

การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอสไฟต์
 $\text{CaFeMo}_2\text{O}_{10}$ ($\text{M} = \text{Bi}, \text{Sb}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง
SYNTHESIS THERMOELECTRIC MATERIAL $\text{CaFeMo}_2\text{O}_{10}$ ($\text{M} = \text{Bi}, \text{Sb}$)
DELAFOSHITE COMPOUNDS BY SOLID STATE REACTION METHOD

นางสาวฉัญฉวี ประสานบุญศรี

นางสาววิศยา ชุ่มยอด

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอสไซต์ CuFeMO_2
($M=\text{Si}, \text{Sn}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง

SYNTHESIS THERMOELECTRIC MATERIAL CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$)
DELAFOSSITE COMPOUNDS BY SOLID STATE REACTION
METHOD

นางสาวชัญญภัส	ประธานสุขศรี
นางสาววทิตา	อยู่ยอด

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**SYNTHESIS THERMOELECTRIC MATERIAL CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$)
DELAFOSSITE COMPOUNDS BY SOLID STATE REACTION
METHOD**

MISS CHIYAPAT

PRASANSUKSRI


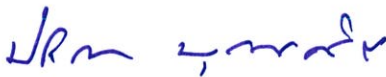


MISS VATITA

YOUYOD

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLY PHYSIC
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2556**

หัวข้อโครงการพิเศษการ	สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอสไซด์ CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง	
	SYNTHESIS THERMOELECTRIC MATERIALS CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$) DELAFOSSITE COMPOUNDS BY SOLID STATE REACTION METHOD	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชญากัส	ประสานสุขศรี
	นางสาววทิตา	อยู่ยอด
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์	
ปี การศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เชรยฐา	รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์	
ดร.เชรยฐา รัตนพันธ์	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษการ	สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอส ไซท์ CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชิญาภัต ประสานสุขศรี นางสาวทิตา อยู่ยอด
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เชรชญา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอสไซท์ CuFeO_2 ที่มีการเจือด้วย Si และ SnCl_4 ที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.1 จากผลที่ได้จาก XRD พบว่าอัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 ที่เจือด้วย Si และ SnCl_4 มีเพียงแค่ 3 อัตราส่วนนี้เท่านั้นที่เป็นโครงสร้างดีลาฟอสไซท์ และเมื่อทำการวัดคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ ที่ดีที่สุดของซิลิกอนอยู่ที่อัตราส่วน 0.01 และของ SnCl_4 อยู่ที่ 0.05 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน 0.00 หรือที่ไม่มีการเจืออะไรเลยพบว่าค่าของคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการเจือไปแล้วนั้นยังมีค่าน้อยกว่าก่อนการทำการเจือดังนั้นในงานวิจัยนี้สารตัวอย่างที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ทำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้แก่ $\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ ที่ $x=0.05$ และ $\text{CuFe}_{1-x}\text{SnCl}_4\text{xO}_2$ ที่ $x=0.01$

คำสำคัญ เทอร์โมอิเล็กทริก, ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค, สภาพนำไฟฟ้า, พาวเวอร์แฟคเตอร์

Title	Synthesis Thermoelectric Materials CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$) Delafossite compounds by Solid State Reaction Method
Students	Miss Chiyapat Prasansuksri Miss Vatita Youyod
Degree	Bachelor of Science
Major Program	physic
Academic Year	2556
Advisor	Dr. Chesta Ruttanapun

Abstract

This project prepared for learning Thermoelectric objects synthesis composed Delafossite CuFeO_2 with Si and SnCl_4 doping, related on 0.01 0.03 0.05 and 0.1 . The result from XRD, found that the rate of 0.01 0.03 and 0.05 which were doped by Si and SnCl_4 has only 3 of the rate is Delafossite structure and when researching Thermoelectric quality, found out that Seeback coefficient, Electrical conductivity, Power factor, the best of Si is related on 0.01 and SnCl_4 's is on 0.05, but the quality of the doped Thermoelectric has less effect before doping when compared with the rate of 0.00 or none of dope. Thus, this investigation, the appropriate sample substances to using Thermoelectric objects are $\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ at $x=0.01$ and $\text{CuFe}_{1-x}\text{SnCl}_4\text{O}_2$ at $x= 0.05$.

Keywords: Thermoelectric, Seeback coefficient, Electrical conductivity, Power factor

กิตติกรรมประกาศ

ในโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ในที่นี้อาจจะไม่สามารถพูดถึงได้ทั้งหมด ซึ่งผู้ที่มีส่วนสำคัญคนแรกคือ ดร. เชษฐา รัตนพันธ์ ที่คอยสอนคอยแนะนำ แก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ เพื่อให้โครงการเล่มนี้ออกมาอย่างสมบูรณ์ที่สุด และขอขอบคุณ พี่ต่าย ที่แนะนำ และคอยชี้แนะ ค่อยสอนในเรื่องของการนำเสนอผลงาน นอกจากนี้ยังมีพี่ให้และพี่ภูษา ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้ และต้องขอขอบคุณทุกๆ ท่านที่ยังไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ที่มีส่วนช่วยทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณพ่อแม่และน้ำ ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ขอบคุณหอสมุดสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีที่ไว้ให้นั่งทำงานและมีหนังสือมากมายที่ไว้ให้ศึกษาค้นคว้า

ชญากัส ประสานสุขศรี
วทิตา อยู่ยอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
ตารางสัญลักษณ์ค่าพารามิเตอร์	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 จุดเริ่มต้นเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2 หลักการของเทอร์โมอิเล็กทริก	4
2.3 ค่า Figure of merit ในเทอร์โมอิเล็กทริก	8
2.4 โครงสร้างโครงสร้างผลึกของ CuFeO_2	9
2.5 ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก	11
2.6 ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance)	11
2.7 วิธีวัดสภาพความต้านทานและสภาพนำไฟฟ้า	12
2.8 Thermogravimetric Analysis (TGA)	13
2.9 X-ray Diffractometer (XRD)	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีเริ่มต้นและอุปกรณ์การทดลอง	17
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบ $\text{CuFe}_{1-x}\text{SiO}_2$ และ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ภาพแสดงความสมบูรณ์ของชิ้นสาร	26
4.2 ผลการวัด X-RAY DIFFRACTION	31
4.3 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์	44
บทที่ 5 สรุปผลและอภิปรายผลการทดลอง	
5.1 สรุปและอภิปรายผล	54
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	2
3.1 ตารางแสดงอัตราส่วน	21
4.1 ชั้นสารแบบเม็ด ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$	26
4.2 ชั้นสารแบบเม็ด ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$	27
4.3 ชั้นสารแบบแท่ง ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$	28
4.4 ชั้นสารแบบแท่ง ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$	29
4.5 แสดงขนาดของชั้นงาน (Si)	30
4.6 แสดงขนาดของชั้นงาน (SnCl_4)	30
4.7 ผลXRD ของ Si = 0.01	31
4.8 ผลXRD ของ Si = 0.03	32
4.9 ผลXRD ของ Si = 0.05	33
4.10 ผลXRD ของ Si = 0.1	34
4.11 ผลXRD ของ $\text{SnCl}_4 = 0.01$	35
4.12 ผลXRD ของ $\text{SnCl}_4 = 0.03$	36
4.13 ผลXRD ของ $\text{SnCl}_4 = 0.05$	37
4.14 ผลXRD ของ $\text{SnCl}_4 = 0.1$	38
4.15 แสดงค่าเฉลี่ย a และ c ของ Si	40
4.16 แสดงค่าเฉลี่ย a และ c ของ SnCl_4	42
4.17 ตารางคำนวณค่า D	43
4.18 ค่ามาตรฐาน	44

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Thomas Johann Seebeck Undated engraving, Deutsches Museum, Munich	4
2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า	4
2.3 Jean Charles Athanase Peltier	5
2.4 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้าโลหะชนิด n	6
2.5 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด	6
2.6 ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริก	7
2.7 ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริก ประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์	7
2.8 เครื่องทำน้ำอุ่นเทอร์โมอิเล็กทริก	8
2.9 ค่า ZT-T ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (ซ้าย) เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด n-type (ขวา) เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด p-type	9
2.10 (a) โครงสร้างของ คีลาฟอสไฟต์ (ABO_2) (b) โครงสร้างแบบ hexagonal	10
2.11 โครงสร้างผลึก และ primitive cell แบบ rhombohedral ของสารประกอบ ออกไซด์ $CuFeO_2$	11
2.12 ไดอะแกรมการวัดสภาพนำไฟฟ้า	13
2.13 ไดอะแกรมวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค	13
2.12 หลักการ XRD	15
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2 วิธีการบอสมิตล์	21
3.3 การกรองสารละลาย	22
3.4 การเอาสารละลายไปเข้าตู้อบ	22
3.5 นำผงการมาเข้าเตาอบ	23
3.6 การบดสาร	23
3.7 การอัดเม็ดสารรอบที่ 1	24
3.8 การอัดเม็ดรอบที่ 2	24
3.9 การอัดเม็ดเพื่อส่งวัดผล	25
3.10 การอัดแท่งเพื่อส่งวัดผล	25
4.1 ตัวอย่างชิ้นงาน	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ผล XRD Si = 0.01	31
4.3 ผล XRD Si = 0.03	32
4.4 ผล XRD Si = 0.05	33
4.5 ผล XRD Si = 0.1	34
4.6 ผล XRD SnCl ₄ = 0.01	35
4.7 ผล XRD SnCl ₄ = 0.03	36
4.8 ผล XRD SnCl ₄ = 0.05	37
4.9 ผล XRD SnCl ₄ = 0.1	38
4.10 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า c (A°) ของSi	41
4.11 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า a (A°) ของSi	41
4.12 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า c (A°) ของSnCl ₄	42
4.13 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า a (A°) ของSnCl ₄	42
4.14 กราฟแสดงอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐาน	44
4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิกับค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐาน	45
4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิกับpower factor มาตรฐาน	45
4.17 ค่า seebeck ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า seebeck มาตรฐาน	46
4.18 ค่า seebeck ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า seebeck มาตรฐาน	47
4.19 ค่า Econd ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า Econd มาตรฐาน	48
4.20 ค่า Econd ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า Econd มาตรฐาน	49
4.21 ค่า power factor ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า power factor มาตรฐาน	50
4.22 ค่า power factor ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า power factor มาตรฐาน	51
4.23 ค่า Mass ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า Mass มาตรฐาน	52
4.24 ค่า Mass ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า power factor มาตรฐาน	53

สัญลักษณ์, ค่าย่อและศัพท์เทคนิค

สัญลักษณ์, ค่าย่อและศัพท์เทคนิค	ความหมาย
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (v)
E	เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (V/m)
T	อุณหภูมิ (K)
ZT	บ่งบอกประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริก (1/K)
R	ความต้านทาน (Ω)
I	กระแสไฟฟ้า (mA)
V	แรงดันไฟฟ้า (v)
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω m)
A	พื้นที่หน้าตัด (m)
L	ความยาว (m)
α	สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)
σ	สภาพนำไฟฟ้า (Ω m)
TGA	เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน
a,c	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่สามารถผันพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างด้านหนึ่งกับอีกด้านหนึ่ง เป็นพลังงานไฟฟ้าและสามารถสร้างปรากฏการณ์กลับได้ คือ จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในวัสดุได้ เมื่อมีการให้พลังงานไฟฟ้าให้แก่วัสดุ เรียกปรากฏการณ์การสร้างไฟฟ้าจากความต่างอุณหภูมิในวัสดุว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ส่วนปรากฏการณ์การสร้างความต่างของอุณหภูมิจากพลังงานไฟฟ้านั้น เรียกปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เป็นตัวทำความเย็นได้ เรียกว่า thermoelectric cooler สำหรับปรากฏการณ์ซีเบคนั้น จะมีค่าคงที่ของวัสดุซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับผลต่างของอุณหภูมิเรียกว่า สัมประสิทธิ์ซีเบค (S) จะบวกและลบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนในปรากฏการณ์เพลเทียร์นั้นจะมีค่าคงที่เป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า เรียกว่า สัมประสิทธิ์เพลเทียร์ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ปัจจุบันกำลังอยู่ในช่วงวิจัยเพื่อค้นคว้าวิจัยหาวัสดุที่สามารถผันพลังงานได้ประสิทธิภาพสูง เตรียมง่าย ราคาถูก และเป็นวัสดุไม่อันตราย ในปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผันพลังงานดีที่สุดในปัจจุบันได้แก่ Bi_2Te_3 , SiGe , PbTe แต่วัสดุดังกล่าวนี้สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นที่มีราคาแพงมาก ปัจจุบันมีรายงานว่าสารประกอบประเภทออกไซด์ นั้นมีศักยภาพสูงมากสำหรับเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และสารประกอบประเภทออกไซด์ดังกล่าว ยังเตรียมง่าย ไม่เป็นพิษและยังมีราคาถูก และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงๆได้ ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหลือทิ้งของความร้อนจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ สำหรับความสนใจในงานวิจัยนี้ก็คือการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของ CuFeMO_2 ($M = \text{Si}, \text{Sn}$) เพื่อเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับการสร้างอุปกรณ์ผันพลังงาน เพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้ โดยจะมีผลกระทบต่อวงการวัสดุศาสตร์ในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์สารประกอบ CuFeMO_2 ($M = \text{Si}, \text{Sn}$)
2. เพื่อศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ CuFeMO_2 ($M = \text{Si}, \text{Sn}$)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการสังเคราะห์สารประกอบ CuFeMO_2 ($M = \text{Si, Sn}$)
2. ตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง XRD SEM
3. ตรวจสอบสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (สัมประสิทธิ์ซีเบค สภาพนำไฟฟ้า และสภาพนำความร้อน)

