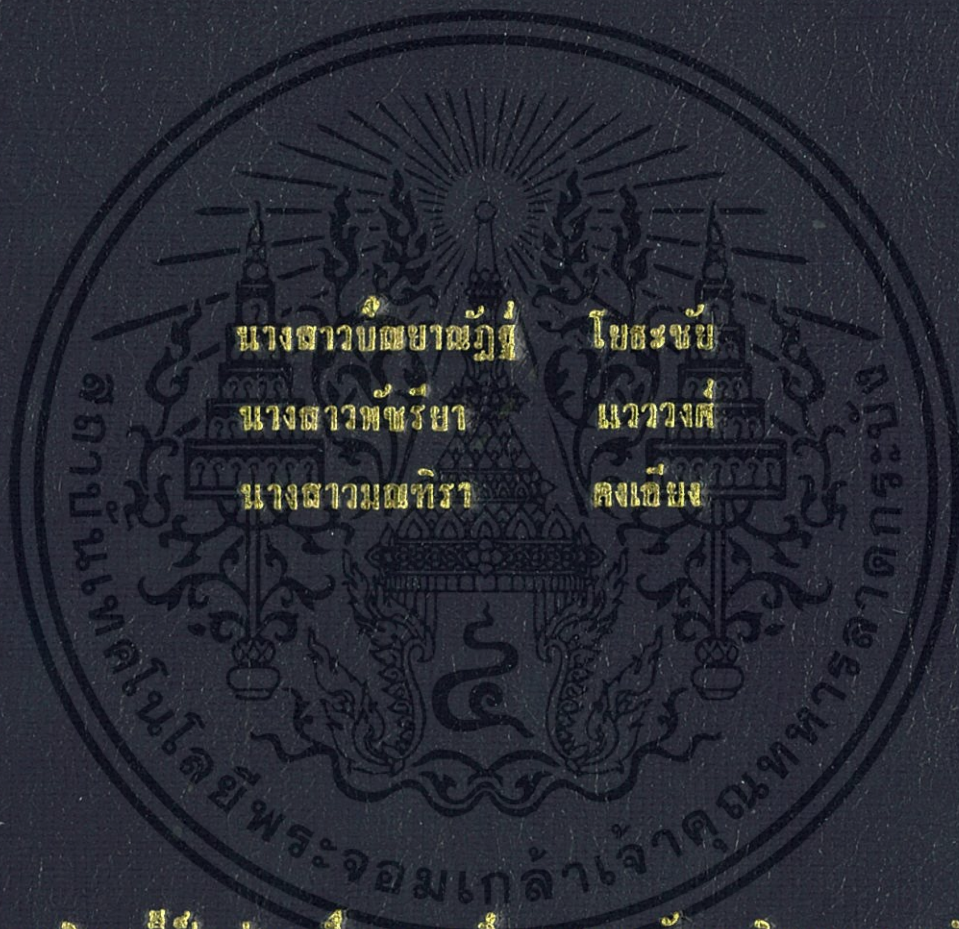


ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิก WO_3 ที่เจือด้วยอะตอม Cd
NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd-DOPED WO_3
CERAMIC



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิก WO_3 ที่เจือด้วยอะตอม Cd
NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd - DOPED WO_3
CERAMIC



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd- DOPED WO₃
CERAMIC**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHINLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2012**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิก WO_3 ที่เจือด้วยอะตอม Cd
NON LINEAR ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd- DOPED
 WO_3 CERAMIC



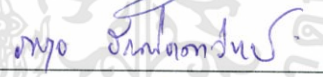


ชื่อนักศึกษา นางสาวปณิศาณัฐ โยระชัย
นางสาวพัชรียา แววงค์
นางสาวมณฑิรา กงเอียง

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาวิทย์	
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอมในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้วงปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีไดนิคส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวปณิธานัฐ โยชะชัย

นางสาวพัชรียา แววงค์

นางสาวมณฑิรา คงเอียง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทั้งสแตนนอกไซด์	4
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	6
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	10
2.4.1 อินพีแดนซ์ของวงจรรวม RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	10
2.4.1.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	10
2.4.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	10
2.4.1.3 กราฟของโบท	15
2.4.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกเพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์	17
2.4.2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม	17
2.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบชอตต์กี	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พูล –เฟรนเคิล	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	26
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	26
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	26
3.1.3 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	29
3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิก Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	30
3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	30
3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	30
3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิห้อง	30
3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	31
4.1 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	31
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	36
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	36
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง .20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	50
4.3.4 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิก Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	64
ประวัติผู้เขียน	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	28
4.1 ค่าคงที่โคงผลึกและขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	33
4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	39
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ – แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	49
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในช่วงความถี่ระหว่าง 20 เฮิร์ต – 2 เมกะเฮิร์ต เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของWO ₃ ในกรณีอุดมคติ	4
2.2 การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม และอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	4
2.3 เฟสของWO ₃ ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ5 องศาเซลวิน	5
2.4 เฟสไดอะแกรมของระบบW- O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ WO ₃	6
2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	7
2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	9
2.7 กราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรRC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	10
2.8 วงจรRC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	11
2.9 กราฟของไนควิสต์ของวงจรRC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูป ครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	12
2.10 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,จ) และแอดมิตแดนซ์สเปกโตรโคปี (ค,ฉ)	13
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว	15
2.12 ก. กราฟไนควิสต์และกราฟของโบด ข. กราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	16
2.13 พื้นที่และความหนาของเม็ดเซรามิก	18
2.14 กราฟแสดงคุณสมบัติของวาริสเตอร์	19
2.15 ขนาดของเกรน	19
2.16 รอยต่อแบบขอตต์กี 2 อันหันหน้าชนกัน	20
2.17 กราฟความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมขอบเกรนและแรงดันไบแอสที่แต่ละขอบเกรน	21
2.18 การหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิก	22
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตต์กี	23
2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J_0$ กับอุณหภูมิ	24
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่	24
2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ $E^{1/2}$	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง	29
4.1 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	31
4.2 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	32
4.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	34
4.4 ปริมาตรของหน่วยเซลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	34
4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	35
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	36
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3(x=0.02)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	37
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3(x=0.03)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	38
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3(x=0.04)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	38
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $Cd_xWO_3(x=0.05)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	39
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอคาลิตีทิมของคความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าลอคาลิตีทิมของสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	41
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอคาลิตีทิมธรรมชาติของคความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	43
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	43
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	44
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	44
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	45
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	46
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	47
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	47
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	48
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	48

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	50
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	51
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.33 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.34 วงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	53
4.35 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
4.36 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
4.38 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
4.39 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
4.40 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
4.41 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

สารประกอบในระบบ WO_3 ได้รับความสนใจกันอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพสูงในการประยุกต์เป็นลิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าและทางแสงฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 เป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (electro chromic) ที่โดดเด่น สามารถประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ (smart windows) สำหรับบ้านและรถยนต์เพื่อการประหยัดพลังงาน (Richard, A.P. and Edwards, D.D., 2003; Ramana, C.V., et al., 2006) นอกจากนี้ฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ยังมีสมบัติตรวจจับไอสารเคมี เช่น NO_x , NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้น (Khatko, V., 2005) ซึ่งสามารถประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ส่วนฟิล์มบางของสารประกอบ CdO เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับประดิษฐ์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงและมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น (n-type)

ทังสเตนบรอนซ์ (tungsten bronzes) มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 เมื่อ M คือ อะตอมของโลหะ สารประกอบนี้เกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO_3 จับกันในแบบใช้มุมติดกัน (corner sharing) เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายอุโมงค์ (tunnel network) ในสามมิติเนื่องจากในอุโมงค์เป็นที่ว่าง ดังนั้นจึงสามารถเติมอะตอมโลหะ M เข้าไปได้ รู้อุโมงค์อาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นหกเหลี่ยมก็ได้

เซรามิกของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ WO_3 ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถประยุกต์เป็นวาริสเตอร์แรงดันต่ำ (low voltage varistor) เพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงดันไฟเกินชั่วขณะ (transient overvoltage) ได้มีการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (non-linear electrical properties) ของสารประกอบในระบบ WO_3-Na_2O , $WO_3-Al_2O_3$, $WO_3-Co_3O_4$, WO_3-MnO_2 ไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1996 (Makarov, V.O., and Trontelj, M., 1996) ส่วนเซรามิกของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยสารประกอบ Li_2O, V_2O_5, Co_2O_3 และ La_2O_3 ในปริมาณเล็กน้อยก็ได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1976 (Kaneki, N., et al., 1976) เซรามิกของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยสารประกอบ Gd_2O_3 (Yang, X.S., et al., 2004) และ Sb_2O_3 (Zang, G.Z., et al., 2004) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.56 และ 1.4 ตามลำดับ

ฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cd ได้มีการเตรียมและศึกษาสมบัติการตรวจวัดก๊าซ NO และ CO (Khatko, V., et al., 2005) แต่เมื่อก่อนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยอะตอมของธาตุ Cd ยังไม่ได้มีผู้ศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ดังนั้นในโครงการพิเศษจึงน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdO และ WO_3 เพื่อเป็นประโยชน์ในการประยุกต์เป็นวาริสเตอร์ชนิดแรงดันต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdO และ WO_3

1.3.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.3.3 ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลการวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

1.4.2 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdO และ WO_3

1.4.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

1.4.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิห้อง และศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.4.8 จัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบเงื่อนไขการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdO และ WO_3

1.5.2 ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมของสารเจือที่เป็นสารประกอบของ CdO ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

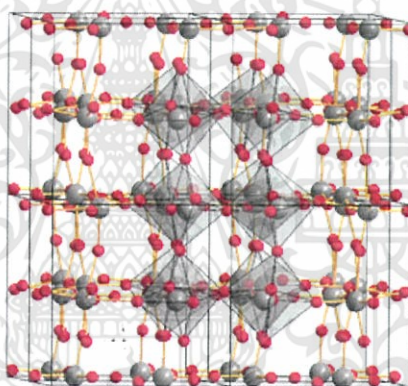
1.5.3 ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมของสารเจือที่เป็นสารประกอบของ CdO ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)

บทที่ 2

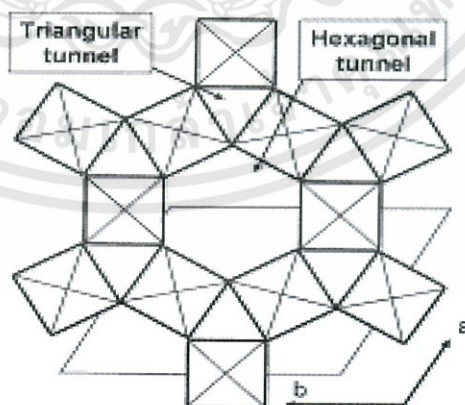
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทังสเตนออกไซด์ (WO_3) (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550)

โครงสร้างผลึกของทังสเตนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมาก ซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะใช้มุมเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอมของธาตุ W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอมของธาตุ O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอุโมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบ เช่น อุโมงค์รูปสามเหลี่ยม อุโมงค์รูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นอุโมงค์สามเหลี่ยมและอุโมงค์หกเหลี่ยมที่เกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ในกรณีอุดมคติ

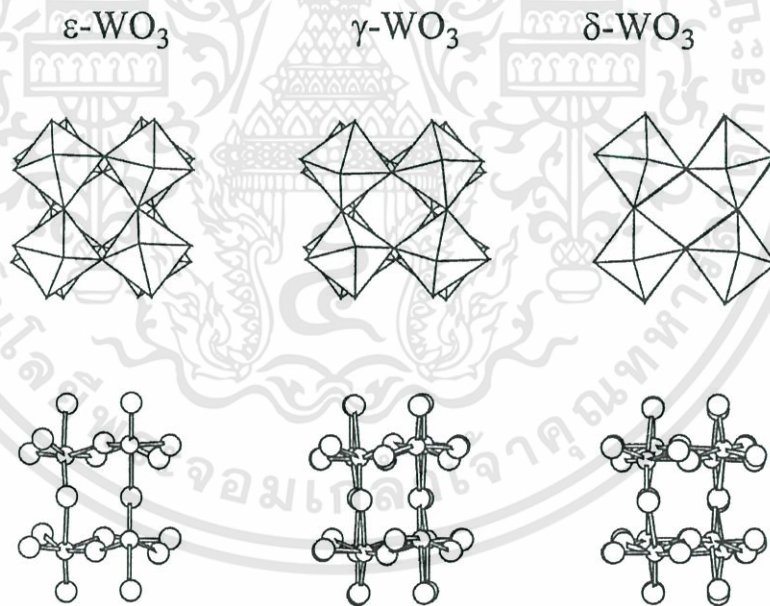


รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม และอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ WO_3 ในอุดมคติจะมีปริมาณของอะตอมของธาตุ O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล แต่การเกิดแวนเดอวาล์วของออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่าง ๆ จำนวนมาก เช่น α - WO_x ($2.98 < x < 3.0$), β - WO_x ($2.83 < x < 2.90$), γ - WO_x ($2.66 < x < 2.72$) และ WO_2 โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ WO_3 ในอุดมคติที่ไม่มีแวนเดอวาล์วของออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (สเปซกรุ๊ป $P2_1/n$) ที่อุณหภูมิห้อง $a=7.297$ อังสตรอม, $b = 7.539$ อังสตรอม, $c = 7.688$ อังสตรอม , $\beta = 90.91$ แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สารประกอบ WO_3 มักจะเกิดเป็นเฟสโมโนคลินิกร่วมกับไตรคลินิก (triclinic) (Yang and Dong,2004)

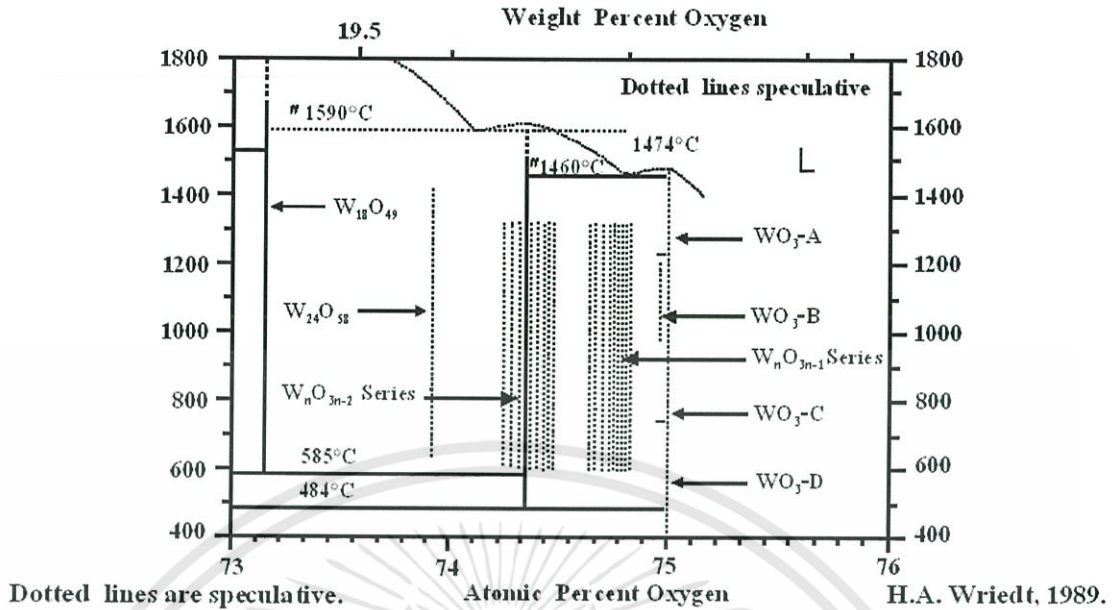
อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วย กล่าวคือในช่วงอุณหภูมิต่ำ 50 ถึง 17 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบโมโนคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัล จากข้อมูลล่าสุด (Salje et. al., 1997) พบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำระดับ 5 องศาเซลวิน เป็นไปได้ 3 แบบ ϵ - WO_3 , γ - WO_3 และ δ - WO_3 ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเอียงไปจากแนวแกนผลึก ดังแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเซลวิน

จากการที่อะตอมออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้างผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO_3 ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นใช้ขอบของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟส นอนสตอยคิโอมेटริกจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.4

Assessed W-O Phase Diagram from 73 to 75 at.% O



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ WO₃

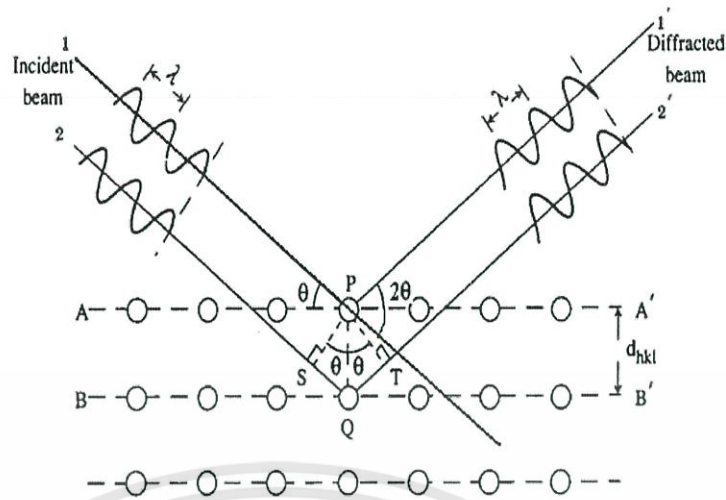
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (งามนิศย์, 2530, ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; งามนิศย์, 2553, ฐิตินัย, 2554)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสีเอกซ์ผ่านโครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริม โดยแบรกก์ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งเรียกว่า กฎของแบรกก์ ดังสมการ

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

- เมื่อ
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 - n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน
 - d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 - θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ จะเรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบนซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้ จากตำแหน่งพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกัดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกัดที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุ หรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

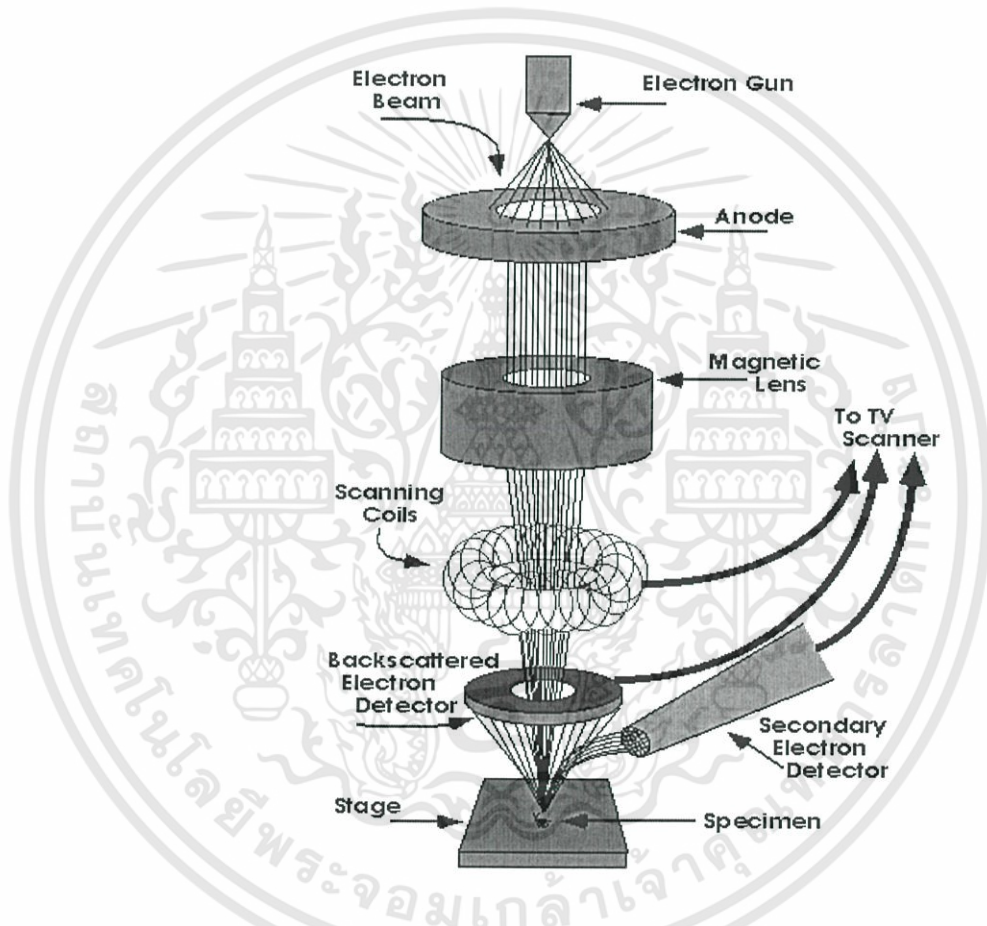
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์(Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรดวอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี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

