

ฉบับนี้แทนการ



สำนักหอสมุด



การสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมา

SYNTHESIS OF ZINC ANTIMONIDE BY MICROWAVE INDUCED PLASMA HEATING

นางสาวชุลีพร อินตะสงค์ รหัส 55361304

นางสาวสาวิณีย์ ปลัดท้วม รหัส 55365586

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

วันลงทะเบียน 7 (07) 2561

เลขทะเบียน 19224959

เลขเรียกหนังสือ ปร

๕๖๗ก

๒๕๖๑

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2558



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำ
พลาสมา

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวชุลีพร อินตะสงค์ รหัส 55361304
นางสาวสาวิณี ปลัดท้วม รหัส 55365586

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

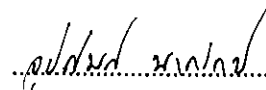
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ


ปีการศึกษา 2558

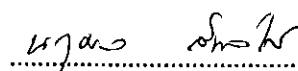
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

๑. 

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ฤชณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ณฤมล สีพลไกร)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมา		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวชุลีพร	อินตะสงค์	รหัส 55361304
	นางสาวสาวิณี	ปลัดท้วม	รหัส 55365586
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ทศพล	ตรีรุจิราภาพงศ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2558		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ ด้วยความร้อนไมโครเวฟเหนี่ยวนำพลาสมา โดยใช้ผงของสังกะสี และผงของพลวง เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 5, 15 และ 30 นาที จากนั้นนำไปทำการตรวจสอบเฟสของสารที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) และตรวจสอบการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 - 1100 นาโนเมตร จากการทดลองพบว่าการสังเคราะห์ด้วยเวลา 5, 15 และ 30 นาที ยังไม่สามารถทำให้ได้สารประกอบ ZnSb เฟสเดียวได้ ยังคงมี Zn และ Sb ปนมาบ้างเล็กน้อย โดยจะลดปริมาณลงตามเวลาสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบการดูดกลืนแสง พบว่ามีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 270 - 320 นาโนเมตร และผลการวิเคราะห์การหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารประกอบ ZnSb ที่เวลาสังเคราะห์ 5, 15 และ 30 นาที พบว่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Band Gap, $E_{g,dir}$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.125 eV, 4.143 eV และ 4.039 eV ตามลำดับ ส่วนค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap, $E_{g,indir}$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.918 eV, 3.878 eV และ 3.663 eV ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะเป็นวัสดุกึ่งตัวนำได้

Project title : SYNTHESIS OF ZINC ANTIMONIDE BY MICROWAVE INDUCED
PLASMA HEATING

Name : Miss Chuleeporn Intasong ID. 55361304

Miss Sawinee Paldthum ID. 55365586

Project advisor : Mr.Thotsaphon Threrujirapapong

Major : Materials Engineering

Department : Industrial Engineering

Academic year : 2015

Abstract

The objective of this project is to synthesize the zinc antimonide by the microwave induced plasma heating method, using elemental zinc and antimony powder as a substance for the reaction. The synthesis is carried out at the microwave power of 1000 watts for 5, 15 and 30 minutes. The synthesized compound is then characterized the phases by the X-ray Diffractometer (XRD) technique, and measured the absorbance property using the UV-VIS Spectrophotometer at the wavelength from the 200 - 1100 nm. The results showed that the synthesis times of 5, 15 and 30 minute cannot fabricate the single phase of ZnSb compound. The elemental Zn and Sb powder are still remained, and decreased with the increasing of synthesis time. The absorbance of ZnSb occurred in the wavelength range of 270 - 320 nm. The energy band gap calculation of the synthesized ZnSb compounds showed the average of Direct Energy Gap ($E_{g,dir}$) is 4.125 eV, 4.143 eV and 4.039 eV for the synthesis times of 5, 15 and 30 minute, respectively, while the average value of Indirect Energy Band Gap ($E_{g,indir}$) is 3.918 eV, 3.878 eV and 3.663 eV respectively. These indicate that ZnSb is possibly applied as a thermoelectric material.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และยังให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอ เกี่ยวกับการ ค้นคว้าข้อมูลในการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหา แก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความ ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และให้กำลังในการทำงานมาโดยตลอด ผู้จัดขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อุปลักษณ์ นาครักษ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ณมล สีพลไกร ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธวัช สุริวงษ์ อาจารย์ประจำวิทยาลัยพลังงานทดแทน ที่คอย แนะนำวิธีใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี รวมถึงคุณชานนท์ บุญมีพิพิธ ที่คอยช่วยเหลือ ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนในเรื่องกำลังใจ และค่าใช้จ่าย จนสามารถศึกษา และทำโครงการเล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวชุลีพร อินตะสงค์

นางสาวสาวิณี ปลัดท้วม

พฤษภาคม 2559

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	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 แนวทางการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.7 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module).....	10
2.8 สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : Zn_4Sb_3).....	12
2.9 ระบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System).....	15
2.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	27
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์	28
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	31
4.1 การตรวจสอบสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟ.....	31
4.2 ค่า Lattice Parameter	32
4.3 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์.....	33
4.4 สมบัติทางแสงของ ZnSb.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการทดลอง	40
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	44
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 สมบัติของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์.....	13
2.2 ข้อมูลทั่วไปของธาตุสังกะสี.....	14
2.3 ลักษณะทางกายภาพของสังกะสี.....	14
2.4 ข้อมูลทั่วไปของแอนติโมนี.....	14
2.5 ลักษณะทางกายภาพของแอนติโมนี.....	15
3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของผงซิงค์ และผงแอนติโมนี.....	28
4.1 ค่า Lattice Parameter.....	33
4.2 แสดงถึงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง($E_{g,dir}$) ของสารประกอบ ZnSb.....	38
4.3 แสดงถึงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง($E_{g,indir}$) ของสารประกอบ ZnSb.....	38



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ความต่างศักย์ซีเบค	5
2.2 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า.....	5
2.3 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลเทียร์	6
2.4 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	7
2.5 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า ZT สูงเทียบกับอุณหภูมิ.....	8
2.6 ความสัมพันธ์ของค่า ZT ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.7 ตัวอย่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดนาโนเมตรที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน	10
2.8 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถ ใช้งานได้ทั้งระบบ ความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า.....	11
2.9 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า.....	11
2.10 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตการแสไฟฟ้า.....	11
2.11 ไดอะแกรมการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลการทำความเย็น และปั๊มความร้อน	12
2.12 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์.....	13
2.13 ช่วงความถี่ และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.14 การหมุนแบบมีขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขั้ว และมี ขั้วทาง ไฟฟ้าโดยที่โมเลกุลจะหมุนไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.15 การหมุนของโมเลกุลที่มีพลังงานในการจับตัวกันของไมโครเวฟ-รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.16 ตัวอย่างของสถานะทั้งสี่สถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส	18
2.17 อุณหภูมิ และความหนาแน่นของสถานะที่สี่ของสสาร	19
2.18 กระบวนการผลิตของพลาสมาในภาคอุตสาหกรรม	19
2.19 แผนภาพแสดงการทำงานของ XRD.....	20
2.20 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พีคตัวอย่างที่ต้องการทราบ	21
2.21 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้เทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	21
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงผ่านเข้า (I_0) และผ่านออก (I) ของตัวอย่าง	22
2.23 การส่งผ่านพลังงานแบบตรง และแบบไม่ตรงของสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.24 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	25
3.1 วิธีการดำเนินโครงการ.....	27
3.2 เครื่องมือไมโครเวฟพลาสมา.....	29
4.1 XRD patterns ของสารประกอบของซิงค์แอนติโมนายด์	32
4.2 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่เวลา 30 นาที	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมพันธระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ ก) 5 นาที ข) 1 นาที ค) 30 นาที34
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับค่า (hv) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ ที่สังเคราะห์ที่เวลา ก) 5 นาที ข) 15 นาที ค) 30 นาที.....36
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับค่า (hv) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่สังเคราะห์ที่เวลา ก) 5 นาที ข) 15 นาที ค) 30 นาที37



สารบัญญัตินิยามและอักษรย่อ

- Zn = ซิงค์ หรือ สังกะสี
Sb = แอนติโมนี หรือ พลวง
ZT = Dimensionless Figure of Merit (ZT)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันความต้องการด้านพลังงาน ถือเป็นปัญหาใหญ่ของประเทศ และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อการพัฒนาของประเทศไทยมากขึ้น เชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกที และจะต้องหมดไปในอนาคต “พลังงานทางเลือก” จึงมีบทบาทสำคัญที่จะเข้ามาทดแทน และ “เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)” เป็นหนึ่งสมบัติของสารที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพลังงานทางเลือกที่นักวิทยาศาสตร์ กำลังให้ความสนใจ และศึกษา

วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานโดยใช้ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) หรือ การทำให้เย็นโดยใช้ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) วัสดุชนิดนี้ถูกเรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) และยิ่งไปกว่านั้นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง โดยนำมาทำเป็นตู้เย็นหรือ ปั๊มความร้อน (Heat Pumps) ได้ ซึ่งไม่มีการใช้ส่วนของการเคลื่อนไหวใด ๆ หรือส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความน่าเชื่อถือสูง และมีความเรียบง่าย จึงทำให้มีการใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างกว้างขวางในวงการการสร้างพลังงานในอวกาศ และเครื่องทำความเย็นต่าง ๆ [1]

สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : ZnSb) เป็นหนึ่งในวัสดุที่คาดว่าจะมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกสูงที่สุด ซึ่งผลจากการมีประสิทธิภาพสูงนั้นมาจากการที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำอย่างเป็นพิเศษในบริเวณที่เป็นจุดรวม (Conjunction) ในโครงสร้างแบบอเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือจำนวนมาก [2]

ดังนั้นในโครงการนี้จะทำการศึกษาการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์เพื่อใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา เพื่อใช้ทำอุปกรณ์เครื่องทำความเย็น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ในสถานะของแข็ง (Solid-state) โดยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา

1.2.2 เพื่อหาเฟส และการดูดกลืนแสงของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (ZnSb) ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา

1.2.3 เพื่อคำนวณหาแถบช่องพลังงาน (Energy Band Gap)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมาได้

1.3.2 สามารถนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้กับเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4 ขอบเขตการทำวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ (ZnSb) โดยใช้สารตั้งต้นเป็นผงของซิงค์ (Zn) และผงแอนติโมนี (Sb)

1.4.2 ศึกษาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ซิงค์แอนติโมนายด์ (ZnSb) โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโดยโมลเท่ากันทุกการทดลอง

1.4.3 ตรวจสอบองค์ประกอบของ ZnSb ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) และทดสอบการดูดกลืนรังสีด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1.5 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

สิงหาคม 2558 - พฤษภาคม 2559

1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.7.1 ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←————→									
1.7.2 ออกแบบ และวางแผนการทดลอง	↔									
1.7.3 ทำการสังเคราะห์ ZnSb ด้วยเครื่องไมโครเวฟพลาสมา	←————→									
1.7.4 ตรวจสอบองค์ประกอบของสารที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)	↔									
1.7.5 ทดสอบการดูดกลืนรังสีด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	↔									
1.7.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง พร้อมจัดทำโครงการ	←————→									

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในบทนี้มีประกอบไปด้วย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โครงสร้างของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ ระบบการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : ZnSb) ด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา การศึกษาการเตรียมสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ของกลุ่มวิจัยที่น่าสนใจ รวมทั้งรายละเอียดของหลักการเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่เตรียมได้

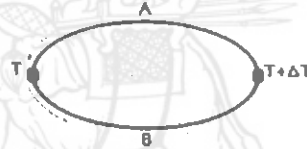
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุที่สามารถเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการจากปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) หรือสามารถทำให้เกิดความเย็นได้ โดยใช้หลักการจากปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ซึ่งวัสดุชนิดนี้เป็นที่รู้จักในชื่อว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกยังมีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นตู้เย็นในสถานะของแข็ง หรือปั๊มความร้อนได้ ซึ่งไม่มีการใช้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ใด ๆ หรือของเหลวที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความน่าเชื่อถือสูง และด้วยความเรียบง่ายของวัสดุ ทำให้มีการใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างกว้างขวางในหลาย ๆ ด้าน เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานทางด้านความหลากหลายของการระบายความร้อน

2.2 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)

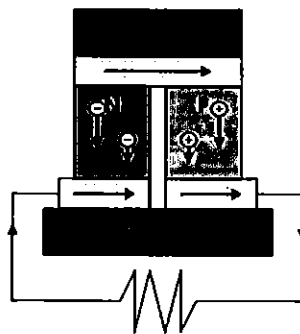
ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1821 โดย โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) [3 และ 4] นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบว่า “เมื่อให้ความร้อนหรือความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของวัสดุตัวนำสองชนิด แล้วทำให้ไฟฟ้าไหลในวงจรปิด” ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ซีเบค” (Seebeck Effect) [5] แสดงดังรูปที่ 2.1 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับความสำคัญของความต่างศักย์ซีเบค ซึ่งเป็นผลของการนำไปสู่สมบัติที่แท้จริงของวัสดุ เราเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck Coefficient) วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบคน้อยมาก ๆ จะอยู่ในกลุ่มโลหะ และวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของ ซีเบคมาก ๆ จะอยู่ในกลุ่มสารกึ่งตัวนำ [4] ปรากฏการณ์ของการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าโดยอุณหภูมิเกรเดียนต์ เราเรียกทอมนี่ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกซิตี (Thermoelectricity) สมบัติทางกายภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกซิตีถูกอธิบายจากปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยที่การขนส่งหรือเคลื่อนที่ของประจุ (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ที่ตำแหน่งร้อน (Hot Side) ของวัสดุจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าตำแหน่งเย็น (Cold Side)

ซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่ของประจุที่สามารถเคลื่อนที่ได้ไปยังบริเวณตำแหน่งที่เย็น และเมื่อในบริเวณตำแหน่งที่เย็นมีประจุที่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ในปริมาณมากกว่าบริเวณตำแหน่งที่ร้อน จะทำให้การกระจายของประจุเป็นรูปแบบไม่เป็นไปในทางเดียวกัน ส่งผลให้สนามไฟฟ้าเกิดการต่อต้านการแพร่ของประจุ ถ้าวัสดุอยู่ในวงจรแบบเปิด ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่ออัตราของประจุมีการย้ายจากด้านเย็นไปสู่ด้านที่ร้อนเนื่องจากสนามไฟฟ้า ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าเคมีในสภาวะสมดุลจะมีการตอบสนองกับความลาดชันของอุณหภูมิ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าเคมีนี้เป็นที่รู้จักในเทอมของความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck Voltage) และจำนวนของความต่างศักย์ที่ถูกสร้างขึ้นต่อหน่วยของความลาดชันอุณหภูมิ เราเรียกเทอมนี้ว่า สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck Coefficient) และถ้าวัสดุถูกเชื่อมต่อกับวงจร ศักย์ไฟฟ้าเคมีจะมีการเคลื่อนย้ายกระแสซึ่งเป็นการทำงานของกระแสไฟฟ้า และเป็นพื้นฐานของแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก [3] และลักษณะการเกิดแบบนี้มีการ แสดงดังรูปที่ 2.1 ในกรณีของซีเบค ค่าอุณหภูมิเกรเดียนต์จะถูกเหนี่ยวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าเคมีให้สร้างกระแสขึ้นในวงจร ซึ่งเป็นการสร้างสนามแม่เหล็กในอีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 2.1 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ความต่างศักย์ซีเบค [3]

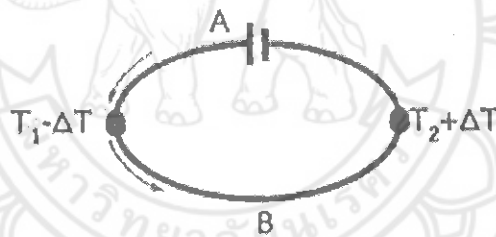
โลหะตัวนำหรือวัสดุตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีวัสดุที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าวัสดุมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type Semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นบวก รูปที่ 2.2 การใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ซีเบคผ่านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Power Generation) จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า [4]

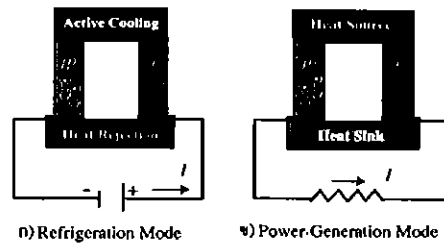
2.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้ทำเป็นตู้เย็นในสถานะของแข็ง หรือปั๊มความร้อนได้ โดยอาศัยการขับเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าในวงจร จากวัสดุที่ไม่เหมือนกันสองชนิด ลักษณะการทำงานเช่นนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพลเทียร์ ซึ่งถูกค้นพบโดย ยีน ชาร์เลส อะธานเนส เพลเทียร์ (Jean Charles Athanase Peltier) ในปี ค.ศ. 1834 เกิดจากการนำวัสดุที่มีอุณหภูมิเท่ากันสองชนิดมาสัมผัสกัน และทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 2.3 จะทำให้เกิดการปล่อยหรือดูดความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ (Peltier Coefficient) คือเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านพื้นผิวของวัสดุต่างกันสองชนิดอย่างต่อเนื่องถ้าวัสดุมีความแตกต่างของสัมประสิทธิ์เพลเทียร์เกิดขึ้น ความร้อนจะถูกปฏิเสธหรือถูกดูดกลืนอย่างใดอย่างหนึ่งที่บริเวณจุดเชื่อมต่อของวัสดุสองชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์กับปริมาณการให้กระแสไฟฟ้าแบบตรง และถ้ามีการให้กระแสไฟฟ้าแบบตรงเข้าไปบริเวณจุดเชื่อมต่อของวัสดุในหนึ่งตำแหน่งจะทำให้เกิดเป็นความร้อนออกมา ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก และการให้กระแสไฟฟ้าแบบตรงอื่น ๆ จะสามารถสร้างความร้อนที่จุดเชื่อมต่อของวัสดุสองชนิด อุปกรณ์ที่มีหลักการเช่นนี้ได้แก่ ปั๊มความร้อน (Heat Pump)



รูปที่ 2.3 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลเทียร์ [5]

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่เลือกมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีอยู่สองชนิดคือวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดพี และชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ โดยลักษณะการต่อเหมือนกับเทอร์โมคู่อิเล็กทริกแบบผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อดูดกลืนความร้อนหรือสร้างความร้อนขึ้นในด้านหนึ่ง และความร้อนที่ได้ไปคายทิ้งอีกด้านหนึ่ง โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านขึ้นอยู่กับทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายกับชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ก) แบบไฟฟ้า

ข) แบบปั๊มทำความเย็นหรือความร้อน

2.4 Dimensionless figure of merit (ZT)

พื้นฐานในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพความหลากหลายของสมบัติที่ขัดแย้งกัน เพื่อเป็นการเพิ่มค่า ZT ของวัสดุ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า ZT หรือต้องการได้ค่า ZT ที่มีค่าสูงจะต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีค่าการนำความร้อนต่ำ [6]

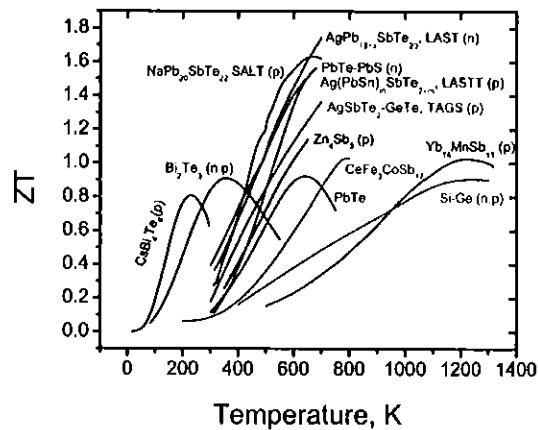
วัสดุที่มีค่า ZT สูงๆ หรือมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูง ๆ นั้น วัสดุต้องมีสมบัติดังนี้

2.4.1 วัสดุต้องมีค่าซีเบคที่สูง เพื่อเพิ่มการขนย้ายพลังงานความร้อนด้วยพาหะหรือประจุไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด

2.4.2 วัสดุมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ หรือมีการนำไฟฟ้าที่สูง เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนกลับไปเป็นพลังงานความร้อน

2.4.3 วัสดุต้องมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมาก ๆ เพื่อรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของด้านร้อน และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

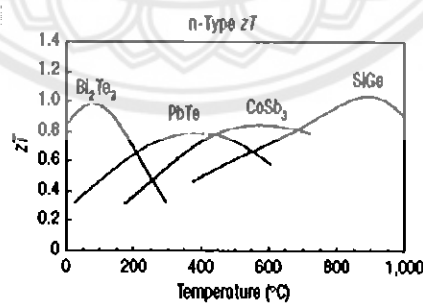
ตัวแปรทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมักเกิดขึ้นไม่พร้อมกันในวัสดุหนึ่ง ๆ ในปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า ZT สูง ดังนั้นการเลือกวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งานควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่นำไปใช้งานด้วย แสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดมีค่า ZT ที่สูงแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้น ๆ ดังนั้นการเลือกวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งานควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่นำไปใช้งานด้วย



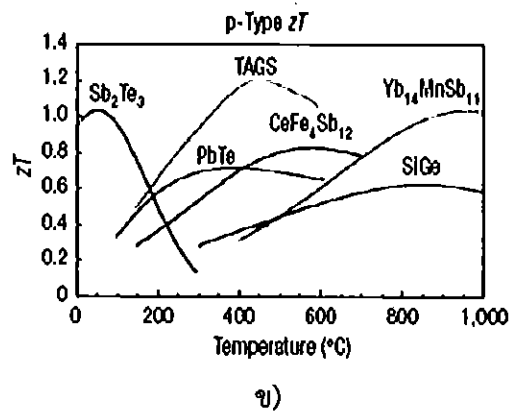
รูปที่ 2.5 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า ZT สูงเทียบกับอุณหภูมิ [7]

2.5 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials)

นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 และวัสดุบางชนิดยังคงมีศักยภาพในการใช้งานในปัจจุบัน เช่น Bi_2Te_3 และ Sb_2Te_3 เป็นต้น อย่างไรก็ตามแล้ววัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีต้องการนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงขณะที่ค่าการนำความร้อนด้วยผลึกต้องต่ำ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (N-type) และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี (P-type) แสดงดังรูปที่ 2.6 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้งานในปัจจุบันมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีประสิทธิภาพสูงนั้น การเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาใช้งานก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน



ก)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่า ZT ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
 ก) ชนิดเอ็น (N-type)
 ข) ชนิดพี (P-type) [8]

2.6 แนวทางการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต้องการเพิ่มค่า ZT ให้มีค่าสูงนั้น ต้องอาศัยสมบัติต่าง ๆ มาประกอบกันหลายส่วน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสัมบูรณ์ (Absolute Value of The Seebeck Coefficient) และค่าการนำไฟฟ้าต้องมีค่าสูง โดยตัวแปรที่มีผลต่อการได้มาของค่า ZT ที่สูงประกอบด้วย

2.6.1 ความเข้มข้นของประจุ (Carrier Concentration)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงต้องมีพาหะชนิดเดียวเท่านั้นภายในวัสดุ การผสมกันของวัสดุชนิดเอ็น และพินำไปสู่การที่ประจุเคลื่อนที่ไปยังด้านร้อน และด้านเย็นในเวลาเดียวกัน (Bipolar Effect) ซึ่งส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ ซีเบคมีค่าลดลง และวัสดุฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำบางชนิดเป็นวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นของพาหะที่ต่ำแล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงกว่า การที่ค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าที่น้อยก็มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย

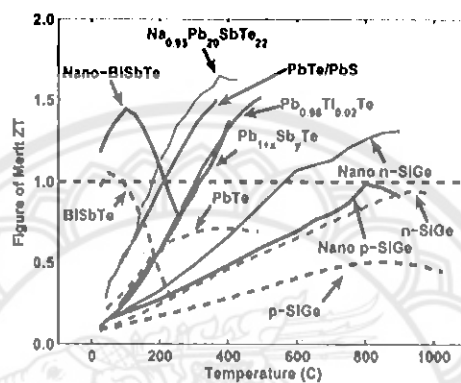
2.6.2 ประสิทธิภาพมวลยังผล (Effective Mass)

ประสิทธิภาพมวลยังผลของเหล่าประจุพาหะจะช่วยสร้างการชนกันของประจุจำนวนมากทำให้มี Effective Mass ที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีค่าเทอร์โมเพาเวอร์สูงขึ้นแต่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพมวลยังผลที่มีความเฉื่อยก็มีความเชื่อมโยงกับค่าของ Effective Mass โดยที่ประจุที่มีน้ำหนักมากจะมีความเร็วต่ำในการเคลื่อนที่จึงส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ที่ช้า และส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าที่ต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมวลยังผลกับความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุนั้นมีความซับซ้อน และขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางไฟฟ้า (Electronic Structure) การกระเจิงแบบเชิงกล [9]

2.6.3 การพัฒนาในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ความสนใจการคิดค้นเพื่อประดิษฐ์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแบบใหม่มีแรงจูงใจโดยการก่อให้เกิดความซับซ้อนในขนาดความยาวของเซลล์ต้นแบบ ซึ่งสามารถนำไปสู่กลไกใหม่สำหรับการ

สร้างประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูง [10 และ 11] ในช่วงกลางปี ค.ศ. 1990 มีทฤษฎีที่ทำนายเกี่ยวกับประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นได้โดยการจำกัดควอนตัมของการแตกตัวของอิเล็กตรอน แถบพลังงานของอิเล็กตรอนในขอบเขตโครงสร้างทางควอนตัมเป็นไปอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องในช่วงแคบ ๆ โดยเป็นการจำกัดการเพิ่มขึ้น และการลดลงของขนาด และในช่วงแคบ ๆ นี้จะทำให้เกิดประสิทธิภาพมวลยิ่งยวดที่มากส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าที่สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน โครงสร้างแตกต่างกันไปตามการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ซึ่งอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และค่าการนำไฟฟ้าเป็นผลมาจากการคัดกรองอิเล็กตรอน [12]

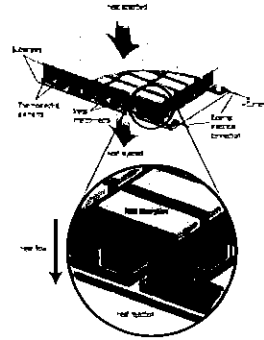


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดนาโนเมตรที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน [5]

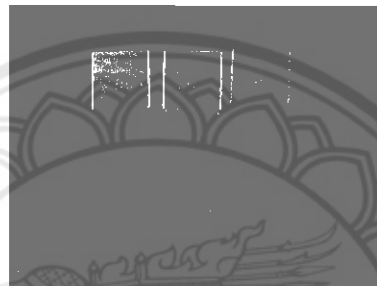
รูปที่ 2.7 แสดงวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดนาโนเมตรสามารถเพิ่มค่า ZT ได้อย่างชัดเจนเพื่อเทียบกับขนาดที่ไม่ใช้นาโนเมตร แต่อย่างไรก็ตามการผลิตวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีขนาดเล็กมาก ๆ หรือขนาดนาโนเมตรนั้นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วยทำให้มีต้นทุนการผลิตวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสูงตามไปด้วย นำไปสู่ราคาของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สูง และไม่สามารถแข่งขันได้ในท้องตลาด

