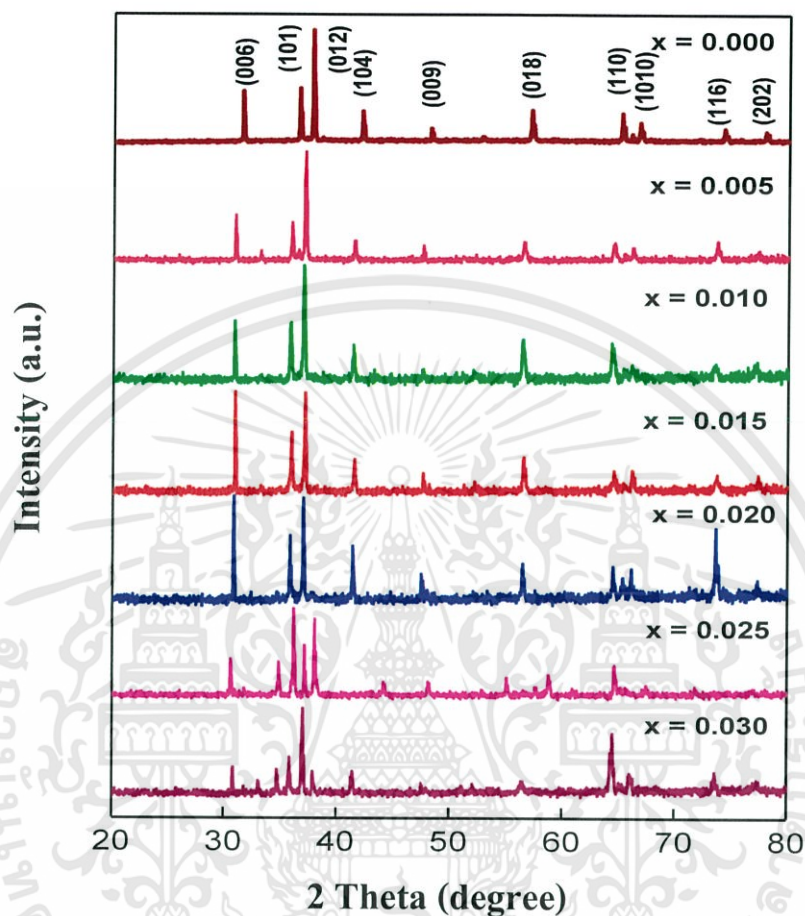
##### 4.1.1 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งในขณะที่ยังไม่มีการเผาจะเป็นสีดำเข้ม แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่ยังไม่มีการเจือ SnO เข้าไปจะมีสีดำเทาและเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เจือ SnO เข้าไปจะมีสีดำเข้มและมีความแวววาว ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

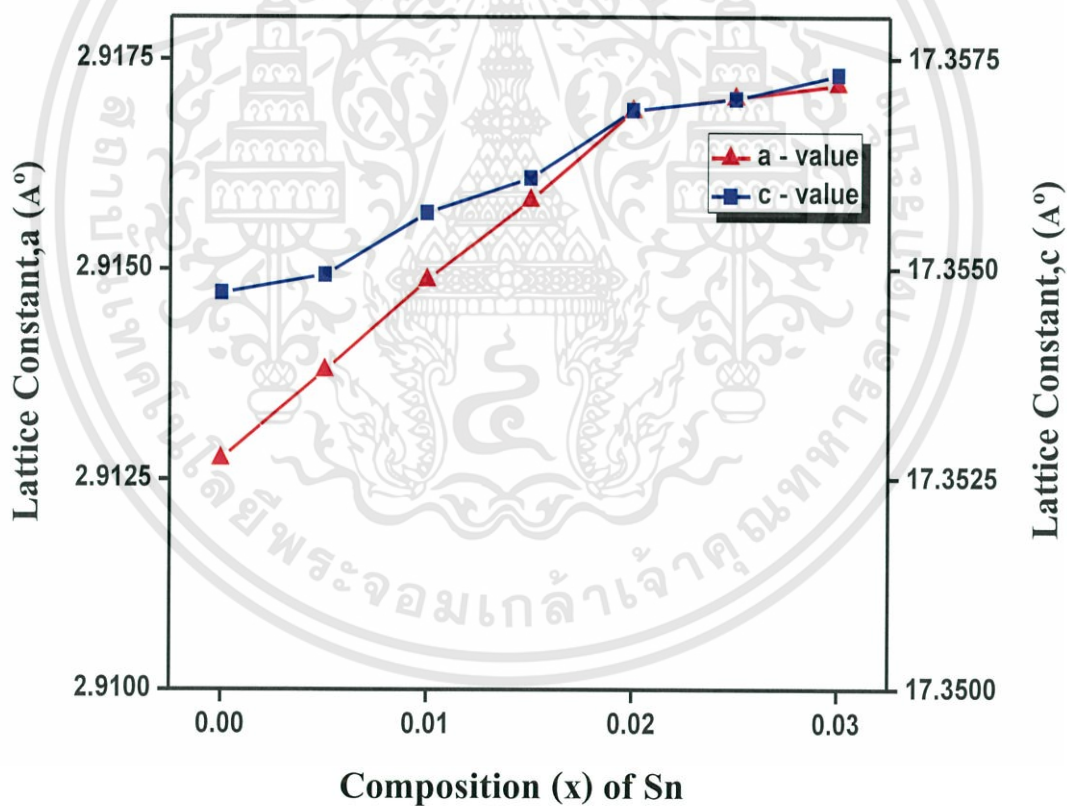


รูปที่ 4.2 ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากรูปที่ 4.2 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า เฟสของ  $\text{CuAlO}_2$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (006) ที่มุม  $2\theta \approx 32$  องศา, (101) ที่มุม  $2\theta \approx 37$  องศา, (012) ที่มุม  $2\theta \approx 38$  องศา, (104) ที่มุม  $2\theta \approx 42$  องศา, (009) ที่มุม  $2\theta \approx 48$  องศา, (018) ที่มุม  $2\theta \approx 57$  องศา, (110) ที่มุม  $2\theta \approx 65$  องศา, (1010) ที่มุม  $2\theta \approx 67$  องศา, (116) ที่มุม  $2\theta \approx 74$  องศา, (202) ที่มุม  $2\theta \approx 78$  องศา โดยที่ปริมาณสารเจือของอะตอม  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{CuO}$  จะปรากฏขึ้นเมื่อมีการเจือ  $\text{SnO}$  เข้าไปตั้งแต่ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล

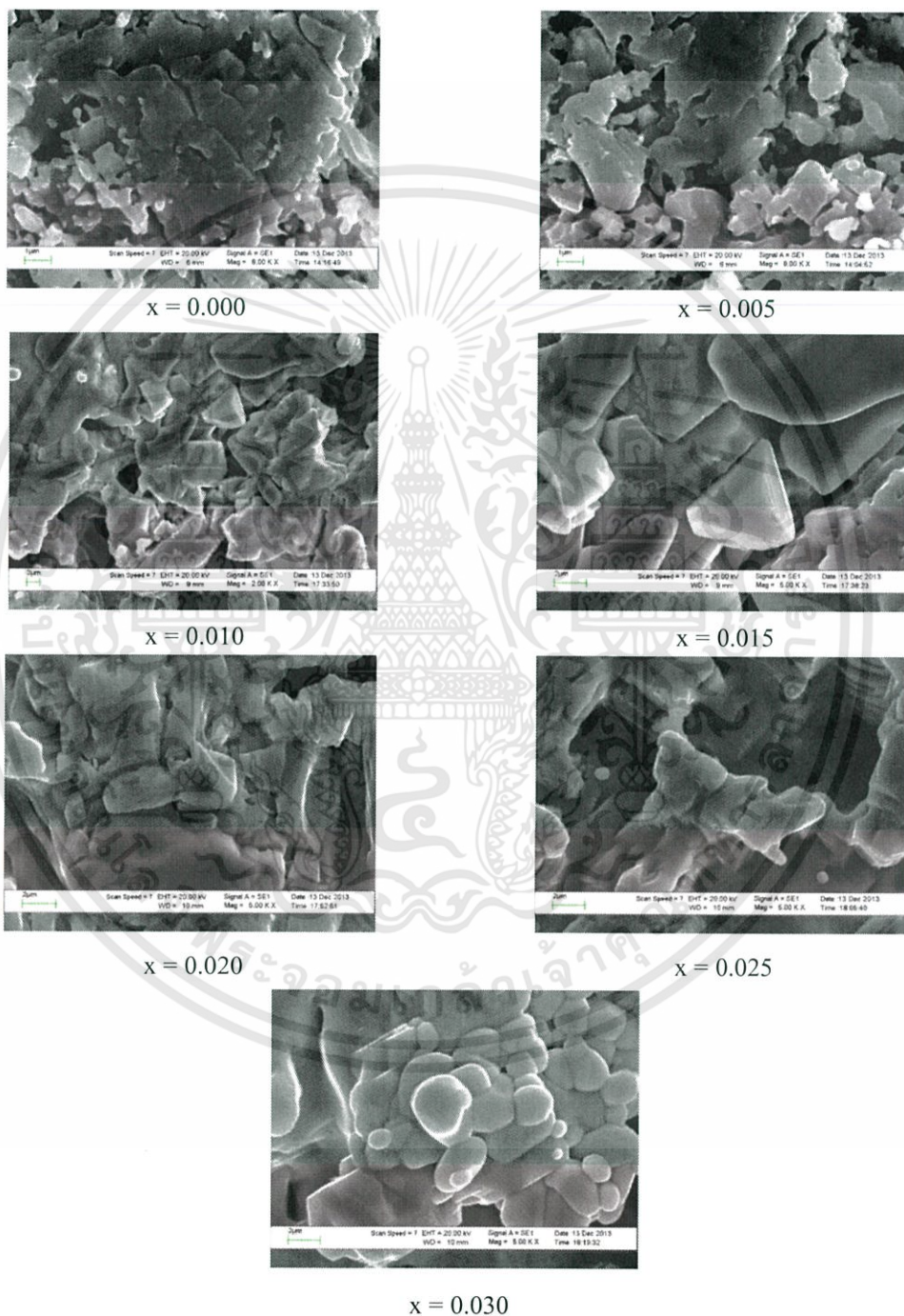
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of Sn	Lattice Constant ( $\text{\AA}$ )		c/a	Grain Size ( $\mu\text{m}$ )
	a	c		
0.000	2.91274	17.35472	5.95821	8.06
0.005	2.91379	17.35493	5.95613	9.42
0.010	2.91487	17.35567	5.95418	10.28
0.015	2.91582	17.35609	5.95238	12.34
0.020	2.91688	17.35689	5.95049	14.38
0.025	2.91704	17.35703	5.95022	15.75
0.030	2.91719	17.35731	5.95001	17.83