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.11 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำโดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

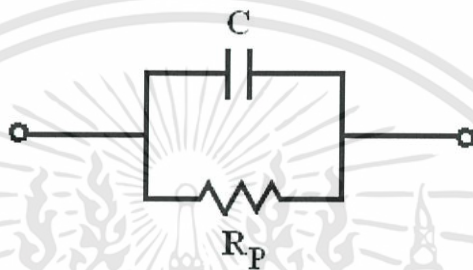


รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_p$ ดังรูปที่ (2.13) ดังนั้นสมการ (2.4) จะกลายเป็น

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

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



รูปที่ 2.8 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $(1 - j\omega R_p C)$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.6) จะได้

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

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad Z_{RC} &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left(\frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) \\ &= Z' - jZ'' \\ Z' &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.8) \end{aligned}$$

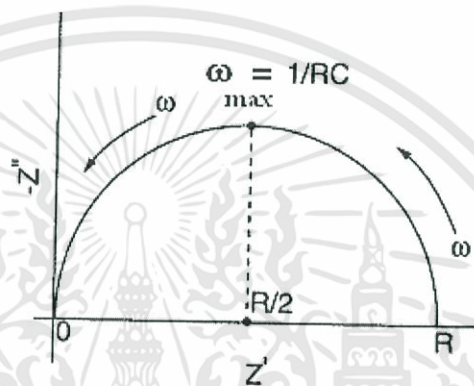
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

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

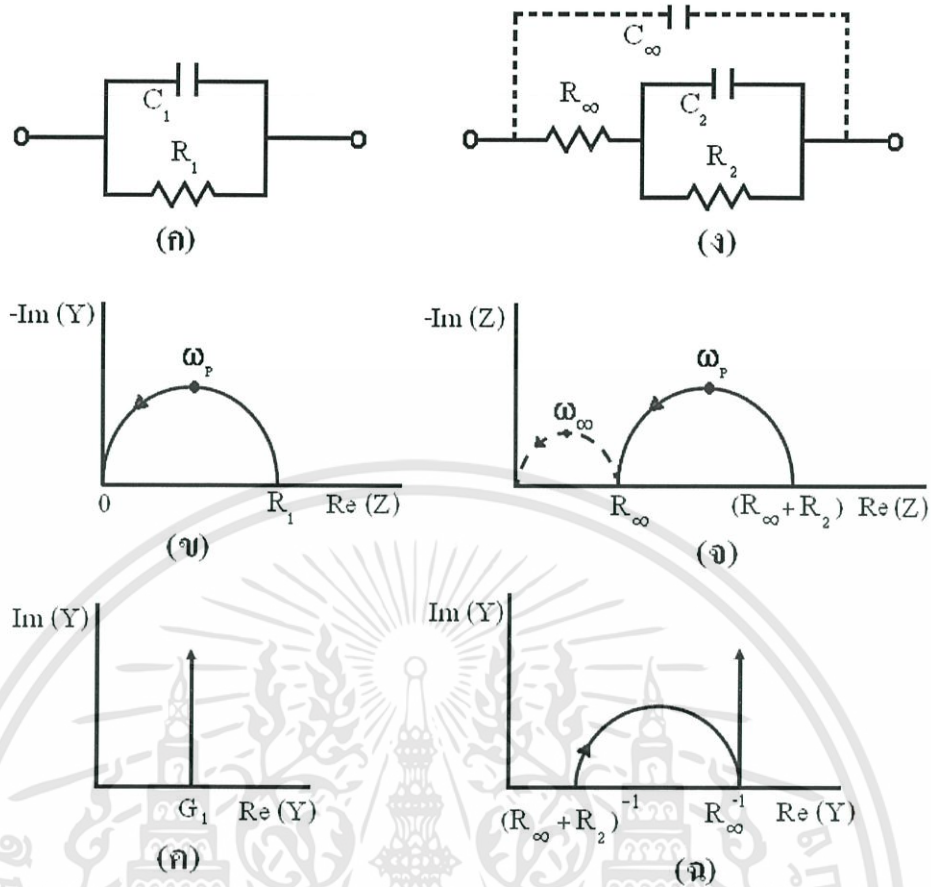
เมื่อ $\tau =$ ค่าคงตัวเวลา (time constant) $= R_p C$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ซึ่งกราฟวงจรร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟของไนควิสต์ของวงจรร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = 1/RC$

วงจรร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,ค) และ แอดมิตแดนซ์สเปกโตรโคปี (ค,ฉ)

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.10 (ก) ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty} C_{\infty} = R_1 C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.10 (ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_p \tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ s ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max} \tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z'' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max} \tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผล

ต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีนี้ที่ $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้า อิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.10 (ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูป 2.10 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไข่วัด ดังรูปที่ 2.10 (จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี 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 $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแดนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.10 (ก) ค่าแอดมิตแดนซ์ลัทซ์ คือ ผลรวมของแอดมิตแดนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ($j\omega C_1$) ดังนั้นจะได้ว่า

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

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

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

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

ในกรณีต่างๆ ไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่าและ Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

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

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในรูปที่ 2.10 ในกรณีที่มีความต้านทานอนุกรม (R_s) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.4.1.3 กราฟของโบท (Bode plot)

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

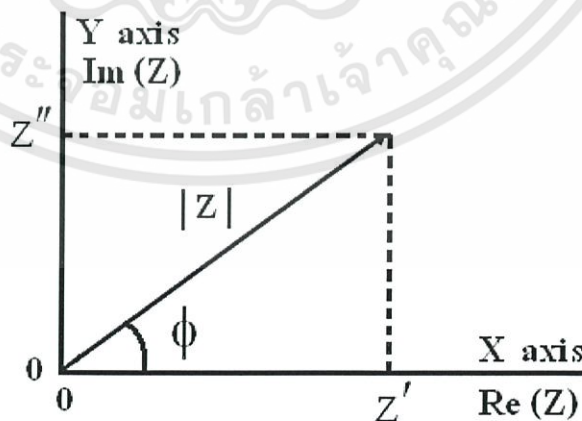
และ

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

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

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

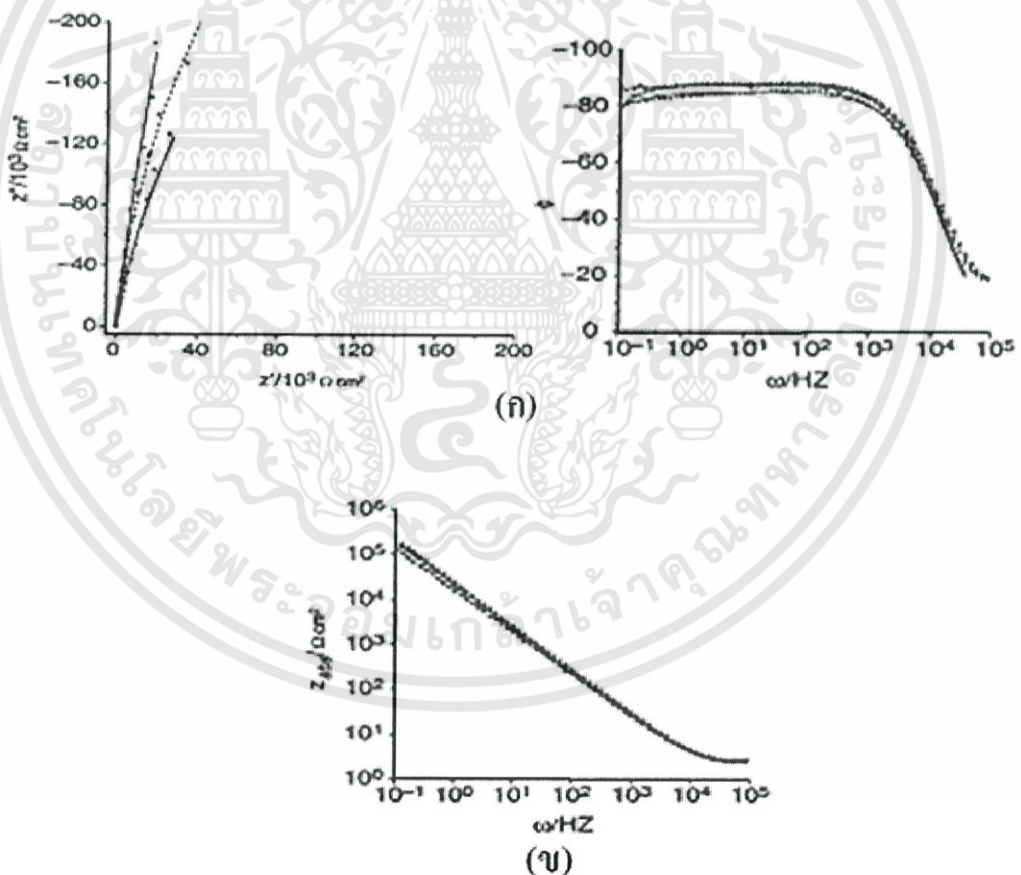
$$\begin{aligned} \exp(j\phi) &= \cos \phi + j \sin \phi \\ \text{ดังนั้น} \quad Z &= |Z| \exp(j\phi) \end{aligned} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

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

กราฟของโบคจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบคคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส = -90 องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element, CPE) ตัวอย่างของกราฟโบคสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.12 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 ก. กราฟไนควิสต์และกราฟของโบค

ข. กราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด(double-layer capacitance, C_{dl}) จะแสดงได้ดังนี้คือ

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

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

2.4.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกส์เพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์

2.4.2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม

จะแสดงดังสมการ

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

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear coefficient)
โดย α จะหาได้จากสมการ

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

เมื่อ $J_1 = 1$ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและ $J_2 = 10$ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ส่วน E_1 และ E_2 คือ สนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับ J_1 และ J_2 ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (2.20) จะกลายเป็น

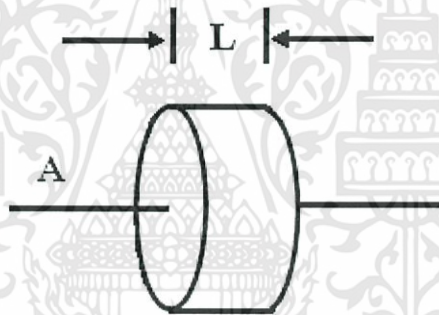
$$\alpha = \frac{1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (2.21)$$

สนามไฟฟ้า E จะหาได้จาก

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

เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนให้ชิ้นงานและ L คือ ความหนาของเซรามิก
ถ้ารัศมีของเซรามิกเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร แล้วพื้นที่ $A = \pi(0.5)^2$

$$A = 0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$



รูปที่ 2.13 พื้นที่และความหนาของเม็ดเซรามิก

ถ้า $A = 0.785$ ตารางเซนติเมตร

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

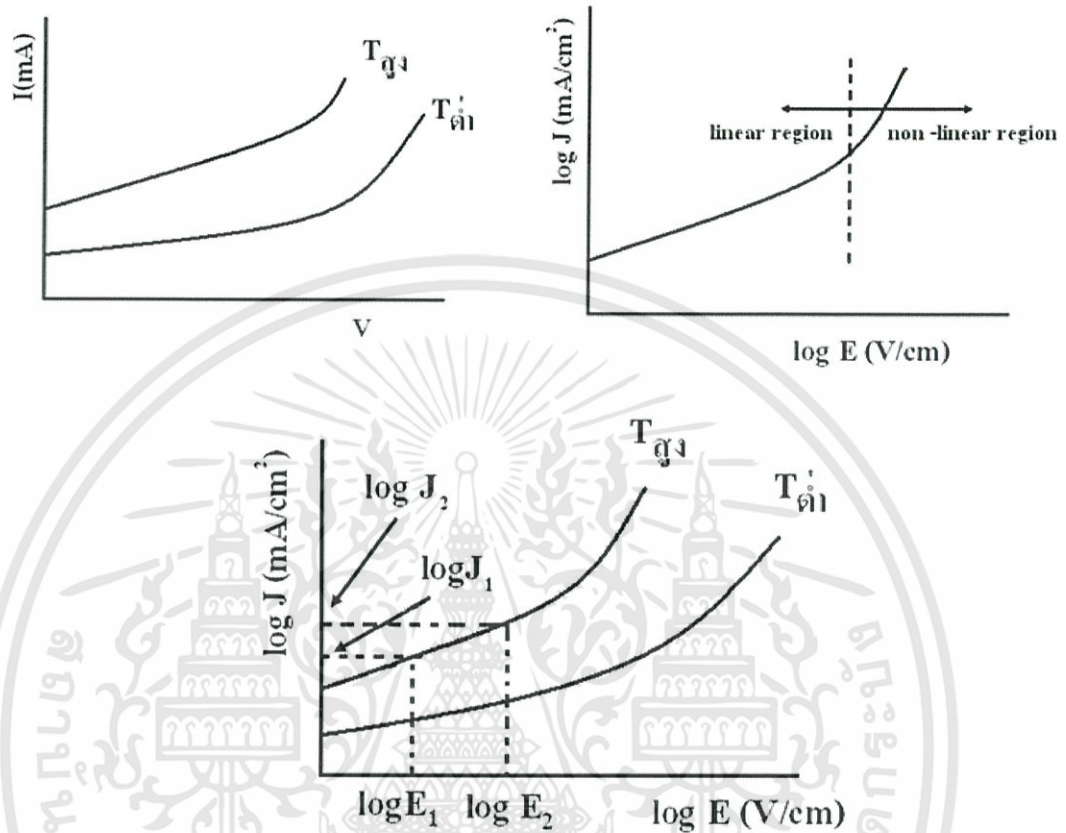
$$I_1 = J_1 A = (1 \text{ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร})(0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}) = 0.785 \text{ มิลลิแอมป์}$$

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

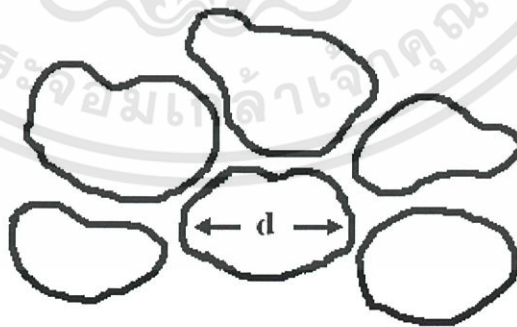
สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field: E_b) พิจารณาที่ $J_1 = 1$ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ E_b มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร หรือบางครั้งใช้ โวลต์ต่อมิลลิเมตร ส่วนกระแสรั่ว (leakage current: I_L) จะพิจารณาที่สนามไฟฟ้า เท่ากับ $0.8 E_b$ ในเนื้อเซรามิกจะมีขอบของเกรน (grain boundary) และเนื้อเกรน (bulk) ประมาณว่าขนาดของเกรน (grain size) มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ d ซึ่งหาได้จาก SEM หรือ XRD ที่บริเวณขอบของเกรน มักจะมีสถานะผิวรอยต่อ (interface state) เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นเหมือนกับมีกำแพงศักย์เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของเกรนคล้ายกับรอยต่อขอตติ์ 2 อันมาหันหน้าชนกันดังรูปที่ 2.16

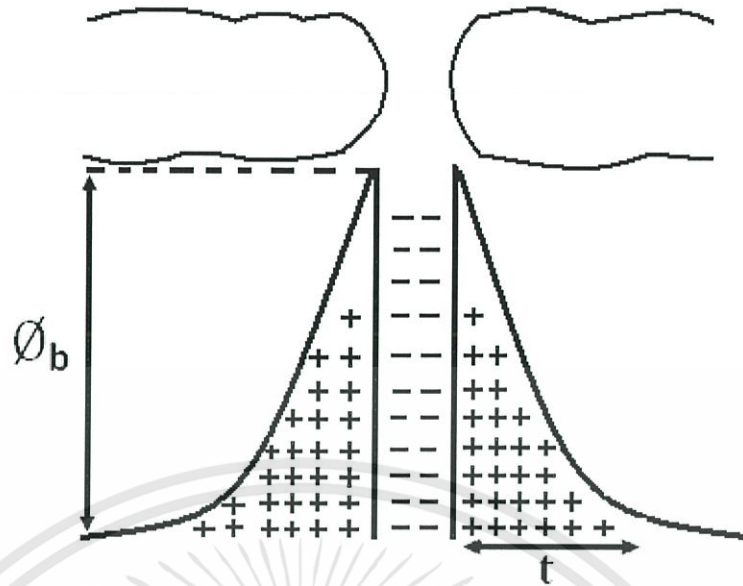


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงคุณสมบัติของวาริสเตอร์



รูปที่ 2.15 ขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 รอยต่อแบบขอตัดที่ 2 อันหันหน้าชนกัน

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (density of interface state: N_t) หาได้จาก
ความสัมพันธ์

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

N_t มีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อ N_d = ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (density of donor) มีหน่วยเป็น ต่อ
ลูกบาศก์เซนติเมตร

ϵ_s = permittivity ของเซรามิก ($\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$)

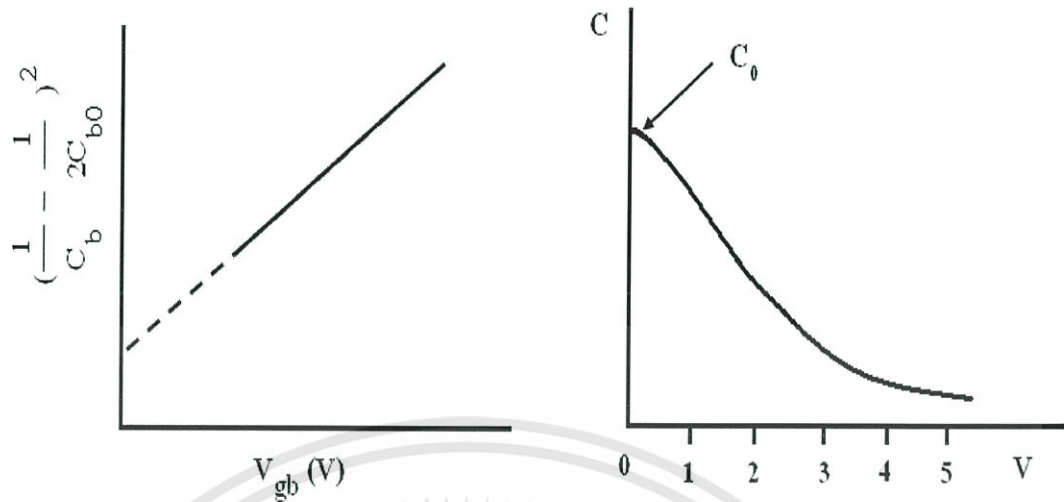
ϵ_0 = permittivity ของสุญญากาศ = 8.85×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร

