

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบ  $CuAlO_2$  โดยวิธีพิมพ์สกรีน**



นางสาวจีระนัย เวียงแก  
นางสาวณัฐพร เต็นประชา  
นางสาวธีรียา มงคลกวิน

รพ.  
๑๕๖๓๗  
๒๕๕๐

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **81609**  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ย. 2551

b. 11๙33๔๘3  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2550  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Fabrication of $\text{CuAlO}_2$ Thick Films by Screen Printing Method**



Miss.Chiranai Wiangkae

Miss.Nattaporn Denpracha

Miss.Teereeya Mongkonkawin

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน Academic Year 2007 ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบ $\text{CuAlO}_2$ โดยวิธีพิมพ์ สกรีน
นักศึกษา	นางสาวจิระนัย เวียงแก นางสาวณัฐพร เค้นประชา นางสาวธีรียา มงคลกวิน
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ณัฐพร พรหมรส

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
กรรมการ ผศ.ดร. ชัยสิงห์ กุร์กษเกียรติ	
กรรมการที่ปรึกษา อ.ณัฐพร พรหมรส	

.....  
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)  
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>โครงการพิเศษเรื่อง</b>	การเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ โดยวิธีพิมพ์สกรีน
<b>นักศึกษา</b>	นางสาวจิระนัย เวียงแก นางสาวณัฐพร เค่นประชา นางสาวธีรียา มงคลกวิน
<b>ภาควิชา</b>	ฟิสิกส์ประยุกต์ <b>คณะวิทยาศาสตร์</b>
<b>สาขาวิชา</b>	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
<b>ปีการศึกษา</b>	2550
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	อ.ณัฐพร พรหมรส

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่มีความบริสุทธิ์ โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นให้ละเอียดและคลุกเคล้าให้เข้ากันดี จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปโดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องไฮโดรลิกความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง ผลึกที่อัดเป็นเม็ดแล้วจะนำไปเผาในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนฟิล์มหนาของ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ได้จากการเคลือบสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงของ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ลงบนกระจกสไลด์ โดยวิธีพิมพ์สกรีน โดยที่ผลึกจะละลายในเอทิลีนไกลคอล แล้วจากนั้นจึงพิมพ์สกรีนลงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง การแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะช่วยทำให้เนื้อฟิล์มแน่นขึ้น และนำมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผลึกพหุพันธ์และฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ส่วนภาพถ่ายของผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างทั้งสองแบบได้จากการบันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกพหุพันธ์  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  และความต้านทานแผ่น  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ของฟิล์มหนานี้ค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ จากค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้สามารถระบุได้ว่าชนิดการนำไฟฟ้าแบบที่ของผลึกพหุพันธ์และฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  มีสาเหตุมาจาก แวแคนซีของอะตอมโลหะและอะตอมออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในโครงผลึก รวมทั้งได้มีการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า-ความร้อนด้วยโดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิต่างๆด้วย

<b>Special Project Title</b>	Fabrication of $\text{CuAlO}_2$ Thick Films by Screen Printing Method
<b>Name</b>	Miss.Chiranai Wiangkae Miss.Nattaporn Denpracha Miss.Teereeya Mongkonkawin
<b>Department</b>	Applied Physics <b>Faculty of Science</b>
<b>Program</b>	Applied Physics-Science and Industry Instrumentation
<b>Academic Year</b>	2007
<b>Special Project Advisor</b>	Mr. Nathaporn Promros

### ABSTRACT

In this special project, polycrystalline of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) were prepared by a solid state reaction method. The mixture of high purity of  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  powder was ground and then pressed by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at  $1100^\circ\text{C}$  for 24 h. Thick films of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) were deposited on slide glass substrates by screen printing method and using  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  phase in powder form as a precursor. The powders were dispersed in ethylene glycol and immediately depositing the screen on the glass substrate. In order to obtain the higher dense material, the as-deposited thick films were annealed in air at  $500^\circ\text{C}$  for 30 min. The crystal structures of polycrystalline and thick films of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  were checked by X-ray diffraction method. Surface morphology of the samples was observed by scanning electron microscope (SEM). Electrical resistivity and sheet resistance were performed on the polycrystalline and thick films of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  respectively. The activation energy values of the samples were estimated by the resistivity measurements as a function of temperature. From the activation energy values, the origin p-type conduction in polycrystalline and thick films of  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  was attributed to metal deficit and excess oxygen atoms within the crystallite sites of the material. The variation of Seebeck coefficient as a function of temperature was also investigated.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ อาจารย์ ฌัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝัง สิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจวบใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสทิเบิล แบบ ดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He $\lambda$  ios  $\alpha$  ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่น อัลตราไวโอเล็ต ไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu $\kappa_1$  1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิสทิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่าน อัลตราไวโอเล็ตและย่านตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจุฑามาศ วัฒนานุรักษ์ คุณประธาน ประจวบโชค และ คุณฌัฐวัฒน์ ทุมเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้  
อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่  
การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุน  
ในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



นางสาวจิระนัย เวียงแก

นางสาวณัฐพร เด่นประชา

นางสาวธีรียา มงคลกวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการทดลอง	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โครงสร้างผลึกแบบเตตราฟอสไฟท์	5
2.2 ขอบกพร่องผลึก	7
2.2.1 ขอบกพร่องผลึกแบบจุด	7
2.2.2 ขอบกพร่องผลึกเชิงเส้น	8
2.2.3 ขอบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	9
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึก	10
2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	10
2.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	14
2.4.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิคแวนเดอร์เพาว์	14
2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	17
2.5 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน	19
2.5.1 ปรากฏการณ์ซีเบก	19
2.5.2 ปรากฏการณ์เพลตียร์	23
2.5.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน	24
2.6 แผนภาพเฟสของระบบ $Cu_2O-CuO-Al_2O_3$	25
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	28
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )	28
3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )	29
3.1.3 วิธีการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )	31
3.2 การเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์	31
3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มหนา ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	31
3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีพิมพ์สกรีน	32
3.3 การศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ทั้งในรูปแบบที่เป็น เซรามิกส์ และฟิล์มหนา	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	33
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	33
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	33
3.3.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
3.3.5 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	35
3.3.6 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก	35
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย</b>	
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	36
4.1.1 สารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ในรูปของเซรามิกส์	36
4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )	37
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	40
4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	41
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกส์ ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_x\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดย วิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึก	42
4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า	
4.2.1	ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	43
4.2.2	การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	44
4.2.3	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีน ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	47
4.2.4	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของฟิล์มหนาของ สารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	49
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการทดลองของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	52
5.2	สรุปผลการทดลองของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีน ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	55
ปัญหาและข้อเสนอแนะ		57
เอกสารอ้างอิง		58
ภาคผนวก		62
ประวัติผู้เขียน		68

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )	31
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	39
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสภาพความต้านทาน ไฟฟ้าและค่าพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารประกอบ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	41
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของ โครงผลึกของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียม โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	45
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านแผ่นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียม โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	47
ตารางที่ 4.5 แสดงพลังงานกระตุ้นและค่าความต้านทานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียม โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	48
ตารางที่ 4.6 แสดงผลต่างระหว่างระดับพลังงานผู้รับและระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียม โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	50

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเคลลาฟอสไซท์	
ก. โครงสร้างชนิดคอมโบฮีทรีล 3R	
ข. โครงสร้างชนิดเฮกซะโกนอล 2H	6
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิคาร์ซีมีไอออนของโครงสร้างเคลลาฟอสไซท์ ของสารประกอบชนิดต่างๆ	6
รูปที่ 2.3 แสดงข้อบกพร่องผลึก	8
รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	8
รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน	
ก. ดิสโลเคชันแบบขอบ	
ข. ดิสโลเคชันแบบสกรู	9
รูปที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน	9
รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร์กก์	11
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	11
รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์	12
รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่าง	15
รูปที่ 2.12 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.13 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	16
รูปที่ 2.14 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	17
รูปที่ 2.15 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการ วัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	18

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.16	ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน	
	ก. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน	
	ข. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
	ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยังไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิ	
	ง. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน	20
รูปที่ 2.17	แสดงปรากฏการณ์เปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
	ก. หลักการวัดปรากฏการณ์เปลติเยร์	
	ข. วงจรเปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
	ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแส	23
รูปที่ 2.18	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบก สภาพนำไฟฟ้า และ ปริมาณพาหะ	25
รูปที่ 2.19	แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย $\text{Po}_2$ เท่ากับ 0.21 atm	
	ก. ได้จากผลงานของ Gadalla และ White	
	ข. ได้จากผลงานของ Jacob และ Alcock	27
รูปที่ 2.20	แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย $\text{Po}_2$ เท่ากับ 0.4 atm	
	ก. ได้จากผลงานของ Gadalla และ White	
	ข. ได้จากผลงานของ Jacob และ Alcock	27
รูปที่ 3.1	แสดงเตาอบอุณหภูมิสูง 1050 °C และ 200 °C ตามลำดับ	32
รูปที่ 3.2	แสดงภาพถ่ายเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของ Burker รุ่น D8 Advance	33
รูปที่ 3.3	แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios α	34
รูปที่ 3.4	แสดงเครื่องมือวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
รูปที่ 4.1	แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสาร $\text{CuO}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่บดรวมกันแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดผลึก	36

รูปที่ 4.2	แสดงเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	37
รูปที่ 4.3	แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	37
รูปที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	38
รูปที่ 4.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณสัดส่วนผสมทางเคมี Mg (x) ค่าต่างๆของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	39
รูปที่ 4.6	แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	40
รูปที่ 4.7	แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	41
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	42
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	43
รูปที่ 4.10	แสดงภาพฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	44

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	44
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	45
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg (x) ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	46
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความต้านทานแผ่นเมื่อเทียบกับสัดส่วนของอะตอม Mg (x) ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	47
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	48
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	49
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	49
รูปที่ 4.18 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มหนา $\text{CuAlO}_2$	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์กำลังเทียบกับอุณหภูมิ  
ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ )  
ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

สารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างแบบเคลาฟอสไซท์ที่มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานแบบเฉียงและแบบตรง 1.8 และ 3.5 eV ตามลำดับ (Ingram; et. al. 2005) โดยมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ 3R (รวมโบฮีตริล) ที่มีค่าสเปซกรุป  $R\bar{3}m$  และ 2H (เฮกซะโกนอล) ที่มีค่าสเปซกรุป  $P6_3/mmc$  ลักษณะโครงสร้างของผลึก 2 ประเภทจะมีส่วนที่แตกต่างกัน โดยการจัดเรียงของระนาบอะตอมที่ชั้นออกไซด์  $\text{AlO}_2$  ที่ไม่เหมือนกัน ในโครงสร้างผลึก 3R จะมีการจัดเรียงกันในลักษณะ  $AaBbCcAaBbCc$  ส่วนในโครงสร้างผลึก 2H จะมีการจัดเรียงแบบ  $AaBbAaBb$  (Park; Ko and Seo 2005) ลักษณะพันธะโควาเลนต์ของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  มาจาก p-d ไฮบริไดเซชันของออร์บิทัล  $\text{Cu-3d}$  กับ  $\text{O-2p}_z$  ของคัมเบล  $\text{O-Cu-O}$  (Ingram; Poeppelmeir and Mason 2005; Koyanagi; et. al. 2003) ลักษณะของพันธะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 บอนดิง (bonding)  $3d(3z^2-r^2)$ ,  $3d(yz)$ ,  $3d(zx)$  ประเภทที่ 2 นอน-บอนดิง (non-bonding)  $3d(x^2-y^2)$ ,  $3d(xy)$  และประเภทที่ 3 แอนติ-บอนดิง (anti-bonding)  $3d(3z^2-r^2)$ ,  $3d(yz)$ ,  $3d(zx)$  (Koyanagi; et al. 2003) เป็นผลให้ค่าของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าอยู่ในระดับ 4 eV ช่องว่างแถบพลังงานในชั้นออกไซด์  $\text{AlO}_2$  มีค่าอยู่ในระดับ 6 eV ฉะนั้น สถานะพลังงานของคัมเบล  $\text{O-Cu-O}$  จะแทรกอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของชั้นออกไซด์  $\text{AlO}_2$  (Koyanagi; et. al. 2003)

Katayama - Yoshida เสนอว่าสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  สามารถนำไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงจึงเป็นที่ได้รับความสนใจที่จะเตรียมสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  ในลักษณะที่เป็นฟิล์มหนาในระดับ 2-3 ไมโครเมตร และในลักษณะที่เป็นเซรามิกส์ เพื่อนำไปสร้างเป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิธพันธุ์ n-CdS/p- $\text{CuAlO}_2$  โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิธพันธุ์ n-CdS/p- $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  และ n-CdS/p- $\text{CdTe}$  กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งได้พบว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่า 15 % และ 17.8 % ตามลำดับ (Ran and Shock, 1999; Paulson and Dutta, 2000) โดย  $\text{CuGaSe}_2$ ,  $\text{CuInSe}_2$  และ  $\text{CdTe}$  เป็นสารประกอบที่ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สูง ถ้าสามารถเปลี่ยนมาใช้  $\text{CuAlO}_2$  ก็จะลดต้นทุนในการผลิตให้ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีพิมพ์สกรีน (screen printing method) เป็นวิธีที่สามารถเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  และเป็นที่น่าสนใจในการเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบออกไซด์ประเภทอื่นๆที่ให้คุณภาพของฟิล์มที่ดี ยึดติดกับแผ่นรองรับได้เป็นอย่างดี มีขนาดของเกรนโคไม่มียอดแตกปรากฏให้เห็นในเนื้อฟิล์ม มีสมบัติการส่งผ่านแสงและการนำไฟฟ้าที่ดี (Kubota and Sakabe, 2002; Williams and Shields, 2002) ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นแรงจูงใจให้ในโครงการพิเศษนี้เลือกที่จะทำการเตรียมฟิล์มหนาของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีพิมพ์สกรีนเพื่อต้องการสร้างเป็นชั้นคูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิพันธุ์ของ n-CdS /p-  $\text{CuAlO}_2$  และศึกษาถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ทำการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.2.2 ทำการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีน
- 1.2.3 ทำการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และถ่ายภาพผิวหน้าของโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นชั้นคูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.3 ขอบเขตของการทดลอง

- 1.3.1 ทำการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสาร  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่มีความบริสุทธิ์สูงแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.3.2 ทำการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) เคลือบลงบนกระจกสไลด์ โดยวิธีพิมพ์สกรีน (screen printing) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ผงผลึก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ละลายในเอทิลีนไกลคอลแล้วทำการพิมพ์สกรีนลงบนกระจกสไลด์นำมาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ  $120^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วเผาในอากาศที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.3 นำเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และถ่ายภาพผิวหน้าของโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4 นำฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 1.3.5 นำเซรามิกส์และฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลจากผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์
- 1.4.2 เตรียมเซรามิกส์และฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ )
- 1.4.3 นำเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในย่านความยาวคลื่น  $\text{Cu}_{K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$  ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.4.4 นำเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ไปถ่ายภาพผิวหน้าของโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของ JOEL รุ่น JSM-6400
- 1.4.5 นำฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในย่านความยาวคลื่น  $\text{Cu}_{K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$  ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.4.6 นำเซรามิกส์และฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลและสรุปผล
- 1.4.8 เขียนรูปเล่ม ครงงานพิเศษ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_x\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_x\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีน
- 1.5.3 ได้รับเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญ
- 1.5.4 ได้รับฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญ
- 1.5.5 ทำให้ทราบถึงการศึกษสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของเซรามิกซ์และฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ เช่น ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาค สมบัติทางด้าน ไฟฟ้าและสมบัติทางด้านไฟฟ้า-ความร้อน
- 1.5.6 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของ Mg ที่มีต่อสมบัติของเซรามิกซ์และฟิล์มหนาของ  $\text{CuAlO}_2$

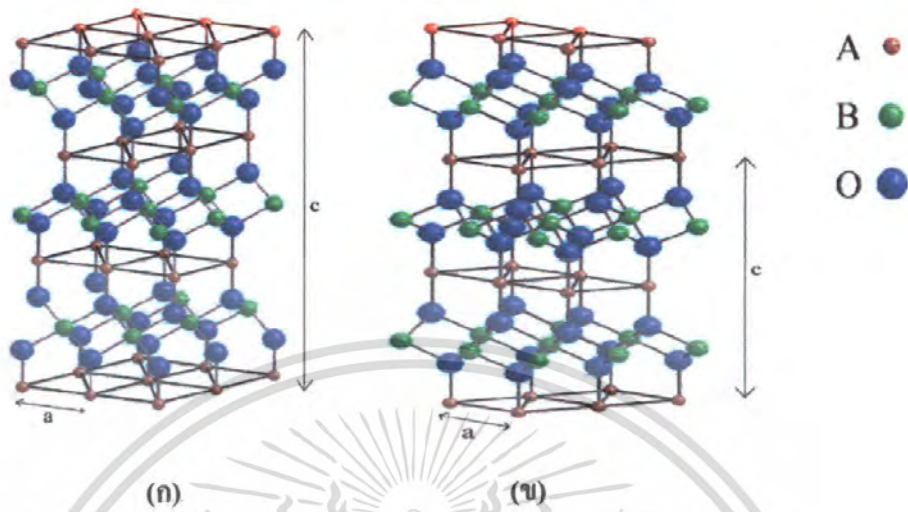
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

