

อภินิพนธ์การ



การสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมา  
SYNTHESIS OF ALUMINIUM ANTIMONIDE BY MICROWAVEINDUCED  
PLASMA HEATING

นางสาววาสนา แอบสมตัว รหัส 55365500  
นายศิวกร สุ่มเกิด รหัส 55365531

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วันลงทะเบียน 7 มิ.ย. 2561

เลขทะเบียน 17224886

เลขเรียกหนังสือ 1/5

ว 491 ก  
๒55๗

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2558



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ      การสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนาต์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำ  
   พลาสมา

ผู้ดำเนินโครงการ      นางสาววาสนา    แอบสมตัว                      รหัส 55365500  
   นายศิวักร            สุ่มเกิด                      รหัส 55365531

ที่ปรึกษาโครงการ      อาจารย์ทศพล    ตรีรุจิราภาพงศ์

สาขาวิชา                      วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา                              วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา                      2558

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์)

.....  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์)

.....  
.....กรรมการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....  
.....กรรมการ  
(อาจารย์นฤมล สีพลไกร)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนีไนด์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมา		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาววาสนา แอบสมตัว	รหัส	55365500
	นายศิวกร สุ่มเกิด	รหัส	55365531
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2558		

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไนด์ (AlSb) ด้วยวิธีความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมาที่กำลัง 1,000 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5, 15 และ 30 นาที ผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer-XRD) ของผงอะลูมิเนียมแอนติโมนีไนด์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่ายังไม่สามารถที่จะทำการสังเคราะห์ให้ได้สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไนด์เพียงเฟสเดียวทั้งหมดได้ ยังคงมีอะลูมิเนียม (Al) และแอนติโมนี (Sb) ปรากฏอยู่ และจากการตรวจสอบการดูดกลืนแสงเพื่อนำไปหาค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct energy band gap,  $E_{g,dir}$ ) ของผงที่สังเคราะห์ด้วยเวลา 5, 15 และ 30 นาทีมีค่าเท่ากับ 4.148 eV, 4.073 eV และ 4.152 eV ตามลำดับ ผลลัพธ์ทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นว่าสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไนด์ที่สังเคราะห์ได้นี้ยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้

Project title : SYNTHESIS OF ALUMINIUM ANTIMONIDE BY  
MICROWAVEINDUCED PLASMA HEATING

Name : Miss.Wasana Aepsomtua ID. 55365500  
Mr.Siwakorn Sumkoet ID. 55365531

Project advisor : Mr.Thotsaphn Threrujirapong

Major : Materials Engineering

Department : Industrial Engineering

Academic year : 2015

.....

## Abstract

The objective of this project is to synthesize the aluminiumantimonide (AlSb) compound by the microwave induced plasma heating method at the power of 1,000 watt for 5, 15 and 30 minute. XRD results of the synthesized AlSb indicated that this method cannot synthesize the single phase of AlSb compound.The original Al and Sb powder are still remaining. The absorbance of the synthesized powder is investigated to determine the direct enery band gap,  $E_{g,dir}$ , which is equal to 4.148, 4.073 and 4.152 eV for 5, 15 and 30 min., respectively. These results indicate that the synthesized AlSb compound could not apply to be a thermoelectric materials.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ปรึกษาโครงการ ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และยังให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นคว้าข้อมูลในการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหา แก้ไขข้อบกพร่อง ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ นฤมล สีพลไกร ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ธวัช สุริวงษ์ อาจารย์ประจำวิทยาลัยพลังงานทดแทน และคุณชานนท์ บุญมีพิพิธ ที่คอยแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนในเรื่องกำลังใจ และค่าใช้จ่ายจนสามารถศึกษา และทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

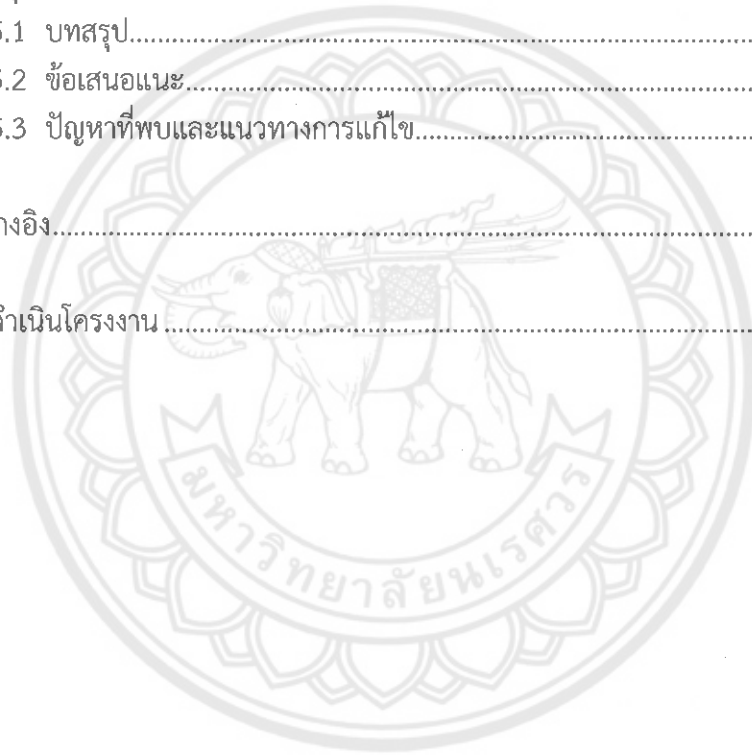
คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม  
นางสาววาสนา แอบสมตัว  
นายศิวกร สุ่มเกิด  
พฤษภาคม 2559

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
1.4 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.2 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect).....	4
2.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect).....	6
2.4 Dimensionless Figure of Merit (ZT).....	7
2.5 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials).....	8
2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module ).....	13
2.7 ระบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System).....	16
2.8 อะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (Aluminium Antimonide : AlSb).....	20
2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	21
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	30
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	30
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	33
4.1 การวิเคราะห์เฟส.....	33
4.2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters).....	35
4.3 โครงสร้างอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb).....	36
4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์.....	37
4.5 ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) .....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	43
5.1 บทสรุป.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	46



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....3
2.1	สมบัติทางเคมีของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ .....21
2.2	สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์.....21
2.3	ค่าแถบช่องว่างพลังงานของแกลเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) ที่แตกต่างกันภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป .....26
2.4	ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอะลูมิเนียมแอนติโมนด์(AlSb) ที่แตกต่างกันภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป .....26
3.1	ตราส่วนทางเคมี (Stoichiometric Ratio) ตามอัตราส่วนประกอบของ AlSb เปลี่ยนไป.....30
4.1	ค่า Lattice Parameter ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb).....34
4.2	แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง ( $E_{g,dir}$ ) ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์.....41
4.3	แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ( $E_{g,ind}$ ) ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์...42





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรถอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ซีเบค .....5
2.2	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า .....5
2.3	วงจรถอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลเทียร์.....6
2.4	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริก .....6
2.5	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล.....7
2.6	วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) สูงเทียบกับอุณหภูมิ ..8
2.7	ความสัมพันธ์ของค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการใช้งานในปัจจุบัน .....9
2.8	แถบพลังงาน ของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ.....9
2.9	การส่องผ่านพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรงของวัสดุกึ่งตัวนำ .....10
2.10	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ .....13
2.11	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี .....13
2.12	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า .....13
2.13	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า.....13
2.14	ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า .....14
2.15	ตัวอย่างการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลการผลิตกระแสไฟฟ้า.....15
2.16	ไดอะแกรมการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็น และปั๊มความร้อน .....15
2.17	การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็น และปั๊มความร้อน .....16
2.18	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....17
2.19	การใช้ประโยชน์จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามความถี่ และความยาวคลื่น .....17
2.20	ตัวอย่างทั้ง 4 สถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมา .....19
2.21	ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมา กับค่าเอนทัลปีของระบบ (Enthalpy of System) .....19
2.22	โครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) .....19
2.23	แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD).....21
2.24	ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พีคตัวอย่างที่ต้องการทราบ .....23
2.25	ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....23
2.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงผ่านเข้า ( $I_0$ ) และผ่านออก ( $I$ ) ของตัวอย่าง .....24
2.27	เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS-Spectrophotometer) .....25
2.28	ส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านฟิล์มบาง AlSb ที่มีความหนา 1,000Å.....26
2.29	ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และ 500 เคลวิน .....26
2.30	FESEM ของฟิล์มบาง AlSb ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค PLD ของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน .....28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....30
4.1	รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟพลาสมา ที่กำลัง 1,000 วัตต์.....34
4.2	โครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลา 30 นาที.....36
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟพลาสมา กำลัง 1,000 วัตต์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร.....38
4.4	แสดงกราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Band Gap) ที่สถานะเงื่อนไข กำลัง 1,000 วัตต์.....40
4.5	กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap) ที่สถานะเงื่อนไข กำลัง 1,000 วัตต์.....42



## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

FCC	=	โครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic
Å	=	อังสตรอม
eV	=	อิเล็กตรอนโวลต์
kg/mol	=	กิโลกรัมต่อโมล
$\text{Cm}^2/\text{V.s}$	=	ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที
kPa	=	กิโลปาสกาล
cps	=	รอบต่อวินาที (Cycles Per Second)
GHz	=	จิกะเฮิรต์
Hz	=	เฮิรต์



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันพลังงานนับเป็นปัญหาใหญ่ในประเทศนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อการพัฒนาของประเทศไทยมากขึ้น เพราะเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น จะมีปริมาณน้อยลงทุกที และคงหมดไปในอนาคต นอกจากนี้ราคาของเชื้อเพลิงดังกล่าวยังมีความผันผวนไปในแนวทางที่สูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจ และการเมืองของประเทศ แหล่งพลังงานดังกล่าวนี้เป็นแหล่งพลังงานสิ้นเปลือง และเป็นต้นเหตุก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม และถึงแม้ว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังน้ำซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนก็ตามแต่ก็มีสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นจึงพยายามคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ ๆ ที่ประหยัด และไม่มีวันสิ้นสุดซึ่งบางชนิดก็นำมาใช้บ้างแล้ว เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานเคมีจากไฮโดรเจน พลังงานชีวมวล และยังมีพลังงานที่ได้จากวัสดุพลังงานชนิดหนึ่งที่เรียกว่า “วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก” (Thermoelectric Materials, TE)

ดังนั้นเราจึงมีการจัดทำโครงการด้านวัสดุพลังงาน (Energy of Materials) ที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน และอนาคต เช่นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งพลังงานทดแทนหลักอีกชนิดหนึ่งได้ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงพร้อมทั้งสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนอีกด้วย โดยปรากฏการณ์ทั้งสองชนิดนี้เกิดขึ้นภายในวัสดุเท่านั้น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัย และพัฒนาให้วัสดุชนิดนี้สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีสมบัติที่ดี [1]

อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) เป็นสารประกอบที่นำมาพัฒนา และประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Dice) โดยใช้ระบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma) ที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใช้เวลาในการสังเคราะห์สั้น และเหมาะสมที่สุดที่จะใช้อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) โดยวิธีไมโครเวฟพลาสมา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ในสถานะของแข็ง (Solid-state) โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟพลาสมา

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์เฟส และสมบัติการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

1.2.3 เพื่อคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.3.1 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงการ และสารที่สังเคราะห์ได้มาพัฒนาต่อยอดเพื่อสามารถนำไปสู่การใช้งานจริงทางเทอร์โมอิเล็กทริก

1.3.2 สามารถสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) โดยใช้วิธีไมโครเวฟพลาสมาเพื่อใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้

## 1.4 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.4.1 ทำการสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) โดยใช้สารตั้งต้นเป็นผงอะลูมิเนียม (Al) และผงแอนติโมน (Sb)

1.4.2 สังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์

1.4.3 เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) คือ 5 ,15 และ 30 นาที

1.4.4 วิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

1.4.5 ทดสอบการดูดกลืนรังสีของสารอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS-Spectrophotometer)

## 1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.5.1 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.5.2 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

สิงหาคม 2558 - พฤษภาคม 2559



## บทที่ 2

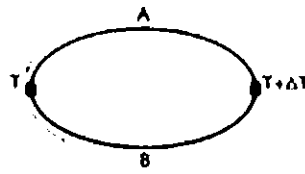
### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [2]

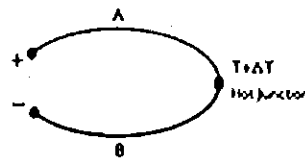
วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials: TE) เป็นวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยผ่านปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) หรือสามารถผันกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนหรือความเย็นได้โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล (Thermoelectric Module) ผ่านปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier Effect) ถือได้ว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งพลังงานทดแทนหลักที่สามารถผันพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยความร้อนที่ใช้สามารถใช้ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) จากกระบวนการต่าง ๆ ได้ ซึ่งกระบวนการผันไฟฟ้าจากความร้อนนี้เกิดขึ้นในวัสดุเท่านั้น ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ส่วนใดเคลื่อนที่ระหว่างการทำงานยิ่งกว่านั้นยังเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สะอาดอีกด้วยอีกด้านหนึ่งของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถทำความเย็น (Refrigeration) และปั๊มความร้อน (Heat Pump) ได้โดยไม่ทำลายธรรมชาติ เพราะไม่มีการใช้สารทำความเย็นในกระบวนการสามารถ นำมาผลิตตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกหรือตู้เย็นพกพา และเครื่องปรับอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นต้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกด้านความเย็นแล้วยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการผลิตความร้อนด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น เครื่องทำน้ำอุ่น เห็นได้ว่าข้อดีของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคือ น้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก และทำงานเงียบ เพราะไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนไหวตลอดการทำงาน

#### 2.2 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) [3]

เมื่อให้ความร้อนหรือความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของวัสดุตัวนำสองชนิด แล้วทำให้ไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ซีเบค” (Seebeck Effect) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับการผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรมันถูกทำให้เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อของวัสดุที่ตัวนำทั้งสอง (A และ B) ส่งผลให้ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรมากขึ้น ทำให้พาหะอิสระหรือประจุ (Free Carrier) บริเวณปลายด้านร้อน (Hot Junction) มีพลังงานจลน์สูงขึ้น และมากกว่ารอยต่อด้านเย็น จนถึงจุดอิมิตัวจุดหนึ่งของพาหะอิสระแล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back Electromotive Force: E.M.F) ซึ่งมีทิศการไหลตรงข้ามกับการไหลของพาหะอิสระ ถ้าเปิดปลายจูดรอยต่อด้านหนึ่งออกดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปลายด้านเปิด เรียกความต่างศักย์วงจรเปิดหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า “ความต่างศักย์ซีเบค” (Seebeck Voltage)



ก)