ϵ_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารประกอบ $WO_3 = 100$

t = ความหนาของชั้นพร่องพาหะ หรือความหนาของกำแพงศักย์

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

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



รูปที่ 2.17 กราฟความจุไฟฟ้าที่ตกร้อมขอบเกรนและแรงดันไบแอสที่แต่ละขอบเกรน

$$\left(\frac{1}{C_b} - \frac{1}{2C_{bo}} \right)^2 = \frac{2(\phi_b - V_{gb})}{q\epsilon_s N_d A^2} \quad (2.25)$$

C_b = ความจุไฟฟ้าที่แต่ละขอบของเกรน (capacitance per grain boundary)

C_{bo} = ความจุต่อจำนวนขอบของเกรนที่แรงดัน = 0 (มีหน่วยเป็นฟารัดต่อตารางเซนติเมตร)

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

C_b จะหาได้จาก C ที่วัดได้หารด้วยจำนวนของเกรน (n) ดังสมการ

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

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

เมื่อ d = ขนาดของเกรน

และ
$$C_{bo} = \frac{C_o}{n} \quad (2.28)$$

N_d จะหาได้จากความชัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ϕ_b จะหาได้จากจุดตัดแกน y

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

E_b = สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field)

V_b = แรงดันตกคร่อมขอบของเกรน (voltage barrier)

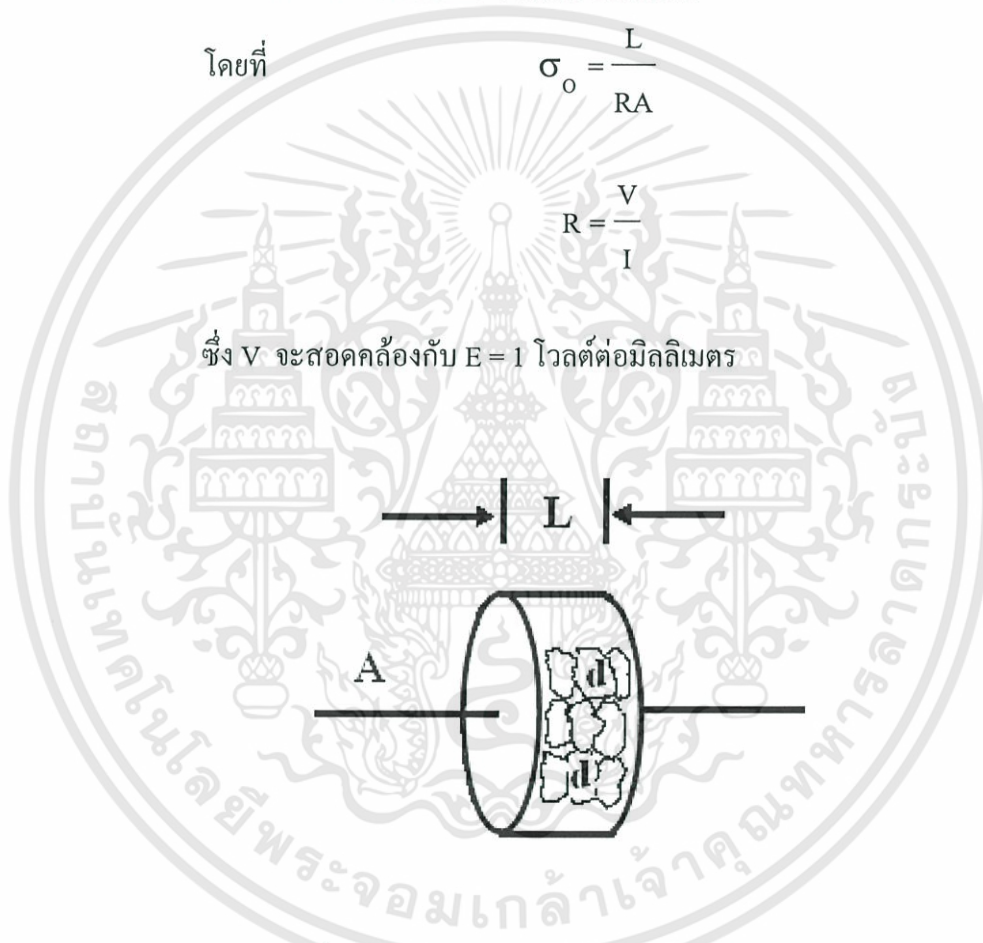
σ_o = ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductivity: σ_o)

จะวัดที่สนามไฟฟ้า $E = 1$ โวลต์ต่อมิลลิเมตร

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

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

ซึ่ง V จะสอดคล้องกับ $E = 1$ โวลต์ต่อมิลลิเมตร

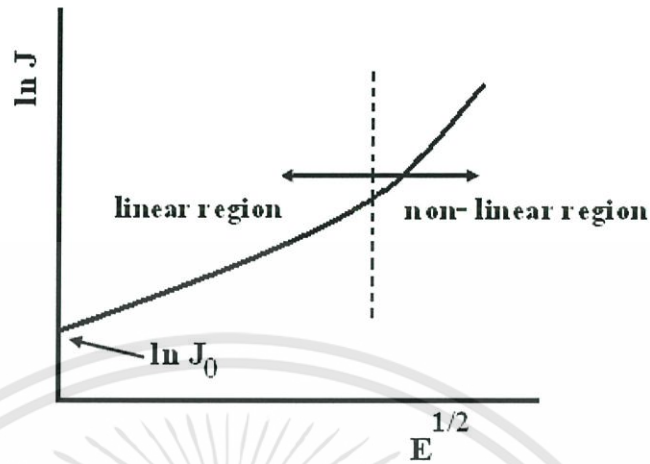


รูปที่ 2.18 การหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดัก

ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดักของวาริสเตอร์ คือ



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดัก

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

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

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

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

เทียบกราฟ $y = mx + c$

$$\text{slope} = \frac{\beta}{kT}$$

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

จากสมการที่ (2.33) จะสามารถหาค่า β ได้ซึ่ง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

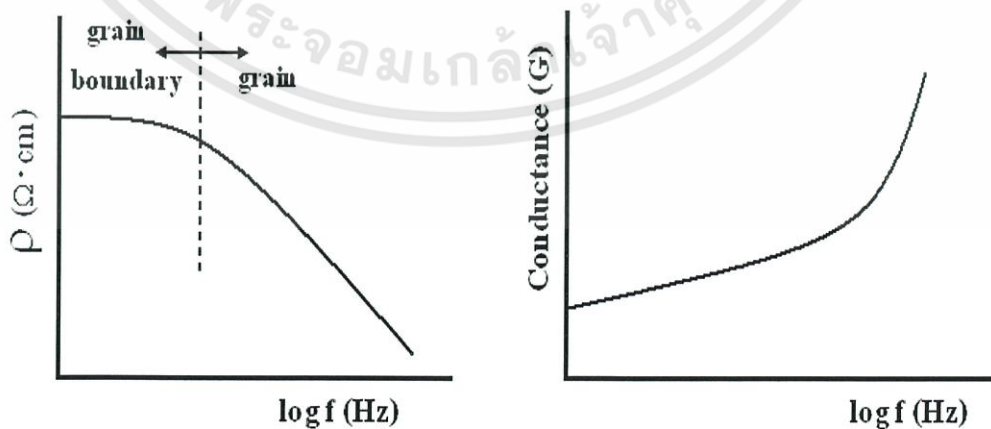
$$\ln J_0 = \ln J_{00} - \frac{E}{kT}$$

$$\ln J_0 = \ln J_{00} - \left(\frac{E}{1000k}\right) \left(\frac{1000}{T}\right) \quad (2.36)$$

เมื่อ $\frac{E}{a}$ = พลังงานกระตุ้น



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J_0$ กับอุณหภูมิ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) จะเปลี่ยนไปตามความถี่ดังนี้

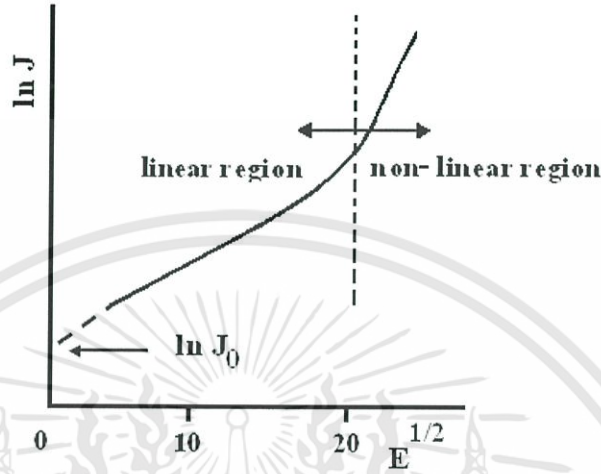


รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พูล – เฟรนเคิล(Poole – Frenkel type)

พลังงานความร้อนจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจะจากสถานะพลังงานของอะตอมของ ผู้รับ (acceptor states) ที่อยู่สถานะฉิวรอยต่อจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.37)



รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnJ กับ E^{1/2}

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

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

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

$$\text{slope} = \frac{2\beta}{kT}$$

$$y = c \ln E - \frac{\phi_b}{kT} \approx \frac{-\phi_b}{kT} \tag{2.39}$$

จากค่าความชันของกราฟ จะหาค่า β ได้ และจากจุดตัดแกน y จะหาค่า ได้ ϕ_b

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (จิตินัย, 2550)

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้น

- แคดเมียมออกไซด์ (CdO)

- ทังสเตน (VI) ออกไซด์ (WO_3)

2. ครกอาเกต

3. เครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้สำหรับอัดเม็ดสารตั้งต้น

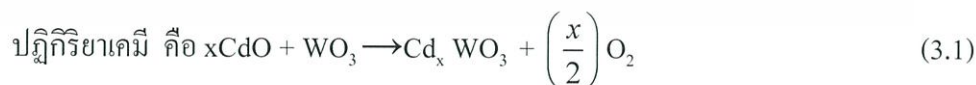
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร

5. เตาเผาสาร

6. เตาอบ

7. ครูซิเบิลชนิดอลูมินา

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิก Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (จิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)



เผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงในอากาศ

กรณี $x=0$

ใช้ WO_3 จำนวน 4 กรัม

กรณี $x = 0.01$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } Cd_{0.05}WO_3 &= 231.8482 + (0.005)(128.3994) \\ &= 232.4902 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $Cd_{0.05}WO_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } CdO &= \frac{(0.005)(128.3994)(4)}{232.4902} \\ &= 0.0111 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{232.4902} \\ &= 3.9889 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.02$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } Cd_{0.01}WO_3 &= 231.8482 + (0.01)(128.3994) \\ &= 233.1322 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $Cd_{0.01}WO_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } CdO &= \frac{(0.01)(128.3994)(4)}{233.1322} \\ &= 0.0220 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{233.1322} \\ &= 3.9780 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.03$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } Cd_{0.015}WO_3 &= 231.8482 + (0.015)(128.3994) \\ &= 233.7742 \text{ กรัม / โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $Cd_{0.015}WO_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } CdO &= \frac{(0.015)(128.3994)(4)}{233.7742} \\ &= 0.0330 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{233.7742} \\ &= 3.9670 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.04$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } Cd_{0.02}WO_3 &= 231.8482 + (0.02)(128.3994) \\ &= 234.4162 \text{ กรัม / โมล} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.04$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของผลึก } \text{Cd}_{0.02}\text{WO}_3 &= 231.8482 + (0.02)(128.3994) \\ &= 234.4162 \text{ กรัม / โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก $\text{Cd}_{0.02}\text{WO}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdO} &= \frac{(0.02)(128.3994)(4)}{234.4162} \\ &= 0.0438 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{234.4162} \\ &= 3.9562 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.05$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของผลึก } \text{Cd}_{0.025}\text{WO}_3 &= 231.8482 + (0.025)(128.3994) \\ &= 235.0582 \text{ กรัม / โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก $\text{Cd}_{0.025}\text{WO}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdO} &= \frac{(0.025)(128.3994)(4)}{235.0582} \\ &= 0.0546 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{235.0582} \\ &= 3.9454 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

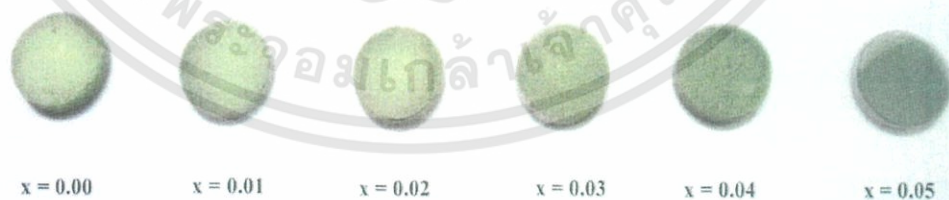
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิก Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	CdO (g)	WO ₃ (g)
0	-	4
0.01	0.0111	3.9889
0.02	0.0220	3.9780
0.03	0.0330	3.9670
0.04	0.0438	3.9562
0.05	0.0546	3.9454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550)

- นำผงผลึกของสารประกอบ CdO และผงผลึกของสารประกอบ WO_3 ตามปริมาณที่ต้องการ นำมาบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - การเจืออะตอมของธาตุ CdO จะทำการเจือในปริมาณ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ แล้วอบในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 - เมื่ออบแล้วนำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 4 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 30 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 4 ตัน และตอนเอาเม็ดผลึกออกจากโมลด์อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
 - นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ในครุชเชิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
 - ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตาออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป
- เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ขณะยังไม่เผา สีจะเป็นสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ยังไม่มีการเจือจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อน ส่วนที่มีการเติมสารเจือแล้วจะมีสีเป็นสีเขียวเข้ม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (จิตินัย, 2550)

3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางจุลภาค

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

3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกทางมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิห้อง

- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

3.2.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

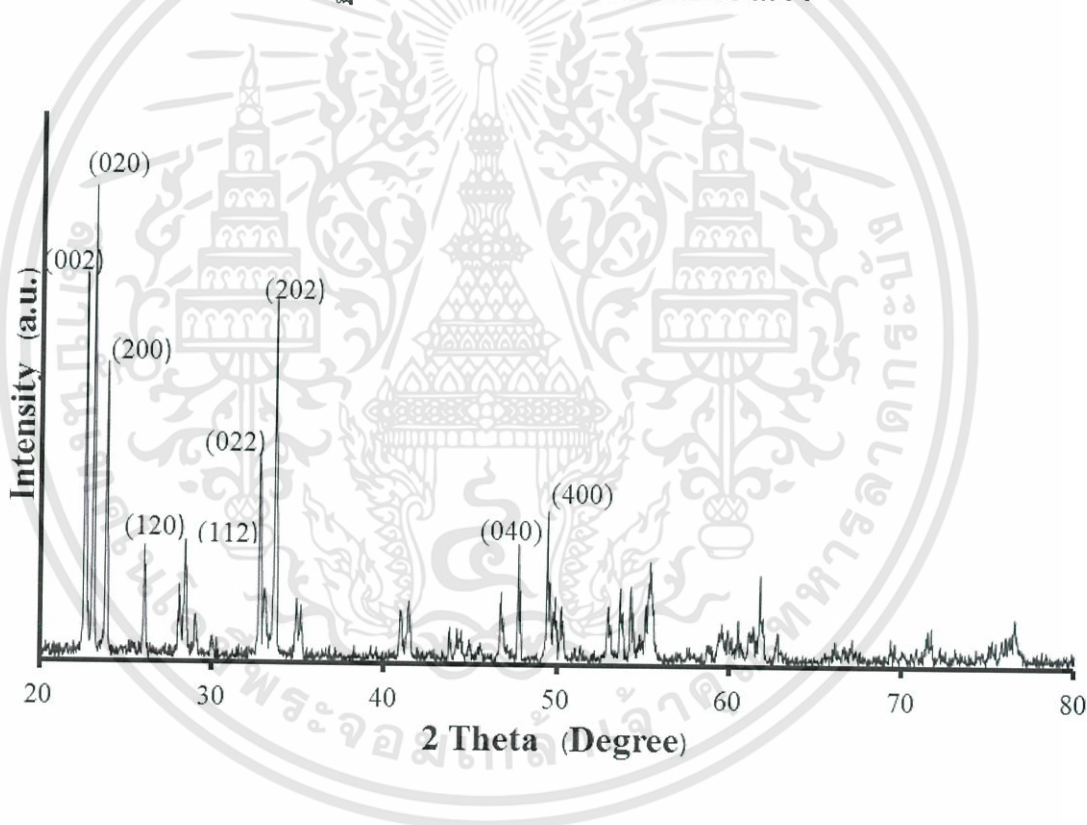
- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 26 มิลลิโวลต์ ใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และใช้อุณหภูมิห้อง
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- สายไฟ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

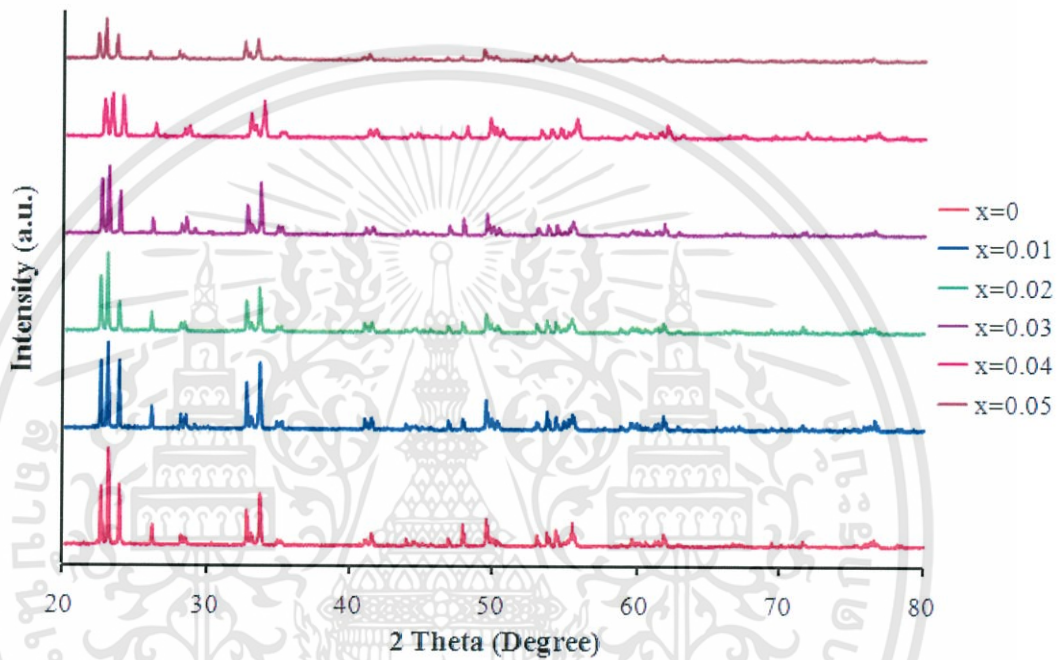
ในงานโครงการพิเศษนี้ ได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.1 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากรูปที่ 4.1 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ ในช่วง 20 - 80 องศา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) จะปรากฏระนาบ (020) ที่ตำแหน่งพิคมีมุม 2θ ประมาณ 23.01 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดและจะปรากฏระนาบอื่นๆ คือ (002), (200), (120), (022), (202), (222), (040), (400) ของโครงผลึกแบบ โมโนคลินิก