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Sn ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.1.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการถ่ายภาพที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



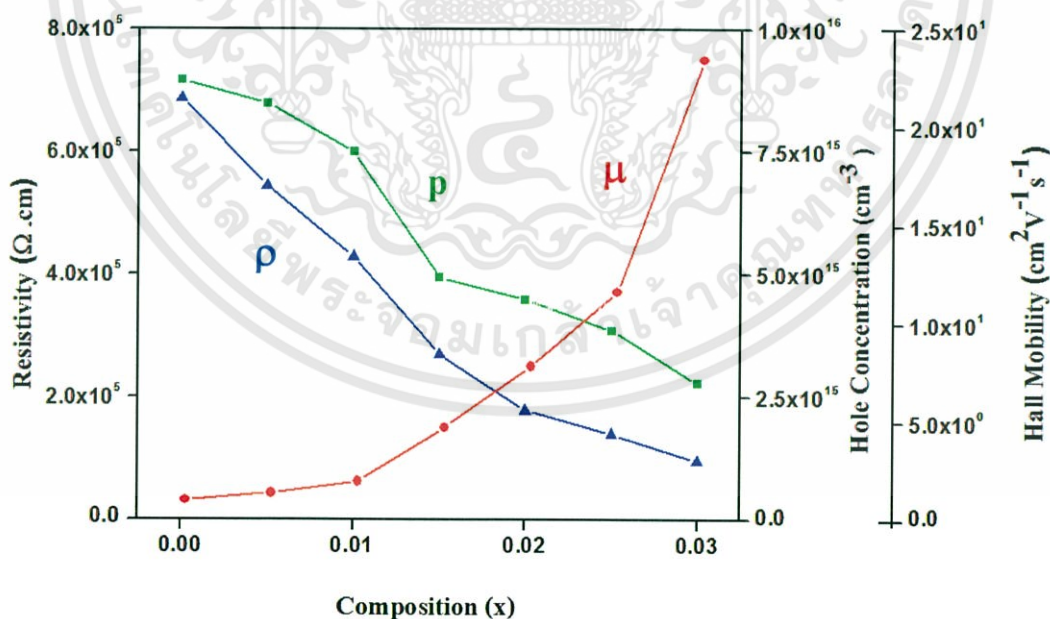
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

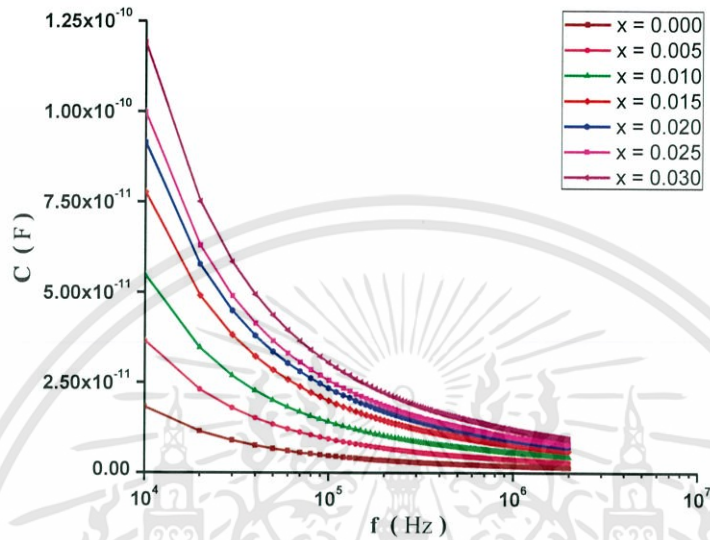
ตารางที่ 4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition of (x) $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$	Conductance G (s)	Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Hall Coefficient ( $\text{cm}^2/\text{C}$ )	Hole Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Hall Mobility ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
0.000	5.72E-06	6.87E+02	6.97E+02	8.95E+15	1.01
0.005	7.22E-06	5.44E+02	7.37E+02	8.47E+15	1.35
0.010	9.17E-06	4.28E+02	8.34E+02	7.49E+15	1.95
0.015	1.46E-05	2.69E+02	1.27E+03	4.93E+15	4.72
0.020	2.20E-05	1.79E+02	1.39E+03	4.48E+15	7.77
0.025	2.80E-05	1.40E+02	1.62E+03	3.85E+15	11.57
0.030	4.09E-05	9.60E+01	2.25E+03	2.77E+15	23.44

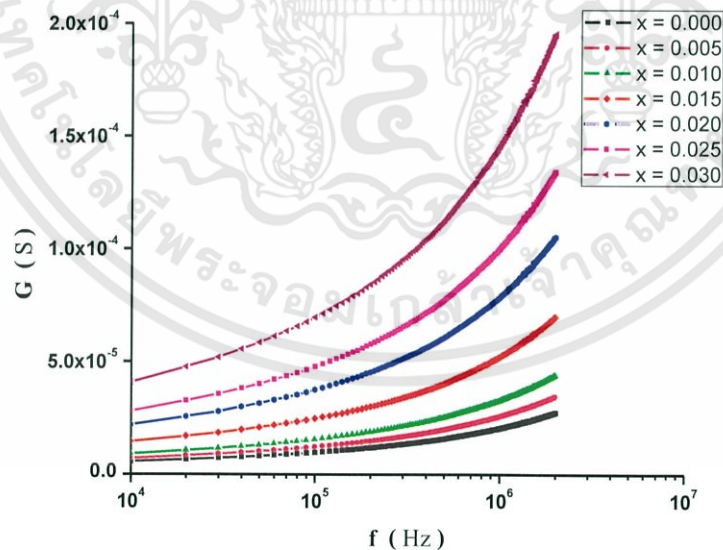


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นโฮลและสภาพคล่องพาหะของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

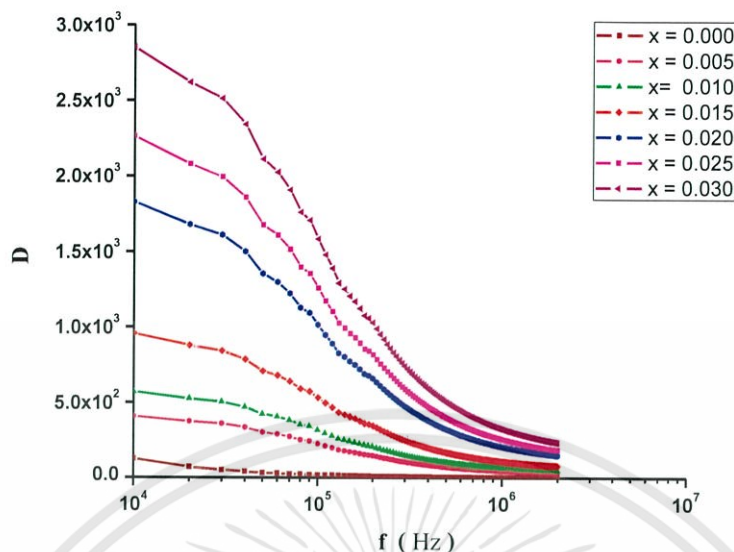
4.3 การศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



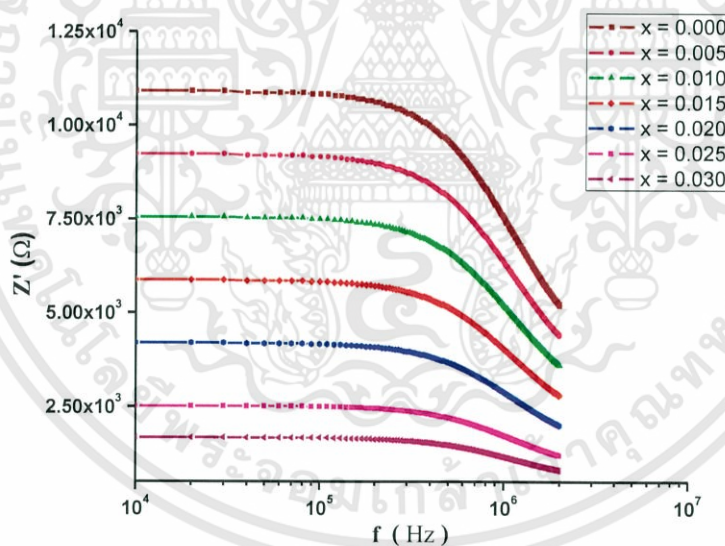
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