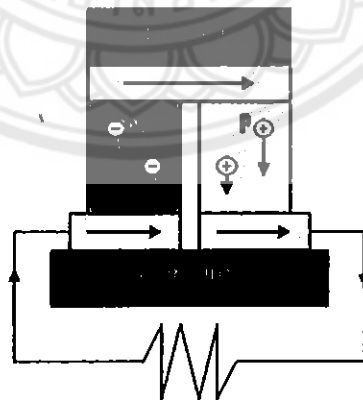
ข)

รูปที่ 2.1 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ซีเบค [3]

ก) ความต่างศักย์วงจรปิดของความต่างศักย์ซีเบค

ข) ความต่างศักย์วงจรเปิดของความต่างศักย์ซีเบค

วัสดุตัวนำหรือโลหะตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าได้ทั้งบวก และลบตามสมบัติของวัสดุนั้น ๆ เช่นถ้าวัสดุมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าวัสดุมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type Semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นบวก รูปที่ 2.2 แสดงการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ซีเบคผ่านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Power Generation) จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

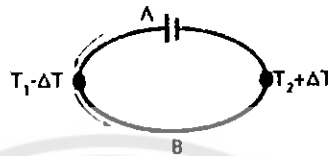


รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า [4]



### 2.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุตัวนำสองชนิดที่ต่อกันแล้วทำให้ความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อวัสดุนำสองชนิด ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสเรียกว่า “ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)” [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายในผ่านเข้าไปในวงจรผ่านวัสดุตัวนำ A และ B ทำให้จุดต่อวงจร  $T_{2+\Delta T}$  มีอุณหภูมิสูงขึ้น และ  $T_{1-\Delta T}$  มีอุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากการไหลของพาหะอิสระตามการเหนี่ยวนำของการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจร



รูปที่ 2.3 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลเทียร์ [3]

การใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพลเทียร์นั้นสามารถนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ทำเป็นตู้เย็นจากความผันผวนความร้อนจากไฟฟ้ากระแสตรง (Thermoelectric Refrigeration) หรือปั๊มความร้อน (Heat Pump) ได้โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่เลือกมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีอยู่สองชนิดคือวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดพี และชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ โดยลักษณะการต่อเหมือนกับเทอร์โมคูลอิเล็กทริกแบบผลิตกระแสไฟฟ้า

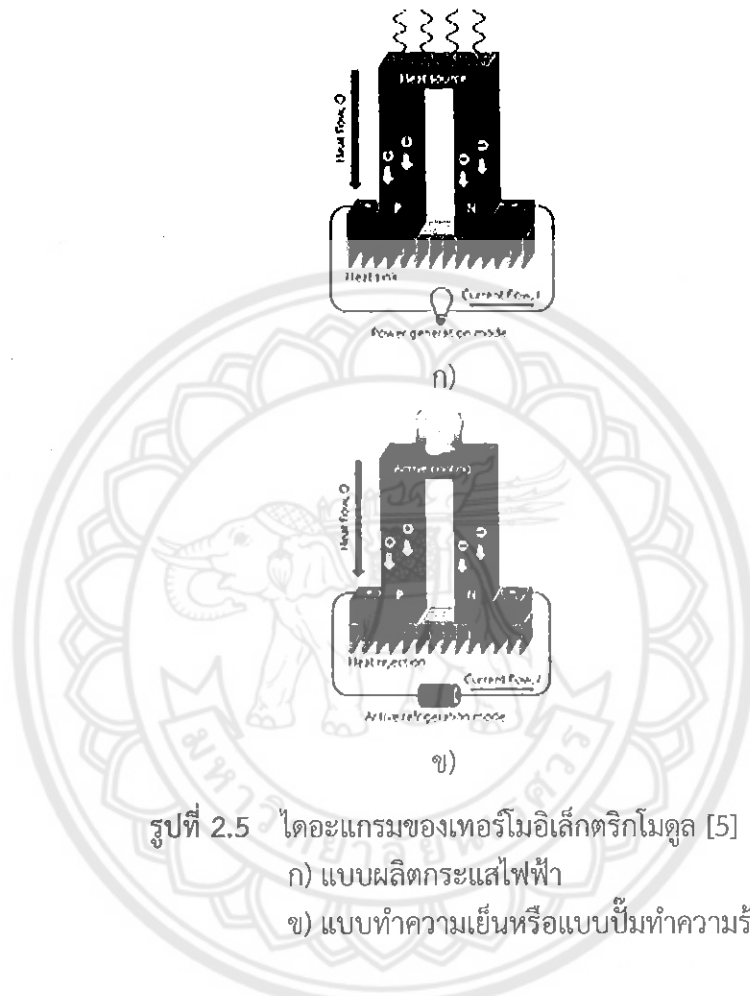


รูปที่ 2.4 โดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริก [5]

ก) แบบผลิตกระแสไฟฟ้า

ข) แบบความเย็นหรือปั๊มสำหรับความร้อน

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยปรากฏการณ์ซีเบคโดยผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า และปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่ผันเป็นกระแสไฟฟ้าความร้อนหรือความเย็นดังแสดงในรูปที่ 2.5 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบไปด้วยวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี และเอ็นมาต่อกันแบบอนุกรม โดยรูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้าจากความร้อน และรูป 2.5 แสดงการทำงานแบบทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน



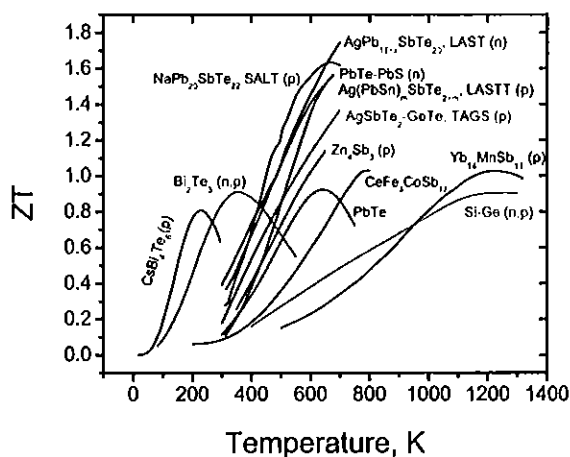
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [5]

ก) แบบผลิตกระแสไฟฟ้า

ข) แบบทำความเย็นหรือแบบปั๊มทำความร้อน

## 2.4 Dimensionless Figure of Merit (ZT)

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกถูกแสดงด้วยค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) ซึ่งเป็นค่าที่ไร้หน่วย ทำให้ง่ายในการเปรียบเทียบสัมประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิด ตามอนุสมการของการใช้งาน



รูปที่ 2.6 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) สูงเทียบกับอุณหภูมิ [6]

สรุปคือการที่วัสดุมีค่า Dimensionless figure of merit (ZT) สูง ๆ หรือมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูง ๆ นั้น วัสดุต้องมีสมบัติดังนี้

2.4.1 วัสดุต้องมีค่าซีเบคที่สูงเพื่อเพิ่มการถ่ายเทพลังงานความร้อนด้วยพาหะหรือประจุไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด

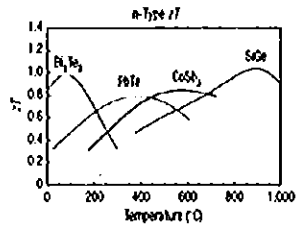
2.4.2 วัสดุมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำหรือมีการนำไฟฟ้าที่สูง เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนกลับไปเป็นพลังงานความร้อน

2.4.3 วัสดุต้องมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมาก ๆ เพื่อรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของด้านร้อน และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

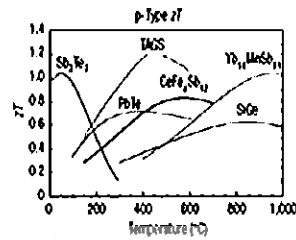
ในรูปที่ 2.6 พบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดมีค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) ที่สูงแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้น ๆ ดังนั้นการเลือกวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งานควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่นำไปใช้งานด้วย [6]

## 2.5 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) [7]

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (N-type) และเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี (P-type) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้งานในปัจจุบันมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีประสิทธิภาพสูงนั้น การเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาใช้งานก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน



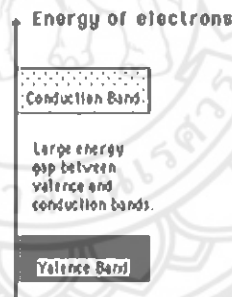
ก)



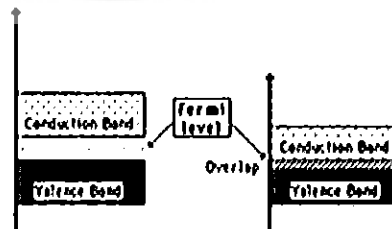
ข)

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของค่า Dimensionless Figure of Merit (ZT) ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการใช้งานในปัจจุบัน [7]  
 ก) ชนิดเอ็น (N-type)  
 ข) ชนิดพี (P-type)

2.5.1 แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap)



ก)



ข)

รูปที่ 2.8 แถบช่องว่างพลังงาน [7]

ก) ฉนวน

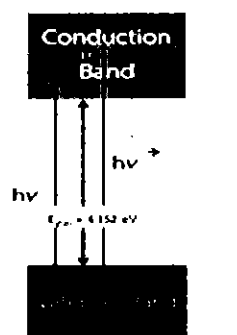
ข) สารกึ่งตัวนำและ ตัวนำ

รูปที่ 2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์ และแถบนำกระแสของ ฉนวนจะมาก ดังนั้นอิเล็กตรอนในฉนวน จึงเคลื่อนที่ได้ยาก เป็นผลให้ฉนวนไม่นำกระแสในสภาวะ ปกติ ส่วนสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างระหว่างระดับพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) น้อยกว่า ฉนวน จึง นำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่า ส่วนตัวนำ จะนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุด เพราะแถบระดับพลังงานของ อิเล็กตรอนทั้งสองย่านนั้นทับซ้อนกันซึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นเราจะ สังเคราะห์สารให้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ

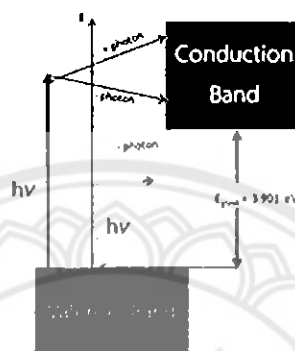
### 2.5.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) คือวัสดุที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบ พลังงาน (Energy Gap) อยู่ระหว่างสารนำไฟฟ้า (Conductor) กับฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ จะไม่นำไฟฟ้าในสภาวะปกติแต่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงไฟฟ้าหรือความร้อน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ที่ได้รับ พลังงานกระตุ้นจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำ ไฟฟ้า (Conduction Band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้เกิด สภาพนำไฟฟ้าได้

รูปที่ 2.9 การดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุด ของแถบเวเลนซ์ขึ้นไปจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืน แสงพื้นฐาน (Fundamental Absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นของสเปกตรัมมีการ ดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Absorption Edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มี ความสัมพันธ์กับโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ซึ่งบางครั้งจำเป็นต้องแสดงลักษณะ แถบพลังงานเป็นฟังก์ชันเลขคลื่น (Wave Number :  $k$ ) ของอิเล็กตรอนในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบ เวเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่ตำแหน่งพอดี เราเรียกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะ ส่งผ่านพลังงานแบบตรง หรืออาจเรียกว่าแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) ส่วนในกรณีที่ ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เราเรียกสารกึ่ง ตัวนำที่มีลักษณะการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่ตรงนี้อาจเรียกว่าแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Bandgap)



ก)



ข)

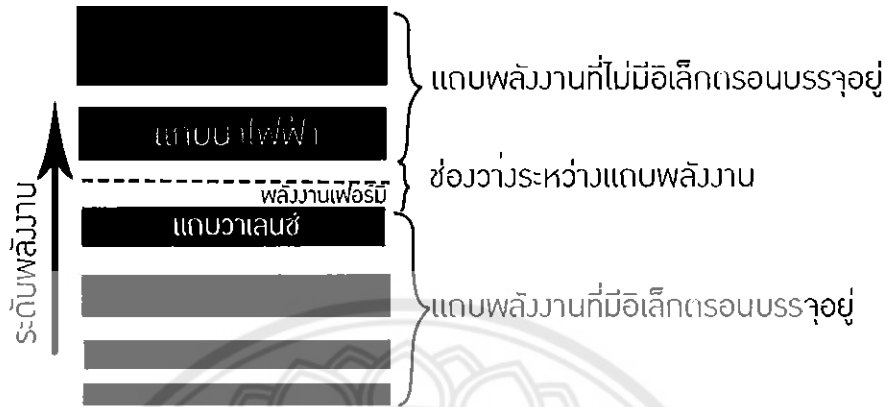
รูปที่ 2.9 การส่งผ่านพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ  
 ก) การส่งผ่านพลังงานแบบตรง  
 ข) การส่งผ่านพลังงานแบบไม่ตรง

จากลักษณะการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรง จุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ในแนวตั้งกับจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใด ๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงกระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) ซึ่งได้แก่การรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมให้กับโครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่ ในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมขอทางระบบจะยังรักษาให้คงที่ไว้ได้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ แต่เมื่ออยู่ในสถานการณ์ปล่อยพลังงานแบบรวมตัวใหม่ (recombination emission) จะไม่มีประสิทธิภาพที่ดี ดังนั้นวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเราจะไม่พบการใช้งานเป็นอุปกรณ์เปล่งแสงได้เลย

### 2.5.3 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy Band Model)

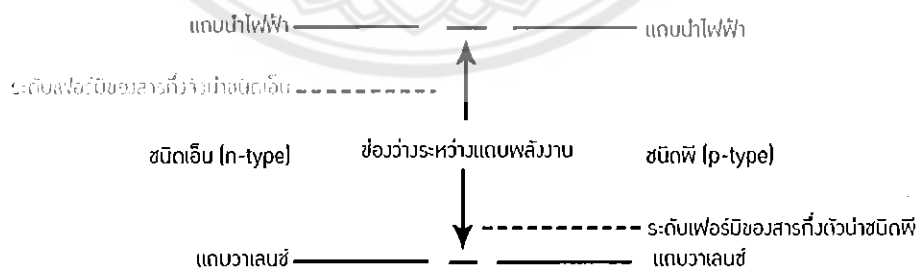
แบบจำลองแถบพลังงานคือ แบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็ง โดยระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอมจะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงาน (Energy Band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy Gap หรือ Band Gap;  $E_g$ ) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำอะตอมสร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็น

โครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence Band) ส่วนแถบพลังงานชั้นนอกจะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า แถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) แบบจำลองแถบพลังงานสามารถนำมาใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารนำไฟฟ้า (Conductor) เช่น โลหะ (Metal) ฉนวน (Insulator) และสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.10 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [7]