รูปที่ 4.2 พิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากรูปที่ 4.2 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) พบว่าความเข้มของพิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณ CdO เพิ่มขึ้น แต่โครงสร้างผลึกยังคงเป็นแบบ โมโนคลินิก จากการคำนวณค่าคงที่โครงผลึก พบว่า เมื่อสัดส่วนโมล x เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ผลึก a และ b มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่า c มีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำสุดที่ $x = 0.04$ แต่เมื่อ $x = 0.05$ ค่า c จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ $x = 0.04$ จะมีค่าลดลงเล็กน้อย

สามารถคำนวณหาขนาดของเกรนได้ จากสูตร

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ $\lambda = 1.5406$ อังสตรอม

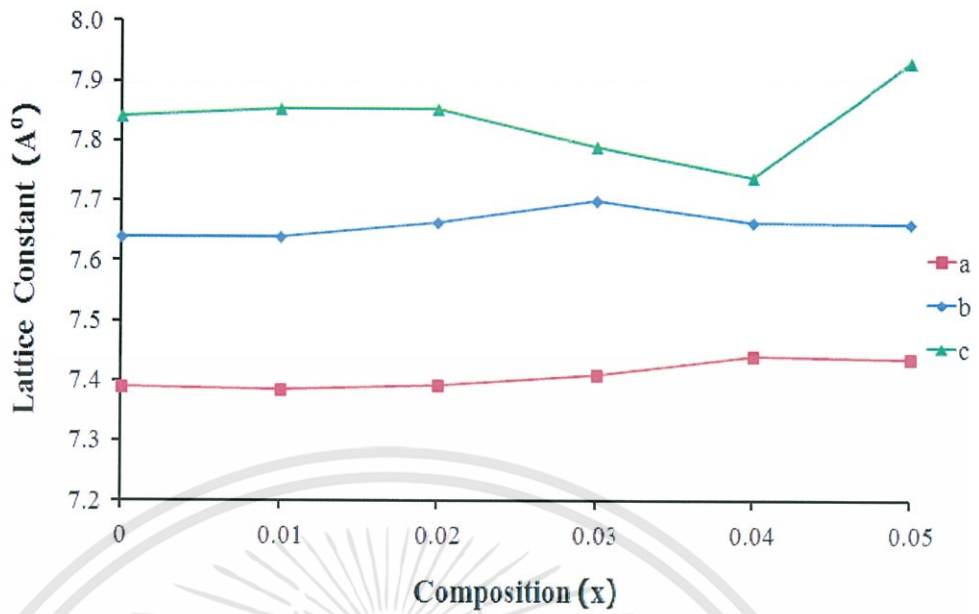
β = ความกว้างของพีคที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูง (full width at half maximum of the diffraction peak)

ขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

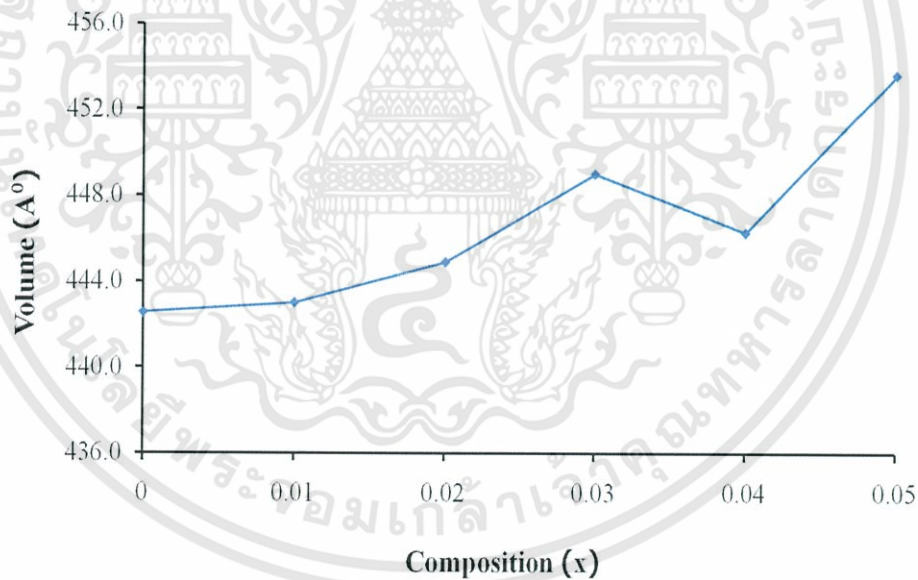
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่โครงผลึกและขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of Cd_xWO_3	Lattice Constant (Å)				Volume (Å) ³	Grain Size (µm)
	a	b	c	β		
0	7.390	7.640	7.840	90.36	442.54	2.21
0.01	7.385	7.640	7.852	90.50	442.99	2.16
0.02	7.393	7.663	7.854	90.55	444.88	2.06
0.03	7.409	7.782	7.789	90.84	448.99	2.39
0.04	7.441	7.751	7.740	90.87	446.26	2.80
0.05	7.435	7.663	7.931	90.98	453.6	1.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



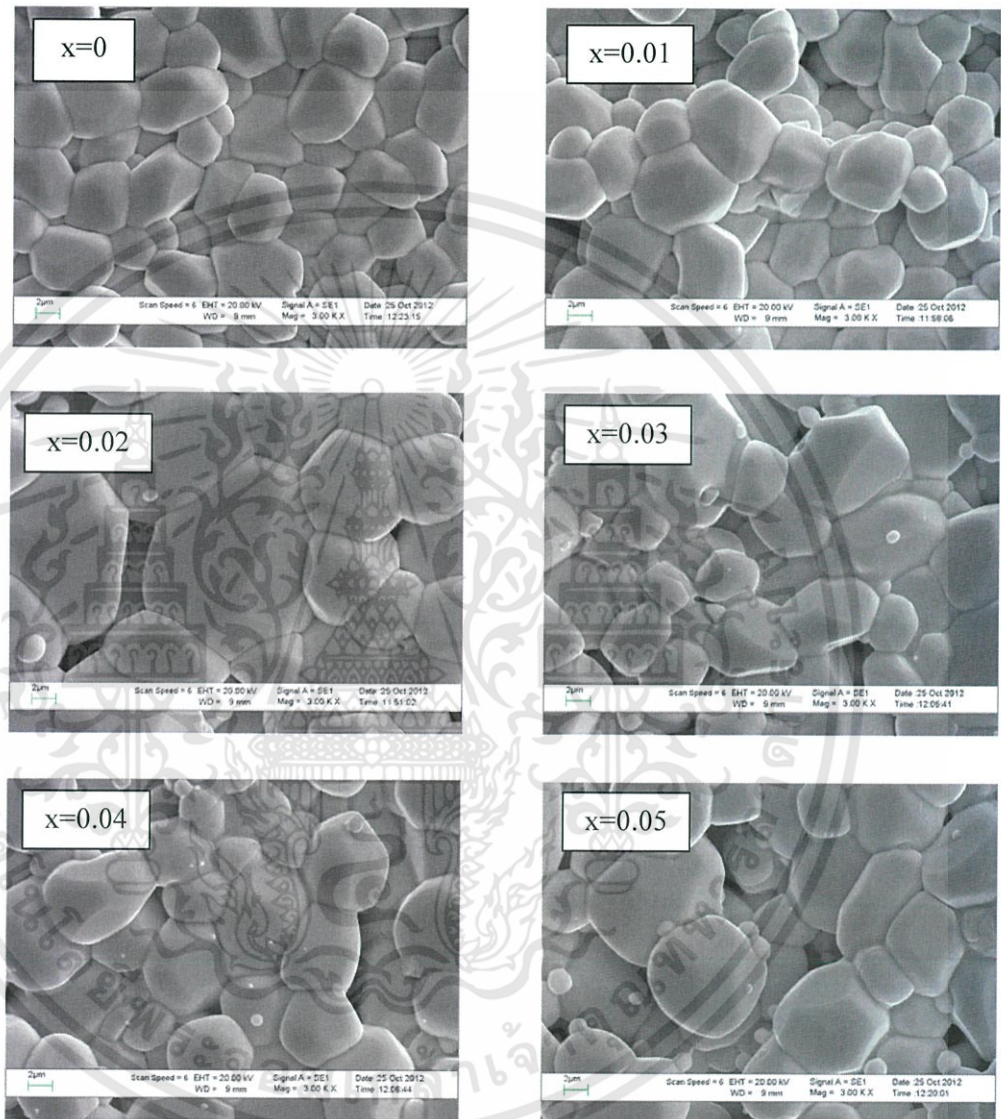
รูปที่ 4.3 ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.4 ปริมาตรของหน่วยเซลล์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

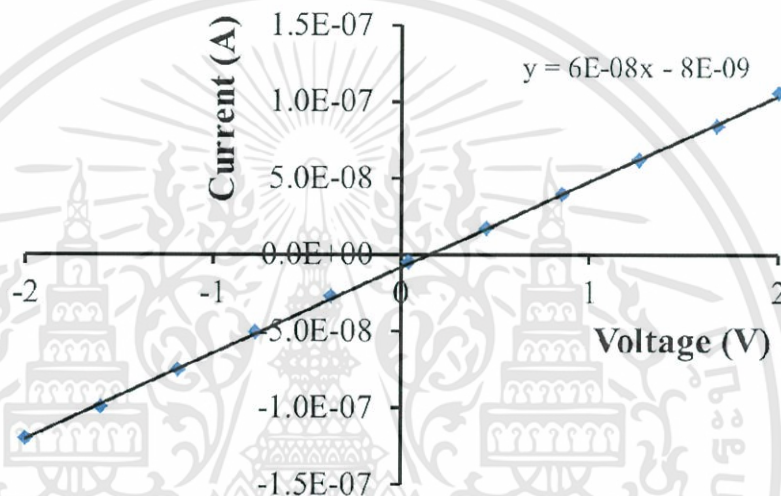
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



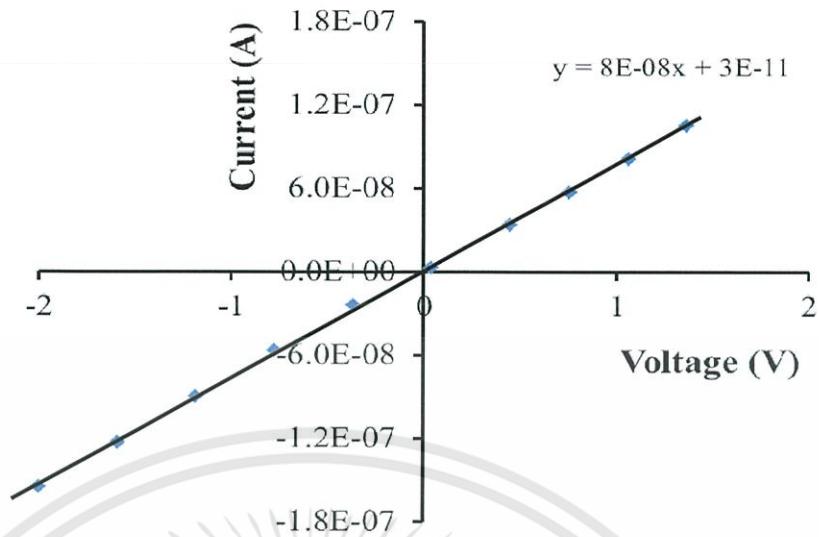
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

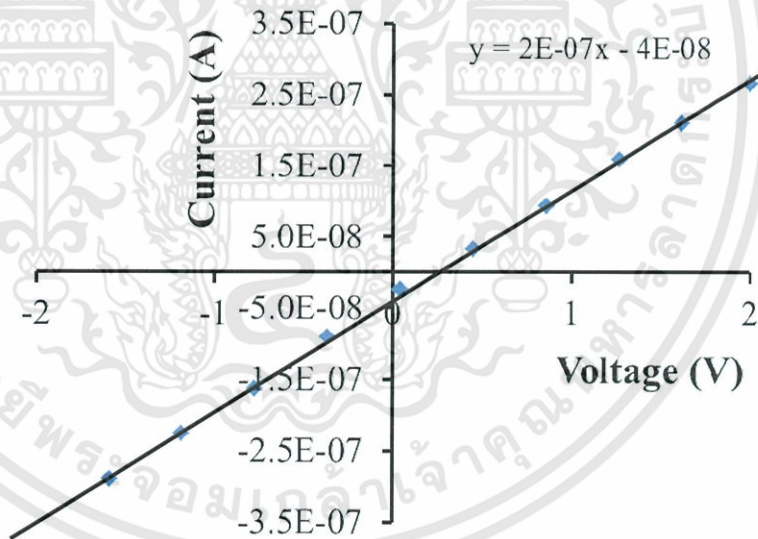
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



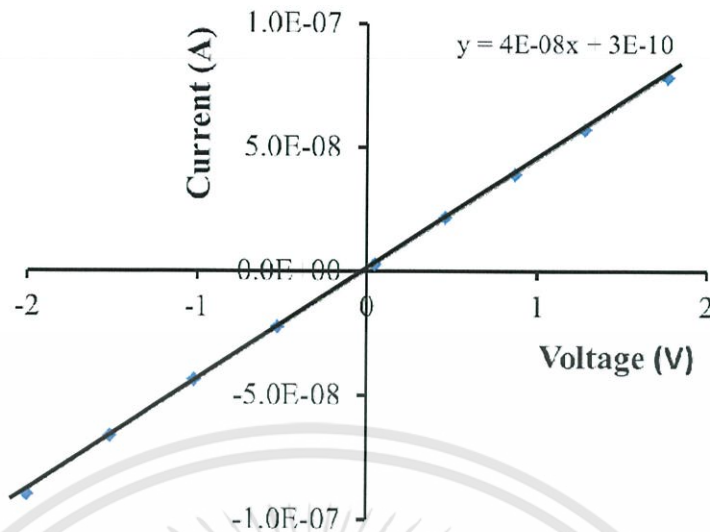
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



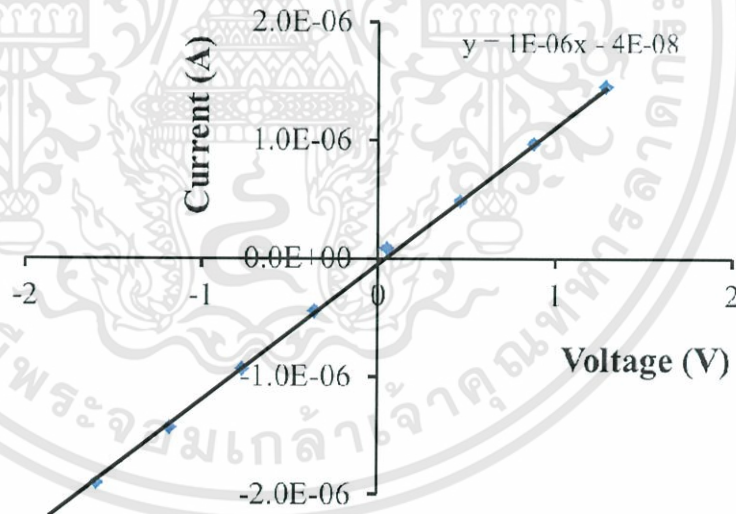
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



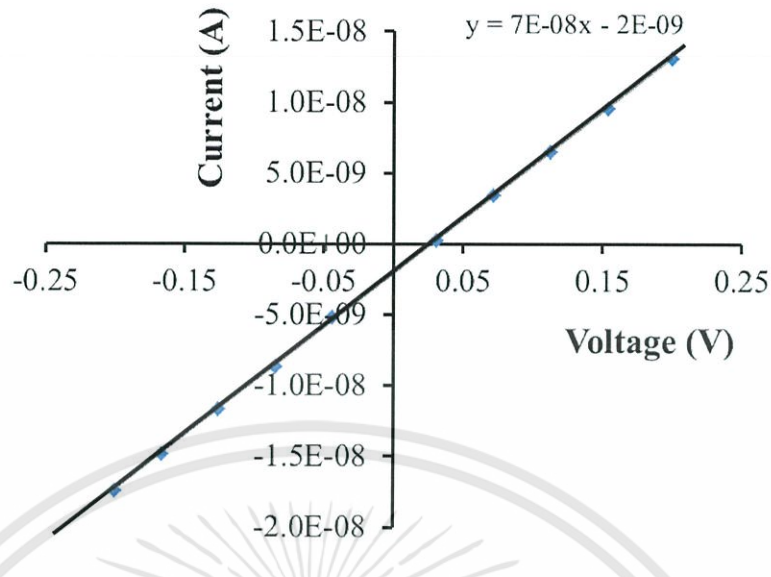
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

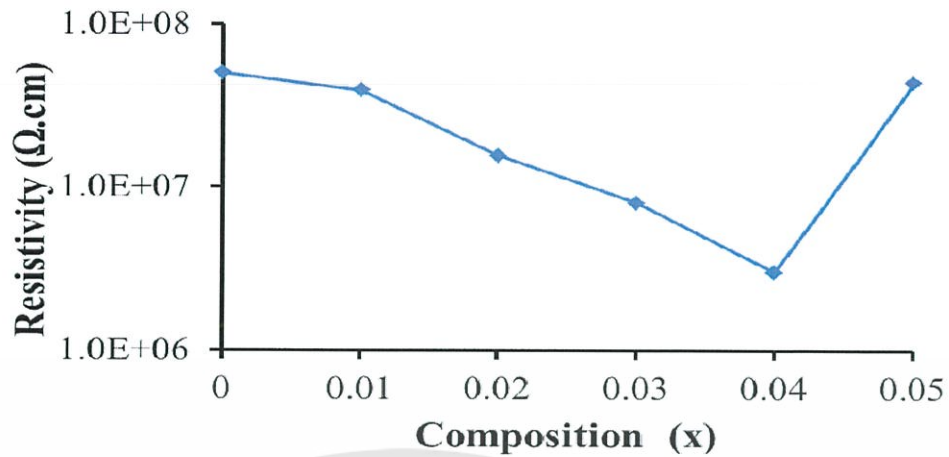


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง จำนวนความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าสัดส่วนผสมเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

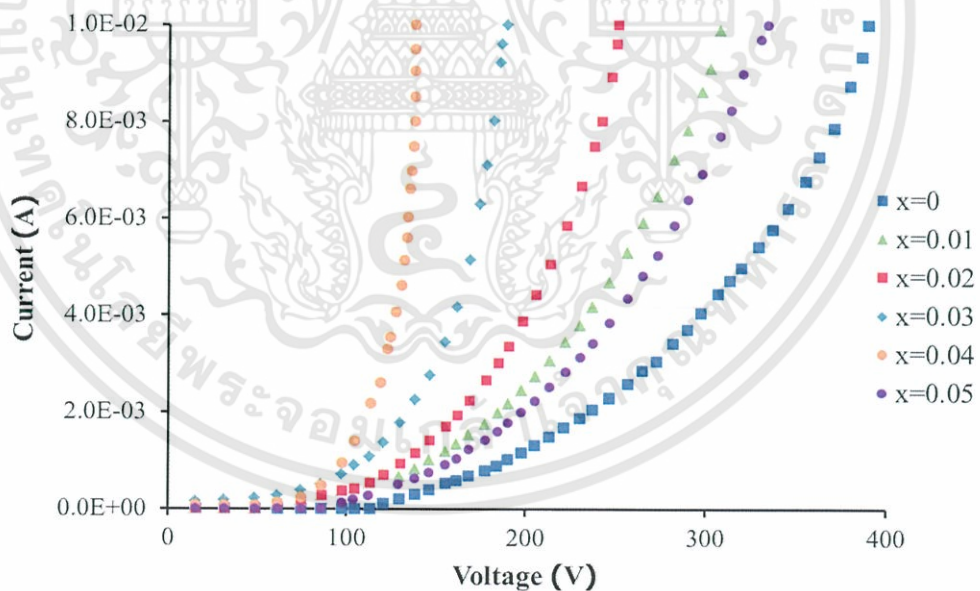
Composition (x) of Cd_xWO_3	R (Ω)	ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)
0	1.67×10^7	5.03×10^7
0.01	1.25×10^7	3.93×10^7
0.02	5.00×10^6	1.57×10^7
0.03	2.50×10^6	8.01×10^6
0.04	1.01×10^6	3.02×10^6
0.05	1.43×10^7	4.40×10^7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