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ตารางขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน – สิงหาคม	สังเคราะห์สารประกอบ CuFeMO_2 ($M = \text{Si, Sn}$)
สิงหาคม – กันยายน	ตรวจสอบโครงสร้างผลึก
ตุลาคม – พฤศจิกายน	ตรวจสอบสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก
ธันวาคม – กุมภาพันธ์	ศึกษาผลการทดลองที่ได้และวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สังเกตและศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบ CuFeMO_2 ($M = \text{Si, Sn}$)
2. ได้เป็นองค์ประกอบความรู้ใหม่สามารถนำไปเสนอในงานวิชาการต่างๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งในบทนี้จะประกอบด้วยหัวข้อของ :

- 2.1 จุดเริ่มต้นเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.2 หลักการของเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.3 ค่า Figure of merit ในเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.4 โครงสร้างโครงสร้างผลึกของ CuFeO_2
- 2.5 ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.6 ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance)
- 2.7 วิธีวัดสภาพความต้านทานและสภาพนำไฟฟ้า
- 2.8 Thermogravimetric Analysis (TGA)
- 2.9 X-ray Diffractometer XRD

2.1 จุดเริ่มต้นเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

ในปี พ.ศ.2364 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบว่า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของตัวนำสองชนิดจะทำให้เกิดไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (seebeck effect) ต่อมาในปี พ.ศ 2377 ยีนเพลทีเยอร์ ชาร์เลส อะธานเนส (Jean Charle Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ค้นพบว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำสองชนิดที่ต่อกัน จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำสองชนิด ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์

จากการค้นพบปรากฏการณ์ทั้งสองวิธี ได้ถูกนำมาพัฒนาจนทำให้ ได้ขึ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วย ตัวนำสองชนิดที่ต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้า และขนานกันทางความร้อน ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกเรียกต่อมาว่า เทอร์โมอิเล็กทริก 20 ปีต่อมา ได้มีการค้นพบว่า เมื่อนำสารกึ่งตัวนำมาใช้แทนสารตัวนำในการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริก จะให้ค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น จากนั้นมีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจึงกลายเป็นหัวข้อวิจัยใหม่ที่น่าสนใจในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น จนถึงปัจจุบัน

เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถหาความเย็น และปั๊มความร้อนได้โดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีการใช้สารทำความเย็นในกระบวนการ อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่

สามารถผันพลังงานความร้อนที่ถูกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเป็นไฟฟ้าได้อีกด้วย ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และทำงานเงียบ เพราะไม่มี ชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว

2.2 หลักการของเทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์พื้นฐานทางการผันไฟฟ้าจากความร้อน มีอยู่ด้วยกันดังปรากฏการณ์ที่กล่าวมาแล้วคือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ทั้งสามปรากฏการณ์นี้มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรืออาจผันไฟฟ้าไปเป็นความร้อน

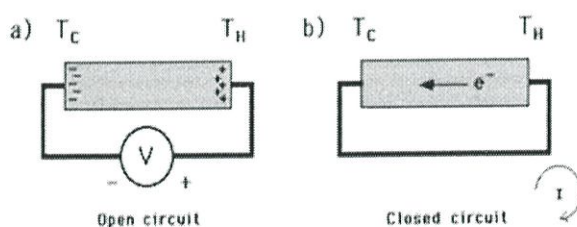
2.2.1. ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ในปี 1821 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน กล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ”



รูปที่ 2.1 Thomas Johann Seebeck

Undated engraving, Deutsches Museum, Munich



รูปที่ 2.2 แสดงความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้าความสำคัญทางกายภาพของมันสามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของ

ตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิหนึ่งพาหะอิสระต่าง ๆ ที่ปลายด้านร้อน (Hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force หรือ back e.m.f) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลที่เกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck voltage)

สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$\Delta V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

ซึ่งสมการ (1) สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและ gradient ของอุณหภูมิได้ว่า

$$E = \alpha \Delta T \quad (2)$$

V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า

E = เวกเตอร์สนามไฟฟ้า, V/m

T = อุณหภูมิ, K

α = สัมประสิทธิ์ซีเบค, V/K

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุ thermoelectric และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ N-type จะมี seebeck coefficient เป็นลบ แต่ P-type จะมี seebeck coefficient เป็นบวก เป็นต้น

2.2.2.ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect)

ในปี 1834 ยีน เพลทีเยอร์ ชาร์เลส อะธานาส (Jean Charles Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส กล่าวว่า “ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า ”



รูปที่ 2.3 Jean Charles Athanase Peltier

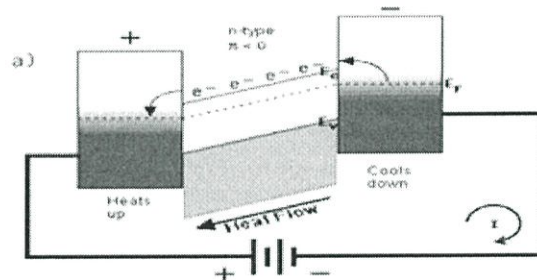
ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งคู่กันกับปรากฏการณ์ซีเบค และถูกนำมาใช้ประโยชน์ ในการทำระบบหล่อเย็นจากการผันความร้อนจากไฟฟ้า (Thermoelectric refrigeration) ในที่นี้ อัตรา ของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (Rate of reversible heat absorption, Q) ซึ่งส่งมาพร้อมกับการ ผ่านกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านรอยต่อ คือ

$$Q = \Pi I \quad (3)$$

โดยที่ Π คือ สัมประสิทธิ์ของเพลทีเยอร์ของรอยต่อ หาได้จาก

$$\Pi = aT \quad (4)$$

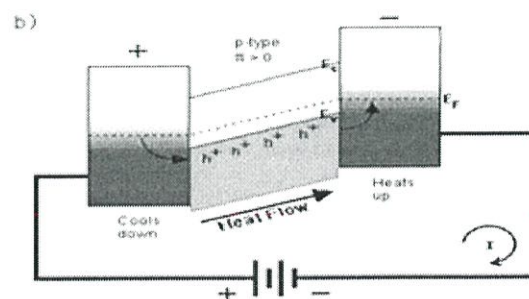
$\Pi < 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเยอร์เป็นลบอเล็กตรอนของอะตอมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากขั้วมาข้าง



การไหลเวียนของความร้อนและกระแสไฟฟ้ามีทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด n

$\Pi > 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเยอร์เป็นบวก หลุมพลังงานสูงเคลื่อนย้ายจากข้างมาขวาการไหลเวียนของ ความร้อนและกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการไหลเวียนของความร้อน และกระแสไฟฟ้า โลหะชนิด p

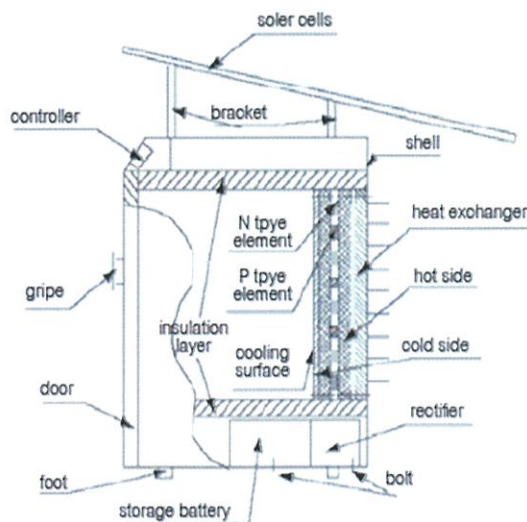
เทอร์โมอิเล็กทริกได้ถูกนำมาใช้งานครั้งแรก ตั้งแต่ปี พ.ศ 2504 ในโครงการอวกาศของ ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อจ่ายไฟฟ้าภายในยานอวกาศต่อจากนั้นมา อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ถูก นำมาใช้ร่วมกับเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก จนกระทั่งปัจจุบันตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดตั้งแต่ ความจุ 0.5ลิตร จนถึง 110 ลิตร มีวางจำหน่ายตามท้องตลาด ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

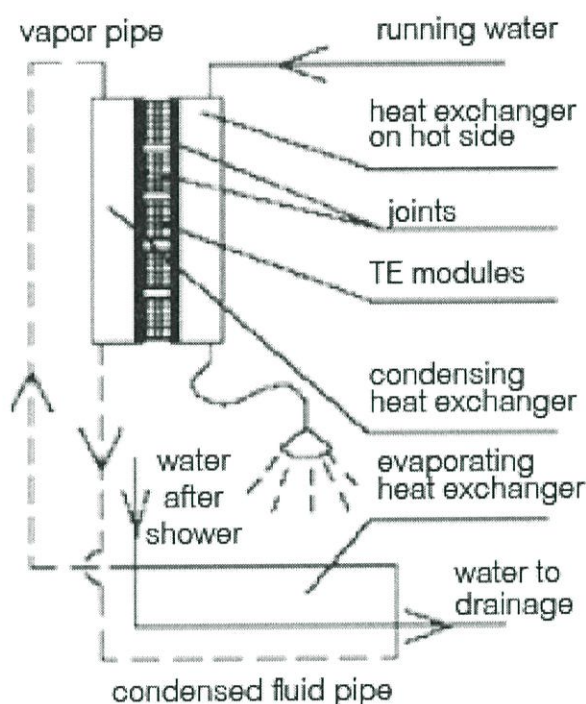
ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับการพัฒนาต่อยอด โดยการประยุกต์ใช้แผงโซลาร์เซลล์เพื่อเปลี่ยน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าป้อนให้กับระบบดังรูปที่ 2.7 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกถูกติดตั้งบนผนัง ด้านหนึ่งของตู้ โดยด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกจะอยู่ภายในตู้ ส่วนด้านร้อนจะอยู่ด้านนอกของตู้ แผงโซลาร์เซลล์ถูกนำมาใช้ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานในเวลากลางวัน ส่วน ตอนกลางคืน เทอร์โมอิเล็กทริกจะใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

เทอร์โมอิเล็กทริกได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยข้อดีที่ว่า มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทำความเย็นได้ต่ำ และสามารถรักษาอุณหภูมิได้ถูกต้อง คงที่ จึงได้มีการนำมาใช้งานใน ระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อ ระบายความร้อนจากซีพียูคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้เทอร์โมอิเล็กทริกได้ถูกประยุกต์ใช้งานกับ เครื่องปรับอากาศภายในห้องที่สามารถผลิตความเย็น และความร้อนได้ ภายในเครื่องเดียวกัน เพียงแค่ สลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริก ประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

นอกจากการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความเย็นแล้วเทอร์โมอิเล็กทริกถูกนำมาใช้ผลิตความร้อนด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น เครื่องทำน้ำอุ่นภายในบ้าน ดังรูปที่ 2.8 น้ำอุ่นที่ได้จากเครื่องทำน้ำอุ่น ได้จากน้ำที่อุณหภูมิห้องได้รับความร้อนจากด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนด้านเย็นจะทำหน้าที่ปั๊มความร้อนที่ถูกรังจกน้ำอุ่นที่ใช้แล้วกลับสู่ด้านร้อน

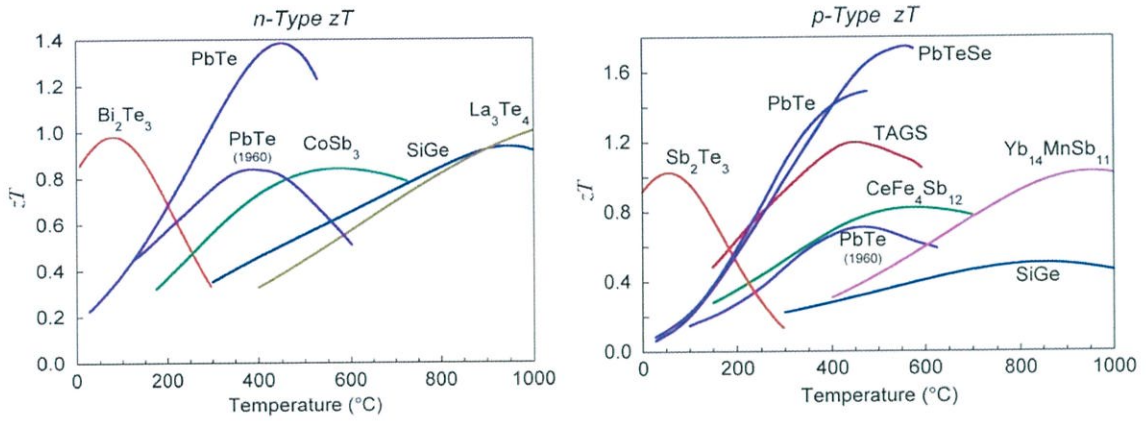


รูปที่ 2.8 เครื่องทำ น้ำอุ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

2.3 ค่า Figure of merit ในเทอร์โมอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์บ่งชี้ด้วยค่า “ZT” หรือที่เรียกกันว่า Figure of Merit และจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ วัสดุที่มีค่า ZT ที่สูง หรือมีประสิทธิภาพสูงนั้น ต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการ ได้แก่

- ความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ต้องถ่ายเท หรือขนย้ายด้วยประจุไฟฟ้าให้มากที่สุด ซึ่งต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (seebeck coefficient) ที่สูง
- วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์มีแรงต้านทานไฟฟ้าต่ำจึงเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดี มิเช่นนั้นกระแสไฟฟ้าก็จะสูญเสีย และเปลี่ยนกลับเป็นความร้อนได้ในเนื้อวัสดุนี้
- วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์เป็นสื่อนำความร้อนที่ไม่ดี เพราะโฟนอนจะเคลื่อนที่ หรือขนย้ายความร้อนสวนทางกับทิศทางของประจุไฟฟ้า ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ลดลง



รูปที่ 2.9 ค่า ZT-T ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (ซ้าย) เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด n-type (ขวา) เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด p-type