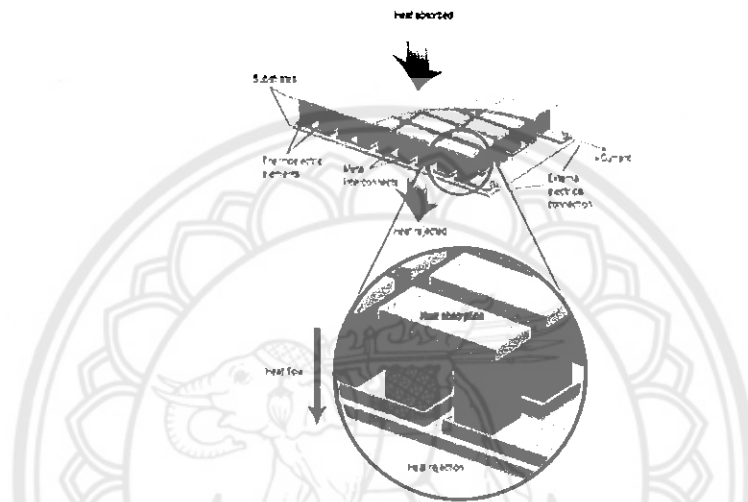
ระดับเฟอร์มิ คือ ระดับพลังงานสมมติค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะมีโอกาสพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Equilibrium) ณ เวลาใด ๆ ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่าง ๆ เป็นไปตามฟังก์ชันของเฟอร์มิดิแรก (Fermi-Dirac Distribution Function) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เติมธาตุเจือปนชนิดพี (P-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และชนิดเอ็น (N-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิใกล้แถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ (P-type, N-type) ได้



รูปที่ 2.11 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี [7]

## 2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module) [7]

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น และ ชนิดพี โดยวัสดุทั้งสองชนิดมาต่อกันแบบอนุกรมเป็นคู่ ๆ สลับกัน และมีขั้วไฟฟ้าโลหะเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน แต่ละคู่ที่ต่อกันมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้าย ที่ด้านบนและด้านล่างของโลหะเชื่อมต่อถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก เมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าไหลก็ทำให้ครบวงจรพอดี ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิตได้จากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบน (ดูดความร้อน) และด้านล่าง (คายความร้อน) ขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พีโมดูลนั้น ดังแสดงในรูป 2.12 และ 2.13

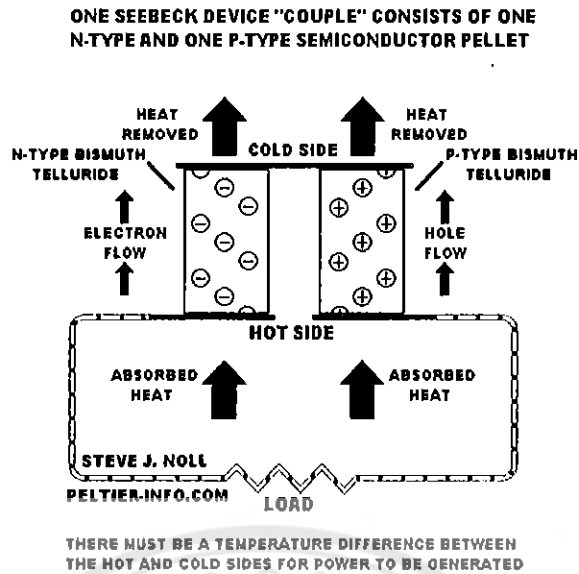


รูปที่ 2.12 โดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า [7]



รูปที่ 2.13 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า [7]

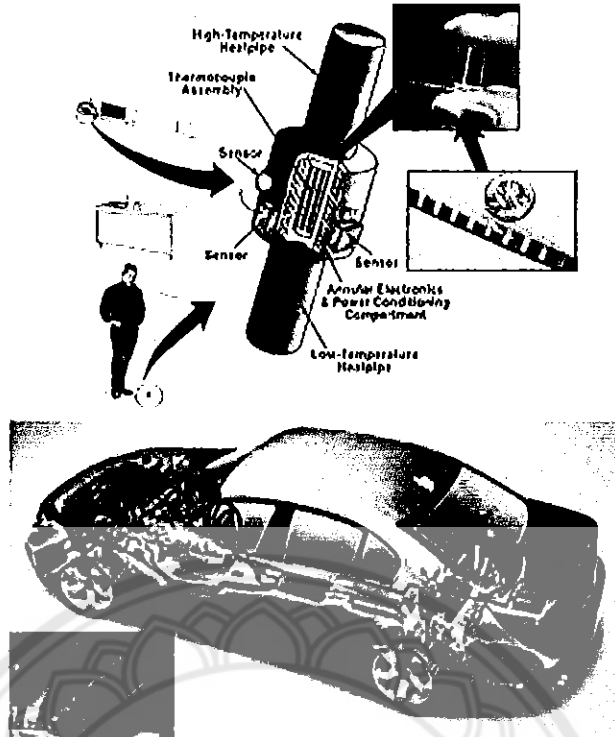




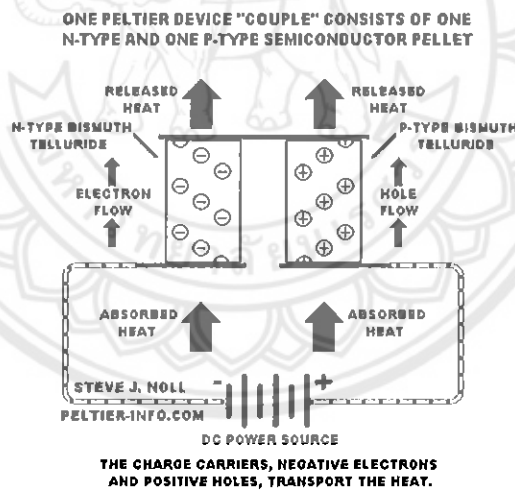
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า [8]

### 2.6.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

การประยุกต์ใช้งานกระแสไฟฟ้าใช้หลักการของปรากฏการณ์ซีเบคของการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการผันความร้อนที่ถ่ายโอนจากด้านร้อนสู่ด้านเย็นเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งความร้อนหรือแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนอิสระเกิดการเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็น และในส่วนของวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี โฮลอิสระเสมือนเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็นเช่นเดียวกัน จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากการถ่ายโอนของประจุระหว่างขั้วทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.14 การใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในปัจจุบันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีหลายรูปแบบดังรูป 2.15 เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งจากท่อเสียรถยนต์ ความร้อนจากร่างกายมนุษย์ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่นาฬิกา และอื่น ๆ



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลการผลิตกระแสไฟฟ้า [9]

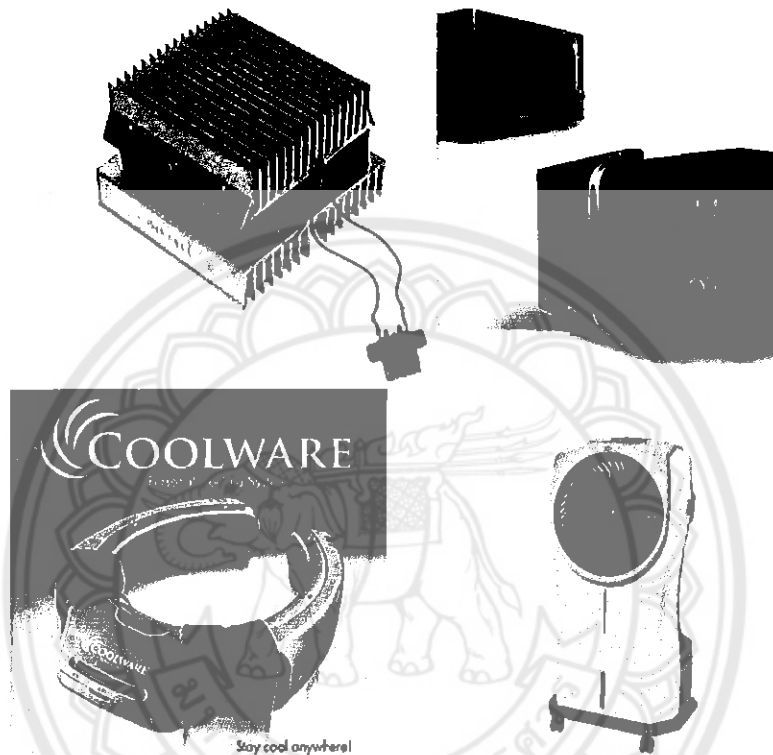


รูปที่ 2.16 โดอะแกรมการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็น และปั๊มความร้อน [8]

### 2.6.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน

การประยุกต์ใช้เพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อนนั้นใช้หลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยกระแสไฟฟ้าที่เข้าจ่ายไปมีผลทำให้อิเล็กตรอนในวัสดุชนิดเอ็นเคลื่อนที่สวนทางกับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า และในทางกลับกันโฮลในวัสดุชนิดพีถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ตามกระแสไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลนั้นมีการนำความร้อนมาด้วยจนทำให้เกิดด้านหนึ่งร้อน และอีกด้านหนึ่งเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.16

การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำความเย็น และปั๊มความร้อนนั้นมีหลายอย่างด้วยกันเช่น การประยุกต์ใช้กับตู้เย็นแบบพกพาอุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์เครื่องปรับอากาศแบบพกพาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่หรือใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปเครื่องทำความเย็นสำหรับเก็บยาวัคซีนหรือตัวอย่างต่าง ๆ ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือพกพาเนื่องจากมีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ทำความร้อน และความเย็นเพื่อปรับอุณหภูมิภายในบ้านโดยมีการใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น



รูปที่ 2.17 การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็น และปั๊มความร้อน [10]

## 2.7 ระบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System)

### 2.7.1 ไมโครเวฟ (Microwave)





ไมโครเวฟ (Microwave) เป็นแหล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือเป็นคลื่นความถี่วิทยุชนิดหนึ่งที่มีความสูงระหว่าง 0.3GHz-300 GHz ความยาวคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ช่วง 100 เซนติเมตร-0.1 เซนติเมตร ดังนั้นคลื่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่าไมโครเวฟซึ่งแปลว่าคลื่นสั้นมากสำหรับการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1 GHz- 60GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยความถี่อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูป 2.18 โดยคลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุ Radio Wave  $1-10^3$  H กับอินฟราเรด (Infrared,IR) [11] รูปที่ 2.19 แสดงการใช้ประโยชน์จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปตามความถี่ และความยาวคลื่น



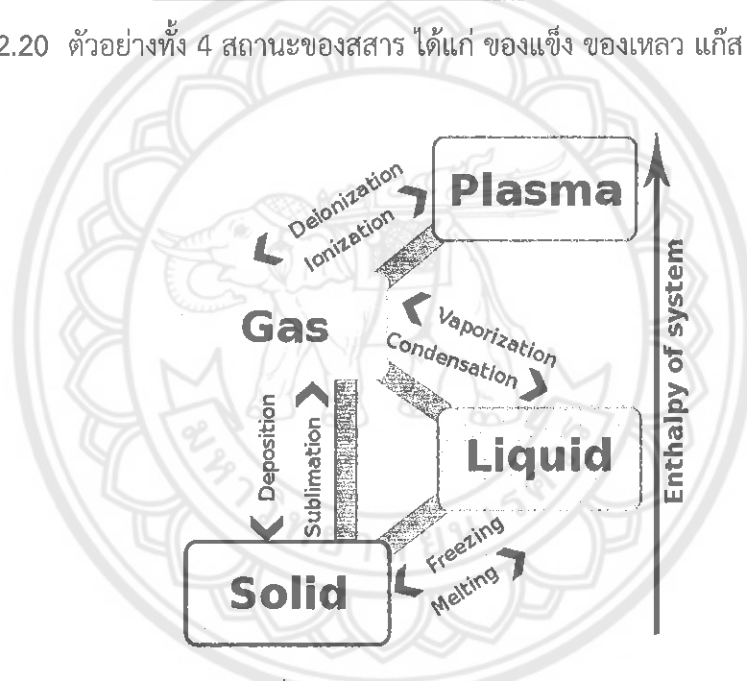
ดังนั้นอาหารจึงร้อนขึ้น และกระบวนการนี้เกิดขึ้นเร็วมาก คลื่นนี้ไม่ทำให้สิ่งที่ทำจากกระดาษ กระเบื้องเคลือบ หรือแก้วร้อนขึ้น การใช้ไมโครเวฟในการปรุงอาหารนอกจากมีความสะดวก ใช้เวลาสั้นลงแล้วยังประหยัดพลังงานอีกด้วย ในปี ค.ศ. 1945 เริ่มมีการผลิตเตาไมโครเวฟออกจำหน่ายแต่ยังมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการใช้ในครัวทั่วไป ต้องใช้เวลาอีกนานกว่าจะสามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็ก และราคาถูกลง จึงเริ่มเป็นที่นิยมใช้ตามบ้าน เนื่องจากนี้ความถี่ช่วงไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวาง เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Communication Equipment) เรดาร์ อุปกรณ์นำร่องทางการบิน และการเดินเรือ (Navigational Equipment) นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในการให้ความร้อนทางอุตสาหกรรม และการรักษาโดยใช้ความร้อน และเตาไมโครเวฟตามบ้านเรือน ทางอุตสาหกรรม และในเชิงพาณิชย์เป็นจำนวนมาก [13]

### 2.7.2 ไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma) [14]

โดยปกติสถานะของสสารมีของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีความแตกต่างกันตรงความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุล กล่าวคือ ของแข็งมีการยึดเหนี่ยวของโมเลกุลที่หนาแน่นกว่า และแก๊สแทบไม่มีแรงนั้นเลย โดยทั่วไปของแข็งเกิดเมื่ออุณหภูมิต่ำ และเปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และหากเพิ่มอุณหภูมิต่อเนื่อง ของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแก๊ส ตัวอย่างที่เราพบได้ในชีวิตประจำวันดังแสดงในรูปที่ 2.16 คือ น้ำแข็ง น้ำ และไอน้ำ จากนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานสูงมาก สสารก็อาจเข้าสู่สถานะหนึ่งๆที่เรียกว่า “พลาสมา” ในทางฟิสิกส์ และเคมีถือว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร คือสถานะที่แก๊สมีสภาพเป็นไอออน และเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมรสภาพของแก๊สเป็นไอออนหมายความว่าเมื่ออิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุลของแก๊สเกิดประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมา มีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารกับเอนทัลปี (Enthalpy) พบว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว แก๊ส และ พลาสมา ตามลำดับขั้นตอนนั้น ส่งผลให้ค่าเอนทัลปีของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นต่อไปด้วยพลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลางเมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก และทำให้แก๊สแตกตัว และกลายเป็นพลาสมาในที่สุดพลาสมาที่สร้างจากการประยุกต์ใช้ในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กสำหรับใช้ในห้องแล็บหรืออุตสาหกรรมสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example: <b>Ice</b> $H_2O$	Example: <b>Water</b> $H_2O$	Example: <b>Steam</b> $H_2O$	Example: <b>Ionized Gas</b> $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
<b>Cold</b> $T < 0^\circ C$	<b>Warm</b> $0 < T < 100^\circ C$	<b>Hot</b> $T > 100^\circ C$	<b>Hotter</b> $T > 100,000^\circ C$ ( $> 10$ electron Volts)
			