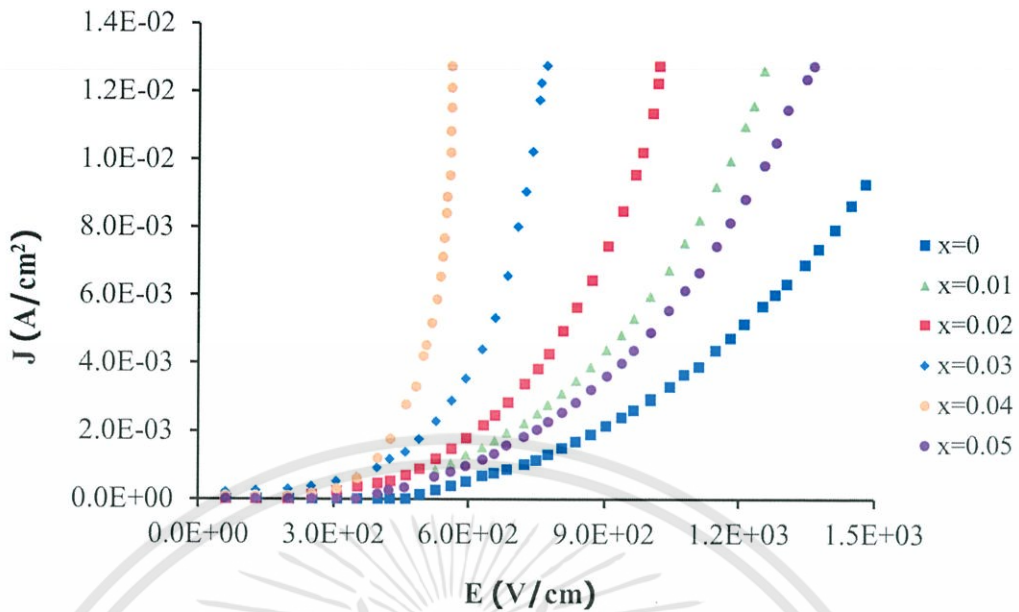


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สัดส่วนผสมเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

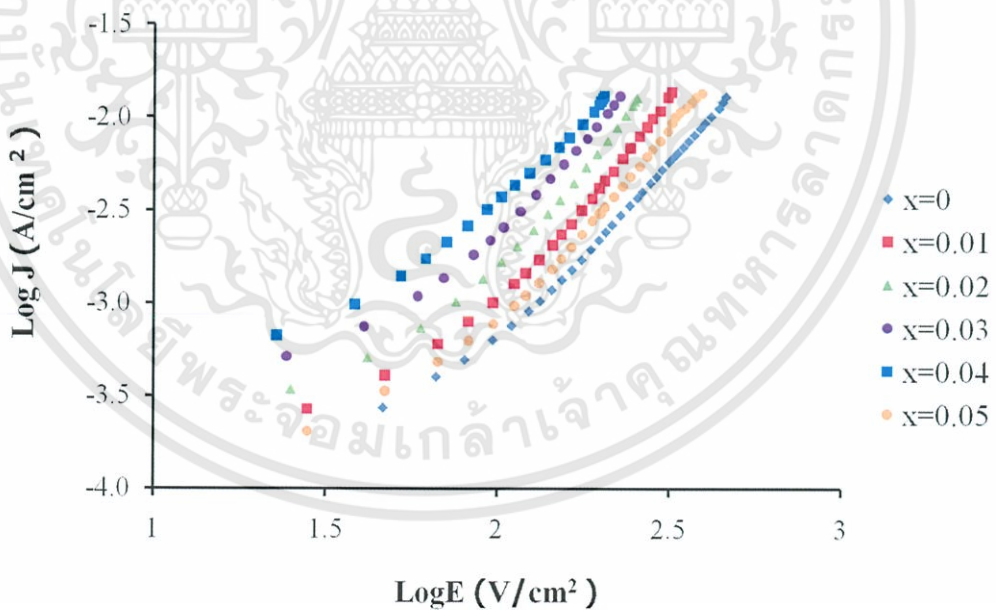
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



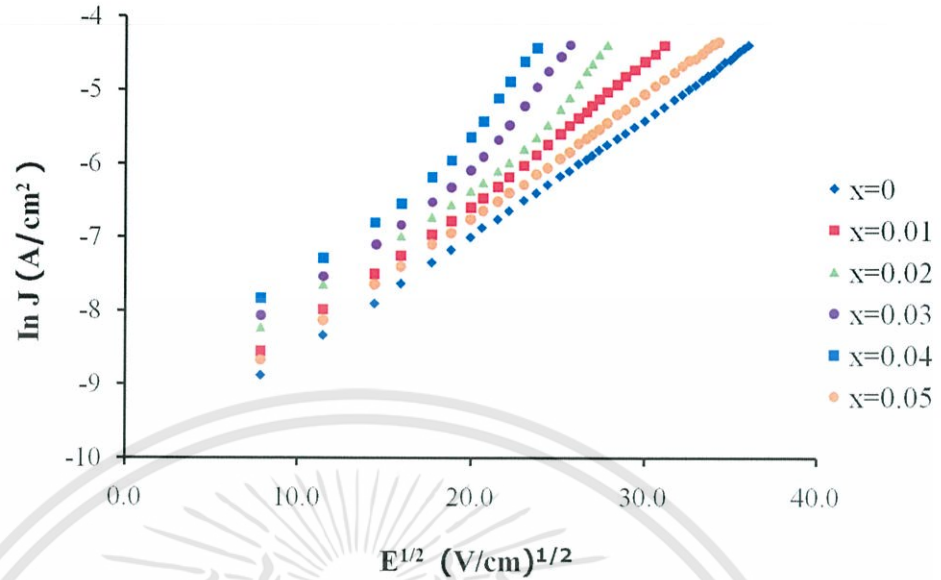
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



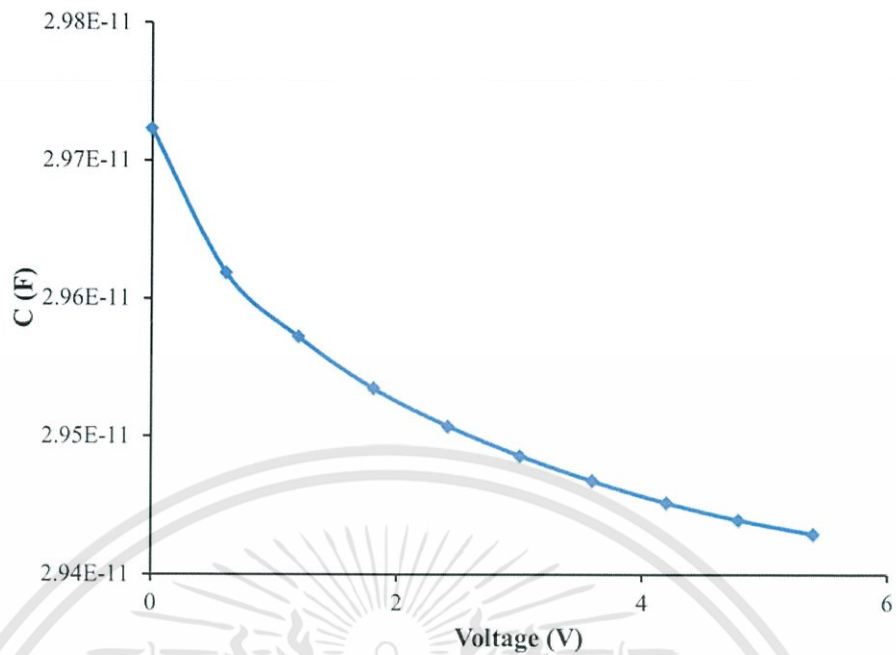
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



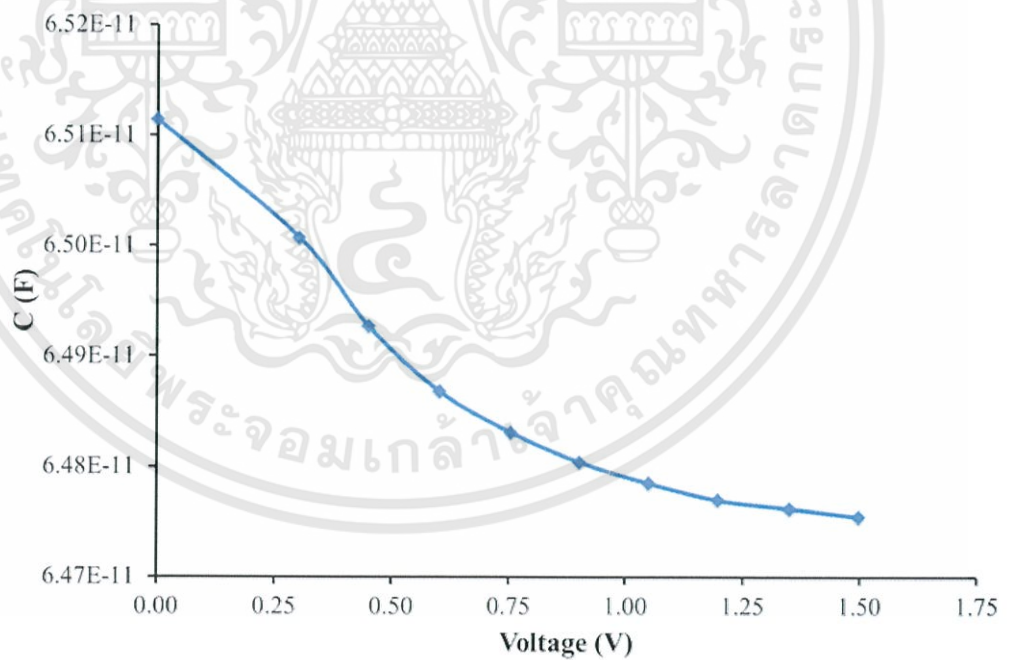
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับรากที่สองของสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	E_b (V/cm)	σ_0 (S/cm)	α	ϕ_b (eV)	I_L (mA)
0	368	1.56×10^{-7}	10.87	0.682	294.4
0.01	416	6.62×10^{-7}	11.07	0.671	332.8
0.02	336	6.49×10^{-7}	9.94	0.664	268.8
0.03	320	1.09×10^{-6}	9.93	0.658	256.0
0.04	240	2.18×10^{-6}	10.44	0.655	192.0
0.05	448	3.90×10^{-7}	11.37	0.674	358.4

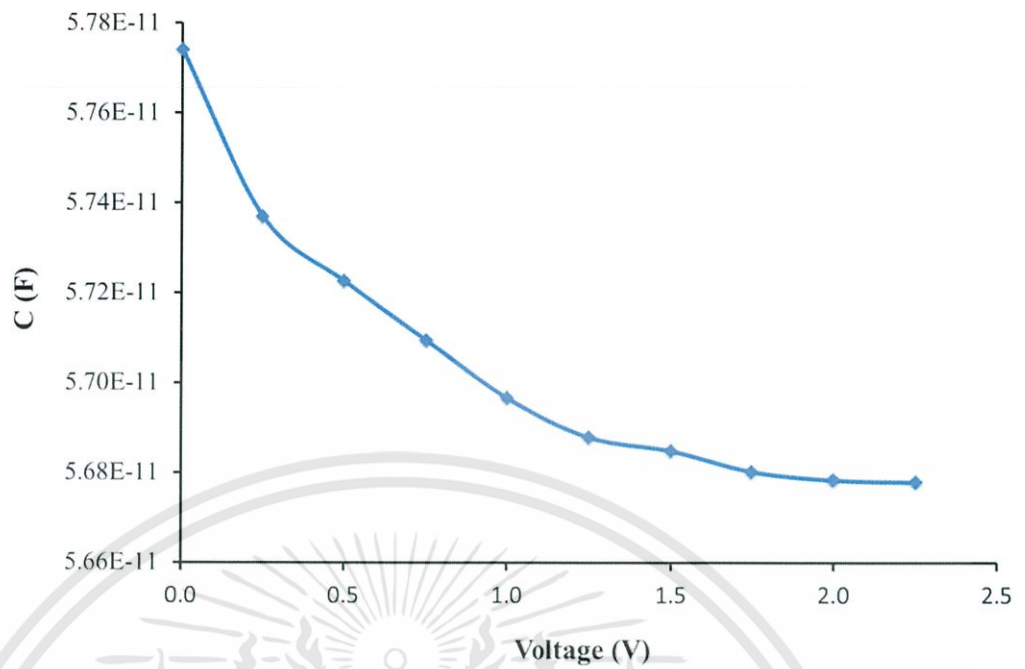


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

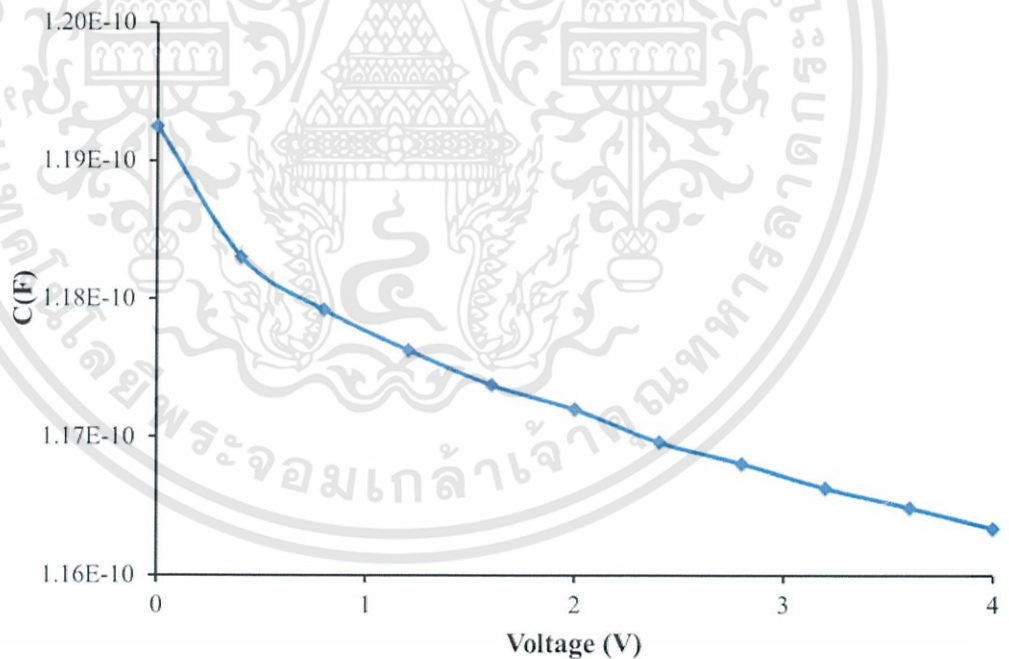


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

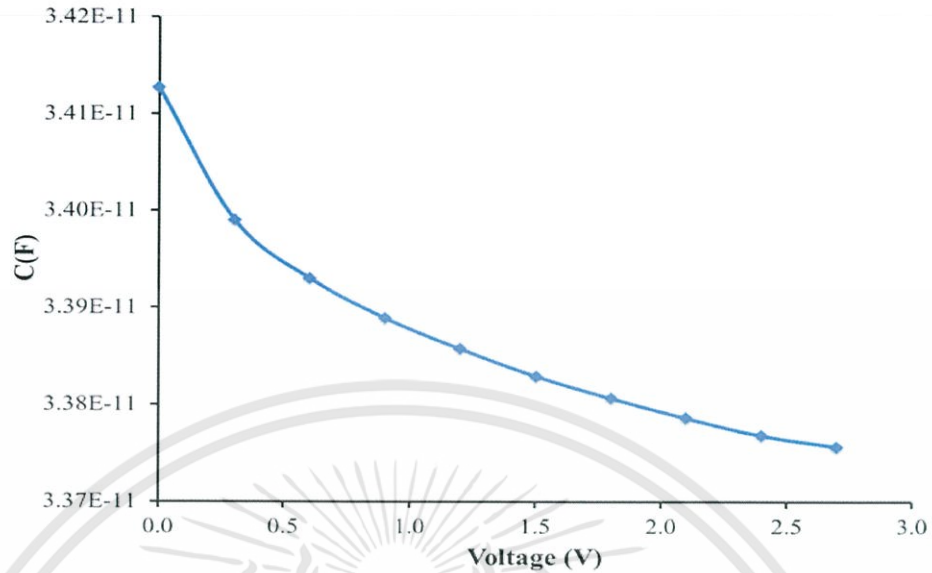
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



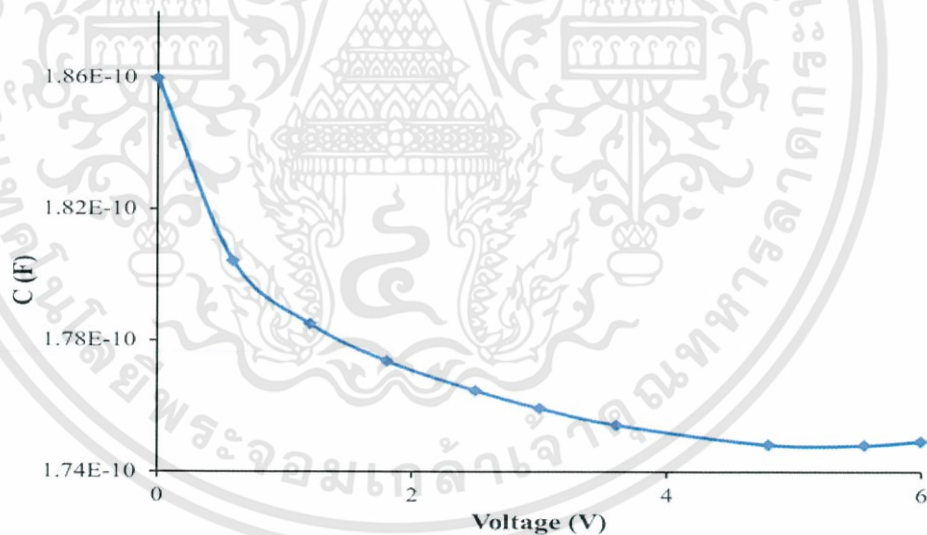
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



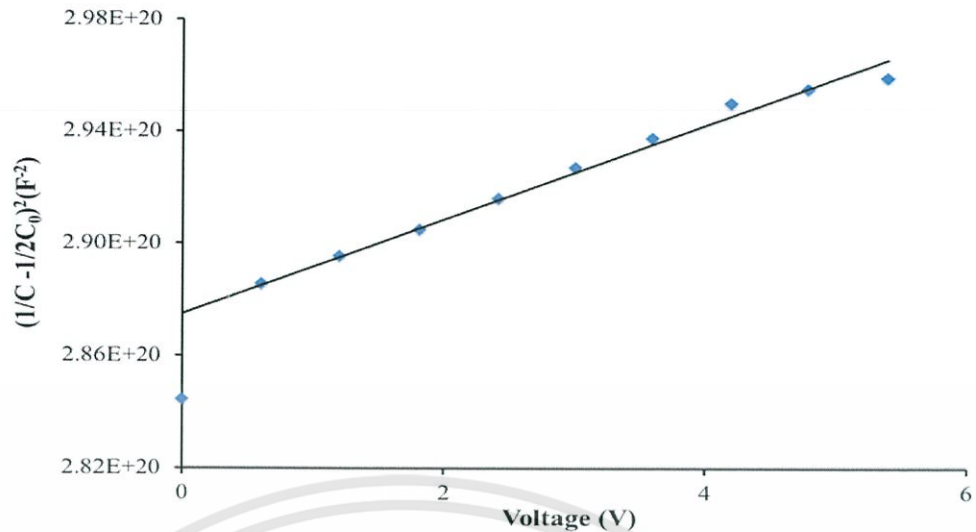
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