ซึ่ง ค่า Figure of merit จะคำนวณหาได้จาก

$$ZT = \frac{s^2 \sigma}{K}$$

ZT = ค่า figure of merit

S = สัมประสิทธิ์ซีเบค

σ = สภาพนำไฟฟ้า

K = สภาพนำความร้อน

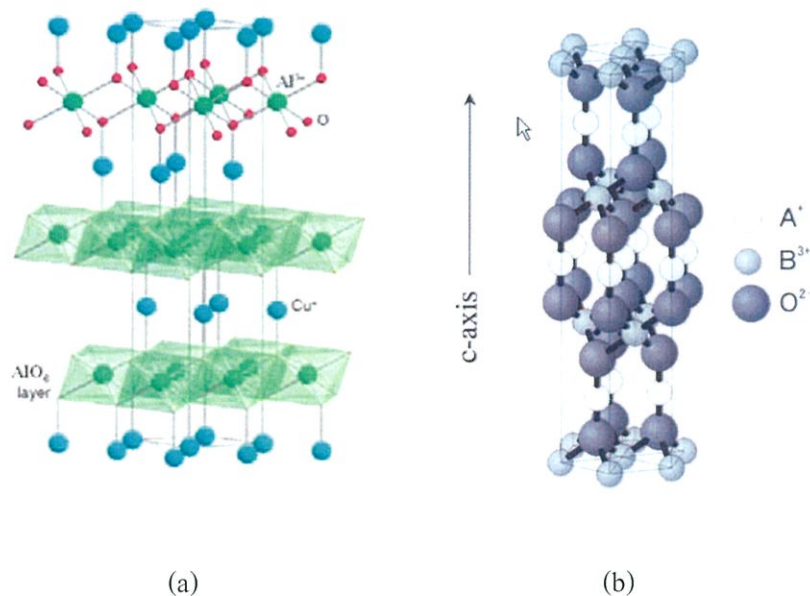
2.4 โครงสร้างโครงผลึกของ CuFeO_2

CuFeO_2 เป็นสารประกอบออกไซด์ในกลุ่มของ ดีลาฟอสไซด์ (Delafossite) P. Dordor (1988) Chesta Ruttanapun (2011) โดยสารประกอบดีลาฟอสไซด์นั้นมีสูตรทั่วไปคือ ABO_2 และ สูตรทางเคมีคือ $\text{A}^+ \text{B}^{3+} \text{O}_2^{2-}$ เมื่อ อีออน A ที่เป็นได้ คือ Cu^+ , Ag^+ , Pt^+ และ Pd^+ ส่วนอีออน B นั้น มีได้ 4 กลุ่ม คือ

- 1) Trivalent transition metals ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rh
- 2) Group III metal elements ได้แก่ Sc, Y, La
- 3) Group 13 metal elements ได้แก่ Al, Ga, In, Tl และ
- 4) Rare earth elements ได้แก่ Pr, Nd, Sm, Eu

ดังนั้นสารประกอบออกไซด์ CuFeO_2 สูตรทางเคมีคือ $\text{Cu}^+\text{Fe}^{3+}\text{O}^{2-}_2$ โครงสร้างผลึกของประกอบออกไซด์ ดีลาฟอสไซด์ (ABO_2) มี unit cell เป็นแบบ hexagonal ของ space group ($R\bar{3}m$) และมี primitive cell เป็นแบบ rhombohedral โครงสร้างผลึกประกอบจากการสลับกันแบบซ้ำๆ ในแนวแกน Z ของชั้น ดัมเบล ของ O–A–O กับชั้นบล็อกทรงเหลี่ยมหกหน้าของ BO_6 โดยไอออน A จะยึดเกาะกับไอออน O^{2-} 2 ไอออน ในลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear Coordination) เรียงในแนวแกน Z ส่วนบล็อกทรงเหลี่ยมหกหน้าของ BO_6 เกิดจากการแทรกกันหกหน้าของ $[\text{BO}_2]^{1-}$ โดยมี ไอออน B^{3+} อยู่ตรงกลางของบล็อกทรงเหลี่ยมหกหน้า และไอออน B จะยึดเกาะกับไอออน O^{2-} 6 ไอออน ในลักษณะปริมาตรฐานสี่เหลี่ยม 2 รูปประกบกัน โดยมุมทั้งแปดของโครงสร้างออกตะฮีดรัลนี้ จะยึดเกาะติดกับไอออน A ในแนวขนานกับ แกน C โดยไอออน A นี้จะทำหน้าที่รวมชั้นของออก-ตะฮีดรัลเข้าด้วยกัน และไอออน O^{2-} จะถูกยึดเกาะด้วยไอออน A 1 ไอออน และ ไอออน B 3 ไอออน ในลักษณะเชื่อม 4 แขน (Tetrahedral Coordination)

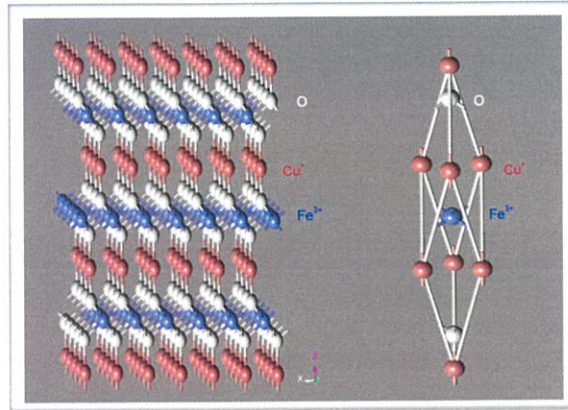
ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (a) โครงสร้างของ ดีลาฟอสไซด์ (ABO_2)

(b) โครงสร้างแบบ hexagonal ($R\bar{3}m$)

ดังนั้นสารประกอบออกไซด์ CuFeO_2 มีโครงสร้างผลึก unit cell เป็นแบบ hexagonal ของ space group ($R\bar{3}m$) และมี primitive cell เป็นแบบ rhombohedral ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึก และ primitive cell แบบ rhombohedral

ของสารประกอบออกไซด์ CuFeO_2

จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ จะพบว่า สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบชนิดคิลาฟอสเฟตจะขึ้นอยู่กับชั้นของไอออน A ซึ่งจะมีระยะห่างจากกับแกน c เนื่องจากในระยะห่างนี้จะมีความหนาแน่นของไอออนน้อยและโดยปกติแล้ว ไอออน A จะเป็นธาตุโลหะดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้าตามระยะห่างนี้จะมีค่ามากกว่าสภาพการนำไฟฟ้าในแนวแกน a ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันนี้ เรียกว่า แอนไอโซโทรปี (Anisotropy) จากเหตุผลดังกล่าวทำให้สารประกอบ ABO_2 สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าได้ โดยแบ่งได้เป็น 2 พวก คือ โลหะ และสารกึ่งตัวนำ ซึ่งพิจารณาได้จากจำนวนอิเล็กตรอนใน orbital d ของไอออน A โดยถ้า orbital d มีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เต็ม (d^9) ซึ่งได้แก่ Pt^+ , Pd^+ จะทำให้สารประกอบ ABO_2 มีสภาพเป็นโลหะ แต่ถ้า orbital d มีจำนวนอิเล็กตรอนอยู่เต็ม (d^{10}) ซึ่งได้แก่ Ag^+ หรือ Cu^+ จะทำให้สารประกอบ ABO_2 นั้น มีสภาพเป็นฉนวน หรือสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นสารประกอบ CuFeO_2 จึงมีสภาพนำไฟฟ้าเป็นแบบสารกึ่งตัวนำ

2.5 ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกได้มีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะการทำความเย็นด้วยระบบอัดไอ และดูดซับ ทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกไม่เป็นที่นิยมในระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ แต่ด้วยข้อดีที่ว่า มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทำความเย็นได้ต่ำทำงานเงียบ ไม่ใช้สารทำความเย็น ทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นที่นิยมในระบบทำความเย็นขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาใช้สร้างเทอร์โมอิเล็กทริก รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนจากเทอร์โมอิเล็ก

ตริกในอนาคต เชื่อว่าเทคโนโลยีนี้ จะนำไปใช้งานในระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ หรือระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่มากขึ้น

2.6 ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance)

คือคุณสมบัติของสสารที่ต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า สสารที่มีความต้านทานไฟฟ้าน้อย เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า ส่วนสสารที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก เรียกว่า ฉนวนไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) ความต้านทานไฟฟ้า จะมีค่าเป็นส่วนกลับของ ความนำไฟฟ้า (Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า (V) , กระแสไฟฟ้า (I) และความต้านทาน (R) เป็นไปตาม กฎของโอห์ม $R = V / I$

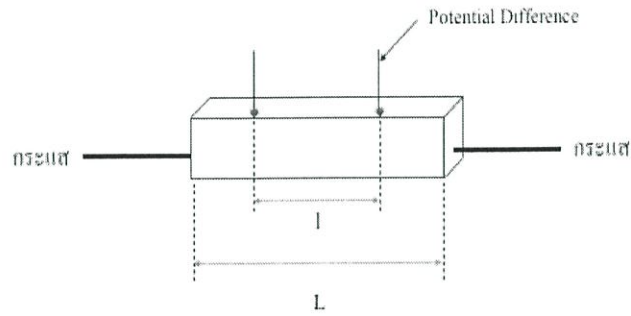
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลหมาย ถึงมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลวดสายไฟ และ อิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของ เส้นลวด เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เราเรียกว่า ความต้านทาน (Resistance) ความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm ใช้สัญลักษณ์ Ω) ความต้านทานเกิดขึ้นทุก ๆ ที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น

ตัวอย่าง ความต้านทานต่าง ๆ มีดังนี้

1. ความต้านทานของตัวนำ ได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
2. ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ความต้านทานของสารละลายของกรดเกลือกรดกำมะถัน น้ำเกลือ เป็นต้น
3. ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของสวิตช์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟ ที่จุด สัมผัสนี้กระแสจะไหลได้ยากเพราะมีความต้านทานสูงความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหาเมื่อให้กระแสไหลผ่าน เป็นจำนวนมากค่าความต้านทานนี้จะลดลงโดยการขัดผิวที่จุดสัมผัสให้เรียบหรือเพิ่มแรงกดที่จุดสัมผัส หรือบัดกรีเชื่อมต่อ ระหว่างสายไฟเสีย
4. ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินและแผ่นโลหะฝังลงดิน
5. ความต้านทานของฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ ไวนิลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ สูงหุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วนี้ว่า การฉนวน และวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้ว่า ฉนวน แต่การฉนวนนั้นมิได้หมายความว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย

2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

โดยทั่วไปจะใช้วิธีขั้วไฟฟ้าสี่จุด คือ กระแสผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างและวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูป 2.12 ไคอะแกรมการวัดสภาพนำไฟฟ้า

สามารถหาความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้าได้จาก

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

โดยที่

ρ = ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

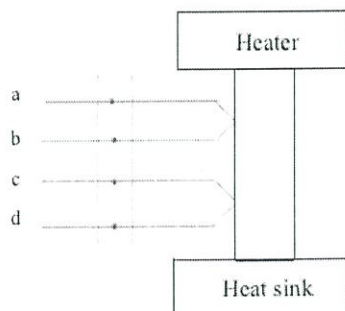
A = พื้นที่หน้าตัด

l = ความยาว

* ค่าสภาพการนำไฟฟ้า, σ (Electrical conductivity) จะเป็นส่วนกลับกับ ρ

2.7.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

สัมประสิทธิ์ซีเบคถูกกำหนดขึ้นจากอัตราส่วนของผลต่างของความต่างศักย์วงจรเปิดต่อผลต่างของอุณหภูมิสัมบูรณ์



รูป 2.13 ไคอะแกรมวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค

สามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ซีเบคได้จาก

$$S = \frac{dV_{ac}}{d(\Delta T)} \approx \frac{V_{ac}}{\Delta T}$$

V_{ac} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หัววัด ab ลบ cd

ΔT = ความต่างอุณหภูมิที่หัววัดเทอร์โมคัปเปิล ab ลบ cd

2.8 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน หรือ Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูง ในสภาวะแวดล้อมที่ผู้ทดลองกำหนด สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลาย ชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่ม Ceramic, Polymer หรือสาร inorganic ต่างๆ ได้ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว, การสูญเสียน้ำหนัก, หาราสน้ำหนักในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง Phase ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนได้อีกด้วย

ลักษณะตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ TGA สามารถทดสอบได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นผง หรือเป็นก้อน หรือตัวอย่างที่เป็นแผ่น กรณีตัวอย่างเป็น ก้อน หรือ แผ่น ต้องตัดให้มีขนาดพอที่จะใส่ลงใน Crucible ได้ (dia. ประมาณ 5mm และสูงไม่เกิน 2-3mm) กรณีตัวอย่างเป็นผง จะใช้ประมาณ 3-5mg จนถึง 20mg ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่าง ..ในการทดสอบ TGA 1 ชุดตัวอย่าง ต้องมีการสร้าง Blank curve สำหรับการทดสอบตัวอย่างในชุดนั้นๆ ซึ่งต้องใช้เวลาในการทดสอบเท่ากับเวลาในการทดสอบ 1 ตัวอย่าง ดังนั้น ในการทดสอบแต่ละชุด ต้องบวกเวลาในการทดสอบ Blank ก่อนเสมอ

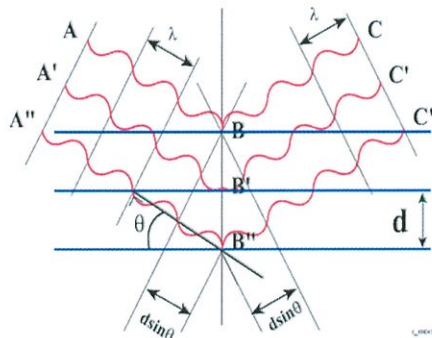
2.9 X-ray Diffractometer XRD

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบ

ต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลักษณะของตัวอย่าง ได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วยเครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างของการทดสอบ โดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาลักษณะของตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน