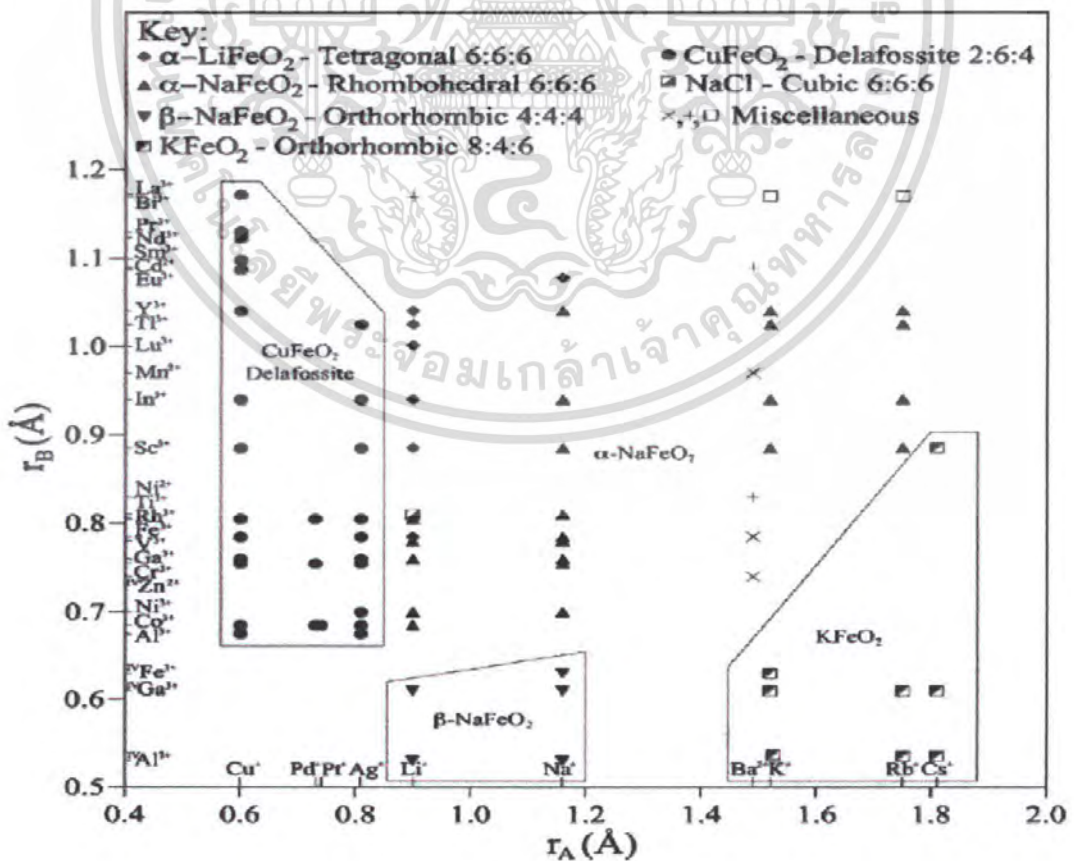
โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมเซรามิกส์และฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและวิธีพิมพ์สกรีนตามลำดับ ซึ่งจะได้อธิบายทฤษฎีและหลักการที่มีความสอดคล้องกับโครงการพิเศษ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 โครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไซด์ (delafossite structure) (ประธาน, 2550; Marquardt; Ashmore and Cann, 2006)

สารประกอบเดลตาฟอสไซด์จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบออกไซด์เชิงสาม โดยมีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{ABO}_2$  โดยที่ A เป็นอะตอมที่มีประจุ +1 เช่น ทองแดง (Cu), เงิน (Ag) หรือ พาราเดียม (Pd) เป็นต้น ซึ่งจะมีพันธะยึดเหนี่ยวกับอะตอมของออกซิเจนสองอะตอมในแบบเชิงเส้น (linear) โดยที่ระยะทางระหว่างอะตอม A จะอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 3.0 อังสตรอม ในตำแหน่งของอะตอม B จะเป็นอะตอมที่มีประจุเป็น +3 โดยที่อะตอม B จะมีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบ 6 อะตอมหรือเรียกว่าการจับพันธะแบบออกทระฮีดรัล (octahedral) โดยที่จะมีการใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกับอะตอม B ข้างเคียง ตัวอย่างของอะตอมในตำแหน่ง B ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และ แลนทานัม (La) เป็นต้น โครงสร้างเดลตาฟอสไซด์ประกอบด้วยชั้นหลักสองชั้นที่เรียงสลับสับเปลี่ยนกันไปซึ่งประกอบด้วยชั้นระนาบของอะตอม A ซึ่งจับกับออกซิเจนในแนวแกน c และชั้นของอะตอม B ซึ่งจับกับออกซิเจนแบบออกทระฮีดรัลหรือ  $\text{BO}_6$  โดยโครงสร้างเดลตาฟอสไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ 2 ชนิดโดยขึ้นกับทิศทางในการจัดเรียงตัวของแต่ละชั้น ในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABAB โดยมีทิศทางต่างกัน 180 องศา จะเรียกการจัดเรียงโครงสร้างแบบ เฮกซะ โกนอล 2H ซึ่งอยู่ใน สเปซกรุ๊ป (space group) แบบ  $\text{P6}_3/\text{mmc}$  ถ้าในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABCABC โดยที่ AB มีทิศทางเดียวกันแต่ C ทิศทางออกไป การจัดเรียงตัวแบบนี้เรียกว่า รอมโบฮีดรัล 3R ซึ่งมีสเปซกรุ๊ปแบบ  $\text{R}\bar{3}\text{m}$  โครงสร้างเดลตาฟอสไซด์ในตำแหน่งของอะตอม A จะมีอะตอมที่ใช้ได้ในตำแหน่งนี้แล้วเกิดความเสถียรเพียงสี่อะตอมเท่านั้น แต่ในตำแหน่งของอะตอม B นั้นจะมีอะตอมที่มีความเหมาะสมอยู่หลายชนิด



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเตลาฟอสไซต์  
 ก. โครงสร้างชนิดรอมโบฮีดรัล 3R  
 ข. โครงสร้างชนิดเฮกซะโกนอล 2H



เอกสารรูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ของโครงสร้างเตลาฟอสไซต์ของสารประกอบชนิดต่างๆ ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ข้อบกพร่องผลึก (งานนิศย์, 2531; งานนิศย์และคณะ 2545; จูตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฎี, 2547; อุปถัมภ์, 2548; Kittel, 1971)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชัน (dislocation) และขอบเขตของเกรน (grain boundaries)

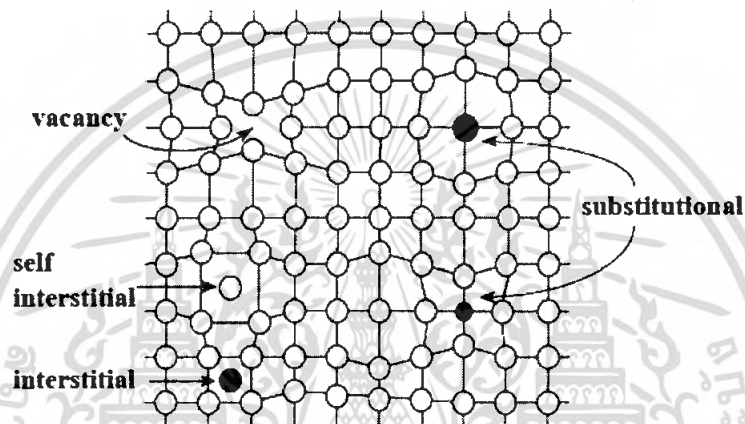
### 2.2.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.3 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

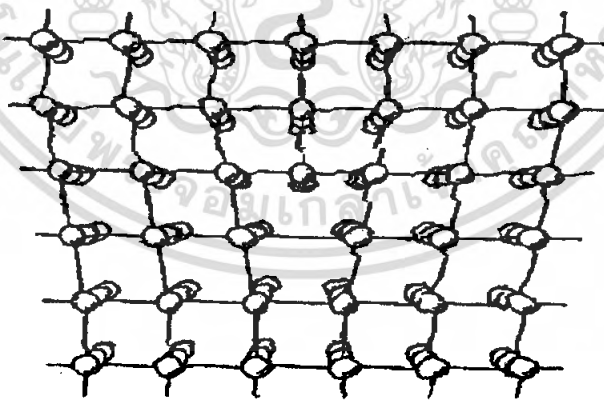
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล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

## 2.2.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

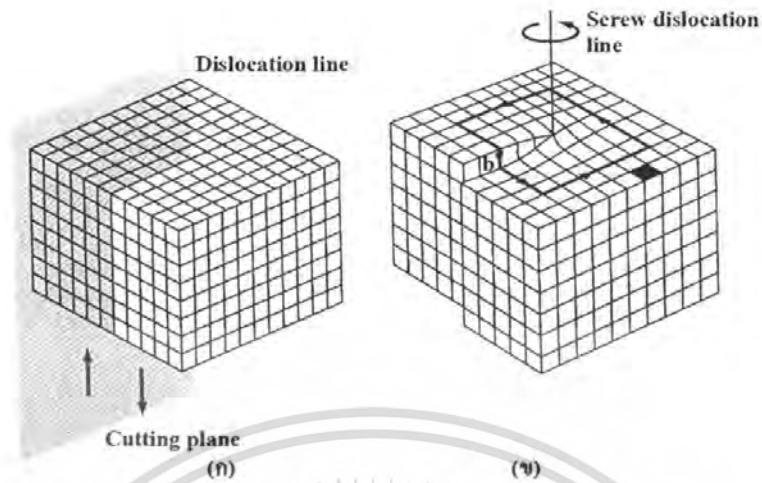
ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน (dislocations) เกิดจากความผิดปกติของจุดของโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.4 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 แสดงข้อบกพร่องผลึก



รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน

ก. ดิสโลเคชันแบบขอบ

ข. ดิสโลเคชันแบบสกรู

### 2.2.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), ตลอดจนเกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึก

### 2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (งามนิตย์, 2531; งามนิตย์และคณะ 2545; จูตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฎี, 2547; อุปถัมภ์, 2548; Cullity, 1956)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวดกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์

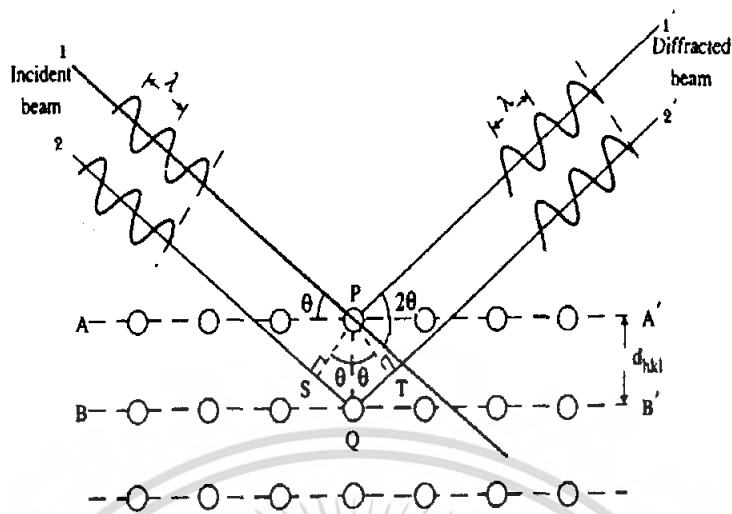
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการกฎของแบร์รอก์

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

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

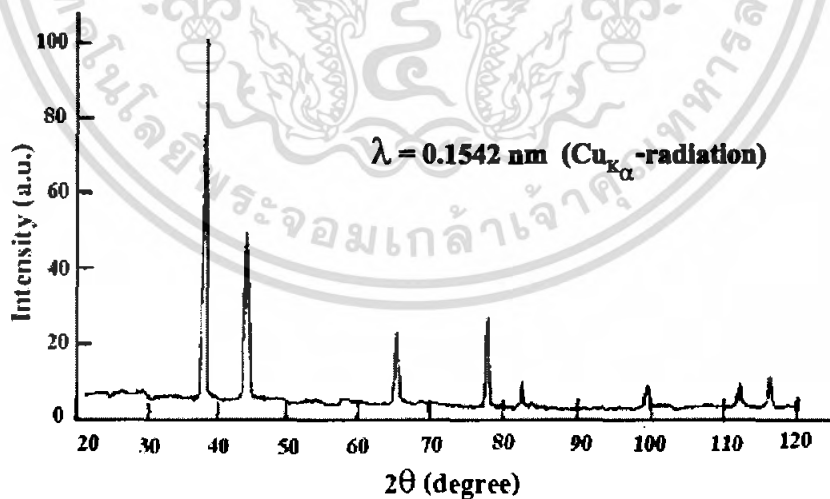
ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์ เรียกว่าระนาบแบร์รอก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่

2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร็กก์

รูปที่ 2.8 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีค (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ (2.2)

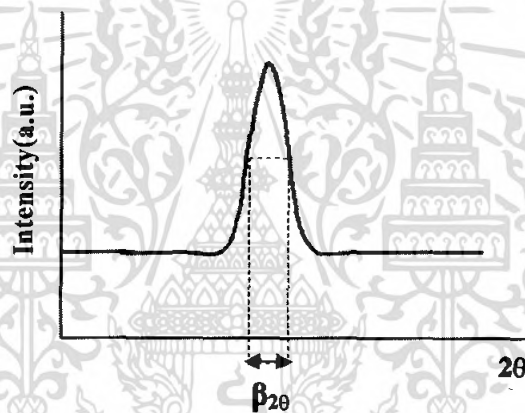
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

$h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

พิจารณารูปที่ 2.9 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน

$K$  คือ ค่าคงตัวซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

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

### 2.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกหินมหาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Dieter, 1998; Hearle; Sparrow and Cross 1973)

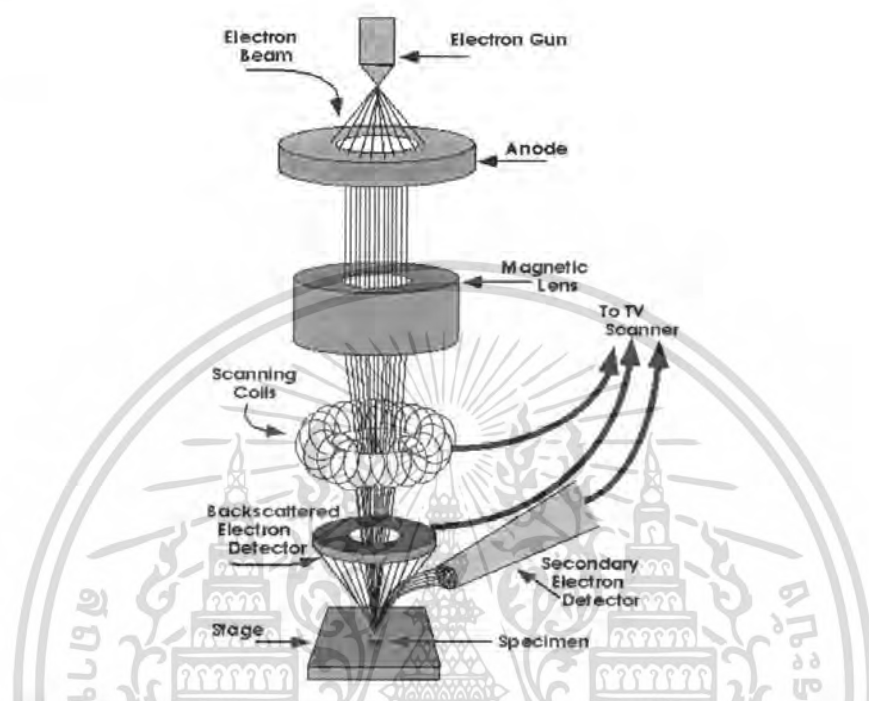
ในปี พ.ศ. 2478 Max Knoll ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา Manfred Von Ardenne ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 Charles William Oatley และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

### ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Gaewdang; et. al. 1993)

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอ็กซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



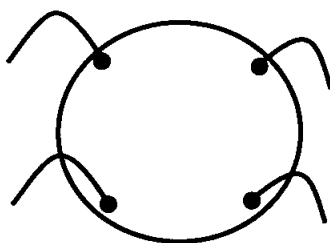
รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

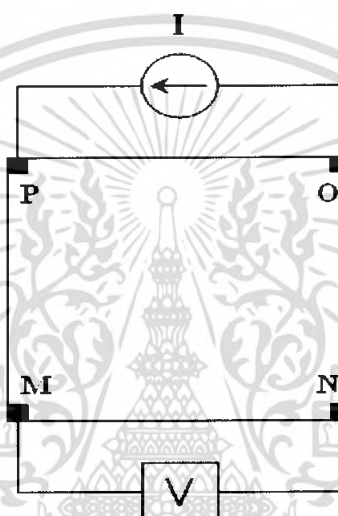
2.4.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (งาม นิตย์, 2531; จูตินัย, 2530; คุสิต, 2535; สมฤทธิ, 2538; Fahrenbruch and Bube 1983; Runyan, 1975; van der Pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.12 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.5)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.5)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.6)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.6)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.7)$$

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

$$\text{โดย} \quad f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.8)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

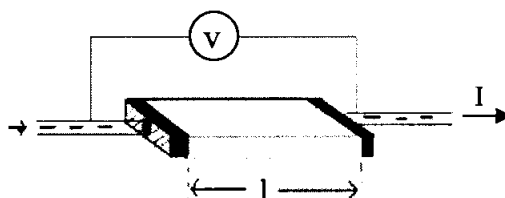
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.9)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

#### 2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method) (คูสิต, 2535; สมฤทธิ, 2538; Fahrenbruch and Bube 1983; Gangopadhyay; et. al. 2004; Runyan, 1975; van der Pauw, 1958)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

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



รูปที่ 2.13 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

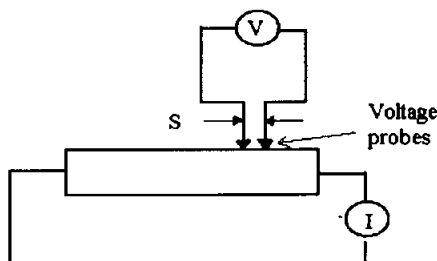
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.10)$$

$$\rho = R \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.11)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

#### 2.4.3 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes) (คูสิต, 2535; สมฤทธิ์, 2538; Fahrenbruch and Bube 1983; Gangopadhyay; et. al. 2004; Runyan, 1975; van der Pauw, 1958)

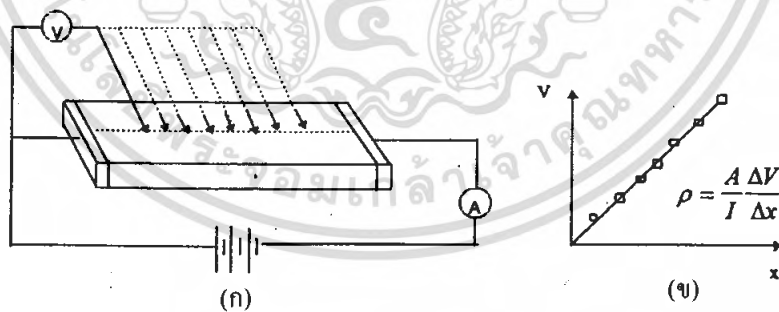
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.14 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equipotential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีครั้งที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.15 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

**2.5 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric effect)** (ฐิตินัย, 2530; คุสิต, 2535, 2542; ประธาน, 2550; สมเกียรติ, 2542; Caballero and Guillén 2003; Fahrenbruch and Bube 1983; Gangopadhyay; et. al. 2004; Tilley, 2004; van der Pauw, 1958)

ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ด้านความร้อนและด้านไฟฟ้าในเวลาเดียวกันโดยมีพลังงานจลน์และระดับพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอนเป็นตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์ เรียกว่า ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric effect) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำมีปรากฏการณ์ที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ ปรากฏการณ์ซีเบก (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลตเยร์ (Peltier effect) ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

**2.5.1 ปรากฏการณ์ซีเบก (Seebeck effect)**

ถ้านำโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดมาต่อสัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยสัมผัสนั้นเท่ากับ  $\Delta T$  จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_s$ ) ขึ้นที่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบก และเรียก  $V_s$  ว่า ศักย์ไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric potential) โลหะถูกนำไปใช้งานประยุกต์เป็นเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) โดยอาศัยปรากฏการณ์นี้

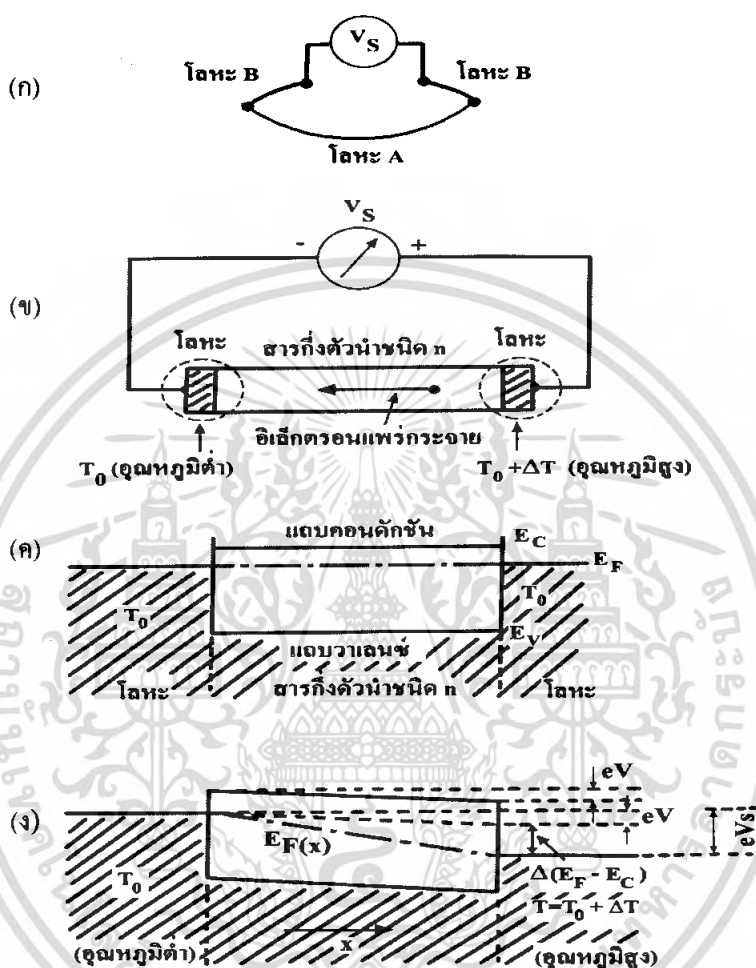
สัมประสิทธิ์ของซีเบก (S) มีนิยามดังนี้

$$V_s = S\Delta T \quad (2.12)$$

ตามปกติค่า  $V_s$  ของสารกึ่งตัวนำจะสูงกว่าของโลหะ ทำให้การวัดค่า S ของสารกึ่งตัวนำกระทำได้ง่ายกว่า

ในรูปที่ 2.16 (ข) ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำชนิด n มีโลหะชนิดเดียวกัน 2 ชนิดติดสัมผัสอยู่และสมมุติว่าที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกันเป็น  $\Delta T$  ถ้าอุณหภูมิของแท่งสารกึ่งตัวนำอยู่ในย่านที่ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ที่ด้านปลายของสารกึ่งตัวนำที่ร้อนกว่าจะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าด้านเย็นดังนั้นอิเล็กตรอนก็จะพยายามแพร่กระจายจากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็น เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้ด้านเย็นมีประจุค้างอยู่มากขึ้นและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นสนามไฟฟ้านี้จะคอยผลการแพร่กระจายมาของอิเล็กตรอนและระบบก็จะอยู่ในสภาพสมดุล ดังนั้นในรูปที่ 2.16 (ข) จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีเครื่องหมายดังแสดงในรูป แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีพาหะข้างมากคือโฮลซึ่งจะไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ

จึงทำให้ข้อของแรงดันไฟฟ้าสลับกับกรณีชนิดอื่นจากปรากฏการณ์นี้ถ้าเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นหรือพี



รูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน

- ก. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน
- ข. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยังไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิ
- ง. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

แรงดันไฟฟ้าซีเบก ( $V_s$ ) มีค่าเท่ากับ ความแตกต่างของระดับเฟอร์มิ  $E_F$  ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากเราเคยทราบแล้วว่า  $E_F$  ก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย เพราะฉะนั้น ความลาดของเส้นของระดับพลังงานเฟอร์มิ จึงไม่จำเป็นต้องเท่ากับ ความลาดของแถบพลังงานจากรูป 2.16 (ง)  $V_s$  มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_s &= \text{ปริมาณการเปลี่ยนตำแหน่งของขอบแถบนำไฟฟ้า (V) + การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง} \\
 &\quad \text{ระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อเทียบกับขอบ } E_c \\
 &= V + \frac{\Delta(E_F - E_C)}{e} \\
 &= V + \frac{d}{dT} \left( \frac{E_F - E_C}{e} \right) \Delta T
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่ซึมจะต้องสมดุลกับกระแสพิศพาที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขณะที่พาหะกำลังแพร่ซึม ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 D_n (-e) \frac{dn}{dx} &= n(-e)\mu_e E \\
 &= n(-e)\mu_e \left( \frac{-dV}{dx} \right) \\
 \frac{dV}{dx} &= \frac{D_n}{n\mu_e} \frac{dn}{dx}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะสมมติให้ความลาดของอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำนั้นสม่ำเสมอตลอด ดังนั้น

$$\frac{dV}{dx} = \frac{V}{L} \quad \text{และ} \quad \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{L}$$

และจากความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์  $D_n = \frac{kT\mu_e}{e}$  และให้  $\frac{d_n}{dx} = \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dx}$  ดังนั้นสมการที่ (2.14) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned}
 \frac{V}{L} &= - \frac{\left( \frac{kT\mu_e}{e} \right) \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dx}}{n\mu_e} \\
 &= - \frac{kT}{en} \left( \frac{dn}{dT} \right) \frac{\Delta T}{L} \\
 V &= - \frac{kT\Delta T}{en} \left( \frac{dn}{dT} \right)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

เมื่อ  $n$  มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อกำหนดค่า  $(1/n)dn/dT = d \ln n/dT$  แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$V = - \left\{ \frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} - \frac{d}{dT} \left( \frac{E_C - E_F}{e} \right) \right\} \Delta T \quad (2.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และ (2.17) สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) (S) คือ

$$S = - \left( \frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} \right) \quad (2.18)$$

ในการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่ได้คำนึงถึงความจริงที่ว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่แพร่กระจายจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำนั้นมีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้า (induced) จากที่อุณหภูมิต่ำไปสู่ที่อุณหภูมิสูงถ้าจะพิจารณาเทอมนี้ด้วยทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric potential) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสัมประสิทธิ์ซีเบกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีรูปเป็น

$$S = - \left( \frac{E_C - E_F}{eT} + 2 \frac{k}{e} \right) \quad (2.19)$$

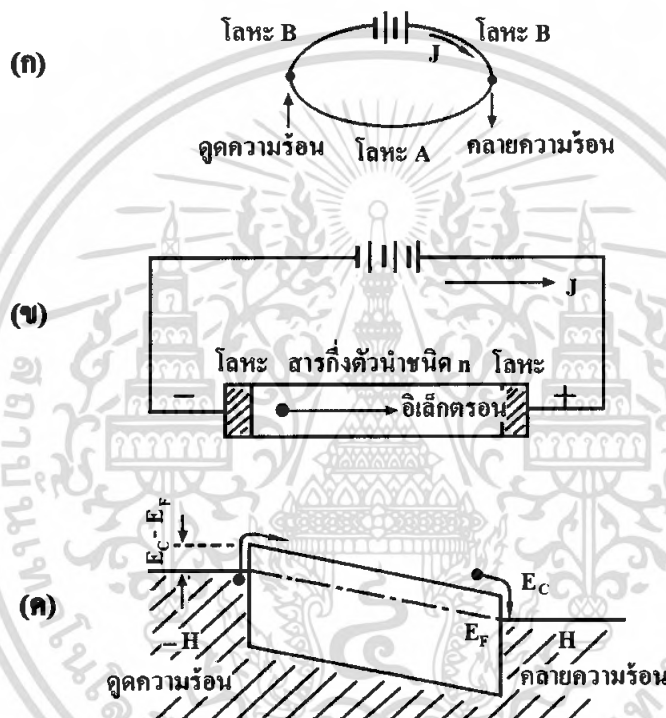
ถ้าแทนสมการที่ (2.16) ลงในสมการที่ (2.19) ก็จะพบว่าในกรณีสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (nondegenerated semiconductor) ถ้าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มจึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีค่าลดลง

นอกจากนี้ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดอินทรินสิก หรืออยู่ในย่านอุณหภูมิอินทรินสิก (intrinsic region) ที่ด้านอุณหภูมิสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเพิ่มขึ้นและพาหะทั้งสองจะแพร่กระจายไปสู่ด้านอุณหภูมิต่ำ และก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น แต่เนื่องจากทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนและโฮลมีทิศทางหักล้างกันดังนั้นแรงดันไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้นั้นจะเกิดจากแฟกเตอร์ของความแตกต่างของความคล่องตัวของพาหะทั้งสองชนิดซึ่งมีค่าน้อยมาก

## 2.5.2 ปรากฏการณ์เปลดติเยร์ (Peltier effect)

การต่อตัวนำที่มีอุณหภูมิเท่ากันสองชนิดให้สัมผัสกัน และปล่อยให้กระแสไฟฟ้า  $J$  ไหลดังแสดงในรูปที่ 2.17 ก. จะทำให้เกิดการปล่อยหรือดูดความร้อน ( $W$ ) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เปลดติเยร์ (Peltier effect) นิยามสัมประสิทธิ์เปลดติเยร์ (Peltier coefficient) คือ

$$W = \Pi J \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.17 แสดงปรากฏการณ์เปลดติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- หลักการวัดปรากฏการณ์เปลดติเยร์
- วงจรเปลดติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแส

ต่อไปลองพิจารณารอยต่อสัมผัสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและโลหะ และปล่อยให้กระแสไฟฟ้าให้ไหล  $J$  ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ข. จากรูปที่ 2.17 ค. อิเล็กตรอนที่สามารถไหลจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้นั้นจะต้องเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าแฟงคิกซ์  $(E_C - E_F)/e$  และเมื่อรวมพลังงานจลน์เข้าไปอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเป็น  $(E_C - E_F)/e + (3/2) kT$  การไหลของ

อิเล็กตรอนออกจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะเป็นการทำให้อิเล็กตรอนดึงพลังงานออกจากโลหะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

ทำให้โลหะสูญเสียพลังงาน และโลหะก็จะเย็นตัวลงและอีกทางปลายด้านหนึ่งอิเล็กตรอนก็จะนำพลังงาน  $(E_C - E_F)/e + (3/2)kT$  ไปให้กับโลหะทำให้โลหะอีกด้านหนึ่งร้อนขึ้น เพราะฉะนั้นพลังงาน  $\Delta E$  ที่อิเล็กตรอน 1 ตัวนำพาไปคือ

$$\Delta E = (E_C - E_F) + \frac{3}{2}kT \quad (2.21)$$

ปริมาณความร้อน ( $W$ ) ที่ถูกปล่อยออกมาหรือถูกดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยเวลาคำนวณได้โดยการคูณสมการที่ (2.21) ด้วยจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลต่อหน่วยเวลา นั่นคือ

$$W = \frac{\Delta EJ}{e} = \left( \frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3}{2} \frac{kT}{e} \right) J \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์เพลตียร์มีค่า

$$\Pi = \frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3}{2} \frac{kT}{e} \quad (2.23)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.18) และ (2.23) จะพบว่าสัมประสิทธิ์ซีเบกและสัมประสิทธิ์เพลตียร์มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\Pi = ST \quad (2.24)$$

ปรากฏการณ์เพลตียร์ถูกนำไปใช้งานในการทำอุปกรณ์การทำความเย็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัสดุ  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  และ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$

### 2.5.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า  $I$  เข้าสู่เส้นโลหะที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกัน  $\Delta T$  จะเกิดการคายหรือดูดกลืนความร้อนปริมาณ  $\pi \Delta T$  เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)  $\tau$  คือสัมประสิทธิ์ทอมสัน (Thomson coefficient) ซึ่งมีค่าคงตัวของวัสดุหนึ่งๆ (แตกต่างกับ  $S$  กับ  $\Pi$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับรอยต่อของวัสดุสองชนิด)  $\tau$  จะมีค่าเป็นบวกถ้าเกิดการคายความร้อนโดยกระแสไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ

สัมประสิทธิ์ทอมสันมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบกดังนี้

$$T \frac{dS_{ab}}{dT} = \tau_a - \tau_b \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

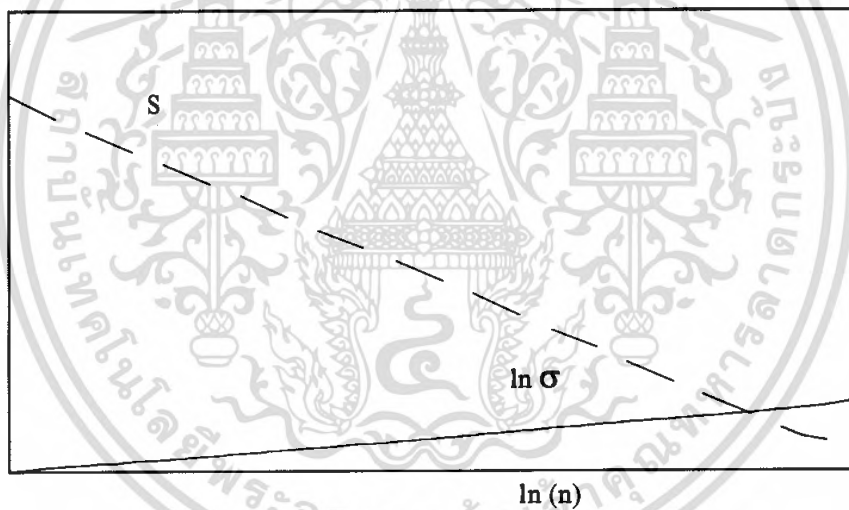
$$S_{ab} = \frac{\tau_{ab}}{T} = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT - \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.26)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่าความสัมพันธ์เคลวิน (Kelvin relation)

จากสมการที่ (2.25) จะสังเกตเห็นได้ว่า  $S_{ab}$  เป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับรอยต่อของโลหะ 2 ชนิด และสามารถเขียนได้ในรูปของผลต่างของ  $\tau_a$  และ  $\tau_b$  ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับโลหะทั้งสอง ถ้าให้ว่า

$$S_a = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT \quad \text{และ} \quad S_b = \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.27)$$

จากความสัมพันธ์เหล่านี้จึงกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.27) ก็คือนิยามของค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ซีเบก (absolute seebeck coefficient) ของวัสดุ a และวัสดุ b นั่นเอง



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบก สภาพนำไฟฟ้า และปริมาณพาหะ

## 2.6 แผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ (จูตินัย, 2530; ปรุชาน, 2550; Jacob and Alcock 1974)

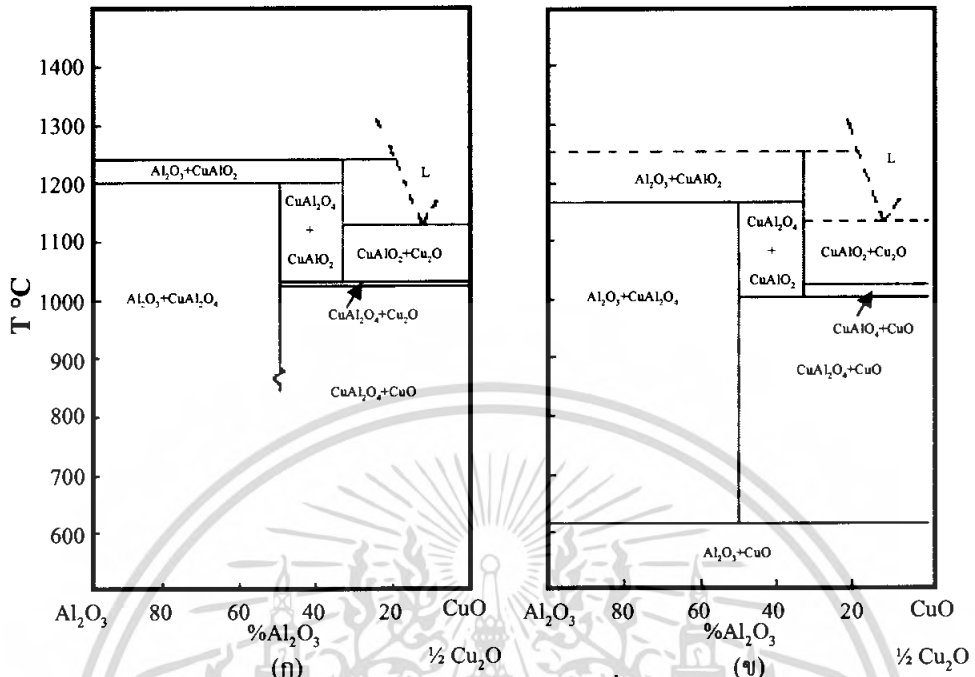
จากแผนภาพเฟสของระบบ  $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$  พบว่ามีเฟสสถานะของแข็งจำนวน 3 เฟส เกิดร่วมกับเฟสสถานะแก๊ส โดยจะเรียกระบบนี้ว่าเป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบครั้งเดียว (monovariant) และที่ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนค่าใดค่าหนึ่งเฟสสถานะของแข็งจำนวน 3 เฟส รวมกับเฟสสถานะแก๊สแล้วจะกลายเป็น 4 เฟส ซึ่งเฟสทั้ง 4 นี้จะเกิดร่วมกันได้ที่อุณหภูมิค่าเดียวเท่านั้น รูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ  $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$  ที่ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่อย  $P_{O_2}$  เท่ากับ 0.21 และ 0.4 atm ตามลำดับ เส้นตรงในแนวตั้งของรูปที่ 2.19 และ 2.20 จะแสดง เฟสของแข็งชนิดต่างๆ จะเกิดขึ้นตามอุณหภูมิและความดันย่อย  $P_{O_2}$  ที่ระบุในแผนภาพเฟส ส่วน เส้นตรงในแนวนอนมีความหมายได้ 2 แบบคือ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิด ขึ้นกับเฟสทั้งหลายหรือไม่ก็มีการเปลี่ยนแปลงแบบครั้งเดียว (monovariant) ที่เกิดขึ้นกับเฟส ของแข็ง 3 เฟส และกับเฟสสถานะแก๊สอีก 1 เฟส ตัวอย่างเช่นในแผนภาพเฟส Jacob และ Alcock ดังรูปที่ 2.19 ที่สถานะสมดุลระหว่างเฟสของแข็ง 3 เฟส ซึ่งได้แก่  $CuAl_2O_4 \rightarrow CuAlO_2 + Al_2O_3$  ที่ ความดันย่อย  $P_{O_2} = 0.21$  atm จะเกิดที่อุณหภูมิ  $1172^\circ C$  แต่สำหรับในรูปที่ 2.19 ก ซึ่งเป็นแผนภาพ เฟสของ Gadalla และ White สถานะสมดุลระหว่าง  $CuAl_2O_4 + CuAlO_2 + Al_2O_3$  จะเกิดขึ้นที่ อุณหภูมิ  $1,200^\circ C$  ซึ่งสูงกว่าในแผนภาพ Jacob และ Alcock เท่ากับ  $28^\circ C$

