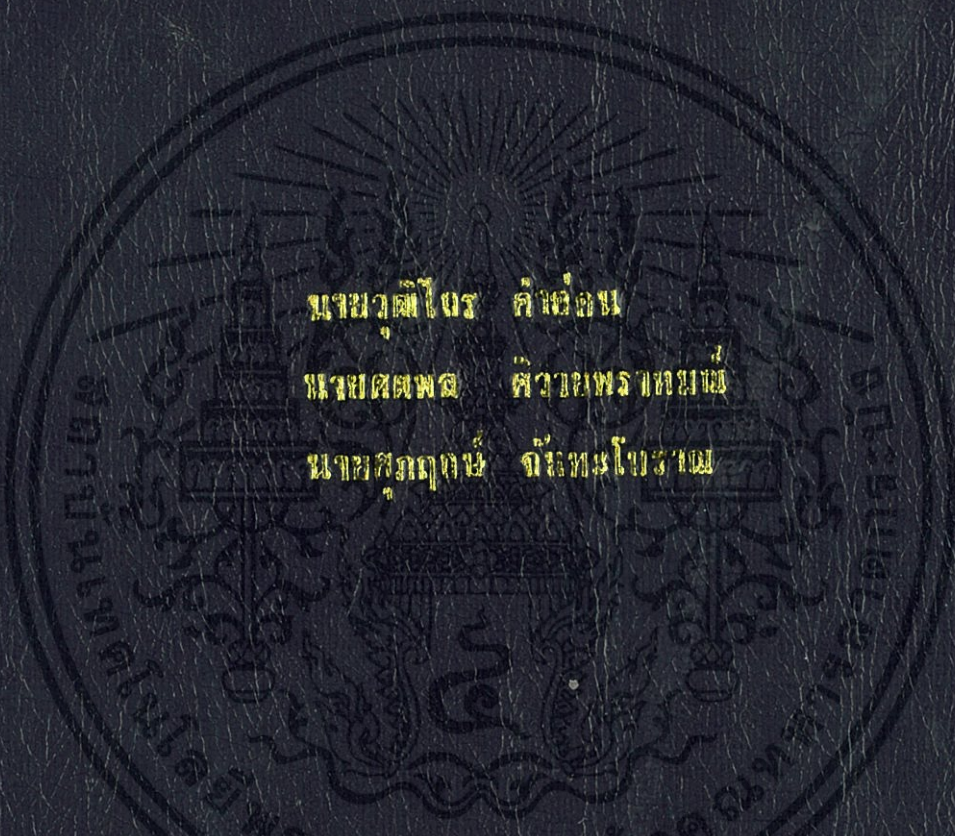


สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_xCa_{1-x}O$   
ELECTRICAL PROPERTIES OF  $Cu_xCa_{1-x}O$  SEMICONDUCTING  
COMPOUND<sup>x x</sup>



นายวุฒิไกร คำอ่อน  
นายศุภผล คำพรานนท์  
นายศุภฤกษ์ จันทะโบราณ

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของนเรศวรศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์

ณ สำนักเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$   
ELECTRICAL PROPERTIES OF  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  SEMICONDUCTING  
COMPOUND



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

**ELECTRICAL PROPERTIES OF  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  SEMICONDUCTING  
COMPOUND**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ใช้

**ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$   
ELECTRICAL PROPERTIES OF  $Cu_{1-x}Cd_xO$  SEMICONDUCTING  
COMPOUND

ชื่อนักศึกษา นายวุฒิไกร คำอ่อน  
นายศตพล ศิวายพราหมณ์  
นายศุภฤกษ์ จันทะโบราณ

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จูตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
ประยุกต์ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ	
อ.ภารจ บัณฑิตธาตวิทย์	
รศ.ดร.จูตินัย แก้วแดง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$
ชื่อนักศึกษา	นายวุฒิไกร คำอ่อน
	นายศตพล ศิวายพราหมณ์
	นายศุภฤกษ์ จันทะโบราณ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จตุตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมผลึกพหุพันธ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $CuO$  และ  $CdO$  โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นด้วยครกอาเกตให้ละเอียดและคลุกเคล้าให้เข้ากันดีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนต่อไปคือนำเอาผงผลึกที่บดดีแล้วไปขึ้นรูปโดยการอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 4 ตัน ที่อุณหภูมิห้อง ผงผลึกที่อัดเม็ดแล้วจะนำไปเผาในบรรยากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพคล่องของฮอลล์ และความหนาแน่นของพาหะอิสระ สามารถคำนวณได้จาก การวัดโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังได้ทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) ที่ความเข้มข้นสารเจือ Cd ค่าต่างๆ พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ความนำไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ สามารถที่จะคำนวณหาค่าได้จากข้อมูลของการทดลอง นอกจากนี้เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ที่มีปริมาณ Cd เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล สามารถตรวจรู้ไอระเหยของอะซีโตนได้ด้วยค่าความไวสูงถึง 16.6 ที่ความดันบรรยากาศปกติ โดยมีค่าตอบสนองและเวลาคืนตัวที่สั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
คำสำคัญ: เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$ , สมบัติทางไฟฟ้า, อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

<b>Title</b>	Electrical Properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ Semiconducting Compound
<b>Student</b>	Mr. Wutikrai Khamon Mr. Satapol Siwayapram Mr. Suparerk Jantaboram
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Department</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2556
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang

### ABSTRACT

In this special project, polycrystalline of  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) were obtained by solid state reaction method. The mixture of high purity of  $\text{CuO}$  and  $\text{CdO}$  powders was well ground in agate mortar for 2 h. The mixed powders were pressed at room temperature by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at  $900^\circ\text{C}$  for 6 h. The crystal structure of polycrystalline of  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) was checked by X-ray diffraction method. Surface morphology of sample was observed by scanning electron microscope (SEM). Electrical properties of the as-sintered pellets were performed using van der Pauw configuration at room temperature. Electrical resistivity, Hall mobility and carrier concentration were evaluated. The variation of impedance spectroscopy as a function of Cd concentration was also investigated. Important parameters such as complex impedance, conductance and capacitance as a function of Cd concentration were calculated from the experimental results. In addition,  $\text{CuO}$  ceramic doped with 3 mol% of  $\text{CdO}$  exhibits excellent acetone vapor sensing with the maximum sensitivity about 16.6 at room temperature in atmospheric pressure with fast response and recovery time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords:**  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ceramics, Electrical properties, Impedance spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

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

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจ

นายวุฒิไกร	คำอ่อน
นายศตพล	ศิวายพราหมณ์
นายศุภฤกษ์	จันทะโบราณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	5
2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	8
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ	10
2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	10
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาลเออร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์	11
2.1.3.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$	12
2.1.4 ซ็อกพร่องผลึก	15
2.1.4.1 ซ็อกพร่องผลึกแบบจุด	15
2.1.4.2 ซ็อกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	15
2.1.4.3 ซ็อกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 18  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	23
2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	23
2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	24
2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิก	25
2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	29
2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	31
2.2.4 ปრაกฏการณ์ฮอลล์	32
2.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	37
2.3 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	39
2.3.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	39
2.3.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	40
2.3.3 กราฟของโบด(Bode plot)	44
2.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมประสมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน $ Z $	46
2.3.5 หลักการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	53
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>55</b>
3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{x-1}Cd_xO(0 \leq x \leq 0.03)$ โดยวิธี ปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	55
3.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{x-1}Cd_xO(0 \leq x \leq 0.03)$ โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	60
3.3 วิธีการสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	61
3.4 วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	63
3.5 วิธีการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	66
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	66
4.1.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	66
4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	67
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	70
4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	71
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยวัดที่อุณหภูมิสูงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	74
4.1.6 การศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยวัดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	81
4.1.7 การศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น เอกสารนี้ไม่มีที่ติดเบสลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง 94

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	98
ประวัติผู้เขียน	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	7
2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	9
2.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	59
4.1 ค่าคงที่ของโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	68
4.2 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าค่าคงที่ของฮอลล์ ความหนาแน่นของโฮลสภาพคล่องพาหะและระยะปลอดการชนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	72
4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	86
4.4 ความไวต่อไอระเหยของอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	9
2.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	11
2.4 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก GaAs	12
2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $Cu_2O$	13
2.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	14
2.7 แผนภาพเฟสของระบบสารประกอบ CuO	14
2.8 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	16
2.9 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	16
2.10 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	17
2.11 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	17
2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	19
2.13 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	19
2.14 วิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	27
2.17 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	30
2.18 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	30
2.19 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	31
2.20 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	33
2.21 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	37
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	40
2.24 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	40
2.25 แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$	42
2.26 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง ) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,จ) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรโคปี(ค,ฉ)	42
2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว	45
2.28 ก. แสดงวงจรสมมูลความต้านทาน $R_p$ กับความจุ $C_p$ ต่ออนุกรมกัน ข. แสดงค่าสมมูลของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	46
2.29 ก.แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อเป็นกรณีที่มีความจุมีค่าต่ำ ข.แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อเป็นกรณีที่มีความต้านทานมีค่ามาก	47
2.30 แสดงกราฟความความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่	49
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่	49
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	49
2.33 แสดงกราฟความความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่	50
2.34 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAlO_2$	50
2.35 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAlO_2$	51
2.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (C) กับความถี่ ( $\omega$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}As_xO_2$	52
3.1 การวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	61
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )	62
3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{23}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{14}$ )	62
3.4 วิธีการต่อวงจรเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	63

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	64
3.6	65
4.1	66
4.2	67
4.3	69
4.4	70
4.5	71
4.6	71
4.7	72
4.8	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	75
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	75
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	76
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	76
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์(-Z'')กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	77
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	77
4.15 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	78
4.16 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	78
4.17 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	79

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	79
4.19 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	80
4.20 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	80
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	81
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	81
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	82
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	82
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์(-Z")กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	83
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	83

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right)$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	85
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (s) กับความต้านทาน ( $\Omega$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	87
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อไอระเหยของอะซีโตนกับปริมาตรเชื้อของสารประกอบ Cd ในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ มนุษย์จึงพยายามคิดค้นและพัฒนา เพื่อค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนและตอบสนองความต้องการ ซึ่งพลังงานนั้นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สามารถใช้ได้ในทุกๆ ที่ เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่เป็นผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในธรรมชาติ

คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคำนึงถึงคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวแล้ว สารประกอบคิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) กับคิวปริสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด ได้มีการนำเอาสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ไปใช้เป็นขั้วแอนโอดของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดฟิล์มบางและเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Jeong, 2010) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมจากสารละลายของคอปเปอร์อะซีเตตกับโซเดียมอะซีเตตจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความต้านทานสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพีถึง 2 เท่า ในเชิงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  จะใช้ประสิทธิภาพสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ (Rakhshani, 1986) ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงพยายามประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายๆชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$  ก่อนข้างโคคเค่น ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{ZnO}$  โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (rf magnetron sputtering) ให้เคลือบลงบนแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของแผ่นโลหะ  $\text{Cu}$  จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-ZnO}$  มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในระดับ 3.85 เปอร์เซ็นต์ (Minami et al., 2011)

เข็มนาโน (nanotherads) และ ลวดนาโน (nanowires) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  จะมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.61 และ 2.69 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว (2.17 อิเล็กตรอนโวลต์) อย่างมาก ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงขึ้นนี้เป็นผลทางควอนตัมของขนาดอนุภาค (quantum size effect) ซึ่งเกิดจากเข็มนาโนและลวดนาโนมีขนาดเล็กมากจนประพจน์คล้ายเป็นวัสดุใน 1 มิติ ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$

และ CuO สามารถประดิษฐ์ให้เป็นอนุภาคนาโนได้ ซึ่งวัสดุนาโนจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แปลกใหม่และน่าสนใจในเชิงการวิจัยพื้นฐาน

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.2-1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจรู้แก๊สต่างๆ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก สิ่งประดิษฐ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ วาริสเตอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_2O$  และ CuO สามารถเตรียมได้จากหลายวิธีเช่น วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีอะโนดิกออกซิเดชัน (anodic oxidation) รีแอกทีฟสปัตเตอร์ริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มีเฟสของ Cu,  $Cu_2O$  ปะการกักร่วมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดียวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_2O$  สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ในช่วงอุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสม

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO และ CdO จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและผิวหน้าของเม็ดเซรามิกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ สำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO และ CdO
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยสังเกตดูผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.5 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะและปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$
- 1.3.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นของ  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$  เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.3.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยสังเกตคูผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
- 1.3.4 ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะและปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลของการเจือสารประกอบ  $\text{CdO}$  ที่มีต่อสมบัติของเม็ดเซรามิกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )
- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

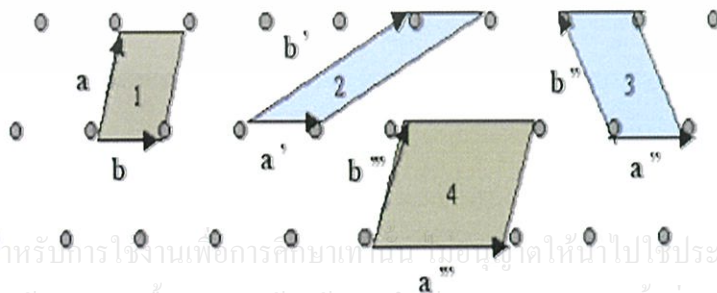
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

#### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก อาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงสร้างผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์ทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงสร้างผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โดยผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ


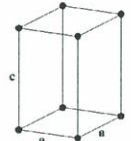
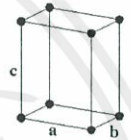
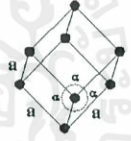

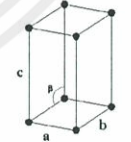
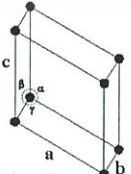
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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)	$a \neq b$	ไม่มี ข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  และ  $\vec{c}$  และ มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่ กำลังศึกษาอยู่นั้น

#### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

##### การระบุตำแหน่ง

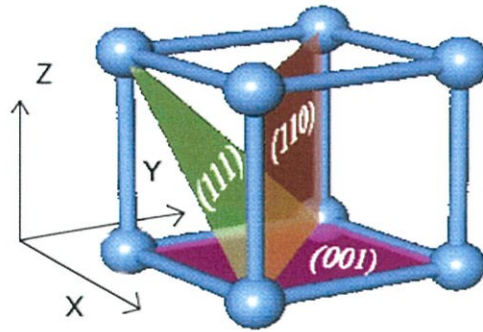
1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x, y, z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่า ตัวอย่าง จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$  การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มี เครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(hkl)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มี เครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

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

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น  $(x, y, z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใด ให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์  $(\infty)$  และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

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

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

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า (112) ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

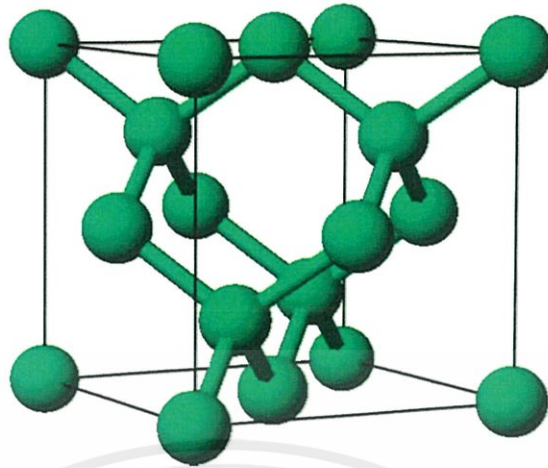
### 2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ลักษณะของโครงสร้างแลตทิซของผลึกนั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของสารนั้นซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ไม่เหมือนกัน เช่น สมบัติเชิงแสง ช่องว่างแลตทิซ สมบัติเชิงไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ  $\alpha$ -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่า โครงสร้างผลึกแบบเพชรนี้ เกิดจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices,  $a=b=c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง  $\frac{1}{4}$  ของเส้นทแยงมุมหนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอม และอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่ง  $(000)$ ,  $(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ ,  $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ ,  $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ ,  $(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4})$ ,  $(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4})$ ,  $(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4})$ ,  $(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$  ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดคู่ออมบ์ซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทางนอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงสร้างผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉาบฉวยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



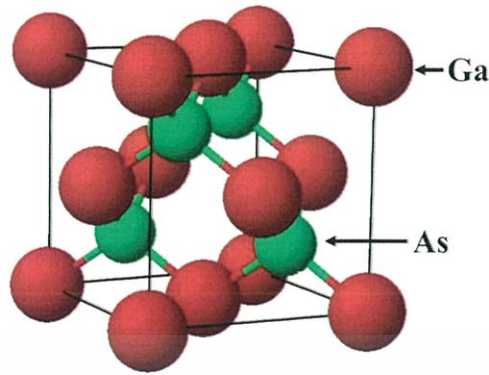
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์

### 2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure)

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และ II-VI เช่น GaAs, GaSb, InSb เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างผลึกแบบเพอร์ ได้จากการเอาโครงสร้างผลึกแบบเพอร์เซนเตอร์คิวบิก 2 โครง ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $a=b=c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา มาซ้อนเหลื่อมกันแต่ต่างกันตรงที่แต่ละโครงสร้างผลึกแบบเพอร์เซนเตอร์คิวบิกที่วางซ้อนเหลื่อมกันนั้นเป็นอะตอมของธาตุแต่ละชนิดกัน ดังรูปที่ 2.4

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วยอะตอมต่างชนิดกัน 2 ชนิดซึ่งมี ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมแต่ละชนิดต่างกัน แต่อะตอมที่ปลายแขนของพันธะสี่หน้าของอะตอมแต่ละตัวยังคงเป็นอะตอมชนิดเดียวกันดังนั้นความยาวพันธะของแต่ละอะตอมจึงเท่ากัน โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงยังเป็นแบบคิวบิก แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพอร์ ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก GaAs

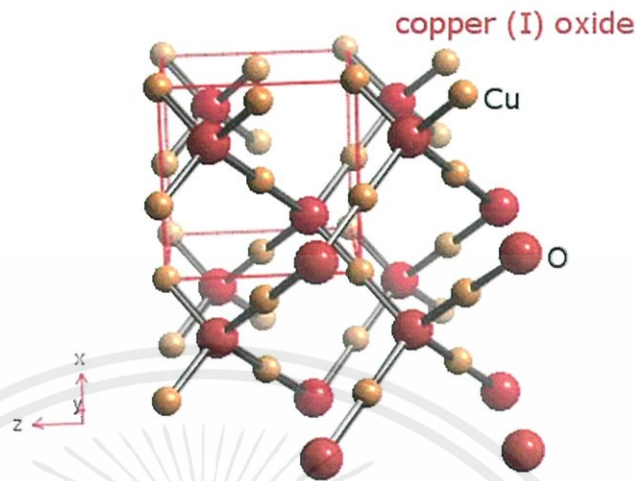
โดยที่อะตอมของธาตุ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง  $(0,0,0), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$  อะตอมของธาตุ As อยู่ที่ตำแหน่ง  $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}), (\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4})$  ปลายแขนของอะตอมของธาตุ Ga จะมีอะตอมของธาตุ As จับอยู่ 4 อะตอม และปลายแขนอะตอมของธาตุ As จะมีอะตอมธาตุ Ga จับอยู่ 4 อะตอมเช่นเดียวกัน

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V จะยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่ในกรณีนี้อะตอมของธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่ม III (หรือกลุ่ม V) ที่เราแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสม (เช่น Ga และ In ในโลหะผสม  $Ga_xIn_{1-x}As$ ) จะเรียงตัวอย่างสุ่ม (random) อยู่ในโครงผลึกย่อยเฟสเซนเตอร์คิวบิก ของธาตุกลุ่ม III

### 2.1.3.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $Cu_2O$ และ $CuO$ (Bugarinovic, 2011; จิตินัย, 2556)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ  $Cu_2O$  จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากชั้นแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับชั้นแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ชั้นแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ชั้นแลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทะแยงมุมของชั้นแลตทิซแรกเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวเส้นทะแยงมุม ค่าคงที่โครงผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ  $Cu_2O$  มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ

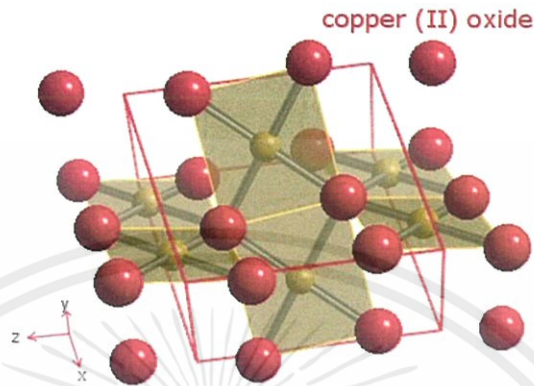
ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อรา เคยนำไปทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



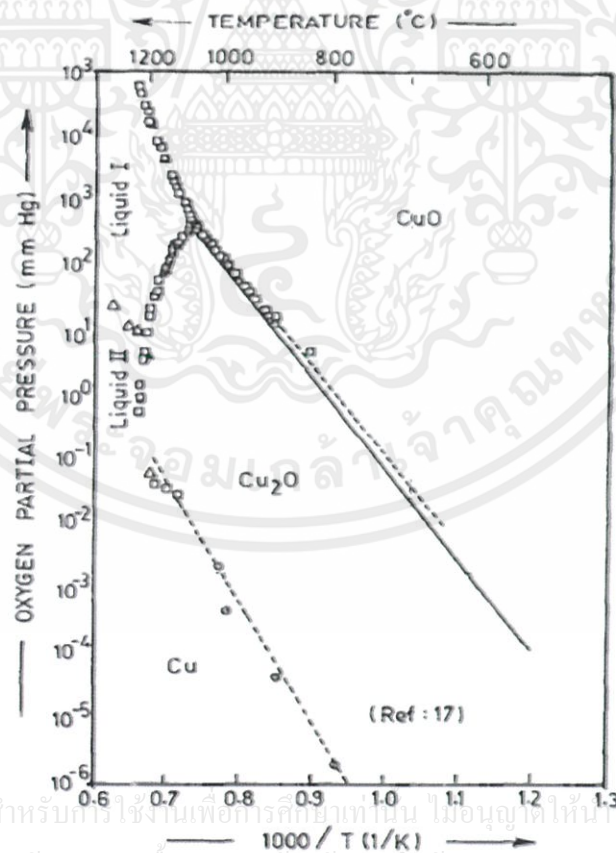
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีสีดำพบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูป มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนेट อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อนและละลายได้ในกรดอะซิติก แต่กรดสารประกอบ  $\text{CuO}$  สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่ออยู่ในสภาวะอากาศความดันต่ำก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีสีดำ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นไฟเบอร์และเซรามิกตัวตรวจรู้แก๊สชนิดต่างๆ และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ  $3d^9$  ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ที่จุด A แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu, Cu<sub>2</sub>O และ CuO



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

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

ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด โดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