รูป 2.14 หลักการ XRD

จาก Bragg's law

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

นำมาคำนวณหาค่า d

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin\theta}$$

โดย

d = ระยะระหว่างระนาบ

λ = ความยาวคลื่น

θ = มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแรกกับของรังสีเอกซ์

สมการหาค่าคงที่ของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$$

โดยที่

h, k, l = ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบผลึก

a, c = ค่าคงที่ของโครงผลึก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะได้กล่าวถึง สารเคมีเริ่มต้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการเตรียมสารประกอบ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ และ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ($x=0.01, 0.03, 0.05, 0.1$) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีเริ่มต้นและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 สารเคมีเริ่มต้น

- CuO (ผงสีดำ)	มีความบริสุทธิ์ 97%
- Fe_3O_4 (ผงสีแดง)	มีความบริสุทธิ์ 99%
- SiO_2 (ผงสีขาว)	มีความบริสุทธิ์ 99.9%
- SnCl_4 (ผงสีขาว)	มีความบริสุทธิ์ 98%

3.1.2 อุปกรณ์ทางการทดลอง

- เครื่องชั่ง



- ช้อนตักสาร



- บีกเกอร์



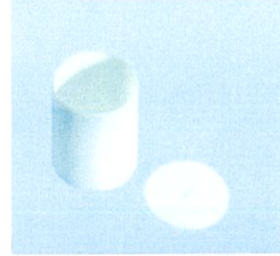
- Foil



- เต้าไฟฟ้า



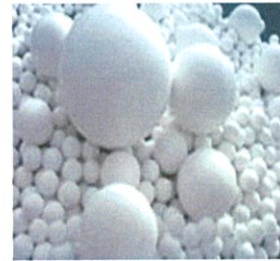
- ถ้วยอะลูมินา



- ครอบบดสาร



- เซอร์โคเนีย



- เตอบอบอุณหภูมิต่ำ



- ตัวอัดไฮดรอลิก



- Aloch-A



- กระบอกพลาสติก



-บล็อกอัดสาร



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบ

$2CuFe_{1-x}Si_xO_2$ และ $2CuFe_{1-x}Sn_xO_2$ จากสารตั้งต้น CuO , Fe_2O_3 , SiO_2 และ $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ มาผสมในขั้นตอนดังนี้



3.2.2 จำนวนของการได้ Si จากสมการ(1) เตรียมปริมาณสาร 10 กรัม จากการคำนวณสมการดังกล่าวนี้จะได้ปริมาณของสารประกอบ $2CuFe_{1-x}Si_xO_2$ ดังนี้

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.01$ คือ

$2CuFe_{0.99}Si_{0.01}O_2$	302.2284 g/mol	ต้องการ	10	กรัม
$2CuO$	159.0908 g/mol	ใช้	5.2639	กรัม
$0.99 Fe_2O_3$	158.0953 g/mol	ใช้	5.2310	กรัม
$(0.01)2SiO_2$	1.2017 g/mol	ใช้	0.0398	กรัม

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.03$ คือ

$2CuFe_{0.97}Si_{0.03}O_2$	301.1179 g/mol	ต้องการ	10	กรัม
$2CuO$	159.0908 g/mol	ใช้	5.283	กรัม
$0.97 Fe_2O_3$	154.9014 g/mol	ใช้	5.144	กรัม
$(0.03)2SiO_2$	3.6050 g/mol	ใช้	0.119	กรัม

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.05$ คือ

$2CuFe_{0.95}Si_{0.05}O_2$	302.2284 g/mol	ต้องการ	10	กรัม
$2CuO$	159.0908 g/mol	ใช้	5.302	กรัม
$0.99 Fe_2O_3$	158.0953 g/mol	ใช้	5.056	กรัม

$(0.05)2\text{SiO}_2$	1.2017	g/mol	ใช้	0.2	กรัม
โดยที่อัตราส่วน $x = 0.1$ คือ					
$2\text{CuFe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}\text{O}_2$	302.2284	g/mol	ต้องการ	10	กรัม
2CuO	159.0908	g/mol	ใช้	5.253	กรัม
$0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$	158.0953	g/mol	ใช้	4.749	กรัม
$(0.1)2\text{SiO}_2$	1.2017	g/mol	ใช้	0.396	กรัม

3.2.3 ในทำนองเดียวกันการคำนวณของการได้ป Sn จากสมการ (2) เตรียมปริมาณสาร 20 กรัม จากการคำนวณสมการดังกล่าวนี้จะได้ปริมาณของสาร $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ดังนี้

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.01$ คือ

$2\text{CuFe}_{0.99}\text{Sn}_{0.01}\text{O}_2$	304.035	g/mol	ต้องการ	20	กรัม
2CuO	159.1	g/mol	ใช้	10.466	กรัม
$0.99\text{Fe}_2\text{O}_3$	158.093	g/mol	ใช้	10.399	กรัม
$(0.01)(2)\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	7.012	g/mol	ใช้	0.461	กรัม

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.03$ คือ

$2\text{CuFe}_{0.97}\text{Sn}_{0.03}\text{O}_2$	306.549	g/mol	ต้องการ	20	กรัม
2CuO	159.1	g/mol	ใช้	10.380	กรัม
$0.97\text{Fe}_2\text{O}_3$	158.093	g/mol	ใช้	10.106	กรัม
$(0.03)(2)\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	7.012	g/mol	ใช้	1.372	กรัม

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.05$ คือ

$2\text{CuFe}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}\text{O}_2$	309.063	g/mol	ต้องการ	20	กรัม
2CuO	159.1	g/mol	ใช้	10.296	กรัม
$0.95\text{Fe}_2\text{O}_3$	151.707	g/mol	ใช้	9.817	กรัม
$20(0.05)(2)\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	35.06	g/mol	ใช้	2.26	กรัม

โดยที่อัตราส่วน $x = 0.1$ คือ

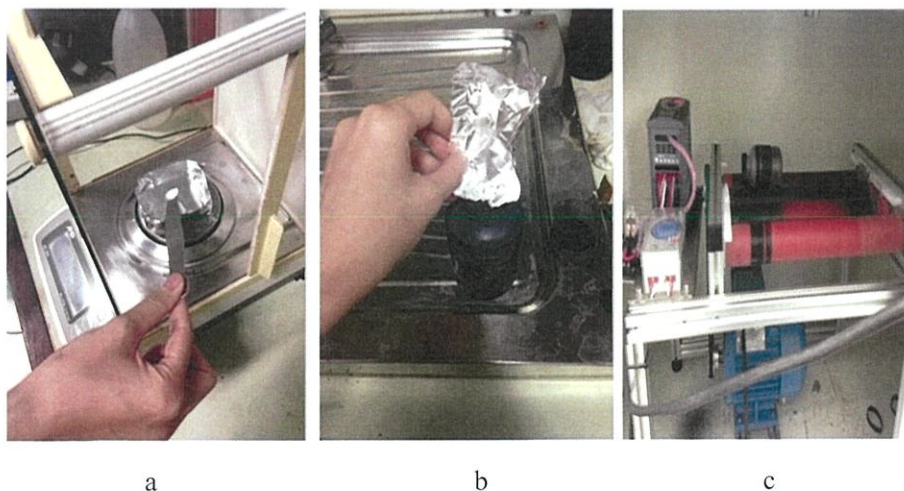
$2\text{CuFe}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_2$	315.351	g/mol	ต้องการ	20	กรัม
2CuO	151.9	g/mol	ใช้	9.634	กรัม
$0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$	143.722	g/mol	ใช้	9.115	กรัม
$(0.1)(2)\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	70.12	g/mol	ใช้	4.447	กรัม

3.2.4 ชั่งสารตั้งต้นตามตาราง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงอัตราส่วน

อัตราส่วน	การได้ป ซิลิกอน			การได้ป ดีบุก		
	2CuFe _x Si _x O ₂ ที่ปริมาณ 10 กรัม			2CuFe _{1-x} Sn _x O ₂ ที่ปริมาณ 20 กรัม		
	2CuO	(x)Fe ₂ O ₃	(x)2SiO ₂	2CuO	(x)Fe ₂ O ₃	(x)2SnCl ₄ ·5H ₂ O
x=0.01	5.263	5.231	0.0398	10.466	10.399	0.461
x=0.03	5.283	5.144	0.119	10.38	10.106	1.372
x=0.05	5.302	5.0567	0.2	10.296	9.8177	2.269
x=0.1	5.253	4.746	0.396	9.634	9.115	4.447

3.2.5 นำสารเคมีตั้งต้นที่เตรียมแล้วใส่ลงในกระบอกผสมสารที่ภายในมีเม็ดเซอร์โคเนีย และเท แอลกอฮอล์ลงในกระบอกผสมสาร ทำการผสมสารเคมีและแอลกอฮอล์ ด้วยวิธีการหมุน เรียกว่าการบอลมิลล์ ใช้เวลาในการบอลมิลล์ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 a การชั่งสารให้ได้ตามที่คำนวณไว้ข้างต้น
b นำสารที่ชั่งไปใส่ลงในขวดที่มีเม็ดเซอร์โคเนีย
c ทำการบอลมิลล์โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง

3.2.6 หลังจากบอลมิลล์เสร็จแล้วจะนำสารละลายที่ได้มาเทลงในบีกเกอร์โดยใช้ตะแกรงกรองและที่เม็ดเซอร์โคเนียมีสารละลายบางส่วนติดอยู่ทำการล้างด้วย แอลกอฮอล์



a

b

c

รูปที่ 3.3 a หลังจากบดมิลล์เสร็จนำมากรองสารละลายลงในบีกเกอร์

b โดยใช้ตะแกรงรอมเม็คเซอร์โคเนีย

c ที่บริเวณเม็คเซอร์โคเนียยังมีสารละลายติดทำการล้างโดยใช้แอลกอฮอล์

3.2.7 นำสารละลายที่กรองแล้วไปเข้าตู้อบอุณหภูมิค่า ที่ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อทำการระเหยแอลกอฮอล์ออก จะได้สารออกมาในรูปที่เป็นผง



a

b

c

รูปที่ 3.4 a หลังจากที่ทำกรล้างเม็คเซอร์โคเนีย

b เอาฝอยมาปิดที่บีกเกอร์แล้วเจาะรูเพื่อให้มีช่องระบาย

c นำบีกเกอร์ที่เตรียมเสร็จแล้วไปเข้าตู้อบใช้เวลา 12 ชั่วโมง

3.2.8 นำผงสารที่ผ่านการอบแห้ง นำไปบดให้ละเอียดแล้วใส่ลงในถ้วยอะลูมินา แล้วเผา calcine ในเตาที่อุณหภูมิ 1050 องศา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



a

b

c

รูปที่ 3.5 a หลังจากอบครบ 12 ชั่วโมง

b สารจะออกมาให้แบบผง

c นำไปใส่ลงในถ้วยอะลูมินาแล้วไปเผาเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

3.2.9 เมื่อครบ 20 ชั่วโมง สารที่นำออกมาจากเตาจะมีลักษณะเป็นผลึก จะทำการบดด้วยครกบดสารให้ละเอียด และทำการเผา calcine อีกรอบที่อุณหภูมิและเวลาเท่าเดิม



a

b

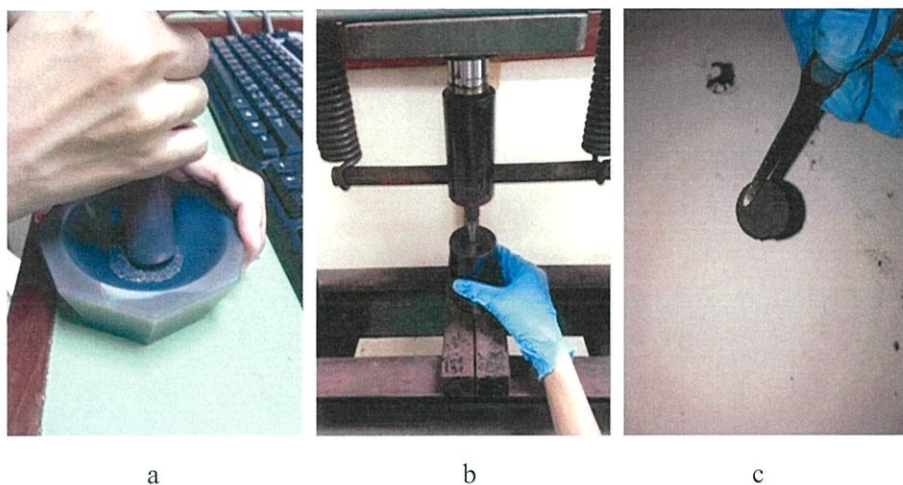
c

รูปที่ 3.6 a นำชิ้นงานออกจากถ้วยอะลูมินา

b จะได้ชิ้นงานในรูปผลึกทำการบดให้ละเอียด

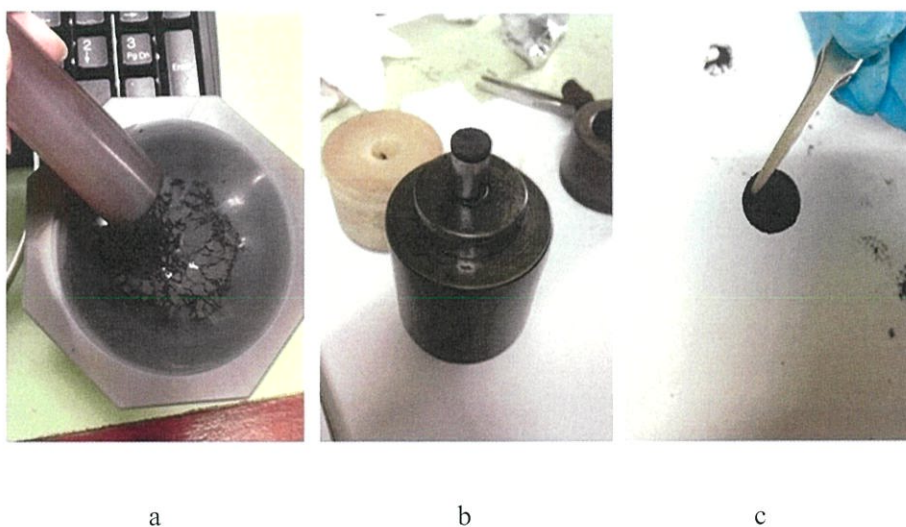
c แล้วนำไปเผาอีกหนึ่งรอบ

3.2.10 หลังจากทำการเผาอบที่สองเสร็จและจะนำมาบดให้ละเอียดแล้วนำไปอัดเม็ดด้วยบล็อกอัดเม็ดสารได้เม็ดสารออกมามีลักษณะเป็นเม็ดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และหนา 2-3 mm โดยใช้แรงในการอัดคือ $2000 \text{ Kg}/1.13 \text{ cm}^2$ เมื่อได้เม็ดสารแล้วจะทำการเผาผลึก (sinter) อีกหนึ่งรอบที่อุณหภูมิและเวลาเท่าเดิม