2.7 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น และชนิดพี โดยวัสดุทั้งสองชนิดมาต่อกันแบบอนุกรมเป็นคู่ ๆ สลับกัน และมีขั้วไฟฟ้าโลหะเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน แต่ละคู่ที่ต่อกันมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้ายที่ด้านบนและด้านล่างของโลหะเชื่อมต่อถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก เมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าไหลก็ทำให้ครบวงจรพอดีปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิตได้จากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบน (จุดความร้อน) และด้านล่าง (คลายความร้อน) ขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พี ในโมดูลนั้น ดังแสดงในรูป 2.8 และ 2.9



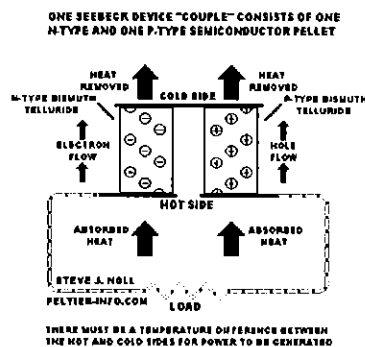
รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า [8]



รูปที่ 2.9 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็น และผลิตกระแสไฟฟ้า [8] การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

2.7.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

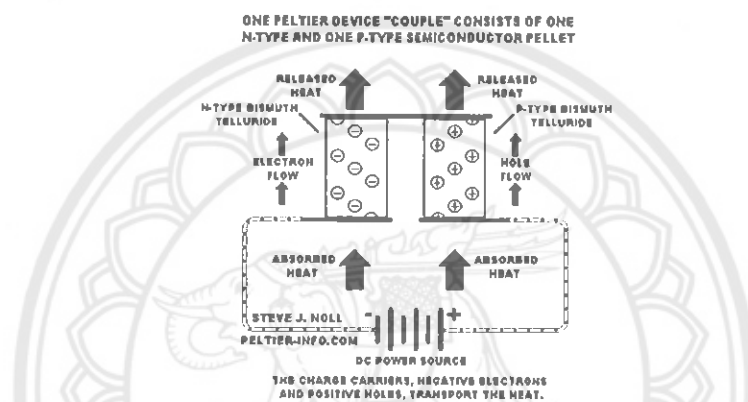
การประยุกต์ใช้งานกระแสไฟฟ้าใช้หลักการของปรากฏการณ์ซีเบคของการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการผันความร้อนที่ถ่ายโอนจากด้านร้อนสู่ด้านเย็นเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนอิสระเกิดการเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็น และในส่วนของวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี โฮลอิสระเสมือนเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็นเช่นเดียวกัน จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากการถ่ายโอนของประจุระหว่างขั้วทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า [17]

2.7.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน

การประยุกต์ใช้เพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อนนั้นใช้หลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยกระแสไฟฟ้าที่เข้าจ่ายไปมีผลทำให้อิเล็กตรอนในวัสดุชนิดเอ็นเคลื่อนที่สวนทางกับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า และในทางกลับกันโฮลในวัสดุชนิดพีถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ตามกระแสไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลนั้นมีการนำความร้อนมาด้วยจนทำให้เกิดด้านหนึ่งร้อน และอีกด้านหนึ่งเย็นแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.11 การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำความเย็น และปั๊มความร้อนนั้นมีหลายอย่างด้วยกันเช่น การประยุกต์ใช้กับตู้เย็นแบบพกพา อุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์ และเครื่องปรับอากาศแบบพกพา



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลการทำความเย็น และปั๊มความร้อน [17]

2.8 สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : Zn_4Sb_3)

เป็นสารประกอบเคมีอนินทรีย์ มีลักษณะคล้ายกับ อินเดียมแอนติโมนายด์ อะลูมิเนียมแอนติโมนายด์ และแกลเลียมแอนติโมนายด์ ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำแบบอินเทอร์เมทัลลิกที่ถูกใช้ในทรานซิสเตอร์ เครื่องตรวจจับอินฟราเรด และอิมเมจความร้อนเช่นเดียวกับอุปกรณ์แมกนีโทเรซิสทีบ ในรายงานครั้งแรกของการใช้โลหะผสมซิงค์ และแอนติโมนี คือในการทำงานเดิมของซีเบคในทางเทอร์โมอิเล็กทริกซิดี เมื่อในปี ค.ศ. 1860 มีนักประดิษฐ์ชาวอเมริกันซึ่งมีชื่อว่า Moses G. Farmer ได้ทำการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลังงานแบบเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูงจากการใช้โลหะผสมซิงค์ และแอนติโมนี โดยที่มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับปริมาณสารสัมพันธ์ของ $ZnSb$ และเขาแสดงให้เห็นถึงการกำเนิดครั้งนี้ในปี ค.ศ. 1867 ในนิทรรศการที่กรุงปารีส ในที่สุด Farmer ได้รับสิทธิบัตรบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเขาในปี ค.ศ. 1870 George H. Cove ได้ทำการจดสิทธิบัตรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้โลหะผสมของซิงค์กับแอนติโมนี

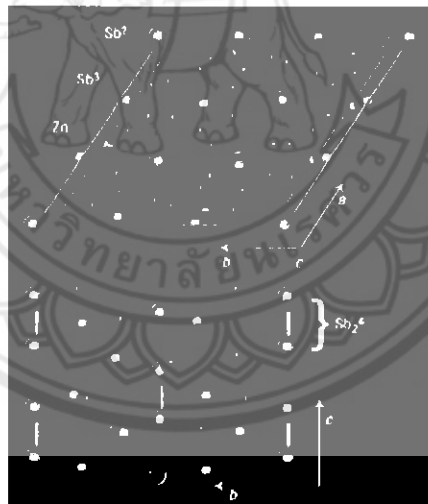
2.8.1 โครงสร้างของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์

สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีลักษณะที่ปรากฏอยู่ 2 ลักษณะ คือ แอลฟา- Zn_4Sb_3 และ เบต้า- Zn_4Sb_3 ซึ่งเป็นลักษณะที่โครงสร้างที่สามารถอยู่ที่อุณหภูมิ

สูงได้ โครงสร้างของ เบต้า-Zn₄Sb₃ เป็นแบบ Rhombohedral มี Spece Group ส่วนโครงสร้างของ แอลฟา-Zn₄Sb₃ มีโครงสร้างเป็นแบบ Triclinic อยู่ในลักษณะ C-centred หรือ เป็นแบบ Metrically Monoclinic Cell (มี space group C1) [17 และ 18]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายต์ [16, 19]

สมบัติ	
สูตรทางเคมี	Zn ₄ Sb ₃
น้ำหนักโมเลกุล	641.24 กรัม/โมล
สีที่ปรากฏ	สีเทา
ความหนาแน่น	6.46 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	570 องศาเซลเซียส
ค่าคงที่ของแลตทิซ	a = 12.2330 อังสตรอม b = 12.2330 อังสตรอม c = 12.4280 อังสตรอม



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายต์ [2]

2.8.2 สมบัติของสารที่นำมาทำการสังเคราะห์

2.8.2.1 สังกะสี (Zinc) [20] คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ 12 ชื่อในภาษาอังกฤษมาจากภาษาเยอรมันว่า Zink เป็นธาตุประเภท โลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจน และธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สารซิงค์ออกไซด์เป็น สารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง ซึ่งในทางฟิสิกส์นิยมสารกึ่งตัวนำว่า เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ เนื่องจากประจุทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) จึงไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบการ

นำ (Conduction Band) เลยแต่ที่อุณหภูมิ มากกว่า 0 เคลวิน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปอยู่ยังแถบการนำได้ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ในสาร ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไปของธาตุสังกะสี

ข้อมูลทั่วไป (General)	
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	สังกะสี, Zn, 30
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
มวลอะตอม	65.409 กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 2

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของสังกะสี

ลักษณะทางกายภาพ (Physical Properties)	
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	692.68 เคลวิน (419.53 องศาเซลเซียส)
จุดเดือด	1180 เคลวิน (907 องศาเซลเซียส)
ความร้อนของการหลอมเหลว	7.32 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	123.6 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 องศาเซลเซียส) 25.390 จูล/โมลเคลวิน

2.8.2.2 พลวงหรือแอนติโมนี (Antimony) [21] คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 51 และสัญลักษณ์คือ Sb (มาจากคำในภาษาลาตินว่า Stibium) พลวงเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloid) มี 4 อัญญรูป โดยพลวงที่มีความเสถียรจะเป็นโลหะสีฟ้า พลวงที่มีสีเหลือง และดำจะเป็นอโลหะที่ไม่เสถียร พลวงใช้ประโยชน์ในการทำซีรามิก สารเคลือบผิว โลหะผสม อิเล็กโทรด และยาง

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทั่วไปของแอนติโมนี

ข้อมูลทั่วไป (General)	
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	พลวง, แอนติโมนี, Sb, 51
อนุกรมเคมี	ธาตุกึ่งโลหะ
มวลอะตอม	121.760 กรัม/โมล
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 18, 5

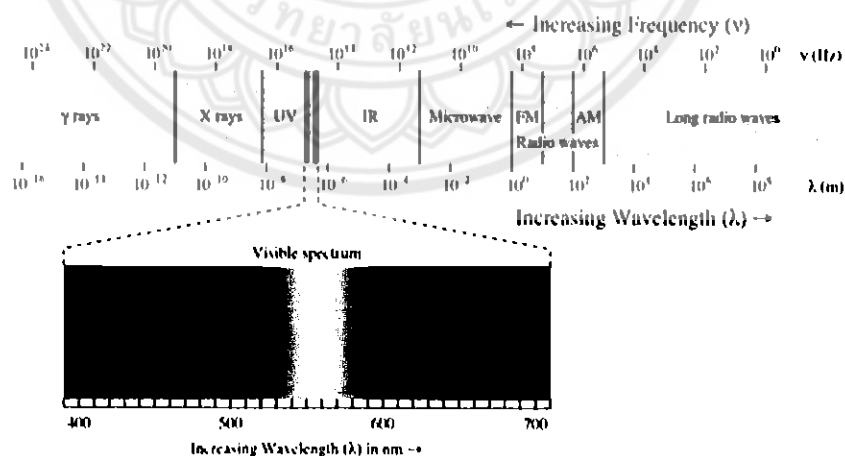
ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของแอนติโมนี

ลักษณะทางกายภาพ (Physical Properties)	
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	903.78 เคลวิน (630.63 องศาเซลเซียส)
จุดเดือด	1860 เคลวิน (1587 องศาเซลเซียส)
ความร้อนของการหลอมเหลว	19.79 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	193.43 กิโลจูล/โมล

2.9 ระบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System)

2.9.1 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) [22]

ไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นความถี่วิทยุชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3 จิกะเฮิรตซ์ – 300 จิกะเฮิรตซ์ ส่วนในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1 จิกะเฮิรตซ์ – 60 จิกะเฮิรตซ์ เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในปี ค.ศ. 1945 เริ่มมีการผลิตเตาไมโครเวฟออกจำหน่ายแต่ยังมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการใช้ในครัวทั่วไป ต้องใช้เวลาอีกนานกว่าจะสามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็ก และราคาถูกลงจึงเริ่มเป็นที่นิยมใช้ตามบ้าน เนื่องจากความถี่ไมโครเวฟสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง แต่ในบทความต่อไปนี้จะกล่าวถึงการนำไปใช้กับวิทยุสื่อสาร



รูปที่ 2.13 ช่วงความถี่ และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.9.2 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave Oven) [22]

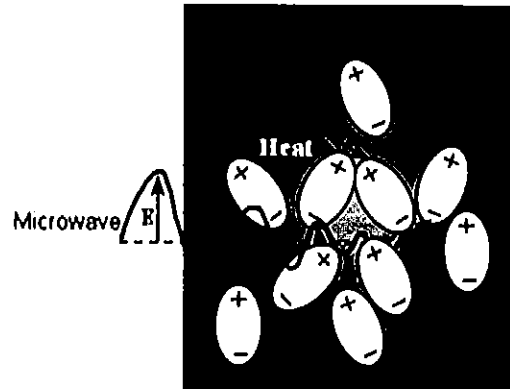
เตาอบไมโครเวฟ (Microwave Oven) เป็นอุปกรณ์เครื่องครัวชนิดหนึ่งที่ทำให้ความร้อนแก่อาหารโดยคลื่นไมโครเวฟ เริ่มแนวความคิดในการใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่อาหารนี้

ค้นพบโดย เพอร์ซี สเปนเซอร์ (Percy Spencer) ซึ่งทำงานที่บริษัทเรอtheon (Raytheon) ในขณะที่กำลังสร้าง แมกนีตรอนสำหรับใช้ในระบบเรดาร์ วันหนึ่งในขณะที่เขากำลังทำงานอยู่กับเรดาร์ที่กำลังทำงานอยู่ เขาได้สังเกตเห็นแท่งช็อกโกแลตในกระเป๋าเสื้อของละลาย อาหารชนิดแรกที่อบโดยตู้อบไมโครเวฟคือ ข้าวโพดคั่ว และชนิดที่สองคือ ไข่ ซึ่งเกิดระเบิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองอบ

การเกิดความร้อนในสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating) เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้าคือ มีประจุบวก และประจุลบที่ขั้วตรงกันข้าม เมื่อคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปโมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกเหนี่ยวนำ และหมุนขั้วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่น และคลื่นนี้เป็นสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสลับไปมาจึงส่งผลให้โมเลกุลเหล่านี้หมุนกลับไปมาทำให้เกิดความร้อนขึ้น การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้จะมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนสูงสุดในการให้ความร้อนแก่ น้ำ และประสิทธิภาพต่ำเมื่อให้ความร้อนแก่ ไขมัน น้ำตาล และน้ำแข็ง การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ มักจะมีการให้คำอธิบายที่ผิดว่าเกิดจากการสั่นพ้องของโมเลกุลน้ำ (การสั่นพ้องของโมเลกุลน้ำ ซึ่งเกิดได้ด้วยความถี่ที่สูงมากในช่วงหลายสิบลิจกะเฮิร์ตซ์ เท่านั้น)

2.9.3 Dielectric Heating [23]

ความร้อนไดอิเล็กตริก หรือ Dielectric Heating นี้ส่วนใหญ่อาจใช้คำอื่นที่มีความหมายเหมือนกัน เช่น Electronic Heating หรือ High-frequency Heating ซึ่งเป็นกระบวนการในคลื่นวิทยุหรือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจาก การได้รับความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งความร้อนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เกิดการหมุนแบบไดโพล การหมุนของโมเลกุลเกิดขึ้นในวัสดุที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขั้ว และมีการไหลผ่านของกระแสแบบมีขั้ว ซึ่งเป็นโมเลกุลที่อยู่ในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแสดงดังรูปที่ 2.14 ถ้ามีการเปลี่ยนทิศทางของสนามไปมา (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) จะทำให้โมเลกุลเกิดการหมุนไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าหรือหมุนไปในแนวเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ซึ่งการหมุนของโมเลกุลแบบนี้เราเรียกว่า เป็นการหมุนแบบไดโพล เมื่อมีการสลับสนามไฟฟ้าเป็นอย่างอื่นจะทำให้โมเลกุลของสารมีทิศทางไปตรงกันข้าม การหมุนของโมเลกุลที่เกิดจากแรงดัน แรงดึง และไปปะทะกับโมเลกุลตัวอื่น (มีการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า และแรงโน้มถ่วง) ทำให้เกิดการแพร่ของพลังงานไปยังโมเลกุล และอะตอมที่อยู่ติดกันในวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.15 อุณหภูมิของอะตอมหรือโมเลกุลในวัสดุได้มาจากพลังงานจลน์เฉลี่ย (พลังงานจากการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือ โมเลกุล) ดังนั้นการที่โมเลกุลเกิดการสั่นขึ้นดังลักษณะดังกล่าวนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในวัสดุ การหมุนแบบไดโพลเป็นแบบเชิงกลที่มีความเกี่ยวข้องกับ Dielectric Heating โดยส่วนใหญ่แล้วจะเห็นในเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งก่อให้เกิดประสิทธิภาพอย่างมากในน้ำที่มีสถานะเป็นของเหลว จะเกิดน้อยมากกับพวกไขมัน น้ำตาล และน้ำแข็ง เนื่องจากพวกไขมัน และน้ำตาลนั้นมีความเป็นขั้วน้อยกว่าโมเลกุลของน้ำมาก จึงทำให้ได้รับผลจากแรงของสนามไฟฟ้าแม่เหล็กที่น้อยมาก



รูปที่ 2.14 การหมุนแบบมีขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขั้ว และมีขั้วทางไฟฟ้าโดยที่โมเลกุลจะหมุนไปในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [24]







รูปที่ 2.15 การหมุนของโมเลกุลที่มีพลังงานในการจับตัวกันของไมโครเวฟ-รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า [15]

การสื่อสารของคลื่นความถี่ไมโครเวฟจะเข้าไปในสารกึ่งของแข็งโดยระยะที่เข้าไปเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของพลังงาน ซึ่งการเจาะของคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถเจาะผ่านเนื้อเยื่อของเราได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งอันตรายสำหรับการอยู่ใกล้กับเสาอากาศที่มีการกระจายคลื่นไมโครเวฟอยู่ ระยะที่ควรอยู่ห่างจากจุดนี้คือมากกว่า 10 ไมล์

2.9.4 พลาสมา [25 และ 26]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะสร้างแรงกระทำต่ออะตอมหรือโมเลกุลที่มีความเสถียร และผลึกของแข็ง ในส่วนใหญ่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากตัวสารในทางเคมี และมาจากสถานะของแข็งในทางฟิสิกส์ ซึ่งผลทั้งสองนี้ถูกพัฒนาให้มีความเข้าใจในพื้นฐานของโครงสร้างแบบคงที่ ระบบของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับพลังงานมากกว่าพลังงานความร้อนที่อยู่รอบ ๆ วัสดุทั้งหมดสามารถเปลี่ยนเฟสให้อยู่ในรูปของก๊าซได้โดยการเพิ่มพลังงานเข้าไปอย่างเหมาะสม ในสถานะแก๊ส โมเลกุลหรืออะตอมมีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในหลอดแก้ว ซึ่งการชนกันของโมเลกุลหรืออะตอมที่ได้เป็นหลักคือการชนกันที่บริเวณผนังของหลอดแก้ว ถ้าแก๊สสามารถแพร่ออกจากหลอดแก้วออกมายังอากาศภายนอกได้ ในที่สุดแล้วมันจะกระจายไปในตัวบรรยากาศ ถ้าเป็นพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นอีก โมเลกุลก็จะทำการแยกส่วนประกอบของตัวเองออก

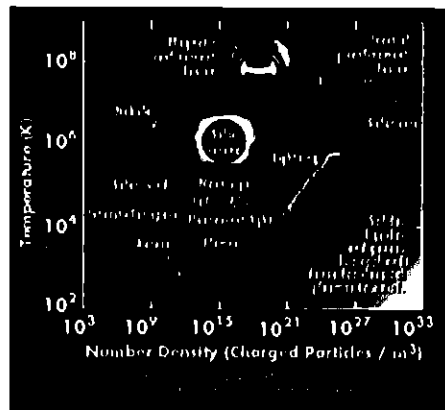
สำหรับอะตอมซึ่งมีโครงสร้างภายใน และจะเริ่มทำการแยกส่วนออกเป็น ส่วน ๆ เช่นเดียวกับโมเลกุล ถ้าอะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนออกไปหนึ่งตัวหรือมากกว่าจะทำให้ประจุของอะตอมมีค่าเป็นบวก ซึ่งเราเรียกว่าไอออน ถ้าหากพลังงานที่ให้เข้าไปในระบบมีความเหมาะสมอะตอมจะมีการแตกตัว กลายเป็นอิเล็กตรอน และไอออน โดยการเพิ่มพลังงานที่มากพอกับวัสดุใด ๆ จะทำให้เกิดของ อิเล็กตรอน และไอออนถูกสร้างขึ้นซึ่งแก๊สสุดท้ายของอิเล็กตรอน และไอออนนี้จะถูกเรียกว่า พลาสมา ดังรูปที่ 2.16

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Ice H_2O	Water H_2O	Steam H_2O	Ionized Gas H^+ , e^- , H^+ , e^-
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ (~ 10 electron volts)
			
Molecules fixed in lattice	Molecules free to move	Molecules free to move, large spacing	Ions and electrons move independently, large spacing

รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของสถานะทั้งสี่สถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมา [27]

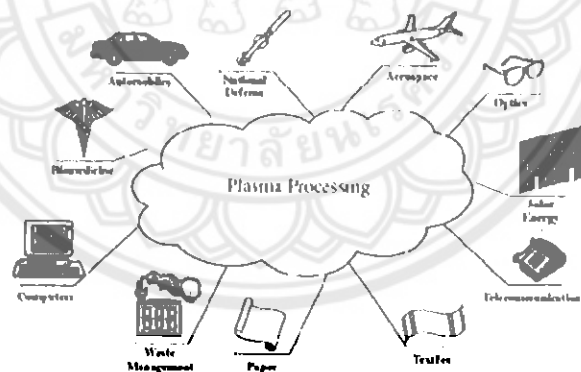
พฤติกรรมที่ตามมาหลังจากชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของแก๊สที่มีการแตกตัวกลายเป็นไอ ส่วนพลาสมาที่มีลักษณะเหมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า ที่ว่าเหมือนนั้นเนื่องมาจากมีความคาดเคลื่อนน้อย จากความเป็นกลางที่มีการวัดผลทางไดนามิกส์ที่ประกอบไปด้วยชนิดของโหมดพลาสมา พลาสมาที่ไม่มีความเป็นกลางอาจประกอบไปด้วยประจุของสัญลักษณ์เพียงหนึ่งเดียวที่เกิดขึ้นโดยพื้นฐานจากประสพการณ์ในห้องทดลอง ซึ่งความสมดุลของพลาสมาขึ้นอยู่กับการมีของสนามแม่เหล็กอย่างเข้มข้น และเกี่ยวกับการหมุนของประจุในของเหลว

สรุปแล้วพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุจำนวนมากโดยมีการควบคุมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า พลาสมาคือแก๊สที่ดูเหมือนจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าของอนุภาคที่เป็นประจุ ซึ่งมีพฤติกรรมในการจับตัวกันเป็นกลุ่ม ในทางฟิสิกส์มีการกำหนดให้พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร ส่วนใหญ่ของจักรวาลถูกสร้างขึ้นจากพลาสมา ดังรูปที่ 2.17 พลาสมาขนาดกลางอธิบายในระดับมหภาค (ในขนาดใหญ่) โดยอุณหภูมิจึงและความหนาแน่นของมัน ส่วนพลาสมาในระดับจุลภาคถูกอธิบายในทางคณิตศาสตร์โดยใช้ความน่าจะเป็นมาคำนวณหาตำแหน่ง และความเร็วของอนุภาคทั้งหมด เนื่องจากการชนกันของอนุภาคเหล่านี้ทำให้อนุภาคของพลาสมาเกิดการแตกตัวเป็นประจุ และมีการคายรังสีออกมา (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ยิ่งไปกว่านั้นยังมีคลื่นที่แตกต่างกันจำนวนมากที่ถูกจัดว่าเป็นพลาสมาขนาดกลาง ความเสถียร และความมั่นคงของคลื่นเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในระบบพลาสมา



รูปที่ 2.17 อุณหภูมิ และความหนาแน่นของสถานะที่สี่ของสสาร [27]

พลาสมาขนาดกลางสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้มากกว่าสภาพแวดล้อมอื่น ๆ และไม่มียืดหยุ่นอื่น ๆ สามารถกระตุ้นอะตอม และโมเลกุลในการแผ่รังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือบรรลุนิวเคลียสที่มีการเปรียบเทียบแบบไม่สมดุค ในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้พลาสมาที่สำคัญที่สุด คือ ผลิตภัณฑ์ของวงจรไฟฟ้าในระดับจุลภาค โดยใช้ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการผลิตวัสดุพลาสมาส่งผลกระทบต่อหลายอุตสาหกรรมการผลิตที่ใหญ่ที่สุดรวมถึงอุตสาหกรรมรถยนต์ ยาชีวภาพ คอมพิวเตอร์ ใยสังเคราะห์ อวกาศ และการสื่อสารคมนาคมต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กระบวนการผลิตของพลาสมาในภาคอุตสาหกรรม [25]

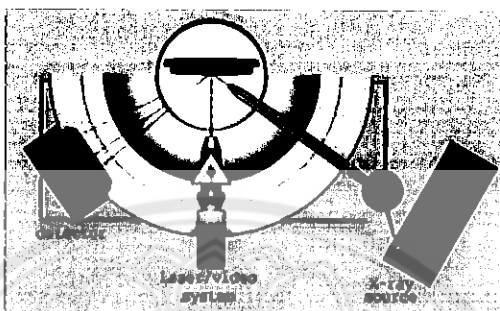
2.9.5 ไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma)

ในการใช้ไมโครเวฟมาเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีทำให้ได้อุณหภูมิที่สูงมากกว่าจากระบบที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบตรง หรือการจ่ายคลื่นความถี่ของวิทยุ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการปล่อยคลื่นไมโครเวฟจะใช้ถึง 100,000 องศาเซลเซียส การใช้คลื่นไมโครเวฟมาเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาสามารถได้มาช่วงความกว้างของความดันแก๊ส ซึ่งมีช่วงตั้งแต่ว่าความดันต่ำมาก ๆ ไปจนถึงความดันบรรยากาศ การใช้อุณหภูมิที่สูงมากจากการใช้คลื่นไมโครเวฟมาเป็นตัวสร้าง

พลาสมา และปริมาณของแก๊สที่มีการแตกตัวเป็นประจุที่น้อยกว่ามากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ [41]

2.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

2.10.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) [31]



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการทำงานของ XRD[16]

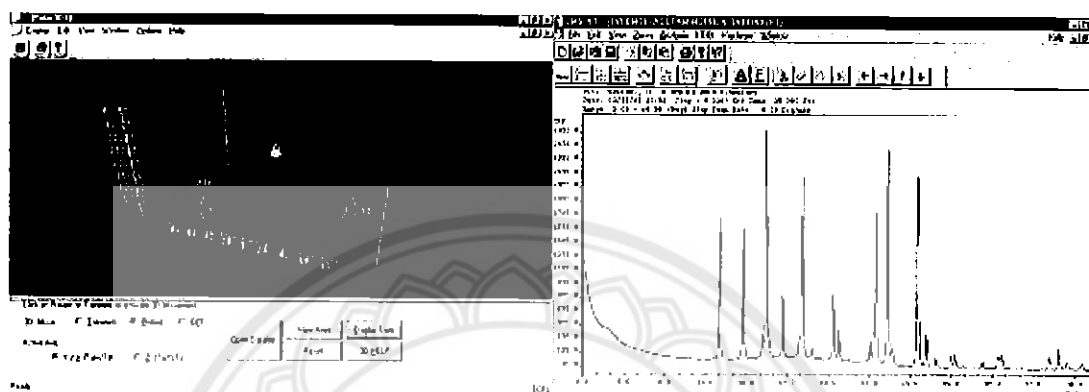
เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่