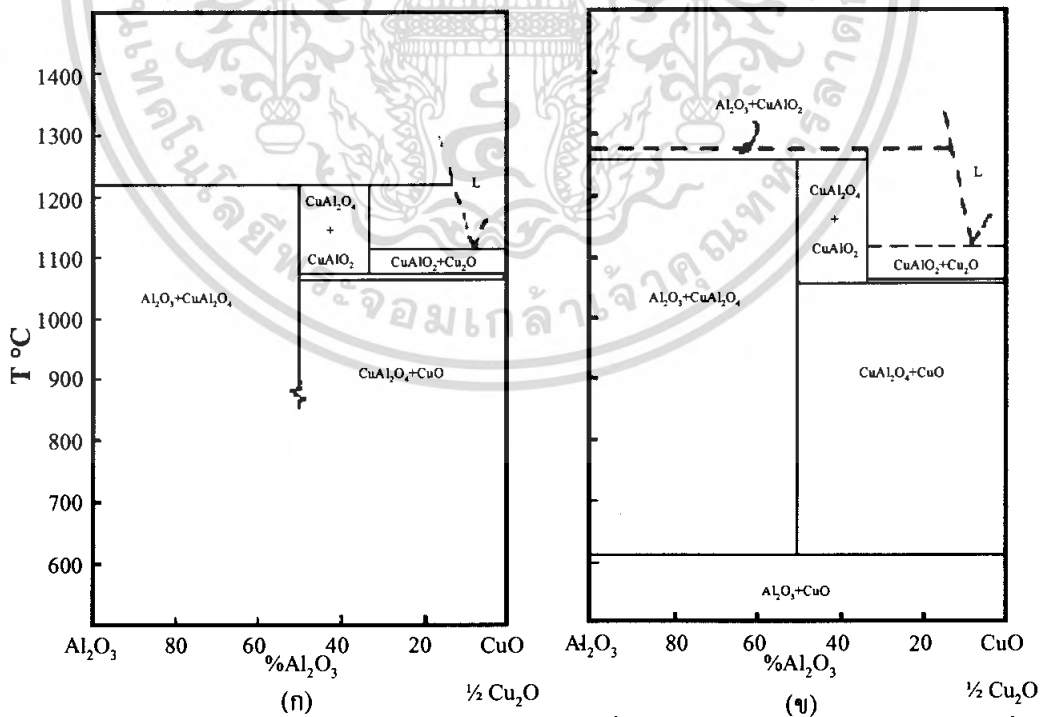
เมื่อความดันย่อย  $P_{O_2}$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 atm (ดังรูปที่ 2.20 ข) สถานะสมดุลของการเกิดร่วมกัน ระหว่างเฟสของแข็งจำนวน 3 เฟส กับเฟสของเหลว 1 เฟส จะปรากฏที่อุณหภูมิ  $1,250^\circ C$  ส่วนใน รูปที่ 2.20 ก การเกิดร่วมกันของเฟสของแข็ง 3 เฟส กับเฟสของเหลว 1 เฟส จะปรากฏที่อุณหภูมิ  $1,227^\circ C$  ซึ่งอุณหภูมิจากแผนภาพเฟสของ Jacob และ Alcock จะสูงกว่าอุณหภูมิของแผนภาพเฟส Gadalla และ White เท่ากับ  $39^\circ C$

จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์จะได้ว่าที่ความดันย่อย  $P_{O_2} = 0.21$  atm  $CuO$  จะสลายตัว เป็น  $Cu_2O$  ที่อุณหภูมิจากประมาณ  $1,028^\circ C$  และเฟสผสมระหว่าง  $CuAlO_2 + CuO$  จะเกิดในช่วง อุณหภูมิ  $1,005$  ถึง  $1,028^\circ C$  (ดังรูปที่ 2.19 ข) แต่ถ้าความดันย่อย  $P_{O_2}$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 atm เฟส  $CuO$  จะสลายตัวเป็น  $Cu_2O$  ที่อุณหภูมิ  $1,055^\circ C$  ถึง  $1,062^\circ C$  กล่าวคือเมื่อความดันย่อย  $P_{O_2}$  เพิ่มขึ้นจาก  $0.21$  atm เป็น  $0.4$  atm แล้วเฟสผสม  $CuAlO_2 + CuO$  จะปรากฏในช่วงอุณหภูมิที่แคบลงคือลดจาก  $23^\circ C$  เป็น  $7^\circ C$  จากแผนภาพเฟสของ Gadalla และ White (ดังรูปที่ 2.19 ก) แสดงให้เห็นว่าในช่วง อุณหภูมิ  $1021 - 1028^\circ C$  เฟส  $CuAlO_2$  จะสลายตัวเป็นเฟส  $CuAl_2O_4$  และ  $Cu_2O$  ส่วนแผนภาพเฟส ของ Jacob และ Alcock (ดังรูปที่ 2.19 ข) จะไม่ปรากฏเฟสผสมนี้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ  $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$  ที่ความดันย่อย  $\text{P}_{\text{O}_2}$  เท่ากับ 0.21 atm ซึ่ง

- ก. ได้จากผลงานของ Gadalla และ White
- ข. ได้จากผลงานของ Jacob และ Alcock



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ  $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$  ที่ความดันย่อย  $\text{P}_{\text{O}_2}$  เท่ากับ 0.4 atm ซึ่ง

- ก. ได้จากผลงานของ Gadalla และ White
- ข. ได้จากผลงานของ Jacob และ Alcock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือที่ละเมิดลิขสิทธิ์ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ในรูปแบบที่เป็นทั้งเซรามิกส์และฟิล์มหนาซึ่งจะได้กล่าวถึงกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

**3.1 การเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงฉีก** (Banejee; Panda and Chattopadhyay 2004; Gaewdang; et. al., 1993, 1994; Manificier, Gasiot and Fillard 1976; Moore and Reynolds 1989; Zribi, Kanzari and Rezig 2005)

**3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ )**

สารตั้งต้น ประกอบด้วย

- คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ )
- อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- แมกนีเซียมไนเตรด ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

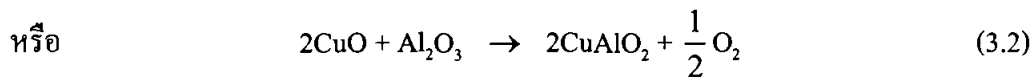
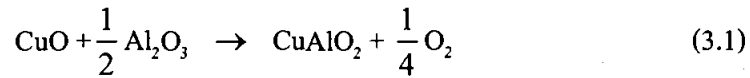
อุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย

- ครกอาเกต
- ช้อนตักสาร
- เครื่องชั่งสาร
- ชุดเครื่องมืออัดเม็ด
- เครื่องอัดเม็ดสาร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
- เตาเผาสาร
- ครูซิเบิ้ล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )

ใช้สารตั้งต้น CuO ร่วมกับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ให้ได้  $\text{CuAlO}_2$  1 กรัม มีวิธีในการคำนวณดังนี้ จากสมการ



ต้องเตรียมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{CuO} &= 63.546 + 15.9994 \\ &= 79.5454 \text{ กรัม/โมล} \\ \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.5[2(26.9815) + 3(15.9994)] \\ &= 0.5(101.9612) \\ &= 50.9806 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{CuAlO}_2 &= 63.546 + 26.9815 + 2(15.9994) \\ &= 63.546 + 26.9815 + 31.9988 \\ &= 122.5263 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ CuO น้หนัก 79.5454 กรัม/โมล ร่วมกับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  น้หนัก 50.9806 กรัม/โมล จะได้  $\text{CuAlO}_2$  น้หนัก 122.5263 กรัม/โมล ถ้าต้องการ  $\text{CuAlO}_2$  1 กรัม/โมล จะสามารถคำนวณหาปริมาณของ CuO และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ได้ดังสมการต่อไปนี้

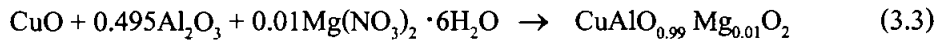
ปริมาณสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบ =

$$\frac{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นใน 1 โมล} \times \text{น้ำหนักของสารทั้งหมดที่มีปริมาณสุทธิ 1 กรัม}}{\text{มวลของสารประกอบเซรามิกซ์ใน 1 โมล}}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \text{CuO} &= \frac{79.5454}{122.5263} \\ &= 0.6492 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{Al}_2\text{O}_3 &= \frac{50.9806}{122.5263} \\ &= 0.4161 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) จะแสดงการคำนวณที่กรณีเจืออะตอมของธาตุ Mg ที่  $x = 0.01$  เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของธาตุ Al จากสมการ



ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{CuO} &= 63.546 + 15.9994 \\ &= 79.5454 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.495\text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.495[2(26.9815)+3(15.9994)] \\ &= 0.495[53.963+47.9982] \\ &= 0.495(101.9612) \\ &= 50.4708 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.01\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 0.01[24.312 + 2[14.0067 + 3(15.9994)] + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 2(62.0049) + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 124.0098 + 108.09204] \\ &= 0.01(256.41384) \\ &= 2.5641 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2 &= 63.546 + 0.99(26.9815) + 0.01(24.312) + 2(15.9994) \\ &= 63.546 + 26.711685 + 0.24312 + 31.9988 \\ &= 122.499605 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าต้องการ  $\text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2$  ปริมาณ 1 กรัม จะต้องใช้

$$\begin{aligned} \text{CuO} &= \frac{79.5454}{122.499605} \\ &= 0.6494 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Al}_2\text{O}_3 &= \frac{50.4708}{122.499605} \\ &= 0.4120 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{2.5641}{122.499605} \\ &= 0.0209 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ )

Composition (x)	CuO (g/mol)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (g/mol)	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g/mol)
0.00	0.4921	0.4161	-
0.01	0.6494	0.4120	0.0209
0.05	0.6499	0.3957	0.1048
0.10	0.6506	0.3753	0.2097
0.20	0.6521	0.3343	0.4204

### 3.1.3 วิธีการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )

- 3.1.3.1 นำผงผลึก CuO และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอาบทเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.1.3.2 การเจืออะตอมของธาตุ Mg จะทำการเจือในปริมาณ 1,5,10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยเทียบกับอะตอมของธาตุ Al โดยที่ในการบดสารจะทำเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1
- 3.1.3.3 เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 2 ตัน
- 3.1.3.4 นำเม็ดของสารที่ได้มาใส่ในครุชชีเบล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
- 3.1.3.5 ใช้อุณหภูมิในการเผา 1,100 องศาเซลเซียส โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิทีละ 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง

## 3.2 การเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส (Banejee; Panda and Chattopadhyay 2004; Gaewdang; et. al.,1993, 1994; Moore and Reynolds 1989)

### 3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

- สาร  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.13
- เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol)
- แท่นพิมพ์สกรีน
- แผ่นกระจกใส
- เตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงเตาอบอุณหภูมิสูง 1050 °C และ 200 °C ตามลำดับ

### 3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยวิธีพิมพ์สกรีน

3.2.2.1 นำผงเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่ได้จากหัวข้อ 3.1.3 มาตรฐานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.2.2 นำผงเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่บดแล้วมาผสมกับเอทิลีนไกลคอล

3.2.2.3 นำสารละลายเคมีที่ได้มาเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_x\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

3.2.2.4 นำฟิล์มที่ได้ไปอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบต่อที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 3.3 การศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ทั้งในรูปแบบที่เป็น เซรามิกส์ และฟิล์มหนา

ในโครงการพิเศษนี้ได้นำฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติทางด้านฟิสิกส์หลายประการ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มหนาของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ที่มีรังสีเอ็กซ์ย่าน  $\text{Cu}_K\alpha$  ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance

### 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_x\text{Mg}_{1-x}\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

### 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

ศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มหนาของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  ด้วยเครื่อง UV-VIS แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios $\alpha$  ในช่วงความยาวคลื่น 190-1100 นาโนเมตร

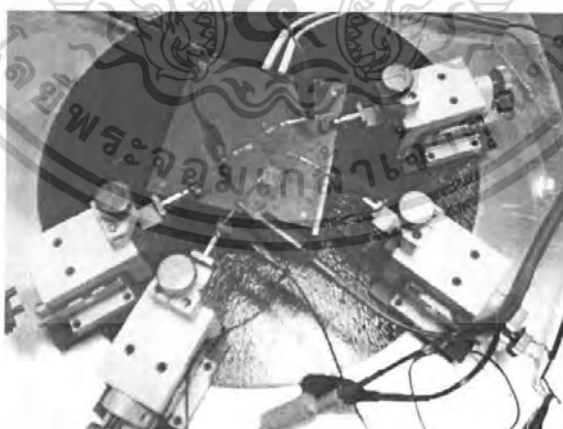
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง UV-VIS แบบดับเบิลเบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ  
Thermo electron corporation รุ่น *Helions $\alpha$*

### 3.3.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า มีอุปกรณ์ดังนี้

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ของ Keithley รุ่น 610 CR
- มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ มีอุปกรณ์ดังนี้

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาของ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- เครื่องวัดอุณหภูมิของ Digicon รุ่น DP-50A
- เตาให้ความร้อน
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

### 3.3.6 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก มีอุปกรณ์ดังนี้

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาของ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236
- เครื่องวัดอุณหภูมิของ Digicon รุ่น DP-50A
- เตาให้ความร้อน
- เครื่องทำความเย็น
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

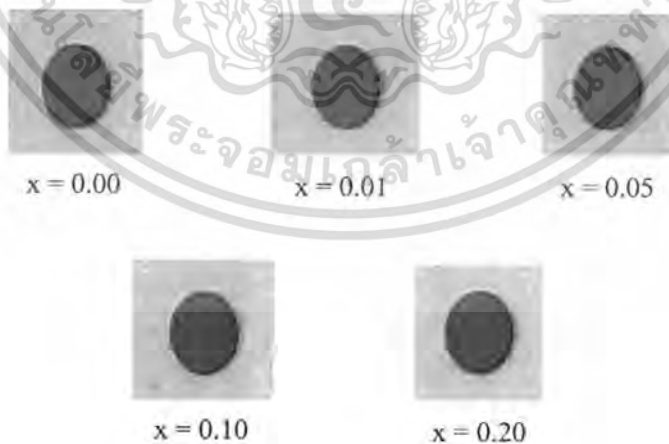
### ผลการทดลองและการอภิปราย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ในรูปของเซรามิกส์และฟิล์มหนา โดยทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำให้ดีขึ้นจากการเจืออะตอมของแมกนีเซียมและมีการเพิ่มอะตอมของออกซิเจนเข้าไปเพื่อเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าและเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากซึ่งคือโฮลนั่นเอง

#### 4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

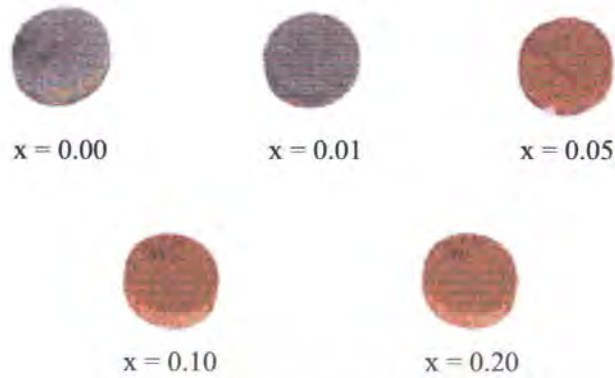
##### 4.1.1 สารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ในรูปของเซรามิกส์

เซรามิกส์  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้จากปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีเทาเข้มแต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เซรามิกส์ที่ไม่มีการเจือแมกนีเซียม ( $x = 0$ ) จะยังคงเป็นสีเทา ส่วนเซรามิกส์ที่มีการเจือแมกนีเซียมจะเปลี่ยนสีเป็นสีเทาแกมส้ม ( $0.01 \leq x \leq 0.20$ )



**รูปที่ 4.1** แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสาร  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่บดรวมกันแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดผงผลึก

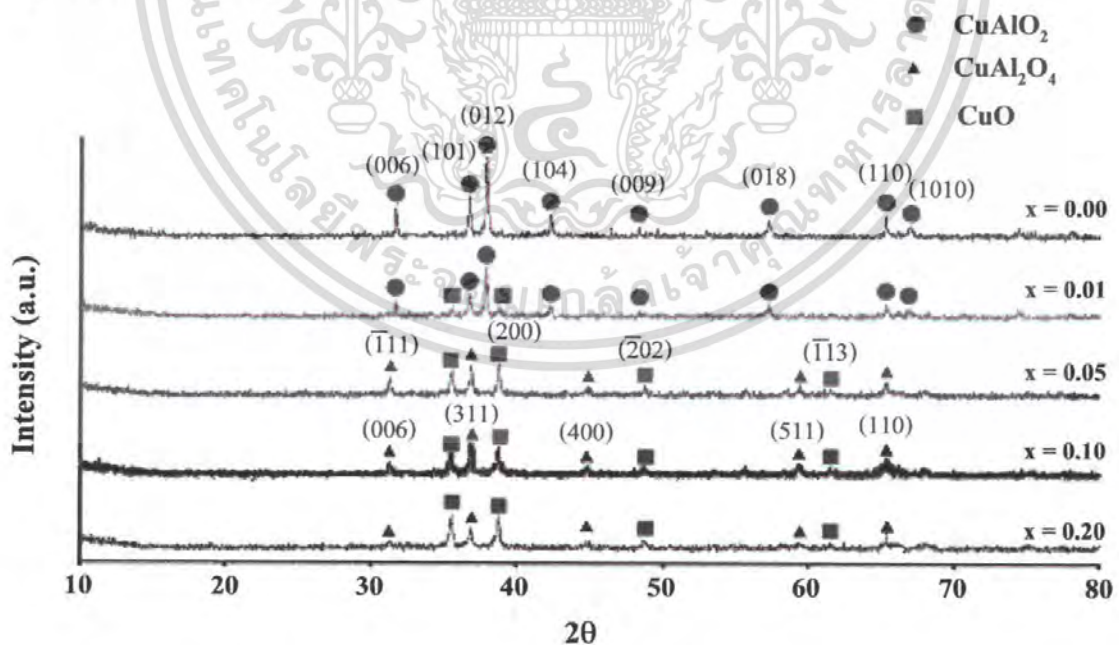
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

#### 4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ )

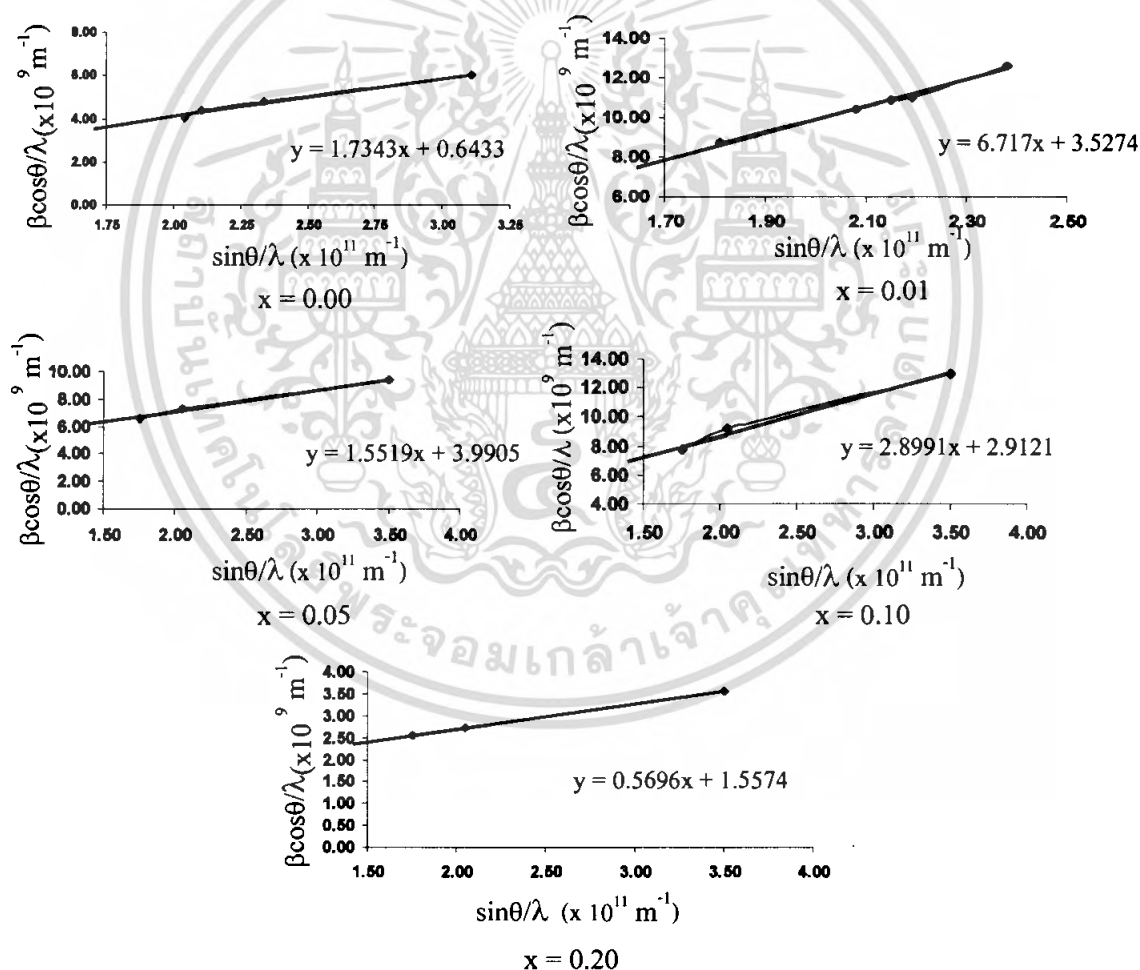
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดใดและมีโครงสร้างแบบใด



รูปที่ 4.3 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการศึกษาคอร์สสร้างผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  จะพบเฟสของ  $\text{CuAlO}_2$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตลาฟอสไซท์ ชนิด  $R\bar{3}m$  โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (006) ที่มุม  $2\theta \approx 32^\circ$  (101) ที่มุม  $2\theta \approx 37^\circ$  (012) ที่มุม  $2\theta \approx 38^\circ$  (104) ที่มุม  $2\theta \approx 42^\circ$  (009) ที่มุม  $2\theta \approx 48^\circ$  (018) ที่มุม  $2\theta \approx 57^\circ$  (110) ที่มุม  $2\theta \approx 65^\circ$  (1010) ที่มุม  $2\theta \approx 67^\circ$  (116) ที่มุม  $2\theta \approx 74^\circ$  และ (202) ที่มุม  $2\theta \approx 78^\circ$  โดยที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่  $x = 0.01$  นั้นจะเริ่มปรากฏเฟสของ CuO ขึ้น ในกรณี  $0.05 \leq x \leq 0.20$  จะไม่ปรากฏเฟสของ  $\text{CuAlO}_2$  แต่จะปรากฏเฟส CuO และ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  ขึ้นแทน และทุกกรณีจะไม่พบเฟสของ MgO



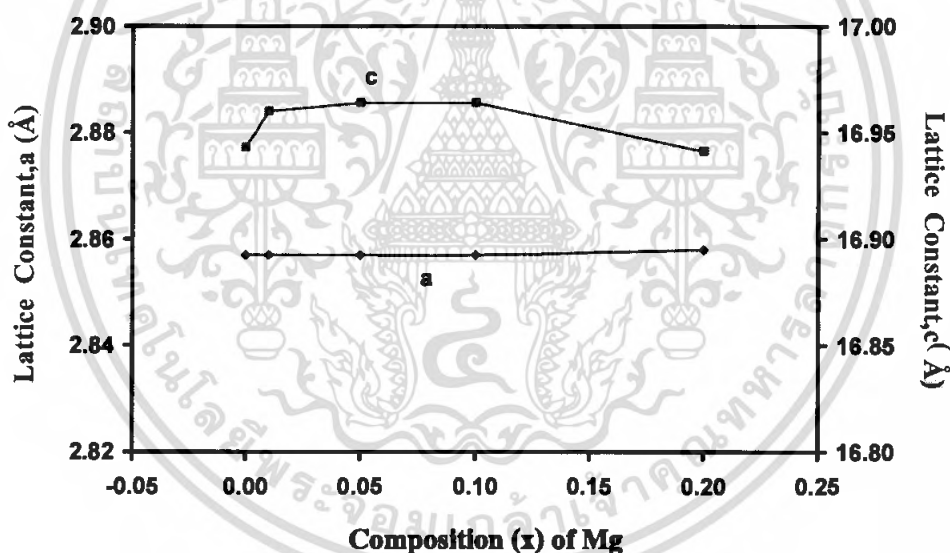
**รูปที่ 4.4** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta \cos \theta / \lambda$  กับ  $\sin \theta / \lambda$  ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ

$\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain size (nm)	Strain	Dislocation Density ( $\text{cm}^{-2}$ )
	a	c				
0.00	2.857	16.943	5.93	271.19	$1.73 \times 10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-5}$
0.01	2.857	16.96	5.936	133.33	$6.72 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-5}$
0.05	2.857	16.964	5.938	156.25	$1.55 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-5}$
0.10	2.857	16.964	5.938	142.86	$2.90 \times 10^{-3}$	$4.90 \times 10^{-5}$
0.20	2.858	16.941	5.928	416.67	$5.70 \times 10^{-4}$	$5.76 \times 10^{-6}$



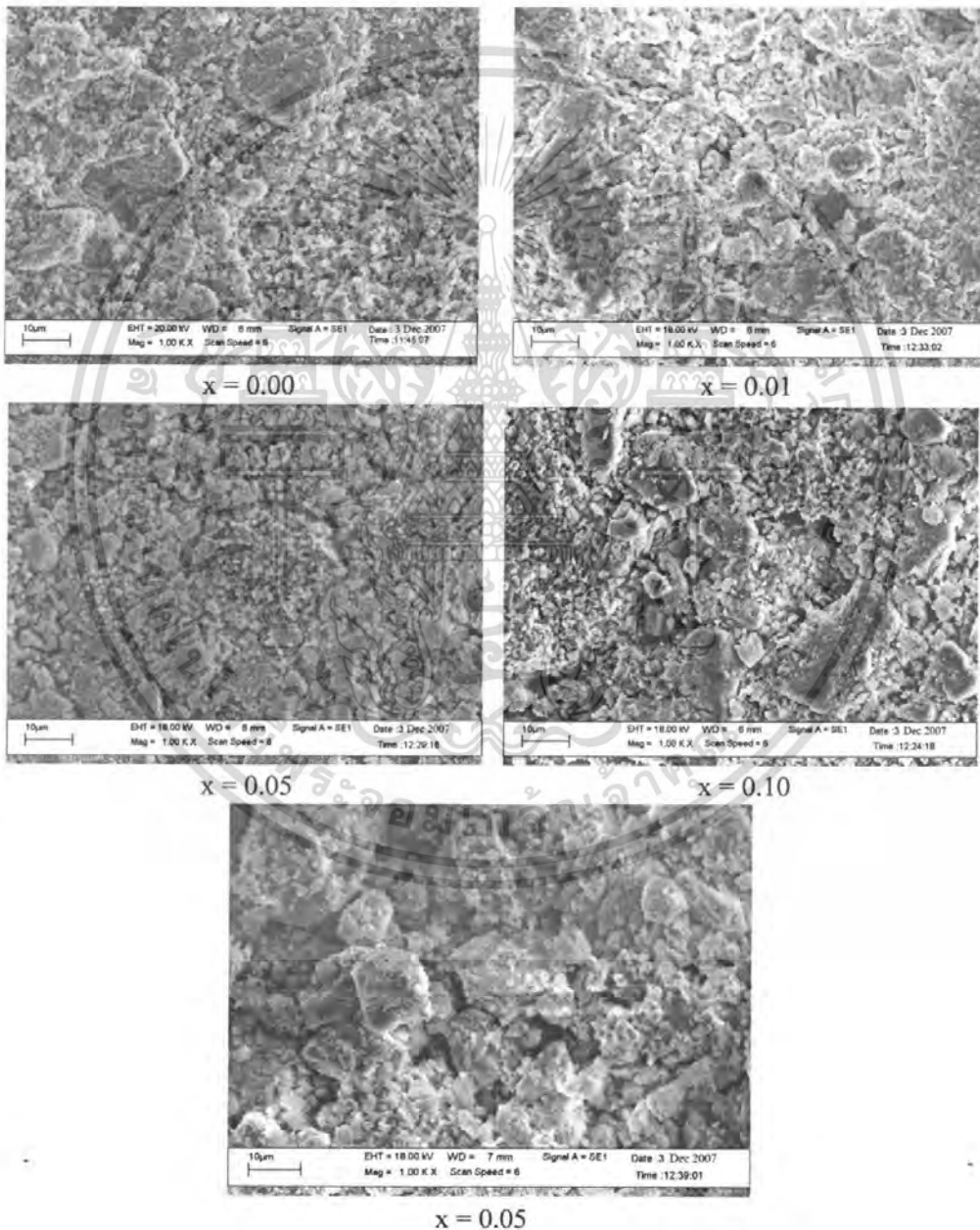
**รูปที่ 4.5** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณสัดส่วนผสมทางเคมีของอะตอม Mg (x) ค่าต่างๆของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าคงที่ของผลึก a และค่าคงที่ของผลึก c เทียบกับปริมาณอะตอม Mg โดยที่ค่าคงที่ของผลึก a ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง  $0 \leq x \leq 0.10$  จะมีค่าคงที่ แต่เมื่อในช่วง  $x = 0.20$  ค่าคงที่ของผลึก a นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าคงที่ของผลึก c ที่ปริมาณสารเจือของอะตอม Mg ในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$0.05 \leq x \leq 0.10$  ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าคงที่และต่อมาในช่วง  $0.10 \leq x \leq 0.20$  ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าลดลง

#### 4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

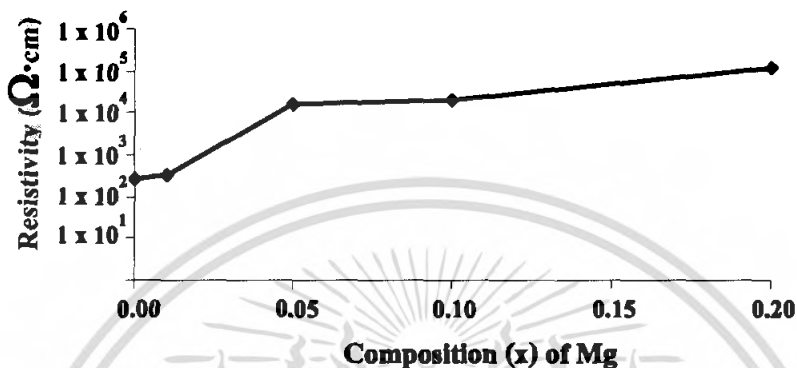


**รูปที่ 4.6** แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซรามิกส์และวัสดุศาสตร์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ซึ่งดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือของอะตอม Mg เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันช่องว่างระหว่างเกรนก็มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



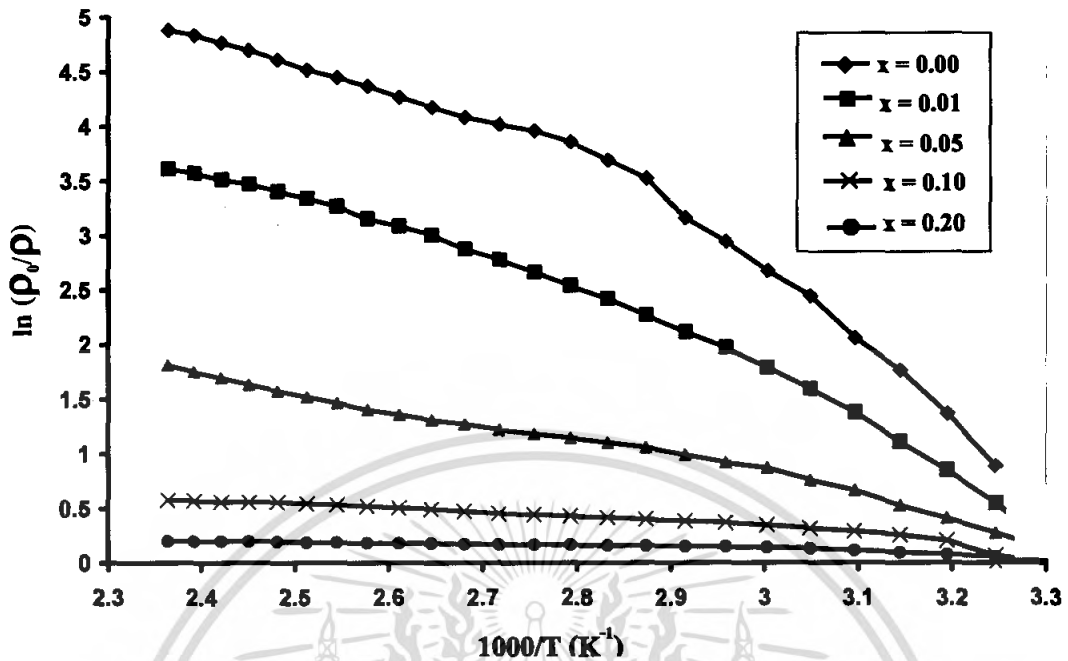
**รูปที่ 4.7** แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

**ตารางที่ 4.2** แสดงค่าสภาพควมต้านทานไฟฟ้าและค่าพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารประกอบ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x)	Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Activation Energy (meV)		
		$E_1$	$E_2$	$E_3$
0.00	$4.07 \times 10^2$	120	300	900
0.01	$5.41 \times 10^2$	-	260	-
0.05	$2.61 \times 10^4$	100	192	-
0.10	$3.60 \times 10^4$	40	-	-
0.20	$1.98 \times 10^5$	32	-	-
Defect type		$O_1$	$V_{\text{Cu}}$	$\text{Cu}_1$

จากภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเจือ Mg ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นค่าสภาพความต้านทานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยและเมื่อไม่มีการเจืออะตอม Mg จะเกิดระดับพลังงาน 3 ระดับ คือ ระดับพลังงานของ  $O_1$ , ระดับพลังงานของ  $V_{\text{Cu}}$  และระดับพลังงานของ  $\text{Cu}_1$  แต่เมื่อมีการเจืออะตอมของ Mg เพิ่มขึ้นนั้น ระดับพลังงานของ  $\text{Cu}_1$  จะหายไป