#### 2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

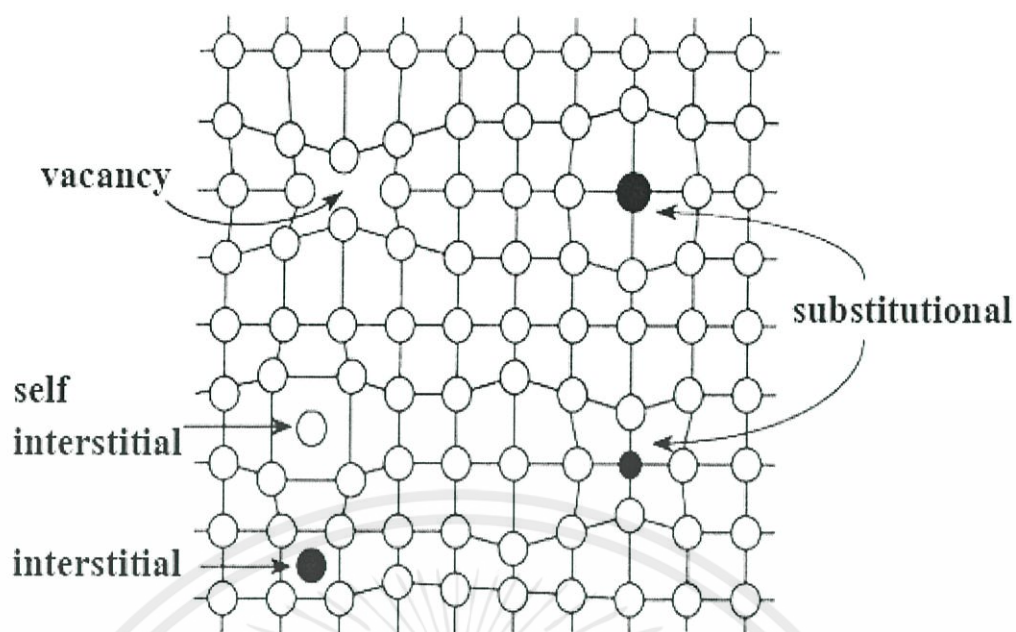
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.7 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนเคิล (Frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

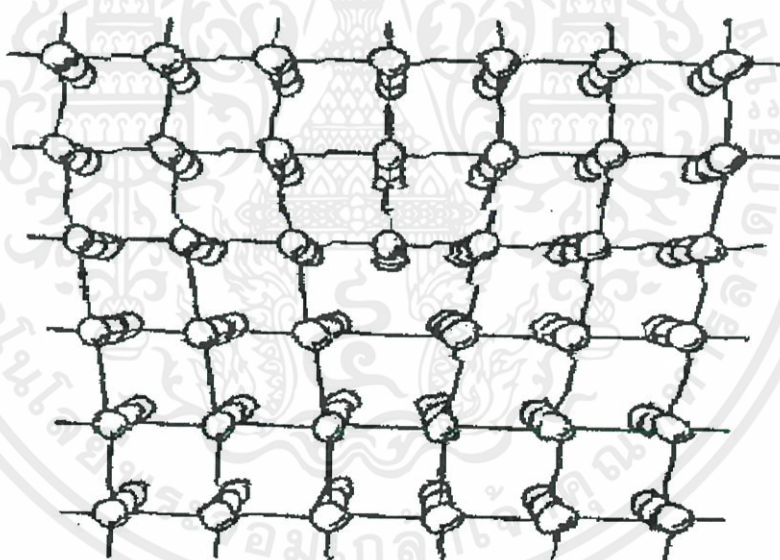
#### 2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุด โครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการ

ผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.8 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.9

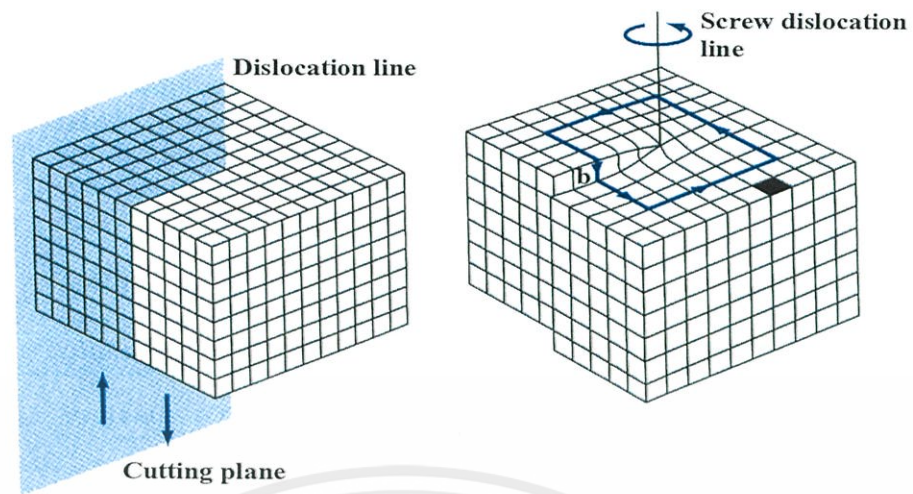


รูปที่ 2.8 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.9 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

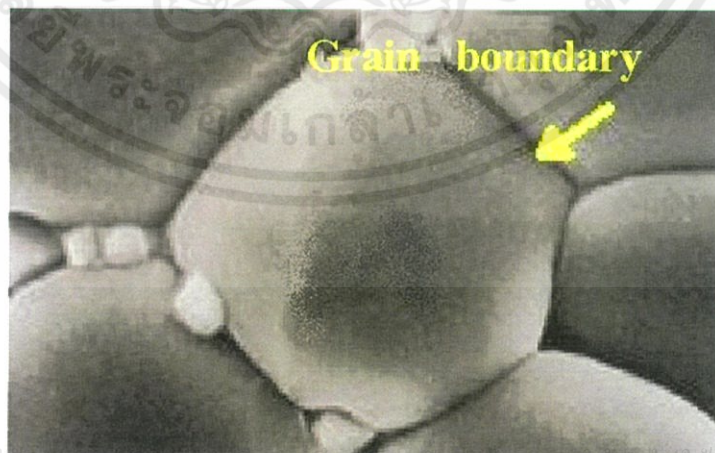


รูปที่ 2.10 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

### 2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

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

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

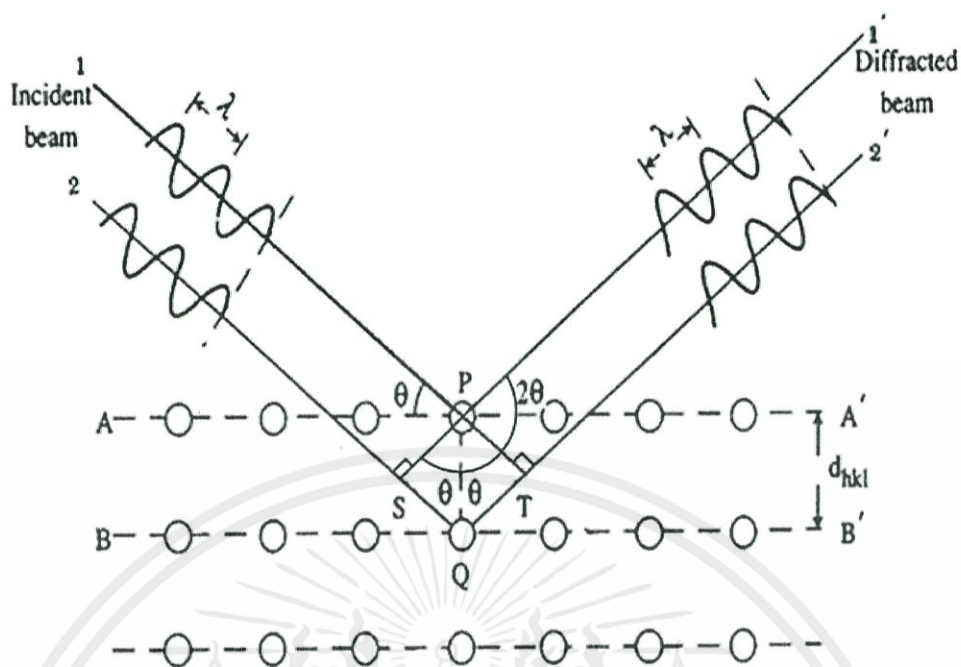
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) ดับเบิลยู เอช แบรกก์ และ ดับเบิลยู แอล แบรกก์ (W.H. Bragg และ W.L. Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

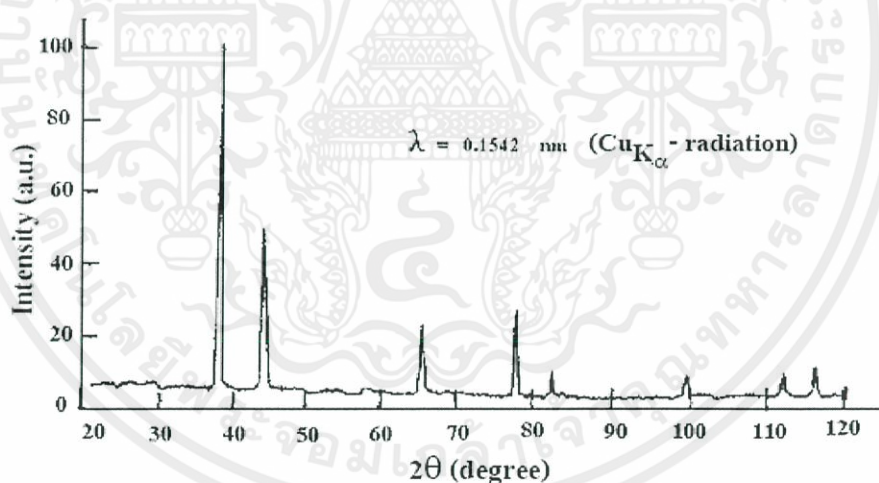
เมื่อ	$d_{hkl}$	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
	$\theta$	คือ	มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
	$n$	คือ	ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

รูปที่ 2.12 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ต่างกัน สังเกตได้จากพิก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

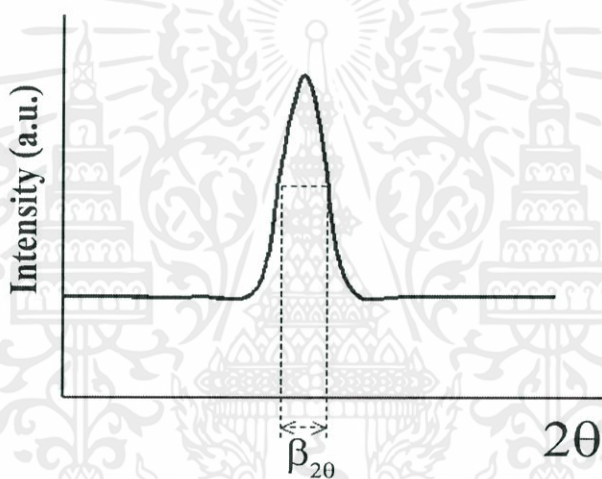
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ (2.3)

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

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 ค่าคงที่ของโครงผลึก  
 $h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.14 วิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารูปที่ 2.13 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 ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

$\epsilon$  คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอยู่ใต้อำนาจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิทย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; จูตินัย, 2551; Hearle, 1973)

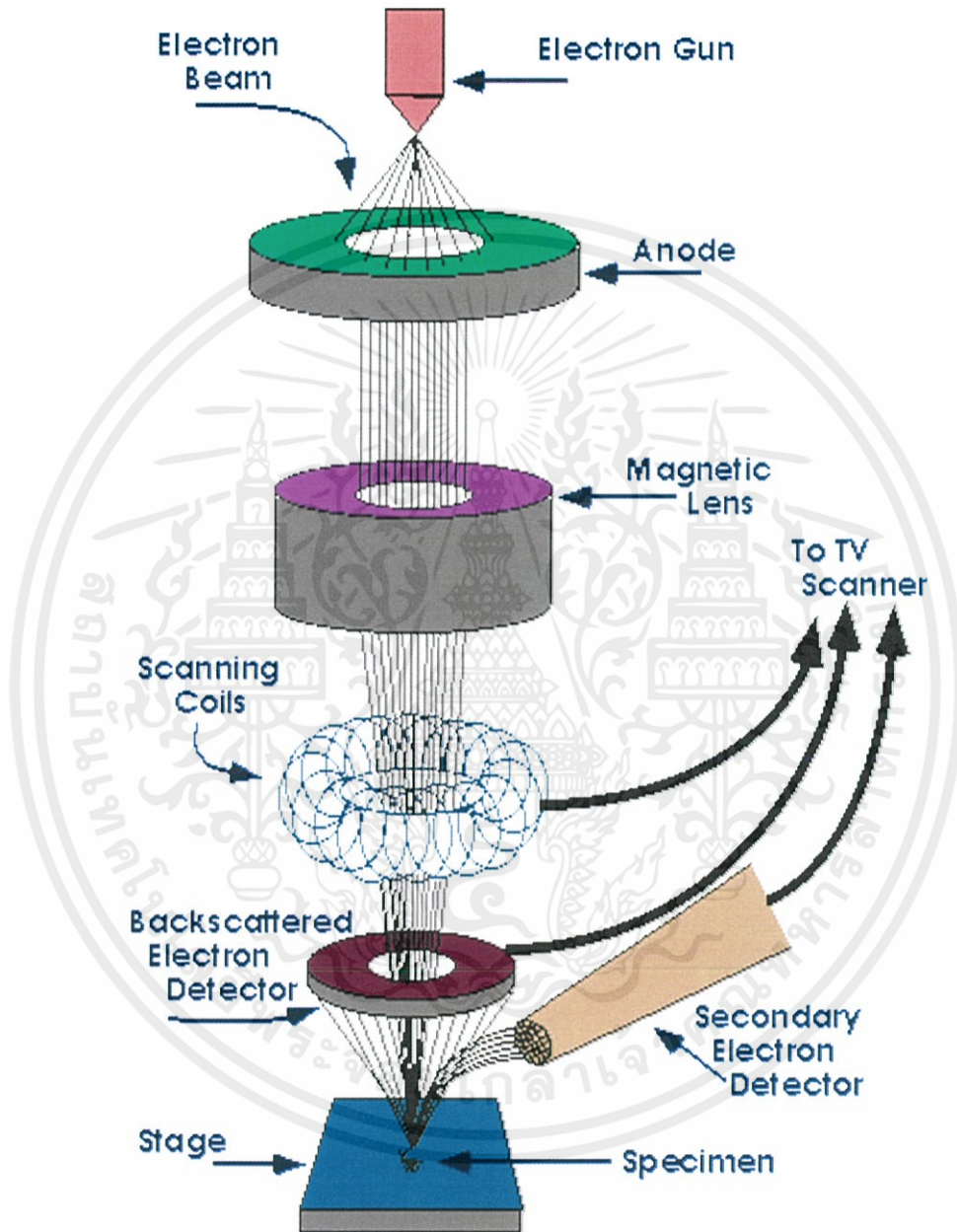
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม เอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 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 2.14 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไป

บนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวซ เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิคย์, 2545; จูตินัย, 2550; งามนิคย์, 2551; จูตินัย, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975; van der Pauw L.J., 1958; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฎี, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; คุสิต, 2535; คุสิต, 2542; Sze, 1981)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮล จากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

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

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

เมื่อ	$f(E)$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน $E$ ที่ อุณหภูมิ $T$ ใดๆ
	$E_F$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มี (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 เอกสารนี้ (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เรียกว่าไม่ว่ากรณี (extrinsic semiconductor) ัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_c(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

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

เมื่อ  $N_c$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

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

เมื่อ  $m_c^*$  คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

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

จากสมการที่ (2.8) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์กลางของขอบล่างของแถบนำนั้นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

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

เมื่อ  $E_i$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

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

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

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

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

เมื่อ

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

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

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

จากสมการที่ (2.17) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

### 2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ใน

สภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน และ โฮลจะหาได้ ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 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

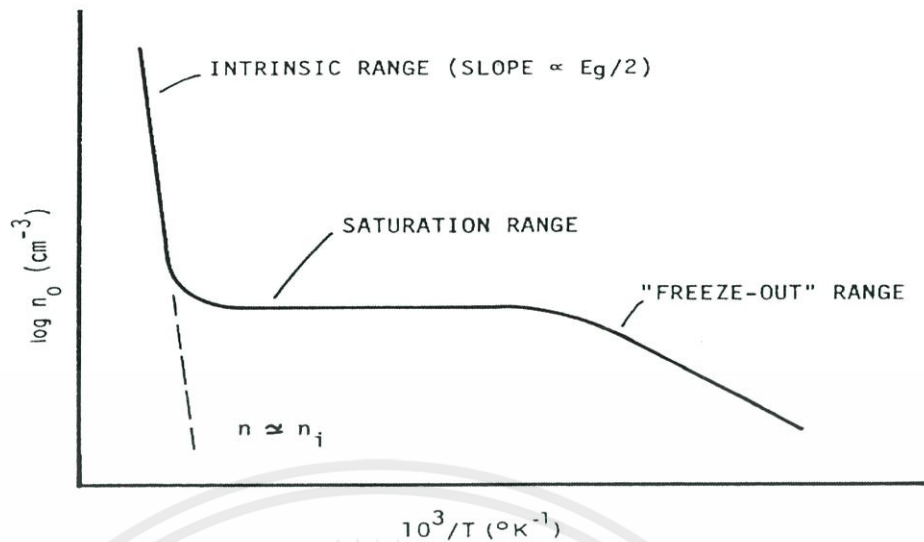
$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.20)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวชนิดเอ็น (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 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ  
 $N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ  
 $n_d, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดัง  
 แสดงในรูปที่ 2.15 คือ



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของอะตอมของสารเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พหุหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.21) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

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

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.24)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพหุหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิต่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรีนสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.23) และ (2.24) จะกลายเป็นสมการอินทรีนสิก

$$n = p = n_i \quad (2.25)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนสิก 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 (2.26) 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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

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

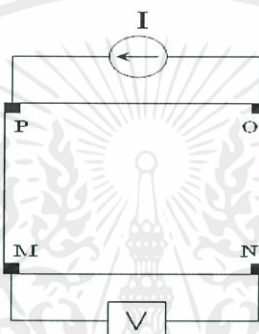
จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.34) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.35) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

### 2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.18 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

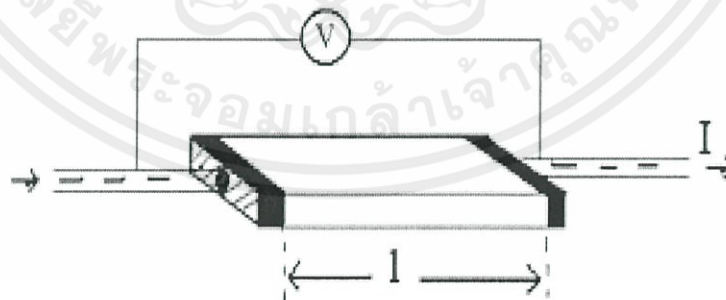
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.40)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

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

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็น วิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.18 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 2.19 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วย โวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

#### 2.2.4 ปปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975; Elangovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง 1 อย่างไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ  
 $\mu_e$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.46) และ (2.47) คือ

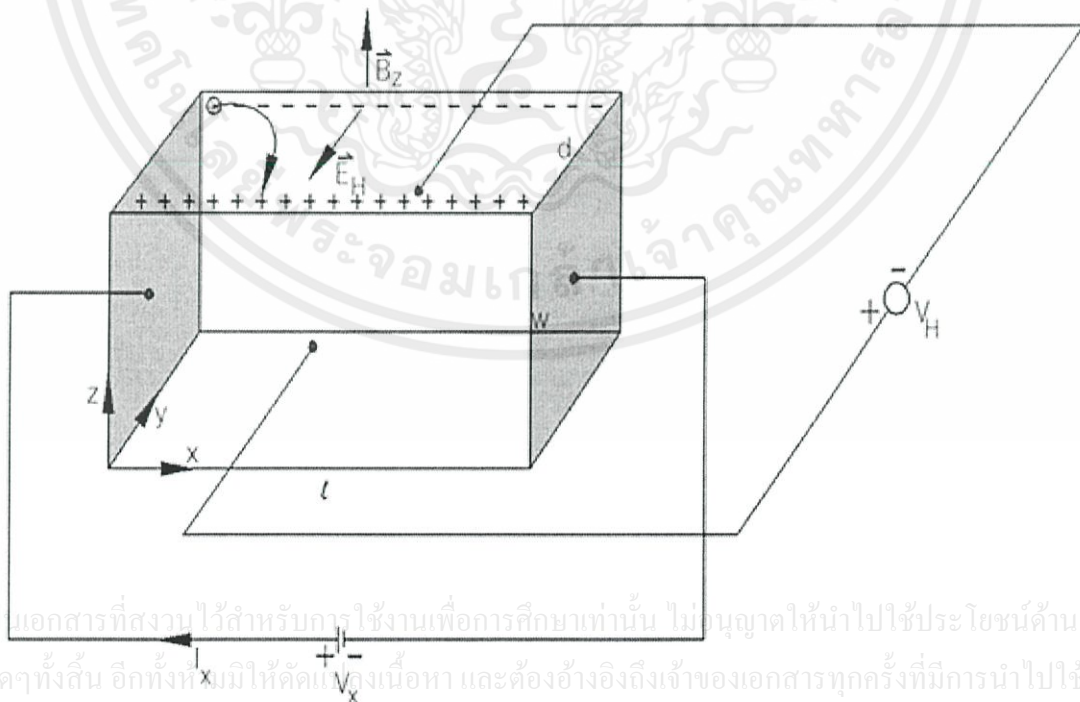
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแถมเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.49)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.48)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = gnv_x(wd) \quad (2.49)$$

จากกฎของโอห์ม

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

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

จากรูปที่ 2.21

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

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.40) 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 อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall voltage:  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

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

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสถานะสมดุลเชิงความร้อน หรือสถานะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $-z$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.55) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

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

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

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลาย ๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยามค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดัง

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

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเรหาค่าของ  $r$  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

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

หรือ จากสมการที่ (2.61) และ (2.67)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่งมีค่าไม่ว่ากรณีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณ

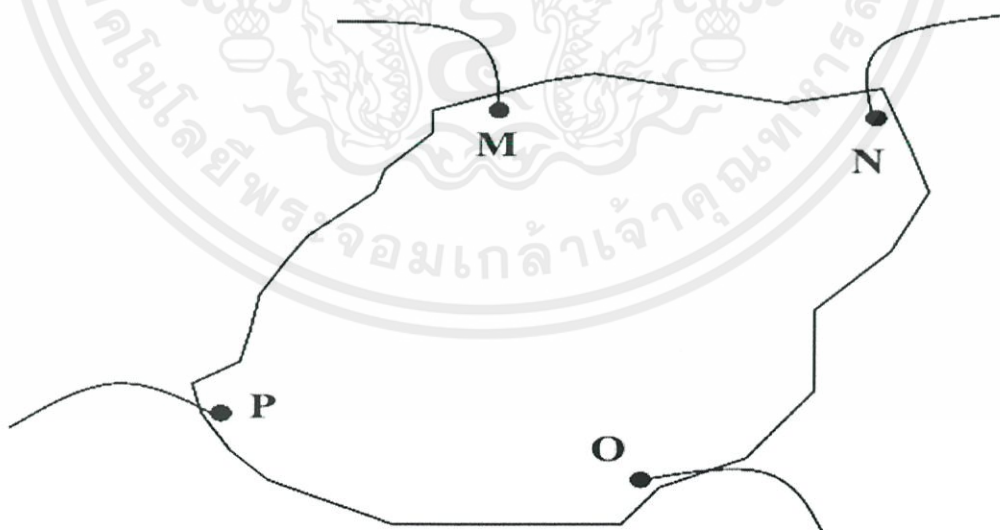
ว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพหุคูณที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพหุคูณที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