2.10.1.1 Single-Crystal Methods โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้าง อะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (Laue Method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่ และทำการ เปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic Plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้ม และตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนแต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุน และอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ Diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวม และจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

2.10.1.2 Powder Method วิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องประกอบ และตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

เทคนิค X-ray Powder Diffractometry นั้นจะใช้ลำรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวฉายลงบนตัวอย่างที่ถูกวางอยู่บนแท่นหมุนเป็นมุม เท่ากับ 0-90 องศา รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแล้วบันทึกบน Inked Strip Chart เครื่องตรวจวัดจะหมุนไปพร้อม ๆ กับแท่นหมุน แต่จะหมุนเป็นมุม และ Strip Chart จะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุน และเครื่องตรวจวัดด้วย

ความเร็วคงที่ เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เครื่องตรวจจับได้ แล้วนำมาพล็อตกราฟ Diffractogram ซึ่งประกอบด้วยพีคต่าง ๆ โดยที่พีคแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาค่า d ของแต่ละพีคแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เป็นต้น ก็จะสมารถหาปริมาณสัมพันธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้



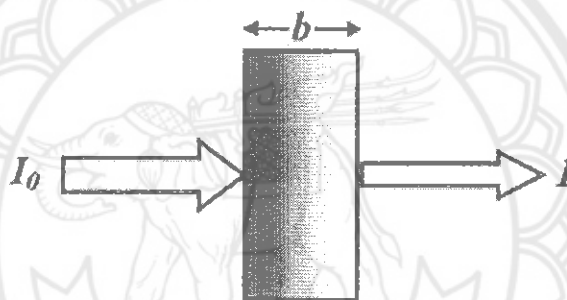
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พีคตัวอย่างที่ต้องการทราบ [31]



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้เทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [31]

2.10.2 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) [32]

โดยทั่วไปแล้ว UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งในปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคนิคง่าย ๆ ประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง มีความรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคนี้ อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ “เบียร์ แลมเบิร์ต” (Beer Lambert’s Law) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กฎของเบียร์ซึ่งมีใจความดังนี้ “ สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นที่ดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียล (Exponential’s Law) กับความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนรังสี และความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านตัวอย่าง ” หรือได้กล่าวไว้ว่า เมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้มเริ่มต้น (I_0) เข้าไปในสารตัวอย่างสารที่มีความหนาเท่ากับความหนาของสารละลายตัวอย่างทำให้โฟตอนของลำแสงเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลของสารทำให้ความเข้มข้นของลำแสงลดลงจากลำแสงที่มีความเข้มแสงผ่านเข้า (I_0) เป็นความเข้มแสงที่ผ่านออก (I) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงผ่านเข้า (I_0) และผ่านออก (I) ของตัวอย่าง [17]

จากรูปที่ 2.22 สามารถเขียนสมการการส่องผ่าน (Transmittance, T) เป็นสัดส่วนปริมาณความเข้มแสงที่ผ่านออกจากตัวอย่าง (I) ต่อปริมาณความเข้มแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (I_0) ดังนี้

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.1)$$

ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, A) สามารถคำนวณได้จาก

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \log \frac{1}{T} = \epsilon b C \quad (2.2)$$

โดยที่ A = Absorbance หรือ Optical Density

T = ค่าการส่องผ่านแสงของสาร (Transmittance)

- I_0 = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of Transmitted Light)
- I = ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of Incident Light)
- b = ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็น เซนติเมตร (Path Length of Sample หรือ Cell Length)
- C = ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น mol/dm^3 หรือ mol/L หรือ Molar
- ϵ = Molar Absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุลค่านี้จะระบุค่าสารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 โมล

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

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

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

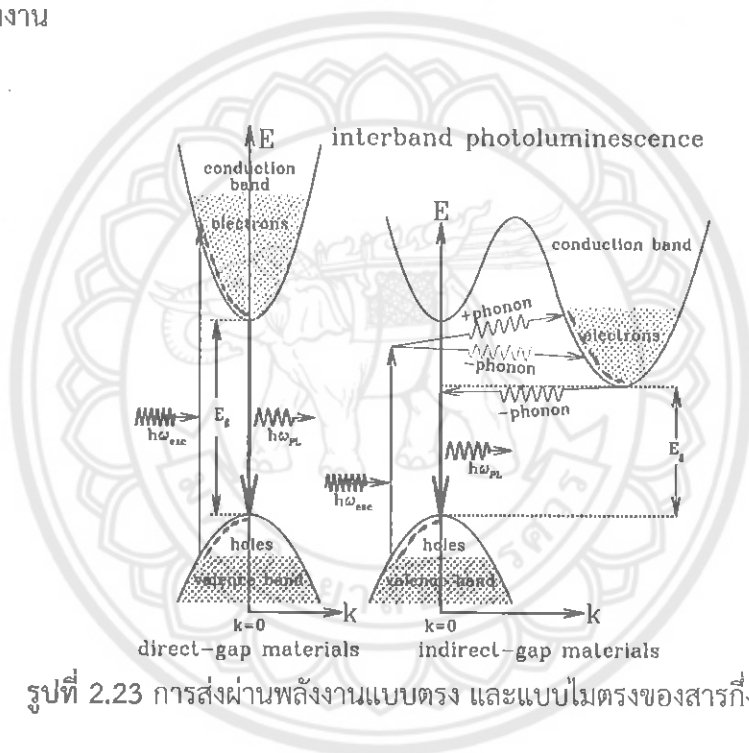
$$t = \frac{bc}{d} \quad (2.5)$$

- โดยที่ α_{abs} = ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรวม
- $H\nu$ = พลังงานโฟตอน (Photon Energy)
- A = ค่าคงที่ (Constant)
- E_g = แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap)
- N = 0.5 สำหรับแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง หรือ 2 สำหรับแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง
- T = Effective Thickness
- B = ความหนาของสารละลาย ทั่วไปมีขนาดเท่ากับคิวกเวทน์ สำหรับใส่

ตัวอย่าง

- D = ความหนาแน่นของสาร (Density)
- C = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลูกบาศก์เมตร) หรือ (โมล/ลิตร)

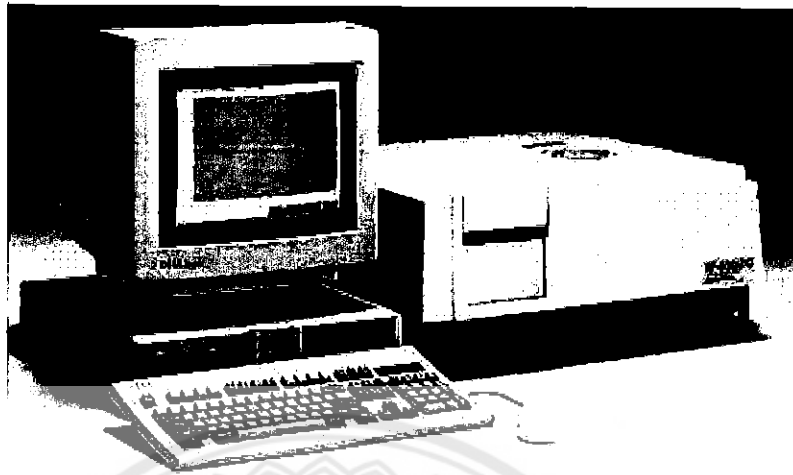
จากสมการ 2.3-3.5 สำหรับการหาค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hu)^2$ กับ hu และสำหรับแบบไม่ตรงสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hu)^{1/2}$ กับ hu ทำการลากเส้นตรงตามความชันของกราฟ (Extrapolated Straight Line) มาตัดที่ค่า $(\alpha hu)^2$ หรือ $(\alpha hu)^{1/2}$ เท่ากับศูนย์ และค่าที่อ่านบนแกนเอ็กซ์มีค่าเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.23 การส่งผ่านพลังงานแบบตรง และแบบไม่ตรงของสารกึ่งตัวนำ

จากรูปที่ 2.23 แสดงการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ขึ้นไปจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental Absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นของสเปกตรัมมีการดูดกลืนนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Absorption Edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ซึ่งบางครั้งจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันเลขคลื่นของอิเล็กตรอน ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เราเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะส่งผ่านแบบตรง หรืออาจเรียกว่าแถบพลังงานแบบตรง (Direct Energy Band Gap) ส่วนในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์

อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เราเรียกกึ่งตัวนำที่มีลักษณะการกักขังอิเล็กตรอนพลังงานแบบไม่ตรง หรือเรียกว่าแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap)



รูปที่ 2.24 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tatsuhiko และคณะ (1999) [30] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบการขึ้นรูปเชิงกลของชั้นงานที่มีลักษณะเป็นบัลก์ โดยประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปสารประกอบซิงค์-แอนติโมนี (Zn_4Sb_3) สำหรับการเตรียมซิงค์แอนติโมนายด์ที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อผ่านการอบอ่อน และการ Hot-pressing แล้ว จะทำให้ได้ชั้นงานที่มีลักษณะเป็นบัลก์ และมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟสเดียว ที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากชั้นงานที่ได้นั้นถูกเตรียมโดยไม่มีรอยร้าวภายในโครงสร้าง ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปเช่นนี้จะไม่สามารถทราบปริมาณสารสัมพันธ์ของซิงค์แอนติโมนายด์ที่เตรียมได้ แต่เป็นวิธีที่ทำให้ได้ชั้นงานที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นที่ต้องการในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

Takashi และคณะ (2002) [31] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ (Zn_4Sb_3) โดยเตรียมจากวิธี Gradient Freeze (GF) และทำการเผาผนึก ซึ่งผลของการลดอุณหภูมิส่งผลต่อการขยายตัวทางความร้อน และการเปลี่ยนแปลงเฟสในโครงสร้าง จากเฟสเบต้าเป็นเฟสแอลฟา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกคือ 236.5 เคลวิน ส่วนอุณหภูมิในการ Gradient Freeze (GF) คือ 257.4 เคลวิน ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าสูง และมีสมบัติของสารเป็นแบบ P-type ตามอุณหภูมิดังกล่าว ขณะที่การลดลงของอุณหภูมิส่งผลให้สารมีความไวต่อการตอบสนองทางแม่เหล็ก และชั้นงานที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Gradient Freeze (GF) มีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูงกว่าชั้นงานที่สังเคราะห์ด้วยการเผาผนึก ซิงค์แอนติโมนายด์ที่มีเฟสแอลฟา เป็นหนึ่งในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกตัวแรก ๆ ที่มีการใช้ประโยชน์ในด้าน Cryogenic Use

L.T.Zhang และคณะ (2003) [32] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของซิงค์แอนติโมนายด์ (Zn_4Sb_3) ในลักษณะฟิล์มบาง ซึ่งเตรียมโดยการทำ Co-

deposition ของซิงค์ และแอนติโมนี ด้วยวิธีการ Magnetron Sputtering फिल्मบางที่ทำการ Deposition ของสารพวกที่มีลักษณะคล้ายแก้ว จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 573-673 เคลวิน ซึ่งวิธีการนี้ทำให้ได้ผลึกของซิงค์แอนติโมนายด์ที่มีเฟสเบต้า फिल्मบางของซิงค์แอนติโมนายด์ที่เตรียมได้จะมีค่า Power Factor ที่สูง และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เวลาในการตกสะสมของฟิล์ม ส่วนค่าการต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์ม และอนุภาคของซิงค์ในเมทริกของการโตแบบหยาบ ๆ ค่าการต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงขึ้นสามารถวัดได้จากฟิล์มที่มีการควบคุมความหนาในระดับจุลภาค ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 300 นาโนเมตรจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

Soon-Chul Ur และคณะ (2004) [33] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : Zn_4Sb_3) ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยวิธีการ hot press โดยตรง ซึ่งซิงค์แอนติโมนายด์ที่เตรียมได้มีความหนาแน่นสูงมาก โดยส่วนประกอบที่เตรียมจากซิงค์ และแอนติโมนีเป็น 57.64 เปอร์เซ็นต์ และ 42.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ให้ผลทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีที่สุด และสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกได้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องจนถึง 600 เคลวิน พบว่าค่า ZT ที่ได้มีค่าเป็น 1.2 ที่อุณหภูมิ 600 เคลวิน