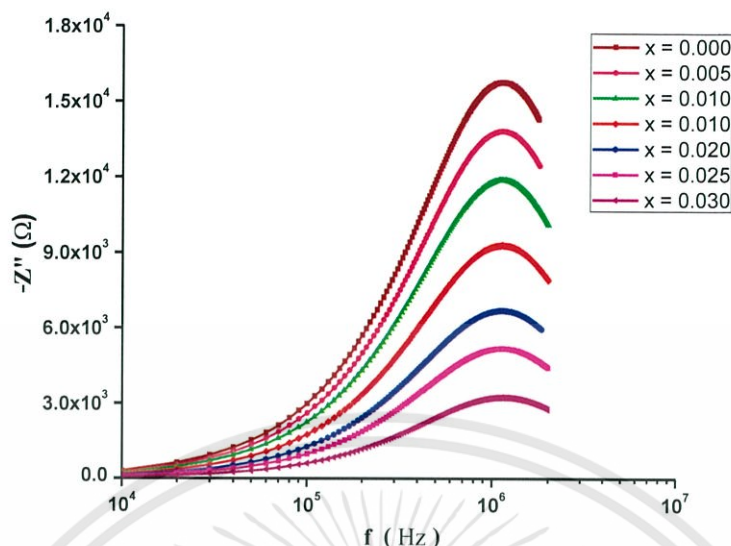
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



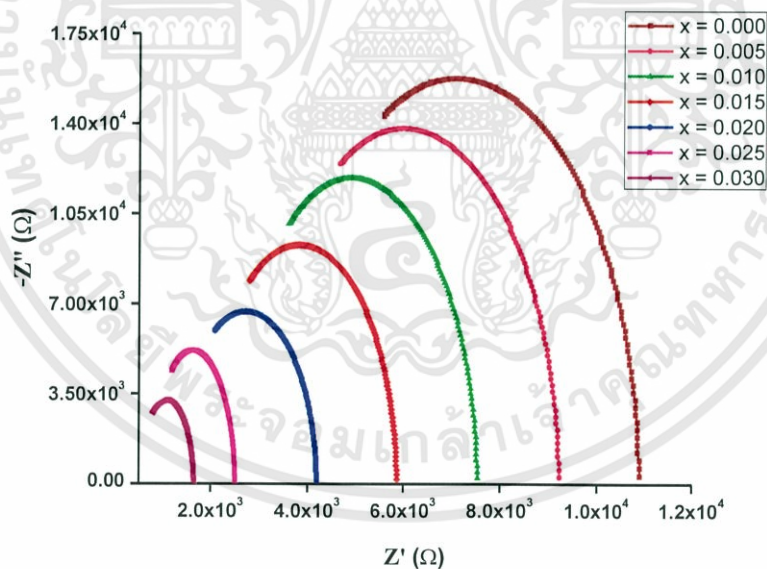
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียความเป็นฉนวนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

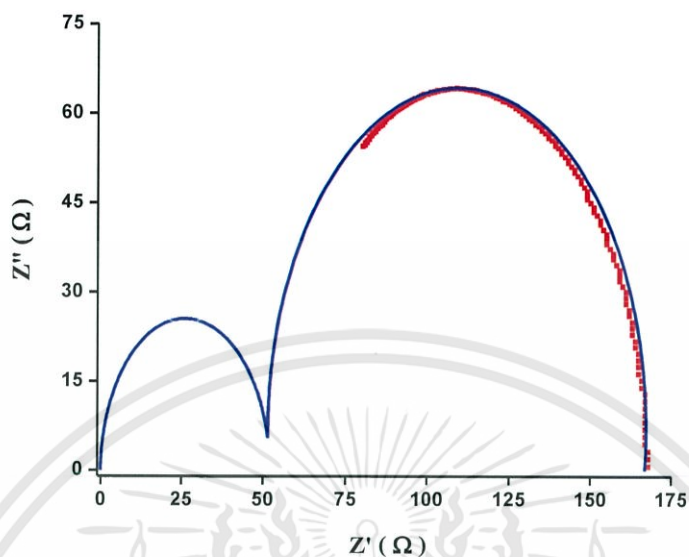


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

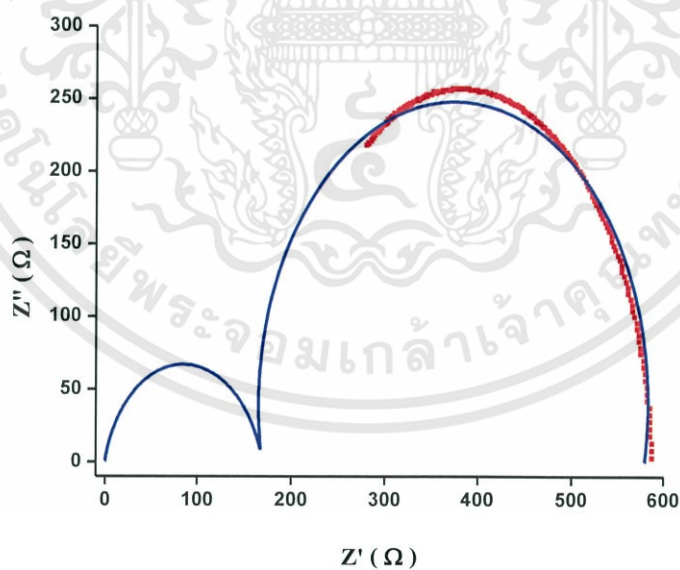


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพกับขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย

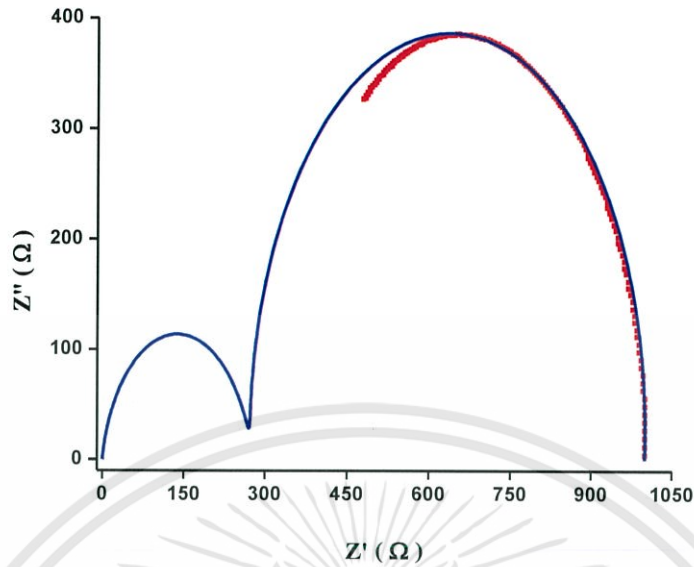
จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$



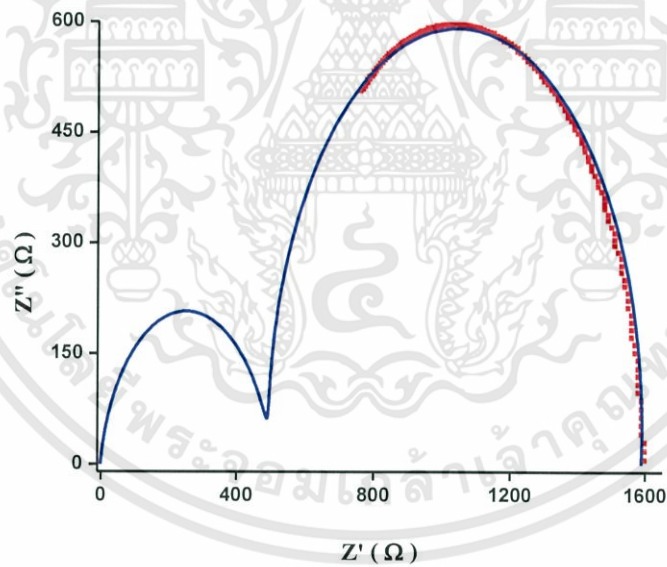
รูปที่ 4.12 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.000$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



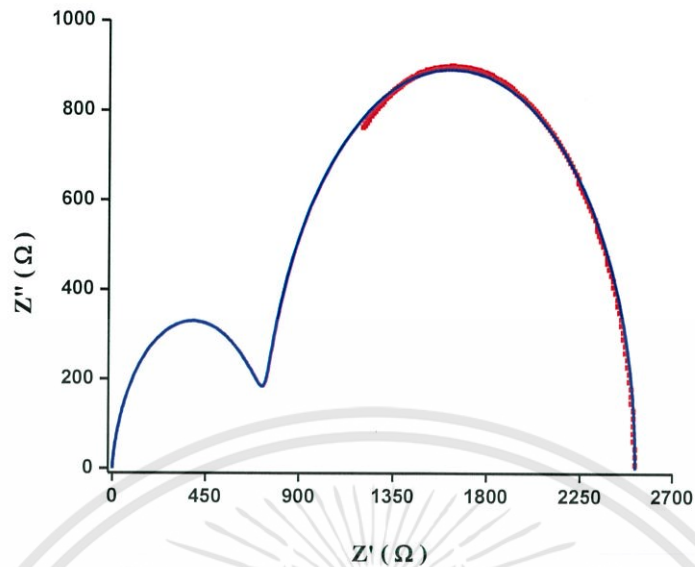
รูปที่ 4.13 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.005$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