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

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

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งที่ ๕๐๓ อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รูปที่ 2.21 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

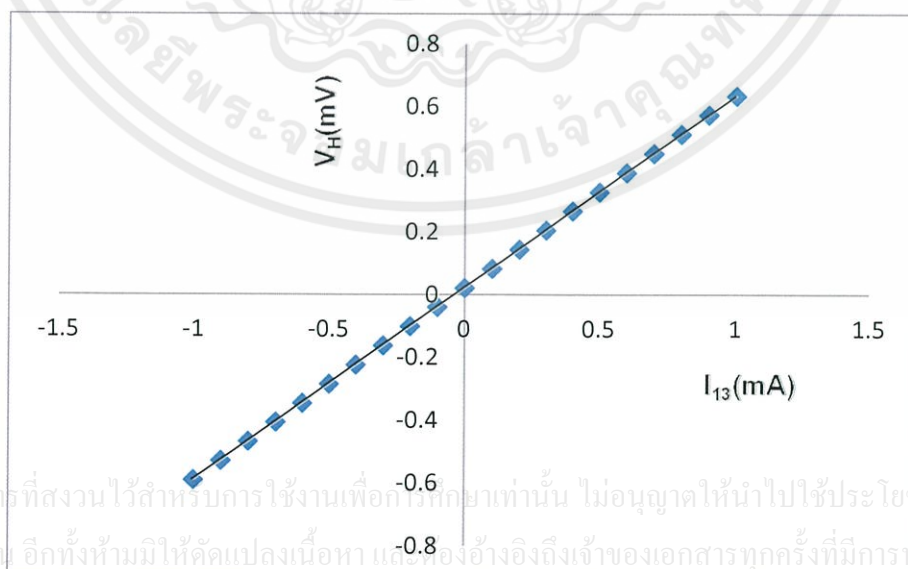
$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right). \quad (2.70)$$

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 ( $I$ ) ที่ได้จากกราฟทดลองเราจะ ได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.22 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า  $\frac{V_H}{I}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แต่อย่างใดจนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.73)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

### 2.3 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน (ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2554; ฐิตินัย, 2556)

#### 2.3.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกันอิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.74)$$

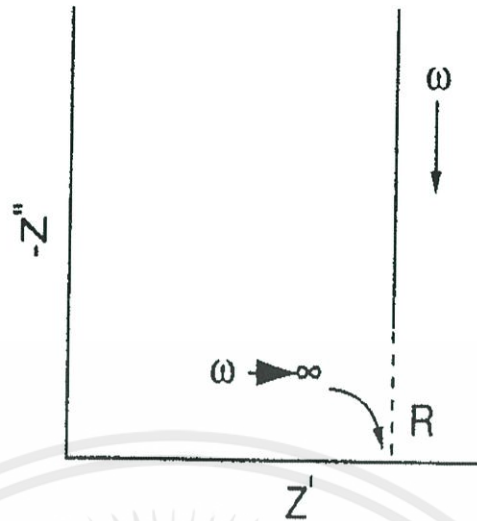
อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น  $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$  และ

$Z_R = R_S$  แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \quad (2.75)$$

โดยที่  $R_S$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน  $\frac{1}{\omega C}$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณี ความถี่เข้าใกล้ลิมิตหรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่ค่า  $R_S$  จากกราฟของไนควิสต์

(Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.3.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

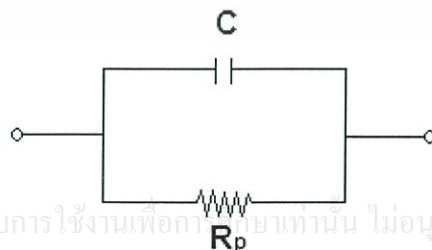
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.25 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

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

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ (2.25) ดังนั้นสมการ (2.24) จะกลายเป็น

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \\ &= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right] \end{aligned}$$

ดังนั้น

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

$$\begin{aligned} Z_{RC} &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) \\ &= Z' - jZ'' \end{aligned}$$

โดยที่

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

และ

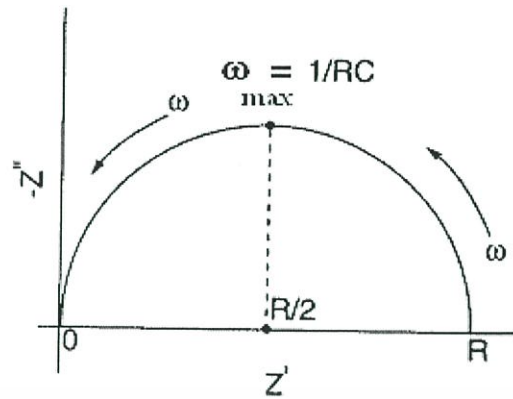
$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.81)$$

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

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร

RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.26

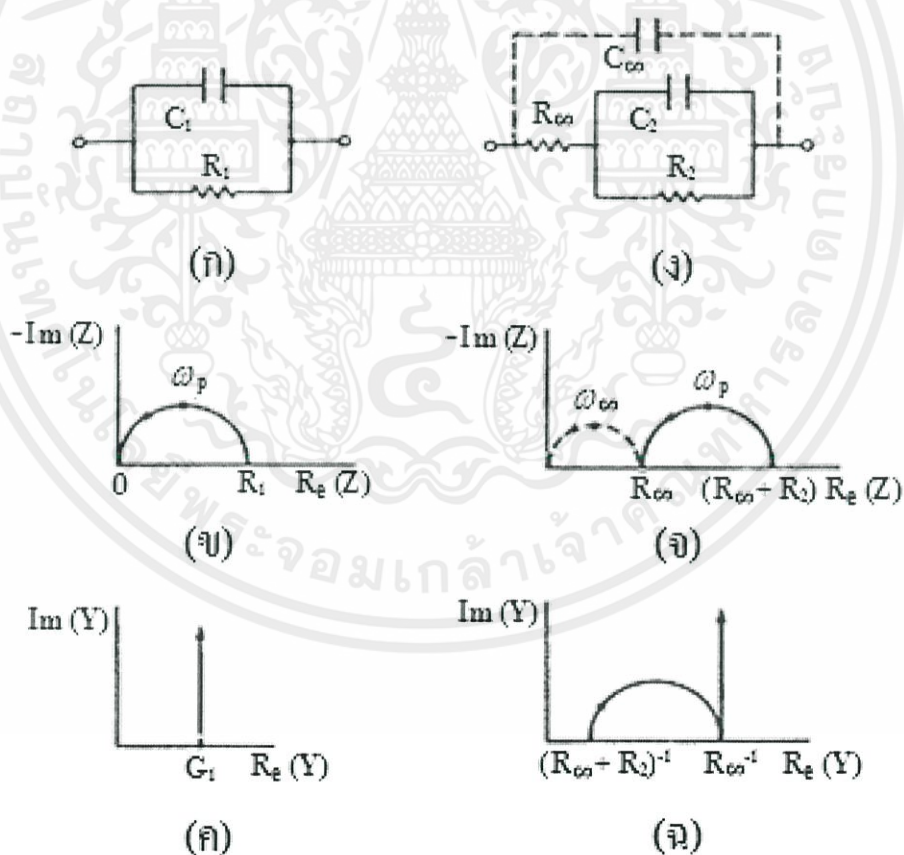
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่ง

วงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ รูปที่ 2.26 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก, ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (ข, จ)

และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (ค, ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance,  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.26 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance,  $R_b$ ) ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเองความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  ค่าสูงสุดคือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.26(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  s ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีที่  $R_1 = R_{\infty}$  และ  $C_1 = C_{\infty}$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_r$  และ  $C_1 = C_r$  เมื่อ  $R_r$  คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_r$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.26(ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_r$  และ  $C_2 = C_r$  ส่วนรูปที่ 2.26(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวของเวลาคือ  $R_{\infty}C_{\infty} \leq R_2C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_{\infty}$  และ  $C_{\infty}$  จะแสดงจุดไขว้ลาดังรูปที่ 2.26(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$  สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.26(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญา การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.82)$$

กราฟของสมการที่ (2.82) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.26(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.26(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \left[ \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty} \right] \quad (2.83)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.83) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.26(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.26(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไก ฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้น ได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.84)$$

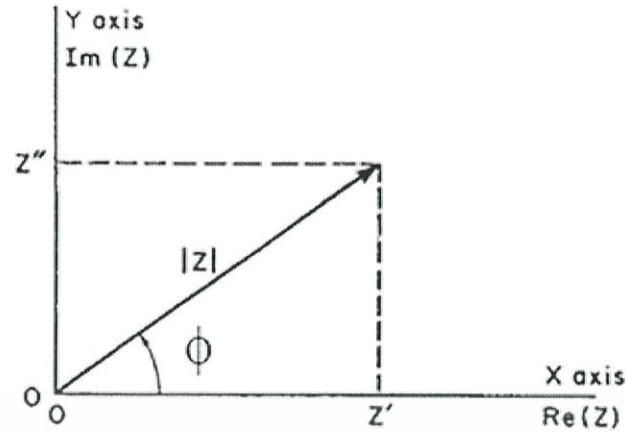
ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.85)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $\frac{R}{2}$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.25 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.3.3 กราฟของโบด(Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z^* = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก(rectangular coordinate) และ โคออร์ดิเนตเชิงขั้ว(polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.28 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

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

และ

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

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

(2.86)

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

(2.87)

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

$$Z^* = Z' + jZ'' = |Z| \cos \phi + j|Z| \sin \phi$$

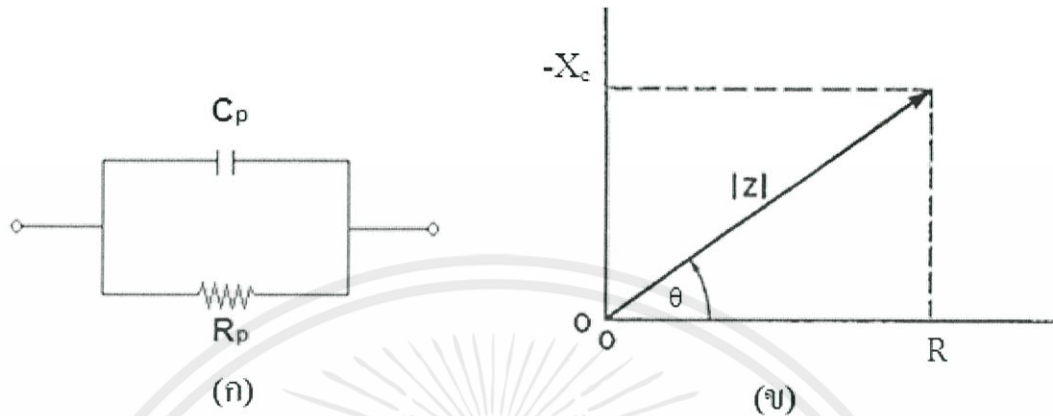
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.88)$$

### 2.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมประสมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน $|Z|$

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของสารกึ่งตัวนำ CdO คือความต้านทาน  $R_p$  ต่อขนานกับความจุ  $C_p$  ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ก. แสดงวงจรสมมูลความต้านทาน  $R_p$  กับความจุ  $C_p$  ต่ออนุกรมกัน  
ข. แสดงค่าสมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

ค่าจินตนาการแห่งความจุ (Capacitive reactance,  $X_c$ ) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p} \quad (2.89)$$

มุมเฟส  $\theta$  จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan \theta = \frac{|X_c|}{R_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2.90)$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทาง แฟกเตอร์สูญเสีย (Dissipation Factor,  $D$ ) คือ

$$D = \tan \theta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2.91)$$

และแฟกเตอร์คุณภาพ (Quality Factor,  $Q$ ) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_p C_p \quad (2.92)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ  $C_p$ - $D$ ,  $C_p$ - $Q$ ,  $C_p$ - $G$ ,  $C_p$ - $R_p$

โดยที่  $G$  คือ ความนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (2.93)$$

ซึ่งโดยทั่วไปที่ความถี่ใดๆ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน  $Z^*$  จะเขียนดังสมการ

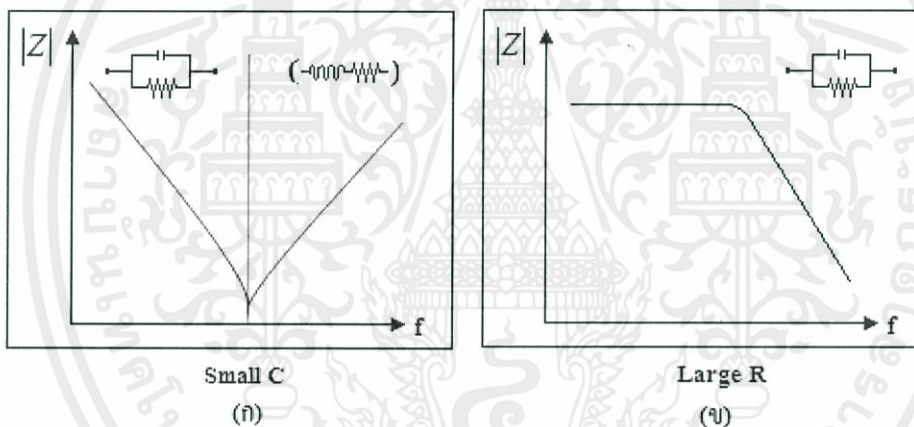
$$Z^* = Z' + jZ'' \quad (2.94)$$

และ 
$$D = \frac{Z'}{Z''} \quad (2.95)$$

เมื่อ 
$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (2.96)$$

$$Z'' = \frac{-\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (2.97)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ ความถี่ จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อเป็นกรณีที่มีความจุมีค่าต่ำ  
 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อเป็นกรณีที่มีความต้านทานมีค่ามาก

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเซอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \quad (2.98)$$

เมื่อ  $n$  คือเลขยกกำลัง

จำนวนจริง ( $Z'$ ) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

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

และ

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

ซึ่งค่า  $R_p$  จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน  $Z'$  ของการพลความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$  ส่วนค่าความจุ  $C_p$  จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (Semi-Circular) ในกรณีอุดมคติที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม คือ  $Z' = -Z''$

$$\frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{-\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

$$1 = \omega C_p R_p \quad (2.99)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time;  $T$ ) จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม

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

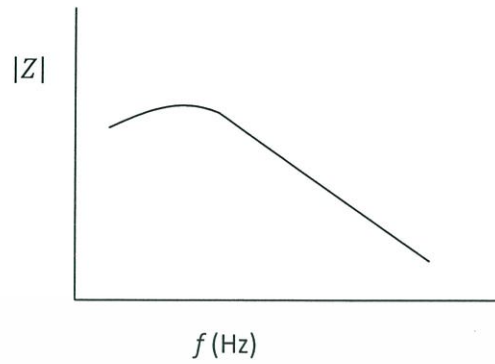
หรือ

$$1 = \omega_{\max} C_p R_p \quad (2.100)$$

จากค่า  $Z'$  และ  $-Z''$  จากสมการที่ (2.96) และ (2.97) จะได้ว่า  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

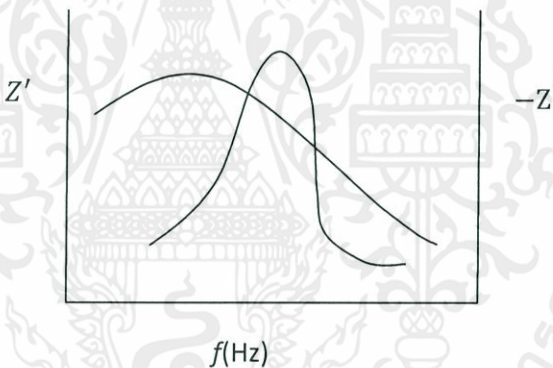
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2.101)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ  $f$  จะเขียนได้ดังนี้ คือ



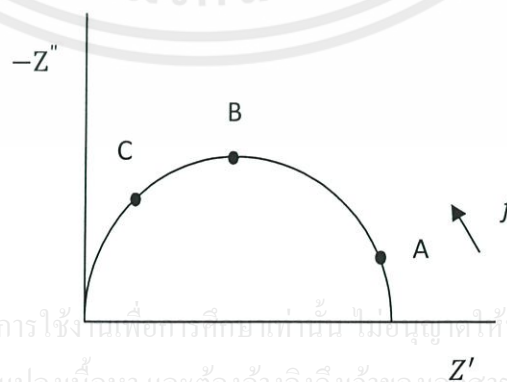
รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  และ  $-Z''$  กับ  $f$  จะได้กราฟดังนี้ คือ



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

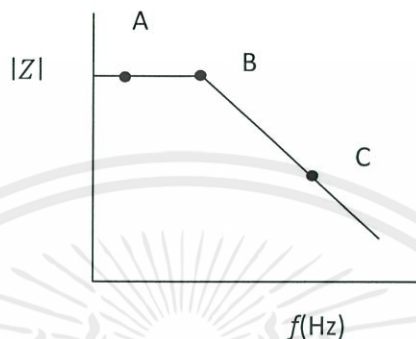
ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  และ  $-Z''$  กับ  $f$  จะได้กราฟดังนี้ คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

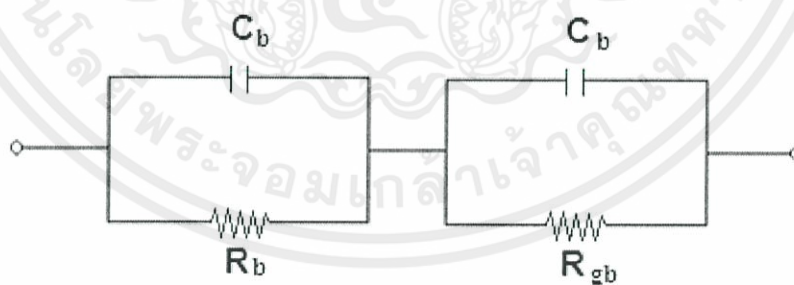
รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

- ที่ความถี่ต่ำ (ที่บริเวณจุด A)  $Z'$  จะมีค่ามาก ส่วน  $-Z''$  จะมีค่าน้อย
- ที่ความถี่ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B)  $Z'$  จะมีค่าลดลง ส่วน  $-Z''$  จะมีเพิ่มขึ้น และในกรณีอุดมคติจะได้ว่า  $Z' = Z''$
- ที่ความถี่สูง (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง  $Z'$  และ  $-Z''$  จะมีค่าลดลงอีกและถ้านำมาเขียนกราฟ  $|Z|$  กับ  $f$  จะได้ดังนี้



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  จะแสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.34 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยเกรนจำนวนมากถ้าคิดว่าเป็นทรงกลมจะมีค่าความจุ  $C = 4\pi\epsilon_s R$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $R$  คือ รัศมีของเกรน ส่วนที่ขอบเขตของเกรน (grain boundary) จะมีความจุ  $C = \frac{\epsilon_s A}{d}$

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเชอร์ ( Jonscher expression ) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

สำหรับอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของวงจรสมมูลดังกล่าวนี้ คือ

$$Z^* = \left[ \frac{1}{R_b} + j\omega C_b \right]^{-1} + \left[ \frac{1}{R_{gb}} + j\omega C_{gb} \right]^{-1} \quad (2.102)$$

จำนวนจริง  $Z'$  และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

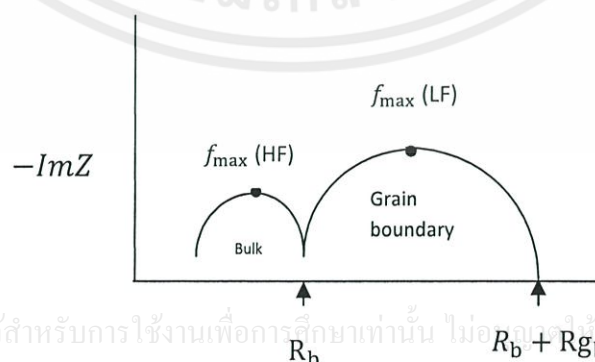
$$Z' = \frac{R_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{R_{gb}}{1 + (\omega_{bg} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (2.103)$$

และ

$$Z'' = \frac{-R_b^2 \omega_b C_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{R_{gb}^2 \omega_{bg} C_{gb}}{1 + (\omega_{bg} C_{gb} R_{gb})^2} \quad (2.104)$$

โดยปกติ  $R_{gb} > R_b$  และ  $C_{gb} > C_b$  ดังนั้นจะพบว่าความถี่ของจุดสูงสุดของครึ่งวงกลมที่สอดคล้องกับขอบของเกรน :  $f_{\max}(\text{LF})$  จะมีค่าต่ำกว่า ความถี่ของจุดสูงสุดของครึ่งวงกลมที่สอดคล้องกับเกรน  $f_{\max}(\text{HF})$

สำหรับเม็ดเซรามิกของเม็ดสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$



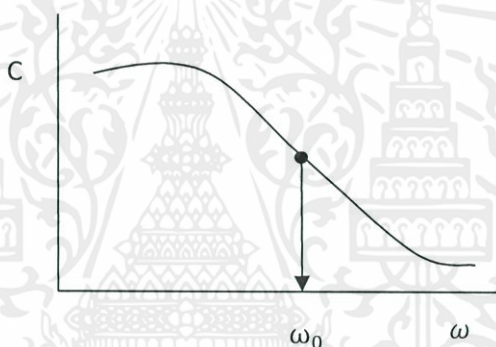
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.35 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{As}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) พบว่าที่อุณหภูมิห้อง ความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้ (Herberholz, 1998)

$$C^*(\omega) = C_\infty + \frac{C_0 - C_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2.105)$$

เมื่อ  $C_\infty$  คือ ความจุไฟฟ้าที่ความสูง (high frequency) ส่วน  $C_0$  คือ ความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (low frequency) ส่วน  $\tau$  คือเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) สำหรับ  $\alpha$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติในวัสดุทั่วไปมักจะมีกับดักประจุ (trap) เข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ สำหรับเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  กับดักที่โดดเด่นคือ  $V_{\text{Cu}}$  เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีกับดักระดับเดียว (single trap level) ความจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ กับดักจะแปรตรงกับความถี่ดังนี้ คือ



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับความถี่ ( $\omega$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{As}_x\text{O}_2$

$$C_r \propto \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 + \omega^2)} \quad (2.106)$$

เมื่อ  $\omega_0$  คือความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C$  กับ ความถี่  $\omega_0$  นี้จะสัมพันธ์กับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (emission rate) ออกจากกับดักประจุ

ซึ่ง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
แต่

$$\omega_0 = 2e_r \tau$$

$$e_r = \frac{1}{\tau}$$

แล้ว

$$\omega_0 = \frac{2}{\tau} = 2N_{C,V}V_{th}\sigma_{n,p} \exp\left(\frac{-E_a}{kt}\right)$$

เมื่อ  $N_{C,V}$  คือ ความหนาแน่นของสถานะยังผลของแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการอัดและคายประจุออกจากกับดักประจุ ส่วน  $V_{th}$  คือ ความเร็วของพาหะเนื่องจากพลังงานความร้อน (thermal velocity) สำหรับ  $\sigma_{n,p}$  คือ ภาคตัดขวางการจับอิเล็กตรอนหรือโฮล และ  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้นบอกลถึงความลึกของพลังงานกับดักเมื่อเทียบกับแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง  $\omega_0$  จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\omega_0 = \xi_o T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (2.107)$$