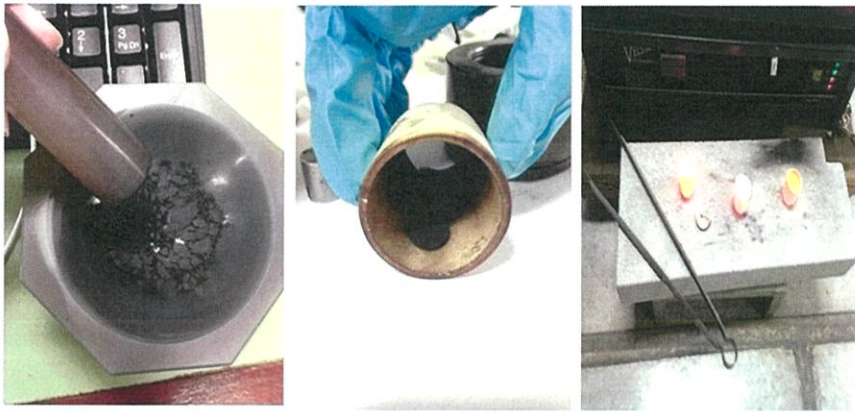
รูปที่ 3.7 a บดให้ละเอียดอีกครั้ง
 b แล้วทำการอัดด้วยแรง $2000 \text{ Kg}/1.13 \text{ cm}^2$
 c หลังจากทำการอัด

3.2.11 เมื่อนำออกมาจากเตาสารที่เผาเสร็จแล้วจะยังเป็นเม็ดสารอยู่ให้ทำการบดให้ละเอียดอีกครั้ง และทำการอัดสารให้เป็นเม็ดอีกรอบด้วยแรงกดเท่าเดิม และนำไปเผาเป็นรอบสุดท้ายที่อุณหภูมิและเวลาเท่าเดิม



รูปที่ 3.8 a การบดให้ละเอียด
 b แล้วนำไปอัดเม็ดอีกรอบ
 c เผาที่อุณหภูมิเท่าเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.2.12 หลังจากนั้นจะนำเม็ดสารบางส่วนมาบดอีกรอบเพื่อทำการส่งวัดผล XRD และอีกบางส่วนส่งวัดผลของค่า สภาพการนำความร้อน สภาพการนำไฟฟ้า และ สัมประสิทธิ์ซีเบค



a

b

c

รูปที่ 3.9

a การบดให้ละเอียด

b แล้วนำไปอัดเม็ดอีกหนึ่งรอบ

c เเผาที่อุณหภูมิเท่าเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



a

b

c

รูปที่ 3.10

a การบดให้ละเอียด

b แล้วนำอัดแต่เป็นการอัดแบบแห้ง

c เมื่อได้ชิ้นงานนำไปเผาที่อุณหภูมิเท่าเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

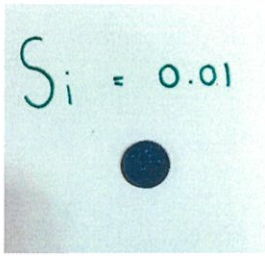
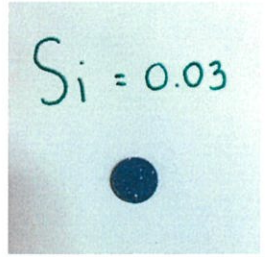
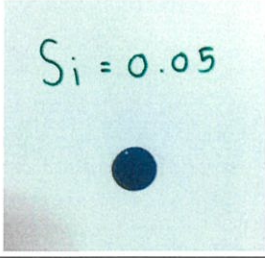
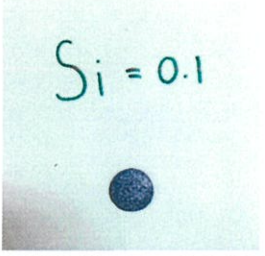
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ภาพแสดงความสมบูรณ์ของชั้นสาร ซึ่งอาจมีผลต่อค่าพารามิเตอร์อื่นๆที่จะทำการส่งวัด เราจึงต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ของชั้นสาร ได้แก่

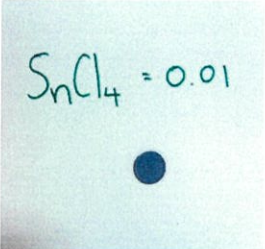
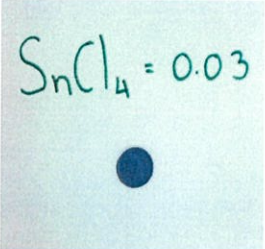
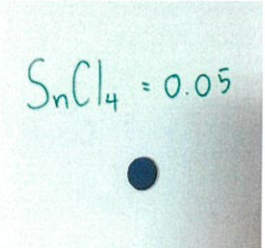
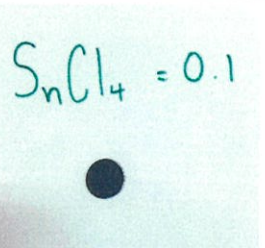
4.1.1 แบบเม็ดกลม $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$

ตารางที่ 4.1 ชั้นสาร ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$

$2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ ที่อัตราส่วน	ภาพชั้นสาร	หมายเหตุ
X = 0.01	 A photograph of a spot test on a white background. The text "Si = 0.01" is written in green ink above a small, dark blue circular spot.	
X = 0.03	 A photograph of a spot test on a white background. The text "Si = 0.03" is written in green ink above a small, dark blue circular spot.	
X = 0.05	 A photograph of a spot test on a white background. The text "Si = 0.05" is written in green ink above a small, dark blue circular spot.	
X = 0.1	 A photograph of a spot test on a white background. The text "Si = 0.1" is written in green ink above a small, dark blue circular spot.	

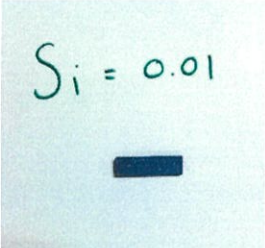
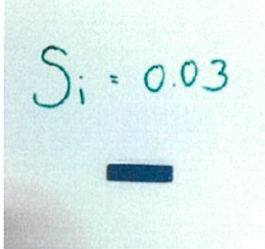
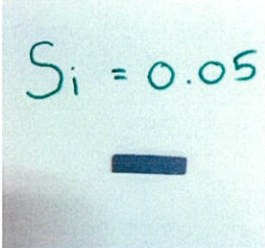
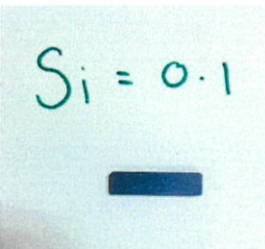
4.1.2 แบบเม็ดกลม $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$

ตารางที่ 4.2 ชั้นสาร ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$

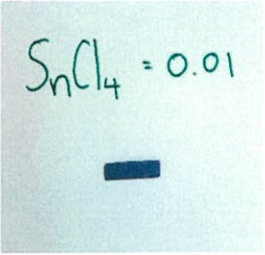
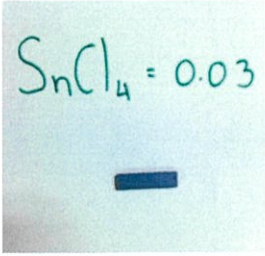
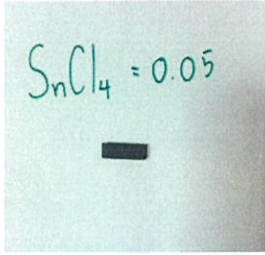
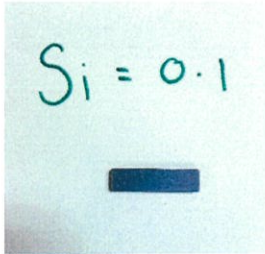
$2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ที่อัตราส่วน	ภาพชั้นสาร	หมายเหตุ
X = 0.01		
X = 0.03		
X = 0.05		
X = 0.1		

4.1.3 แบบแท่ง $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$

ตารางที่ 4.3 ชั้นสาร ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$

$2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$ ที่อัตราส่วน	ภาพชั้นสาร	หมายเหตุ
X = 0.01		
X = 0.03		
X = 0.05		
X = 0.1		

4.1.4 แบบแท่ง $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ตารางที่ 4.4 ชั้นสาร ของ $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$

2CuFe _{1-x} Sn _x O ₂ ที่อัตราส่วน	ภาพชั้นสาร	หมายเหตุ
X = 0.01		
X = 0.03		
X = 0.05		
X = 0.1		

4.1.5 ขนาดของชิ้นงาน



รูป 4.1 ตัวอย่างชิ้นงาน

ตาราง 4.5 แสดงขนาดของชิ้นงาน (Si)

อัตราส่วน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความหนา (mm)
0.01	4.86	19.3	2.60
0.03	4.80	18.77	2.49
0.05	4.79	18.79	2.45

ตาราง 4.6 แสดงขนาดของชิ้นงาน (SnCl₄)

อัตราส่วน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความหนา (mm)
0.01	4.90	19.2	2.44
0.03	4.76	18.92	2.31
0.05	4.79	18.95	2.54

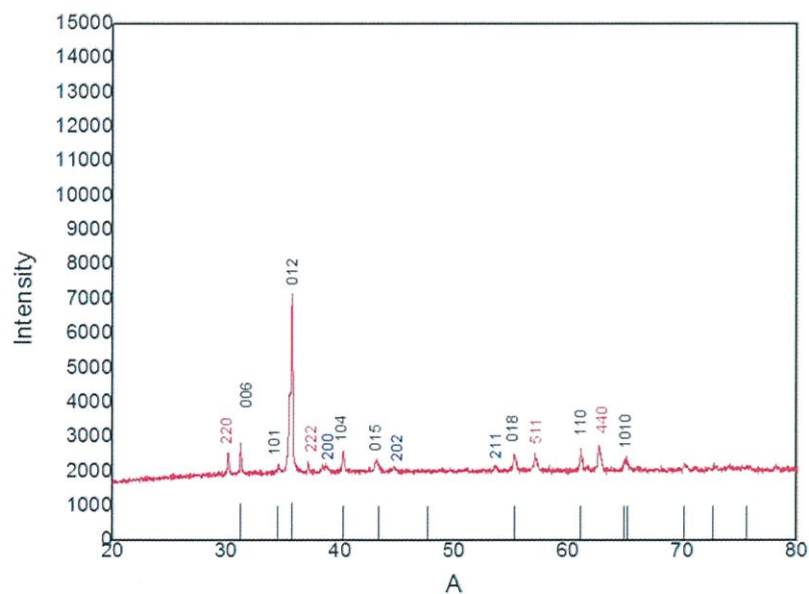
4.2 ผลการวัด X-RAY DIFFRACTION

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำละลายตัวอย่าง โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ

4.2.1 $2\text{CuFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_2$

ตารางที่ 4.7 ผล XRD Si = 0.01

λ (Å°)	h	k	l	2θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.2415	0.1426
0.154056	1	0	1	34.5112	0.1766
0.154056	0	1	2	35.7199	0.1783
0.154056	1	0	4	40.2268	0.2174
0.154056	0	1	5	43.1542	0.3976
0.154056	0	1	8	55.2659	0.2890
0.154056	1	1	0	61.0670	0.2557
0.154056	1	0	10	64.9614	0.4447



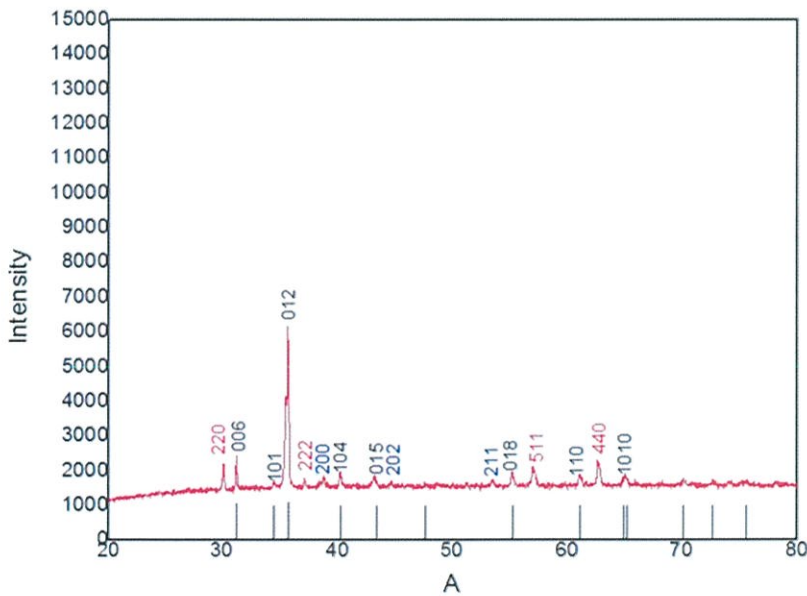
รูป 4.2 ผล XRD Si = 0.01

จากรูปที่ 4.2 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการได้ปซิลิกอนในอัตราส่วน 0.01 จากกราฟพบว่าที่ระนาบ 220 222 511 440 เป็นพีคที่เกิดขึ้นจากการสปินเนล และที่ระนาบ 006 101 012 104 015 018 110 1010 เป็นพีคที่เกิดจากโครงสร้างดีลาฟอสไฟต์ และระนาบที่เหลือ 200 202 211 เป็นพีคที่