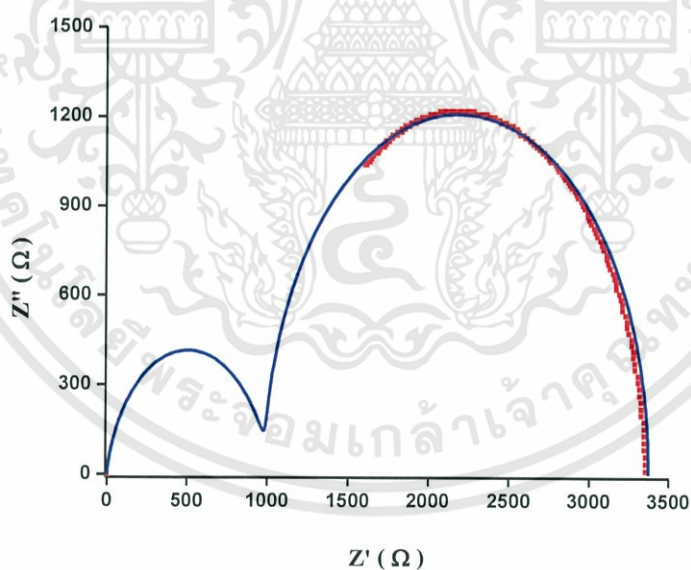
รูปที่ 4.14 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



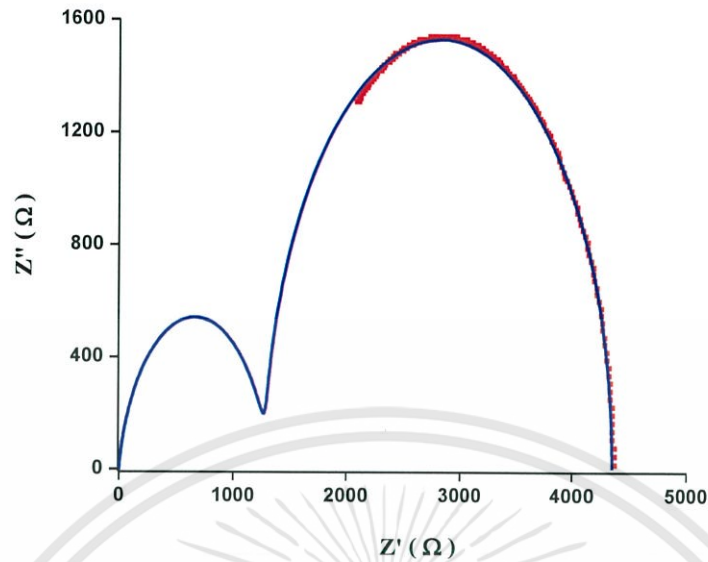
รูปที่ 4.15 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.015$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



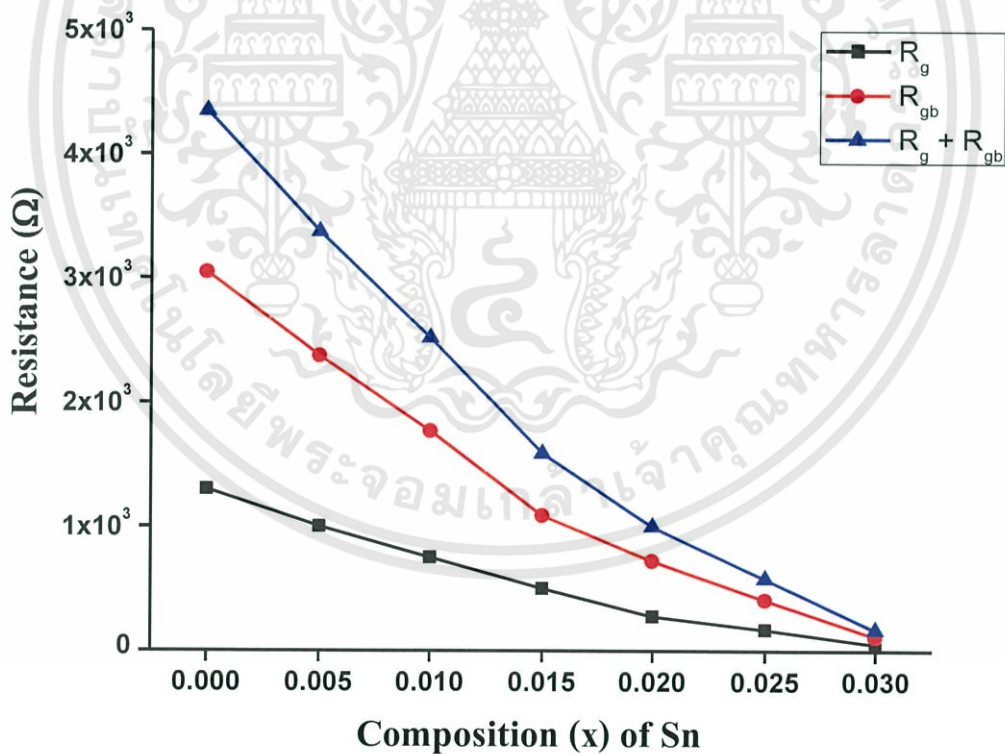
รูปที่ 4.16 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.020$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.17 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.025$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.18 การจำลองแบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

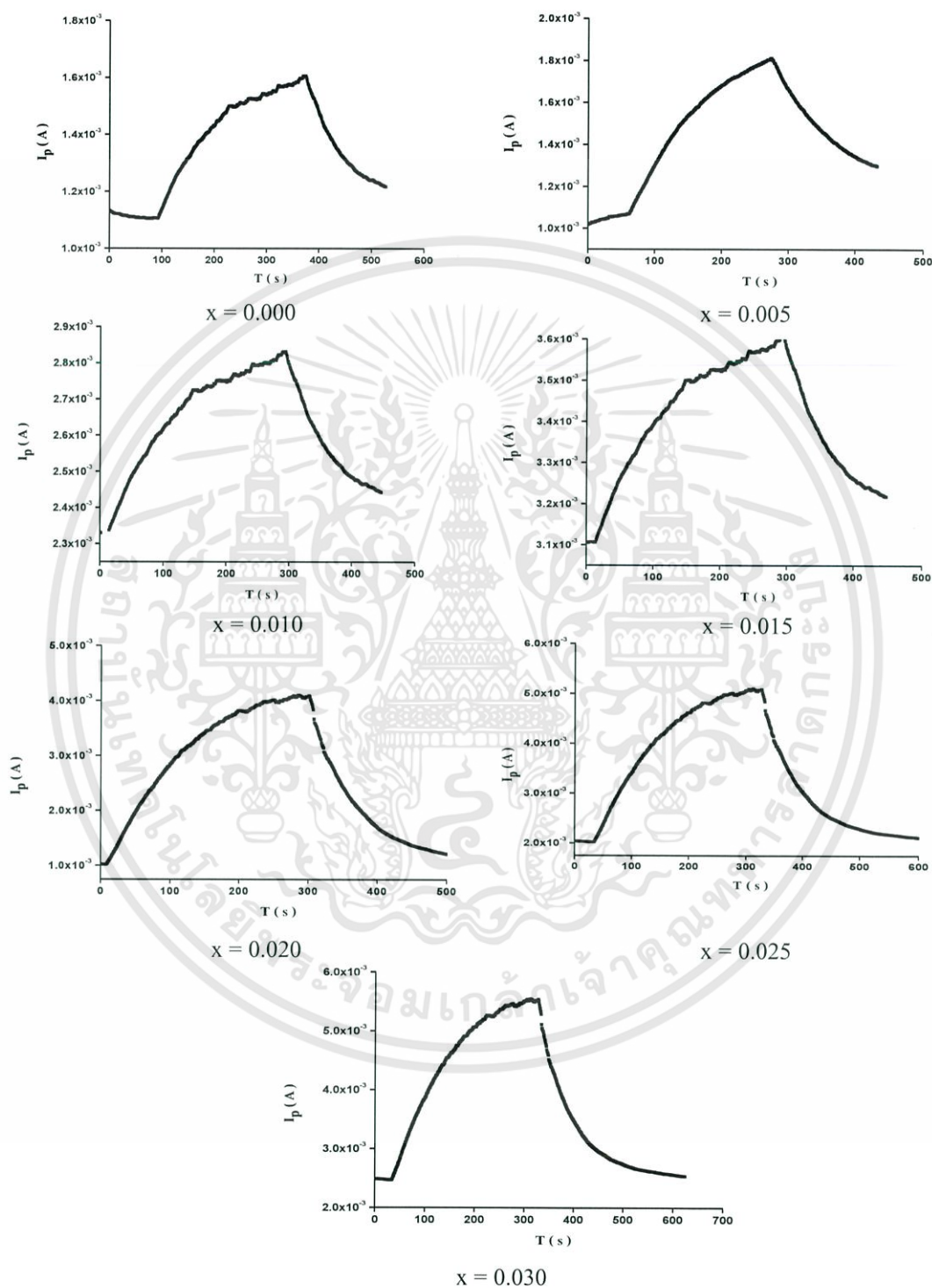


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ความต้านทานของเกรน, ความต้านทานของขอบเกรนและความต้านทานรวมที่ขึ้นกับปริมาณของสารเจือ