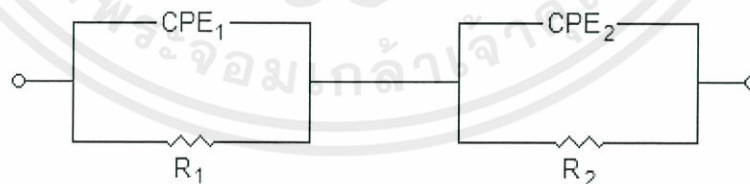
และ

$$\xi_o = \xi_{oo} \exp\left(\frac{E_a}{E_{oo}}\right) \quad (2.108)$$

ซึ่ง  $\xi_{oo}$  และ  $E_{oo}$  เป็นค่าคงที่สอดคล้องกับกลไกการขูดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เมื่ออุณหภูมิลดลง แล้ว  $\omega_0$  ของสมการที่ (2.107) จะมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้า  $C_p$  จากสมการ (2.106) มีค่าลดลงตามอุณหภูมิด้วย ซึ่งสอดคล้องดีกับผลการทดลองของ C กับ  $f$  ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10-300 เคลวิน

### 2.3.5 หลักการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

จากวงจรสมมูลที่มีอิลิเมนต์เฟสคงตัว (CPE) กับตัวต้านทาน R จำนวน 2 ชุด ที่ต่ออนุกรมกัน ดังรูป



จากข้อมูลการทดลองจะทำให้รู้ค่า  $f_{\max}(LF)$  ที่ความถี่ต่ำ และจากจุดตัดแกน  $x$  จะได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  เราสามารถ คำนวณหา  $C_2$  ได้จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$\omega_{\max} R_2 C_2 = 1 \quad (2.109)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_{\max} R_2} = \frac{1}{2\pi f_{\max} (LF) R_2} \quad (2.110)$$

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

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

$$\omega_{\max} R_1 C_1 = 1 \quad (2.111)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_{\max} R_1} = \frac{1}{2\pi f_{\max} (HF) R_1} \quad (2.112)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ในรูปแบบที่เป็นเซรามิกซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก (ฐิตินัย, 2553; ประธาน, 2553)

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ

$\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

1. สารตั้งต้น
  - คิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ )
  - แคดเมียมออกไซด์ ( $\text{CdO}$ )
2. ครกอาเกต
3. ชุดเครื่องมืออัดเม็ด
4. เครื่องอัดไฮโดรลิก
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. กรูชิลเบลชนิดอลูมินา

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  รวมกับผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$  ดังสมการที่ (3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
$$(1-x)\text{CuO} + x\text{CdO} \rightarrow \text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O} \quad (3.1)$$
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลอะตอมของธาตุ Cu, Cd และ O มีค่าดังนี้คือ 63.5460, 112.41 และ 15.9994 ตามลำดับดังนั้นจะ  
ได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารประกอบ CuO = 63.5460+15.9994 = 79.5454 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdO = 112.41+15.9994 = 128.4094 กรัมต่อโมล

กรณี  $x=0.005$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O} = (0.995 \times 63.5460) + (0.005 \times 112.41) + 15.9994$   
= 79.7897 กรัมต่อโมล

ถ้าเราต้องการผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O}$  จำนวน 3 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก  
ของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้ คือถ้าผลึกของสารประกอบ  
 $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O}$  จำนวน 79.7897 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = (0.995 \times 79.5454) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = \frac{(0.995 \times 79.5454 \times 3)}{79.7897} = 2.9759 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผลึกของสารประกอบ CuO เท่ากับ 2.9759 กรัม

สำหรับการคำนวณปริมาณของผลึกของสารประกอบ CdO

ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O}$  จำนวน 79.7897 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = (0.005 \times 128.4094) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.995}\text{Cd}_{0.005}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = \frac{(0.005 \times 128.4094 \times 3)}{79.7897} = 0.0241 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผลึกของสารประกอบ CdO เท่ากับ 0.0241 กรัม

กรณี  $x=0.010$



มวลโมเลกุลของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O} = (0.990 \times 63.5460) + (0.010 \times 112.41) + 15.9994$   
= 80.0340 กรัมต่อโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O}$  จำนวน 3 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้ คือถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O}$  จำนวน 80.0340 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = (0.990 \times 79.5454) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = \frac{(0.990 \times 79.5454 \times 3)}{80.0340} = 2.9518 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  เท่ากับ 2.9518 กรัม

ถ้าห้การคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O}$  จำนวน 80.0340 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = (0.005 \times 128.4094) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.990}\text{Cd}_{0.010}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = \frac{(0.010 \times 128.4094 \times 3)}{80.0340} = 0.0481 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$  เท่ากับ 0.0481 กรัม

กรณี  $x=0.015$



$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของสารประกอบ } \text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O} &= (0.985 \times 63.5460) + (0.015 \times 112.41) + 15.9994 \\ &= 80.2783 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O}$  จำนวน 3 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้ คือถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O}$  จำนวน 80.2783 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = (0.985 \times 79.5454) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = \frac{(0.985 \times 79.5454 \times 3)}{80.2783} = 2.9280 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  เท่ากับ 2.9280 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O}$  จำนวน 80.2783 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = (0.015 \times 128.4094) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.985}\text{Cd}_{0.015}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = \frac{(0.015 \times 128.4094 \times 3)}{80.2783} = 0.0719 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ CdO เท่ากับ 0.0719 กรัม

กรณี  $x=0.020$



$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ } \text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O} &= (0.980 \times 63.5460) + (0.020 \times 112.41) + 15.9994 \\ &= 80.5227 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้ คือถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O}$  จำนวน 80.5227 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = (0.980 \times 79.5454) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = \frac{(0.980 \times 79.5454 \times 3)}{80.5227} = 2.9043 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ CuO เท่ากับ 2.9043 กรัม

สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ CdO

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O}$  จำนวน 80.5227 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = (0.020 \times 128.4094) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.980}\text{Cd}_{0.020}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = \frac{(0.020 \times 128.4094 \times 3)}{80.5227} = 0.0957 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ CdO เท่ากับ 0.0957 กรัม

กรณี  $x=0.030$



$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ } \text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O} = (0.970 \times 63.5460) + (0.030 \times 112.41) + 15.9994$$

$$= 81.0113 \text{ กรัมต่อโมล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราต้องการผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O}$  จำนวน 3 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้ คือถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O}$  จำนวน 81.0113 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = (0.970 \times 79.5454) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CuO} = \frac{(0.970 \times 79.5454 \times 3)}{81.0113} = 2.8573 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  เท่ากับ 2.8573 กรัม

สำหรับการคำนวณปริมาณของผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$

ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O}$  จำนวน 81.0113 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = (0.030 \times 128.4094) \text{ กรัม}$$

แต่ถ้าผงผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_{0.970}\text{Cd}_{0.030}\text{O}$  จำนวน 3 กรัม ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdO} = \frac{(0.030 \times 128.4094 \times 3)}{81.0113} = 0.1426 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CdO}$  เท่ากับ 0.1426 กรัม

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x)	CuO (g)	CdO (g)
0	3	-
0.005	2.9759	0.0241
0.010	2.9518	0.0481
0.015	2.9280	0.0719
0.020	2.9043	0.0957
0.030	2.8573	0.1426

### 3.1.3 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธี

ปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

3.1.3.1 นำผงผลึก  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$  ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้แล้วนำบดรวมในครกอำเภตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- 3.1.3.2 การเจืออะตอมของธาตุ Cu จะทำการเจือในปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับอะตอมของธาตุ Cd โดยที่ในการบดสารจะทำเช่นกับข้อ 3.1.2.1
- 3.1.3.3 เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดโดยแบ่งผงผลึกที่บดแล้วออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันโดยการชั่งน้ำหนักแล้วทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 4 ตัน
- 3.1.3.4 นำเม็ดของสารตั้งต้นที่อัดแล้วมาใส่ในครุชเบิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
- 3.1.3.5 ในการเผาขั้นนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 900 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงลดอุณหภูมิลดลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิจากแล้วทิ้งให้เย็นก่อนที่จะนำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์ต่อไป

### 3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก (ฉัตินัย, 2553; ประธาน, 2553)

#### 3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคจะอาศัยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.548 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40mA และความต่างศักย์ 40 kV

#### 3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

#### 3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ จาก Keithley รุ่น 236
- โวลต์มิเตอร์ FLUKE8808A
- มัลติมิเตอร์ UNI-T รุ่น UT71E
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายทองแดงชนิดอ่อน

#### 3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4982A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 26 มิลลิโวลต์

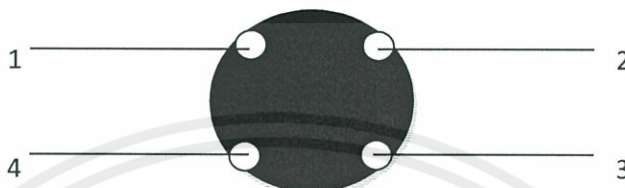
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง

- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

- สายทองแดงชนิดอ่อน

### 3.3 วิธีการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2553 ; ประธาน, 2553)

จากหลักการของวิธีแวนเดอร์เพาว์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.2 แล้วเพื่อความสะดวกในการวัดห้วงไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.1 การจัดทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดเข้ากับสารตัวอย่างดีหรือไม่โดยการวัดความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1.จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดยแหล่งจ่ายไฟ Keithley 236 ในโหมคของกระแส ทำการวัดความต่างศักย์  $v_{43}$  จะได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวก เลือกกระแสหลายๆค่า เช่น ในช่วง 0.1-1.0 ไมโครแอมแปร์ แต่ถ้าไม่ได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวกให้เปลี่ยนกระแสไหลเข้าที่ขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา

2.จ่ายกระแส  $I_{12}$  แล้ววัดความต่างศักย์  $v_{43}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{12}$  แต่ละค่า ปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{12}$  ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0.1-1.0 ไมโครแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า

3.จ่ายกระแส  $I_{12}$  ที่เป็นค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley236 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  $\frac{1}{R_1}$

5.จ่ายกระแส  $I_{23}$  ค่าต่างๆแล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{23}$  แต่ละค่า ปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า

6.จ่ายกระแส  $I_{23}$  ค่าลบจากแหล่งจ่ายไฟ Keithley236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่มีค่าเป็นลบ ปรับเปลี่ยนค่ากระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า

7.เขียนกราฟระหว่าง  $I_{23}$  กับ  $V_{14}$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $I_{23}$  และแกน  $x$  เป็น  $V_{14}$  ความชันของกราฟคือ  $\frac{1}{R_2}$  ถึงแม้ว่ากรณีนี้จะไม่มีการวัดค่าความต้านทานโดยตรง แต่การวัดค่าความชันของกราฟทั้งสองกราฟสามารถนำมาใช้หาค่าความต้านทานได้

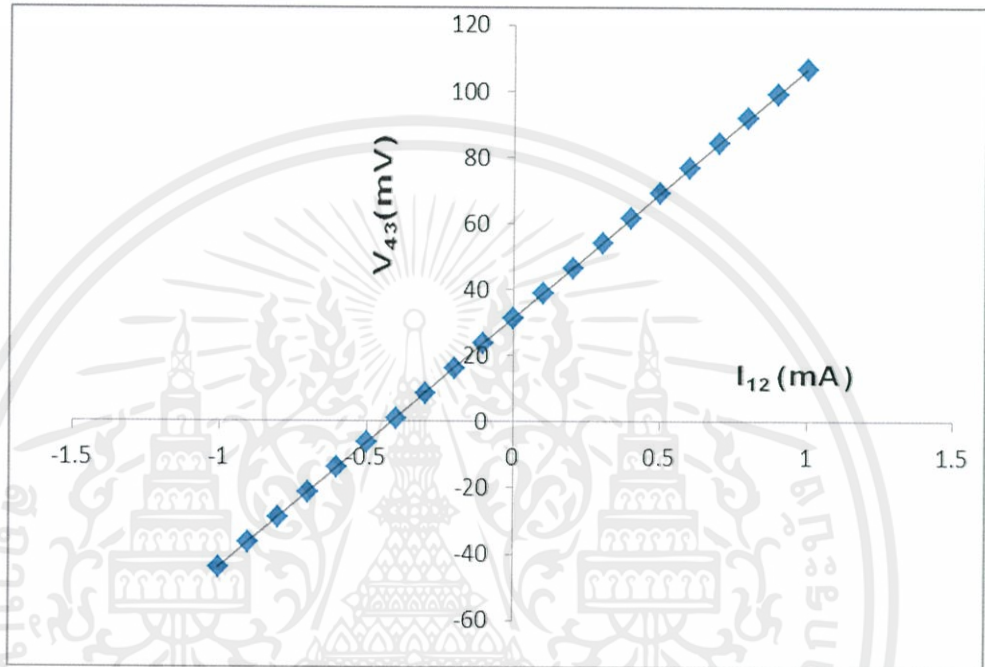
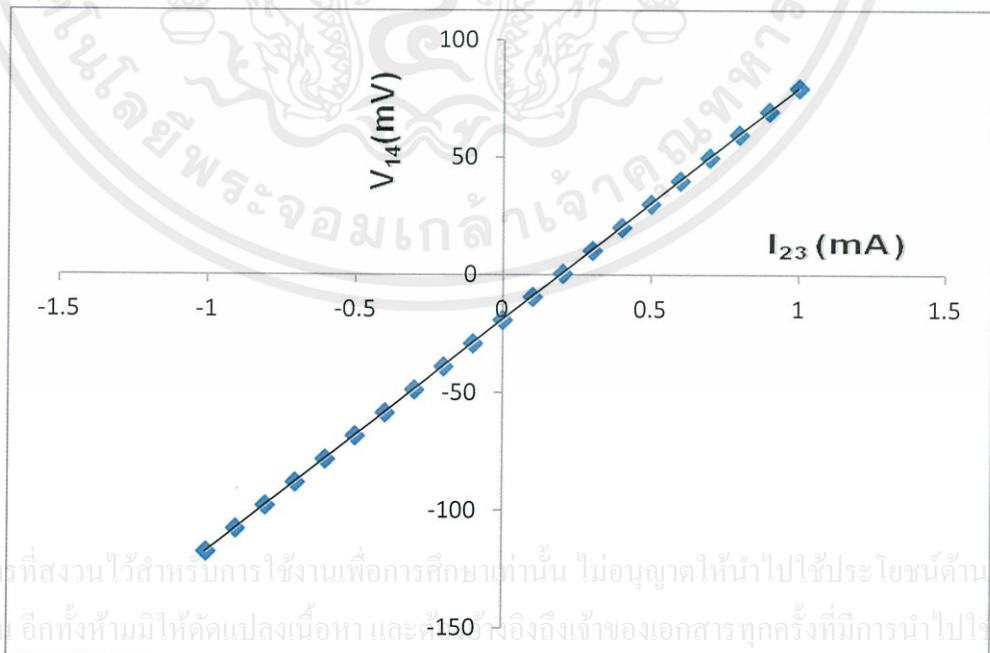
8.นำเอาค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) จากสูตร  $R_{sh} = f\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right)\left(\frac{R_1+R_2}{2}\right)$

เมื่อ

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

ส่วนสภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณได้จากสูตร

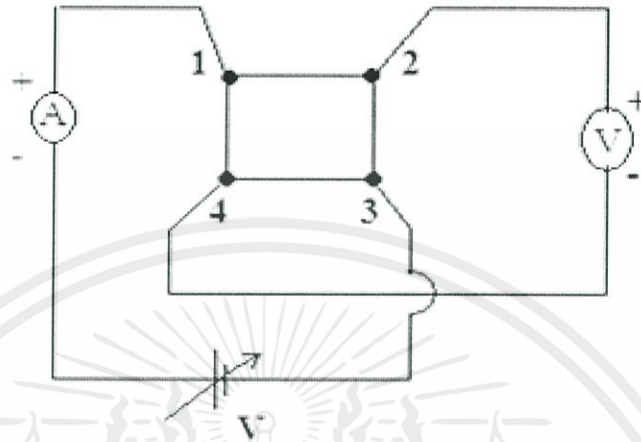
$$\rho = R_{sh} \cdot d$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{23}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{14}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (ฐิตินัย, 2553; ประธาน, 2553)

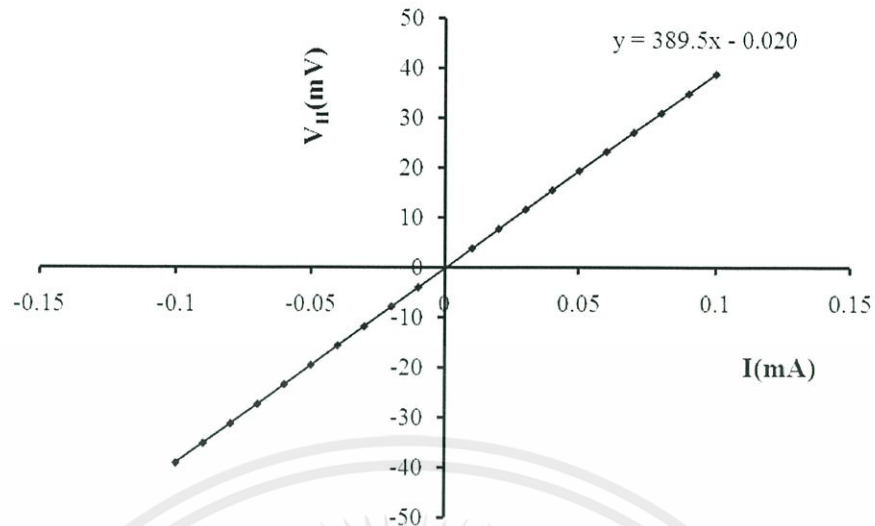
จากปรากฏการณ์ของโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.6 ทำการจัดเตรียม ขั้วไฟฟ้า และอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่างนี้แล้วจึงเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.4 วิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

1. ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ ) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{24}$  ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าไม่ได้เครื่องหมายเป็นบวก ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา
2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก  $B$  ความต่างศักย์  $V_{24}$  ควรจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้จะเรียกว่า  $V'_{24}$  เนื่องจากมีผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์  $V_H$  เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย แต่ถ้า  $V'_{24}$  มีค่าลดลงแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็น ชนิดพี (p-type) ดังนั้นต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้ว 3 และไหลออกทางขั้ว 1 แล้ว  $V'_{24}$  ยังมีเครื่องหมายเป็น บวกเหมือนเดิม
3. จ่ายกระแส  $I$  ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V'_{24}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I$  แต่ละค่า ปรับเปลี่ยนกระแส  $I$  ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0.1-1.0 ไมโครแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. จ่ายกระแส  $I$  ค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley 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  $R_H = 10^8 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{B}{d} \right)$  เมื่อ  $B$  คือสนามแม่เหล็กและมีค่าเท่ากับ 4600 เกาส์ และ  $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่ เช่น การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  จากสูตร

$$R_H = 10^8 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right)$$

เมื่อ  $\frac{V_H}{I}$  คือความชันที่ได้จากกราฟ  $I$  กับ  $V_H$ ,  $R_H$  มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูอมบ์,  $I$  มีหน่วยเป็นแอมแปร์,  $V_H$  มีหน่วยเป็นโวลต์,  $d$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและ  $B$  มีหน่วยเป็นเกาส์

8. ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

สภาพคล่องของฮอลล์ ( $\mu_H$ ) คือ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

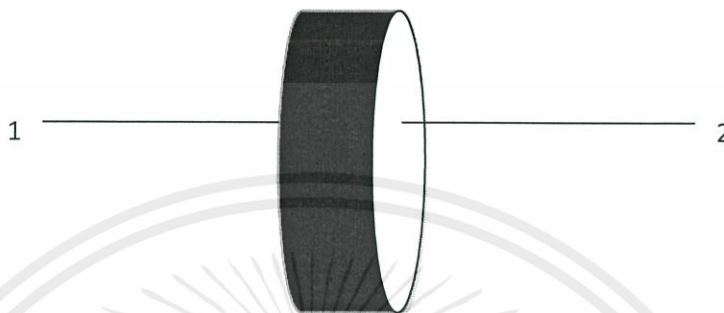
และระยะทางเฉลี่ยปลดการชน (mean free path,  $l$ ) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $l = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.5 วิธีการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ฐิตินัย, 2553; ประธาน, 2553)

1. ทำขั้วไฟฟ้าให้กับเม็ดเซรามิกโดยการป้ายด้วยกาวเงิน (Silver paste) ทั้งสองหน้าของเม็ดเซรามิก ด้วยกาวเงินจะกลายเป็นอิเล็กโทรดแล้วนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. ทำการต่อขั้วไฟฟ้า โดยการใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมปลายลวดทองแดงเข้ากับอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.6 การต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

3. ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยการวัด C-f, G-f, D-f, Z'-f และ Z''-f โดยให้วัดด้วยโหมด manual ตั้งแต่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000 เฮิร์ตซ์ และ 15000 เฮิร์ตซ์ ต่อจากนั้นให้ใช้โหมด sweep จากความถี่ 10,000 ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์
4. นำไปเขียนกราฟ C กับ f, G กับ f, D กับ f, Z' กับ f, Z'' กับ f และ Z' กับ Z''
5. ทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม EIS เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $C_p$ ,  $R_p$  และ  $R_s$  จากวงจรสมมูลที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

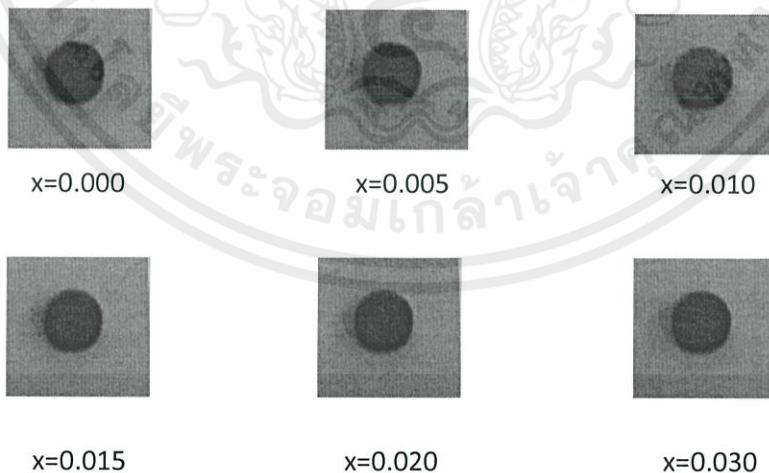
## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$  จากนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาผิวหน้าผลึกของเม็ดเซรามิกโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ในตอนสุดท้ายได้ทำการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของอะซีโตนที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้ดังกล่าวข้างต้น

### 4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียม โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

#### 4.1.1 ลักษณะของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียม ได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