เหลืออยู่ของซิลิกอนที่โด๊ปเข้าสู่ CuFeO_2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีซิลิกอนบางส่วนที่โด๊ปเข้าสู่โครงสร้างไม่หมดนั่นเอง

ตารางที่ 4.8 ผล XRD Si = 0.03

λ (Å)	h	k	l	2θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.2229	0.0997
0.154056	1	0	1	34.4749	0.1321
0.154056	0	1	2	35.6879	0.1752
0.154056	1	0	4	40.1887	0.1539
0.154056	0	1	5	43.1410	0.3187
0.154056	0	1	8	55.2321	0.2532
0.154056	1	1	0	61.0368	0.3119
0.154056	1	0	10	64.9890	0.4472



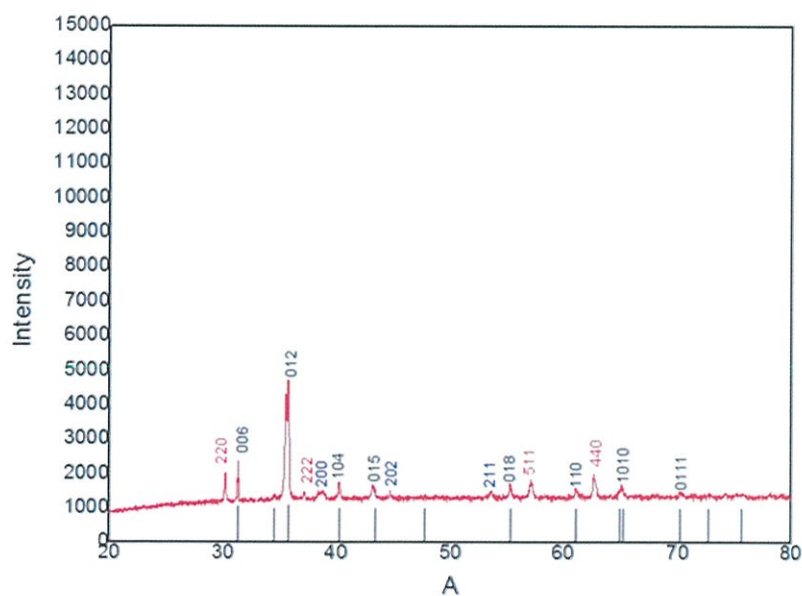
รูป 4.3 ผล XRD Si = 0.03

จากรูปที่ 4.3 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการโด๊ปซิลิกอนในอัตราส่วน 0.03 จากกราฟพบว่าที่ระนาบ 220 222 511 440 เป็นพีคที่เกิดขึ้นจากการสปินเนล และที่ระนาบ 006 101 012 104 015 018 110 1010 เป็นพีคที่เกิดจากโครงสร้างดีลาฟอสเฟต และระนาบที่เหลือ 200 202 211 เป็นพีคที่

เหลืออยู่ของซิลิกอนที่โด๊ปเข้าสู่ CuFeO_2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีซิลิกอนบางส่วนที่โด๊ปเข้าสู่โครงสร้างไม่หมดนั่นเอง

ตารางที่ 4.9 ผล XRD Si = 0.05

λ (\AA°)	h	k	l	2θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.2430	0.1421
0.154056	1	0	1	35.7037	0.1843
0.154056	0	1	2	40.2162	0.2166
0.154056	1	0	4	43.1451	0.3278
0.154056	0	1	5	55.2511	0.2543
0.154056	0	1	8	61.0592	0.2406
0.154056	1	1	0	64.9760	0.3967
0.154056	1	0	10	70.5809	0.3563



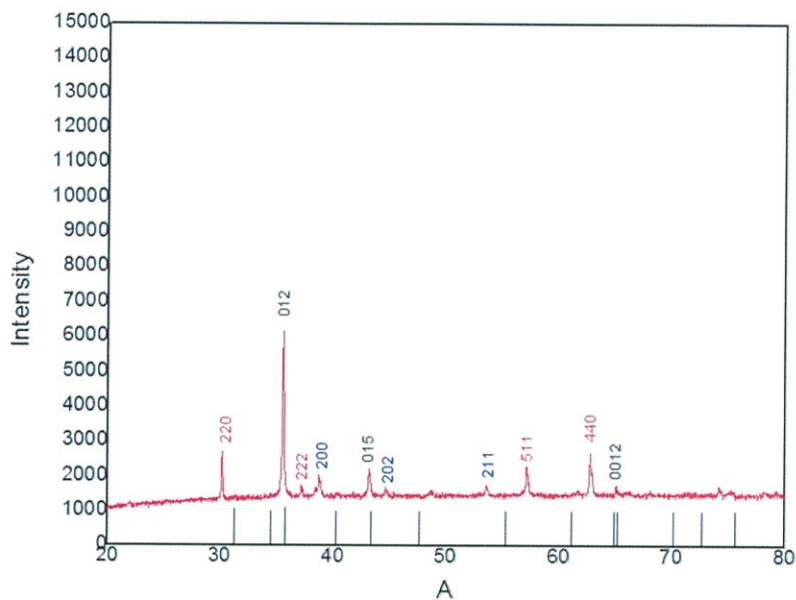
รูปที่ 4.4 ผล XRD Si = 0.05

จากรูปที่ 4.4 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการโด๊ปซิลิกอนในอัตราส่วน 0.05 จากกราฟพบว่าที่ระนาบ 220 222 511 440 เป็นพีคที่เกิดขึ้นจากการสปีนแนล และที่ระนาบ 006 101 012 104 015 018 110 1010 0111 เป็นพีคที่เกิดจากโครงสร้างคัลฟาออสไซส์ และระนาบที่เหลือ 200 202 211 เป็น

พีคที่เหลืออยู่ของซิลิกอนที่โด๊ปเข้าสู่ CuFeO_2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีซิลิกอนบางส่วนที่โด๊ปเข้าสู่โครงสร้างไม่หมดนั่นเอง

ตารางที่ 4.10 ผล XRD Si = 0.1

λ (\AA)	h	k	l	2θ (degree)	FWHM
0.154056	0	1	2	35.5298	0.1868
0.154056	0	1	5	43.1881	0.2514
0.154056	0	0	12	65.0110	0.1334



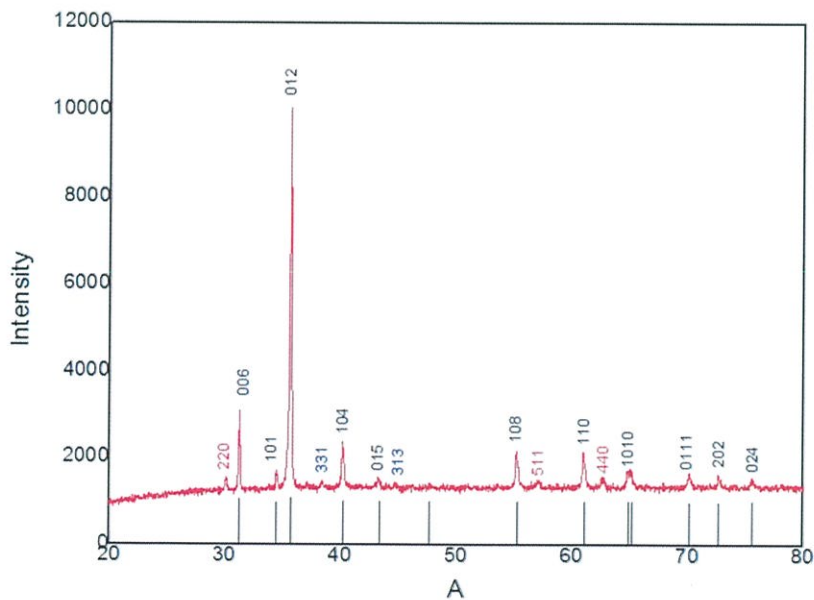
รูป 4.5 ผล XRD Si = 0.1

จากรูปที่ 4.5 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการโด๊ปซิลิกอนในอัตราส่วน 0.1 จากกราฟพบว่าที่ระนาบ 220 222 511 440 เป็นพีคที่เกิดขึ้นจากการสปินแนล และที่ระนาบ 012 015 0112 เป็นพีคที่เกิดจากโครงสร้างคัลฟาอสไซส์ และระนาบที่เหลือ 200 202 211 เป็นพีคที่เหลืออยู่ของซิลิกอนที่โด๊ปเข้าสู่ CuFeO_2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีซิลิกอนบางส่วนที่โด๊ปเข้าสู่โครงสร้างไม่หมดนั่นเอง และจากกราฟยังพบอีกว่าพีคของโครงสร้างคัลฟาอสไซส์ในบางส่วนและเป็นส่วนใหญ่ได้หายไป ทำให้มีความเป็นคัลฟาอสไซส์ที่ไม่ดี ถ้าหากนำไปใช้ในการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะทำให้สมบัติความเป็นอิเล็กทริกไม่ดีเท่าที่ควร

4.2.2 $2\text{CuFe}_{1-x}\text{SnCl}_4\text{O}_2$

ตารางที่ 4.11 ผล XRD $\text{SnCl}_4 = 0.01$

λ (Å°)	h	k	l	2θ (degree)	FWHM
0.154056	0	1	5	43.2252	0.2945
0.154056	0	1	8	55.2060	0.2796
0.154056	1	1	0	60.9547	0.3017
0.154056	1	0	10	64.9248	0.5563
0.154056	0	1	11	70.1063	0.3196
0.154056	2	0	2	72.6920	0.3223
0.154056	0	2	4	75.5815	0.3790
0.154056	0	0	6	31.2217	0.0453
0.154056	1	0	1	34.4684	0.1842
0.154056	0	1	2	35.6649	0.1571
0.154056	1	0	4	40.1724	0.2210



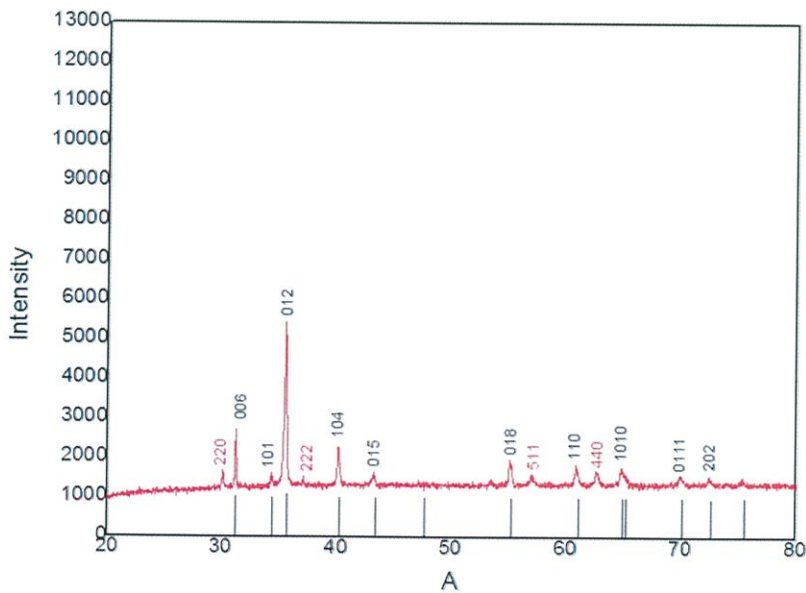
รูป 4.6 ผล XRD $\text{SnCl}_4 = 0.01$

จากรูปที่ 4.6 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการได้ไป SnCl_4 ในอัตราส่วน 0.01 จะเห็นได้ว่าที่ระนาบ 220 511 440 นั้นเป็นระนาบที่เกิดจากการสปินเนลและที่ระนาบ 006 101 102 104 015 108 110

1010 0111 202 024 เป็นฟีกของโครงสร้างดีตาฟอสไซส์ และมี SnCl₄ เหลืออยู่บางส่วนเล็กน้อย
สังเกตได้จากฟีกที่ระนาบ 331 313 ทำให้ทราบว่า SnCl₄ ที่ได้ป้เข้าสู่ CuFeO₂ ยังมีบางส่วนที่ได้ป้
ไม่เข้าและหลงเหลืออยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 4.12 ผล XRD SnCl₄ = 0.03

λ (A°)	h	k	l	2 θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.2269	0.1439
0.154056	1	0	1	34.3733	0.1952
0.154056	0	1	2	35.5623	0.2526
0.154056	1	0	4	40.1016	0.2344
0.154056	0	1	5	43.1282	0.3325
0.154056	0	1	8	55.1326	0.2967
0.154056	1	1	0	60.8063	0.3401
0.154056	1	0	10	64.8008	0.5564
0.154056	0	1	11	69.9387	0.4279
0.154056	2	0	2	72.4694	0.2827