<b>Molecules Fixed In Lattice</b>	<b>Molecules Free to Move</b>	<b>Molecules Free to Move, Large Spacing</b>	<b>Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing</b>

รูปที่ 2.20 ตัวอย่างทั้ง 4 สถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมา [14]



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมากับค่าเอนทัลปีของระบบ (Enthalpy of System) [14]

2.7.2.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดพลาสมาไฟฟ้ากระแสตรงคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) และไมโครเวฟ

2.7.2.2 ความดันขณะเกิดพลาสมาความดันสุญญากาศ (น้อยกว่า 10 มิลลิทอร์) ความดันปานกลาง (1 ทอร์) และ ความดันบรรยากาศ (760 ทอร์)

2.7.2.3 ระดับความเป็นไอออนในพลาสมาสามารถแบ่งเป็นไอออนทั้งหมดไอออนบางส่วน และไอออนเล็กน้อย

2.7.2.4 อุณหภูมิที่สัมพันธ์กับพลาสมา: พลาสมาความร้อน (Thermal Plasma) โดยที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนเท่ากับอุณหภูมิไอออน และอุณหภูมิแก๊ส ( $T_e = T_{ion} = T_{gas}$ ) และพลาสมาเย็น (Non-Thermal หรือ Cold Plasma) โดยอุณหภูมิอิเล็กตรอนมากกว่าอุณหภูมิไอออน และอุณหภูมิแก๊ส และส่วนอุณหภูมิไอออนเท่ากับอุณหภูมิแก๊ส ( $T_e \gg T_{ion} = T_{gas}$ )

2.7.2.5 โครงสร้างของอิเล็กโทรดที่กำเนิดพลาสมา

2.7.2.6 สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคในพลาสมา

ก. มีความเป็นแม่เหล็ก (Magnetized) โดยทั้งไอออน และอิเล็กตรอนถูกกักขังด้วยสนามแม่เหล็ก

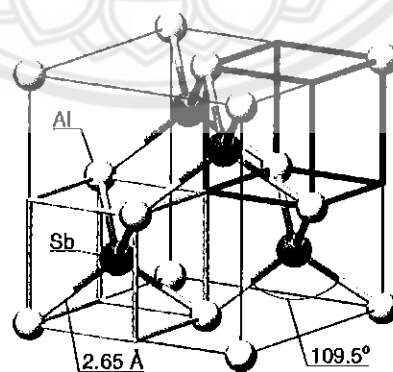
ข. มีความเป็นแม่เหล็กบางส่วน (Partial Magnetized) เฉพาะอิเล็กตรอนเท่านั้นที่ถูกกักขังด้วยสนามแม่เหล็กไม่มีความเป็นสนามแม่เหล็ก (Non-magnetized) สนามแม่เหล็กมีความเข้มอ่อนมากจนไม่สามารถกักขังอนุภาคไว้ได้

2.7.2.7 แบ่งตามการประยุกต์ใช้งาน

## 2.8 อะลูมิเนียมแอนติโมนิไดต์ (Aluminium Antimonide : AlSb) [15]

อะลูมิเนียมแอนติโมนิไดต์เป็นสารประกอบของธาตุอะลูมิเนียม (Al) และธาตุแอนติโมนิไดต์ (Sb) มีลักษณะเป็นผงสีเทาเงิน และมีลักษณะคล้ายกับอินเดียมแอนติโมนิไดต์ซิงค์แอนติโมนิไดต์ และแกลเลียมแอนติโมนิไดต์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแถบช่องว่างพลังงานที่แคบ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้ในทรานซิสเตอร์เครื่องตรวจจับอินฟราเรด และอิมเมจความร้อนเช่นเดียวกับอุปกรณ์แมกนีโทริซิสทีบซึ่งอะลูมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเยี่ยม และนำความร้อนได้ดีกว่าเหล็กถึงสามเท่า ด้วยสมบัตินี้ทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความสำคัญกับทั้งงานที่ใช้ความเย็น และความร้อน ประกอบกับ แอนติโมนิเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งคาดว่าน่าจะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้ดีต่อไปในอนาคต

### 2.8.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไดต์



รูปที่ 2.22 โครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไดต์ (AlSb) [15]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไดไซด์

สมบัติทางเคมี	
สูตรทางเคมี	AlSb
น้ำหนักโมเลกุล	148.742 kg/mol
สีที่ปรากฏ	สีเทา
โครงสร้างผลึก	ลูกบาศก์ (FCC)
ค่าคงที่ของแลตทิส	6.1355 อังสตรอม

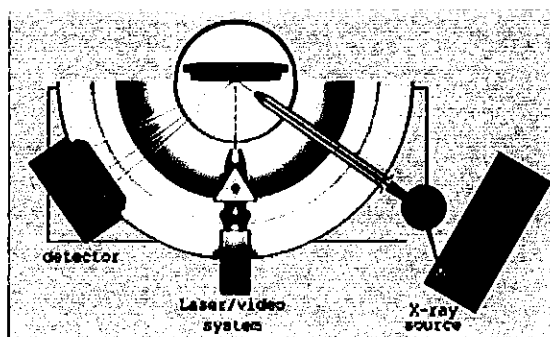
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไดไซด์

สมบัติทางไฟฟ้า	
ค่าคงที่ความจุไฟฟ้า	11
Band Gap	1.83 eV
Electron Mobility	200-400 $\text{Cm}^2/\text{V-s}$
Hole Mobility	550 $\text{Cm}^2/\text{V-s}$

การเตรียมสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนีไดไซด์ (AlSb) ในปัจจุบันนั้นมีมากมายหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป การเลือกวิธีสังเคราะห์นั้นขึ้นอยู่กับว่ามีความต้องการ AlSb ไปประยุกต์ใช้งานในด้านใด การสังเคราะห์สามารถกำหนดหรือออกแบบการสังเคราะห์ให้ได้ขนาด และรูปร่างของ AlSb ตามต้องการ ทั้งขนาดระดับไมโครเมตรหรือระดับนาโนเมตรหรือรูปร่างต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น เป็นแผ่น เป็นท่อ เป็นผงละเอียด เป็นต้น ตัวอย่างรายละเอียดการรายงานผลการสังเคราะห์ AlSb ดังนี้

## 2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

### 2.9.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) [16]



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) [16]

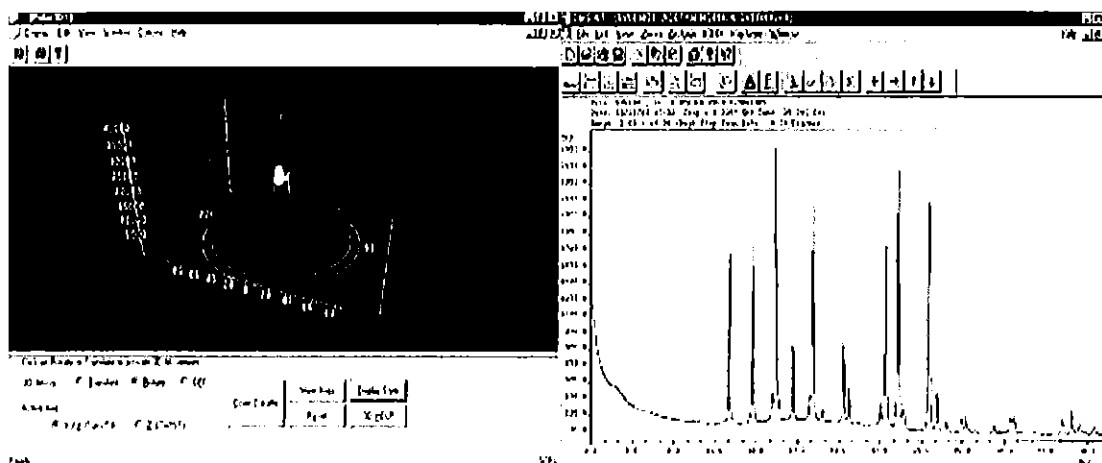


เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคได้แก่

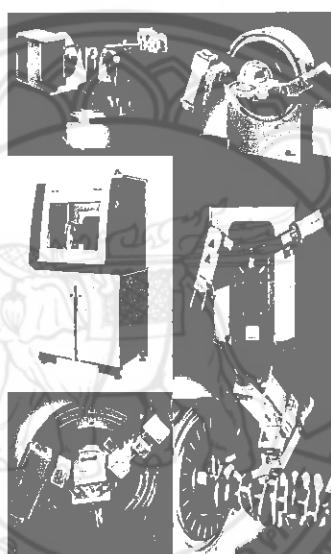
2.9.1.1 Single-crystal Methods โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอมความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น ( Laue Method ) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic Plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้ม และตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนแต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุน และอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบน จากวิธีการดั้งเดิมวิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุมโดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้การกระจายออกของลำแสงที่เรียกว่า Diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวม และจัดการข้อมูลซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

2.9.1.2 Powder Method ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้วิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุโดยจะใช้บอกร่องประกอบ และตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-crystal Methods คือแต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบนแต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้ การทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เทคนิค X-ray Powder Diffractometry นั้นจะใช้ลำรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวฉายลงบนตัวอย่างที่ถูกวางอยู่บนแท่นหมุนเป็นมุม 0-90 องศา รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแล้วบันทึกบน Inked Strip Chart เครื่องตรวจวัดจะหมุนไปพร้อม ๆ กับแท่นหมุน แต่จะหมุนเป็นมุมและ Strip Chart จะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุน และเครื่องตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เครื่องตรวจวัดได้ แล้วนำมาพล็อตกราฟ Diffractogram ซึ่งประกอบด้วยพีคต่าง ๆ โดยที่พีคแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาค่าระยะห่างของแต่ละพีคแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เป็นต้นก็จะสามารถหาปริมาณสัมพันธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้



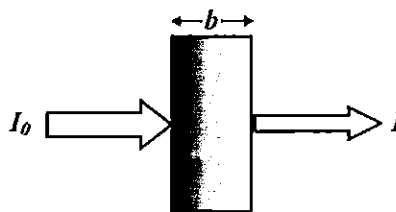
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พีคตัวอย่างที่ต้องการทราบ [16]



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [16]

### 2.9.2 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis-Spectrophotometer) [17]

โดยทั่วไปแล้ว UV-Vis-Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งในปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นเทคนิคง่าย ๆ ประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง มีความรวดเร็ว มีความรวดเร็วสูง การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ “เบียร์แลมเบิร์ต” (Beer Lambert’s Law) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กฎของเบียร์ซึ่งมีใจความดังนี้ “ สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นที่ดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียล (Exponential’s Law) กับความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนรังสี และความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านตัวอย่าง” หรือได้กล่าวไว้ว่า เมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้มเริ่มต้น ( $I_0$ ) เข้าไปในสารตัวอย่างสารที่มีความหนาเท่ากับความหนาของสารละลายตัวอย่างทำให้โฟตอนของลำแสงเกิดปฏิกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลของสารทำให้ความเข้มข้นของลำแสงลดลงจากลำแสงที่มีความเข้มแสงผ่านเข้า ( $I_0$ ) เป็นความเข้มแสงที่ผ่านออก ( $I$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงผ่านเข้า ( $I_0$ ) และผ่านออก ( $I$ ) ของตัวอย่าง [17]

จากรูปที่ 2.26 สามารถเขียนสมการการส่องผ่าน (Transmittance,  $T$ ) เป็นสัดส่วนปริมาณความเข้มแสงที่ผ่านออกจากตัวอย่าง ( $I$ ) ต่อปริมาณความเข้มแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ( $I_0$ ) ดังนี้

$$T = I/I_0 \quad (2.1)$$

ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance,  $A$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$A = \log I_0/I = \log I_0/T = \epsilon bC \quad (2.2)$$

โดยที่	A	=	Absorbance หรือ Optical Density
	T	=	ค่าการส่องผ่านแสงของสาร (Transmittance)
	$I_0$	=	ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of Transmitted Light)
	$I$	=	ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of Incident Light)
	$b$	=	ความหนาของสารละลายหน่วยเป็นเซนติเมตร (Path Length of Sample หรือ Cell Length)
	$C$	=	ความเข้มข้นของสารละลายหน่วยเป็น $\text{mol/dm}^3$ หรือ $\text{mol/L}$ หรือ Molar
	$\epsilon$	=	Molar Absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุลค่านี้จะระบุว่าสารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 โมล

จากหลักการดังกล่าว นอกจากนำมาใช้ในการหาปริมาณของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้แล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) ทั้งแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Gap,  $E_{g,dir}$ ) และแบบไม่ตรง (Indirect Energy Gap,  $E_{g,ind}$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$(\alpha_{abs}hv) = \alpha (hv - E_g)^n \quad (2.3)$$

$$\alpha_{abs} = -\log T/t \quad (2.4)$$

$$T = bC/d \quad (2.5)$$

192 24886

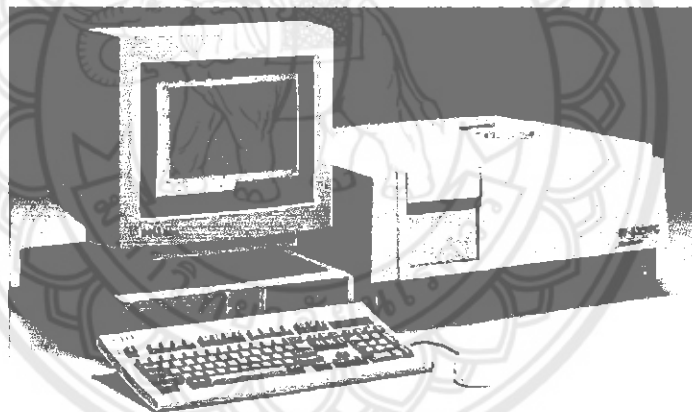


สำนักหอสมุด

1-7 ก.ย. 2561

โดยที่	$\alpha_{\text{abs}}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรวม (Total Absorption Coefficient)
	$h\nu$	=	พลังงานโฟตอน (Photon Energy)
	A	=	ค่าคงที่ (Constant)
	$E_g$	=	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
	N	=	0.5 สำหรับแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง หรือ 2 สำหรับแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง
	T	=	Effective Thickness
	B	=	ความหนาของสารละลาย ที่ไม่มีขนาดเท่ากับคิวเวทท์ (Cuvette) สำหรับใส่ตัวอย่าง (Pathlength of Sample หรือ Cell Length)
	D	=	ความหนาแน่นของสาร (Density)
	C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย ( $\text{mol/m}^3$ ) หรือ (mole/l) หรือ Molar