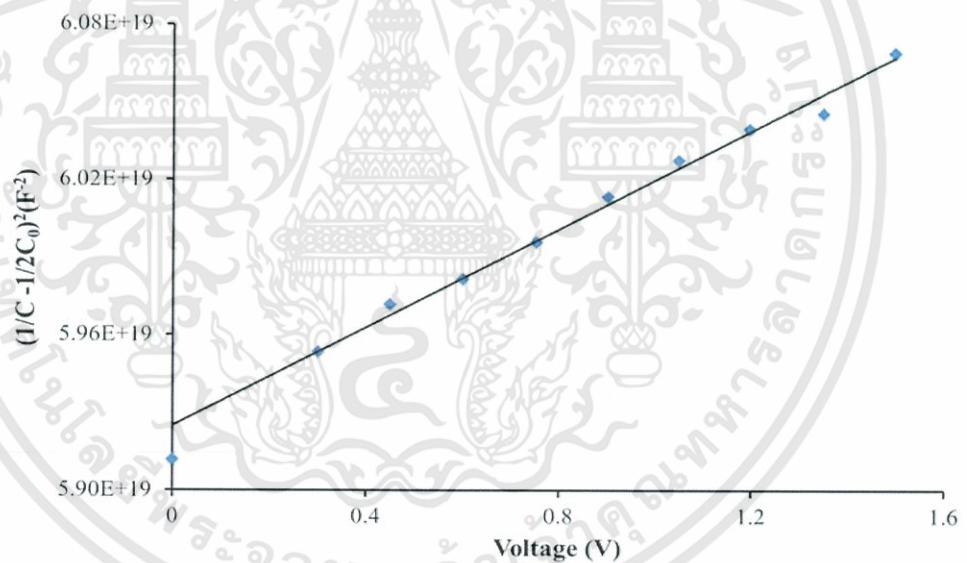
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



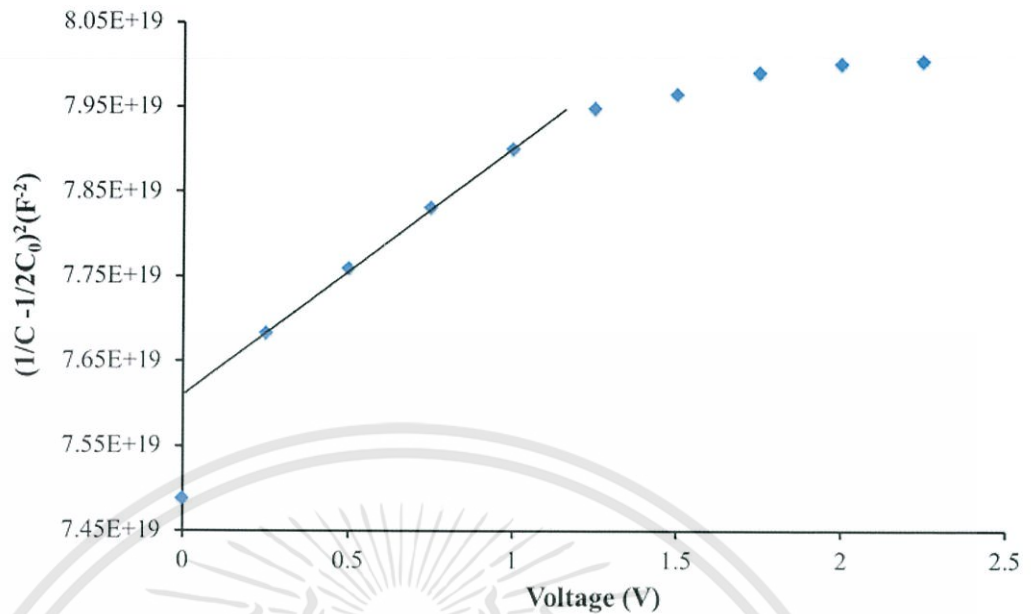
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 850 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



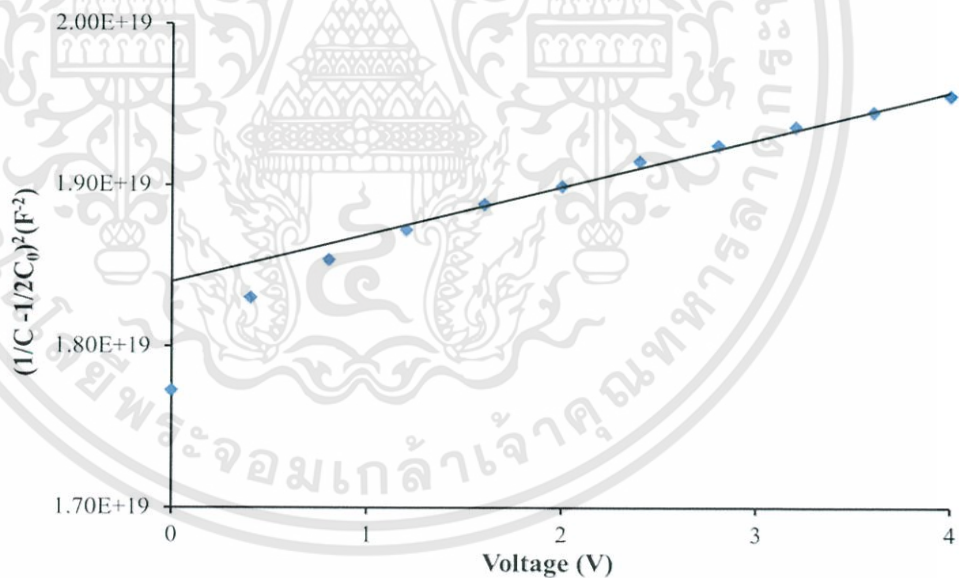
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



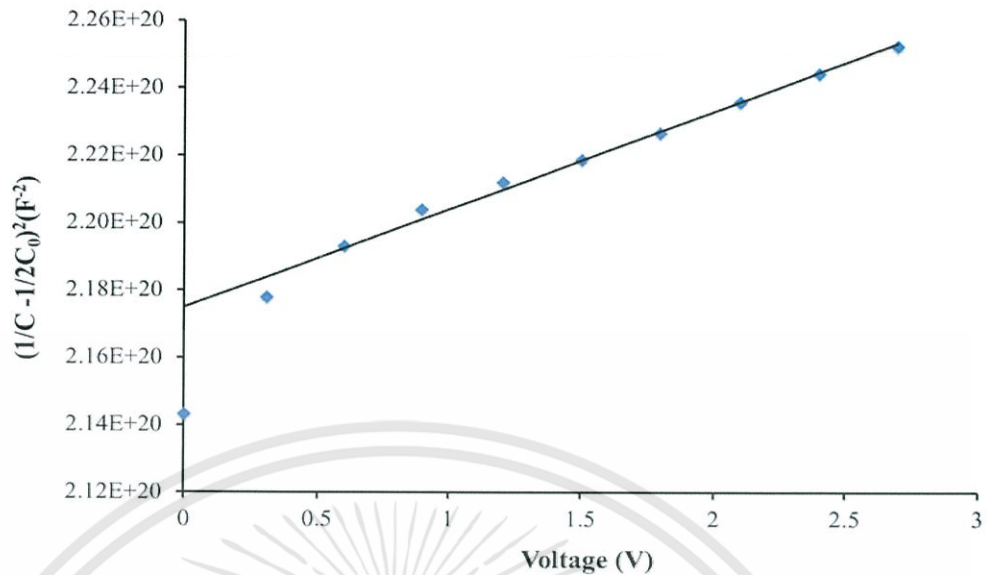
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



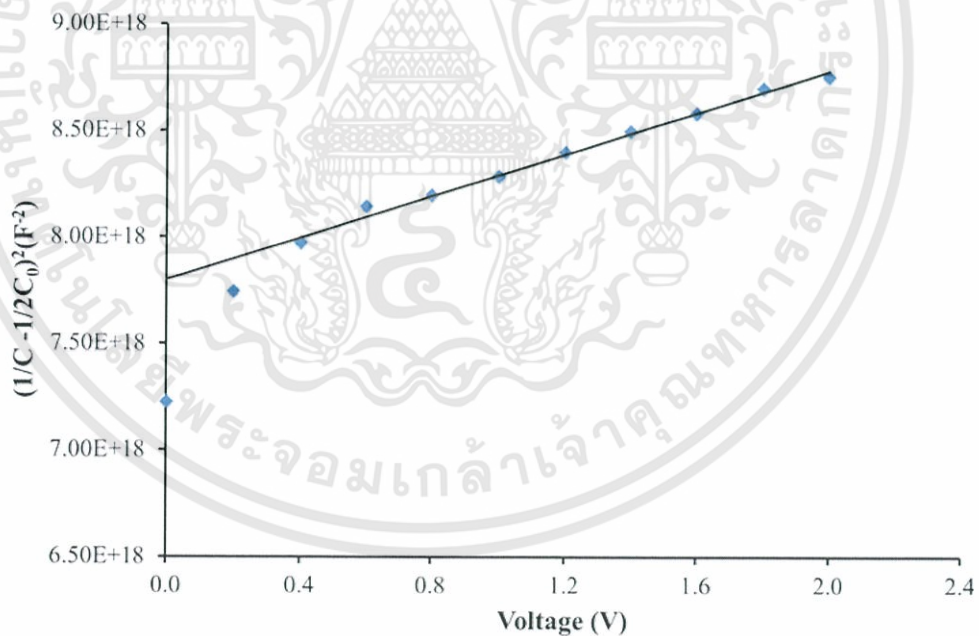
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(1/C - 1/2C_0)^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

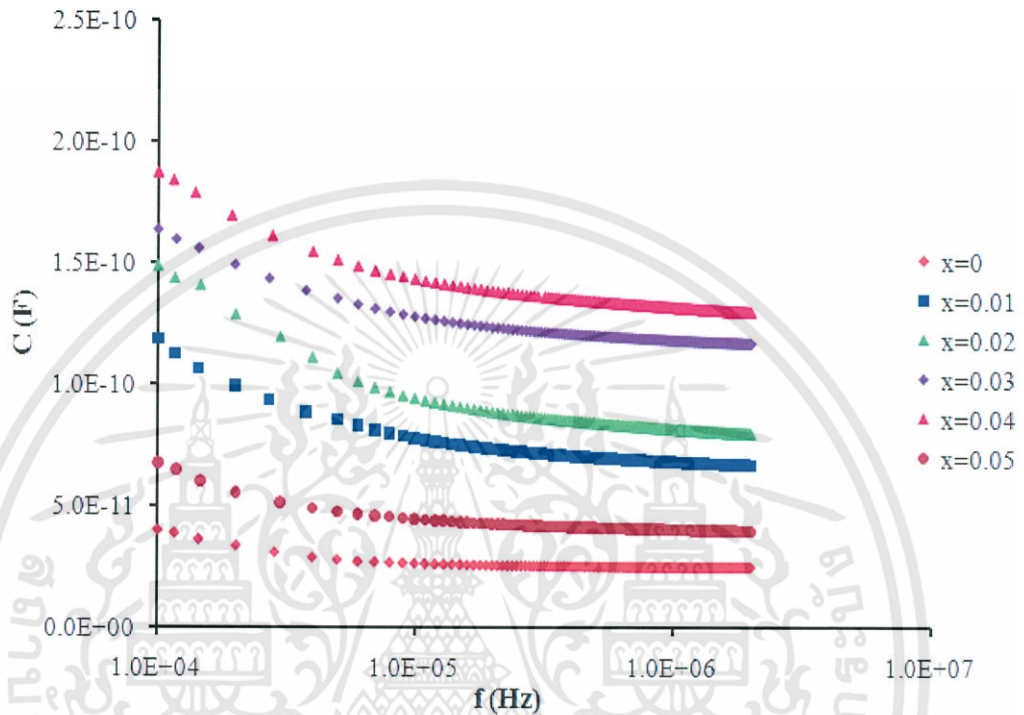
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ – แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	ϕ_b (eV)	N_d (cm^{-3})	N_t (cm^{-2})	t (μm)	d (μm)	β ($V^{1/2} cm^{1/2}$)
0	0.350	4.68×10^{14}	1.35×10^{11}	2.88	6.00	4.67×10^{-2}
0.01	0.203	8.28×10^{14}	1.35×10^{11}	1.63	8.00	4.53×10^{-2}
0.02	0.264	1.95×10^{14}	4.64×10^{10}	2.34	10.00	4.37×10^{-2}
0.03	0.270	1.73×10^{15}	2.28×10^{11}	1.32	11.00	4.01×10^{-2}
0.04	0.350	1.59×10^{14}	7.84×10^{10}	4.93	12.00	3.77×10^{-2}
0.05	0.084	8.48×10^{14}	8.66×10^{10}	1.02	14.00	4.59×10^{-2}

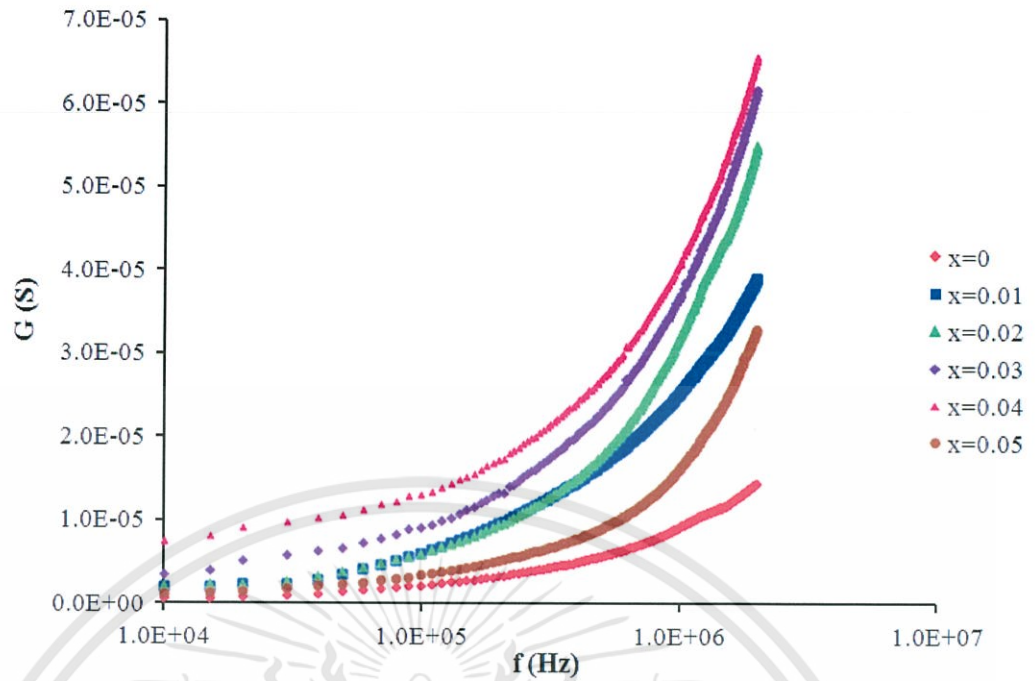


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

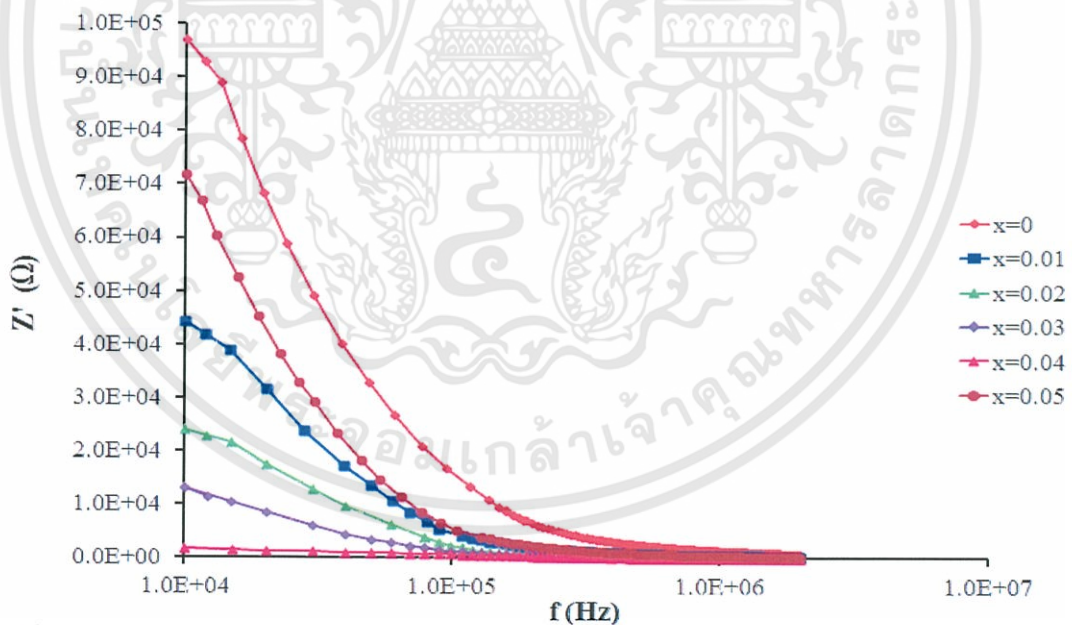
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



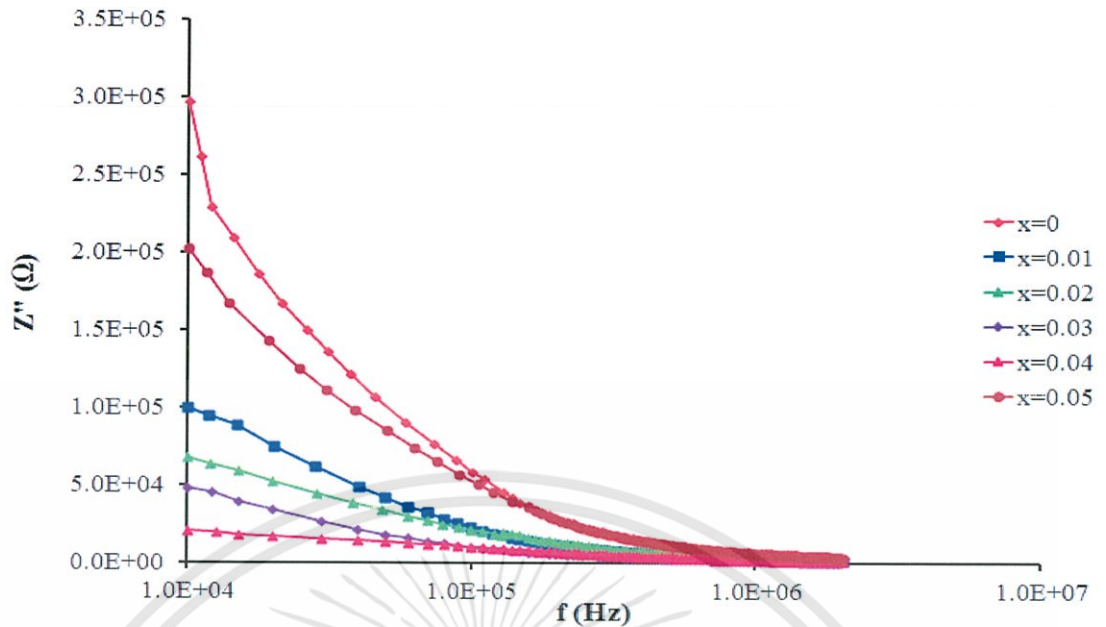
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