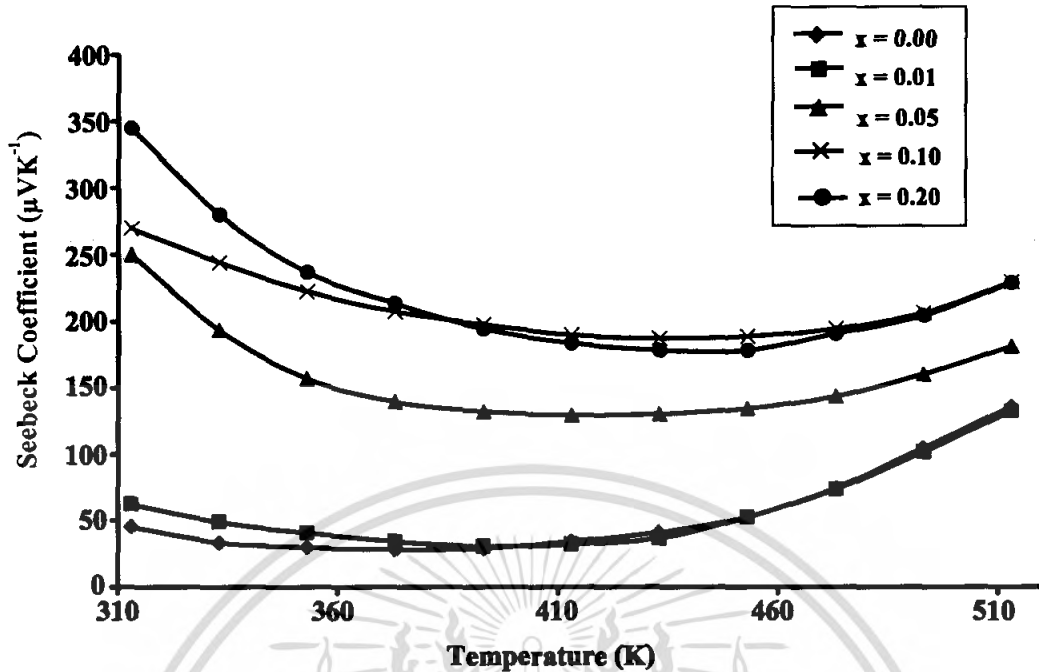
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

#### 4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_x\text{Mg}_{1-x}\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ สัมประสิทธิ์ของซีเบกที่ปริมาณ  $x$  เท่ากับ 0.00 มีค่าประมาณ  $50 \mu\text{VK}^{-1}$  และที่ค่า  $x$  มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ จะลดลงจากช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  และจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9

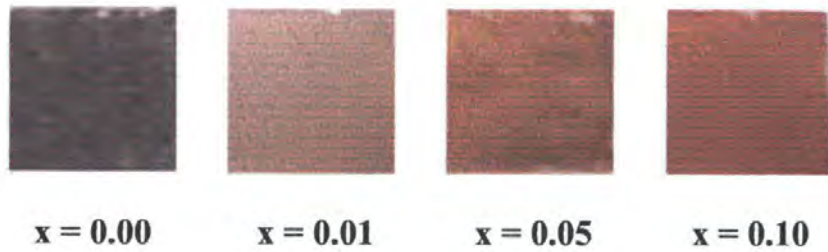


**รูปที่ 4.9** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

#### 4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

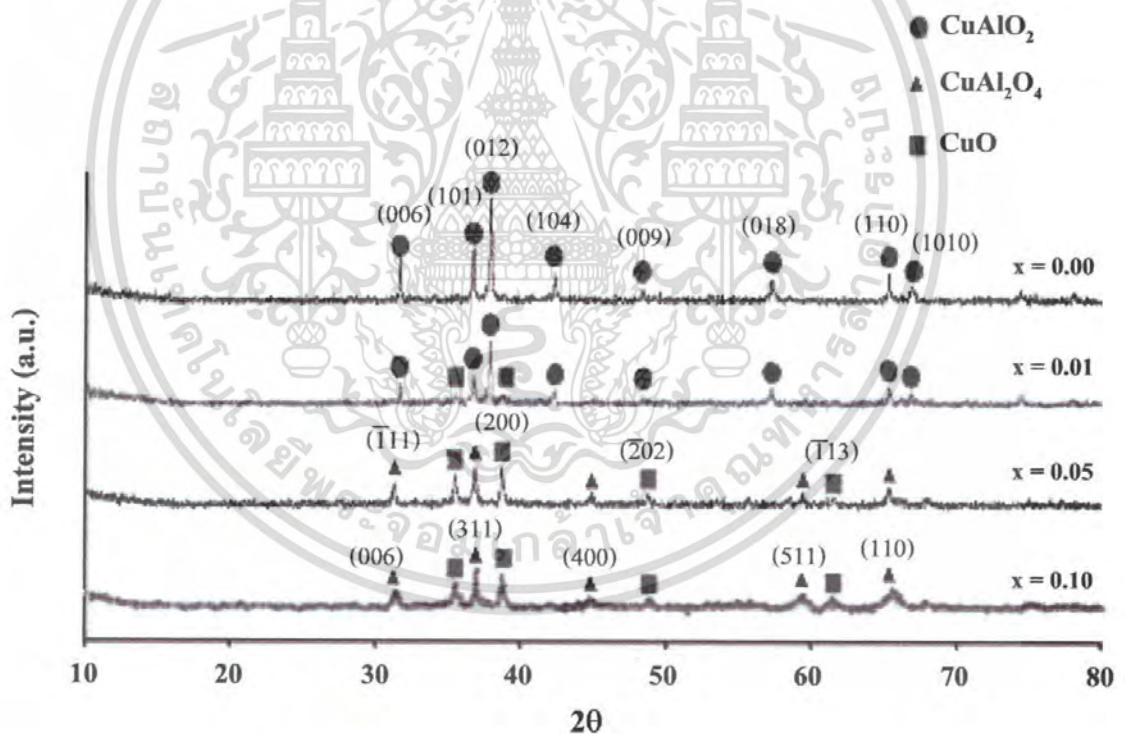
##### 4.2.1 ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) เตรียมได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นเซรามิกส์ที่ได้จากวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ฟิล์มที่ได้จะมีความพรุนที่สูง สีที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับเซรามิกส์



รูปที่ 4.10 แสดงภาพฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

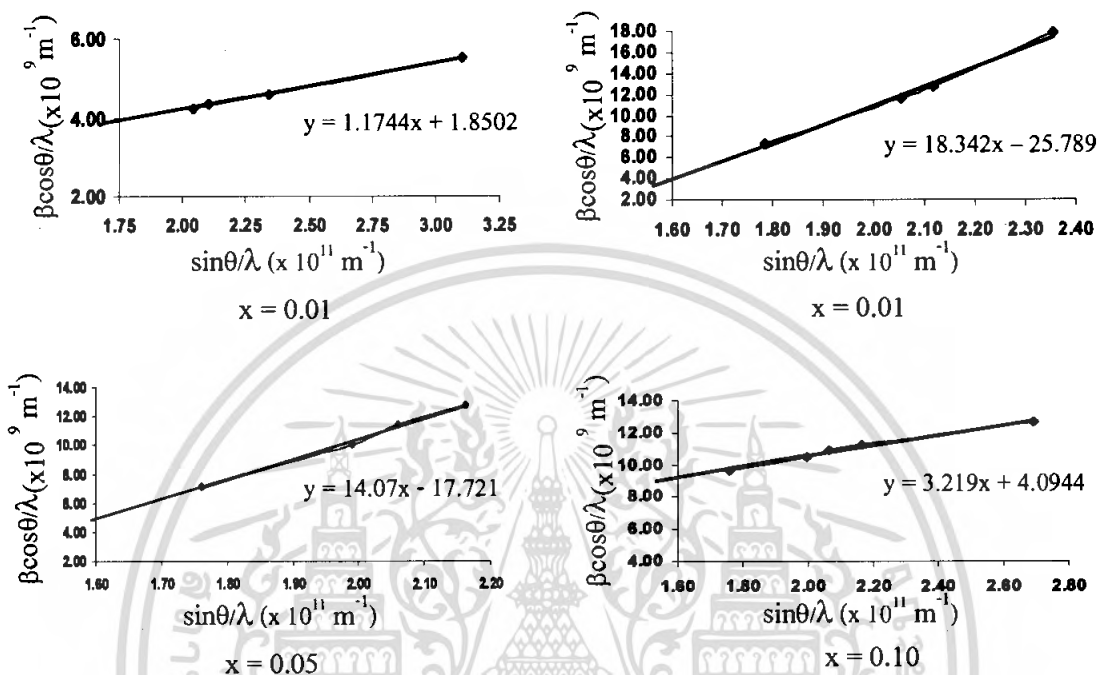
#### 4.2.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.11 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

พิคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) มีลักษณะเหมือนกับเซรามิกส์  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  คือปริมาณของอะตอม Mg ที่  $x$  เท่ากับ 0.00 จะพบเฟสเดี่ยวของเอกสารเป็นเอกสารที่สวางเวส่าหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูอาดเหเนาเปะประะเขยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CuAlO}_2$  และที่  $x$  เท่ากับ 0.01 จะเริ่มพบเฟสของ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  และในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  จะพบว่าเฟสของ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและเฟสของ  $\text{CuAlO}_2$  จะหายไป



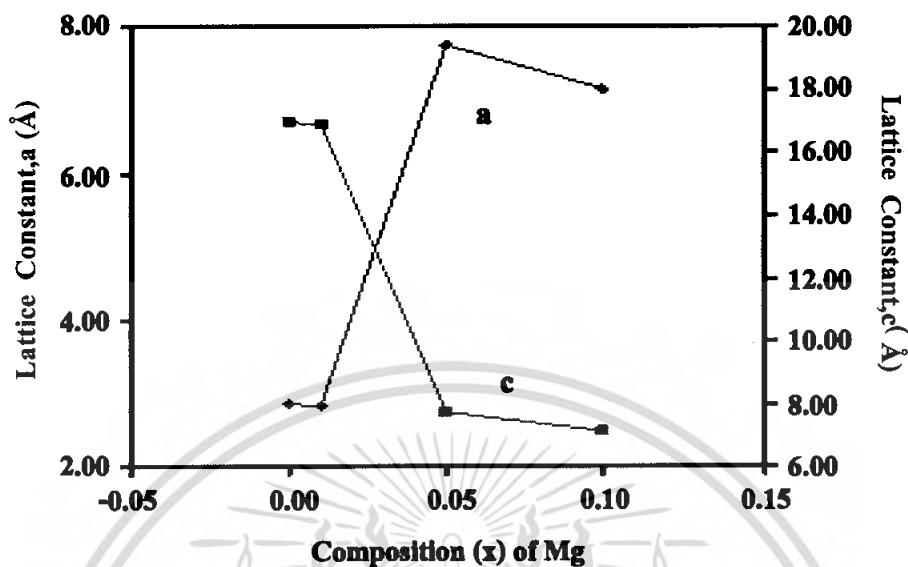
**รูปที่ 4.12** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta \cos \theta / \lambda$  กับ  $\sin \theta / \lambda$  ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition (x)	Lattice Constant ( $\text{\AA}$ )		c/a	Grain size (nm)	Strain	Dislocation Density ( $\text{cm}^{-2}$ )
	a	c				
0.00	2.86	16.961	5.93	253.97	$1.17 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-5}$
0.01	2.841	16.884	5.94	266.67	$1.83 \times 10^{-2}$	$1.41 \times 10^{-5}$
0.05 <sup>a</sup>	7.744	7.744	1	213.33	$1.41 \times 10^{-2}$	$2.20 \times 10^{-5}$
0.10 <sup>a</sup>	7.147	7.147	1	232.56	$3.22 \times 10^{-3}$	$1.85 \times 10^{-5}$

a: คือเฟสของ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$

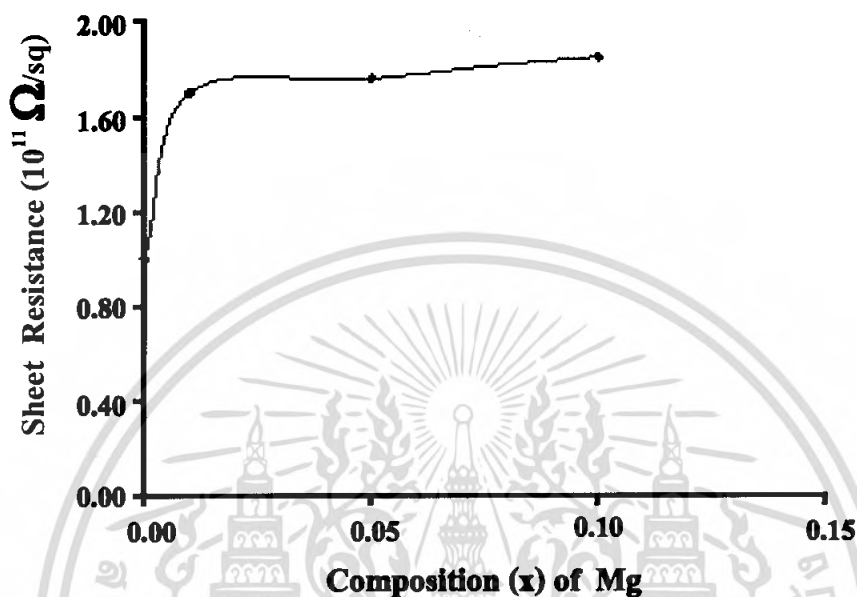
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.13** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg (x) ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงค่าคงที่ของผลึก a และค่าคงที่ของผลึก c เทียบกับปริมาณอะตอม Mg โดยที่ค่าคงที่ของผลึก a ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเจืออะตอม Mg ในช่วง  $0.01 \leq x \leq 0.05$  ค่าคงที่ของโครงผลึก a จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และเมื่อเจืออะตอม Mg ในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ค่าคงที่ของโครงผลึก a ก็จะมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าคงที่ของผลึก c ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเจืออะตอม Mg ในช่วง  $0.01 \leq x \leq 0.05$  ค่าคงที่ของโครงผลึก c จะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก และเมื่อเจืออะตอม Mg ในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ค่าคงที่ของโครงผลึก c ก็จะมีค่าลดลง

#### 4.2.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



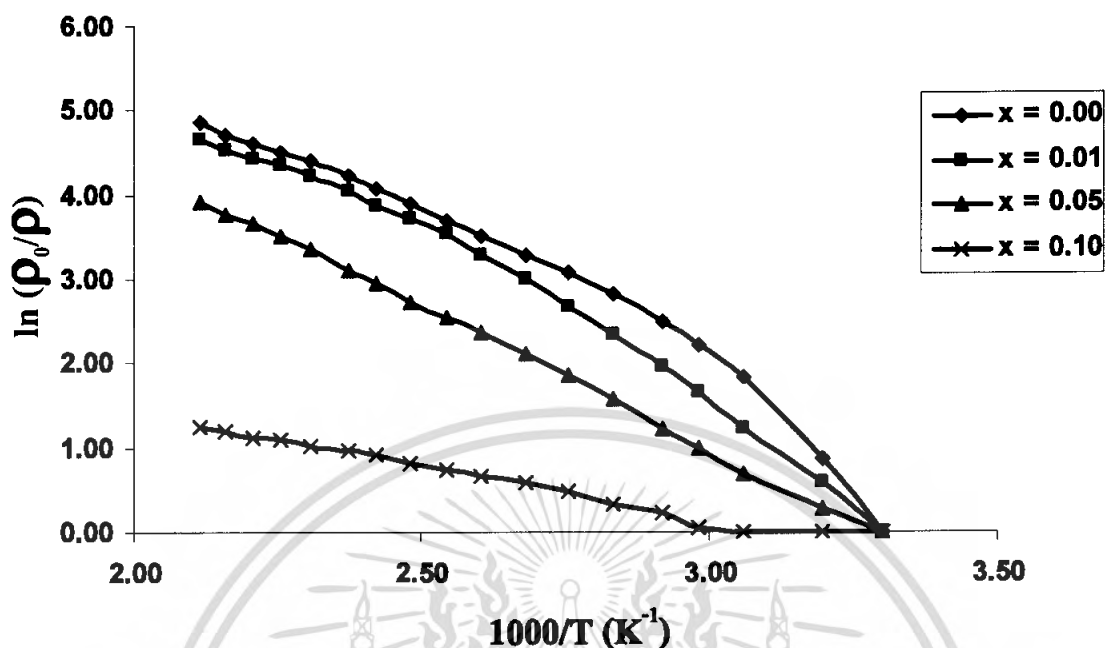
**รูปที่ 4.14** แสดงค่าความต้านทานแผ่นเมื่อเทียบกับสัดส่วนของอะตอม Mg ( $x$ ) ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition ( $x$ )	Sheet Resistance ( $\Omega/\text{sq}$ )
0.00	$1.04 \times 10^{11}$
0.01	$1.70 \times 10^{11}$
0.05	$1.76 \times 10^{11}$
0.10	$1.85 \times 10^{11}$

จากรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.4 แสดงถึงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มหนาที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกคือที่ปริมาณของอะตอม Mg อยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  และเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.15** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

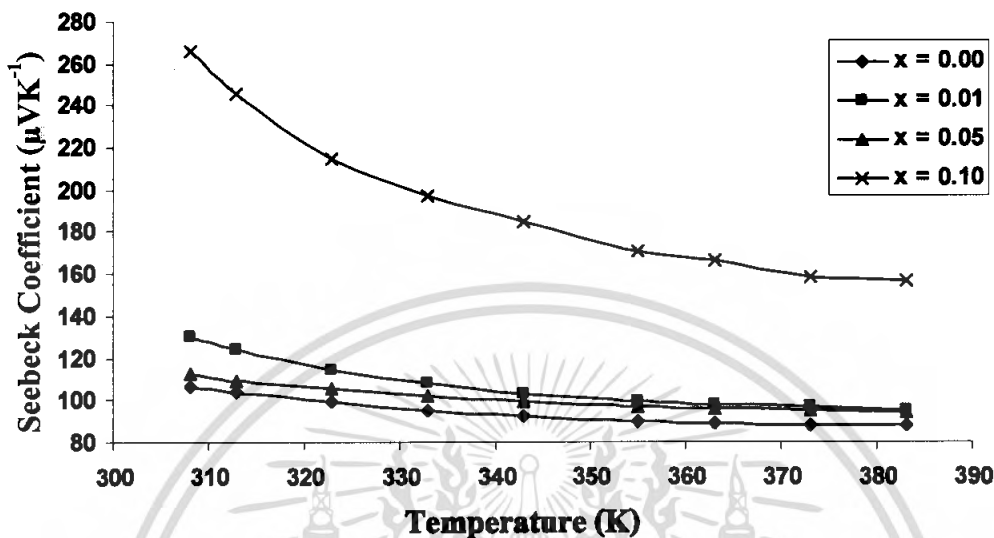
**ตารางที่ 4.5** แสดงพลังงานกระตุ้นและค่าความต้านทานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_x\text{Mg}_{1-x}\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition (x)	Resistivity ( $\Omega\text{-cm}$ )	Activation Energy (meV)			
		$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
0.00	$1.04 \times 10^{11}$	318	657	-	-
0.01	$1.70 \times 10^{11}$	-	783	-	1560
0.05	$1.76 \times 10^{11}$	-	-	817	-
0.10	$1.85 \times 10^{11}$	-	-	856	-
Defect type		$V_{\text{Cu}}$	$V_{\text{Al}}$	$\text{Cu}_i$	$V_{\text{O}}$