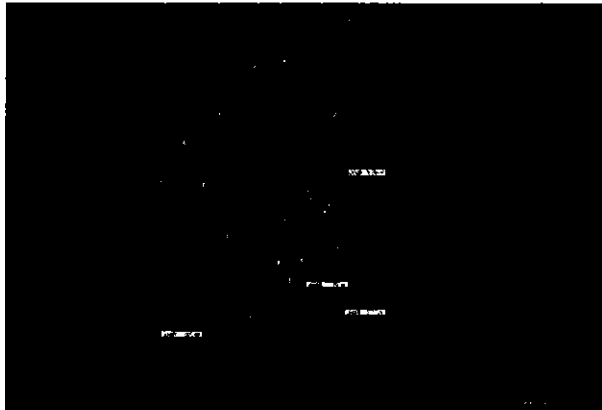
จากสมการ 2.3-2.5 สำหรับการหาค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  และสำหรับแบบไม่ตรงสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  กับ  $h\nu$  ทำการลากเส้นตรงตามความชันของกราฟ (Extrapolated Straight Line) มาตัดที่ค่า  $(\alpha h\nu)^2$  หรือ  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  เท่ากับศูนย์ และค่าที่อ่านบนแกนเอ็กซ์มีค่าเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.27 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis-Spectrophotometer) [17]

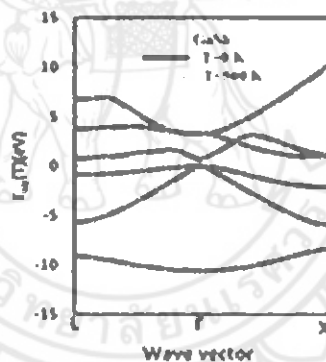
## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. R. Toda และคณะ (2011) [18] ได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของการเคลือบฟิล์มบาง ALSb โดยเทคนิคการระเหยทางความร้อนบนพื้นผิวผลึกแก้ว พบว่าขนาดของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มโดยมีค่า 488.04, 517.29 และ 574.8 นาโนเมตร ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง ALSb มีค่าเท่ากับ 1.58 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของแสง พบว่าฟิล์มบาง ALSb เป็นโครงสร้างผลึก (Polycrystalline) ที่มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์ ที่มีขนาด 10.75 นาโนเมตร และยังพบว่าฟิล์มบาง ALSb เป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) อีกด้วย

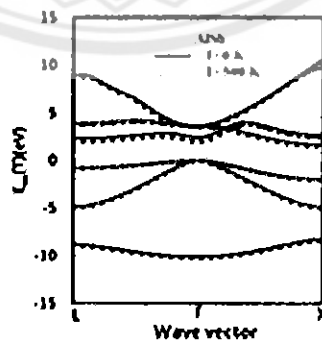


รูปที่ 2.28 ส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านฟิล์มบาง ALSb ที่มีความหนา 1,000 อังสตรอม [18]

B. Elkenany (2015) [19] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ GaSb และ ALSb ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียสพบว่าทั้ง GaSb และ ALSb มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ลดลงไปตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.28



ก)



ข)

รูปที่ 2.29 ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และ 500 เคลวิน [19]

ก) GaSb

ข) ALSb

ตารางที่ 2.3 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของแกเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) ที่แตกต่างกัน ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป [20]

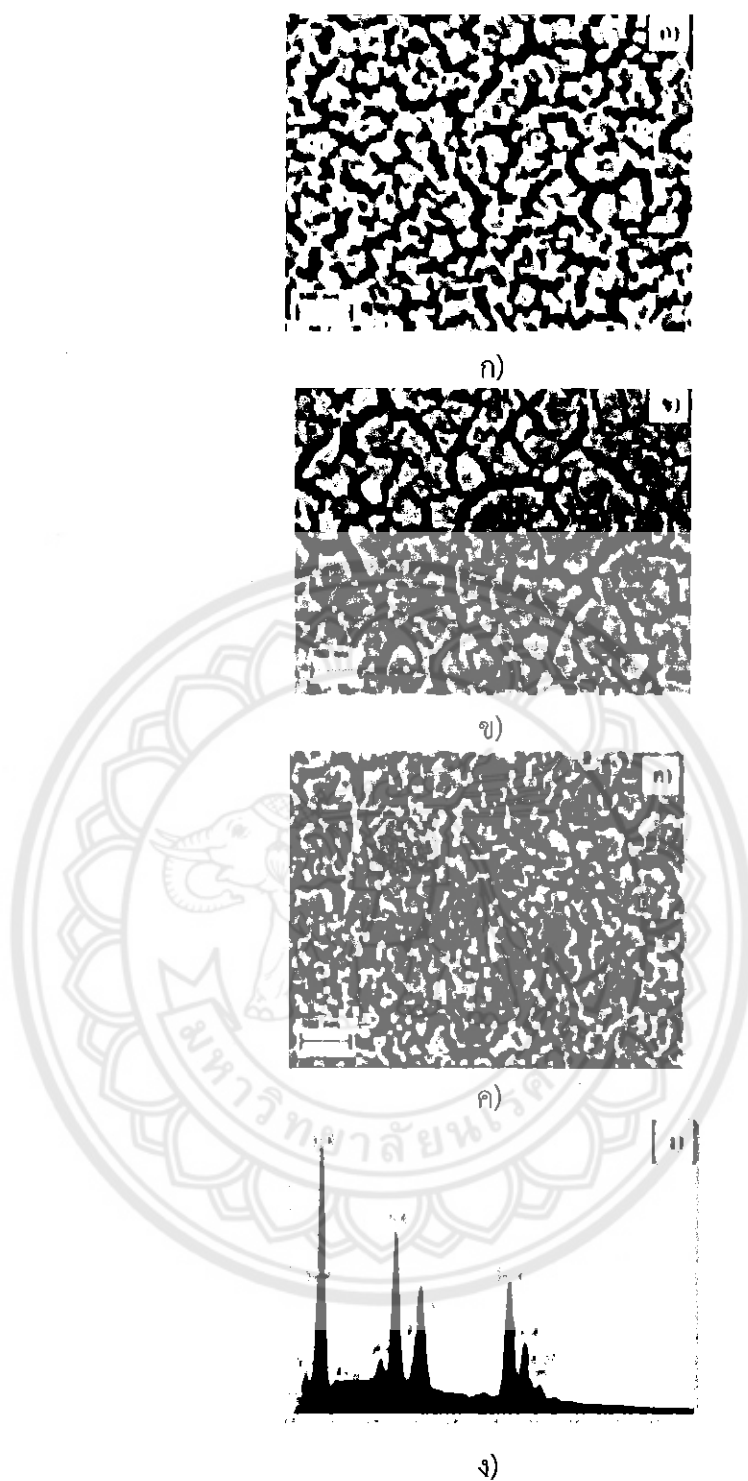
อุณหภูมิ (เคลวิน)	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
	ผลการทดลองที่ได้
0	0.8749 eV
100	0.8566 eV
200	0.8475 eV
300	0.8327 eV
400	0.8365 eV
500	0.7835 eV

ตารางที่ 2.4 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (AlSb) ที่แตกต่างกัน ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป [20]

อุณหภูมิ (เคลวิน)	แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap)
	ผลการทดลองที่ได้
0	2.3384
100	2.2985
200	2.2472
300	2.2349
400	2.1170
500	2.0164

El-Sayed (2015) [21] ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง AlSb ด้วยวิธีการระเหยเป็นไอด้วยความร้อน (Thermal Evaporation Technique) และมีการอบอ่อน (Anneal) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในระบบสุญญากาศขนาดของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง AlSb มีค่าเท่ากับ 1.6 อิเล็กตรอนโวลต์

S. Das และคณะ (2015) [22] รายงานผลการเตรียมฟิล์มบาง AlSb ด้วยเทคนิค Pulsed Laser Deposition (PLD) ภายใต้สภาวะบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนโดยอุณหภูมิของซับสเตรท (Substrate) อยู่ระหว่าง 673 เคลวินถึง 873 เคลวิน พบว่าถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปร เช่น อุณหภูมิ ความดัน จะส่งผลให้สีฐานหรือรูปร่างของผิวหน้าฟิล์มบาง AlSb ที่แตกต่างกันขนาดของผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของการทำเทคนิค Pulsed Laser Deposition (PLD) นอกจากนี้พบว่าขนาดของผลึกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามสภาวะการทำอบอ่อน แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 FESEM ของฟิล์มบาง AlSb ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค PLD [23]

ก) อุณหภูมิเท่ากับ 273 เคลวิน

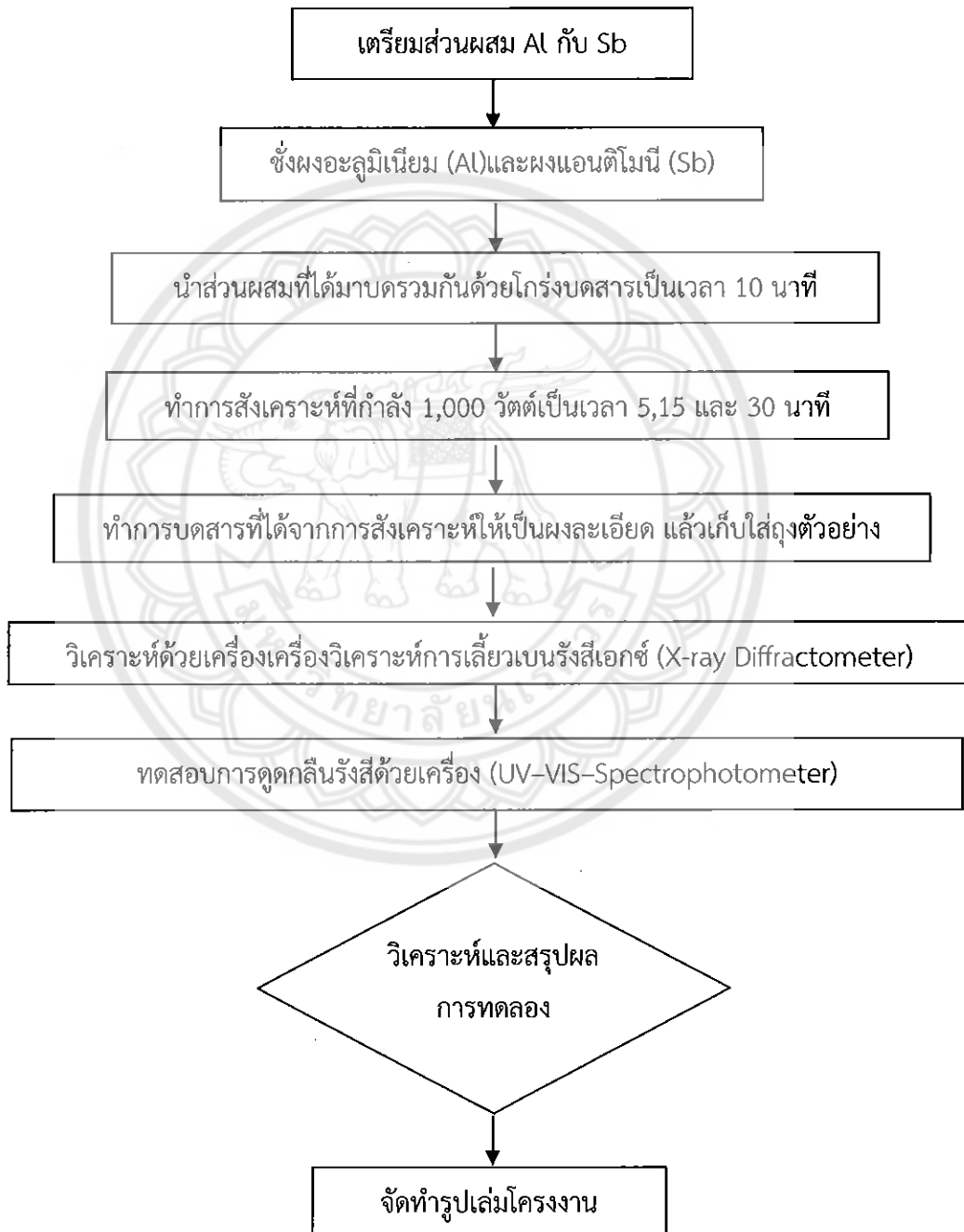
ข) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 733 เคลวิน

ค) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 873 เคลวิน

ง) แสดงเส้นสเปกตรัมที่อุณหภูมิเท่ากับ 773 เคลวิน

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน

สำหรับวิธีการดำเนินงานนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วัสดุ และอุปกรณ์ รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ในการสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนี (AlSb) ใช้เทคนิคไมโครเวฟพลาสมา ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

#### 3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1.1 ผงอะลูมิเนียม (Aluminium Powder)
- 3.1.1.2 ผงแอนติโมนี (Antimony Powder)
- 3.1.1.3 เครื่องกำเนิดความร้อนไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System)
- 3.1.1.4 แก๊สอาร์กอน (Argon Gas)
- 3.1.1.5 หลอดบรรจุสาร (Silica Tube)
- 3.1.1.6 เครื่องชั่งสาร (Weight Balance)
- 3.1.1.7 โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)
- 3.1.1.8 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.1.9 ถุงใส่สารตัวอย่างสาร

#### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

- 3.1.2.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) เพื่อวิเคราะห์เฟส AlSb
- 3.1.2.2 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS-Spectrophotometer) เพื่อวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนรังสี

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.2.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

- 3.2.1.1 ศึกษาความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก
- 3.2.1.2 ศึกษาการทำงานของเครื่องไมโครเวฟพลาสมา และศึกษาการสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนี (AlSb)

#### 3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.2.2.1 ชั่งผงอะลูมิเนียม และแอนติโมนีตามอัตราส่วนทางเคมี (Stoichiometric Ratio) ตามอัตราส่วนประกอบของ AlSb คือ  $Al : Sb = 1 : 1$  โดยโมลโดยมีน้ำหนักของส่วนผสมของสารตั้งต้นเท่ากับ 1 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนทางเคมี (Stoichiometric Ratio) ตามอัตราส่วนประกอบของ ALSb

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม (กรัมโมล)	โมล	น้ำหนัก(กรัม)	น้ำหนักต่อ 1 กรัม
อะลูมิเนียม(Al)	26.401	1	26.40100	0.17819
แอนติโมนี(Sb)	121.76	1	121.76000	0.82181
รวม			148.61000	1.00000

3.2.2.2 นำส่วนผสมที่ได้มาบดรวมกันด้วยโกร่งบดสาร โดยทำการบดด้วยแรงน้อย ๆ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำส่วนผสมเทใส่หลอดบรรจุสาร

3.2.2.3 นำหลอดบรรจุสารไปวางบริเวณตรงกลางของท่อควอทซ์ภายในเตาไมโครเวฟ แล้วทำการประกอบชุดฝาปิดท่อควอทซ์ให้แน่นเพื่อรักษาความดันภายในท่อควอทซ์ให้เป็นสุญญากาศ

3.2.2.4 ทำการเปิดปั๊มสุญญากาศ และเปิดวาล์วระบบเพื่อดูดอากาศภายในท่อควอทซ์ให้มีความดันสมบูรณ์เท่ากับ  $4.3 \pm 1$  kPa ทิ้งไว้ 10 นาที