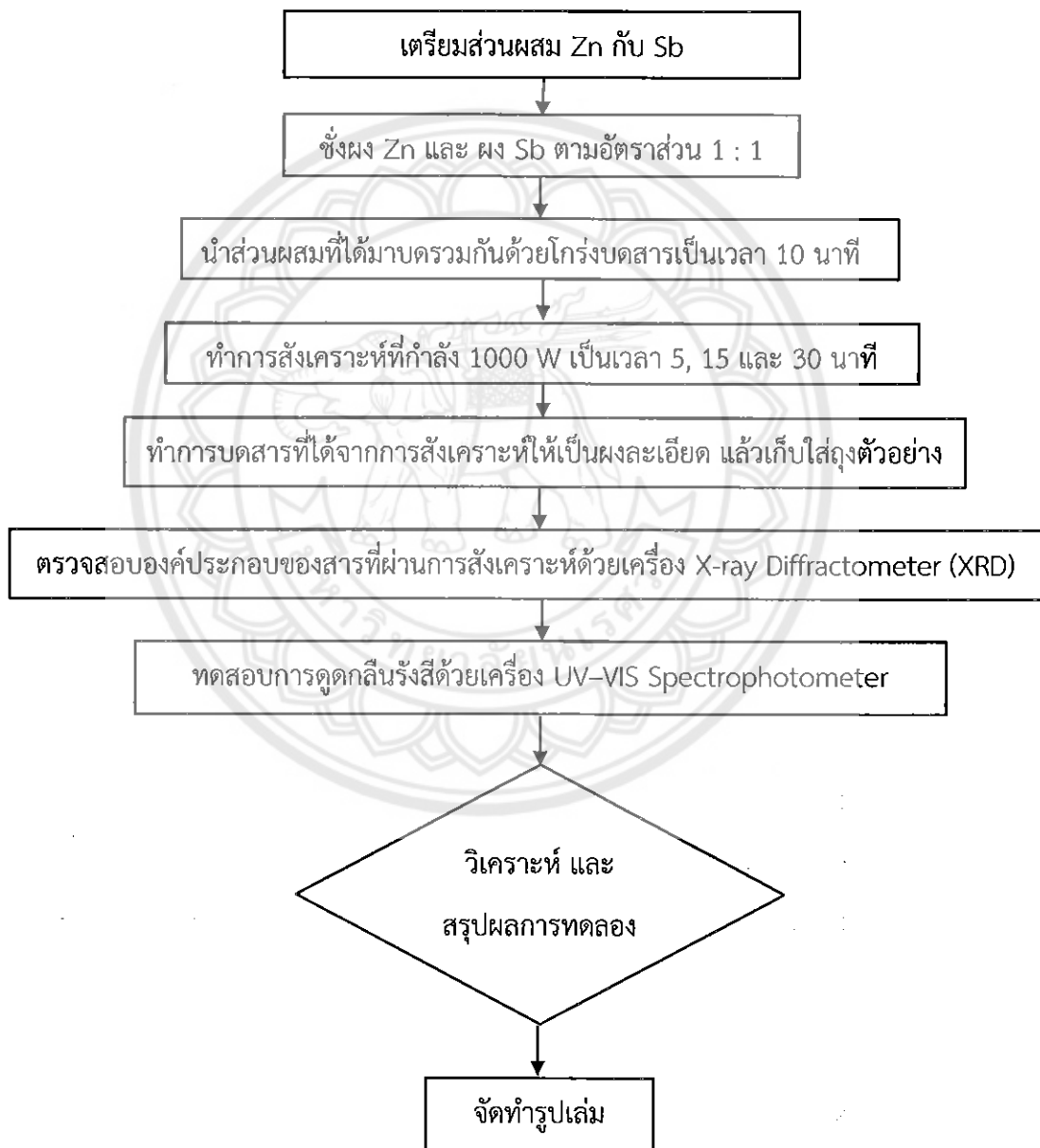
M. Chitroub และคณะ (2008) [34] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (Zinc Antimonide : Zn_4Sb_3) โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี Hot-pressed และเตรียมชิ้นงานในอัตราส่วนตามเลขปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric) ของซิงค์ต่อแอนติโมนี คือ 4:3 จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) และนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้อง Microprobe ส่วนผลจากการวัดค่าสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าค่าการนำไฟฟ้า และการนำความร้อนได้ผลดีเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

B. L. Pedersen และคณะ (2008) [35] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์ (Zn_4Sb_3) ด้วยวิธีการที่เรียกว่า zone-melting ซึ่งผลจากการสังเคราะห์ซิงค์แอนติโมนายด์แล้ว พบว่าวิธีการนี้ทำให้เกิดความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ หรือการเผาด้วยเตาเผาธรรมดา

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

การสังเคราะห์ ZnSb ด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดพลาสมา และเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนของเครื่องกำเนิดความร้อนไมโครเวฟพลาสมา สำหรับการทำปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็งของสารตั้งต้น ด้วยวิธีการดำเนินงานแสดงในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 ผงซิงค์ (Zinc Powder)

3.1.1.2 ผงแอนติโมนี (Antimony Powder)

3.1.1.3 เครื่องกำเนิดความร้อนไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma System)

3.1.1.4 แก๊สอาร์กอน (Ar Gas)

3.1.1.5 หลอดบรรจุสาร (Silica Tube)

3.1.1.6 เครื่องชั่งสาร (Weight Balance)

3.1.1.7 โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

3.1.2.1 X-ray Diffractometer (XRD)

3.1.2.2 UV-VIS Spectrophotometer

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการสังเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเวฟพลาสมา และศึกษาการสังเคราะห์ ZnSb

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์

การเตรียมส่วนผสม ชั่งผงซิงค์ และผงแอนติโมนีตามอัตราส่วนทางเคมี (Stoichiometric ratio) ตามอัตราส่วนประกอบของ ZnSb คือ Zn : Sb = 1 : 1 กรัมโดยโมล ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของผงซิงค์ และผงแอนติโมนี

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม กรัม*มวล	โมล	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนักจาก 1 (กรัม)
Zn	65.401	1	65.40100	0.34944
Sb	121.76	1	121.76000	0.65056
รวม			187.16100	1.00000

3.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ ZnSb

3.2.3.1 จากการเตรียมส่วนผสม (3.2.2.1) นำส่วนผสมที่ได้มาบดรวมกันด้วยโกร่งบดสาร โดยทำการบดสารด้วยแรงน้อย ๆ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ใส่หลอดบรรจุสาร

3.2.3.2 นำหลอดบรรจุสารไปวางบริเวณตรงกลางของท่อควอทซ์ภายในเตาไมโครเวฟ ตามรูป 3.2 แล้วทำการประกอบชุดฝาปิดท่อควอทซ์ให้แน่นเพื่อรักษาความดันภายในท่อควอทซ์ให้เป็นสุญญากาศ

3.2.3.3 ทำการเปิดปั๊มสุญญากาศ และเปิดวาล์วระบบเพื่อดูดอากาศภายในท่อควอทซ์ให้มีความดันสมบูรณ์เท่ากับ 4.3 ± 1 กิโลปาสกาล ทิ้งไว้ 10 นาที

3.2.3.4 เมื่อครบเวลา 10 นาทีแล้ว ทำการเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนเพื่อให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้าท่อควอทซ์อย่างช้าๆ จนมีความดันสัมบูรณ์เท่ากับความดันบรรยากาศ หลังจากนั้นปิดวาล์วแก๊สอาร์กอน

3.2.3.5 เปิดเตาไมโครเวฟที่กำลัง 1000 วัตต์ โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ ดังนี้

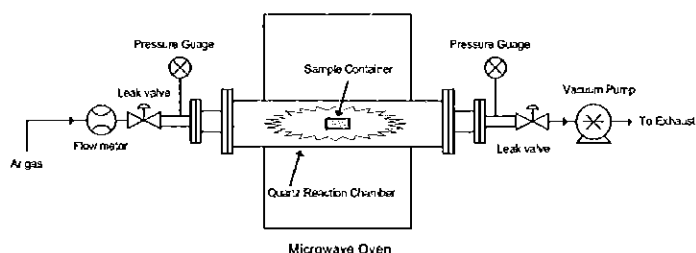
ก. เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที

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

3.2.3.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปล่ยตัวอย่างให้เย็นในสภาวะสุญญากาศจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แล้วทำการปิดปั๊มสุญญากาศ

3.2.3.7 นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากท่อควอทซ์ แล้วมาทำการบดด้วยโกร่งบดสารจนเป็นผงละเอียด แล้วเก็บตัวอย่างในถุงเก็บตัวอย่างที่สามารถป้องกันการสัมผัสกับอากาศ และนำไปเก็บไว้ที่โถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องมือไมโครเวฟพลาสมา

3.2.4 ขั้นตอนการตรวจสอบ

3.2.4.1 ขั้นตอนการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของ ZnSb นำผงชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วไปตรวจหาสารประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer

3.2.4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบการดูดซับรังสี นำผงชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วไปตรวจสอบหาค่าการดูดซับรังสีด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

3.2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผล

3.2.5.1 วิเคราะห์เฟสของสาร ZnSb ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเวลาแตกต่างกัน

3.2.5.2 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน

3.2.5.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับค่าการดูดซับรังสี

3.2.5.4 สรุปผลการทดลอง



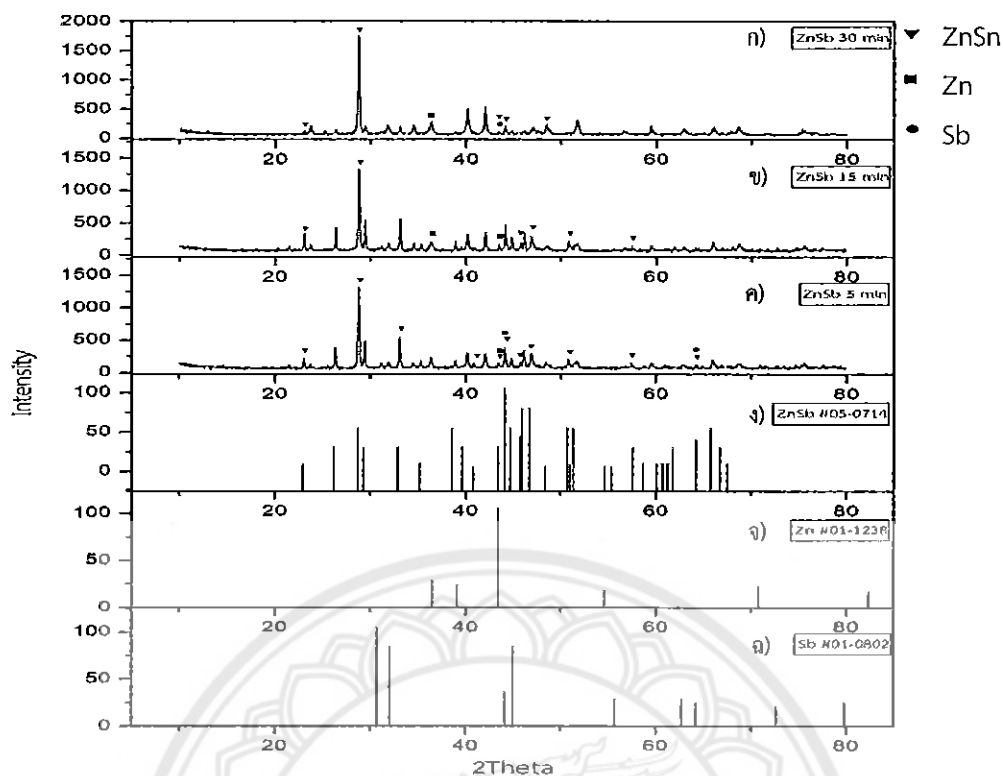
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดผลการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยผลการวิเคราะห์หาเฟส สมบัติการดูดกลืนแสง และค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (ZnSb) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma)

4.1 การตรวจสอบสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี

ในการเตรียมสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา เป็นการเตรียมจาก ผงโลหะของ ซิงค์ (Zn) และแอนติโมนี (Sb) ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Zn ต่อ Sb 1:1 โดยใช้ เวลาในการสังเคราะห์เป็นเวลา 5, 15 และ 30 นาที จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิค เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้ผลแสดงดังรูป 4.1 จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าการสังเคราะห์ สารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่เวลา 5 นาที เริ่มมีเฟสของสารประกอบ ZnSb เกิดขึ้นบ้าง โดย สังเกตได้จากพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 26.364 องศา แต่ยังมีเฟสของ Zn และ Sb คงเหลืออยู่ ดัง แสดงในรูป 4.1 ค) จึงเพิ่มเวลาการสังเคราะห์เป็น 15 นาที จะพบว่าเฟสของ Zn และ Sb มีปริมาณ ลดลง โดยสังเกตจากความเข้มของกราฟที่มุม 2θ เท่ากับ 43.493 ดังแสดงในรูป 4.1 ข) และ เมื่อทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 30 นาที ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูป 4.1 ก) พบว่าเฟสของ Zn และ Sb มีการลดลง เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้สังเคราะห์ ที่ 5 และ 15 นาที โดยสังเกตได้จากความ เข้มของพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 36.496 สำหรับ Zn และ 2θ เท่ากับ 64.179 สำหรับ Sb



รูปที่ 4.1 XRD patterns ของสารประกอบของซิงค์แอนติโมนายด์

- ก) สังเคราะห์ที่เวลา 30 นาที
- ข) สังเคราะห์ที่เวลา 15 นาที
- ค) สังเคราะห์ที่เวลา 5 นาที
- ง) พีคมาตรฐานของ ZnSb
- จ) พีคมาตรฐานของ Zn
- ฉ) พีคมาตรฐานของ Sb

4.2 ค่า Lattice parameter

จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเวลาในการสังเคราะห์ ZnSb ทั้งหมด สามารถนำมาคำนวณหาค่า Lattice Parameter ดังตารางที่ 4.1 และแบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบ ZnSb ดังรูปที่ 4.2 ได้ โดยนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FullProf Suite ที่นำผล XRD จากการทดลอง มาคำนวณซ้ำ ๆ เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากที่สุด จนกว่าค่า Chi-square (χ^2) จะมีค่าต่ำที่สุด โดยทั่วไปแล้วในทางสถิติค่า (χ^2) เป็นค่าที่บอกถึง การเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่หรือในรูปของสัดส่วนซึ่งไม่สามารถวัดค่าออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอน แต่สามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้ เช่น มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด หรือดีและไม่ดี เป็นต้น