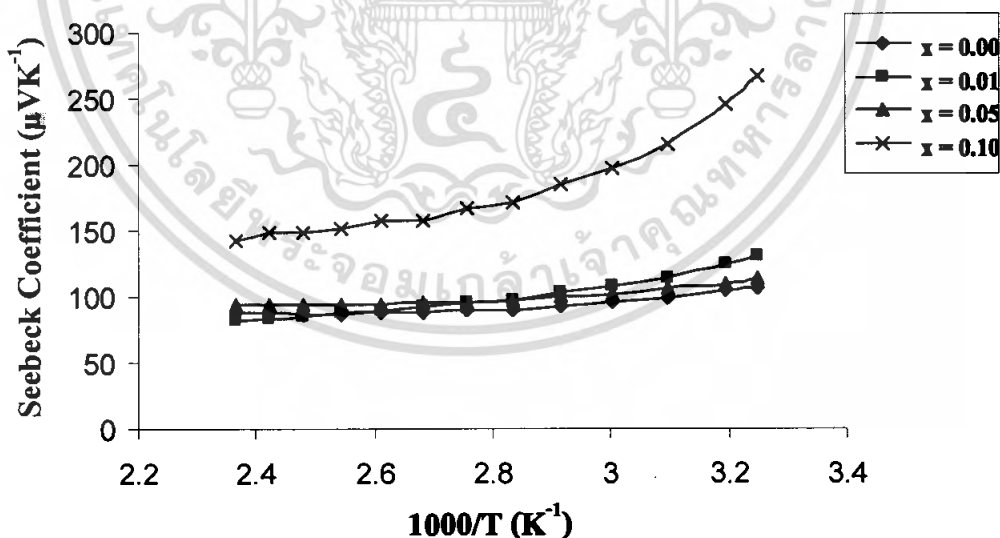
ระดับพลังงานการกระตุ้นที่พบในฟิล์มหนาในช่วงของปริมาณสารเจือ  $x = 0$  จะพบระดับพลังงานของ  $V_{\text{Cu}}$  และ  $V_{\text{Al}}$  ในช่วง  $x = 0.01$  จะพบระดับพลังงานของ  $V_{\text{Al}}$  และ  $V_{\text{O}}$  และในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.20$  จะพบระดับพลังงานของ  $\text{Cu}_i$  เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของฟิล์มทกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพินส์กรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



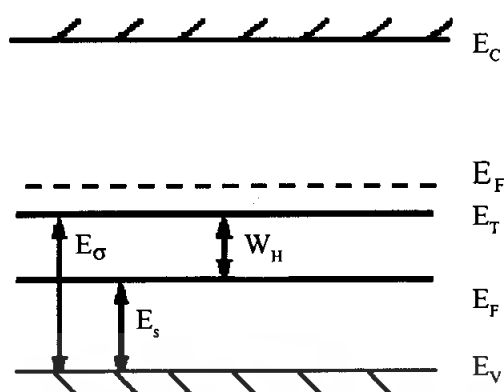
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพินส์กรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่า ที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ สัมประสิทธิ์ซีเบกที่ปริมาณสารเจือ ( $x$ ) เท่ากับ 0.00 มีค่าประมาณ  $105 \mu\text{VK}^{-1}$  โดยที่ปริมาณของสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.00, 0.01, 0.05 จะมีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.10 พบว่ามีค่าที่สูงกว่าปริมาณสารเจืออื่น ๆ มากโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก ณ อุณหภูมิห้องประมาณ  $265 \mu\text{VK}^{-1}$

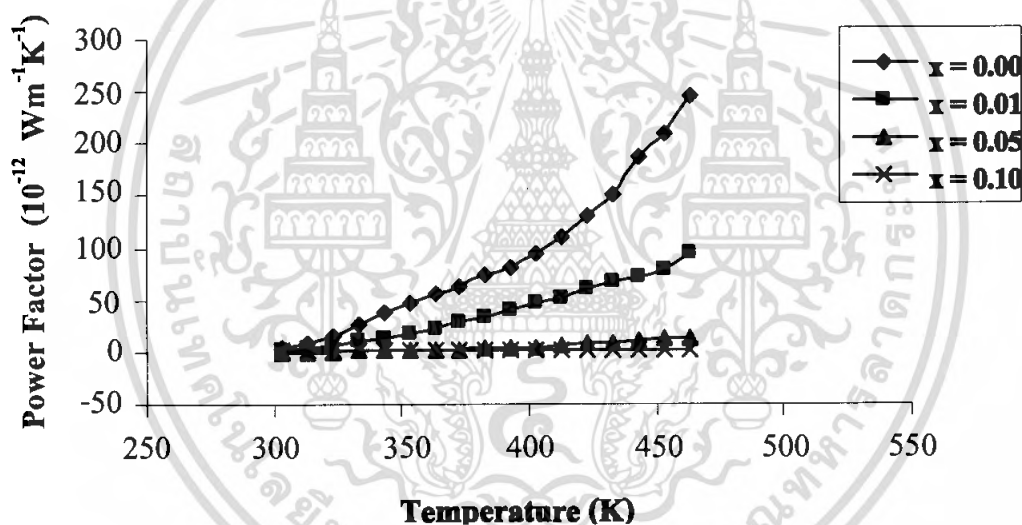
**ตารางที่ 4.6** แสดงผลต่างระหว่างระดับพลังงานผู้รับและระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition (x)	$E_G$ (meV)	$E_S$ (meV)	$W_H$ (meV)
0.00	522	41	481
0.01	325	34	291
0.05	292	34	258
0.10	112	53	59

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้  $E_G$  มีค่าลดลงอย่างมาก และ  $E_S$  มีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วง  $0.01 \leq x \leq 0.05$  และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ดังนั้นจึงทำให้ค่า  $W_H$  ที่ได้มีค่าลดลง เมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเพิ่มมากขึ้นระดับพลังงาน  $E_G$ ,  $E_S$  และ  $W_H$  จะปรากฏในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์กำลังเทียบกับอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

จากรูปที่ 4.19 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์กำลังของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังของทุกกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อปริมาณของสารเจือเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังที่อุณหภูมิสูงๆมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยลง และพบว่าที่  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ค่าแฟกเตอร์กำลังที่ได้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดยเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินโครงการพิเศษ ตั้งแต่ขั้นเตรียมสารตัวอย่างในแบบเซรามิกส์และฟิล์มหนา จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของสารตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการทดลองของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่เตรียมได้ โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้เป็นเฟสเดี่ยวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ สเปซกรุป  $R\bar{3}m$  หน่วยเซลล์เป็นแบบเฮกซะโกนอลมีค่าคงที่ของโครงผลึก  $a$  และ  $c$  เท่ากับ 2.857 และ 16.943 Å แต่สำหรับเซรามิกส์  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) ที่มีการเจืออะตอม Mg เข้าไปในโครงผลึกของ  $\text{CuAlO}_2$  พบว่าเมื่อ  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.10 ค่าคงที่โครงผลึกแกน  $c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่วนค่าคงที่โครงผลึกแกน  $a$  มีค่าคงที่ แสดงว่าไอออน  $\text{Mg}^{2+}$  ได้เริ่มเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ  $\text{Cu}^+$  ซึ่งโครงผลึก  $\text{CuAlO}_2$  มักจะมี  $V_{\text{Cu}}$  ปรากฏอยู่เสมอ (Ingram; et.al. 2005) โดยที่ Mg ไม่ได้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ  $\text{Al}^{3+}$  เนื่องจากรัศมีไอออน  $\text{Mg}^{2+}$  (เท่ากับ 0.72 Å) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของ  $\text{Al}^{3+}$  (เท่ากับ 0.535 Å) และมีขนาดเล็กกว่ารัศมีของ  $\text{Cu}^+$  (เท่ากับ 0.95 Å) ซึ่งปรากฏการณ์ที่  $\text{Mg}^{2+}$  เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ  $\text{Cu}^+$  นี้ Stauber และเพื่อนร่วมงาน (Banerjee; Maity and Chattopadhyay 2003) ได้รายงานไว้ในฟิล์มบางของ  $\text{CuAlO}_2:\text{Mg}$  ก่อนหน้านี้แล้ว

สำหรับ  $0.10 \leq x \leq 0.20$  ค่าคงที่โครงผลึกแกน  $a$  และ แกน  $c$  มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเพียงเล็กน้อยตามลำดับ ส่วนพีคการเลี้ยวเบนที่  $0.05 \leq x \leq 0.20$  จะเริ่มปรากฏเฟสของ  $\text{CuO}$  และ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  ขึ้นแสดงว่าปริมาณ  $\text{Mg}^{2+}$  สามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ  $\text{Cu}^+$  เมื่อ  $x$  ไม่เกิน 0.10 แต่เมื่อ  $x \geq 0.10$  ค่าคงที่โครงผลึกแกน  $c$  มีแนวโน้มลดลงแต่ค่าคงที่โครงผลึกแกน  $a$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า  $\text{Mg}^{2+}$  สามารถที่จะเข้าไปในตำแหน่งของ  $\text{Al}^{3+}$  ได้บ้างแต่ทว่าปริมาณของเฟส  $\text{CuO}$  และ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  มีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จากโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ ชั้นคัมเบลของ O-Cu-O จะวางตัวอยู่ในแนวแกน  $c$  ส่วนชั้นของออกทระฮีดรัล  $\text{AlO}_6$  ที่มีขอบเชื่อมติดกัน (edge-sharing octahedral) จะขนานกับระนาบ  $ab$  โดยที่ชั้นของคัมเบล O-Cu-O กับชั้นของออกทระฮีดรัลจะ

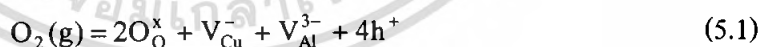
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางตัวในลักษณะสลับชั้นกันตามแนวแกน c ได้ 2 แบบ คือแบบ AaBbAaBb ซึ่งเรียกว่าชนิด 2H (2H polytype) กับแบบ AaBbCcAaBbCc ซึ่งเรียกว่าชนิด 3R (3R polytype) การที่  $Mg^{2+}$  เข้าไปแทนที่ใน  $V_{Cu}$  จะทำให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน c มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ  $Mg^{2+}$  เพิ่มขึ้นถึง  $x = 0.10$  แล้ว  $Mg^{2+}$  จะเริ่มเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ  $Al^{3+}$  ได้บ้างจึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน a มีค่าเพิ่มขึ้นบ้าง เนื่องจากชั้นของออกไซด์คริสตัล  $AlO_6$  วางตัวอยู่ในระนาบ ab แต่หน่วยเซลล์ของ  $CuAlO_2$  เป็นระบบบรอมโบฮีดรัล ดังนั้น  $a = b$  และรัศมีของ  $Mg^{2+}$  ใหญ่กว่ารัศมีของ  $Al^{3+}$  มากเมื่อ  $Mg^{2+}$  แทนที่ในตำแหน่งของ  $Al^{3+}$  จึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน a มีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพถ่าย SEM ของเซรามิกส์  $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) แสดงให้เห็นว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นในลักษณะที่แต่ละเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้นแต่ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย แสดงว่าเซรามิกส์มีรูพรุนมากขึ้นเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิกส์  $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$  ( $0 \leq x \leq 0.20$ ) เมื่อปริมาณสารเจือ  $Mg^{2+}$  เพิ่มขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสเฟต สภาพนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนทางเคมีของอะตอมที่ต่างไปจากกรณีอุดมคติหรือที่เรียกว่า นอนสโตอิชิโอเมตรี (nonstoichiometry) ซึ่งจะทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดจุด (point defects) ในหลาย ๆ แบบ เช่น อะตอมโลหะของโครงสร้างขาดหายไป (metal deficit) และการเติมอะตอมออกซิเจนส่วนเกินเข้าไปในโครงสร้างซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า อินเตอร์คัลเลชัน (intercalation) หรือกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งข้อบกพร่องทั้ง 2 แบบดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนส่วนเกินในโครงสร้าง ในกรณีที่มีอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากแวกแคนซีของ Cu และ Al จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ (Stauber; et. al. 2000)



เมื่อ  $O_O^x$ ,  $V_{Cu}^-$ ,  $V_{Al}^{3-}$  และ  $h^+$  คืออะตอมของออกซิเจน แวกแคนซีของ Cu แวกแคนซีของ Al และโฮลตามลำดับ

ส่วนกรณีที่มีอะตอมออกซิเจนส่วนเกินโดยกระบวนการอินเตอร์คัลเลชันอะตอมออกซิเจนดังกล่าวจะปรากฏแทรกอยู่ระหว่างโครงสร้าง ( $O_I^{2-}$ ) ดังความสัมพันธ์ (Banerjee and Chattopadhyay 2005)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเจือ  $Mg^{2+}$  ลงในตำแหน่งของ  $Cu^+$  ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลลดลงแสดงว่าการเจือ  $Mg^{2+}$  ลงในตำแหน่งของ  $Cu^+$  ประพฤติตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (donor) ซึ่งจะหักล้างกับปริมาณที่มีอยู่จึงทำให้ปริมาณโฮลสุทธิลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$2Mg_{Cu} = 2Mg_{Cu}^+ + O_1^{2-} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $Mg_{Cu}^+$  คือ ไอออน  $Mg^{2+}$  ซึ่งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ  $Cu^+$  ประจุสุทธิจึงเป็น +1 และ  $Mg_{Cu}^+$  (ซึ่งประพฤติตัวเสมือนเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน) จะเหนี่ยวนำให้เกิด  $O_1^{2-}$  จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณสารเจือ ( $x$ )  $\geq 0.05$  ขึ้นไปค่าพลังงานกระตุ้นของทุก ๆ สารตัวอย่างจะมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้เกิดจาก  $O_1^{2-}$  ซึ่งประพฤติตัวเหมือนเป็นผู้รับอิเล็กตรอนกรณีที่ปริมาณสารเจือ ( $x$ )  $\leq 0.05$  ระดับพลังงานกระตุ้น  $E_2$  และ  $E_3$  น่าจะสอดคล้องกับข้อบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cu}^-$  และ  $Cu_i$  ตามลำดับ

เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $CuAlO_2$  ซึ่งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $4.07 \times 10^2 \Omega \cdot cm$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่รายงานโดย Kawazoe และเพื่อนร่วมงาน แต่เมื่อปริมาณสารเจือ  $x$  เพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีเฟส  $CuO$  และ  $CuAl_2O_4$  ปะปนอยู่ด้วยส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์  $CuAlO_2$  ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ  $50 \mu VK^{-1}$  และจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อทำการเจือ  $Mg^{2+}$  เข้าไปในเซรามิกส์ของ  $CuAlO_2$  สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ  $Mg^{2+}$  และมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $345 \mu VK^{-1}$  เมื่อปริมาณสารเจือ ( $x$ ) = 0.20

สัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์  $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$  ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับของเซรามิกส์  $CuAlO_2$  ที่ไม่มีการเจือ กล่าวคือที่  $x$  ค่าใดๆ สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจากนั้นสัมประสิทธิ์ซีเบกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และอัตราการเพิ่มจะยิ่งช้าลงเมื่อ  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้น

## 5.2 สรุปผลการทดลองของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) เตรียมได้จากการเคลือบผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ลงบนกระจกใสด้วยวิธีพิมพ์สกรีนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปอบได้นำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบต่อที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าในการแอนนیلในอากาศนั้นจะช่วยให้เนื้อของฟิล์มแน่นขึ้น มีรูพรุนเนื่องจากโพรงอากาศน้อยลงจึงสามารถนำมาตรวจวัดสมบัติต่างๆ ได้สะดวกขึ้น จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่ามีลักษณะเหมือนกับผงผลึก  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  กล่าวคือ เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้เป็นเฟสเดี่ยวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ซึ่งมีสเปซกรุ๊ป  $R\bar{3}m$  หนึ่งหน่วยเซลล์เป็นแบบเฮกซะโกนอล สำหรับในช่วง  $0 \leq x \leq 0.10$  พิกการเลี้ยวเบนของเฟส  $\text{CuO}$  กับ  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  เริ่มปรากฏขึ้น หลังจากนั้นนำผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้มาทำการหาค่าคงที่ของผลึก a และ c และนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ พบว่าในช่วง  $0 \leq x \leq 0.01$  ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน a และแกน c มีค่าค่อนข้างเกือบคงที่ ในขณะที่ช่วง  $0.01 \leq x \leq 0.05$  นั้น แกน c มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และแกน a มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  แกน a และแกน c มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยคือ แกน a และ c มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่โครงสร้างผลึกเหล่านี้สามารถอธิบายได้เหมือนกับกรณีที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

สภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มหนาของ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  มีค่าสูงกว่าที่พบในเซรามิกส์ เนื่องจากเนื้อของฟิล์มหนามีรูพรุนสูงกว่าเนื้อของเซรามิกส์ จากการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มหนาในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 200 องศาเซลเซียส ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) สอดคล้องกับเซรามิกส์  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  กล่าวคือ ที่  $0 \leq x \leq 0.01$  จะพบระดับพลังงานเป็นไปคาบสมการที่ (5.1) ซึ่ง คือระดับพลังงานของ  $V_{\text{Cu}}$  และ  $V_{\text{Al}}$  ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในเซรามิกส์ โดยทั้งสองระดับพลังงานนั้นเป็นระดับพลังงานผู้รับซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดโฮล และทั้งนี้ยังพบอีกว่าที่  $x = 0.01$  พบระดับพลังงานของ  $V_{\text{Al}}$  และ  $V_o$  ซึ่งประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ (donor) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้นี้จะสร้างอิเล็กตรอนอิสระไปหักล้างกับโฮล ส่งผลให้โฮลสุทธิมีปริมาณลดลง ดังนั้นฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.01$ ) ที่แอนนیلในบรรยากาศของออกซิเจนบริสุทธิ์จึงนำไฟฟ้าได้ลดลง (ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง) แต่เมื่อมีการเจือ  $\text{Mg}^{2+}$  เข้าไปมากขึ้นคือที่ค่า ( $0.05 \leq x \leq 0.10$ ) จะมีการเกิดระดับพลังงานของ  $\text{Cu}_i$  เกิดขึ้นมาซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพความต้านทานที่มากขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานของ  $\text{Cu}_i$  จะเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และเนื่องจากฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงเกินไปจึงไม่สามารถศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์จึงเขียนหน้าการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ ดังนั้นค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าสภาพคล่องของฮอลล์จึงไม่ได้มีรายงานไว้