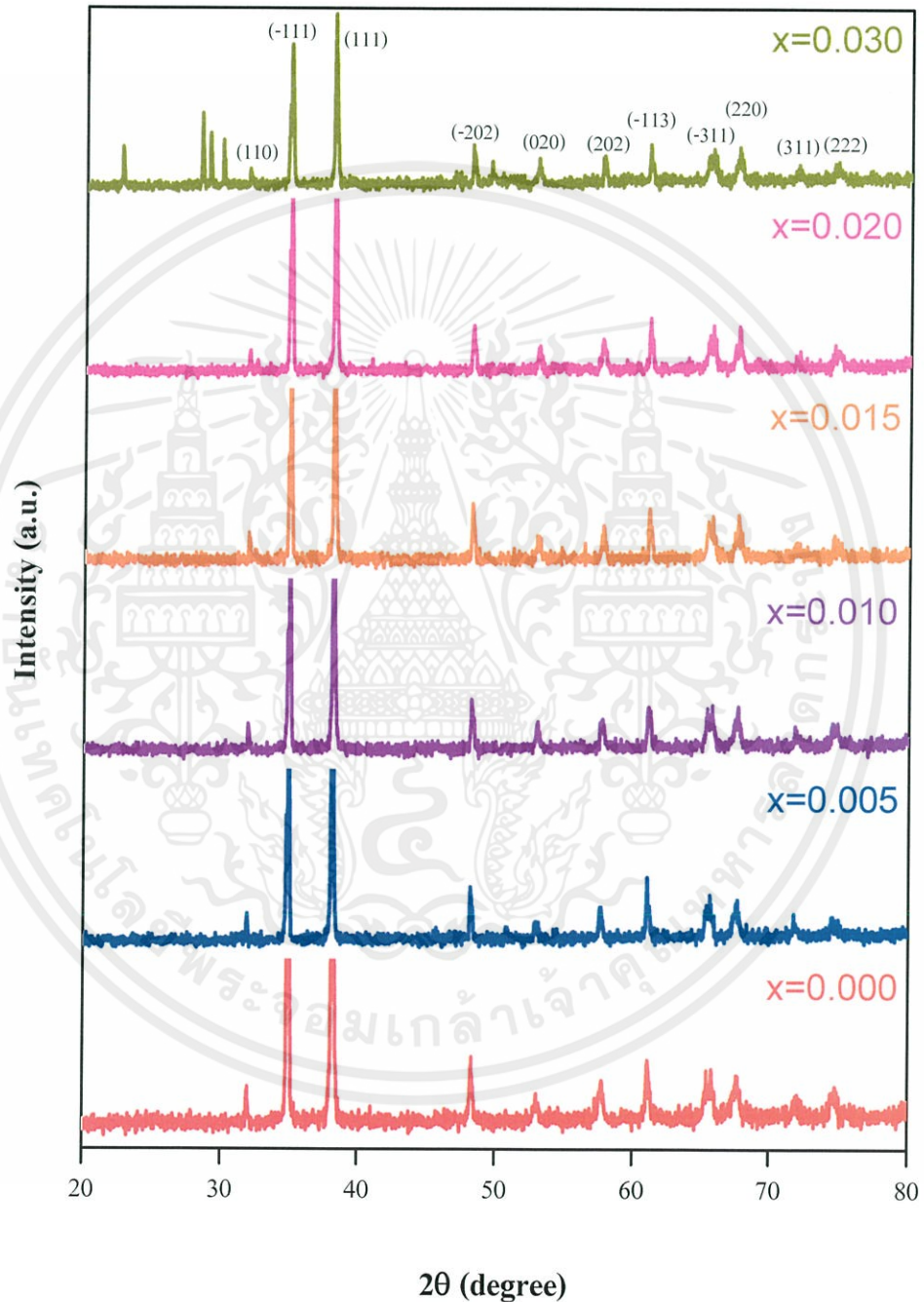
เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมจากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีดำหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก็ยังเป็นสีดำเช่นเดิม



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงคุณภาพของสารกึ่งตัวนำและสามารถหาขนาดของเกรนได้ด้วย



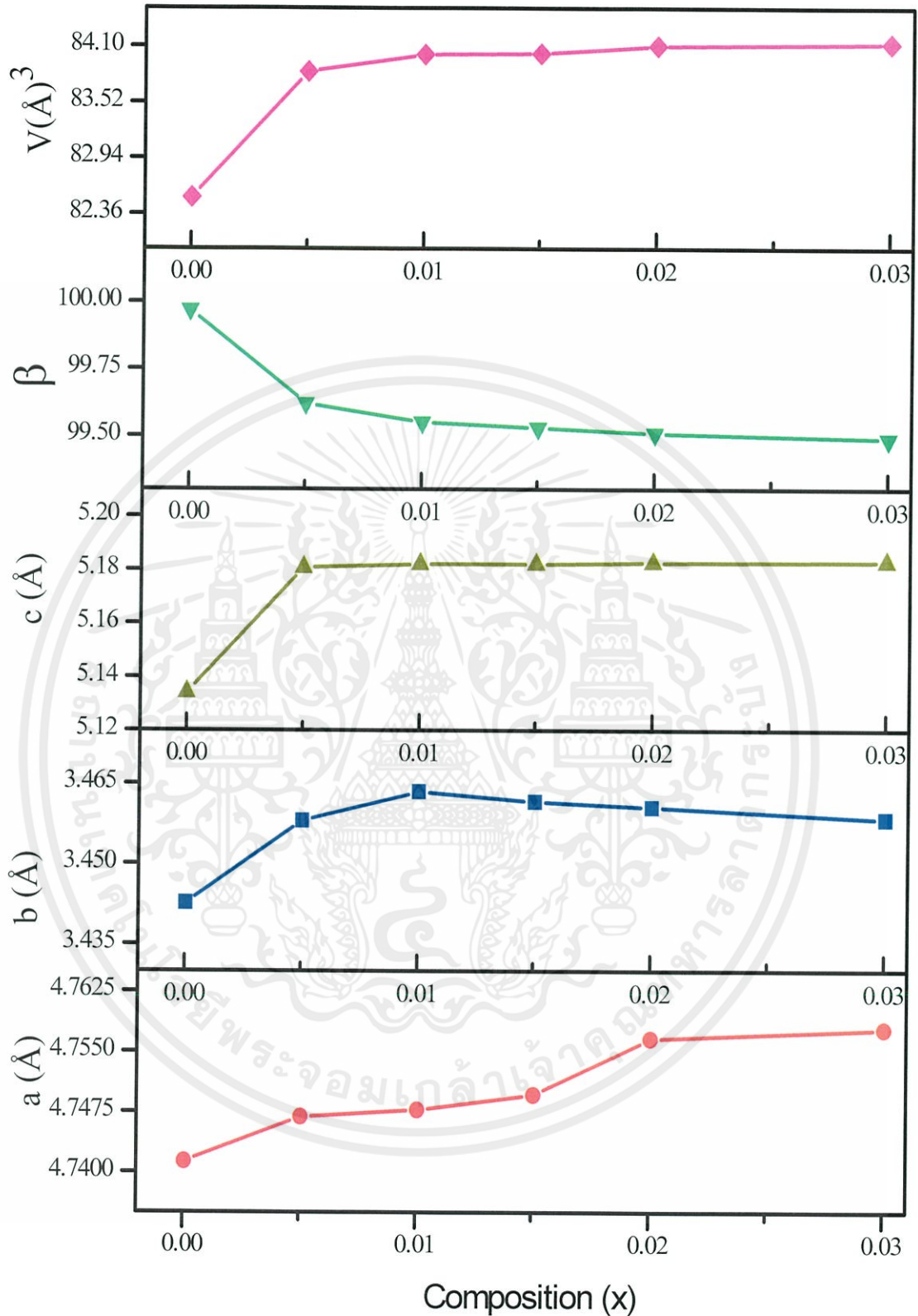
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.2 พิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผง  
ผลึก

จากรูปที่ 4.2 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าในช่วง ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะพบเฟสของสารประกอบ  $\text{CuO}$  ซึ่งโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก โดยปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (110) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 31.905$  องศา ระนาบ (-111) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 34.883$  องศา ระนาบ (111) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 38.122$  องศา ระนาบ (-202) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 48.170$  องศา ระนาบ (020) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 53.407$  องศา ระนาบ (202) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 58.250$  องศา ระนาบ (-113) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 61.458$  องศา ระนาบ (-311) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 66.144$  องศา ระนาบ (220) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 68.008$  องศา ระนาบ (311) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 72.320$  องศา และระนาบ (222) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 82.973$  องศา พิกซ์ของระนาบดังกล่าวนี้จะเลื่อนไปทางมุม  $2\theta$  ที่น้อยลง เมื่อปริมาณสารเจือของสารประกอบ  $\text{CdO}$  เพิ่มขึ้น แสดงว่าหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าคงที่โครงผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารเจือของสารประกอบ  $\text{CdO}$  ที่เพิ่มขึ้น จะแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ กรณีสัดส่วนของโมลอะตอมของสารประกอบ  $\text{CdO}$  เท่ากับ 0.03 จะมีเฟสอื่นปรากฏร่วมด้วย

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

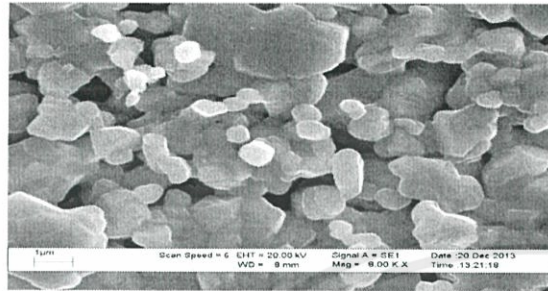
Composition (x) of $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$	Lattice Constant (Å)			$\beta$ ( $\theta$ )	Volume	Grain size (Å)
	a	b	c			
0.000	4.7413	3.4427	5.1340	99.97	82.536	378
0.005	4.7469	3.4580	5.1807	99.62	83.844	435
0.010	4.7477	3.4635	5.1821	99.55	84.024	387
0.015	4.7496	3.4616	5.1821	99.53	84.032	462
0.020	4.7566	3.4606	5.1825	99.51	84.114	481
0.030	4.7578	3.4584	5.1829	99.49	84.135	426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

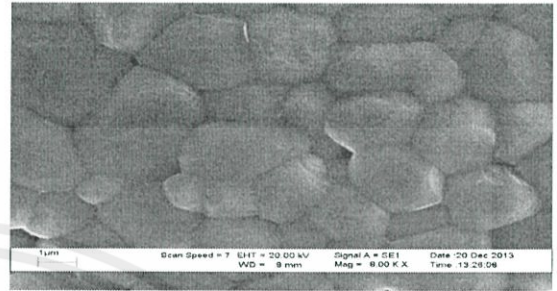


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b, c และ  $\beta$  ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่  
เป็นผงผลึก

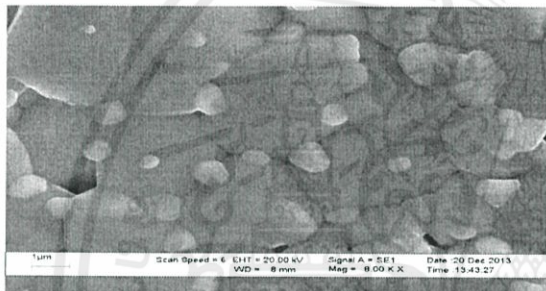
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



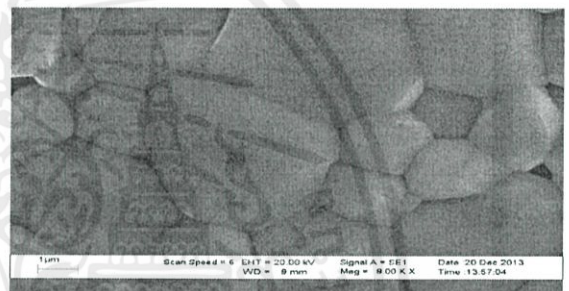
$x=0.000$



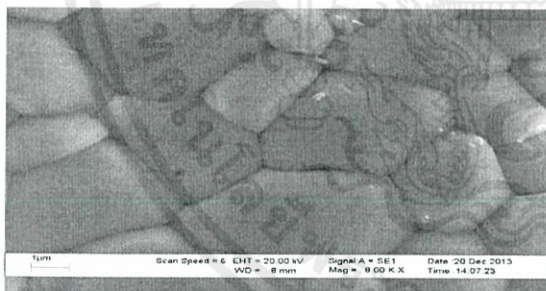
$x=0.005$



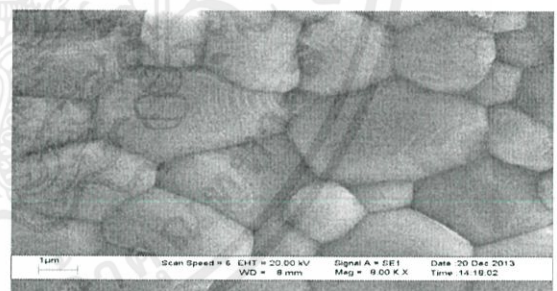
$x=0.01$



$x=0.015$



$x=0.020$



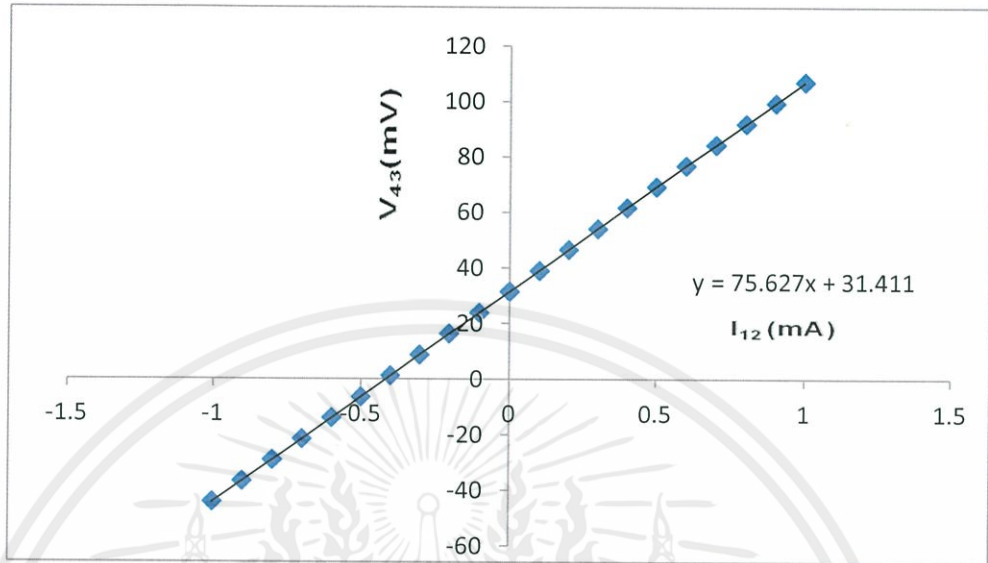
$x=0.030$

รูปที่ 4.4 รูปถ่าย SEM ของผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

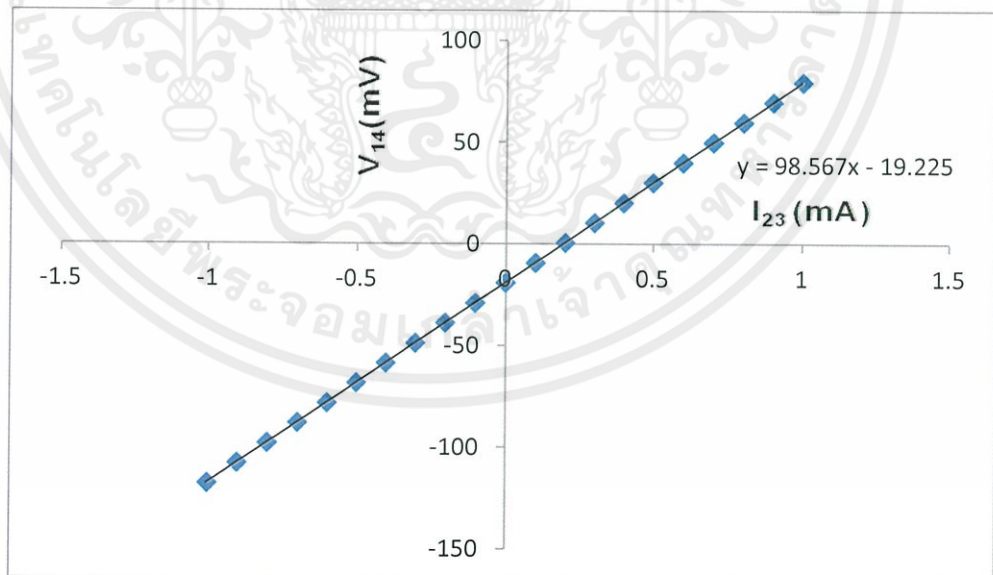
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าสารเจือของสารประกอบ CdO ช่วยทำให้เกรนของเซรามิก

$\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ใหญ่ขึ้นอย่างมาก โดยเกรนใหญ่ที่สุด เมื่อสัดส่วนโดยโมล  $x = 0.02$

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

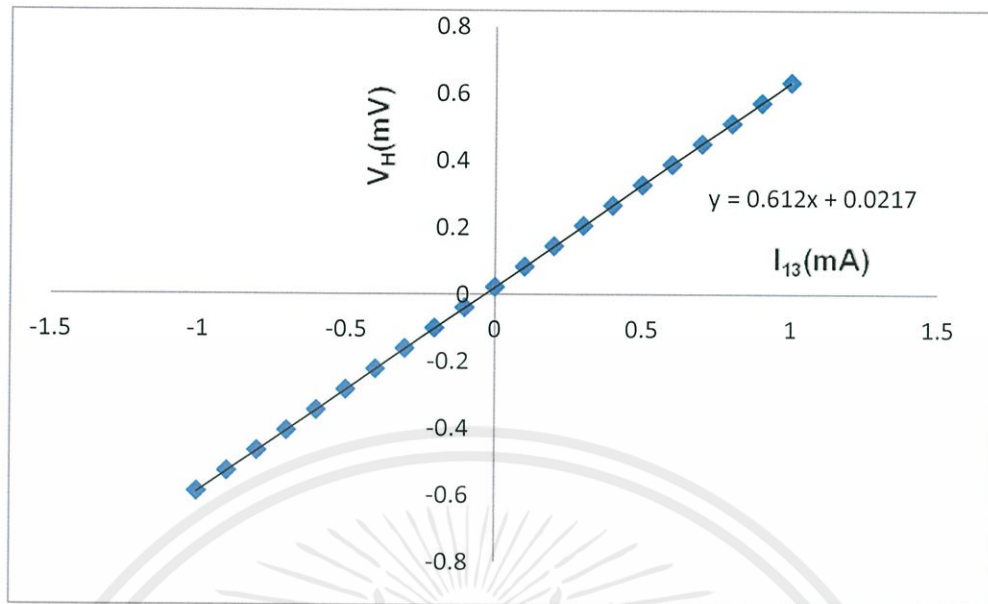


รูปที่ 4.5 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.6 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

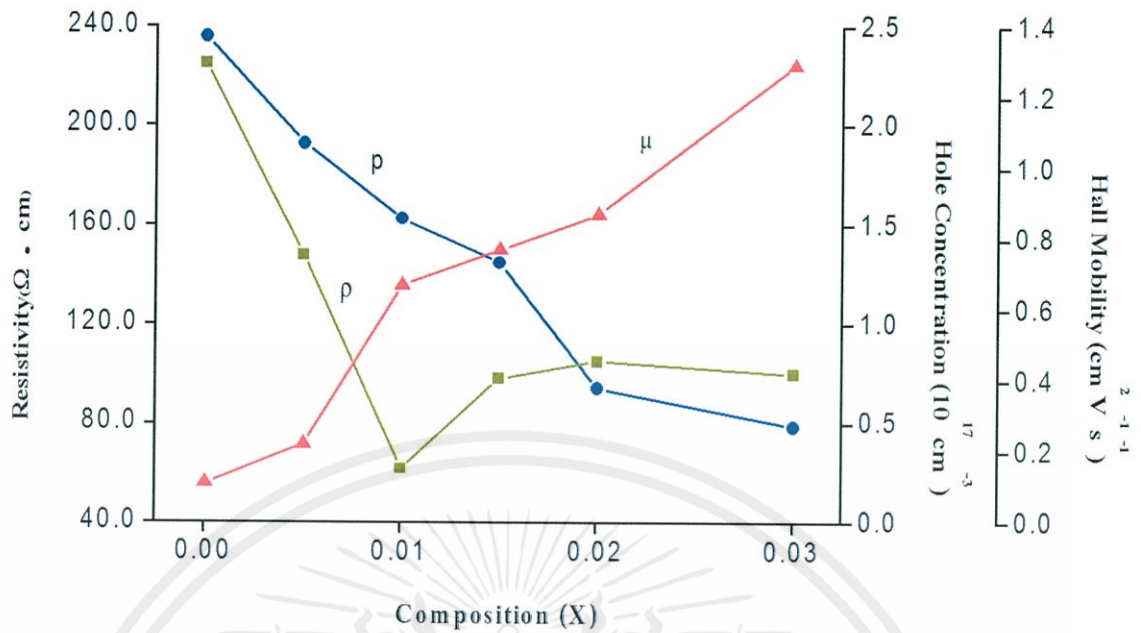
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ทรงลิขสิทธิ์นำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

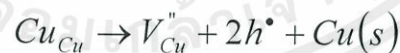
ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าค่าคงที่ของฮอลล์ ความหนาแน่นของโฮลสภาพคล่องพาหะและระยะปลอดการชนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$	Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Hall coefficient ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )	Hole concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Hall mobility ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	mean free path (cm)
0.000	225.06	25.43	$2.45 \times 10^{17}$	0.11	$2.23 \times 10^{-11}$
0.005	147.99	32.59	$1.91 \times 10^{17}$	0.22	$4.10 \times 10^{-11}$
0.010	61.62	40.81	$1.53 \times 10^{17}$	0.41	$7.10 \times 10^{-11}$
0.015	98.08	47.58	$1.31 \times 10^{17}$	0.77	$1.26 \times 10^{-10}$
0.020	105.03	92.18	$6.77 \times 10^{16}$	0.87	$1.15 \times 10^{-10}$
0.030	100.01	129.63	$4.81 \times 10^{16}$	1.29	$1.52 \times 10^{-10}$



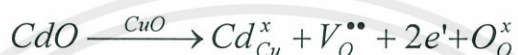
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) ความหนาแน่นของโฮล ( $\text{cm}^{-3}$ ) และสภาพคล่องพาหะของโฮล ( $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ที่ความดันบรรยากาศปกติ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  จะมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี (p-type) เนื่องจากมีแวนแคนซีของอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  เกิดขึ้นในเนื้อผลึก ซึ่งจะอธิบายได้โดยใช้สัญลักษณ์ของวังก์ (Vink notation) ดังนี้ คือ



เมื่อสัญลักษณ์ " และ  $\bullet$  คือประจุ 2- และ +1 ตามลำดับ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdO}$  มีโครงสร้างผลึกแบบ  $\text{NaCl}$  อะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  ที่อยู่ล้อมรอบจำนวน 4 อะตอม ดังนั้น ไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  จะมีเลขออกซิเดชัน +2 สำหรับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  มีโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิก อะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  ที่อยู่ล้อมรอบจำนวน 4 อะตอม ดังนั้นในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  จึงมีเลขออกซิเดชัน +2 รัศมีของไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{Cu}^{2+}$  มีค่าเท่ากับ 0.84 และ 0.62 อังสตรอมตามลำดับ ซึ่งรัศมีของไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  จะใหญ่กว่ารัศมีของไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  เล็กน้อย

แต่เมื่อมีการเจือสารประกอบ CdO ลงในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ส่งผลให้เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  มีความหนาแน่นของโฮลลดลง และสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่สัดส่วนโมลของอะตอมของธาตุ Cd เท่ากับ 0.01 แต่เนื่องจากรัศมีของไอออน  $Cd^{2+}$  มีค่ามากกว่ารัศมีของไอออน  $Cu^{2+}$  ดังนั้นการเจืออะตอมของธาตุ Cd เพื่อให้เข้าแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Cu จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเกิดการขยายตัวและทำให้เกิดข้อบกพร่องของผลึกชนิดเวแคนซีของธาตุ O ได้ความหนาแน่นของโฮลที่ลดลงอาจจะอธิบายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ



เมื่อสัญลักษณ์  $x$ ,  $\bullet\bullet$  และ  $'$  แทนประจุเป็นกลาง เป็นบวกและเป็นลบ ตามลำดับ การเกิดเวแคนซีของธาตุ O จะส่งผลให้มีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น แล้วโฮลสุทธิของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  มีค่าลดลง สำหรับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มลดลงนั้นอาจเกิดจากเกรนของผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นการกระเจิงของพาหะเนื่องจากบริเวณขอบของเกรนลดลงส่งผลให้สภาพคล่องของโฮลเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ O สูงกว่า 0.01 สภาพต้านทานไฟฟ้ากลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะกับสภาพคล่องของโฮล ดังสมการ

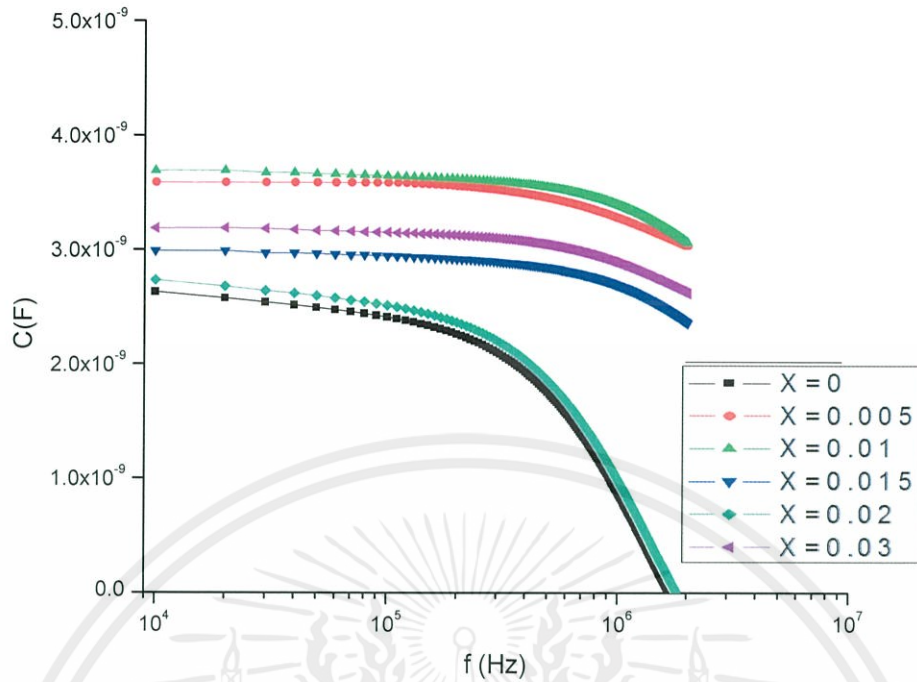
$$\rho = \frac{1}{e\mu p}$$

แสดงว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  เมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ O สูงกว่า 0.01 นั้นมาจากผลของความหนาแน่นของโฮลที่ลดลง เด่นกว่าผลของสภาพคล่องของโฮล

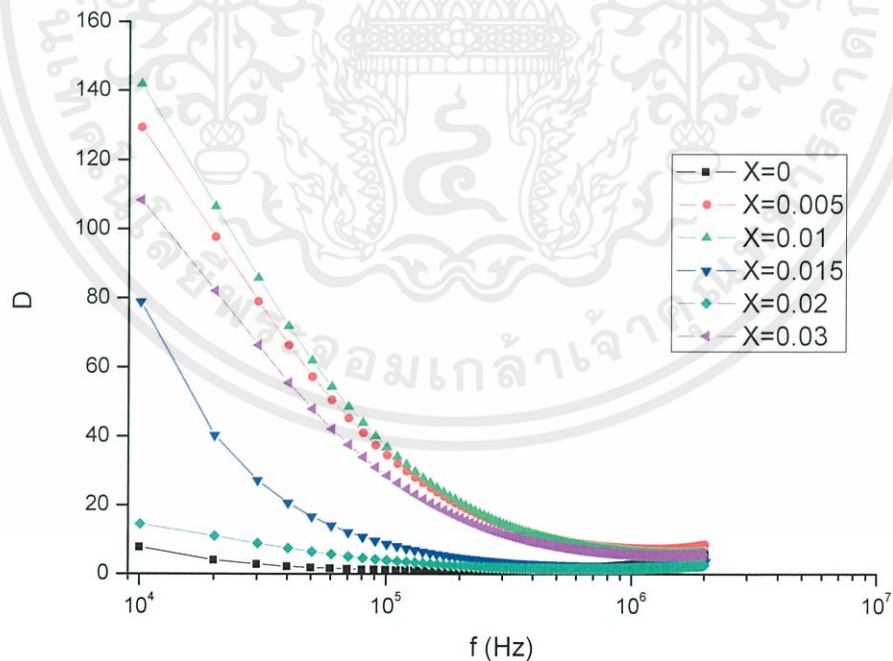
#### 4.1.5 การศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$

( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็น

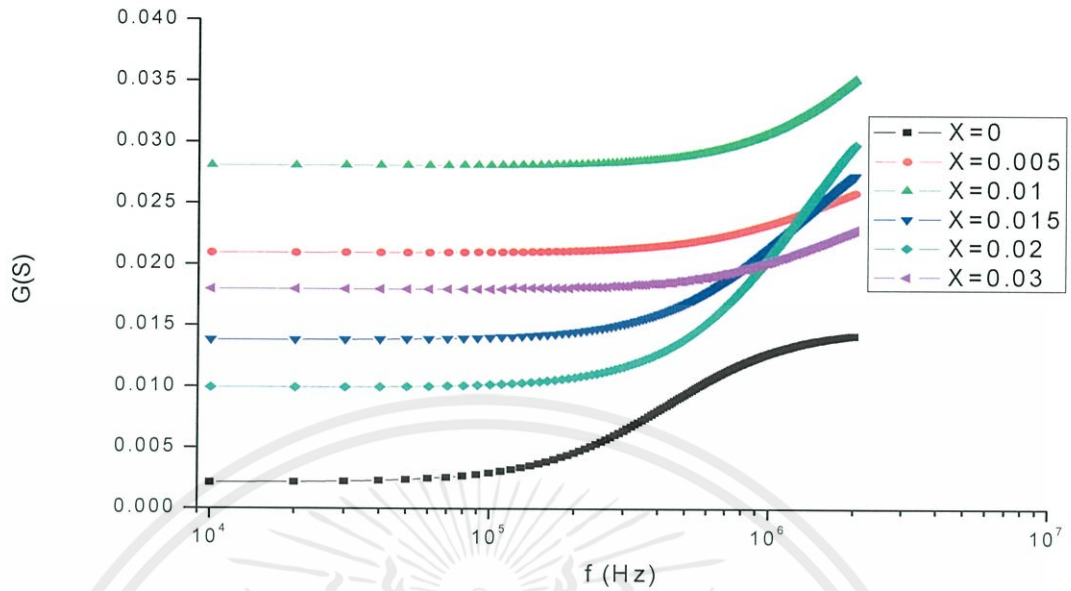
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ผงผลึก  
 ไม่ว่าจะฉฉใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้



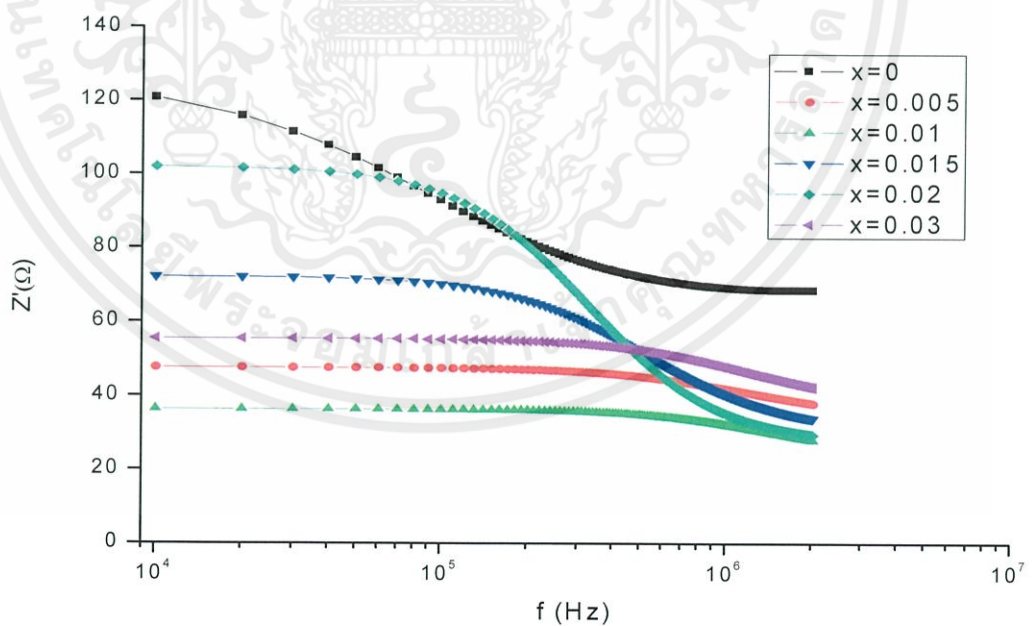
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



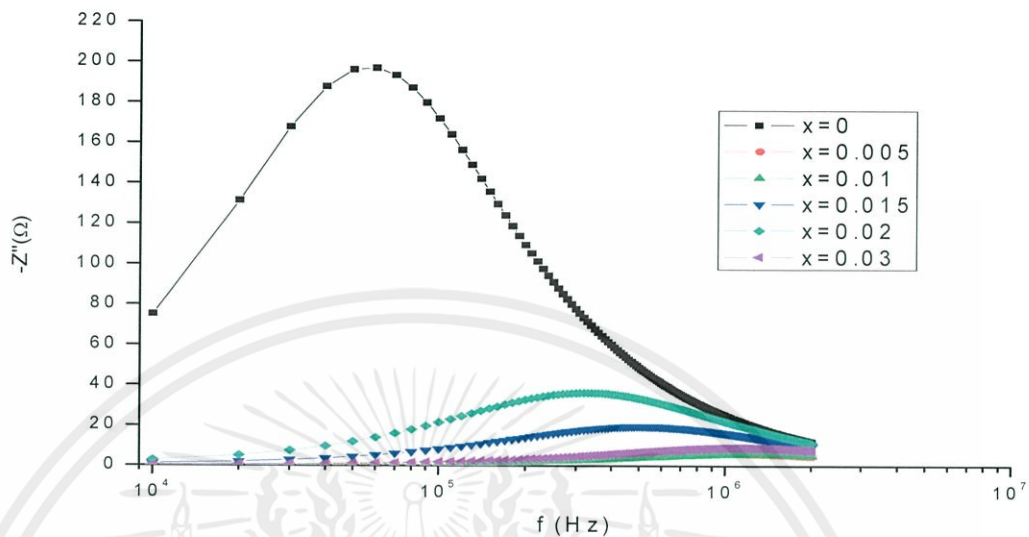
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสาร  
ละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



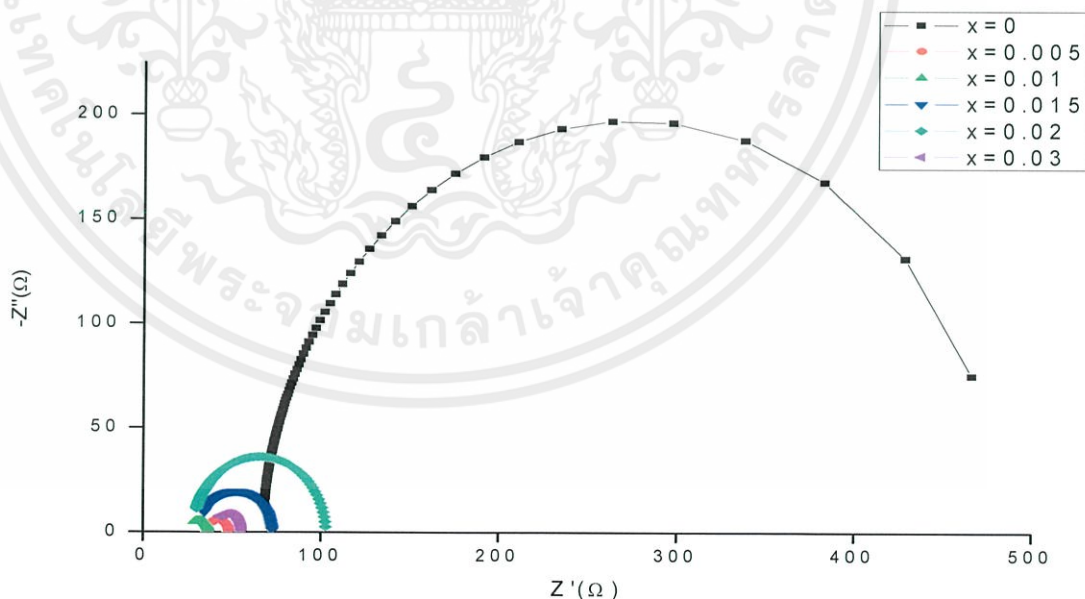
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

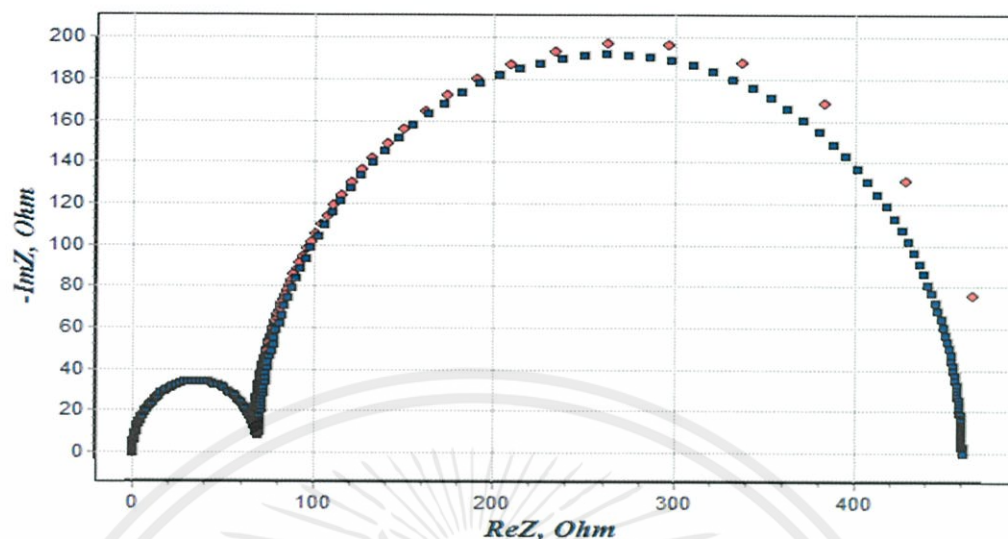


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์(-Z'')กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

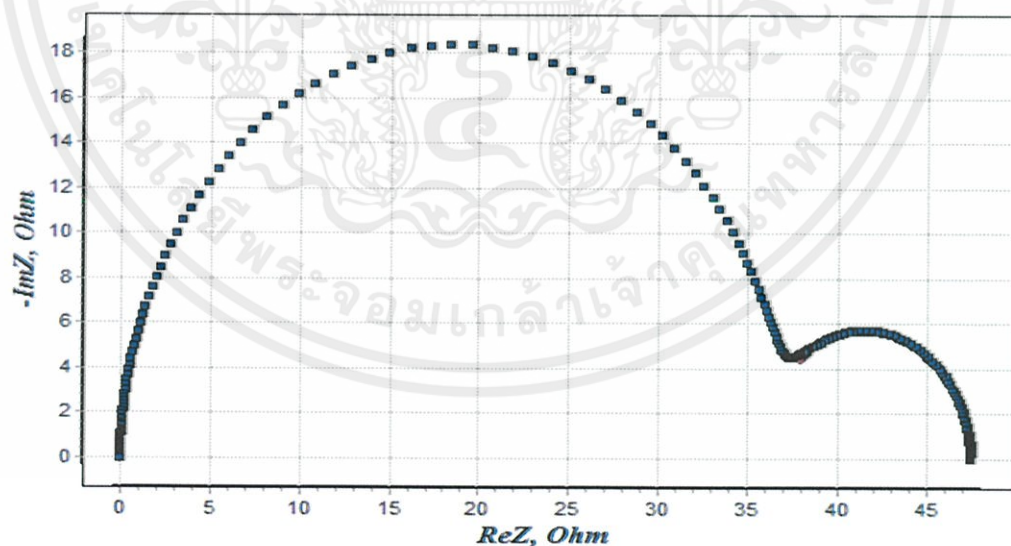


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

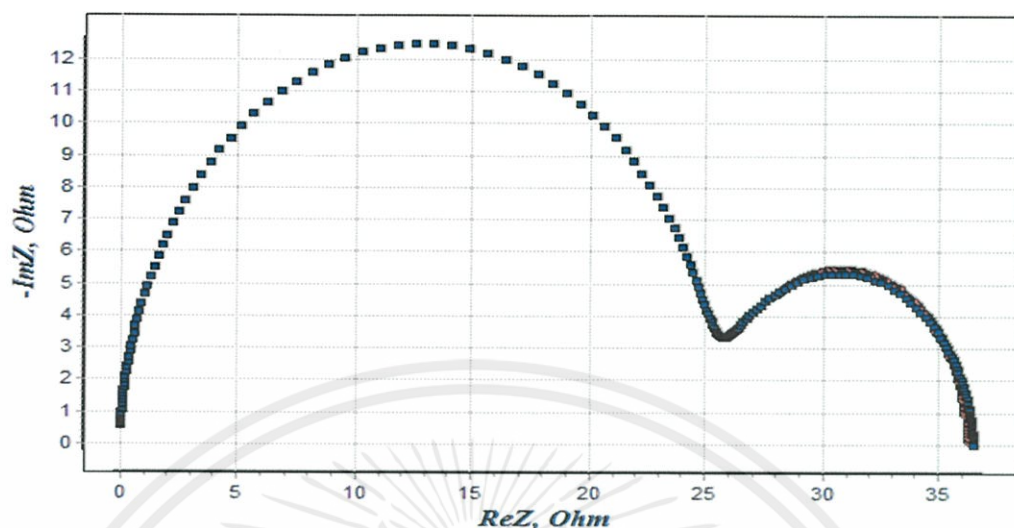
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควาใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



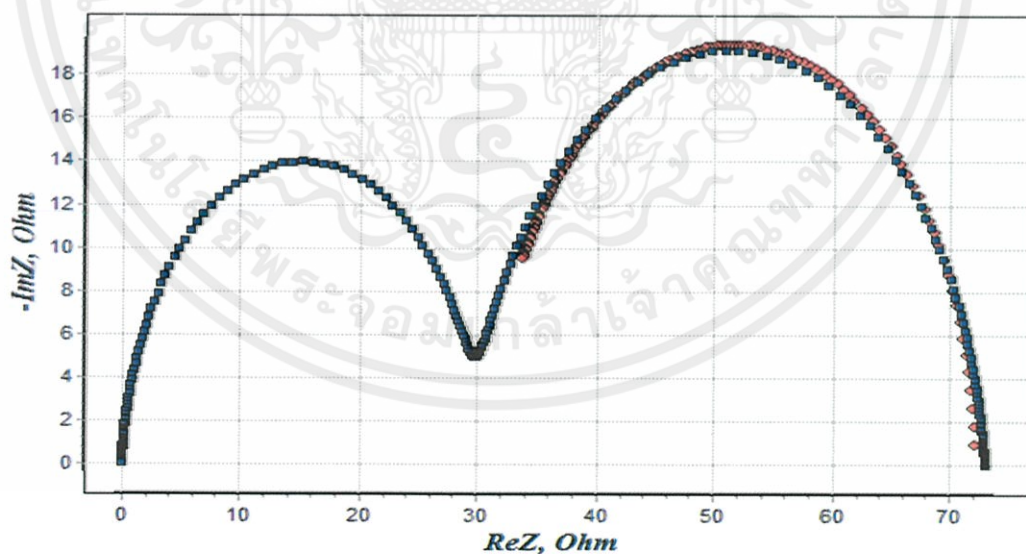
รูปที่ 4.15 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.000$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



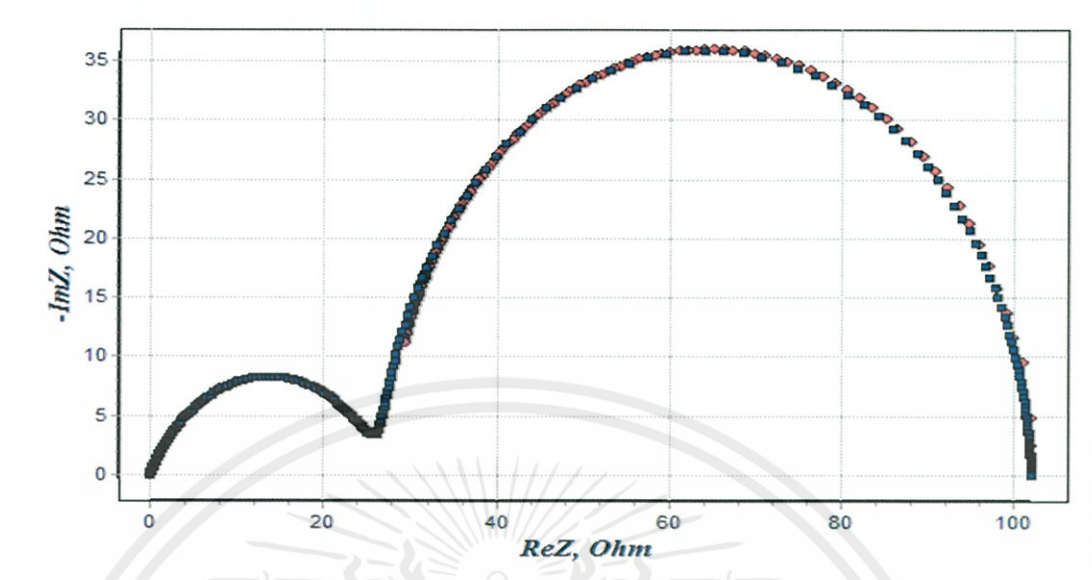
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.16 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.005$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