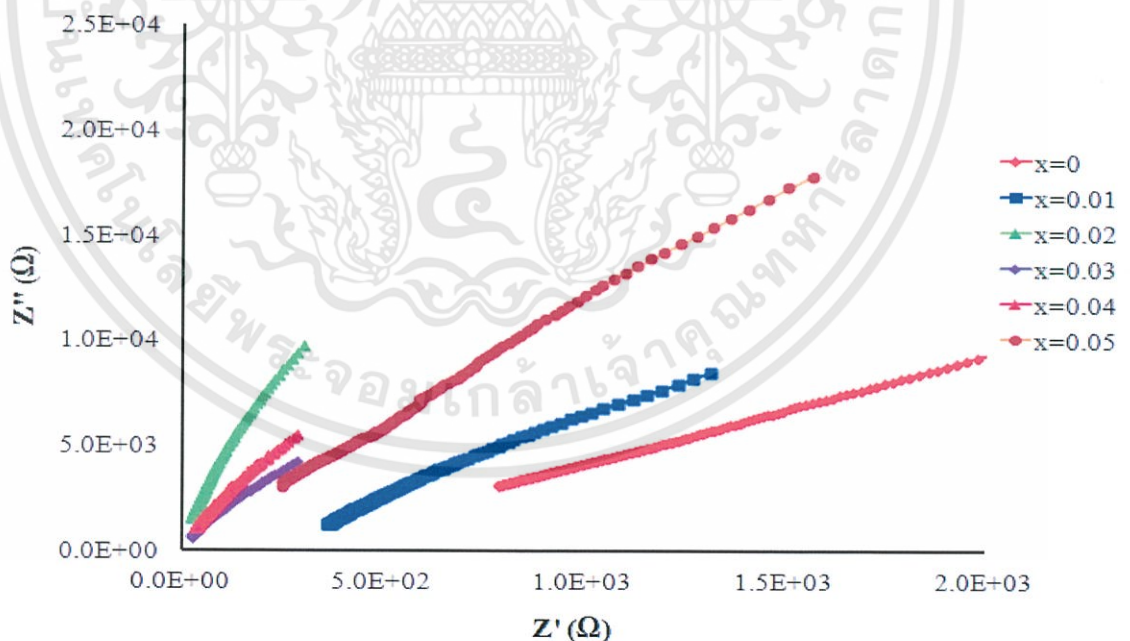
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า-ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน - ความถี่ ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



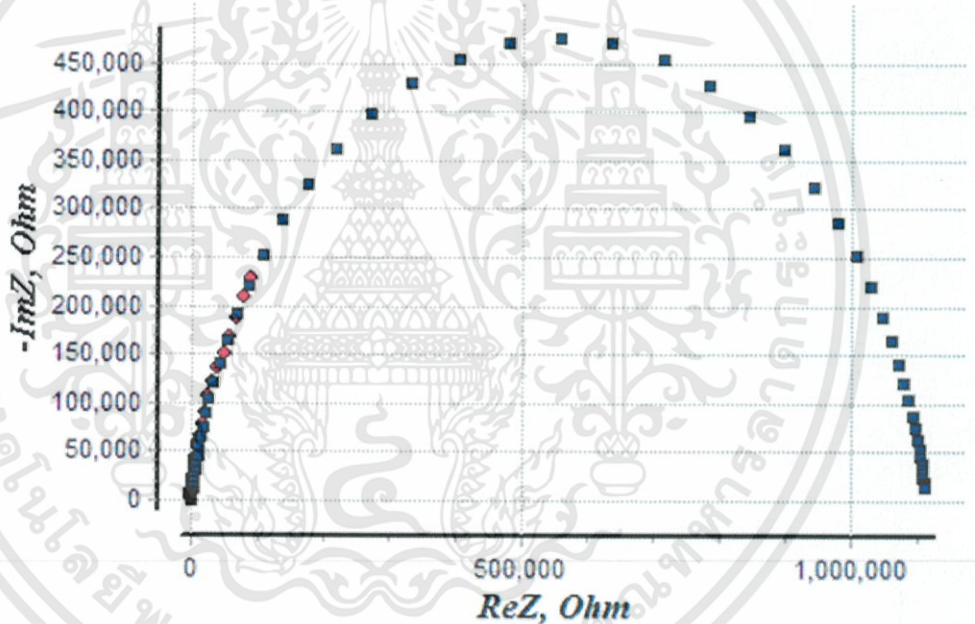
รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

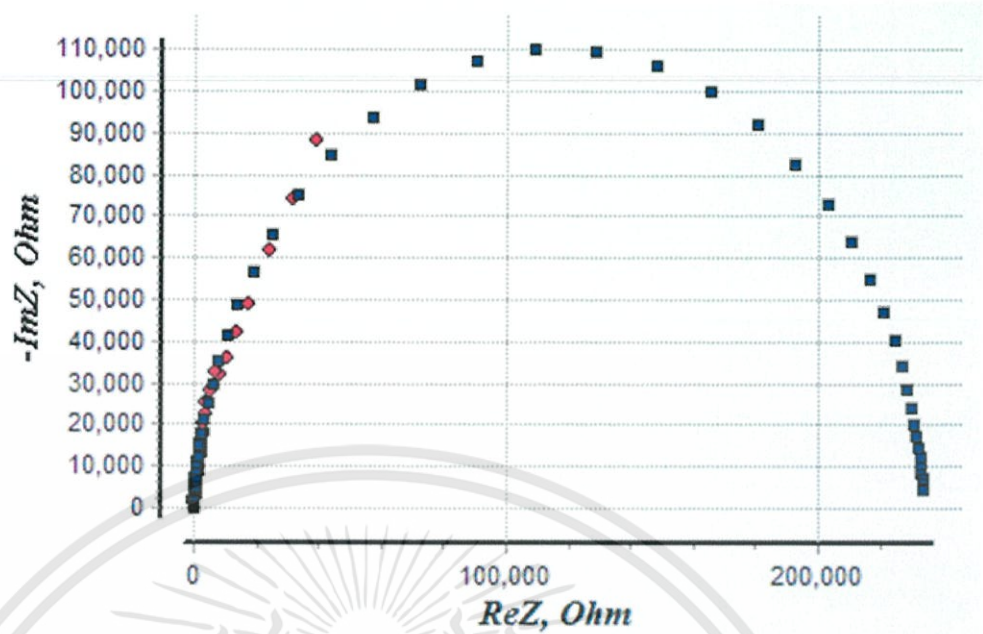
4.3.4 ผลการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



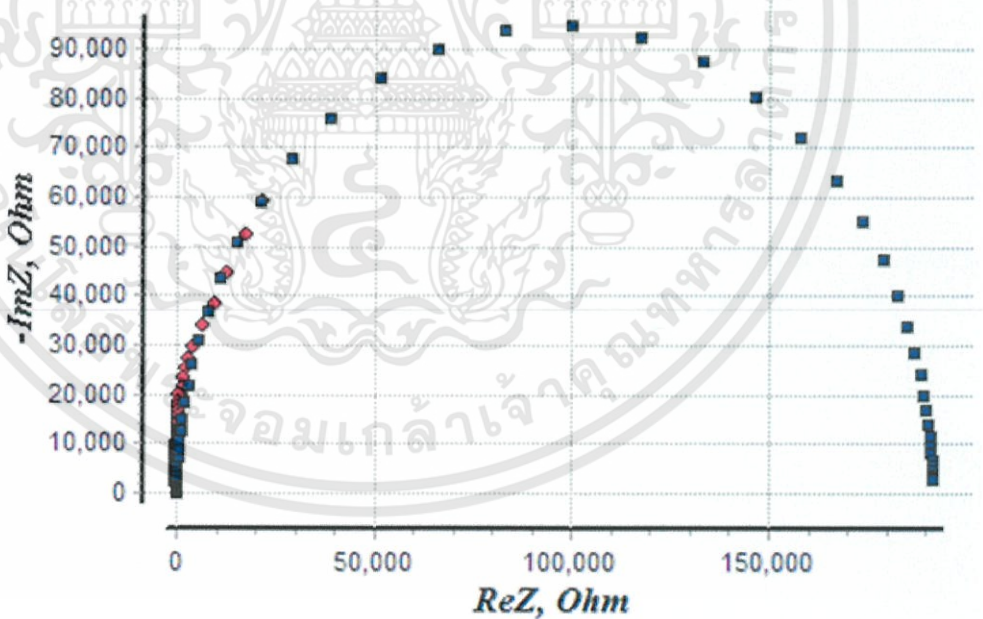
รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



รูปที่ 4.35 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

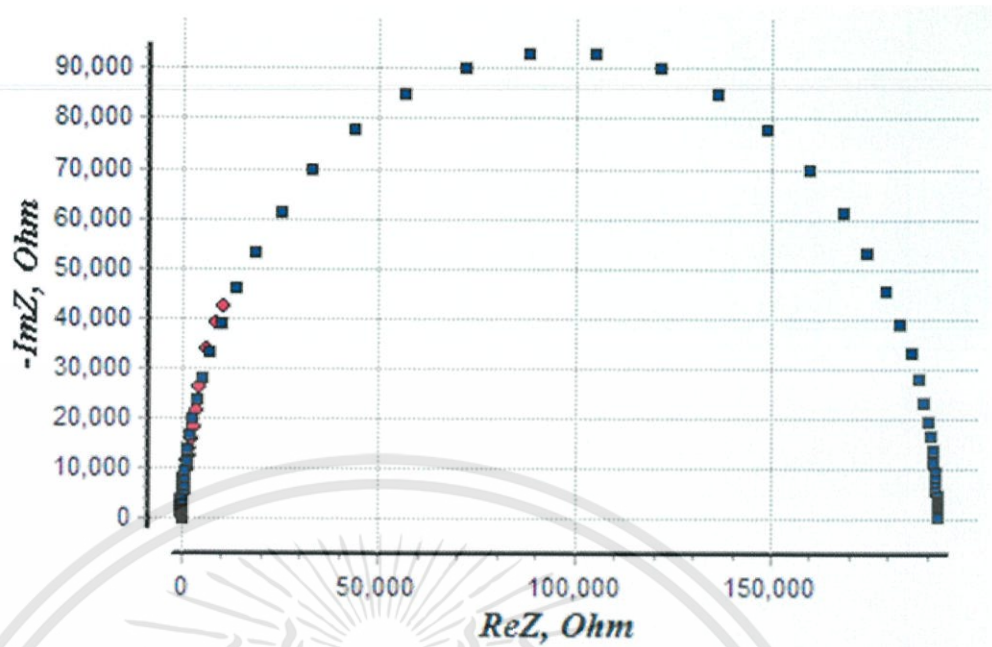


รูปที่ 4.36 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

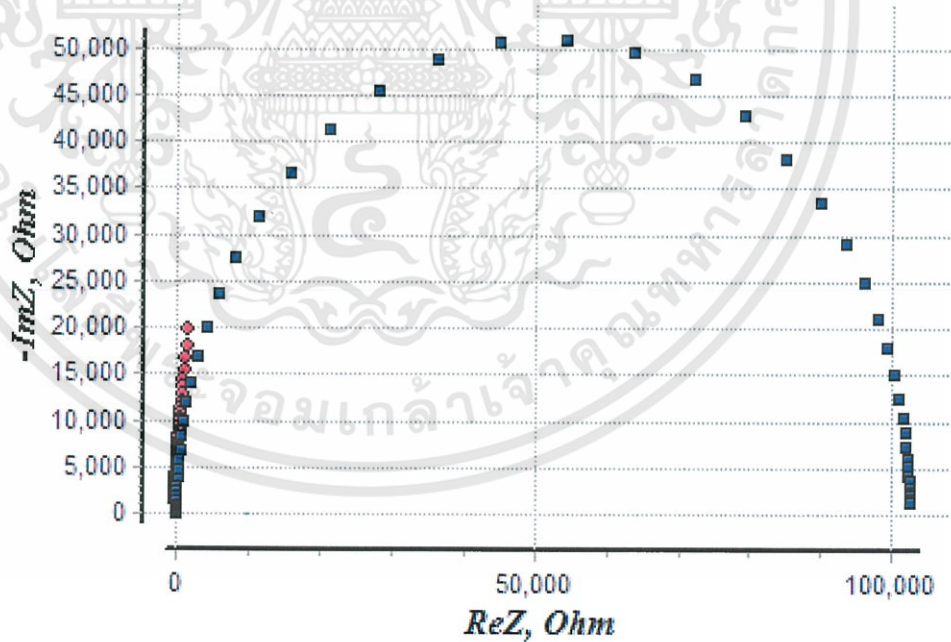


รูปที่ 4.37 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

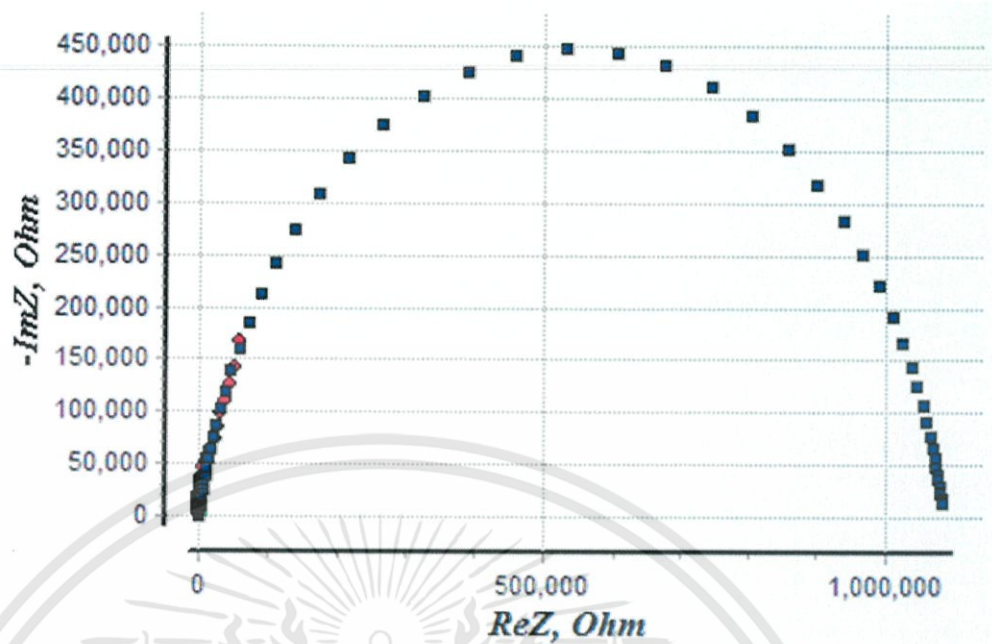


รูปที่ 4.38 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.39 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

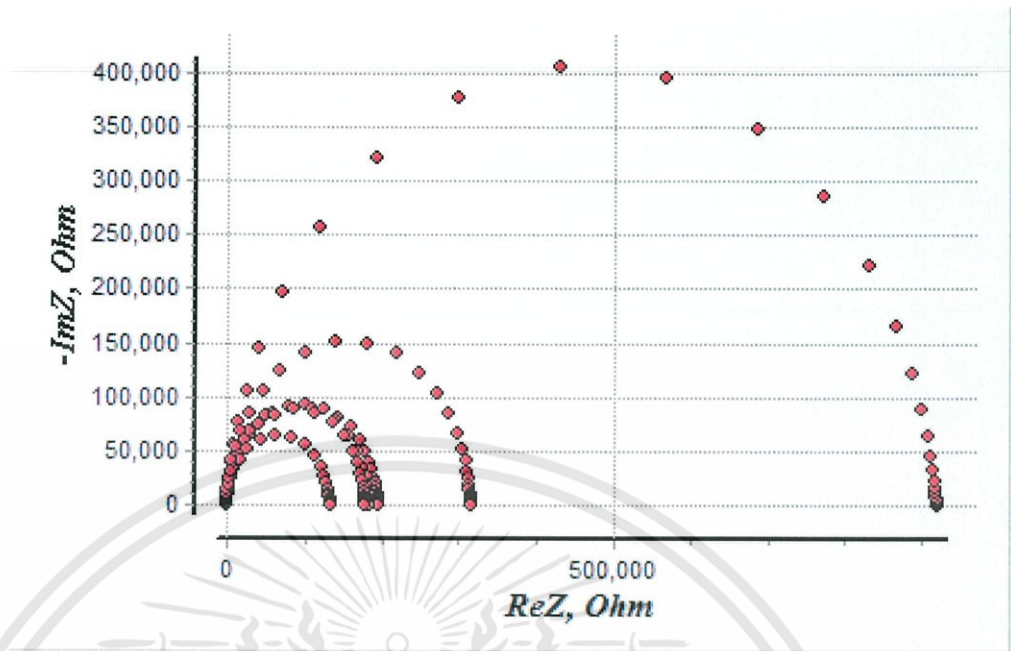
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($x = 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.5 ตารางพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of Cd_xWO_3	Parameters				
	R_s (Ω)	R_p (Ω)	C_p (pF)	f_{max} (Hz)	$\omega_{max} R_p C_p$
0	200	9.21×10^5	5.15×10^{-11}	3631	1.08
0.01	150	1.95×10^5	8.80×10^{-11}	8912	0.96
0.02	100	1.84×10^5	9.85×10^{-10}	1000	1.11
0.03	90	1.78×10^5	9.50×10^{-10}	954	1.01
0.04	70	1.32×10^5	8.74×10^{-10}	1445	1.04
0.05	50	3.16×10^5	8.73×10^{-10}	3623	0.99



รูปที่ 4.41 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมทั้งสแตบรอนซ์ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกที่ปรากฏระนาบ (002), (020), (200), (120), (112), (022), (202), (040) และ (400) ตามลำดับ เมื่อปริมาณของสารประกอบ CdO เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้หนึ่งหน่วยเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) พบว่าเมื่อสัดส่วน โมล (x) เพิ่มขึ้นแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้ามีขนาดลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ $x = 0.04$ จากนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก และจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าพบว่าสนามไฟฟ้าพังทลาย (E_p) และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วน โมล (x) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์ (ϕ_b) มีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วน โมล (x) เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมีค่าอยู่ในช่วง $1.59 \times 10^{14} - 1.73 \times 10^{15}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของกับดักประจุที่บริเวณขอบของเกรนมีค่าอยู่ในช่วง $4.64 \times 10^{10} - 2.28 \times 10^{11}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Cd_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) พบว่าในวงจรมุมไม่ปรากฏว่ามีค่าความจุไฟฟ้าของขอบเกรนปรากฏอยู่ อีกทั้งความสูงของขอบกำแพงศักย์ (ϕ_b) มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเม็ดเซรามิกเกิดจากกระแสอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงศักย์ต่ำสุด ในกรณีที่สัดส่วน โมล $x = 0.04$ จะมีค่ากำแพงศักย์และแรงดันพังทลายต่ำสุด จึงทำให้เม็ดเซรามิกที่มีสัดส่วน โมล $x = 0.04$ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดด้วย และจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้คือความจุของเนื้อสารที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดสองอันไม่มีแรงดันตกคร่อมขอบของเกรนปรากฏขึ้นมา และกลไกการนำกระแสของอิเล็กตรอน อธิบายได้ดีด้วยกลไกของชอตต์กีมากกว่ากลไกพูล-เฟรเนล