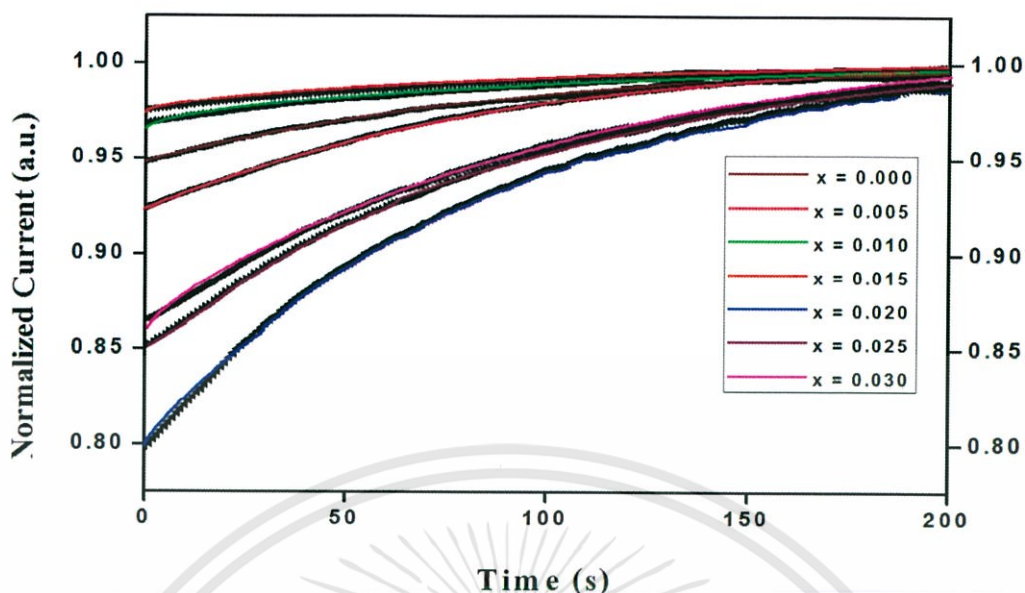
ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			$C_1$ (F)	$C_2$ (F)	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	$f_{\max}$ (Hz)	$\omega$ (rad/s)	$\omega\tau$
0.000	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 1300 \ \Omega$	2.332E-10	-	3.032E-7	-	5.022E5	3.155E6	0.957
		$P_1 = 7.385E-10$							
		$n_1 = 0.918$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 3050 \ \Omega$	-	3.049E-9	-	9.300E-6	1.612E4	1.012E5	0.915
		$P_2 = 3.545E-9$							
		$n_2 = 0.987$							
0.005	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 1000 \ \Omega$	4.262E-10	-	4.262E-7	-	3.574E5	2.246E6	0.957
		$P_1 = 4.935E-10$							
		$n_1 = 0.991$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 2375 \ \Omega$	-	3.464E-9	-	8.226E-6	1.813E4	1.139E4	0.937
		$P_2 = 5.935E-9$							
		$n_2 = 0.954$							
0.010	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 750 \ \Omega$	1.599E-10	-	1.199E-7	-	1.194E6	7.502E6	0.899
		$P_1 = 6.198E-10$							
		$n_1 = 0.915$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 1770 \ \Omega$	-	1.531E-9	-	2.710E-6	5.573E4	3.502E5	0.949
		$P_2 = 9.332E-9$							
		$n_2 = 0.859$							
0.015	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 500 \ \Omega$	2.018E-10	-	1.009E-7	-	1.468E6	9.224E6	0.931
		$P_1 = 5.39E-10$							
		$n_1 = 0.939$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 1090 \ \Omega$	-	2.493E-7	-	2.717E-6	5.258E5	3.304E6	0.898
		$P_2 = 4.731E-9$							
		$n_2 = 0.950$							
0.020	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 275 \ \Omega$	1.121E-9	-	3.084E-7	-	5.103E5	3.206E6	0.999
		$P_1 = 6.983E-9$							
		$n_1 = 0.878$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 725 \ \Omega$	-	2.536E-7	-	1.839E-4	8.500E2	5.34E3	0.939
		$P_2 = 3.64E-7$							
		$n_2 = 0.958$							
0.025	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 170 \ \Omega$	1.614E-9	-	2.744E-7	-	5.690E5	3.575E6	0.981
		$P_1 = 5.83E-9$							
		$n_1 = 0.915$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 410 \ \Omega$	-	4.360E-7	-	1.788E-4	8.800E2	5.529E3	0.993
		$P_2 = 7.64E-7$							
		$n_2 = 0.935$							
0.030	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 52 \ \Omega$	5.454E-9	-	2.836E-7	-	5.594E5	3.515E6	0.997
		$P_1 = 3.59E-8$							
		$n_1 = 0.875$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 115 \ \Omega$	-	1.998E-6	-	2.298E-4	6.826E2	4.289E3	0.986
		$P_2 = 4.98E-6$							
		$n_2 = 0.891$							

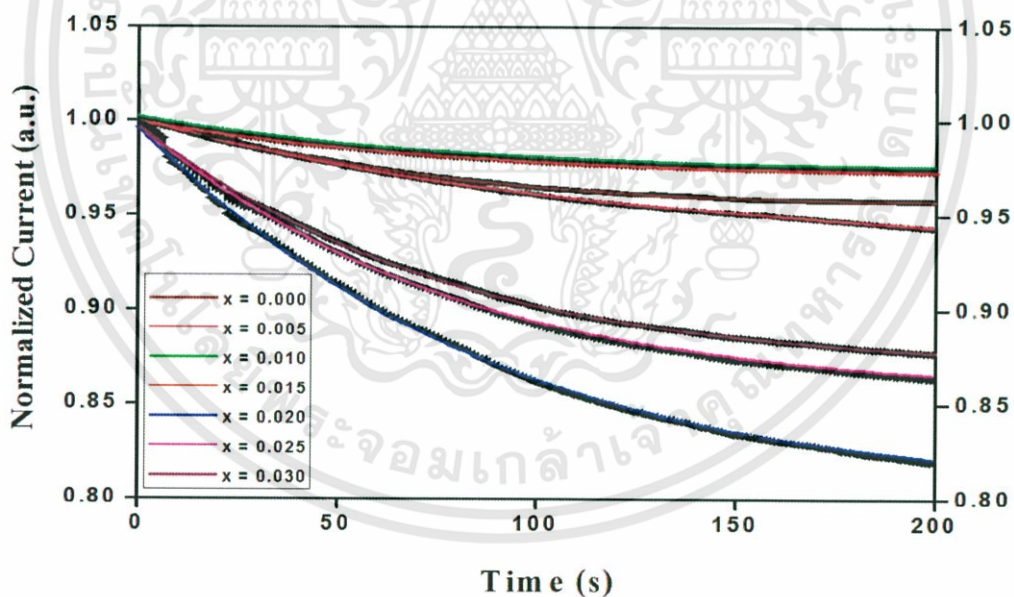
4.4 การศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.20 ปรากฏการณ์เชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.21 กระแสอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาในช่วง 0 วินาที ถึง 200 วินาที ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



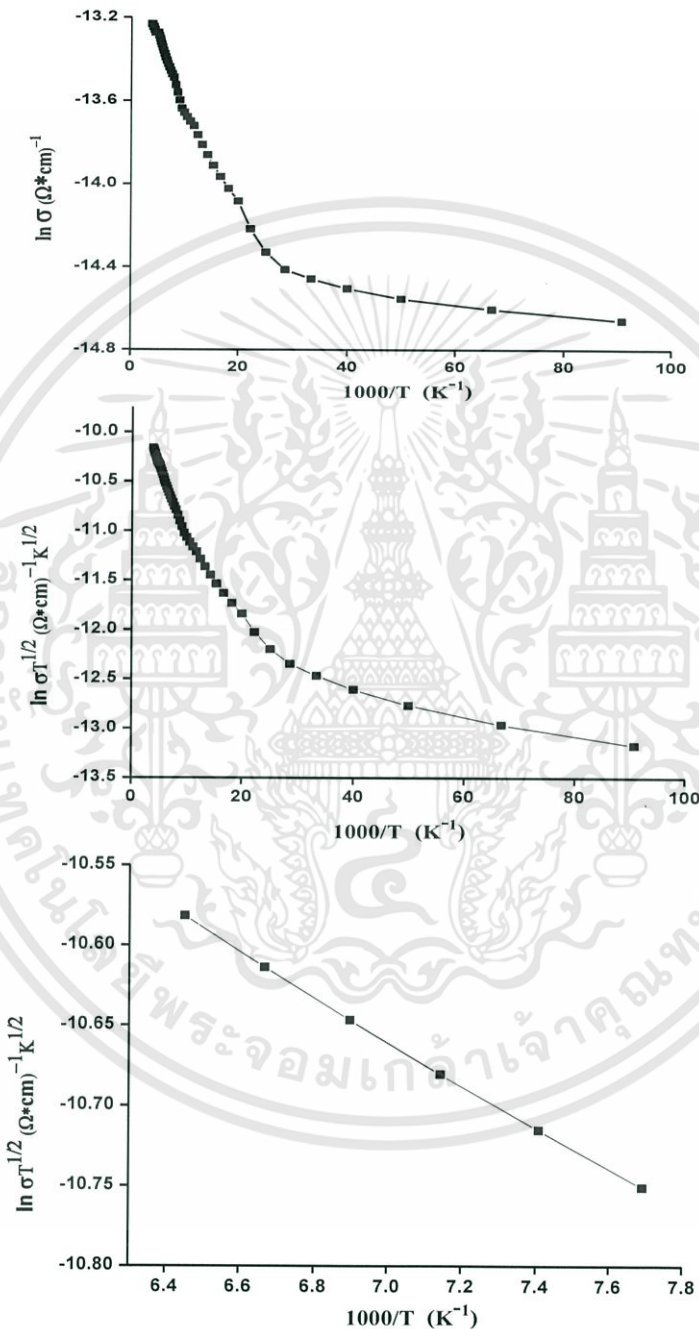
รูปที่ 4.22 กระแสอร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาในช่วง 0 วินาที ถึง 200 วินาที ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