โปรแกรม FullProf Suite จะทำการจำลองฟิสิกให้ซ้อนทับกับฟิสิกที่ได้จากผล XRD ในการสังเคราะห์ให้มากที่สุด โดยจะต้องให้ค่า Chi-square (χ^2) มีค่าอยู่ระหว่าง 1–9 หรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 มากก็แสดงว่าการจำลองฟิสิกนั้นดี เสมือนกับฟิสิกที่ได้จากเครื่อง XRD

ตารางที่ 4.1 ค่า Lattice parameter

Lattice parameter	การทำ Rietveld Analysis ด้วยโปรแกรม Fullprof Suite			
	5 นาที	15 นาที	30 นาที	มาตรฐาน
a	5.646425 Å	6.156945 Å	6.172229 Å	6.218 Å
b	6.727025 Å	7.533865 Å	7.701462 Å	7.741 Å
c	7.356133 Å	8.103666 Å	8.095508 Å	8.115 Å
Chi-square (χ^2)	10.4	10.7	11.4	-

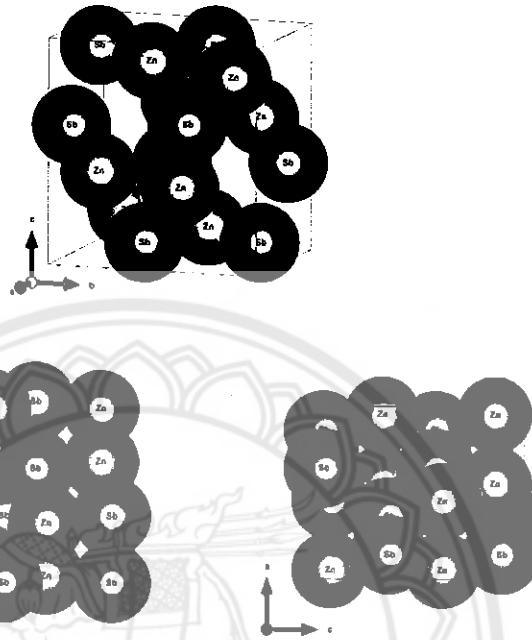
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า a, b และ c ของสารประกอบ ZnSb ที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเวลา 5 นาที ไม่มีค่าใดเลยที่ใกล้เคียงกับค่า Lattice Parameter ของสารประกอบ ZnSb มาตรฐาน แม้ว่าจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะตรวจพบการเกิดขึ้นของสารประกอบ ZnSb แล้วก็ตาม สาเหตุนั้น คาดว่าเกิดมาจาก Zn และ Sb ที่ยังทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์ ยังเหลือค้างอยู่ในสารที่สังเคราะห์เป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Fullprof ที่ใช้มุม 2Theta ทุกองศาตั้งแต่ 10 – 80 องศา รวมผลกระทบจากฟิสิกของ Zn และ Sb เข้าไปด้วย

ในส่วนของค่า a, b และ c ของสารประกอบ ZnSb ที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเวลา 15 และ 30 นาที พบว่าค่า Lattice Parameter ที่ได้จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD มีความใกล้เคียงกับค่า Lattice Parameter มาตรฐานมาก แต่ค่า chi-square (χ^2) ยังมีค่าสูงอยู่ ทั้งนี้อาจเกิดจากสาร Zn และ Sb เข้ากันได้ดีแล้ว แต่ยังไม่ได้สาร ZnSb ที่เป็นเฟสเดียว แสดงให้เห็นว่ายังคงมีอิทธิพลจาก Zn และ Sb ที่เหลือค้างอยู่ และคาดว่าน่าจะได้รับอิทธิพลมาจากธาตุ Zn มากกว่า Sb สังเกตได้จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ 30 นาที แสดงฟิสิกของ Zn อย่างชัดเจนที่มุม 2Theta เท่ากับ 38.9 องศา

4.3 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายต์

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนาย (ZnSb) ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที โดยการจำลองตำแหน่งการวางตัวของอะตอม Zn และ Sb ในโครงสร้างผลึก

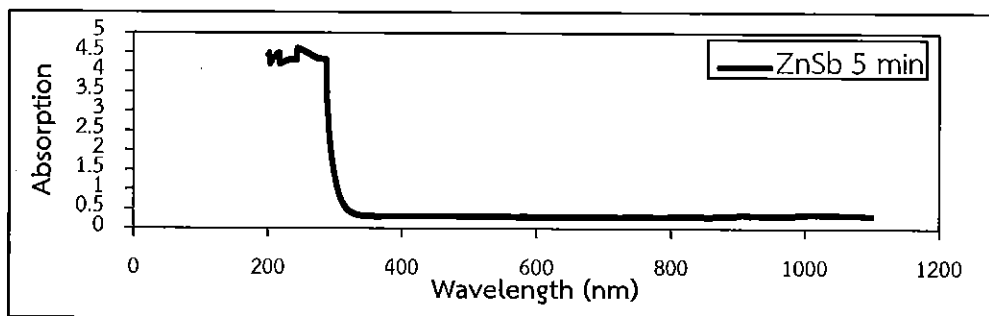
ด้วยโปรแกรม Fullprof Suite โดยค่า Pattice Parameter จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า สารประกอบซิงค์แอนติโมนาย (ZnSb) มีลักษณะโครงสร้างผลึกคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) คือมีค่า $a \neq b \neq c$ และมุมระหว่างแกนมีค่า $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



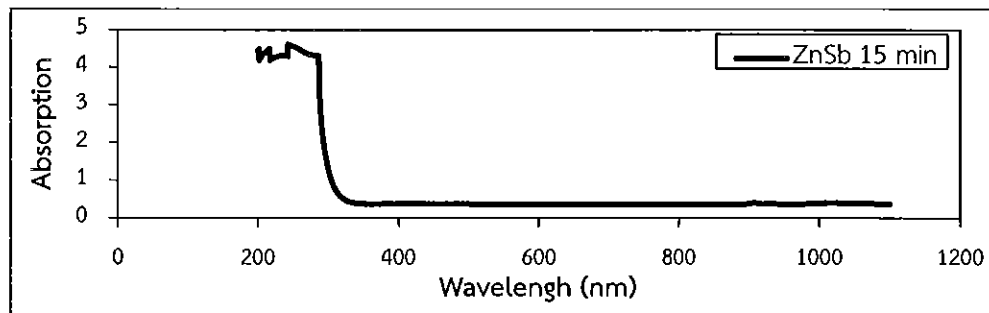
รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายที่เวลา 30 นาที

4.4 สมบัติทางแสงของ ZnSb

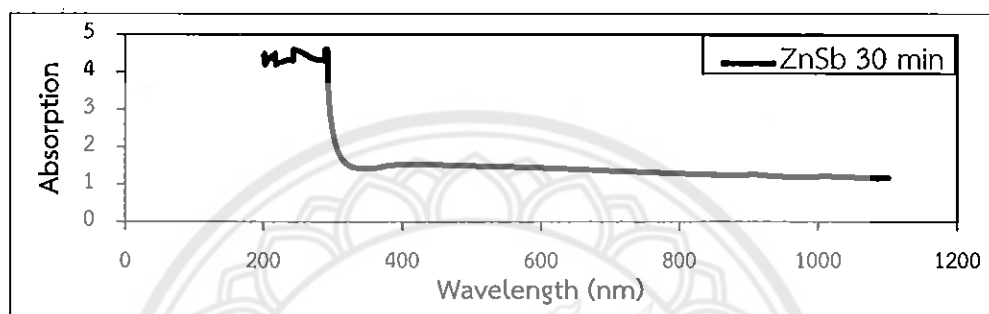
การตรวจสอบสมบัติทางแสงของสารประกอบ ZnSb ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา ในเวลา 5, 15 และ 30 นาที เพื่อที่จะนำผลการตรวจสอบไปคำนวณหาค่าพลังงานแถบช่องว่างของสารต่อไป ผลการตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrometer ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 1100 นาโนเมตร แสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength) กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก) – ค)



ก)



ข)

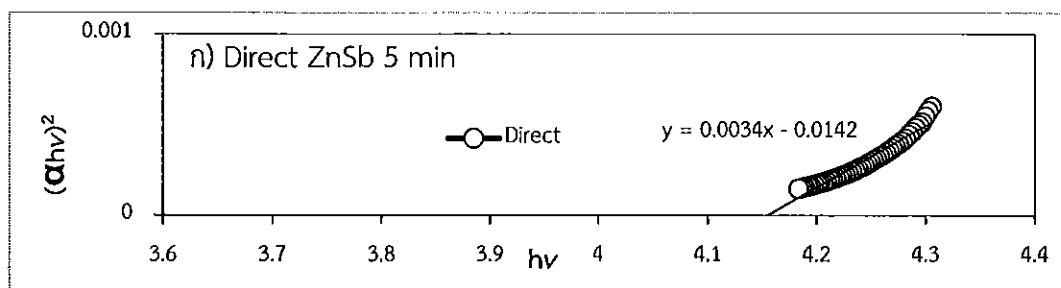


ค)

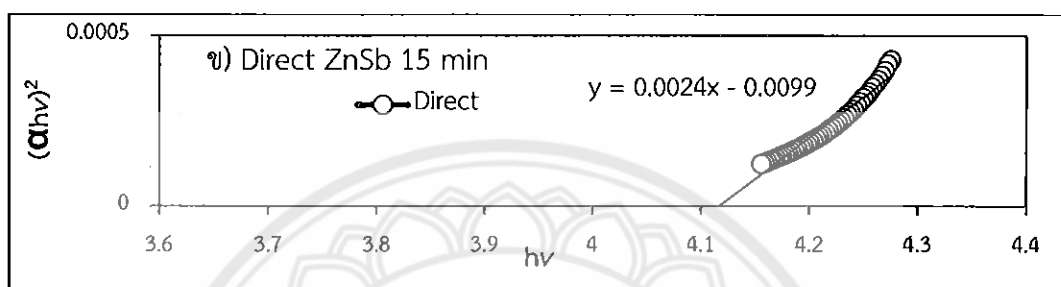
- รูปที่ 4.3** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมพันธะระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่
- ก) 5 นาที จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงในช่วง 286 – 302 นาโนเมตรหลังจากนั้นมีค่าการดูดกลืนแสงค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ช่วง 378 – 1100 นาโนเมตร
 - ข) 15 นาที จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงในช่วง 264 – 301 นาโนเมตรหลังจากนั้นมีค่าการดูดกลืนแสงค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ช่วง 356 – 1100 นาโนเมตร
 - ค) 30 นาที จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงในช่วง 270 – 309 นาโนเมตรหลังจากนั้นมีค่าการดูดกลืนแสงค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ช่วง 400 – 1100 นาโนเมตร

ซึ่งเป็นอันตรกิริยากันระหว่างอิเล็กตรอนและช่องว่างในแถบพลังงานช่องว่างพลังงาน ทำให้สามารถนำช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนี้ไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานได้

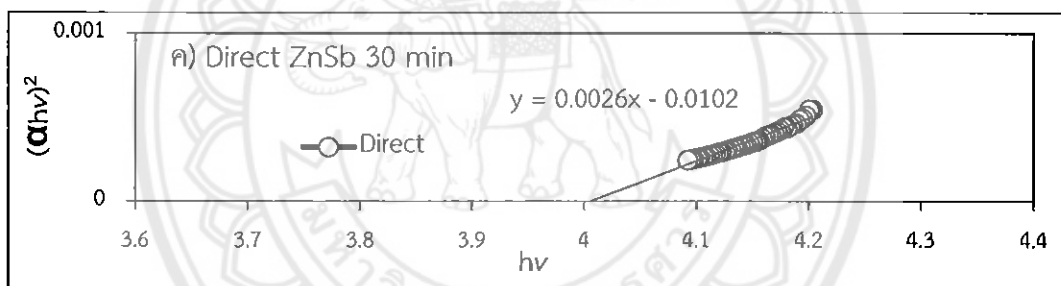
หลังจากนั้นนำค่าประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในรูป 4.3 ก) – ค) มาทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ เพื่อหาแถบพลังงาน โดยแต่ละเวลาในการสังเคราะห์ จะทำการทดลองการดูดกลืนแสงทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Band Gap $E_{g,dir}$) ดังรูปที่ 4.4 ก) – ค) เป็นกราฟตัวแทนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับค่า $h\nu$ และการหาค่าแถบพลังงานโดยการขยายเส้นแนวโน้มของกราฟให้ยื่นออกมาตัดกับแกน $h\nu$ เมื่อค่า $(\alpha h\nu)^2$ มีค่าเท่ากับศูนย์ จุดตัดแกนคือค่าแถบพลังงาน



น)



ข)

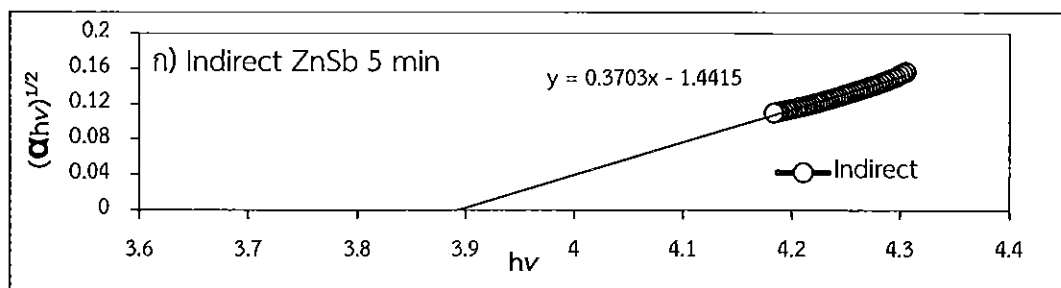


ค)