3.2.2.6 ตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่ในท่อควอทซ์เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบออกไซด์ในระหว่างการทำปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมแอนติโมนี (ALSb)

3.2.2.7 เปิดเตาให้กำลังที่ 1,000 วัตต์แล้วทำการหาเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียม และแอนติโมนีเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ โดยไมโครเวฟพลาสติกที่ได้จะมีสีชมพูม่วงโดยใช้เวลาสังเคราะห์ดังนี้

ก. เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที

ข. เวลาในการสังเคราะห์ 15 นาที (ทำการสังเคราะห์ 5 นาที พักเครื่อง 5 นาที เป็นจำนวน 3 รอบ)

ค. เวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที (ทำการสังเคราะห์ 5 นาที พักเครื่อง 5 นาที เป็นจำนวน 6 รอบ) โดยเกิดพลาสมาเฉพาะภายในท่อควอทซ์ที่อยู่ในส่วนช่องอบของเตาไมโครเวฟเท่านั้น

3.2.2.8 เมื่อครบเวลาที่กำหนดปล่อยตัวอย่างให้เย็นตัวในสภาวะสุญญากาศจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แล้วทำการเปิดปั๊มสุญญากาศ

3.2.2.9 นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากท่อควอทซ์ แล้วมาทำการบดด้วยครกบดสารจนเป็นผงละเอียด แล้วเก็บตัวอย่างในถุงเก็บตัวอย่างที่สามารถป้องกันการสัมผัสกับอากาศ และนำไปเก็บไว้ที่โถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป

### 3.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบ

3.2.3.1 ขั้นตอนการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมแอนติโมนีไดออกไซด์ (AlSb) นำผงชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วไปตรวจหาสารประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

3.2.3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบการดูดซับรังสีนำผงชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS-Spectrophotometer)

### 3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผล

3.2.4.1 วิเคราะห์กราฟที่ได้จากการตรวจหาสารประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

3.2.4.2 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน

3.2.4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับค่าการดูดซับรังสีโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS-Spectrophotometer)

3.2.4.3 สรุปผลการทดลอง



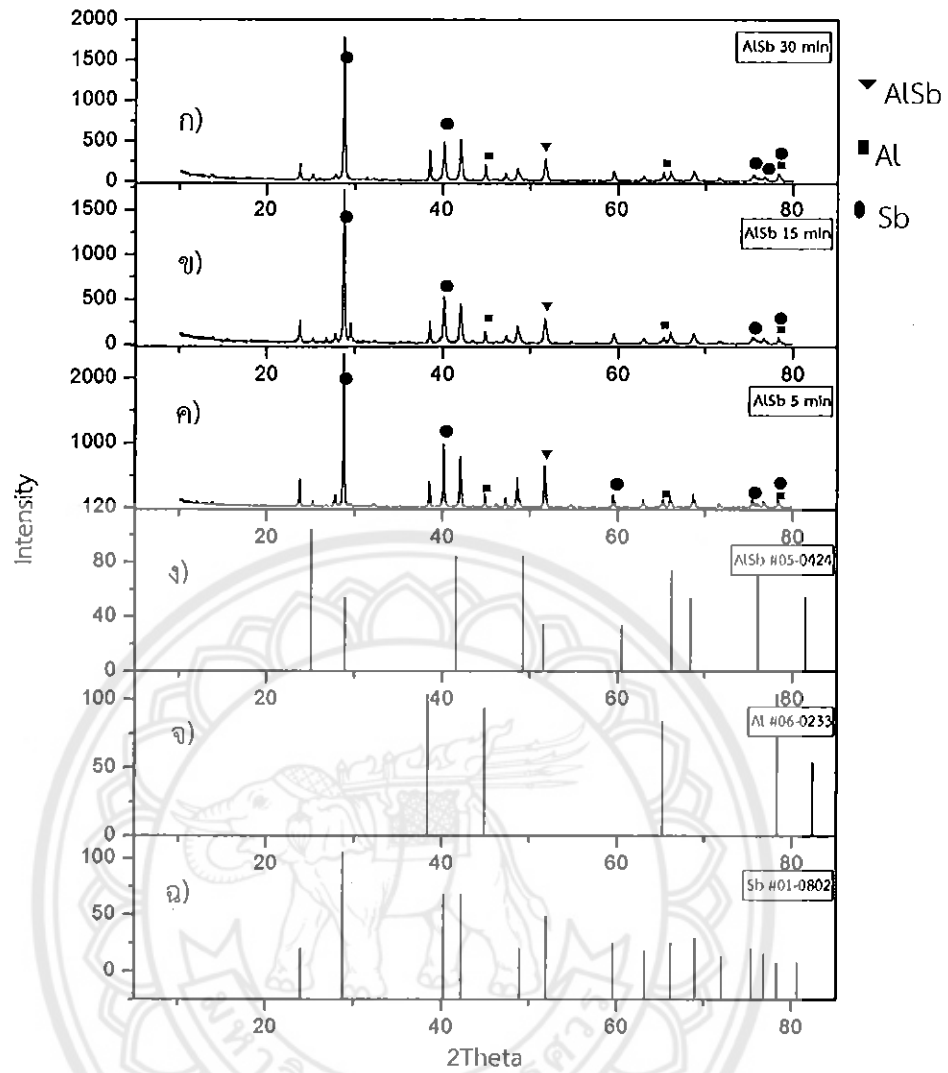
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการผลซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์หาเฟส ค่า Lattice parameters สมบัติการดูดกลืนแสง และค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) จากการสังเคราะห์ด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนไมโครเวฟพลาสมาซึ่งผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์เฟส

ภายหลังจากการสังเคราะห์สาร ALSb ด้วยเครื่องกำเนิดไมโครเวฟพลาสมา ที่กำลัง 1,000 วัตต์ ในเวลา 5 , 15 และ 30 นาที นำสารที่ได้ไปทำการตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ ALSb ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ยังไม่สามารถที่จะสังเคราะห์ให้ได้ อะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (ALSb) เฟสเดียวได้ในทุกเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ ยังคงตรวจพบธาตุอะลูมิเนียม (Al) และ แอนติโมนด์ (Sb) แม้จะเพิ่มระยะเวลาขึ้นเป็น 15 และ 30 นาที ก็ตามสังเกตเห็นได้จากพีคของธาตุแอนติโมนด์ (Sb) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $42.01$  องศา ดังแสดงในรูป 4.1 ก) – ค) ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที พีคแอนติโมนด์ (Sb) ปรากฏที่มุม  $42.01$  องศา มีค่าความเข้มพีค เท่ากับ  $790\text{cps}$  (Count Per Second) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของพีคสูงสุดในกราฟ ซึ่งอยู่ที่มุมเท่ากับ  $28.77$  องศา นั้น จะได้ค่าเป็นร้อยละเท่ากับ  $44.16$  ในส่วนของระยะเวลาในการสังเคราะห์ เท่ากับ 15 นาที และ 30 นาที ดังรูปที่ 4.1 ก) – ข) สามารถคำนวณได้ คิดเป็นร้อยละ  $26.23$  และร้อยละ  $22.01$  ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณแอนติโมนด์ (Sb) ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และอาจจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ให้นานขึ้นเพื่อทำให้แอนติโมนด์ (Sb) หหมดไป ถึงจะทำให้ได้สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ ALSb เพียงเฟสเดียว



รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมแอนติโมนีนาโนที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟพลาสมาที่กำลัง 1,000 วัตต์

ก) สังเคราะห์ที่เวลา 30 นาที

ข) สังเคราะห์ที่เวลา 15 นาที

ค) สังเคราะห์ที่เวลา 5 นาที

ง) เฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมแอนติโมนี (AlSb)

จ) เฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียม (Al)

ฉ) เฟสมาตรฐานของแอนติโมนี (Sb)

## 4.2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters)

จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเวลาในการสังเคราะห์ ALSb ทุกช่วงเวลา 5, 15 และ 30 นาที ที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ สามารถนำมาคำนวณหาค่า Lattice Parameter ได้โดยจะนำค่ามุม  $2\theta$  และ ความเข้มฟลักซ์ที่มุมนั้น ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) มาใช้ในการคำนวณตามเทคนิค Rietveld ซึ่งจะใช้โปรแกรม Fullprof Suite ช่วยคำนวณค่า Lattice Parameter ของสารที่สังเคราะห์ได้ ผลการคำนวณและค่า Lattice Parameter ตามมาตรฐานของ ALSb แสดงดังตารางที่ 4.1

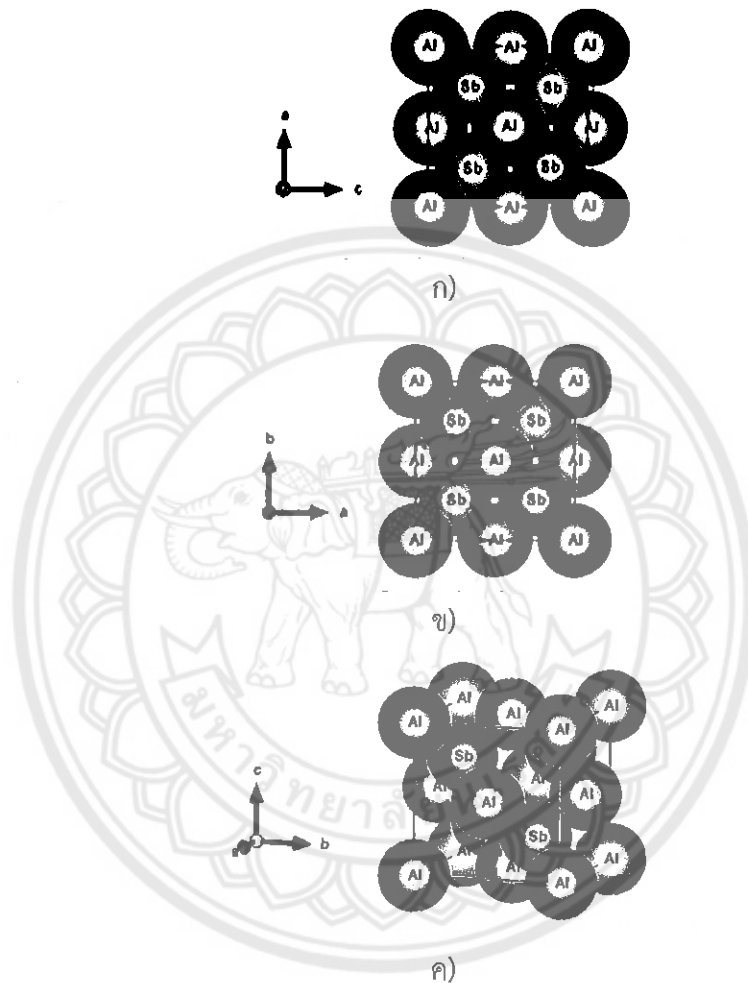
ตารางที่ 4.1 ค่า Lattice Parameter ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (ALSb) ตามสภาวะเงื่อนไขการทดลอง

Lattice Parameter	เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์						มาตรฐาน JPCDS. รหัส#05-0424
	5 นาที $\chi^2=18.3$ (Å)	$\Delta\text{Å}/\text{Å}_0$ , %	15 นาที $\chi^2=16.9$ (Å)	$\Delta\text{Å}/\text{Å}_0$ , %	30 นาที $\chi^2=16.2$ (Å)	$\Delta\text{Å}/\text{Å}_0$ , %	
A	6.1313	0.11	6.1263	0.19	6.1385	-0.01	6.1380 Å
B	6.1313	0.11	6.1263	0.19	6.1385	-0.01	6.1380 Å
C	6.1347	0.05	6.1397	-0.03	6.1484	-0.17	6.1380 Å

จากการคำนวณค่า Lattice Parameter ด้วยโปรแกรม Fullprof Suite ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนด์ (ALSb) ที่สังเคราะห์ได้นั้น เมื่อทำการใส่ค่า Space Group เท่ากับ F-43m และ Space Group Number เท่ากับ 162 ตามฐานข้อมูล JCPDs รหัส #05-0424 [26] และผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้ทำการทดลองมา ลงในโปรแกรม พบว่าค่า Lattice Parameter ของสารประกอบแอนติโมนด์ (ALSb) ที่สังเคราะห์ได้นั้นในทุก ๆ เวลาที่มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานที่มีค่า  $A=B=C= 6.1380$  อังสตรอม (Å) และมุมระหว่างแกนมีค่า  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา แต่ว่าการคำนวณด้วยโปรแกรมนั้น ยังไม่สามารถลดค่า  $\chi^2$  ลงมาอยู่ในเลขหลักหน่วยได้ (ซึ่งค่า  $\chi^2$  คือค่าทางสถิติที่นิยมใช้มากในการเปรียบเทียบหรือทดสอบข้อมูลที่เป็นความถี่หรือข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัดส่วนร้อยละของความแตกต่างเทียบกับค่ามาตรฐานโดยทั่วไปเป็นค่าอยู่ในช่วงเลขตัวเดียว) [25] จากตารางที่ 4.1 ค่า A, B และ C ที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกับค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปของร้อยละความแตกต่าง ( $\Delta\text{Å}/\text{Å}_0$ ) นอกจากนั้น ในทุกช่วงเวลาที่สังเคราะห์พบว่า ค่า A และ B ยังมีค่าเท่ากัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงก็เฉพาะในแกน C ซึ่งตรงจุดนี้เป็นที่สังเกตได้ว่าถ้าปฏิกิริยาเริ่มเกิดอะตอมที่อาศัยอยู่ในแกน A และแกน B จะเริ่มเกิดการเรียงตัวของอะตอมตามตำแหน่งที่มีค่าแน่นอนเฉพาะในโครงผลึกทันทีก่อนและจะไม่เปลี่ยนแปลงขนาดของแกนอีก จากนั้นจึงค่อยมีการเคลื่อนที่เข้าไปของอะตอมในแกน C โดยที่ถ้าเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นอะตอมที่เคลื่อนที่เข้าไปในแกน C ก็จะทำให้ขนาดของแกนเพิ่มมากขึ้น

### 4.3 โครงสร้างอะลูมิเนียมแอนติโมนิต์ (AlSb)

ในส่วนของโครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิต์ (AlSb) ที่ได้จากการนำข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิต์ (AlSb) ที่สังเคราะห์ที่ได้ไปทำการจำลองโครงสร้างผลึกโดยนำค่าที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม Fullprof Suite โดยโปรแกรมนี้ นอกจากจะใช้หาค่า Lattice Parameter แล้วยังสามารถทำการจำลองโครงสร้างผลึกได้อีกด้วย



รูปที่ 4.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิต์ (AlSb) ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลา 30 นาที