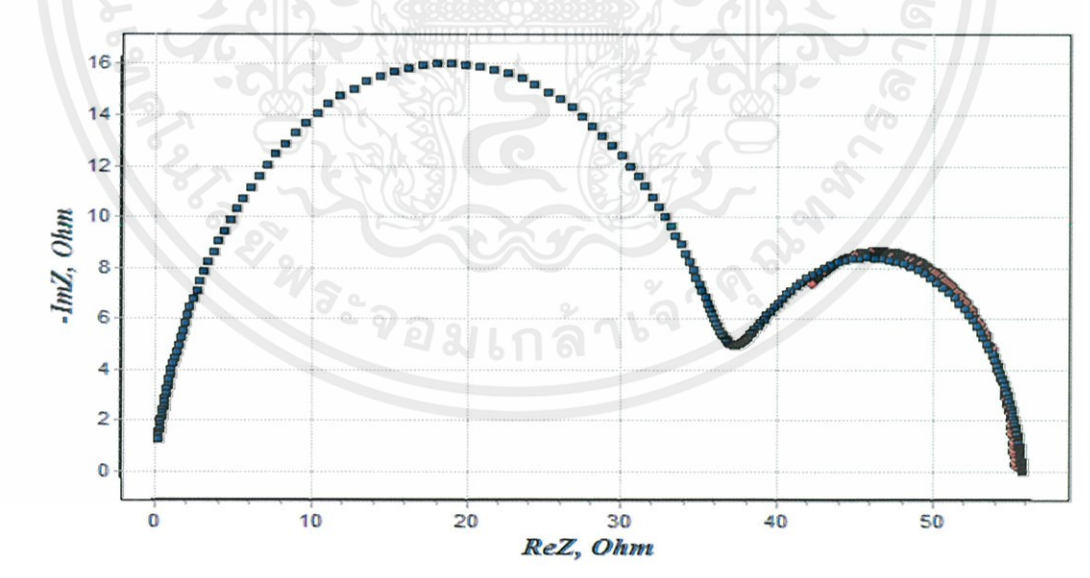
รูปที่ 4.17 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.010$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.18 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.015$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

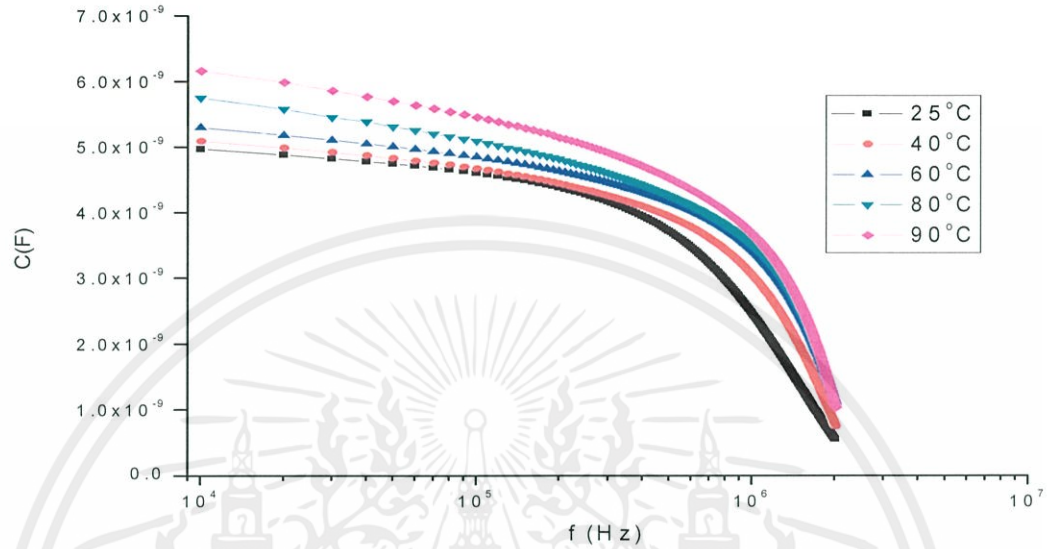


รูปที่ 4.19 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.020$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

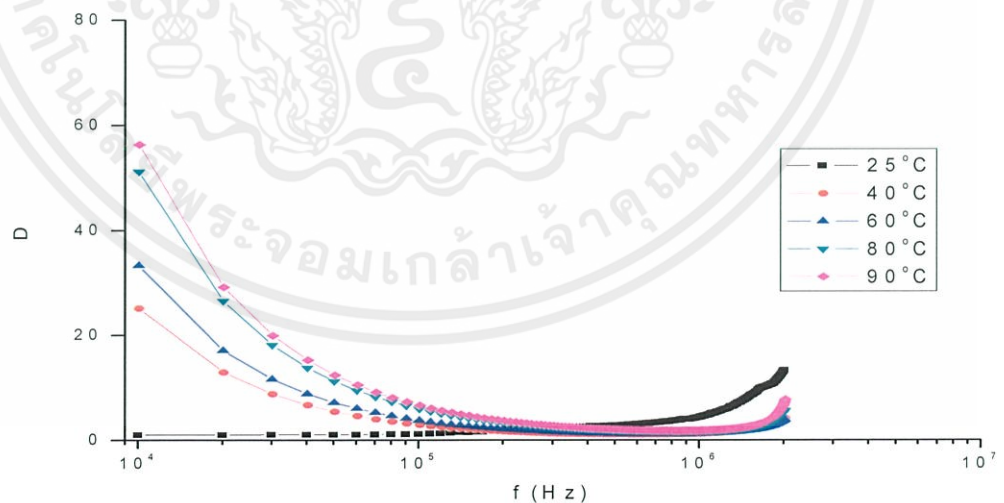


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.20 การจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

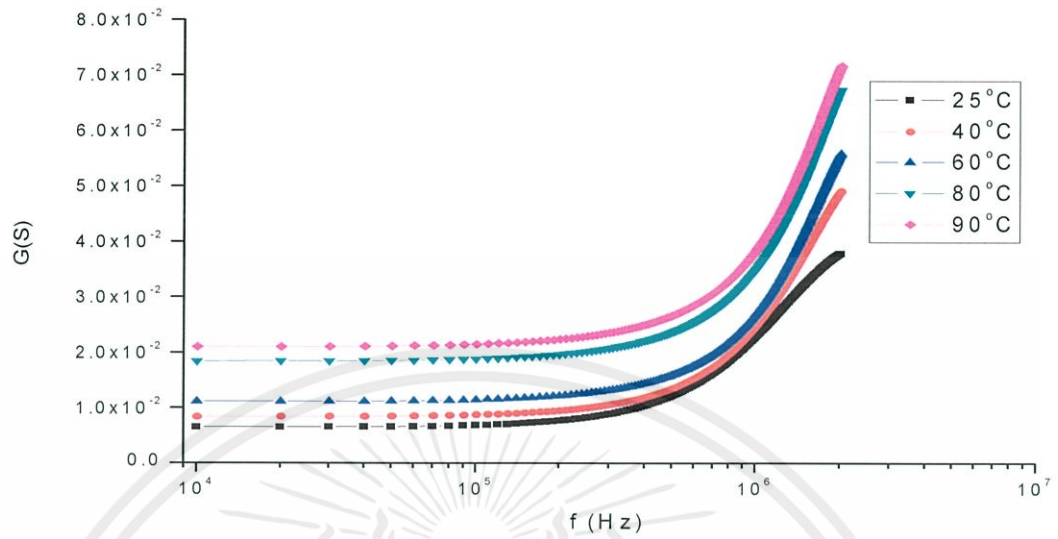
4.1.6 การศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยวัดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



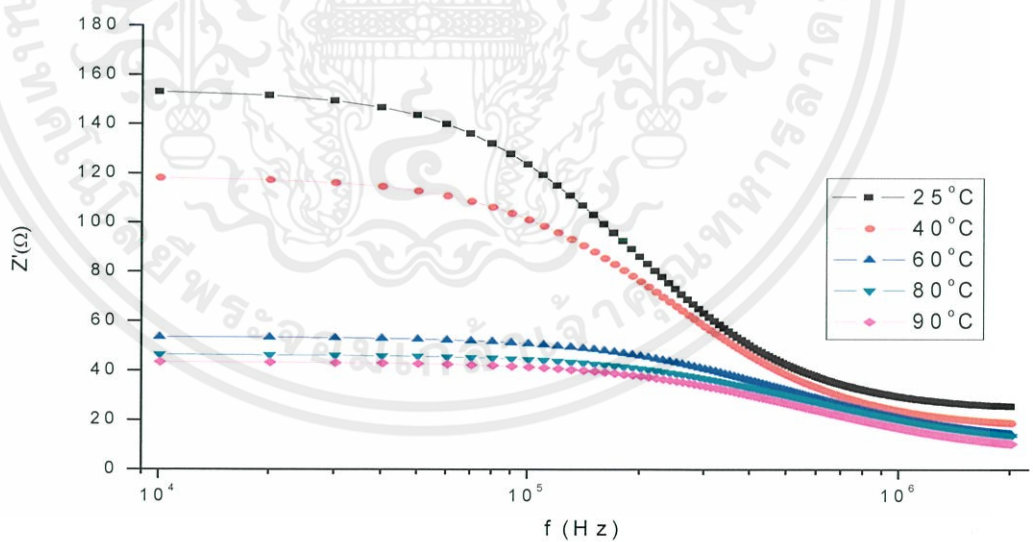
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



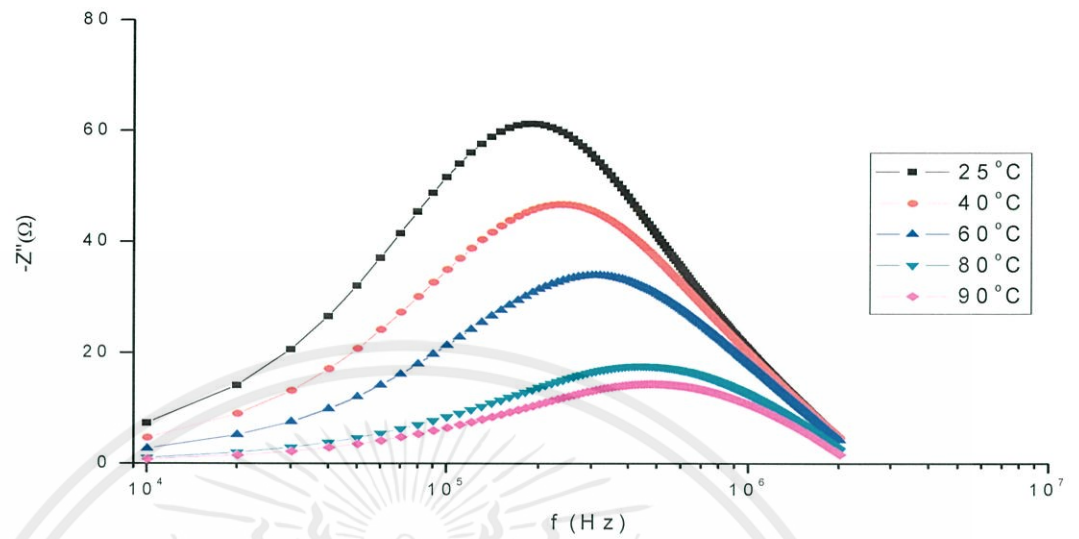
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



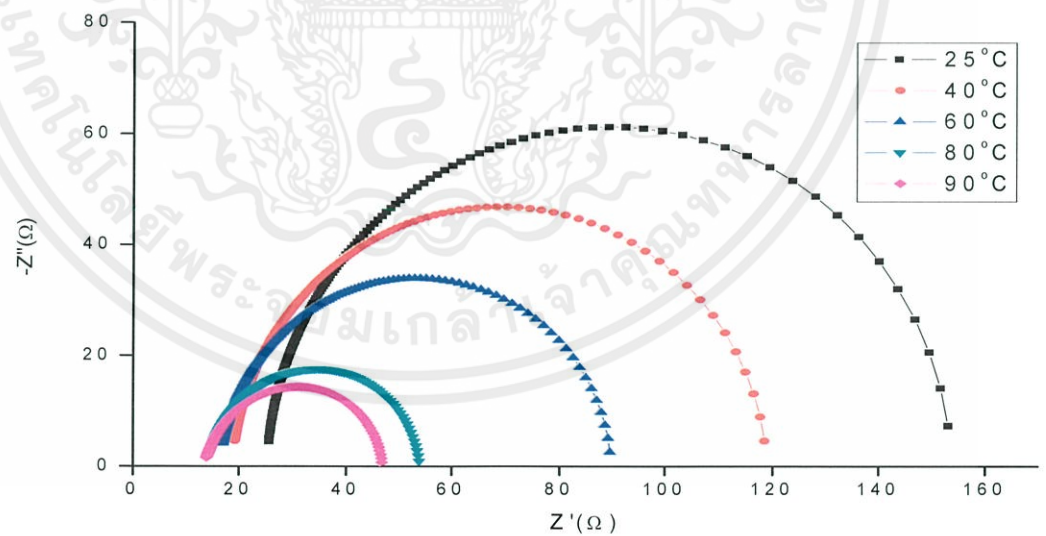
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ ( $-Z''$ ) กับความถี่ของเม็ดเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้  
 รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ความถี่เฉพาะ ( $\omega_0$ ) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\ln f$  กับ  $f$  ที่อุณหภูมิในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถที่จะนำไปหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right)$  กับ  $\frac{1,000}{T}$  ซึ่งมีที่มาจากสมการ

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

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นซึ่งจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \xi_0$$

และเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ สามารถปรับสมการให้อยู่ในรูปใหม่ดังนี้ คือ

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \xi_0$$

ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) จะคำนวณได้จากความชัน (slope) ของกราฟดังนี้

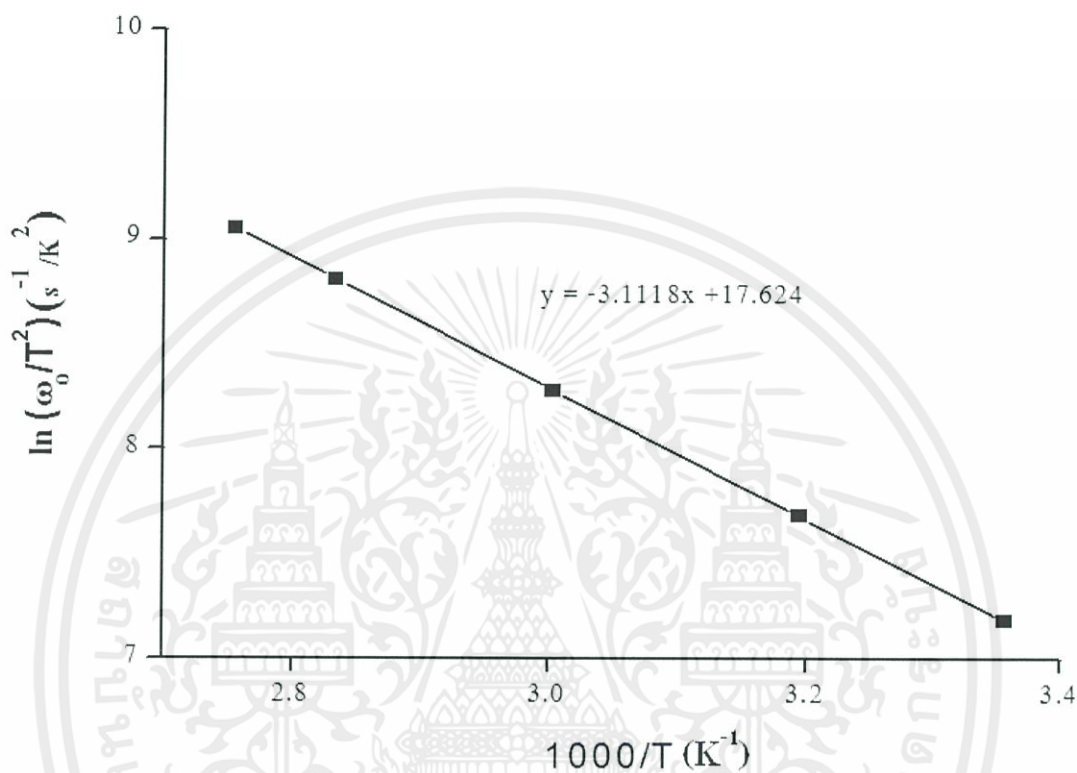
$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1,000k}{q} (\text{ความชัน}) \\ &= \frac{1,000(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} (\text{ความชัน}) \\ &= 0.086 (\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned}$$

จุดตัดแกน y นั้นคือ  $\ln \xi_0$  จากนั้นก็สามารถหาค่า  $\xi_0$  และ  $\sigma_T$  ได้จากสมการ

$$\xi_0 = 2\sigma_T v_{th} N_v$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข และ  $\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_v}$  เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จะมีค่า  $v_{th}$  และ  $N_v$  เท่ากับ  $1 \times 10^7$  เซนติเมตร/วินาที และ  $5.57 \times 10^{20}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะได้ว่า  $E_a$ ,  $\xi_0$  และ  $\sigma_T$  มีค่าเท่ากับ 0.268 อิเล็กตรอนโวลต์,  $4.508 \times 10^7$  ต่อวินาที-ต่อเคลวินยกกำลังสอง และ  $4.047 \times 10^{-21}$  ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



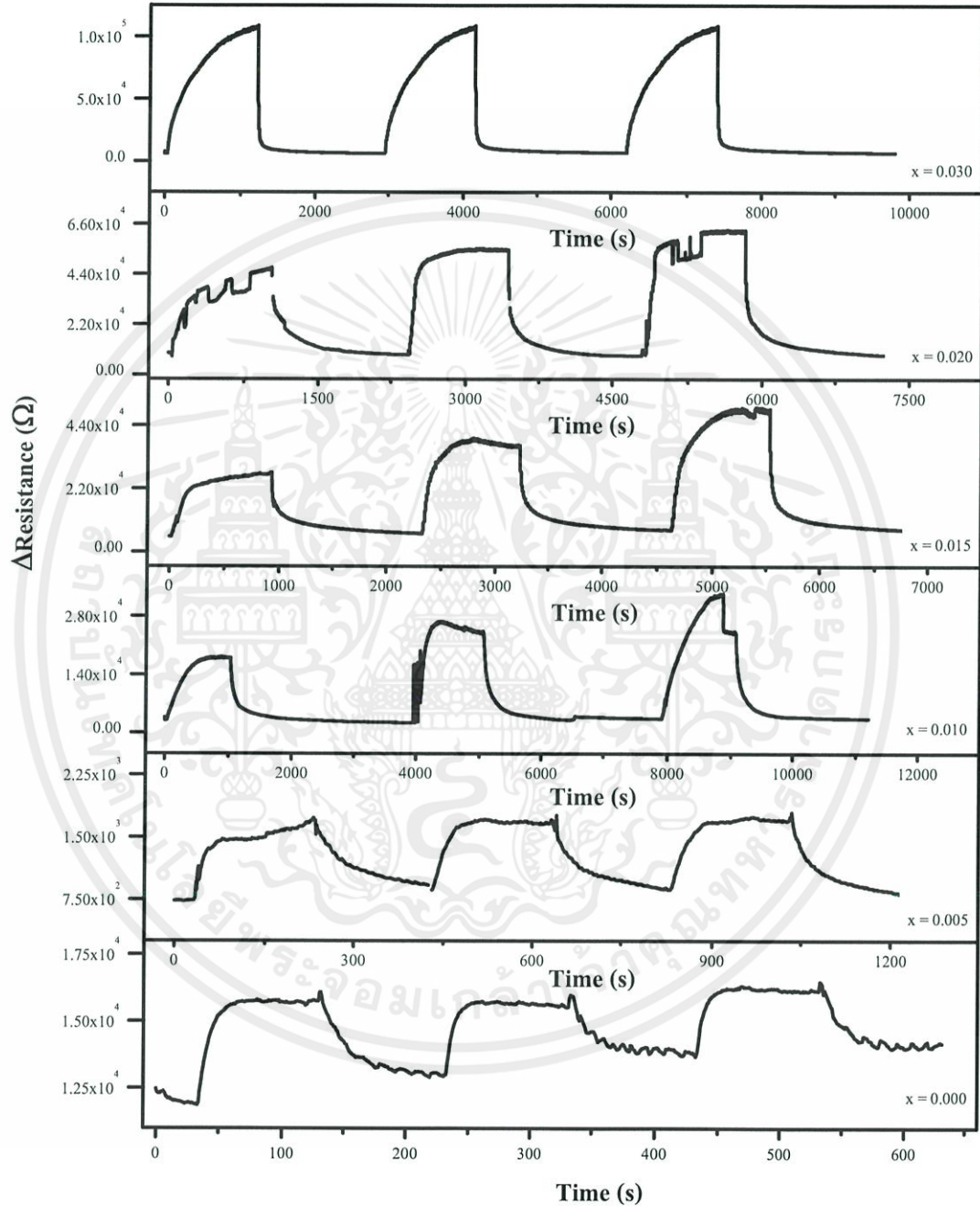
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $\frac{1,000}{T}$  ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัว  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $x = 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของ  
 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการ  
 การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of $\text{Cu}_{1-x}$ $\text{Cd}_x\text{O}$	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			$C_1(\text{F})$	$C_2(\text{F})$	$\tau_1(\text{s})$	$\tau_2(\text{s})$	$f_{\text{max}}(\text{Hz})$	$\omega(\text{rad/s})$	$\omega\tau$
0.000	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 70 \Omega$	6.59E-8	-	2.52E-5	-	6.3E3	3.958E4	1.000
		$P_1 = 2.0\text{E-}9$							
		$n_1 = 0.987$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 390 \Omega$	-	1.62E-9	-	1.134E-7	1.48E6	9.3E6	1.054
		$P_2 = 5.0\text{E-}7$							
		$n_2 = 0.99$							
0.005	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 10.5 \Omega$	1.116E-6	-	1.17E-5	-	1.44E4	9.05E4	1.0586
		$P_1 = 1.25\text{E-}6$							
		$n_1 = 0.99$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 37 \Omega$	-	4.27E-9	-	1.58E-7	1.01E6	6.34E6	1.002
		$P_2 = 5.0\text{E-}9$							
		$n_2 = 0.99$							
0.010	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 11 \Omega$	4.95E-9	-	1.26E-7	-	1.26E6	7.917E6	1.000
		$P_1 = 2.0\text{E-}9$							
		$n_1 = 0.95$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 25.5 \Omega$	-	3.14E-12	-	8.007E-11	2.01E9	1.23E10	0.985
		$P_2 = 5.0\text{E-}12$							
		$n_2 = 0.98$							
0.015	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 43.2 \Omega$	9.23E-9	-	3.98E-7	-	5.1E5	3.2E6	1.275
		$P_1 = 3.0\text{E-}8$							
		$n_1 = 0.92$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 29.8 \Omega$	-	4.69E-11	-	1.39E-9	1.11E8	6.97E8	0.968
		$P_2 = 1.3\text{E-}10$							
		$n_2 = 0.950$							
0.020	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 75 \Omega$	1.84E-8	-	4.97E-7	-	3.2E5	2.01E6	1.000
		$P_1 = 1.0\text{E-}6$							
		$n_1 = 0.97$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 27 \Omega$	-	1.1E-9	-	2.97E-8	5.75E6	3.61E7	1.072
		$P_2 = 2.0\text{E-}7$							
		$n_2 = 0.7$							
0.030	CPE <sub>1</sub>	$R_1 = 18.8 \Omega$	3.79E-9	-	1.41E-7	-	1.13E06	7.1E6	1.000
		$P_1 = 4.0\text{E-}9$							
		$n_1 = 0.90$							
	CPE <sub>2</sub>	$R_2 = 37.1 \Omega$	-	1.93E-12	-	7.160E-11	3.0E9	1.88E10	1.346
		$P_2 = 2.0\text{E-}11$							
		$n_2 = 0.90$							