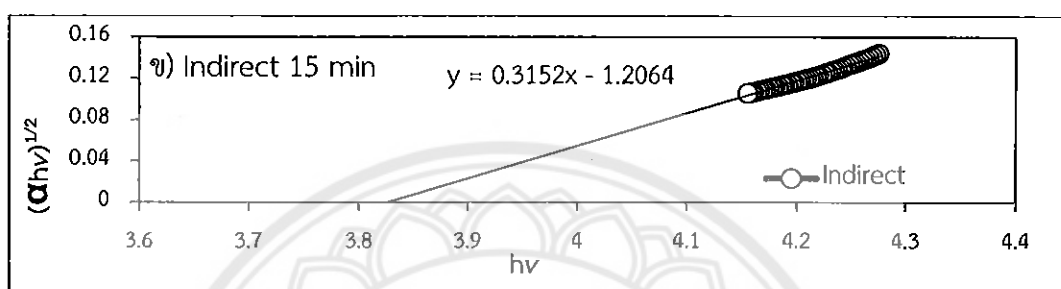
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับค่า (hv) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์
สังเคราะห์สังเคราะห์ที่เวลา

- ก) 5 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงเท่ากับเท่า 4.176 eV
- ข) 15 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงเท่ากับเท่า 4.125 eV
- ค) 30 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรงเท่ากับเท่า 3.923 eV

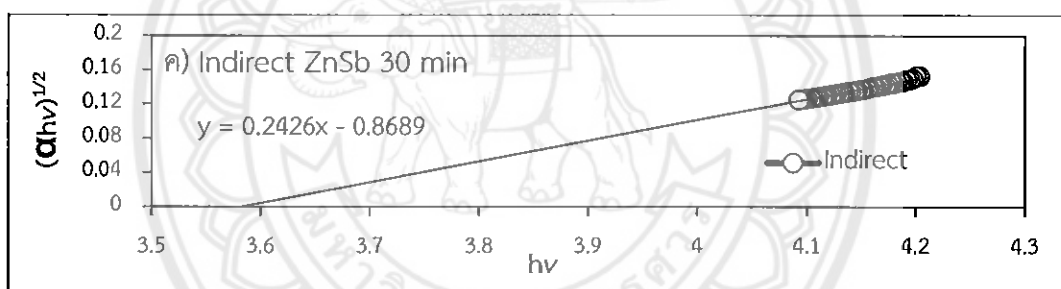
ในส่วนของการหาค่าเฉลี่ยของแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect Energy Band Gap, $E_{g,indir}$) สามารถคำนวณได้เหมือนกับการหาค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง แต่ภายหลังการคำนวณ จะทำการสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับค่า hv แทน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ก) - ค)



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับค่า (hv) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์สังเคราะห์สังเคราะห์ที่เวลา

ก) 5 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงเท่ากับเท่า 3.893 eV

ข) 15 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงเท่ากับเท่า 3.827 eV

ค) 30 นาที มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงเท่ากับเท่า 3.581 eV

ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง($E_{g,dir}$) ของสารประกอบ ZnSb

เวลาในการ สังเคราะห์ (นาทีก)	ครั้งที่	ค่า Energy Gap (eV)	E_g (eV)
5	1	4.176	4.125
	2	4.162	
	3	4.038	
15	1	4.125	4.143
	2	4.119	
	3	4.186	
30	1	3.923	4.039
	2	4.137	
	3	4.057	

ตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง($E_{g,indir}$) ของสารประกอบ ZnSb

เวลาในการ สังเคราะห์ (นาทีก)	ครั้งที่	ค่า Energy Gap (eV)	E_g (eV)
5	1	3.893	3.918
	2	3.969	
	3	3.893	
15	1	3.827	3.878
	2	3.899	
	3	3.908	
30	1	3.581	3.663
	2	3.753	
	3	3.657	

เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับค่า (hv) และ $(\alpha hv)^{1/2}$ กับค่า (hv) พบว่าในการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิลของซิงค์แอนติโมนายด์ที่เตรียมได้ จะถูกควบคุมโดยสองช่วงพลังงานโฟตอน (hv) เมื่อพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานจะทำให้มีการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานโฟตอน ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานของประจุจากชั้นบนสุดของชั้นวาเลนส์ไปยังชั้นล่างสุดของชั้นการนำ และเมื่อพลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงาน เส้นกราฟจะไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ประจุมีการเปลี่ยนไปตามตำหนิที่เกิดขึ้น

ผลจากการคำนวณพบว่าสารประกอบ ZnSb ที่ใช้เวลา 5, 15 และ 30 นาทีในการสังเคราะห์ มีค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct energy band gap, $E_{g,dir}$) เฉลี่ยเท่ากับ 4.125 eV, 4.143 eV และ 4.039 eV ตามลำดับ ส่วนค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (indirect energy band gap, $E_{g,indir}$) เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.918 eV, 3.878 eV และ 3.663 eV ตามลำดับ จากค่า $E_{g,dir}$ และ $E_{g,indir}$ ทั้ง 3 ค่า จะเห็นได้ว่า ค่า $E_{g,dir}$ และ $E_{g,indir}$ มีค่าลดลงตามเวลาการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า E_g มาตรฐานของสารประกอบ ZnSb เท่ากับ 0.5 eV [36] แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ ZnSb มีแนวโน้มที่จะเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) มากขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา รวมทั้งปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขของโครงการ มีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แบบสถานะของแข็งของสารประกอบซิงค์-แอนติโมนายด์ (ZnSb) ด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำการสังเคราะห์สารได้รวดเร็ว และมีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่ 1000 W สภาวะเงื่อนไขเวลาในการสังเคราะห์คือ 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ ภายใต้สภาพแวดล้อมของก๊าซอาร์กอนที่ความดันสมบูรณ์ 4.3 ± 1 kPa ผลการวิเคราะห์เฟส โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ (ZnSb) พบว่าที่เวลา 5 นาที มีเฟส ZnSb เกิดขึ้นและยังพบ Zn และ Sb เหลือค้างอยู่

การวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) ของสารประกอบซิงค์แอนติโมนายด์ทั้ง 3 สภาวะเงื่อนไขนี้ คือที่เวลา 5, 15 และ 30 นาที และนำไปคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Energy Gap, $E_{g,dir}$) ได้เฉลี่ยเท่ากับ 4.125 eV, 4.143 eV และ 4.039 eV ตามลำดับ ส่วนค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (indirect energy band gap, $E_{g,indir}$) เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.918 eV, 3.878 eV และ 3.663 eV ตามลำดับ จากค่า $E_{g,dir}$ และ $E_{g,indir}$ ทั้ง 3 ค่า จะเห็นได้ว่า ค่า $E_{g,dir}$ และ $E_{g,indir}$ มีค่าลดลงตามเวลาการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า E_g มาตรฐานของสารประกอบ ZnSb เท่ากับ 0.5 eV แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ ZnSb มีแนวโน้มที่จะเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

ควรมีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องจากเมื่อทำการสังเคราะห์สารเป็นเวลานานเครื่องจะหยุดทำงานไปเองทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการสังเคราะห์ และควรเพิ่มระยะเวลาในการสังเคราะห์เพื่อให้สารรวมตัวเป็นเฟสเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectrics). 2555 [9/11/2558];จาก.
http://www.srri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=3078:-thermoelectrics&catid=44:2010-11-01-18-55-24&Itemid=326
- [2] Snyder, G. J. et al. (2004). Disordered zinc in Zn_4Sb_3 with Phonon-glass and Electron-crystal Thermoelectric Properties. *Nature mater*, (Vol.3 pp.458-463).
- [3] Minnich, A. J. et al. (2009). Bulk Nanostructured Thermoelectric Materials: Current Research and Future Prospects. *Energy Environ. Sci*2, (pp.466-479).
- [4] Tritt, TM. And Subramanian, M. A. Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. (2006). *MRS Bull*, (Vol.31, pp.188-198).
- [5] Rowe DW. (2006). *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*, Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [6] Snyder, G. J. and Toberer E. S. (2008). Complex Thermoelectric Materials. *Nature mater*, (Vol.7, pp.105-114).
- [7] Kanatzidis MG. (2010). Nanostructured Thermoelectrics: the New Paradigm. *Chem Mater*, (Vol.22, pp. 648-659).
- [8] Snyder GJ. And Tobere ES. (2008). Complex Thermoelectric Materials. *Nature Materials* 7. 105-114.
- [9] Rowe, D. M. (1995). *Handbook on Thermoelectrics*, CRC Press, New York
- [10] Dresselhaus, M. S. et al. (2007). New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials. *Advanced materials*, (Vol.19, pp.1043-1053).
- [11] Bogaerts, A., et al. (2002). Low Temperature Plasma Technology. *Spectrochimica Acta. B* 57, 609.
- [12] Rao, K. J., et al. (1999). Synthesis of Inorganic Solids Using Microwaves *Chemistry of Materials*, 11 (4), 882-895.
- [13] Heremans J. (2007). Nanometer-Scale Thermoelectric Materials In: Bhushan B. *Springer Handbook of Nanotechnology*,. 2nd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany: Springer;. P.345-374.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์ สืบค้นเมื่อ 5 พฤศจิกายน 2558, จาก www.peltier-info.com/photos
- [15] สืบค้นเมื่อ 5 พฤศจิกายน 2558, จาก <http://www.instructables.com/answers/Peltier-thermoelectric-heat-pump-can-it-be-useda/Bibcode:2008Natur.451.168B.doi:10.1038/nature0645>
- [16] ซิงค์แอนติโมนายด์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 4 พฤศจิกายน 2558, สามารถเข้าถึงได้จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_antimonide. (2012/06/24)
- [17] Ur, S. C., Il-Ho. Kim and Philip Nash. (2004). Thermoelectric Properties of Zn_4Sb_3 Directly Synthesized By Hot Pressing. *Materials Letters*, pp.2132-2136.
- [18] Arkady S. Mikhaylushkin. (2005). Structure and Bonding of Zinc Antimonides: Complex Frameworks and Narrow Band Gaps. *Chem, Eur. J.* (Vol.11, pp.4912-4291).
- [19] Johanna Nylén. et al. (2004). The Structure of α - Zn_4Sb_3 : Ordering of the Phonon-Glass Thermoelectric Material β - Zn_4Sb_3 . *J. Am. Chem. Soc.*, 126 (50), pp.16306–16307
- [20] สังกะสี. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 16 ธันวาคม 2558, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B5>
- [21] พลวง. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 16 ธันวาคม 2558, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%A7%E0%B8%87>
- [22] ไมโครเวฟ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 5 พฤศจิกายน 2558. สามารถเข้าถึงได้จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave>.
- [23] Dielectric_heating. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 5 พฤศจิกายน 2558, สามารถเข้าถึงได้จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_heating.
- [24] ฟิสิกส์ และเทคโนโลยีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 2 พฤศจิกายน 2558, จาก :<http://www.vcharkarn.com/varticle/38525>
- [25] Eliezer, S. and Eliezer, Y. (2010). Handbook on An Introduction to Plasma Scienec, 2nd ed. Institute of Physics Publications, UK.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] Fitzpatrick, R. (2011). *The Physics of plasms*, The University of Texas at Austin. [Online] . สืบค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2558, จาก : <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/380.pdf>
- [27] [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 8 พฤศจิกายน 2558. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สามารถเข้าถึงได้จาก <http://www.bloggang.com>.
- [28] การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD. สืบค้นเมื่อ 16 ธันวาคม 2558, จาก http://lab.geol.science.cmu.ac.th/xrdxrf/Right_mainframe_article_xrd1_4.html
- [29] Kimberly S. Cleaves (2003) *Spectrophotometry On The Rise, Today's Chemist At Work*, December, pp.17-18.
- [30] Aizawa, T. et al. (1999). in *Proceedings of the 18th International Conference on Thermoelectrics* (Baltimore, USA, September 1999) IEEE, p. 173 .
- [31] Souma, T., Nakamoto, G. and Kurisu, M. (2002). Low-temperature thermoelectric properties of alpha- and beta- Zn_4Sb_3 bulk crystals prepared by a gradient freeze method and a spark plasma sintering method. *Journal of Alloys and Compounds*. 340, 275-280.
- [32] Zhang, L. T., Tsutsui, M., Ito, K. and Yamaguchi, M. (2003). Thermoelectric Properties of Zn_4Sb_3 Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*. 443: 84-90.
- [33] Ur, S. C., Kim, I. H. and Nash, P. (2004). *Materials Letters*, (Vol.58, pp.2132).
- [34] Chitroub, M., Besse, F. and Scherrer, H. (2008). Thermoelectric Properties of Semi-conducting Compound Zn_4Sb_3 . *Journal of alloys and compounds*. (Vol.460, pp.90-93).
- [35] Pedersen, B. L. and Iversen, B. B. (2008) , Thermally stable thermoelectric Zn_4Sb_3 by Zone-melting Synthesis. *APPLIED PHYSICS LETTERS*. (Vol.92,pp.1-3).
- [36] Romain Viennoisa, Xiaoma Taob, Kinga Niedziolkaa and Jean-Claude Tedenaca Philippe Junda. (2012). *Physical properties of thermoelectric zinc antimonide using first-principles calculations*.

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวชุลีพร อินทะสงค์
ภูมิลำเนา 81/1 ถ. อินทคีรี อ. แม่สอด จ. ตาก 63110
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสรรพวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: ch.intasong23@hotmail.com



ชื่อ นางสาวสาวิณี ปลัดท้วม
ภูมิลำเนา 19/1 ถ. นารีพัฒนา ต.ในเมือง อ. เมือง
จ. เพชรบูรณ์ 67000
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: meew1992@hotmail.com