ก) โครงสร้างด้านหน้า

ข) โครงสร้างด้านบน

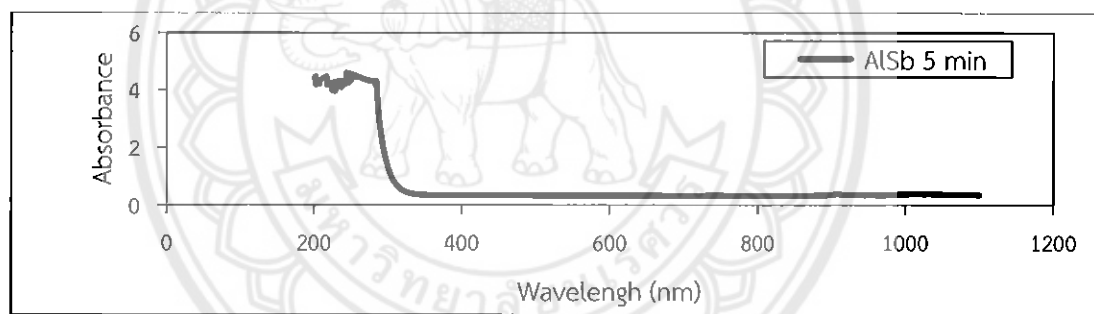
ค) โครงสร้างสามมิติ

ผลการจำลองโครงสร้างผลึกพบว่า มีรูปแบบเป็นแบบลูกบาศก์ โดยมีอะตอมเรียงตัวอยู่ตรงกลางของทุก ๆ ด้านหรือเรียกว่าโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Center Cubic) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยโครงสร้างของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิต์ (AlSb) นี้จะมีอะตอมของอะลูมิเนียม (Al) จัดเรียงอยู่ที่มุมทุก ๆ มุม และที่ผิวหน้าของทุก ๆ ด้านของผลึก และมีอะตอมของแอนติโมนิ (Sb) อยู่ภายในของโครงสร้างผลึก ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกต ที่แกน A และ B

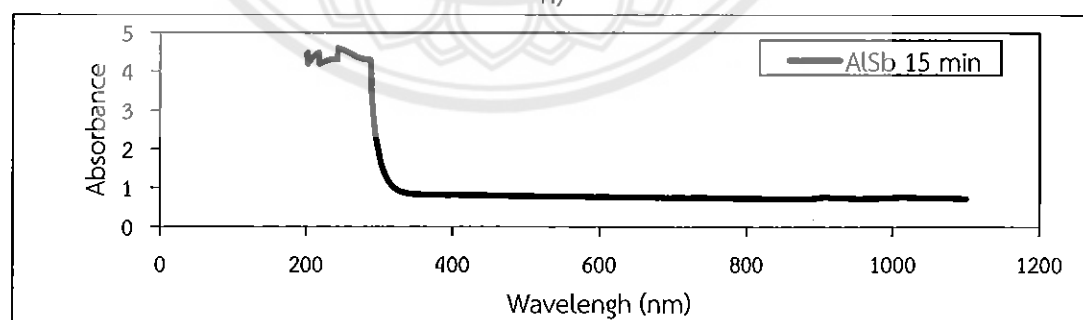
เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะไม่เปลี่ยนแปลงขนาดอีก ซึ่งตรงกับการอาศัยอยู่ของอะตอมอะลูมิเนียม (Al) นั้นเอง ส่วนความยาวแกน C เกิดการขยายขึ้นจากค่ามาตรฐานก็เป็นผลมาจากอะตอม Sb ที่เคลื่อนเข้าไปเพื่อจัดเรียงตัวนั่นเองแต่เนื่องจากที่แกน C มีความยาวขยายขึ้นจากค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย จึงทำให้การจำลองโครงสร้างผลึกในรูปที่ 4.2 จึงเห็นโครงสร้างผลึกที่มีขนาดเท่ากับทุกแกน

#### 4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์

การวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb) ทำโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงตั้งแต่ช่วงคลื่นยูวี (UV) ถึงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis-Spectrophotometer) ที่เลือกทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงตั้งแต่ 200 - 1,100 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb) ในทุกช่วงเวลาการสังเคราะห์ แสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 - 350 นาโนเมตร เป็นช่วงที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมากที่สุด มีดูดซับพลังงานแล้วเกิดการหลุดและเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลตรงจุดนี้สามารถนำไปประยุกต์คำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) ส่วนช่วงความยาวคลื่นประมาณตั้งแต่ 350 - 1,100 นาโนเมตร เป็นช่วงที่มีกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบราบเรียบ



ก)



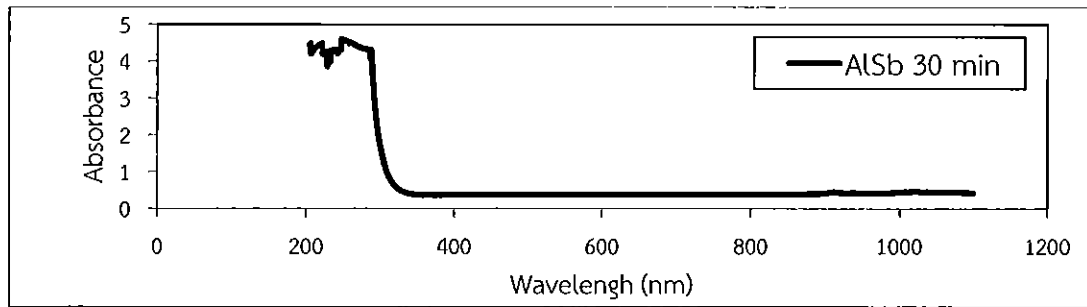
ข)

รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารประกอบ AlSb ที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟพลาสมา กำลัง 1,000 วัตต์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร

ก) สังเคราะห์ที่เวลา 5 นาที

ข) สังเคราะห์ที่เวลา 15 นาที



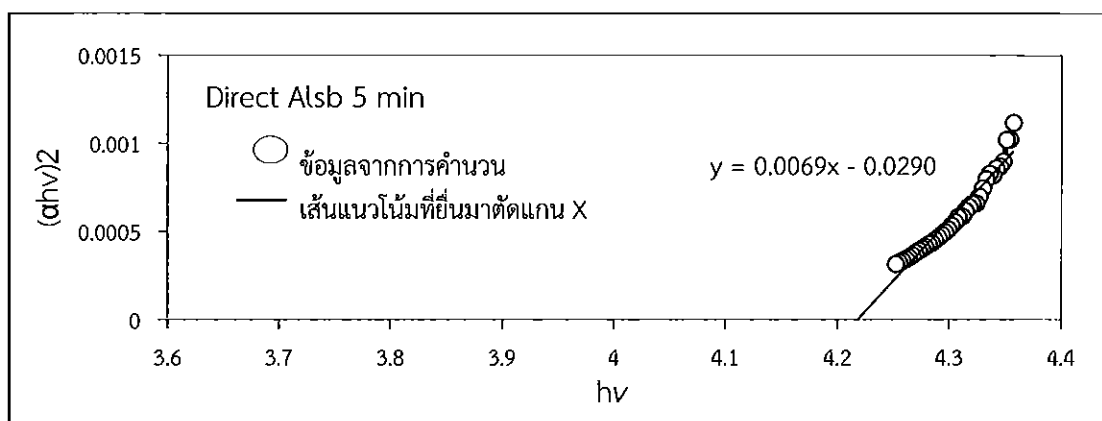


ค)

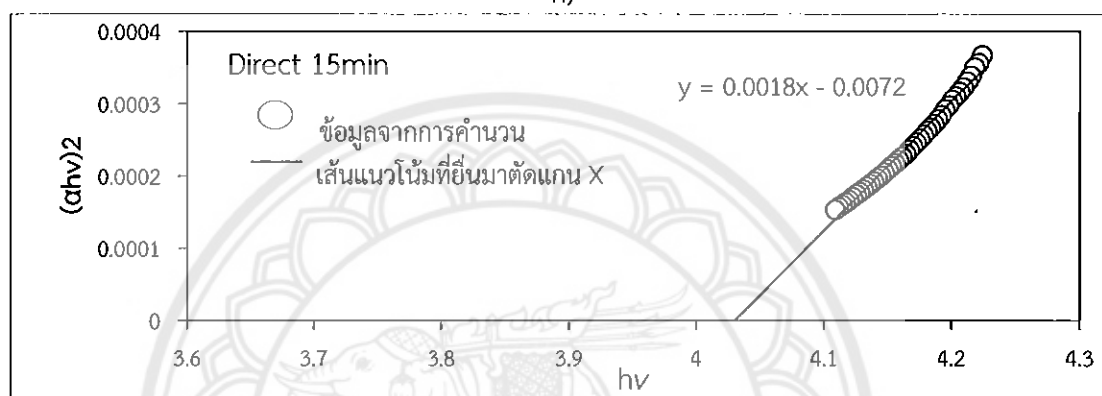
รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารประกอบ ALSb ที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ พลาสมากำลัง 1,000 วัตต์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร  
ค) สังเคราะห์ที่เวลา 30 นาที

#### 4.5 ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap)

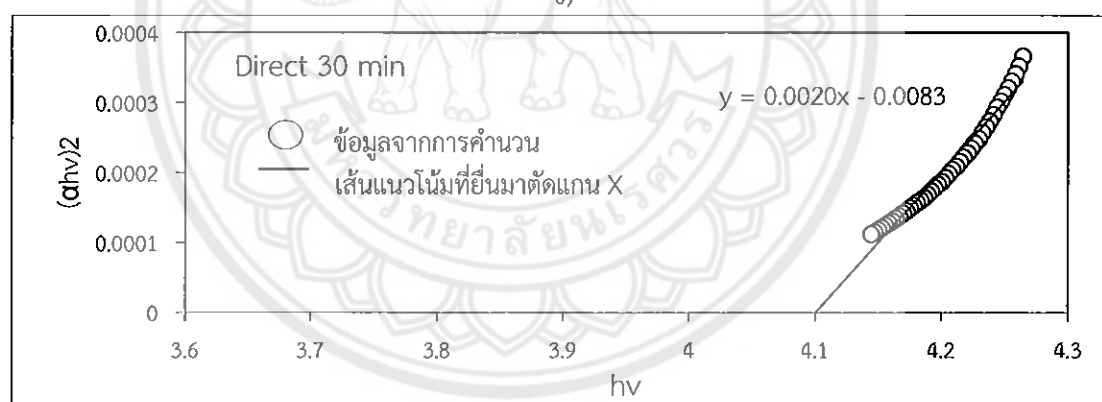
เมื่อนำผลการดูดกลืนแสงของทั้ง 3 สภาวะการทดลองมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.1. ถึง 2.5 ในบทที่ 2 เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) แบบตรง (Direct Energy Gap,  $E_g$ ) และแบบไม่ตรง (Indirect Energy Gap) ตามพื้นฐานการดูดกลืนแสงของวัสดุซึ่งถูกควบคุมด้วย 2 ช่วงพลังงานโฟตอนคือพลังงานโฟตอนที่มีค่าสูงและพลังงานโฟตอนที่มีค่าต่ำโดยเมื่อพลังงานโฟตอนมีค่าสูงกว่าค่าแถบพลังงาน (Energy Gap) ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานโฟตอนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่จากตำแหน่งสถานะสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (Valance Band) ไปยังตำแหน่งสถานะต่ำสุดของแถบการนำ (Conduction Band) การคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของพลังงานโฟตอน  $(\alpha h\nu)^2$  กับค่าพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  โดยนำค่าตรงช่วงการดูดกลืนประมาณตั้งแต่ 250 – 350 นาโนเมตรมาคำนวณตามสมการที่ 2.1. ถึง 2.5 ในบทที่ 2 เพื่อสร้างกราฟ เมื่อสร้างกราฟเสร็จแล้ว ทำการหาเส้นแนวโน้มของความชันและลากเส้นตรงยื่นออกไป (Extrapolated Straight Line) ให้ไปตัดที่แกน  $(h\nu)$  ตรงที่ค่า  $(\alpha h\nu)^2$  เท่ากับศูนย์ จุดตัดนั้นจะเป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงรูปที่ 4.4 (a-c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับค่า  $h\nu$  ผลการทดลองพบว่าที่การสังเคราะห์เวลา 5 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) หรือรูปที่ 4.3 ก) เท่ากับ 4.20 eV ที่การสังเคราะห์เวลา 15 นาที และ 30 นาที หรือรูปที่ 4.3 ข) และ ค) มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) เท่ากับ 4.00 eV และ 4.15 eV ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่มีค่าเท่ากับ 1.60 eV [26] พบว่ายังไม่มีความใกล้เคียงกันคาดว่าอาจจะเป็นเพราะผลกระทบของ Al และ Sb ที่เหลือค้างอยู่ในผงที่สังเคราะห์นั่นเอง เนื่องจากในการทดลองนี้ยังไม่สามารถสังเคราะห์สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิได (ALSb) ให้ได้เพียงเฟสเดียวทั้งหมด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Band Gap) ที่สภาวะ  
เงื่อนไขกำลัง 1,000 วัตต์

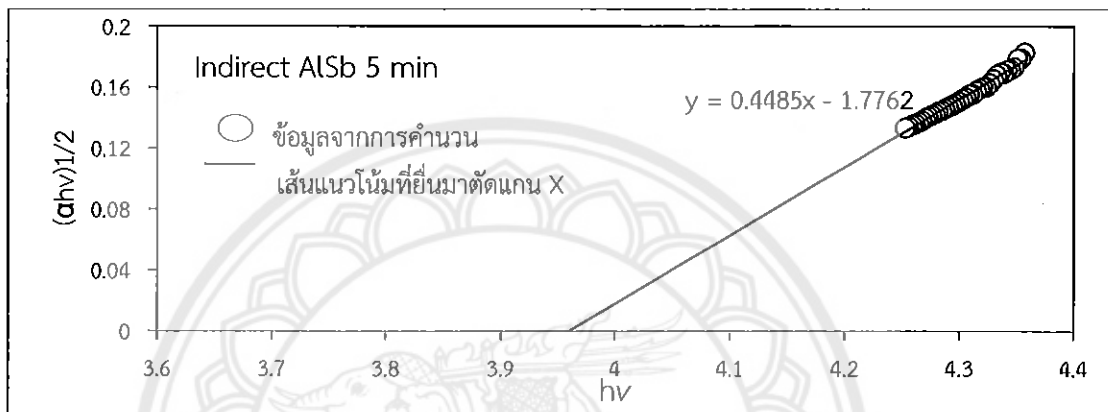
ก) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 5 นาที

ข) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 15 นาที

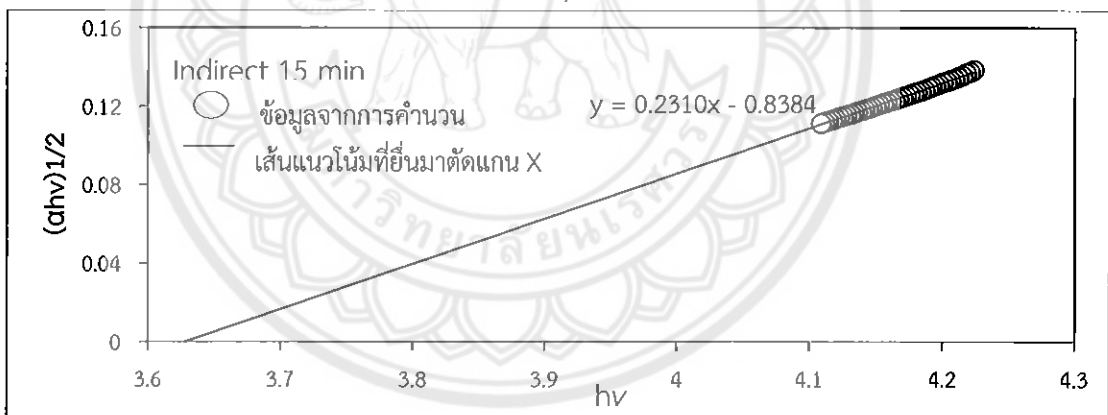
ค) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 30 นาที