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของฟิล์มหนา  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ  $105 \mu\text{VK}^{-1}$  โดยที่ปริมาณของสารเจือ ( $x$ ) = 0.00, 0.01 และ 0.05 จะมีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.10 พบว่ามีค่าที่สูงกว่าปริมาณสารเจืออื่น ๆ มากโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก ณ อุณหภูมิห้องประมาณ  $265 \mu\text{VK}^{-1}$

เมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้  $E_c$  มีค่าลดลงอย่างมาก และ  $E_v$  มีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วง  $0.01 \leq x \leq 0.05$  และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วง  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ดังนั้นจึงทำให้ค่า  $W_H$  ที่ได้มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Mg เพิ่มขึ้น กลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (variable range hopping) จะเด่นชัดมากขึ้น

สำหรับค่าแฟกเตอร์กำลังของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังของทุกกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อปริมาณของสารเจือเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังที่อุณหภูมิสูงๆมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยลง และพบว่าที่  $0.05 \leq x \leq 0.10$  ค่าแฟกเตอร์กำลังที่ได้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดยเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเจือ Mg ลงในโครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ไม่ช่วยให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ลดลงได้ ดังนั้นจึงควรหาสารเจืออื่นที่เหมาะสมกว่าเช่น N, Ni, Fe หรือ Ca เป็นต้น
2. การเตรียมฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  ด้วยเทคนิคอื่นเช่น ดีซีสปีดเตอร์ริง ภายใต้การควบคุมปริมาณก๊าซ  $\text{O}_2$  / Ar ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยทำให้ฟิล์มหนามีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มหนา n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>
3. ควรมีการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง
4. ควรศึกษาสมบัติของ  $\text{CuAlO}_2$  กรณีที่เจือธาตุหมู่ 4 เพื่อให้เป็นชนิดเอ็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

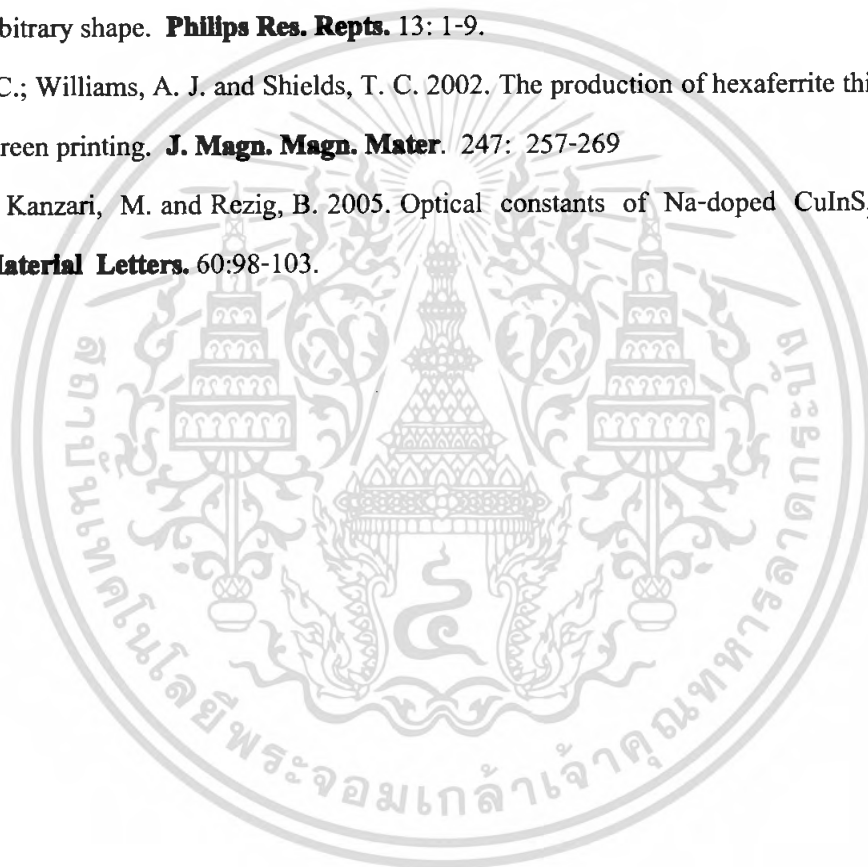
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. **การศึกษารอยต่อแบบโหระ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซไนด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. **การเตรียมและ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซมิคอนดักเตอร์แสงอาทิตย์**. รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2530. **การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซไนด์ ( $CuInSe_2$ )**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คูสิต เครื่องงาม. 2535. **โซลิดสเตทฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- คูสิต เครื่องงาม. 2542. **ตั้งประดิษฐ์อุปกรณ์ไดโอดเทอร์โมนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประธาน ประจวบโชค. 2550 **การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $CuAlO_2$  ชนิดพี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วีรชัย ธิภา. 2547. **การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง  $CdS-ZnS$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ สุกเดช. 2542. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ:แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์. 2538. **ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลดควมคุมโดยคอมพิวเตอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. **การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซมิคอนดักเตอร์แสงอาทิตย์  $CdTe$** . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปถัมภ์ นาครัถย์. 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและทอง  
ซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์  
ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Banerjee, A.N. and Chattopadhyay, K.K. 2005. Size-dependent Optical properties of sputter  
deposited nanocrystalline P-type transparent  $\text{CuAlO}_2$  thin films. **J.Appl.Phys.** 97:  
084308-1 - 084308-8.
- Banerjee, A.N.; Maity, R. and Chattopadhyay, K.K. 2003. Preparation of P-type transparent  
conducting  $\text{CuAlO}_2$  thin films by reactive DC sputtering. **Mater.Lett.**58: 10-13.
- Banerjee, A.N.; Panda, D. and Chattopadhyay, K. K. 2004. Fabrication of p- $\text{CuAlO}_2$  / n-ZnO : Al  
heterojunction diodes for transparent electrodes. **Proceedings in Photonics 2004.** 9-  
11 December 2004, Cochin ,India
- Caballero, R. and Guillén, C. 2003. Optical and electrical properties of  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  thin films  
obtained by selenization of sequentially evaporated metallic layers. **Thin Solid Films.**  
431-432: 200-204.
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-ray Diffraction** . Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Fahrenbruch A.L. and Bube R.H. 1983. Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar  
Energy Conversion. New York Academic Press Inc., p. 44.
- Gaewdang, T.; Chaminade, J.P.; Garcia, A.; Fouassier, C.; Pouchard, M.; Hagenmuller, P. and  
Jacquier, B. 1993. Crystal growth and luminescence properties of  $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ . **Mater.**  
**Lett.** 18:64-68.
- Gaewdang, T.; Chaminade, J.P.; Garcia, A.; Pouchard, M.; Hagenmuller, P. and Jacquier, B.  
1994. Luminescent of  $\text{Ce}^{3+}$  in the  $\text{In}_x\text{SC}_{1-x}\text{BO}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) solid solution. **J. Phys.**  
**Chem. Solld.** 55:501-504.
- Gaewdang, T.; Chaminade, J.P.; Gravereau, P.; Garcia, A.; Fouassier, C. and Hagenmuller, P.  
1993. Crystal structure and luminescent properties of indium titanate. **Mat. Res.**  
**Bull.** 28:1051-1060.
- Gangopadhyay, U.; Kim, K.; Mangalaraj, D. and Yi, J. 2004. Low cost CBD ZnS antireflection  
coating on large area commercial mono-crystalline silicon solar cells. **Applied Surface**  
**Science.** 230: 364-370.

- Hearle, J. W. S.; Sparrow, J. T. and Cross, P. M. 1973. **The Use of the Scanning Electron Microscope**. New York: Pergamon Press Ltd.
- Ingram, B. J.; Bertoni, M. I.; Poepelmeir, K. R. and Mason, T. O. 2005. Point defects and transport mechanisms in transparent conducting oxides of intermediate conductivity. **Thin Solid Films**. 486: 86-93.
- Jacob, K.T. and Alcock, C.B. 1974. Thermodynamic of  $\text{CuAlO}_2$  and  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  and phase equilibria in the system  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . **Journal of the American Ceramic Society**. 58(5-6):192-195.
- K. S. Dieter. 1998. **Semiconductor Material and Device Characterization** 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Koyanagi, T.; Harima, H.; Yanase, A. and Katayama-yoshida, H. 2003. Materials design of p-type transparent conducting oxides of delafossite  $\text{CuAlO}_2$  by super-cell FLAPW method. **J. Phys. Chem Solids**. 64: 1443-1446.
- Manifacier, J.C.; Gasiot, J. and Fillard, J.P. 1976. A simple method for the determination of the optical constants  $n$ ,  $k$  and the thickness of a weakly absorbing thin film. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. 9:1002-1004.
- Marquardt, M.A.; Ashmore, N.A. and Cann, D.P. 2006. Crystal chemistry and electrical properties of the delafossite structure. **Thin solid films**. 496: 146-156.
- Moore, D. M. and Reynolds, Jr. R. C. 1989. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York : Oxford University Press Inc.
- Paulson, P. D. and Dutta, V. 2000. Study of in situ  $\text{CdCl}_2$  treatments on CSS deposited CdTe films and CdS/CdTe solar cells. **Thin Solid Films**. 370: 299-306.
- Park, K.; Ko, K. Y. and Seo, W. S. 2005. Thermoelectric properties of  $\text{CuAlO}_2$ . **J. Eur. Ceram. Soc.** 25: 2219-2222.
- Ran, U. and Shock, H. 1999. Future development of  $\text{CdS}/\text{CuInSe}_2$  thin films solar cells. **Appl. Phys. A**. 69(7): 131-147.
- Runyan, W. R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument** 3<sup>rd</sup> ed. New York: Mc Graw-Hill

- Stauber, R.E.; Parilla, P.A.; Perkins, J.D. and Ginley, D.S. 2000 Growth and chemical substitution of transparent P-type  $\text{CuAlO}_2$ . 623: 625.
- Tanaka, K.; Kubota, T. and Sakabe, Y. 2002. Preparation of Piezoelectric  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  on  $\text{ZrO}_2$  Substrate using low temperature firing. **Sens. Actuators A**. 96: 179-183.
- Tilley, J.D. 2004. **Understanding Solids : The Science of Materials**. Chichester : John Wiley & Sons.
- van der Pauw L. J. 1958. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape. **Philips Res. Repts**. 13: 1-9.
- Yuan, Z. C.; Williams, A. J. and Shields, T. C. 2002. The production of hexaferrite thick films by screen printing. **J. Magn. Magn. Mater**. 247: 257-269
- Zribi, M.; Kanzari, M. and Rezig, B. 2005. Optical constants of Na-doped  $\text{CuInS}_2$  thin films. **Material Letters**. 60:98-103.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Pattern</b> : 351401		<b>Radiation</b> = 1.540598		<b>Quality</b> : Calculated		
CuAlO <sub>2</sub>		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Copper Aluminum Oxide		15.678	10	0	0	3
<b>Lattice</b> : Rhombohedral <b>S.G.</b> : R-3m (166)		31.671	40	0	0	6
		36.690	47	1	0	1
<b>a</b> = 2.85670 <b>c</b> = 16.94300 <b>Z</b> = 3		37.851	100	0	1	2
		42.282	23	1	0	4
<b>Mol. weight</b> = 122.53 <b>Volume [CD]</b> = 119.74 <b>Dx</b> = 5.097 <b>Dm</b> = 5.060		48.311	9	0	0	9
		52.870	4	1	0	7
COLOR :Dark blue		57.222	30	0	1	8
		65.263	26	1	1	0
SAMPLE PREPARATION ; Prepared by solid state reaction of Cu <sub>2</sub> O and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> at 1373 K in N <sub>2</sub> atmosphere.		66.123	5	0	0	12
		66.871	15	1	0	10
ANALYSIS :Chemical analysis ( wt.% ) : Cu 51.8, Al 22.1,O 26.1.		67.572	1	1	1	3
		72.423	1	0	1	11
ADDITIONAL PATTERN: To replace 9-185		74.350	9	1	1	6
		77.259	2	0	2	1
GENERAL COMMENTS : 3R polytype		77.979	6	2	0	2
		80.891	2	0	2	4
*Private Communication,(1984) primary reference: Ishizawa, N., Tokyu Institute of Technology, Tokyo, Japan. *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, Volume 39, page 564, (1983) unit cell data : Ishiguro, T.et al.		85.202	3	1	1	9
		90.229	2	0	1	14
<b>Radiation</b> :CuKα <b>Lambda</b> : 1.54180 <b>SS/FOM</b> : F30=45(0.0159,42)		92.305	3	2	0	8
		100.198	3	1	1	12
<b>Fitter</b> : Not specified <b>d-sp</b> : Calculated spacings <b>External Standard</b> : Si		100.900	3	0	2	10
		104.608	2	1	0	16
		109.837	2	0	0	18
		111.194	1	2	1	1
		111.954	4	1	2	2
		112.859	1	0	1	17
		115.046	2	2	1	4
		128.451	3	1	2	8
		138.182	3	3	0	0
		140.439	2	2	1	10
		146.467	1	0	2	16
		147.921	1	0	1	20

Pattern : 71.967		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	
		19.014	2	1	1	1	
<b>Lattice</b> : Face-centered Cubic		<b>Mol. weight</b> = 181.51	31.294	49	2	2	0
<b>S.G.</b> : Fd3m (227)		<b>Volume[CD]</b> = 527.12	36.874	100	3	1	1
<b>a</b> = 8.07800	<b>Z</b> = 8	<b>I/Icor</b> = 3.20	38.557	<1	2	2	2
			44.845	17	4	0	0
			49.121	1	3	3	1
			55.700	13	4	2	2
			59.405	32	5	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 009558		65.289	40	4	4	0	
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 1468.		68.686	<1	5	3	1	
TEMPERATURE FACTOR : ITF		69.800	<1	4	4	2	
		74.184	4	6	2	0	
		77.409	7	5	3	3	
		78.475	1	6	2	2	
		82.700	2	4	4	4	
		85.842	<1	5	5	1	
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refermce: * J.Am.Ceram.Soc., volume 55 , page 395, (1972): Cooley , R.F.,Read,J.S.							
<b>Radiation</b> :CuKα1	<b>Filter</b> : Not specified						
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Calculated spacings						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-1917		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
CuO Copper Oxide		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
<b>Lattice</b> : Monoclinic		32.498	7	1	1	0
<b>S.G.</b> : Cc (9)		35.505	94	0	0	2
<b>a</b> = 4.68930		*35.505	94	-1	1	1
<b>b</b> = 3.42680		38.736	100	1	1	1
<b>c</b> = 5.13210		38.933	30	2	0	0
<b>a/c</b> = 1.36842		46.211	2	-1	1	2
<b>c/b</b> = 1.49764		48.662	28	-2	0	2
<b>Beta</b> = 99.65		51.396	1	1	1	2
<b>Z</b> = 4		53.433	10	0	2	0
<b>Dx</b> = 6.499		56.674	1	0	2	1
<b>I/Icor</b> = 3.91		58.374	14	2	0	2
ICSD COLLECTION CODE : 089758		61.496	19	-1	1	3
TEMPERATURE FACTOR : ATF		65.775	14	0	2	2
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 196		66.180	14	-3	1	1
		67.968	10	1	1	3
		68.059	13	2	2	0
		68.819	<1	-2	2	1
		71.589	<1	-3	1	2
		72.436	6	3	1	1
		72.947	<1	2	2	1
		75.034	6	0	0	4
		75.151	6	-2	2	2
		79.716	<1	0	2	3
		80.081	2	-2	0	4
		82.237	4	-3	1	3
		83.099	4	2	2	2
		83.596	3	3	1	2
		*83.596	3	4	0	0
		86.432	1	-4	0	2
		86.647	1	-2	2	3
		88.075	<1	1	3	0
		*88.075	<1	1	1	4
		89.679	5	-1	3	1
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce : * J.Phys. : Condens. Matter, volume 3,page 8173, (1991): Asbrink, S., Waskowska,A.						
<b>Radiation</b> :CuKα1	<b>Fitter</b> : Not specified					
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 75-1531		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cu <sub>2</sub> O Cuprite / Copper Oxide		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
		29.632	5	1	1	0
<b>Lattice</b> : Cubic	<b>Mol. weight</b> = 143.09	36.503	100	1	1	1
<b>S.G.</b> : Pn3m (224)	<b>Volume[CD]</b> = 77.31	42.402	35	2	0	0
<b>a</b> = 4.26000	<b>Z</b> = 2  <b>I/ICor</b> = 8.28	52.581	1	2	1	1
		61.519	27	2	2	0
		65.703	<1	2	2	1
		69.753	<1	3	1	0
		73.699	20	3	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 031057		77.567	4	2	2	2
REMARKS FROM ICSD : No R value given		85.153	<1	3	2	1
TEST FROM ICSD : At least one TF missing						
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce: * Z. Kristallogr., Kristalltallphys., Kristallchem., volume 57 , page Niggli, P.						
<b>Radiation</b> :CuKα1	<b>Filter</b> : Not specified					
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-2179		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
MgO Magnesium Oxide		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	
		36.940	12	1	1	1	
<b>Lattice</b> : Face-centered Cubic		<b>Mol. weight</b> = 40.30	42.916	100	2	0	
<b>S.G.</b> : Fm3m (225)		<b>Volume [CD]</b> = 74.69	62.308	45	2	2	
<b>a</b> = 4.21140	<b>Z</b> = 4	<b>I/Cor</b> = 3.04	74.694	5	3	1	
			78.634	11	2	2	2
ICSD COLLECTION CODE : 060492							
TEST FROM ICSD : No R value given.							
TEST FROM ICSD : At least one TF missing							
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce:</p> <p>* Z. Anorg. Allg. Chem., Volume 332, page 230, (1940) : Schmahl, N.G., Barthel, J., Eikerling, G.F.</p>							
<b>Radiation</b> :CuKα1		<b>Filter</b> : Not specified					
<b>Lambda</b> : 1.54060		<b>d-sp</b> : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิระนัย เวียงแก เกิดเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2529 เป็นคนฉะเชิงเทราโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ ฉะเชิงเทรา และได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547

นางสาวณัฐพร เค้นประชา เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 เป็นคนชลบุรีโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนชลกันยานุกูล และได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547

นางสาวธีรียา มงคลกวิน เกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 เป็นคนกรุงเทพฯโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนมัธยมวัดคูสิดาราม และได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547