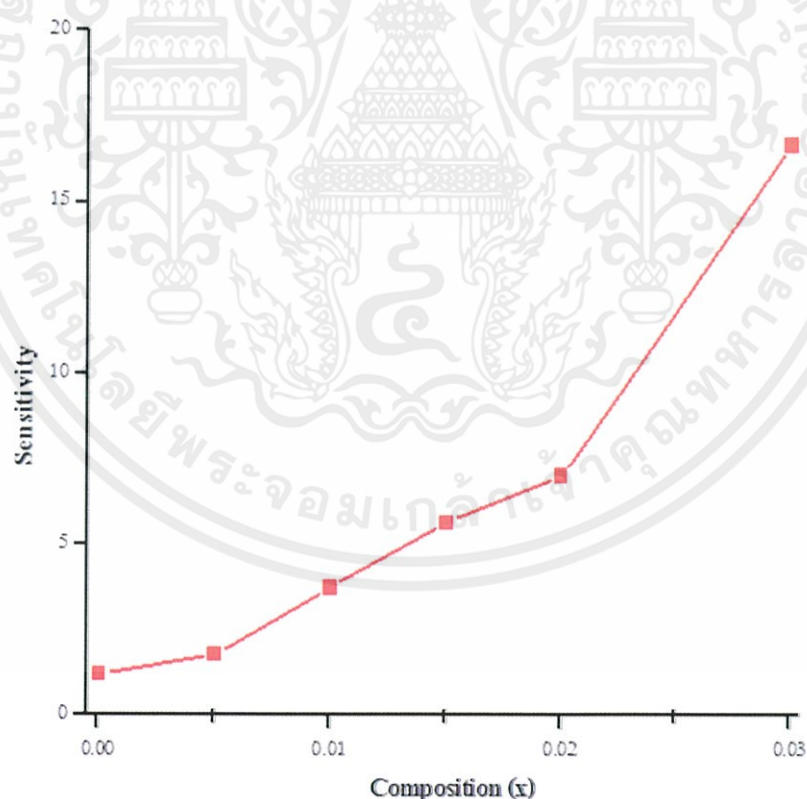
4.1.7 การศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยของอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

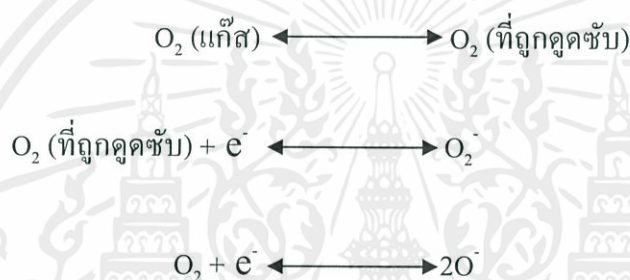
ตารางที่ 4.4 เวลาตอบสนอง เวลาคืนตัว และความไวต่อไอระเหยของอะซีโตนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$	Sensitivity	Response Time (s)	Recovery Time (s)
0	1.20	88	37
0.005	1.76	178	50
0.010	3.71	786	347
0.015	5.63	792	76
0.020	7.00	891	39
0.030	16.66	1068	19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อไอระเหยของอะซีโตนกับปริมาณสารเจือของสารประกอบ CdO ในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

กลไกการตรวจรู้ไอระเหยอะซีโตนเป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยอยู่บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ซึ่งความต้านทานไฟฟ้านี้จะถูกควบคุมโดยโมเลกุลของไอระเหยอะซีโตนและอะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ โดยปกติอะตอมออกซิเจนจากอากาศจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวและบริเวณขอบของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำกับอะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ กล่าวคือ อิเล็กตรอนอิสระจากแถบนำของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนย้ายถ่ายเทไปยังอะตอมออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ส่งผลให้เกิดเป็นไอออน  $O^-$  หรือไอออน  $O_2^-$  ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้คือ



อิเล็กตรอนที่เคลื่อนย้ายถ่ายโอนจากแถบนำของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำไปยังอะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ ส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระในเม็ดเซรามิกมีปริมาณลดลง ส่งผลให้พหะข้างมากคือ โวลต์ โดคเด่นขึ้นตั้งนั้นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  จึงมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดพีและมีความต้านทานต่ำแต่เมื่อเม็ดเซรามิกอยู่บรรยากาศของไอระเหยอะซีโตน โมเลกุลของอะซีโตนจะทำปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระกลับสู่แถบนำของเม็ดเซรามิกจำนวนพหะคือ โวลต์จึงมีปริมาณน้อยลง ดังนั้นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดพีจึงมีความต้านทานเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่ไอระเหยอะซีโตนกระทำต่ออะตอมของธาตุออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้จะเป็นดังนี้คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $CH_3COCH_3 \text{ (แก๊ส)} + OH^- + O^- \longrightarrow CH_3COC^+H_2 + OH^- + e^-$   
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หรือ



จากการทดลองพบว่า เมื่อเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  อยู่ภายใต้บรรยากาศของไอระเหยอะซีโตน ความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง แสดงว่าพื้นที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของอะซีโตนจนหมดสิ้น ปฏิริยาเคมีจึงสิ้นสุดลง แต่เมื่อนำเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำกลับเข้าสู่อากาศความดันปกติ โมเลกุลของอะซีโตนจะถูกปลดปล่อยออกจากพื้นที่ผิวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นอะตอมของธาตุออกซิเจนจะถูกดูดซับไว้ในพื้นที่ผิวของเซรามิกอย่างเดิม ปฏิริยาเคมีจะเกิดซ้ำได้อีกเมื่อนำเอาเซรามิกใส่กลับเข้าไปในบรรยากาศไอระเหยของอะซีโตน

ความเร็วในการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะนิยามโดยเวลาตอบสนอง (response time) และเวลาคืนตัว (recovery time) เวลาตอบสนอง คือเวลาที่ตัวตรวจรู้สามารถจับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นไปถึงค่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุด ส่วนเวลาคืนตัว คือเวลาที่สัญญาณลดลงจากค่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุด มาเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุด

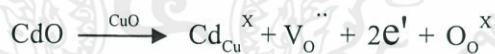
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานตั้งแต่ขั้นการเตรียมสารตัวอย่างในแบบของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของสารตัวอย่าง รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง อีกทั้งยังได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่มีการเจืออะตอมเพื่อให้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของธาตุ Cu แต่เนื่องจากรัศมีไอออน  $Cd^{2+}$  มีค่าใหญ่กว่ารัศมีของไอออน  $Cu^{2+}$  เมื่อมีการเจือสารประกอบ CdO เข้าไปในเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จะทำให้หนึ่งหน่วยเซลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะโตขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b, c, และ  $\beta$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

จากภาพถ่าย SEM เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารประกอบ CdO ที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากรัศมีของไอออน  $Cd^{2+}$  มีค่ามากกว่ารัศมีของไอออน  $Cu^{2+}$  ดังนั้นการเจืออะตอมของธาตุ Cd เพื่อให้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Cu จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเกิดการขยายตัวและทำให้เกิดข้อบกพร่องของผลึกชนิดแวนแคนซีของธาตุ O ได้ ความหนาแน่นของโพลที่ลดลงอาจจะอธิบายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้คือ



สำหรับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มลดลงนั้นอาจเกิดจากเกรนของผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น การกระเจิงของพาหะเนื่องจากบริเวณขอบของเกรนลดลงส่งผลให้สภาพคล่องของโพลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ O สูงกว่า 0.01 สภาพต้านทานไฟฟ้ากลับมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าความหนาแน่นของโพลที่ลดลงมีผลโดดเด่นกว่าสภาพคล่องของโพล

จากการศึกษาคาปาซิแตนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $Cu_{1-x}Cd_xO$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) พบว่าที่ทุกสัดส่วนโมลของอะตอมสารเจือ (x) ค่าความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่เพื่อพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ความจุไฟฟ้าที่  $x=0$  จะมีค่าต่ำสุดและไม่ว่ากรณีซึ่งสอดคล้องกับสภาพต้านทานไฟฟ้าของ  $x=0$  ที่มีค่าสูงสุดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) จะให้ผลในลักษณะเดียวกันกับคาปาซิแตนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือที่ทุกๆค่าของ  $x$  ค่าการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง การสูญเสียไดโอดีเล็คทริกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำที่  $x = 0.01$  จะมีค่าสูงสุด ส่วนการสูญเสียไดโอดีเล็คทริกที่  $x = 0$  จะมีค่าต่ำสุด

ความนำไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าดังนั้นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ที่  $x = 0.01$  และ  $x = 0$  จะมีความนำไฟฟ้าสูงสุดและความนำไฟฟ้าต่ำสุด ตามลำดับ ส่วนความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ซึ่งสอดคล้องกับสมการของจอนเซออร์ คือ

$$G(\omega) = G_0 \omega^s$$

เมื่อ  $s$  คือ เลขยกกำลังซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) พบว่าทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพมีค่าสูงสุด เมื่อ  $x = 0$  และทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพมีค่าต่ำสุดที่  $x = 0.01$  จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม EIS โดยใช้วงจรสมมูลที่มีความจุ ( $C_p$ ) ต่อขนานกับตัวต้านทาน ( $R_p$ ) จำนวน 2 ชุดที่นำมาต่ออนุกรมกันจากการจำลองอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีนี้ทำให้เราสามารถหาค่าความต้านทานของเนื้อเกรน ( $R_g$ ) และความต้านทานบริเวณขอบของเกรน ( $R_{gb}$ ) ได้ ซึ่งทั้งค่า  $R_g$  และ  $R_{gb}$  จะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนโมลของอะตอมสารเจือ Cd อย่างมาก

จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ ) มีอุณหภูมิในช่วง 25-90 องศาเซลเซียสทั้งค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดพี ค่าพลังงานกระตุ้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $\frac{1,000}{T}$  พบว่า  $E_g$  มีค่าเท่ากับ 0.268 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งคาดว่าป็นระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $x = 0.030$ )

จากการทดสอบความสามารถในการตรวจรู้ไอระเหยอะซีโตนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.030$ ) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ที่

มีสัดส่วนโมลของสารเจือ Cd เท่ากับ 0.03 มีความไวสูงสุด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$
- ทำให้ทราบถึงผลของการเจือสารประกอบ  $\text{CdO}$  ที่มีต่อสมบัติของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )
- ทำให้ทราบถึงโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )
- ทำให้ทราบถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ ควรทำให้มีความหนาเท่าๆกัน และความหนาควรไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร เม็ดเซรามิกแต่ละเม็ดไม่ควรแตกบิ่นหรือมีรอยร้าว
2. ควรค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CdO}$  เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบ วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ )
3. การทำงานควรวางแผนล่วงหน้าในการเก็บข้อมูล ปรึกษาหารือถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน และทำงานเป็นทีมอย่างมืออาชีพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง  $CdTe$  โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. การเตรียมฟิล์มบาง  $CdTe$  โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CdO$  ที่เจือด้วยอะตอม  $Al$  สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553

จิตินัย แก้วแดง. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี  $Zn$  เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี  $Zn$  ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2550.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{CdS/CdTe}$ , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2554.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{CdS/CdTe}$ , รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2552.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ,2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ,2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส,2551. การเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CdS}$  โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประธาน ประจวบโชค, 2550. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ชนิดพี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อดิศร นพรัฐกุล. 2555. สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์  $\text{CdS/ CuAlO}_2$ . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อัญฐพร อริยฤทธิ์. 2553. การศึกษาสมบัติรอยต่ออวิวิพพันธุ์  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S/ CuAlO}_2$ . โครงการงานพิเศษสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{In}_x\text{WO}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) และการประยุกต์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์  $\text{CdS/CuO}$  รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Chen, H.Y. and Wu, J.H. 2012. Transparent Conductive  $\text{CuFeO}_2$  Thin Films Prepared by Sol-Gel Processing, *Appl. Surf.Sci.* 258, 4844-4847

Choi, D.M., Moon, S.J., Hong, J.S., An, S.Y., Shim, I.B. and Kim, C.S. 2009. Impurity Dependent Semiconductor Type of Epitaxial  $\text{CuFeO}_2$  (III) Thin Films Deposited by Using a pulsed Laser Deposition. *Thin Solid Films*, 517, 3987-3991.

Dong, G.B., Zhang, M., Lan, W., Dong, P.M., Zhao, X.P. and Yan, H. 2009. Synthesis and Characteristics of p- $\text{CuAlO}_2$ /n-S; Heterojunction. *J. Mater Sci : Electron.* 20, 193-195.

Gaewdang, T., Wongcharoen, Ng., Ariyarat, A., Nopparuchikun, A., Wongcharoen, T. and Poo-Rakkiat, C. 2011. Temperature Dependence Of Current-Voltage Characteristics of  $\text{CdZnS/CuAlO}_2$  Heterojunction Diode. *J. Srinakharinwirot University (Science And Technology)*. 3(2), 12-22.

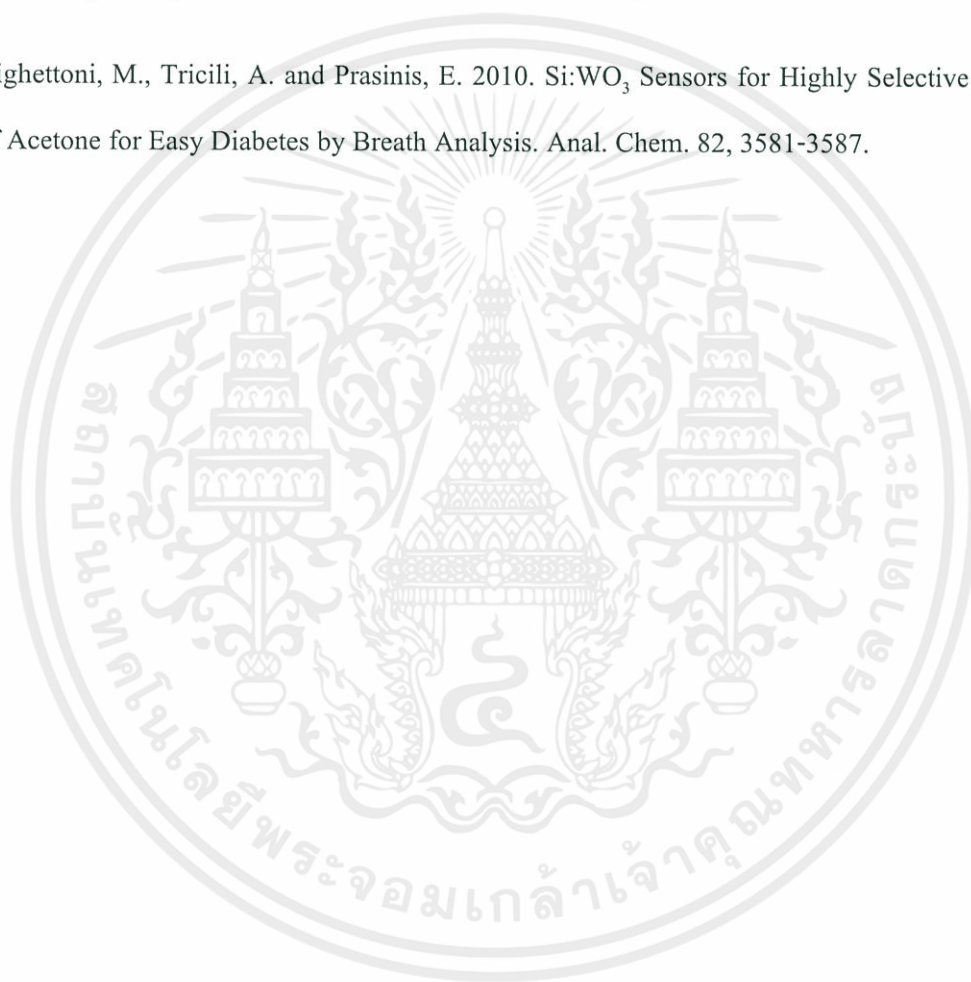
Gaewdang, T., Wongcharoen, Ng., Nopparachikun, A., Wongcharoen, T., Poo-Rakkiat, C. 2012. Fabrication and Characterisation of Heterojunction for  $\text{CdS}$  Thin Films and  $\text{CuAlO}_2$  Ceramic Pill Substrate. *J. Metals, Materials and Minerals.* 22(2), 125-129

Katayama-Yoshida, H., Koyanaki, T., Funashima, H., Harima, H. and Yanase, A. 2003. Engineering of Nested Fermi Surface and Transparent Conducting P-type Delafossite  $\text{CuAlO}_2$ : Possible Lattice Instability or Transparent Superconductivity. *Solid State Comm.* 126, 135-139.

Kim, D.S., Park, T.J., Kim, D.H. and Choi, S.Y. 2006. Fabrication of a Transparent p-n Heterojunction Thin Films Solid Composed of p- $\text{CuAlO}_2$ /n-ZnO. *Phys. Status Solid (a)*. 203(6), R51-R-53.

Lalann, M., Demont, P. and Barnebe, A. 2011. Ac Conductivity and Dielectric Properties of  $\text{CuFe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_2$ : Mg Delafossite. *J. Phys. D : Applied Physics*, 44(18), 185401-1-18540-7

- Nozaki, T., Hayashi, K. and Kajitami, T. 2008. High Temperature Thermoelectric Properties of Delafossite Type Oxides  $\text{CuFe}_{0.98}\text{M}_{0.02}\text{O}_2$  (M=Mg, Zn, Ni, Co, Mn, or Ti). 2007 International Conference on Thermoelectric, IEEE Proceeding, 167
- Takahata, S., Saiki, K., Imao, T., Nakanishi, H., Sugiyama, M. and Chichibu, S.F. 2009. Fabrication of n-type ZnO/p-type Cu-Al-O Heterojunction Diode by Sputtering Deposition Methods. Phys. Status Solid; C. 6 (5), 1105-1108
- Gao, P. Ji, H. and Li, X. 2012. Selective Acetone Gas Sensors Using Porous  $\text{WO}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  Thin Films Prepared by Sol-Gel Method. Thin Solid Films. 520, 3100-3106.
- Righettoni, M., Tricili, A. and Prasinis, E. 2010. Si:WO<sub>3</sub> Sensors for Highly Selective Detection of Acetone for Easy Diabetes by Breath Analysis. Anal. Chem. 82, 3581-3587.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีคำนวณหาความเข้มข้นของไอระเหยของอะซีโตน

จากนิยามที่ว่า 1 ppm คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าต้องการความเข้มข้นของไอระเหยของอะซีโตนเท่ากับ 100 ppm แสดงว่าในภาชนะบรรจุก๊าซของเราต้องมีปริมาณอะซีโตนเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าภาชนะของเรามีปริมาตร 20 ลิตร ดังนั้น ความเข้มข้น 100 ppm ในภาชนะ 20 ลิตร ต้องมีปริมาณอะซีโตนเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัม แต่ความหนาแน่นของอะซีโตน คือ 0.791 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์จะได้ว่า

มวลของอะซีโตน 0.791 กรัม จะมีปริมาตร = 1 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{มวลของอะซีโตน 2,000 มิลลิกรัม จะมีปริมาตร} &= \frac{1 \times (2,000 \text{ mg})}{0.791} \\ &= \frac{(1)(2,000 \times 10^3)}{0.791} \\ &= 2.53 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องตวงอะซีโตน 2.53 มิลลิลิตร แล้วฉีดใส่เข้าไปในภาชนะ โดยใช้หลอดฉีดยา เขย่าภาชนะให้อะซีโตนระเหยจนหมด จากนั้นจึงนำเอาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  สอดเข้าไปในระบบ เพื่อทำการศึกษาสมบัติการตรวจรู้ไอระเหยอะซีโตนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$  ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CuO ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS

Pattern : 80-191E		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cu O		2th	l	h	k	l
Copper Oxide		32.476	7	1	1	0
		35.495	95	-1	1	1
		38.686	100	1	1	1
		38.891	29	2	0	0
		46.193	2	-1	1	2
		48.659	28	-2	0	2
		51.313	1	1	1	2
		53.407	10	0	2	0
		56.642	1	0	2	1
		58.250	14	2	0	2
		61.458	18	-1	1	3
		65.723	13	0	2	2
		66.144	14	-3	1	1
		67.848	8	1	1	3
		68.008	15	2	2	0
		68.789	<1	-2	2	1
		71.574	<1	-3	1	2
		72.320	6	3	1	1
		72.864	<1	2	2	1
		74.923	5	0	0	4
		75.129	8	-2	2	2
		79.634	<1	0	2	3
		80.050	2	-2	0	4
		82.228	4	-3	1	3
		82.973	3	2	2	2
		83.490	3	3	1	2
		*83.490	3	4	0	0
		86.404	1	-4	0	2
		86.617	1	-2	2	3
		87.904	<1	1	1	4
		*87.904	<1	1	3	0
		89.633	4	-1	3	1
Lattice : Monoclinic S.G. : Cc (9) a = 4.69270 b = 3.42830 c = 5.13700 a/b = 1.36881 c/b = 1.49841		Mol. weight = 79.55 Volume [CD] = 81.50 Dx = 6.483 Beta = 99.55 Z = 4 I/cor = 3.88		ICSD COLLECTION CODE 069757 TEMPERATURE FACTOR ATF REMARKS FROM ICSD : REM TEM Mentioned		
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference *J. Phys. Condens. Matter, volume 3, page 8173. (1991) : Asbrink, S. Waskowska, A		Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ Cd ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS

Pattern : 5-674		Radiation = 1.540600		Quality : High		
Cd		2 $\theta$	<i>I</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Cadmium, syn / Cadmium		31.832	65	0	0	2
		34.743	32	1	0	0
		38.354	100	1	0	1
		47.808	32	1	0	2
		61.076	26	1	0	3
		62.260	19	1	1	0
		66.548	3	0	0	4
		71.653	17	1	1	2
Lattice : Hexagonal		73.330	2	2	0	0
Mol. weight = 112.41		75.515	13	2	0	1
S.G. : P63/mmc (194)		77.251	4	1	0	4
Volume [CD] = 43.19		82.147	3	2	0	2
a = 2.97930		92.970	5	2	0	3
Dx = 8.644		96.774	3	1	0	5
		97.827	4	1	1	4
		104.350	2	2	1	0
c = 5.61810		106.575	9	2	1	1
Z = 2		108.340	1	2	0	4
<i>I</i> /cor = 2.00		110.713	1	0	0	6
		113.480	4	2	1	2
		122.124	2	1	0	6
		125.877	10	2	1	3
		127.196	2	3	0	0
		130.769	1	2	0	5
		139.030	5	3	0	2
		148.171	2	2	1	4
COLOR : Gray						
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from New Jersey Zinc Company, Sterling Hill, NJ, USA.						
ANALYSIS : Spectroscopic analysis. <0.01% Hg, <0.001% Si, <0.001% Ga, Cu, Fe, Mg, Pb						
TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 26 C.						
CAS: 7440-43-9						
*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 0, page 10, (1954) primary reference : Swanson, Fuyat.						
Radiation : CuK $\alpha$ 1		Filter : Beta				
Lambda : 1.54050		d-sp : Not given				
SS/FOM : F26= 74(0.0131,27)						

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายวุฒิไกร คำอ่อน
เกิดเมื่อ	วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2534
ภูมิลำเนา	จังหวัดหนองบัวลำภู
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียน คำแสนวิทยาสรรค์ จังหวัดหนองบัวลำภู ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นายศตพล ศิวายหรรหมณ์
เกิดเมื่อ	วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2535
ภูมิลำเนา	จังหวัดหนองบัวลำภู
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียน คำแสนวิทยาสรรค์ จังหวัดหนองบัวลำภู ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นายศุภฤกษ์ จันทะโบราณ
เกิดเมื่อ	วันที่ 17 เมษายน พ.ศ. 2535
ภูมิลำเนา	จังหวัดหนองบัวลำภู
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียน คำแสนวิทยาสรรค์ จังหวัดหนองบัวลำภู ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้