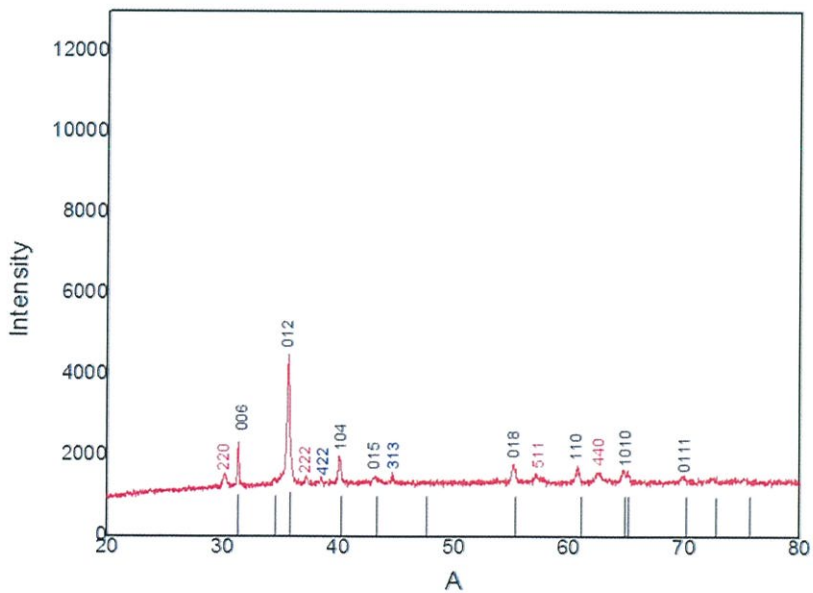


รูป 4.7 ผล XRD SnCl₄ = 0.03

จากรูปที่ 4.7 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการได้ป SnCl₄ ในอัตราส่วน 0.03 จะเห็นได้ว่าที่ระนาบ 220 511 440 นั้นเป็นระนาบที่เกิดจากการสปีนแนลและที่ระนาบ 006 101 102 104 015 108 110 1010 0111 202 เป็นพีคของโครงสร้างดีลาฟอสไซส์ ซึ่งในการได้ปที่อัตราส่วน 0.03 นี้ ไม่มี SnCl₄ หลงเหลืออยู่เลย สังเกตได้จากไม่มีพีคของ SnCl₄ ปรากฏอยู่ให้เห็น ดังนั้นที่อัตราส่วนนี้ค่อนข้างจะมีความบริสุทธิ์ที่ดีกว่าในการได้ปที่อัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งมี SnCl₄ หลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย และมีพีคของดีลาฟอสไซส์ในบางพีคก็หายไปด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.13 ผล XRD SnCl₄ = 0.05

λ (A°)	h	k	l	2 θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.2237	0.1629
0.154056	0	1	2	35.5249	0.2690
0.154056	1	0	4	40.0322	0.2704
0.154056	0	1	5	43.2077	0.5367
0.154056	0	1	8	55.0730	0.3605
0.154056	1	1	0	61.7345	1.1193
0.154056	1	1	10	64.8182	0.6551
0.154056	0	1	11	69.8105	0.4376

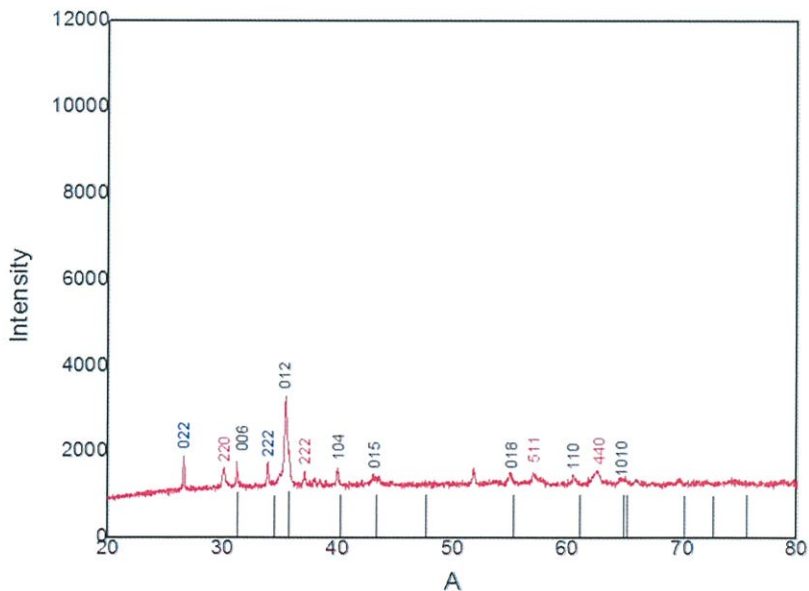


รูป 4.8 ผล XRD SnCl₄ = 0.05

จากรูปที่ 4.8 เป็นรูปของกราฟ XRD ที่ทำการได้ป SnCl₄ ในอัตราส่วน 0.05 จะเห็นว่าที่ระนาบ 220 222 511 440 นั้นเป็นระนาบที่เกิดจากการสปีนแนลและที่ระนาบ 006 102 104 015 108 110 1010 0111 เป็นพีคของโครงสร้างดีลาฟอสไซส์ และมี SnCl₄ เหลืออยู่บางเล็กน้อยสังเกตได้จากพีคที่ระนาบ 422 313 ทำให้ทราบว่า SnCl₄ ที่ได้ปเข้าสู่ CuFeO₂ ยังมีบางส่วนที่ได้ปไม่เข้าและหลงเหลืออยู่เล็กน้อย และพีคของดีลาฟอสไซส์เองก็หายไปใบบางพีคด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.14 ผล XRD SnCl₄ = 0.1

λ (Å°)	h	k	l	2 θ (degree)	FWHM
0.154056	0	0	6	31.1629	0.1455
0.154056	0	1	2	35.4466	0.3208
0.154056	1	0	4	39.9367	0.2112
0.154056	0	1	5	43.2199	0.8161
0.154056	0	1	8	54.9395	0.3431
0.154056	1	1	0	60.4998	0.3684
0.154056	1	1	10	64.6680	0.6350



รูป 4.9 ผล XRD SnCl₄ = 0.1

การคำนวณผลหาค่า a และ c

ยกตัวอย่างการคำนวณ Si = 0.01

กำหนดให้ $n = 1$, $\lambda = 1.54056 \times 10^{-10}$

$$\text{peak 1} \quad d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \text{-----(1)}; \quad d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2\sin(15.6208)} = 2.8606 \times 10^{-10}$$

$$\text{หาค่าพารามิเตอร์ } a, c \text{ จากสมการ} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \text{-----(2)}$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad \frac{1}{(2.8606 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{0^2 + 0 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{6^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.8606 \times 10^{-10})^2} = \frac{6^2}{c^2}$$

$$c^2 = 6^2 \cdot (2.8606 \times 10^{-10})^2 = 2.9459 \times 10^{-18}; c = \sqrt{2.9459 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.716 \times 10^{-9}$$

$$\text{peak 2} \quad d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad ; \quad d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2\sin(17.2556)} = 2.5967 \times 10^{-10}$$

$$\text{หาค่าพารามิเตอร์ } a, c \text{ จากสมการ} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \text{-----(2)}$$

แทนค่า $c^2 = 2.9459 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

$$\text{จะได้ว่า} \quad \frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2 + 1 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{1^2}{2.9459 \times 10^{-18}}$$

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} - \frac{1^2}{2.9459 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4491 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4491 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.2011 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.2011 \times 10^{-20}} = 3.0333 \times 10^{-10}$$

เอา a ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2}{9.2011 \times 10^{-20}} \right] + \frac{1^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} - 1.4491 \times 10^{19} = \frac{1^2}{c^2}$$

$$3.3958 \times 10^{17} = \frac{1^2}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{1^2}{3.3958 \times 10^{17}} = 2.9453 \times 10^{-18}$$

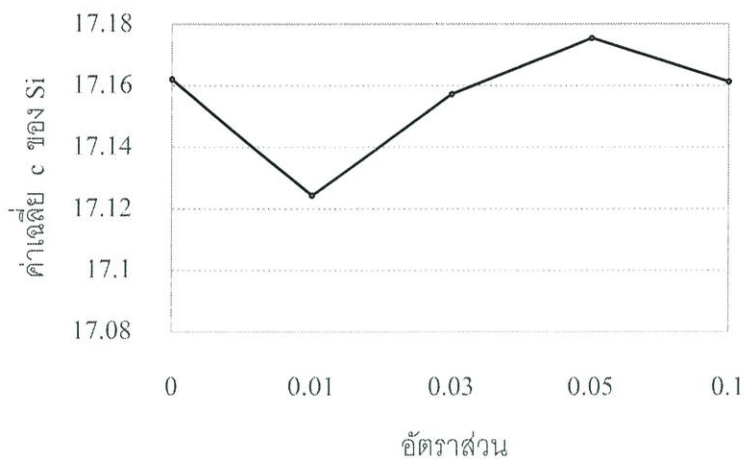
$$c = \sqrt{2.9453 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7162 \times 10^{-9}$$

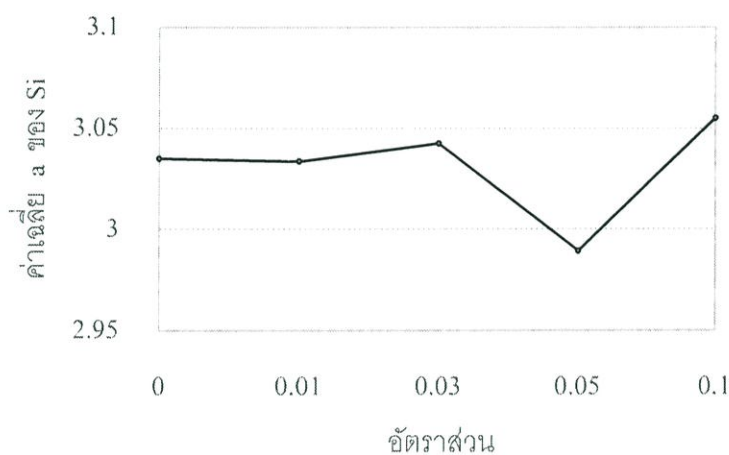
หลังจากคำนวณครบทุก peak ของแต่ละอัตราส่วนแล้วจะได้ค่าเฉลี่ย a และ c ดังตารางตารางที่

ตาราง 4.15 แสดงค่าเฉลี่ย a และ c ของ Si

อัตราการ โดป Si	a (Å°)	a (Å°)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	c (Å°)	c (Å°)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
	มาตรฐาน			มาตรฐาน		
0.01	3.0347	3.0337	0.0330	17.1620	17.1243	0.2197
0.03	3.0347	3.0426	-0.2603	17.1620	17.1572	0.0280
0.05	3.0347	2.9893	1.4960	17.1620	17.1754	-0.0781
0.1	3.0347	3.0550	-0.6689	17.1620	17.1612	0.0047



รูป 4.10 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า c (Å) ของ Si

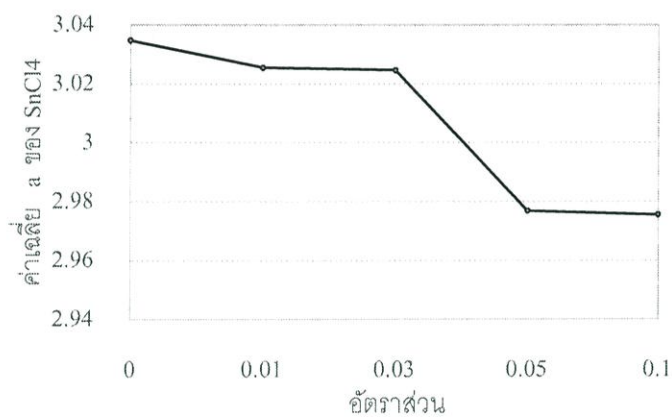


รูป 4.11 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า a (Å) ของ Si

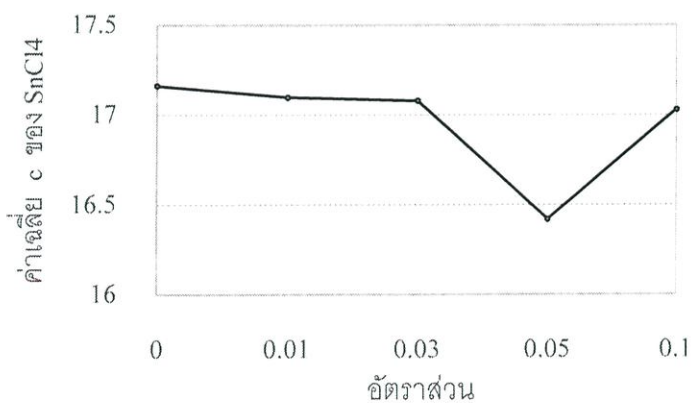
จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง c กับ อัตราส่วนของ Si จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ย c ในระนาบดังกล่าว จะเห็นว่าค่าสูงสุด และต่ำสุดของค่า c นั้นอยู่ในช่วงที่มีค่าความผิดพลาดไปจากค่ามาตรฐานแต่เมื่อ คำนวณเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ จะเห็นว่าค่า c ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกค่า และในลักษณะเดียวกันค่าเฉลี่ยระนาบ a ในรูปที่ 4.11 ก็ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดของค่าที่วัดได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ถ้านำค่าที่วัดได้คำนวณเทียบค่า เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ค่าเฉลี่ยระนาบ ก็ จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในทุกอัตราส่วน เช่นกัน

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ย a และ c ของ SnCl₄

อัตราสาร โคป SnCl ₄	a (A°)	a (A°)	% ค่า	c (A°)	c (A°)	% ค่า
	มาตรฐาน		ความคลาด เคลื่อน			ความคลาด เคลื่อน
0.01	3.0347	3.0255	0.3032	17.1620	17.0970	0.3800
0.03	3.0347	3.0246	0.3328	17.1620	17.0789	0.4842
0.05	3.0347	2.9768	1.9079	17.1620	16.4190	0.0433
0.1	3.0347	2.9754	1.9541	17.1620	17.0282	0.7796