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนพบว่าผลการทดลองอาจมีค่าคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากอิเล็กโทรดที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกไม่เรียบเสมว่าเสมอส่งผลให้มีประจุค้างระหว่างเนื้อสารกับอิเล็กโทรด
2. การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้ามีข้อจำกัดเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟให้แรงดันไม่เกิน 110 โวลต์



เอกสารอ้างอิง

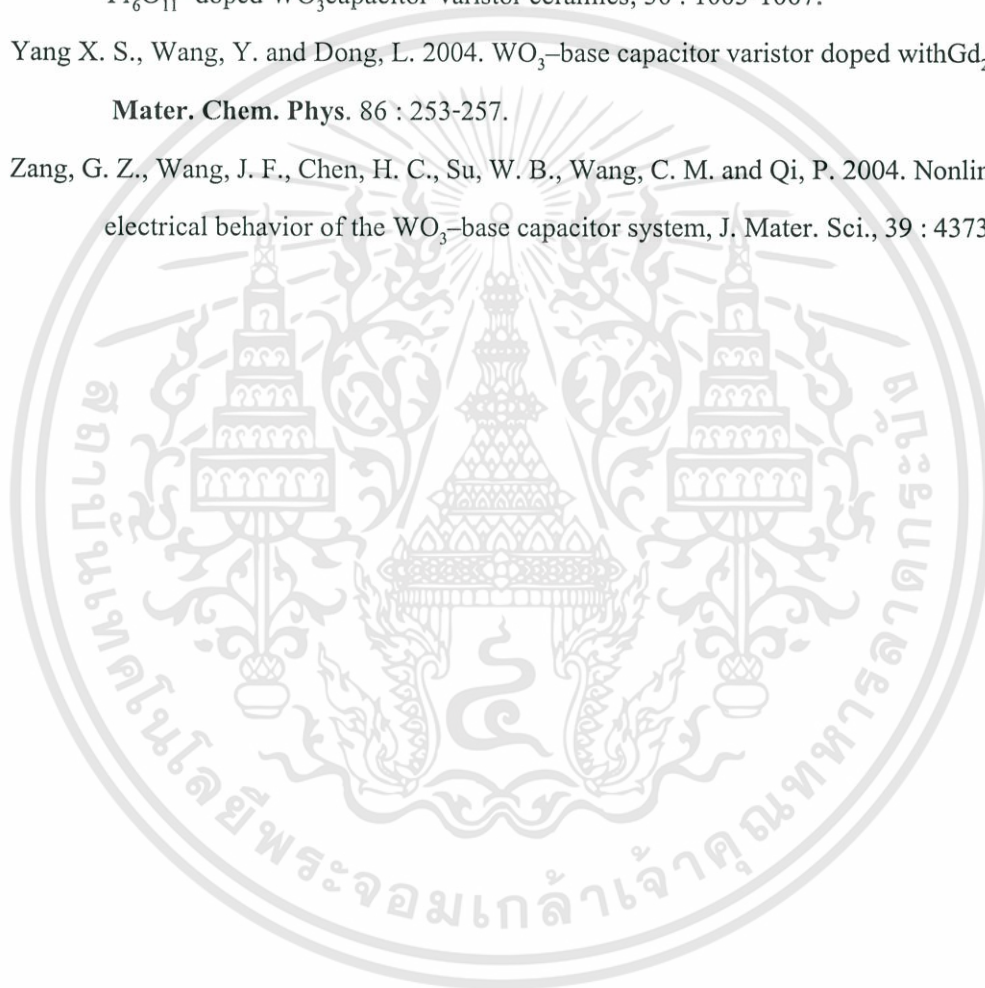
- งามนิศย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ซิลิไซด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- งามนิศย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยระเหิดใน ระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- งามนิศย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย อะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียม ไดซิลิไซด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. “การเตรียมและ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์” รายงาน วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. “การประดิษฐ์ ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่ เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อ เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้า ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ตัวไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- คูสิต เครื่องงาม, 2535. โพลีคริสตัลฟิล์ม, กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดดูเคชั่น
- คูสิต เครื่องงาม, 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิล์ม เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม1, กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วีรัชย์ ภิภา, 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประธาน ประจวบโชค, 2550. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO₂ ชนิดพี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สมเกียรติ สุขเดช, 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุกฤษฎี เกิดแสง, 2547. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อุปถัมภ์ นาครักษ์, 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวง ซึ่งเตรียมด้วยวิธีแผ่นของสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Bouchard, R. J. and Gillson, J. L., 1968. Hexagonal indium tungsten bronze, **Inorg. Chem.**, 7(5) : 969-972.
- Banejee, A. N., Maity, R., Ghosh, P. K. and Chattopadhyay, 2005. Thermoelectric properties and electrical characteristics of sputter-deposited p-CuAlO₂ thin films, **Thin Solid Films**, 474: 261-266.
- Chaminade, J. P., Garcia, A., Pouchard, M., Fouassier, C., Jacquier, B., Perret-Gallix, D. and Gonzalez-Mestres, L. 1990, Crystal growth and characterization InBO₃:Tb³⁺. **J. Cryst. Growth**, 99 : 799-801.
- Cullity, B.D., 1956. **Elements of X-Ray Diffraction**, Addison-Wesley Publishing Company
- Inc. Kittel, C., 1971. **Introduction to Solid State Physics**, 4th. Ed., New York: John, Wiley & Son

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dabney, W. S., Antolino, N. E., Luisi, B. S., Richard, A. P. and Edwards, D. D, 2002. Sol-gel deposition and characterization of $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ thin films, **Thin Solid Films**, 411 : 192-197.
- Diot, N., Larcher, O., Marchand, R., Kempf, J. Y. and Macaudiere, P., 2001. Rare earth and tungsten oxynitrides with a defect fluorite type structure as new pigments, **J. Alloys Comp.**, 323-324 : 45-48.
- Gaewdang, T., Chaminade, J. P., Garcia, A., Fouassier, M., Pouchard, M. and Hagenmuller, P., 1993. Crystal growth properties of and luminescence $\text{In}_6\text{WO}_{12}$, **Mater. Lett.** 18 : 64-68.
- Gaewdang, T., Chaminade, J. P., Garcia, A., Pouchard, M., Hagenmuller, P. and Jacquier, B. 1994. Luminescence of Ce^{3+} in the $\text{In}_x\text{Sc}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) solid solution, **J. Phys. Chem. Solids**, 55 : 501-504.
- Hearle, J. W. S, Sparrow, J. T., and Cross, P. M., 1973. **The Use of the Scanning Electron Microscope**, New York: Pergamon Press Ltd.
- Kaneki, N., Hara, H. and Shimuzu, T., 1976. Effect of atmosphere on resistivity of WO_3 ceramic, **J. Am. Ceram. Soc.**, 59 : 368-369.
- Khatho, V., Llobet, E., Vilanova, X., Brezmes, J., Hubalek, J., Malysz, K., and Correig, X., 2005. Gas sensing properties of nanoparticle indium-doped WO_3 thick films, **sens. Actuators B**, 101 : 45-51.
- Kittel, C., 2005. Introduction to solid state Physics, 8th ed.**, John Wilg & Sons Inc., New York.
- Makarov, V.O. and Trontelj, M., 1996. Sintering and electrical conductivity of doped WO_3 , **J. Eur. Ceram. Soc.**, 16 : 791-794.
- Raghavan, R. S., 1976. High mass indium detector for low energy solar neutrinos, **Phys. Res. Lett.** 37 : 259-261.
- Ramana, C.V., Utsunomiya, S., Ewing, C., Julien, C.M., and Becker, U., 2006, Structural stability and phase transitions in WO_3 thin films, **J. Phys. Chem. B**, 110 : 10430–10435.
- Richard, A. P. and Edwards, D. D., 2004. Subsidiary phase relations and crystal structures of the mixed-oxide phases in the In_2O_3 - WO_3 system, **J. Solid State Chem.**, 177 : 2740-2748.
- Runyan, W. R., 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**, 3rd .ed, New York: Mc.Graw-Hill.
- Salje, E. K. H., Rehmman, S., Pobell, F., Morris, D., Knight, K. S., Herrmannsdorfer, T. and Dove, M., 1997. Crystal structure and paramagnetic behavior of E- WO_{3-x} , **J. Phys. Condens. Matter.**, 9 : 6563-6577.

- Sze, S.M., 1981. **Physics of Semiconductor Devices**, 2nd .ed., John Wiley & Sons New York.
- Tilley, J.D., 2004. **Understanding Solids : The Science of Materials**, Chichester : John Wiley & Son.
- T. G. Wang et al. **Ceramics International** vol. 36, (2010)pp. 1063-1067.
- Van de Pauw L.J., 1958. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape, **Philips Res. Reports**, 13 : 1-9.
- Wang, T. G., Shao, G. Q., Zhang, W. J. Li, X. B. and Yu, X. H., 2010. Electrical properties of Pr_6O_{11} -doped WO_3 capacitor-varistor ceramics, 36 : 1063-1067.
- Yang X. S., Wang, Y. and Dong, L. 2004. WO_3 -base capacitor varistor doped with Gd_2O_3 , **Mater. Chem. Phys.** 86 : 253-257.
- Zang, G. Z., Wang, J. F., Chen, H. C., Su, W. B., Wang, C. M. and Qi, P. 2004. Nonlinear electrical behavior of the WO_3 -base capacitor system, **J. Mater. Sci.**, 39 : 4373-4374.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 71-131

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

W O ₃		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
		16.351	<1	0	1	1	72.747	2	4	4	1
		16.616	<1	1	0	1	73.176	1	0	0	6
		20.359	<1	1	1	1	73.281	1	5	2	2
		22.920	100	0	0	2	*73.281	1	3	1	5
		23.485	97	0	2	0	73.522	1	4	3	3
		24.229	100	2	0	0	74.411	<1	0	1	6
		25.797	1	0	1	2	74.646	3	2	4	4
		26.473	15	1	2	0	*74.646	3	3	5	1
		28.560	26	1	1	2	75.257	1	0	6	0
		29.370	<1	2	1	1	75.580	5	4	2	4
		33.048	41	0	2	2	75.717	7	1	1	6
		33.596	44	2	0	2	75.915	3	5	3	1
		33.996	44	2	2	0	76.269	4	4	4	2
		35.295	10	1	2	2	76.558	4	1	6	0
		35.683	1	2	1	2	*76.558	4	2	3	5
		36.838	<1	1	0	3	77.493	<1	2	5	3
		37.450	<1	0	3	1	78.039	2	6	0	0
		38.549	<1	3	0	1	*78.039	2	0	2	6
		41.398	25	2	2	2	78.384	1	2	0	6
		42.721	1	0	3	2	79.389	1	1	2	6
		44.030	3	3	2	0	*79.389	1	5	3	2
		44.151	2	1	2	3	79.593	1	2	1	6
		44.549	5	1	3	2	79.891	1	0	6	2
		45.400	7	3	1	2	*79.891	1	0	4	5
		46.828	10	0	0	4	80.418	2	0	5	4
		48.037	10	0	4	0	*80.418	2	2	6	0
		48.434	1	0	1	4	81.170	4	1	6	2
		49.634	17	4	0	0	*81.170	4	1	4	5
		49.712	16	1	4	0	81.694	2	4	3	4
		*49.712	16	2	3	2	*81.694	2	1	5	4
		50.099	20	1	1	4	82.629	2	6	0	2
		50.207	13	3	2	2	82.853	3	6	2	0
		51.178	<1	1	4	1	83.216	2	2	2	6
		51.379	<1	3	0	3	*83.216	2	5	4	0
		52.124	<1	1	3	3	83.514	3	5	1	4
		52.612	<1	4	1	1	83.824	2	6	1	2
		53.033	8	0	2	4	84.095	1	0	3	6
		53.408	8	2	0	4	84.354	<1	5	4	1
		*53.408	8	3	3	1	84.983	1	2	6	2
		53.864	8	0	4	2	*84.983	1	2	4	5
		54.509	9	2	4	0	85.351	3	1	3	6
		54.872	1	2	1	4	85.504	2	2	5	4
		55.340	16	4	0	2	85.593	2	0	6	3
		55.411	15	1	4	2	85.955	4	4	2	5
		55.610	16	4	2	0	*85.955	4	3	1	6
		56.770	<1	4	1	2	86.773	2	3	6	0
		*56.770	<1	2	3	3	87.077	2	4	5	2
		56.969	<1	4	2	1	*87.077	2	5	2	4
		57.226	<1	3	2	3	87.395	3	6	2	2
		57.556	2	3	3	2	87.754	2	5	4	2
		59.118	7	2	2	4	89.142	1	2	3	6
		59.893	7	2	4	2	89.380	1	1	0	7
		60.930	11	4	2	2	*89.380	1	6	1	3
		*60.930	11	0	1	5	89.970	2	4	4	4
		61.589	7	1	3	4	*89.970	2	6	3	1
		61.936	5	3	4	0					
		62.270	9	3	1	4					
		62.449	5	0	5	1					
		63.209	<1	3	4	1					
		63.300	<1	4	1	3					
		63.798	<1	4	3	1					
		63.798	<1	1	5	1					
		64.037	<1	3	3	3					
		64.549	<1	5	0	1					
		64.930	<1	0	2	5					
		65.812	2	2	3	4					
		*65.812	2	5	1	1					
		66.223	1	3	2	4					
		*66.223	1	2	4	3					
		66.951	5	3	4	2					
		67.585	1	4	3	2					
		*67.585	1	1	5	2					
		68.010	<1	2	5	1					
		68.491	1	5	2	0					
		69.338	3	0	4	4					
		69.524	3	5	1	2					
		69.702	1	5	2	1					
		70.619	5	4	0	4					
		*70.619	5	1	4	4					
		71.560	4	4	4	0					
		*71.560	4	2	5	2					
		72.039	<1	3	0	5					
		72.565	4	3	3	4					

ICSD COLLECTION CODE : 000836
REMARKS FROM ICSD : PICT
TEMPERATURE FACTOR : ITF
REMARKS FROM ICSD : PICT

*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference.
*Acta Crystallogr., Sec. B, volume 33, page 574, (1977)
Salje, E.

Radiation : CuKα1 Filter : Not specified
Lambda : 1.54060 d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 71-131		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated							
W O ₃		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
Tungsten Oxide		16.351	<1	0	1	1	72.747	2	4	4	1
		16.616	<1	1	0	1	73.176	1	0	0	6
		20.359	<1	1	1	1	73.281	1	5	2	2
		22.920	100	0	0	2	73.281	1	3	1	5
		23.485	97	0	2	0	73.522	1	4	3	3
		24.229	100	2	0	0	74.411	<1	0	1	6
		25.797	1	0	1	2	74.646	3	2	4	4
		26.473	15	1	2	0	74.646	3	3	5	1
Lattice : Orthorhombic		28.560	26	1	1	2	75.257	1	0	6	0
Mol. weight = 231.85		29.370	<1	2	1	1	75.580	5	4	2	4
S.G. : Pmnb (62)		33.048	41	0	2	2	75.717	7	1	1	6
Volume [CD] = 430.90		33.596	44	2	0	2	75.915	3	5	3	1
a = 7.34100		33.996	44	2	2	0	76.269	4	4	4	2
Dx = 7.148		35.295	10	1	2	2	76.558	4	1	6	0
b = 7.57000		35.683	1	2	1	2	76.558	4	2	3	5
c = 7.75400		36.838	<1	1	0	3	77.493	<1	2	5	3
a/b = 0.96975		37.450	<1	0	3	1	78.039	2	6	0	0
Z = 8		38.549	<1	3	0	1	78.039	2	0	2	6
l/lcor = 5.79		41.398	25	2	2	2	78.384	1	2	0	6
		42.721	1	0	3	2	79.389	1	1	2	6
		44.030	3	3	2	0	79.389	1	5	3	2
		44.151	2	1	2	3	79.593	1	2	1	6
		44.549	5	1	3	2	79.891	1	0	6	2
		45.400	7	3	1	2	79.891	1	0	4	5
ICSD COLLECTION CODE : 000836		46.828	10	0	0	4	80.418	2	0	5	4
REMARKS FROM ICSD : PICT		48.037	10	0	4	0	80.418	2	2	6	0
TEMPERATURE FACTOR : ITF		48.434	1	0	1	4	81.170	4	1	6	2
REMARKS FROM ICSD : PICT		49.634	17	4	0	0	81.170	4	1	4	5
		49.712	16	1	4	0	81.694	2	4	3	4
		49.712	16	2	3	2	81.694	2	1	5	4
		50.099	20	1	1	4	82.629	2	6	0	2
		50.207	13	3	2	2	82.853	3	6	2	0
		51.178	<1	1	4	1	83.216	2	2	2	6
		51.379	<1	3	0	3	83.216	2	5	4	0
		52.124	<1	1	3	3	83.514	3	5	1	4
		52.612	<1	4	1	1	83.824	2	6	1	2
		53.033	8	0	2	4	84.085	1	0	3	6
		53.408	8	2	0	4	84.354	<1	5	4	1
		53.408	8	3	3	1	84.983	1	2	6	2
		53.864	8	0	4	2	84.983	1	2	4	5
		54.509	9	2	4	0	85.351	3	1	3	6
		54.872	1	2	1	4	85.504	2	2	5	4
		55.340	15	4	0	2	85.593	2	0	6	3
		55.411	15	1	4	2	85.955	4	4	2	5
		55.610	16	4	2	0	85.955	4	3	1	6
		56.770	<1	4	1	2	86.773	2	3	6	0
		56.770	<1	2	3	3	87.077	2	4	5	2
		56.969	<1	4	2	1	87.077	2	5	2	4
		57.226	<1	3	2	3	87.395	3	6	2	2
		57.556	2	3	3	2	87.754	2	5	4	2
		59.118	7	2	2	4	89.142	1	2	3	6
		59.893	7	2	4	2	89.380	1	1	0	7
		60.930	11	4	2	2	89.380	1	6	1	3
		60.930	11	0	1	5	89.970	2	4	4	4
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :		61.589	7	1	3	4	89.970	2	6	3	1
		61.936	5	3	4	0					
*Acta Crystallogr., Sec. B, volume 33, page 574, (1977) ;		62.270	9	3	1	4					
Salje, E.		62.449	5	0	5	1					
		63.209	<1	3	4	1					
		63.300	<1	4	1	3					
		63.798	<1	4	3	1					
		63.798	<1	1	5	1					
		64.037	<1	3	3	3					
		64.549	<1	5	0	1					
		64.930	<1	0	2	5					
		65.812	2	2	3	4					
		65.812	2	5	1	1					
		66.223	1	3	2	4					
Radiation : CuKα1		66.223	1	2	4	3					
Filter : Not specified		66.951	5	3	4	2					
Lambda : 1.54060		67.585	1	4	3	2					
d-sp : Calculated spacings		67.585	1	1	5	2					
		68.010	<1	2	5	1					
		68.491	1	5	2	0					
		69.338	3	0	4	4					
		69.524	3	5	1	2					
		69.702	1	5	2	1					
		70.619	5	4	0	4					
		70.619	5	1	4	4					
		71.560	4	4	4	0					
		71.560	4	2	5	2					
		72.039	<1	3	0	5					
		72.565	4	3	3	4					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวปัทมาณัฐ โยชะชัย
เกิดเมื่อ	วันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2533
ภูมิลำเนา	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2551 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียน โนนสะอาดพิทยาสรรค์ ปี พ.ศ. 2552 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพัชรียา แฉวงค์
เกิดเมื่อ	วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2533
ภูมิลำเนา	จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2551 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียน ศรีราชา ปี พ.ศ. 2552 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวมณฑิรา คงเอียง
เกิดเมื่อ	วันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2533
ภูมิลำเนา	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2551 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคใต้ ปี พ.ศ. 2552 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-โซลิตสเททอเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้