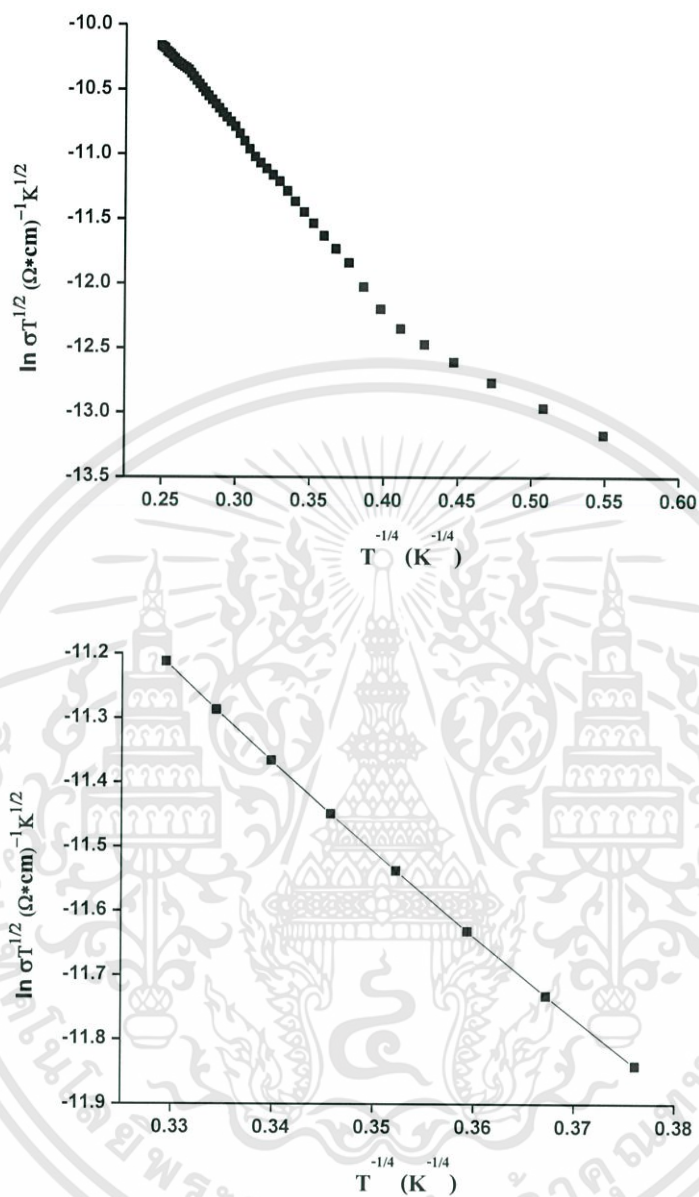
4.5 การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

#### 4.4.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงตามแบบจำลองของซีโต



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับ  $1000/T$  ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

#### 4.4.2 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH)



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับ  $T^{-1/4}$  ในช่วงอุณหภูมิ (10 - 300 เคลวิน) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Temperature (K)	Grain Size (cm)	$E_b$ (eV)	$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_t$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$L_D$ (cm)	$E_t$ (eV)
155	$10.28 \times 10^{-6}$	0.117	$4.589 \times 10^{12}$	$4.717 \times 10^9$	$1.229 \times 10^{-4}$	0.983

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Temperature (K)	$T_0$ (K)	$\sigma_0$ ( $\text{S.cm}^{-1}$ )	$N(E_F)$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	R (cm)	W (eV)	$\alpha R$
90	$3.658 \times 10^5$	888.567	$2.684 \times 10^{20}$	$4.673 \times 10^{-7}$	$8.716 \times 10^{-3}$	1.686

#### 4.4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงตามแบบจำลองของซีโตน

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1,000 k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000 k}$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.602 \times 10^{-19}}$$

แทนค่า

$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(1.363)}{(1.602 \times 10^{-19})}$$

$$E_a = 0.117 \quad \text{อิเล็กตรอน โวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_s$ )

$$\begin{aligned}\epsilon_s &= \epsilon_r \epsilon_0 \\ \text{แทนค่า} \quad \epsilon_s &= (9.38)(8.8 \times 10^{-14}) \\ \epsilon_s &= 8.3013 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}\end{aligned}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอม ( $N_a$ )

$$\begin{aligned}E_b &= \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \\ N_a &= \frac{8 \epsilon_s E_b}{e^2 L^2} \\ \text{แทนค่า} \quad N_a &= \frac{8(8.3013 \times 10^{-13})(0.117)(1.602 \times 10^{-19})}{(1.602 \times 10^{-19})^2 (10.28 \times 10^{-6})^2} \\ N_a &= 4.589 \times 10^{14} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}\end{aligned}$$

-การหาค่าความยาวเดอบาย ( $L_D$ )

$$\begin{aligned}L_D &= \left[ \frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \text{แทนค่า} \quad L_D &= \left[ \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 155 \times 8.3013 \times 10^{-13}}{(1.602 \times 10^{-19})^2 (4.589 \times 10^{14})} \right]^{\frac{1}{2}} \\ L_D &= 1.229 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}\end{aligned}$$

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ ( $E_i$ )

$$\begin{aligned}E_a &= \frac{1}{2} E_g - E_i \\ E_i &= \frac{1}{2} E_g - E_a \\ \text{แทนค่า} \quad E_i &= \frac{1}{2} (2.2) - 0.117 \\ E_i &= 0.983 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}\end{aligned}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ ( $N_t$ )

$$\sigma = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$N_t = \frac{(L^2 e^2 N_v N_a v_c) \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}{2kT\sigma} + LN_a$$

$$v_c = \left[ \frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$v_c = \left[ \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 155}{2\pi(0.3)(9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 35426.691 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi \times 0.3 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 155 \times 1.38 \times 10^{-23}}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}} = 1.539 \times 10^{24}$$

$$N_t = \frac{(L^2 e^2 N_v N_a v_c) \exp\left[-\frac{E_a}{kT}\right]}{2kT\sigma} + LN_a$$

$$N_t = \frac{(A) \exp\left[-\frac{E_a}{kT}\right]}{B} + C$$

$$A = (10.28 \times 10^{-6})^2 (1.602 \times 10^{-19})^2 (1.539 \times 10^{24}) (4.589 \times 10^{14}) (35426.691) = 6.789 \times 10^{-5}$$

$$B = 2 \frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.602 \times 10^{-19}} \times 155 \times (2.038 \times 10^{-6}) = 5.442 \times 10^{-8}$$

$$C = (10.28 \times 10^{-6}) \times (4.589 \times 10^{14}) = 4.717 \times 10^9$$

$$N_t = \frac{6.789 \times 10^{-5} \exp\left[\frac{-0.117 \times 1.602 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 155}\right]}{5.442 \times 10^{-8}} + (4.717 \times 10^9)$$

$$N_t = 4.717 \times 10^9 \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์กลไกการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่กึ่งที่ (VRH)

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ ( $T_0$ ) และแฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล ( $\sigma_0$ )

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln\sigma_0$$

$$T_0 = 36578.502 \text{ เคลวิน}$$

$$\sigma_0 = 888.567 \text{ ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร}$$

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha = 21.23(888.567)(36578.502)^{\frac{1}{2}} = 3.608 \times 10^6 \text{ ต่อเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี ( $N(E_F)$ )

$$N(E_F) = \left[ \frac{16 \pi^2 k^2}{81 e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่า  $N(E_F) = (2 \times 10^9)(888.567)^3 (36578501)^{\frac{1}{2}}$

$$N(E_F) = 2.684 \times 10^{20} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \times \text{ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R$ )

$$R = \left[ \frac{9}{8 \pi \alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

แทนค่า  $R = \left[ \frac{9}{8(3.14)(3.608 \times 10^6) \left( \frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.602 \times 10^{-19}} \right) (90)(2.684 \times 10^{20})} \right]^{\frac{1}{4}}$

$$R = 4.673 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)}$$

แทนค่า

$$W = \frac{3}{4(3.14)(4.673 \times 10^{-7})^3 (2.684 \times 10^{20})}$$

$$W = 8.716 \times 10^{-3} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R = 3.608 \times 10^6 \times 4.673 \times 10^{-7}$$

$$\alpha R = 1.686$$



## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงาน โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SnO}$  โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง และยังได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยขั้นสูงต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการทดลองของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

##### 5.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ สภาพนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนทางเคมีของอะตอมที่ต่างไปจากกรณีอุดมคติหรือที่เรียกว่า นอนสโตอิชิโอเมตรี (non stoichiometry) ซึ่งจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defects) ในหลายๆแบบ เช่น อะตอมโลหะของโครงผลึกขาดหายไป (metal deficit) และการเติมอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินเข้าไปในโครงผลึกซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า อินเตอร์คะเลชัน (intercalation) หรือกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งข้อบกพร่องทั้ง 2 แบบ ดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนส่วนเกินโครงผลึก ในกรณีที่มีอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินซึ่งเกิดเนื่องมาจาก แวแคนซีอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  และ อะตอมของธาตุ  $\text{Al}$  จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.1)



เมื่อ  $\text{O}_\text{o}$ ,  $\text{V}_\text{Cu}$ ,  $\text{V}_\text{Al}$  และ  $\text{h}^+$  คืออะตอมของออกซิเจน แวแคนซีอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  แวแคนซีอะตอมของธาตุ  $\text{Al}$  และ โฮลตามลำดับ

ส่วนกรณีที่มีอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินโดยกระบวนการอินเตอร์คะเลชันอะตอมของธาตุออกซิเจนดังกล่าวจะปรากฏแทรกอยู่ระหว่างโครงผลึก ( $\text{O}_\text{i}^{2-}$ ) ดังความสัมพันธ์



**5.1.2 การศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของโฮลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง**

จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องโฮลล์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจะพบว่าเมื่อทำการเจืออะตอมของธาตุ Sn เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนผสมทางเคมีเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และจากปรากฏการณ์โฮลล์พบว่า เมื่อ x เพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโฮลล์ลดลง ส่วนสภาพคล่องพาหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

**5.1.3 การศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง**

จากการศึกษา อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเม็ดเซรามิก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก โดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งพบว่า ความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้คือ (Herberholz, 1998)

$$C^*(\omega) = C_\infty + \frac{C_0 - C_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{-\alpha}} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $C_\infty$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง (high frequency) ส่วน  $C_0$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (low frequency) ส่วน  $\tau$  คือ เวลาผ่อนคลาย (relaxtion time) สำหรับ  $\alpha$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติในวัสดุทั่วไปมักจะมีกับดักประจุ (trap) เข้าเกี่ยวข้องเสมอสำหรับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  กับดักที่โดดเด่นคือ  $V_{\text{Cu}}$  เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีกับดักระดับพลังงานเดียว (single trap level) ความจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักจะแปรตรงกับความถี่ดังนี้ คือ

$$C_T \propto \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 + \omega^2)} \quad (5.4)$$

เมื่อ  $\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า (C) กับ ความถี่ (f) ซึ่งความถี่  $\omega_0$  นี้จะสัมพันธ์กับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (emission rate) ออกจากกับดักประจุ

ค่าความนำไฟฟ้า ( $G$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะปรากฏที่ความถี่ต่ำกว่า  $10^5$  เฮิร์ตซ์โดยประมาณ เป็นผลของการนำไฟฟ้ากระแสตรงของพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการจอนเซอร์ ดังนี้คือ

$$G_{ac} = G_{dc} + A\omega^n \quad (5.5)$$

แต่เมื่อความถี่สูงกว่า  $10^5$  เฮิร์ตซ์ อิเล็กตรอนในกับดักจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกมาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามความถี่

สำหรับค่าจำนวนจริง ( $Z'$ ) และจำนวนเชิงซ้อน ( $Z''$ ) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z^*$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลที่ตัวเก็บประจุ (CPE) ต่อขนานกับตัวต้านทาน ( $R_p$ ) จำนวน 2 ชุดต่อเนื่องกัน จะได้ว่า

$$Z' = \frac{R_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{R_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (5.6)$$

$$Z'' = \frac{-R_b^2 \omega_b C_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{-R_{gb}^2 \omega_{gb} C_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.6) และ (5.7) จะเห็นได้ว่า อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีสามารถแยกผลของความต้านทานของเนื้อวัสดุในเกรน ( $R_b$ ) และความต้านทานของบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ( $R_{gb}$ ) (grain boundary) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ออกจากกันได้จากสมการที่ (5.6) จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า ( $Z'$ ) จะลดลง และจากสมการที่ (5.7) จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้ว ( $Z''$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ ( $Z''$ ) มีค่าสูงสุดและมีค่าเท่ากับ ( $Z'$ ) แล้วจะเรียกความถี่เชิงมุมนี้ว่า ความถี่ผ่อนคลาย ( $\omega_{max}$ ) จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น สำหรับการทดลอง เวลาผ่อนคลาย  $\tau$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\tau_b = \frac{1}{\omega_b} = C_b R_b \quad (5.8)$$

$$\tau_{gb} = \frac{1}{\omega_{gb}} = C_{gb} R_{gb} \quad (5.9)$$

จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $Z'$ ) กับ ( $Z''$ ) จะได้ว่าจุดตัดแกนอน (แกน  $Z'$ ) จะระบุถึงค่า ( $R_b$ ) และ ( $R_{gb}$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงพฤติกรรมปกติของสารกึ่งตัวนำ

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. สารมีความชื้นมากเกินไปทำให้บดสารไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ผลการวัดเซรามิกมีความคลาดเคลื่อน

2. จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีพบว่า ผลการทดลองอาจมีค่าคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากอิเล็กโทรดบริเวณผิวหน้าของเม็ดผลึกไม่ราบเรียบ ส่งผลให้มีประกูค้ำระหว่างเนื้อสารกับอิเล็กโทรดได้

3. จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีพบว่า ผลการทดลองอาจคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากการที่ผู้ทำการทดลองไม่สวมใส่ถุงมือจึงทำให้มีคาบไขมันติดอยู่ที่บริเวณชิ้นงานเป็นผลทำให้การทดลองคลาดเคลื่อนได้

4. จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงพบว่าผลการทดลองนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจาก แสงที่ส่องเข้ามาในชิ้นงานนั้นไม่คงที่ และดับไปไม่ทันที่ทันใด จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ดังกล่าว



## เอกสารอ้างอิง

- ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. การศึกษาข้อสัมผัสไอห่มมิทของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม AI สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. การ ประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษา สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิธพันธุ์  $CdS/CuO$ . รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ  $In_xWO_3$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) และการกบประยุต์. รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- จิตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.  
วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิตติกร จรรยาธรรม. 2550. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จิตติกร จรรยาธรรม. 2552. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่แตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดุสิต เครื่องงาม. 2535. โพลีคริสตัลไลน์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่นสกูล. เกิดแสง.  
2547. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์  $CdTe$ . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุรียา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักไดโอด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ สุขเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิโลบล แก้วพวง, นิสานาถ ชัยชนะ, ชุตติกาญจน์ หุมล้า. 2554. ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่อวิวิธพันธุ์  $CdS/CuCrO_2$ . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วราภรณ์ บุญเกื้อ. 2554. สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $CdS/CdTe$ . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เมธิรา ร่วมสุข. 2555. สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยในระบบสุญญากาศ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิสร นพรุจิกุล. 2555. สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์  $CdS$  กับ  $CuAlO_2$ . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดุลย์ หาญวังม่วง. 2550. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- อัญฐพร อริยฤทธิ์. 2553. การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/CuAlO_2$  ปริณญานิพนธ์  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เอกชัย วิลามาศ. 2552. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ  
รอยต่อวิวิธพันธุ์  $CdS/CdTe$ . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Barsoukov E., Macdonald J.R. 2005. Impedance Spectroscopy Theory Experiment and  
Application. 2<sup>nd</sup> Edition. New Jersey : John Wiley&Sons Inc. Hoboken.
- Jiban Podder<sup>1</sup>, Ryohei Kobayashi., Masaya Ichimura. 2005. Photochemical Deposition of  $Cu_xS$   
Thin Films from Aqueous Solutions. Thin Solid Films. Vol. 472. pp. 71-75
- Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics. 8<sup>th</sup> Edition. United States of America : John  
Wiley&Sons Inc.
- Mehdi Adelifard., Hosein Eshghi., Mohammad Mehdi Bagheri Mohagheghi. 2012. Synthesis and  
Characterization of Nanostructural  $CuS-ZnS$  Binary Compound Thin Films Prepared by  
Spray Pyrolysis. Optics Communications. Vol. 285. pp. 4400-4404
- Runyan, W.R., 1975. Semiconductor Measurement and Instrument, 3<sup>rd</sup> Edition, New York:  
Mc.Graw-Hill.
- Sze S.M. 2007. Semiconductor Devices Physics and Technology. 3<sup>rd</sup> Edition. United States of  
America : John Wiley&Sons Inc.
- Xu, Q., Huang, B., Zhao, Y., Yan Y., Noufi, R., Wei, S., Ho. 2012. Crystal and Electronic  
Structure of  $Cu_xS$  Solar Cell Absorbers. Appl. Phys. Lett. 100,061906-1-061906-4.
- Yan Han., Yaping Wang., Wenhong Gao., Yijing Wang., Lifang Jiao., Huatang Yuan., Shuangxi  
Liu. 2011. Synthesis of Novel  $CuS$  with Hierarchical Structures and Its Application in  
Lithium-Ion Batteries. Powder Technology. Vol. 212. pp. 64-68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$ ,  $\text{CuO}$  และ  $\text{SnO}_2$  ที่  
ได้จากไฟล์ข้อมูลมาตรฐาน JCPDS (The Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