ในส่วนพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าค่าแถบพลังงาน (Energy Gap) ค่าการดูดกลืนแสงมี  
ลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง กราฟจึงเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของค่าสัมประสิทธิ์การ  
ดูดกลืนแสงของพลังงานโฟตอน  $(\alpha hv)^{1/2}$  กับค่าพลังงานโฟตอน (hv) ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ผลการทดลองพบว่าที่การสังเคราะห์เวลา 5 นาที 15 นาที และ 30 นาที มีค่าแถบช่องว่างแบบไม่ตรง ( $E_{g,ind}$ ) ของสารประกอบ ALSb จากรูปที่ 4.4 เท่ากับ 3.960, 3.629 และ 3.79 eV ตามลำดับ ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลการคำนวณค่าแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรง โดยทำการตรวจสอบการดูดกลืนแสง 3 ครั้ง แล้วค่อยนำค่าทั้ง 3 ครั้งมาคำนวณค่าแถบพลังงาน และทำการเปรียบเทียบกับค่าแถบช่องว่างพลังงานมาตรฐานของสารประกอบ ALSb แบบตรงมีค่าเท่ากับ 1.60 eV และแบบไม่ตรงมีค่าเท่ากับ 2.22 eV [27] พบว่ายังไม่มีความใกล้เคียงกันคาดว่าอาจจะเป็นเพราะในการทดลองนี้ยังไม่สามารถสังเคราะห์สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (ALSb) ให้ได้เพียงเฟสเดียวทั้งหมดเช่นเดียวกับค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง ( $E_{g,dir}$ )



ก)

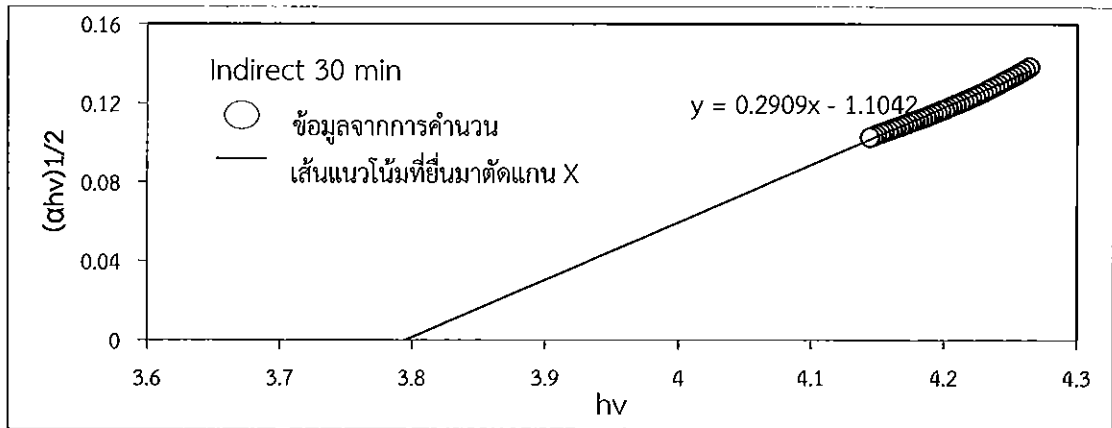


ข)

รูปที่ 4.5 กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap) ที่สภาวะ  
เงื่อนไขกำลัง 1,000 วัตต์

ก) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 5 นาที

ข) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 15 นาที



ค)

รูปที่ 4.5 (ต่อ) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap) ที่

สภาวะเงื่อนไขกำลัง 1,000 วัตต์

ค) กราฟแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงที่เวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง ( $E_{g,dir}$ ) ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติ-โมไนต์ (ALSb)

เวลาในการ สังเคราะห์(นาที)	ครั้งที่	ค่า Energy Band gap (eV)	$E_g$ เฉลี่ย (eV)
5	1	4.202	4.148
	2	4.067	
	3	4.175	
15	1	4.158	4.073
	2	4.000	
	3	4.061	
30	1	4.157	4.152
	2	4.150	
	3	4.149	

ตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ( $E_{g,ind}$ ) ของสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb)

เวลาในการสังเคราะห์(นาทีก)	ครั้งที่	ค่า Energy Band gap (eV)	$E_g$ เฉลี่ย (eV)
5	1	3.756	3.869
	2	3.960	
	3	3.892	
15	1	3.645	3.670
	2	3.737	
	3	3.629	
30	1	3.795	3.860
	2	3.883	
	3	3.904	

ผลจากการคำนวณพบว่าสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb) ที่ใช้เวลา 5 นาทีกในการสังเคราะห์ มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct energy band gap , $E_{g,dir}$ ) เฉลี่ยเท่ากับ 4.148 eV ส่วนการสังเคราะห์ด้วยเวลา 15 นาทีก และ 30 นาทีก มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงเฉลี่ยเท่ากับ 4.073 eV และ 4.152 eV ตามลำดับ ส่วนค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (indirect energy band gap , $E_{g,ind}$ ) เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.869 eV, 3.670 eV และ 3.860 eV ตามลำดับ จากค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง ( $E_{g,dir}$ ) และค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ( $E_{g,ind}$ ) ทั้ง 3 ค่า จะเห็นได้ว่า ค่า  $E_{g,dir}$  และ  $E_{g,ind}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงว่าสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb) ยังไม่มีแนวโน้มที่จะนำไปทดสอบค่าต่าง ๆ ทางเทอร์โมอิเล็กทริกได้ ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ให้นานขึ้นจึงจะสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมนิไนด์ (AlSb) ให้เป็นเฟสเดียวกันได้ และนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 บทสรุป

การสังเคราะห์อะลูมิเนียมแอนติโมไนด์ (AlSb) ในสภาวะของแข็ง (Solid-state) โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟพลาสมาที่กำลัง 1,000 วัตต์โดยใช้เวลา 5, 15 และ 30 นาที ในการทดลองครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงพีคของ Al และ Sb ในทุกช่วงระยะเวลาการสังเคราะห์ ซึ่งยังไม่สามารถทำให้เกิดอะลูมิเนียมแอนติโมไนด์ (AlSb) เพียงเฟสเดียวได้ทั้งหมด

5.1.2 ค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct energy band gap  $E_{g,dir}$ ) ที่เวลาสังเคราะห์ 5, 15 และ 30 นาที มีค่าเท่ากับ 4.148, 4.073 และ 4.152 eV ตามลำดับ

5.1.3 อาจจำเป็นต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์ให้นานขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการสังเคราะห์สารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมไนด์ (AlSb) โดยใช้วิธีความร้อนเหนี่ยวนำพลาสมาที่ยังไม่สามารถที่จะสังเคราะห์สารให้บริสุทธิ์ได้ อาจจะต้องลองใช้วิธีการสังเคราะห์อื่น ๆ เช่น การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Pulsed Laser Deposition (PLD) [22]

5.2.2 การพิจารณาการเลือกสารที่จะนำมาสังเคราะห์ให้เป็นสารประกอบที่บริสุทธิ์เพื่อนำไปพัฒนาเป็นสารกึ่งตัวนำและพัฒนาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต่อไปนั้น ควรจะเลือกสารที่อยู่ในหมู่ของโลหะธาตุแทรนซิชันผสมกับธาตุกึ่งโลหะ เพราะว่ามีสมบัติของธาตุแทรนซิชันนั้นเป็นธาตุที่สามารถรวมกับธาตุอื่นได้ดี

#### 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข

5.3.1 ในการผสมสารประกอบอะลูมิเนียมแอนติโมไนด์นั้นต้องใช้เครื่องไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดพลาสมาซึ่งทำให้เกิดความร้อนมากเมื่อสังเคราะห์เสร็จควรรอให้เครื่องเย็นก่อนแล้วจึงนำสารตัวอย่างออกจากเครื่องได้

5.3.2 เนื่องจากเราใช้ผงของอะลูมิเนียมและผงแอนติโมไนด์เป็นผงขนาดเล็กในการบดผสมสารนั้นอาจจะมีผงบางส่วนที่หายไปในขณะที่เทใส่หลอดทดลองเพราะว่าผงของสารจะติดอยู่ที่โครงบดสารควรจะใช้ช้อนตักสารชูดสารออกให้หมดเกลี้ยงและควรผสมสารที่อยู่ในห้องที่ถูกควบคุมเพื่อไม่ให้ผงของสารระเหยออก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Heremans JP, Jovovic and Charoenphakde. (2008) Enhancement of Thermoelectric. Efficiency InPbTe By Distortion of The Electronic Density of States. *Science*, 321 (588),47-55.
- [2] ชยอนจง และดักลาส. (ตุลาคม 2553).วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.สืบค้นเมื่อ 21 พฤศจิกายน 2558, จาก [http://www.thermoelectrics.caltech.edu/history\\_page.html](http://www.thermoelectrics.caltech.edu/history_page.html).
- [3] Rowe DW. (2006)Thermoelectrics Handbook Macro to Nano.Thermoelectrics Handbook Macro To Nano,642 (241),14
- [4] Minnich AJ, Dresselhaus MS and Ren ZF.(2009) Bulk Nanostructured.ThermoelectricMaterials: Current Research and Future Prospect.EnergyEnviron.Science.; 2 (466),79.
- [5] Tritt TM, Subramanian MA (2006) Thermoelectric Materials, Phenomena, And Application.A Bird's Eye View MRS Bull.; 31(188),98.
- [6] Kanatzidis MG. (n.d.)The Best Thermoelectric Materials. Retrieved October 20, 2015, from <http://chemgroups.northwestern.edu/kanatzidis/greatthermo.html>.
- [7] Snyder GJ and Tober ES. (2008) Complex Thermoelectric Materials. *Nature Materials*, 7(1038),115-114.
- [8] Thermoelectric Module [image]. Retrieved on September 9, 2012, from:<http://www.sigmaaldrich.com/materialsscience/metalandceramicscience/thermoelectrics.htm>.
- [9] Cronin B. Vining. (2009) Thermoelectric Materials.*NatureMaterials*,8(10),83-85.
- [10] Tober ES(กันยายน 2014) การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อใช้เป็นปั๊มความร้อนหรือปั๊มความเย็น. (2012) สืบค้นเมื่อ 2 พฤศจิกายน 2558.จาก<http://availabletechnologies.pnnl.gov/technology.asp>
- [11] สายสนม ประดิษฐ์ดวง. (2543)การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการฉายรังสีอาหารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง . ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,กรุงเทพมหานคร.
- [12] Jerrold,Bushbergetal and Wilkins. (2012) Physics of Medical Imaging 3<sup>rd</sup> editor Graphic Courtesy of Jerrold Bushberg.Reproduced With Permission, From The Essential.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [13] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (8 กรกฎาคม 2558). ไมโครเวฟ. สืบค้นเมื่อ 4 พฤศจิกายน 2558, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/ไมโครเวฟ>
- [14] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (6 กรกฎาคม 2558). พลาสมา(สถานะของสาร). (2015). สืบค้นเมื่อ 2 พฤศจิกายน 2558, จาก [http://th.Wikipedia.or/wiki.พลาสมา\\_\(สถานะของสาร\)](http://th.Wikipedia.or/wiki.พลาสมา_(สถานะของสาร)).
- [15] P. Giannozzi, S. De Gironcoli and S. Baroni. (1991) Aluminium Antimonide : *AlSb*, *Phys R*, 43(11), 31-73.
- [16] Dr Martijn Fransen (2004). *X-ray Powder Diffractometry Moves Into The Analytical Laboratory*, Lab Asia. Retrieved November 22 2015, from [http://www.labasia.net/pdf/las/2004/03/las200403\\_page39-40.pdf](http://www.labasia.net/pdf/las/2004/03/las200403_page39-40.pdf)
- [17] Kimberly S. Cleaves (2003) *Spectrophotometry The Rise, Today's Chemist at Work*. Retrieved December 22 2015, from <http://www.labasia.net/Spectrophotometry/pdf/las/2004/03/las200403>
- [18] Herczog A. and Haberecht RR. (2010) *Middleton AE J Electrochem Science*, 7(1958)10-33.
- [19] D. Vogel, P. Kruger and J. Pollmann. (1997) *Semiconductor of GaSb and AlSb at Temperature Different Phys R*, 55,3(25)12-36.
- [20] S. Adachi (2005). *Department of Electronic Engineering. Properties of Group -IV III-V and II-VI Semiconductors*, Gunma University, Japan
- [21] El-Sayed HE. (2005) *Structural And Optical Properties of Thermally Evaporated AlSb Films. Applied Surface Science*, 250(14), 7-8.
- [22] L. Yongquan and S. Yongkang. (2010) *New Energy Materials*. Publishing House of Tianjin University, Tianjin.
- [23] H. Zheng, W-Li and L. Bing. (2010) *Pulsed Laser Deposition (PLD). Chin Phys*, 12(720), 4.
- [24] Ren ZF. (2012) *การสังเคราะห์ฟิล์มบาง AlSb. Chin Phys E*. 9(19) 10.
- [25] มนต์ชัย เทียนทอง, การทดสอบโคสแควร์ (ออนไลน์), สืบค้นจาก [:http://home.dsd.go.th/kamphaengphet/km/information/RESECARCH/12Chi-Square\\_Test.pdf](http://home.dsd.go.th/kamphaengphet/km/information/RESECARCH/12Chi-Square_Test.pdf) [19 มีนาคม 2556]
- [26] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, David R. Lide, Ed. 79th Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 1998
- [27] K Seeger and E Schonherr (1991) "Microwave dielectric constant of aluminium antimonide" *Semicond. Sci. Technol.* 6 301



## ประวัติผู้ดำเนินงาน



ชื่อ นางสาววาสนา แอบสมตัว  
ภูมิลำเนา 56 หมู่ 7 ต.หัวดง อ.เก้าเลี้ยว จ.นครสวรรค์  
ประวัติการศึกษา  
- จบระดับการศึกษามัธยมจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ  
มัชฌิม  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: bellwasana28@hotmail.com



ชื่อ นายศิวกร สุ่มเกิด  
ภูมิลำเนา 272 หมู่ 5 ต. วังกะพ้อ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์  
ประวัติการศึกษา  
- จบระดับการศึกษามัธยมจากโรงเรียนอุตรดิตถ์  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: Indy\_soul\_as@hotmail.com