PDF#35-1401: QM=Star/Calculated; d=Other/Unknown; I=(Unknown)													PDF Card				
Copper Aluminum Oxide $\text{CuAlO}_2$																	
Radiation=CuK $\alpha$ 1 Calibration= Ref= Level-1 PDF					Lambda=1.5406 d-Cutoff=					Filter= I/c(RIR)=							
Rhombohedral R-3m(166)																	
Density(c)=5.06			Density(m)=			Mwt=			Vol=			Z=3			mp=		
Ref= Ibid																	
Strong Line: 2.38/X 2.45/5 2.82/4 1.61/3 1.43/3 2.14/2 1.40/2 5.65/1																	
33 Lines, Wavelength to Compute Theta = 1.54056A(Cu), I%-Type = (Unknown)																	
#	d(A)	I(I)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)	#	d(A)	I(I)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)
1	5.6479	10.0	0	0	3	15.677	7.839	0.0885	18	1.1380	3.0	1	1	9	85.199	42.600	0.4394
2	2.8229	40.0	0	0	6	31.670	15.835	0.1771	19	1.0872	2.0	0	1	14	90.226	45.113	0.4599
3	2.4474	47.0	1	0	1	36.690	18.345	0.2043	20	1.0681	3.0	2	0	8	92.302	46.151	0.4681
4	2.3750	100.0	0	1	2	37.850	18.925	0.2105	21	1.0041	3.0	1	1	12	100.195	50.097	0.4980
5	2.1358	23.0	1	0	4	42.280	21.140	0.2341	22	0.9990	3.0	0	2	10	100.897	50.448	0.5005
6	1.8824	9.0	0	0	9	48.309	24.155	0.2656	23	0.9735	2.0	1	0	16	104.605	52.302	0.5136
7	1.7303	4.0	1	0	7	52.869	26.434	0.2890	24	0.9413	2.0	0	0	18	109.833	54.916	0.5312
8	1.6086	30.0	0	1	8	57.221	28.610	0.3108	25	0.9336	1.0	2	1	1	111.190	55.595	0.5356
9	1.4285	26.0	1	1	0	65.262	32.631	0.3500	26	0.9294	4.0	1	2	2	111.950	55.975	0.5380
10	1.4120	5.0	0	0	12	66.121	33.060	0.3541	27	0.9245	1.0	0	1	17	112.855	56.427	0.5408
11	1.3980	15.0	1	0	10	66.870	33.435	0.3577	28	0.9131	2.0	2	1	4	115.042	57.521	0.5476
12	1.3852	1.0	1	1	3	67.570	33.785	0.3610	29	0.8554	3.0	1	2	8	128.445	64.223	0.5845
13	1.3039	1.0	0	1	11	72.421	36.210	0.3835	30	0.8246	3.0	3	0	0	138.175	69.087	0.6064
14	1.2748	9.0	1	1	6	74.348	37.174	0.3922	31	0.8186	2.0	2	1	10	140.431	70.215	0.6108
15	1.2339	2.0	0	2	1	77.256	38.628	0.4052	32	0.8045	1.0	0	2	16	146.457	73.229	0.6215
16	1.2243	6.0	2	0	2	77.976	38.988	0.4084	33	0.8015	1.0	0	1	20	147.911	73.956	0.6238
17	1.1874	2.0	0	2	4	80.889	40.445	0.4211									

PDF#29-1484: QM=Doubtful(?); d=Other/Unknown; I=(Unknown)													PDF Card				
Tin Oxide $\text{SnO}_2$																	
Radiation=CuK $\alpha$ 1 Calibration= Ref= Level-1 PDF					Lambda=1.5406 d-Cutoff=					Filter= I/c(RIR)=							
Orthorhombic, P212121(19)																	
Cell=4.714x5.727x5.214<90x90x90>																	
Density(c)=7.11			Density(m)=			Mwt=			Vol=			Z=4			mp=		
Ref= Ibid																	
Strong Line: 2.98/X 3.64/3 2.61/3 1.75/3 2.51/2 1.72/2 1.77/2 1.57/2																	
22 Lines, Wavelength to Compute Theta = 1.54056A(Cu), I%-Type = (Unknown)																	
#	d(A)	I(I)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)	#	d(A)	I(I)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)
1	3.6400	30.0	1	1	0	24.434	12.217	0.1374	12	1.7180	20.0	2	2	1	53.277	26.638	0.2910
2	2.9840	100.0	1	1	1	29.919	14.960	0.1676	13	1.5680	15.0	1	1	3	58.846	29.423	0.3189
3	2.8610	5.0	0	2	0	31.237	15.619	0.1748	14	1.4920	5.0	2	2	2	62.165	31.083	0.3351
4	2.6090	25.0	0	0	2	34.344	17.172	0.1916	15	1.4860	10.0	0	2	3	62.444	31.222	0.3365
5	2.5080	20.0	0	2	1	35.773	17.886	0.1994	16	1.4630	15.0	1	3	2	63.540	31.770	0.3418
6	2.3650	10.0	0	1	2	38.016	19.008	0.2114	17	1.4550	15.0	3	1	1	63.930	31.965	0.3436
7	2.1200	15.0	1	1	2	42.611	21.305	0.2358	18	1.3810	5.0	0	4	1	67.803	33.902	0.3621
8	1.9270	5.0	0	2	2	47.123	23.561	0.2595	19	1.2570	5.0	2	2	3	75.583	37.792	0.3978
9	1.8190	5.0	2	2	0	50.107	25.053	0.2749	20	1.2130	5.0	3	3	0	78.843	39.422	0.4122
10	1.7680	20.0	1	3	0	51.657	25.828	0.2828	21	1.1910	5.0	2	4	1	80.594	40.297	0.4198
11	1.7490	25.0	2	0	2	52.260	26.130	0.2859	22	1.1410	5.0	2	0	4	84.923	42.461	0.4382

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDF#48-1548: QM=Star/Calculated; d=Other/Unknown; l=(Unknown)													PDF Card				
Tenorite, syn CuO																	
Radiation=CuKα1						Lambda=1.5406			Filter=								
Calibration=						d-Cutoff=			I/c(RIR)=								
Ref= Level-1 PDF																	
Monoclinic, C2/c(15)											Z=4		mp=				
Cell=4 688x3.423x5.132<90x99.506x90>											Pearson=						
Density(c)=6.505		Density(m)=		Mwt=		Vol=											
Ref= Ibsd.																	
Strong Line: 2.52/X 2.32/X 2.53/4 1.87/3 2.31/2 1.51/2 1.41/2 1.38/1																	
51 Lines, Wavelength to Compute Theta = 1.54056Å(Cu), I%-Type = (Unknown)																	
#	d(Å)	l(f)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)	#	d(Å)	l(f)	h	k	l	2-Theta	Theta	1/(2d)
1	2.7520	13.0	1	1	0	32.508	16.254	0.1817	27	1.1699	4.0	3	1	-3	82.359	41.180	0.4274
2	2.5324	37.0	0	0	2	35.417	17.709	0.1974	28	1.1618	2.0	2	2	2	83.063	41.531	0.4304
3	2.5237	100.0	1	1	-1	35.543	17.772	0.1981	29	1.1560	4.0	3	1	2	83.566	41.783	0.4325
4	2.3243	99.0	1	1	1	38.708	19.354	0.2151	30	1.1239	1.0	4	0	-2	86.530	43.265	0.4449
5	2.3131	21.0	2	0	0	38.902	19.451	0.2162	31	1.1214	1.0	2	2	-3	86.772	43.386	0.4459
6	1.9610	3.0	1	1	-2	46.259	23.129	0.2550	32	1.1092	1.0	1	1	4	87.965	43.983	0.4508
7	1.8676	30.0	2	0	-2	48.716	24.358	0.2677	33	1.1084	1.0	1	3	0	88.051	44.026	0.4511
8	1.7781	1.0	1	1	2	51.343	25.671	0.2812	34	1.0914	3.0	1	3	-1	89.787	44.894	0.4581
9	1.7118	7.0	0	2	0	53.485	26.743	0.2921	35	1.0733	1.0	1	3	1	91.726	45.863	0.4659
10	1.6211	1.0	0	2	1	56.741	28.371	0.3084	36	1.0401	1.0	2	0	4	95.562	47.781	0.4807
11	1.5823	10.0	2	0	2	58.264	29.132	0.3160	37	1.0176	2.0	2	2	3	98.388	49.194	0.4913
12	1.5060	20.0	1	1	-3	61.524	30.762	0.3320	38	1.0079	2.0	3	1	3	99.681	49.840	0.4961
13	1.4179	10.0	0	2	2	65.811	32.906	0.3526	39	0.9916	1.0	4	0	2	101.932	50.966	0.5042
14	1.4101	15.0	3	1	-1	66.220	33.110	0.3546	40	0.9818	2.0	1	1	-5	103.353	51.677	0.5092
15	1.4059	1.0	3	1	0	66.447	33.224	0.3557	41	0.9804	2.0	2	2	-4	103.561	51.781	0.5100
16	1.3792	6.0	1	1	3	67.903	33.951	0.3625	42	0.9580	2.0	4	2	0	107.045	53.523	0.5219
17	1.3753	14.0	2	2	0	68.123	34.061	0.3636	43	0.9431	1.0	1	3	-3	109.515	54.757	0.5301
18	1.3616	1.0	2	2	-1	68.905	34.453	0.3672	44	0.9394	3.0	4	2	-2	110.166	55.083	0.5323
19	1.3155	1.0	3	1	-2	71.681	35.841	0.3801	45	0.9336	1.0	4	0	-4	111.187	55.593	0.5356
20	1.3047	5.0	3	1	1	72.371	36.186	0.3832	46	0.9212	2.0	1	1	5	113.485	56.742	0.5428
21	1.2959	1.0	2	2	1	72.942	36.471	0.3858	47	0.9182	2.0	4	2	1	114.056	57.028	0.5446
22	1.2657	6.0	0	0	4	74.976	37.488	0.3950	48	0.9096	1.0	1	3	3	115.739	57.870	0.5497
23	1.2618	5.0	2	2	-2	75.243	37.621	0.3962	49	0.9042	1.0	5	1	-1	116.833	58.417	0.5530
24	1.2017	1.0	0	2	3	79.731	39.865	0.4161	50	0.8885	1.0	2	2	4	120.216	60.108	0.5628
25	1.1964	2.0	2	0	-4	80.155	40.077	0.4179	51	0.8872	6.0	3	3	1	120.504	60.252	0.5636

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายวชิระ น้อยหว่า  
 วัน เดือน ปีเกิด 17 ธันวาคม 2534  
 ภูมิลำเนา 100/434 ซ.ย่าโม ถ.นิตโย ต.ธาตุเชิงชุม อ.เมืองสกลนคร จ.สกลนคร  
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล  
 ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์  
 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว  
 วัน เดือน ปีเกิด 4 กุมภาพันธ์ 2535  
 ภูมิลำเนา 49/1 หมู่ 9 ต.ยางหวาย อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ  
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนคอนสวรรค์  
 ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์  
 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