รูป 4.12 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า c (A°) ของ SnCl₄



รูป 4.13 แสดงค่าเฉลี่ย ค่า a (A°) ของ SnCl₄

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง c กับ อัตราส่วนของ SnCl_4 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ย c ในระนาบดังกล่าว จะเห็นว่าค่าสูงสุด และต่ำสุดของค่า c นั้นอยู่ในช่วงที่มีค่าความผิดพลาดไปจากค่ามาตรฐานแต่เมื่อ คำนวณเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ จะเห็นว่าค่า c ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกค่า ยกเว้นที่อัตราส่วน 0.05 ที่หลุดไปจากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และในลักษณะเดียวกันค่าเฉลี่ยระนาบ a ในรูปที่ 4.13 ก็ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดของค่าที่วัดได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ถ้านำค่าที่วัดได้คำนวณเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ค่าเฉลี่ยระนาบ ก็ จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในทุกอัตราส่วนเช่นกัน

จากตารางค่า FWHM นำมาคำนวณหารค่า crystallite size

จากสูตร

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

จะได้ค่า D ดังตาราง

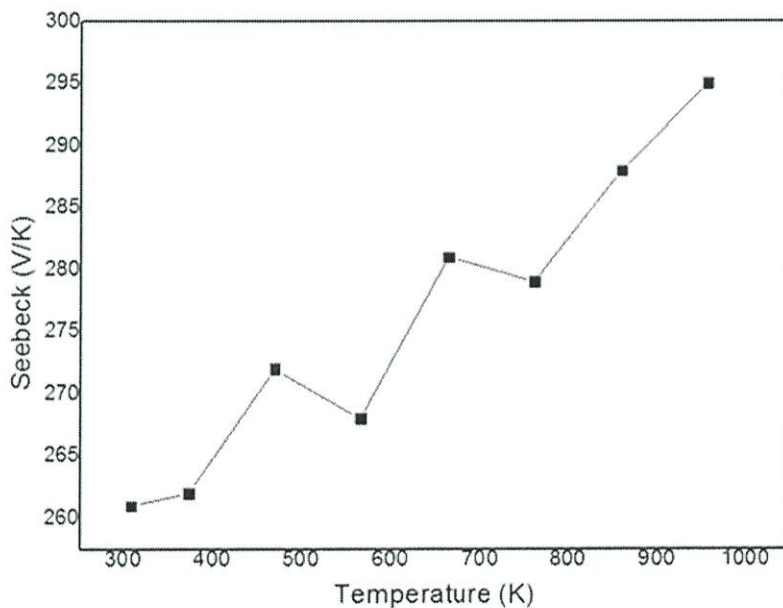
ตารางที่ 4.17 ตารางคำนวณค่า D

k	λ (Å)	θ (Radins)	θ (Radins)	$\cos\theta$ (Radins)	D (nm)
0.89	1.54056	0.2726	0.00249	0.9631	572.0264
0.89	1.54056	0.3012	0.00308	0.9550	465.8019
0.89	1.54056	0.3117	0.00311	0.9518	462.9031
0.89	1.54056	0.3510	0.00379	0.9390	384.8218
0.89	1.54056	0.3766	0.00694	0.9299	212.4700
0.89	1.54056	0.4823	0.00500	0.8859	306.8249
0.89	1.54056	0.5329	0.00446	0.8613	356.6891
0.89	1.54056	0.5669	0.00776	0.8436	209.4121

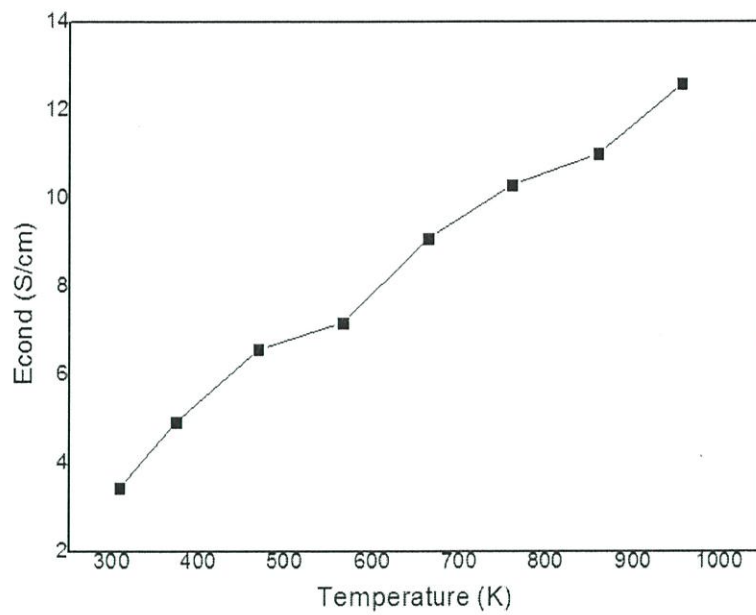
4.3 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 4.18 ค่ามาตรฐาน

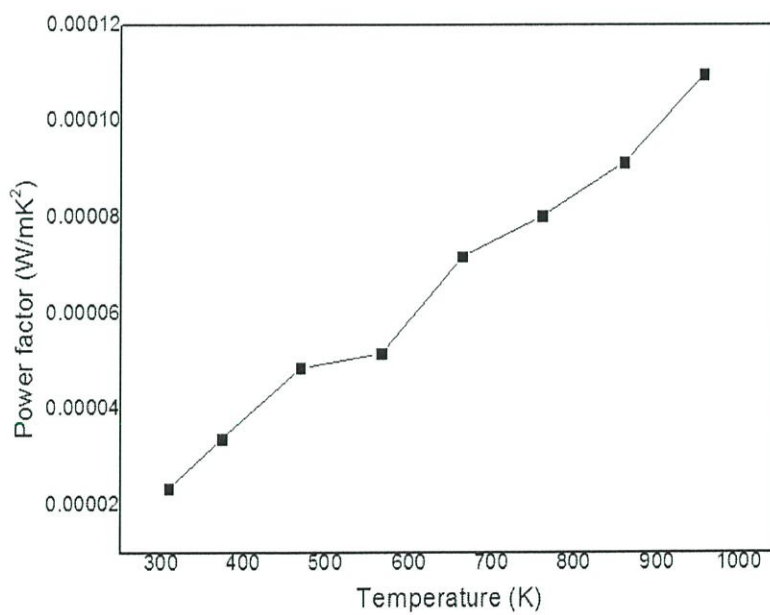
temp(K)	Seebeck($\mu\text{V}/\text{K}$)	Econd(S/cm)	power
309	261	3.44	0.000023433624
373	262	4.92	0.000033772848
469	272	6.56	0.000048533504
566	268	7.17	0.000051497808
663	281	9.09	0.000071775549
761	279	10.3	0.00008017623
859	288	11	0.0000912384
956	295	12.6	0.0001096515



รูป 4.14 กราฟแสดงอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐาน



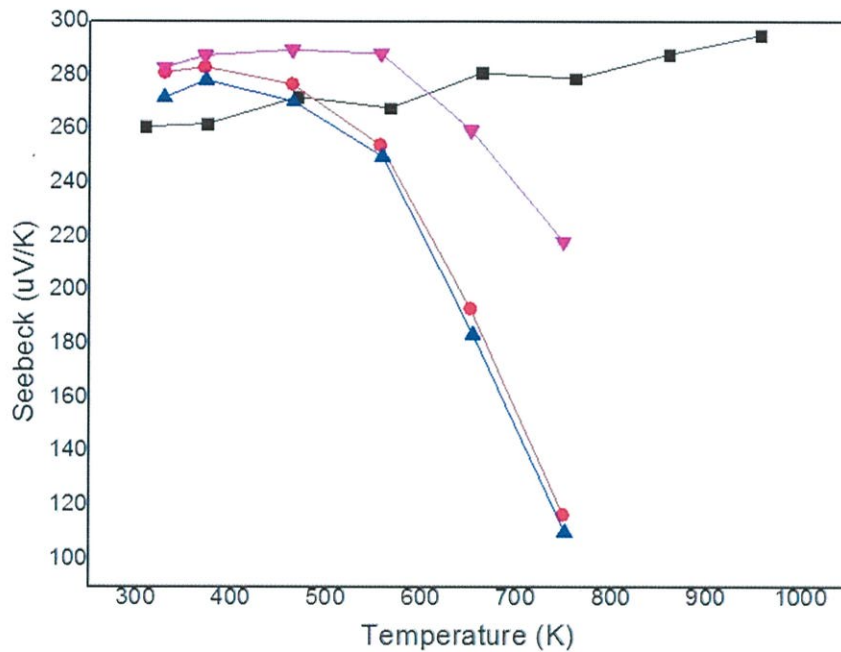
รูป 4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิกับค่าสภาพความนำไฟฟ้ามาตรฐาน



รูป 4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิกับpower factor มาตรฐาน

4.3.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ของ Si

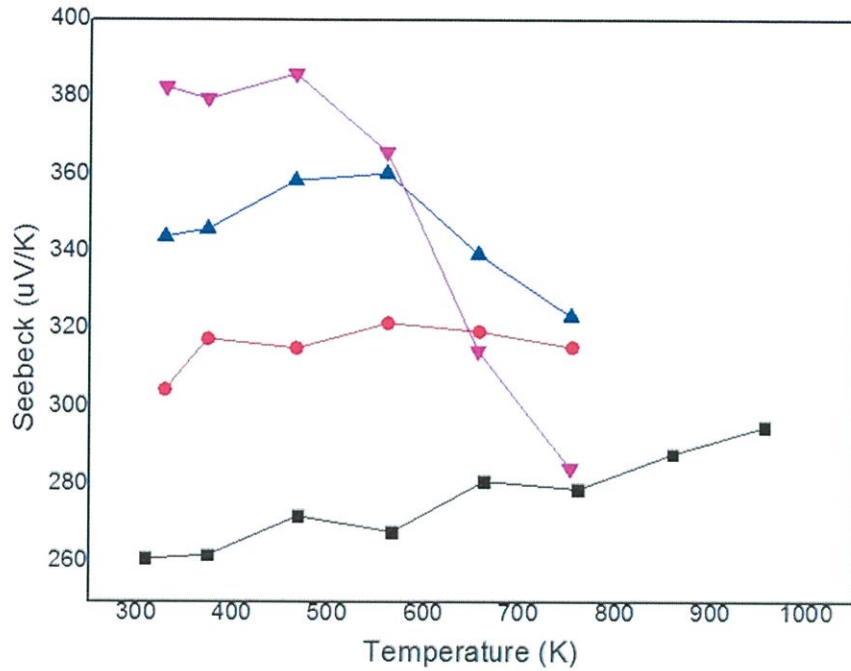


รูป 4.17 ค่า seebeck ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า seebeck มาตรฐาน

โดย seebeck มาตรฐาน	—
seebeck Si = 0.01	—
seebeck Si = 0.03	—
seebeck Si = 0.05	—

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Si) กับอุณหภูมิ จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 0.01 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีการจะเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงๆหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค จะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับที่อัตราส่วนอื่นที่ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะเพิ่มขึ้นจนถึง ช่วงๆหนึ่งแล้วจะลดลง ซึ่งในอัตราส่วนทั้งหมดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่ดีที่สุดคือที่อัตราส่วน 0.05 คือจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคอยู่ในช่วงที่มากที่สุดและแนวโน้มในการลดลงน้อยที่สุด

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ของ SnCl_4



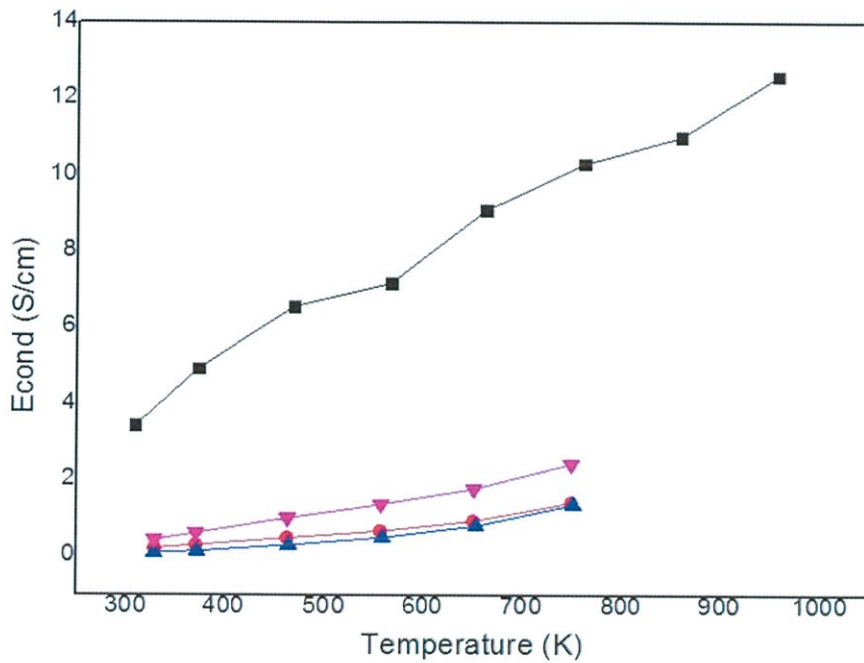
รูป 4.18 ค่า seebeck ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า seebeck มาตรฐาน

โดย seebeck มาตรฐาน	—
seebeck $\text{SnCl}_4 = 0.01$	—
seebeck $\text{SnCl}_4 = 0.03$	—
seebeck $\text{SnCl}_4 = 0.05$	—

จากรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค (SnCl_4) กับ อุณหภูมิ ในแต่ละอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่งแล้วจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ที่อัตราส่วน 0.01 จากกราฟจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงไม่ต่อเนื่อง และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นถ้าเทียบกับทั้ง 2 อัตราส่วนแล้วที่อัตราส่วนนี้ค่อนข้างจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่ดีที่สุด

4.3.2 สภาพนำไฟฟ้า

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ของ Si

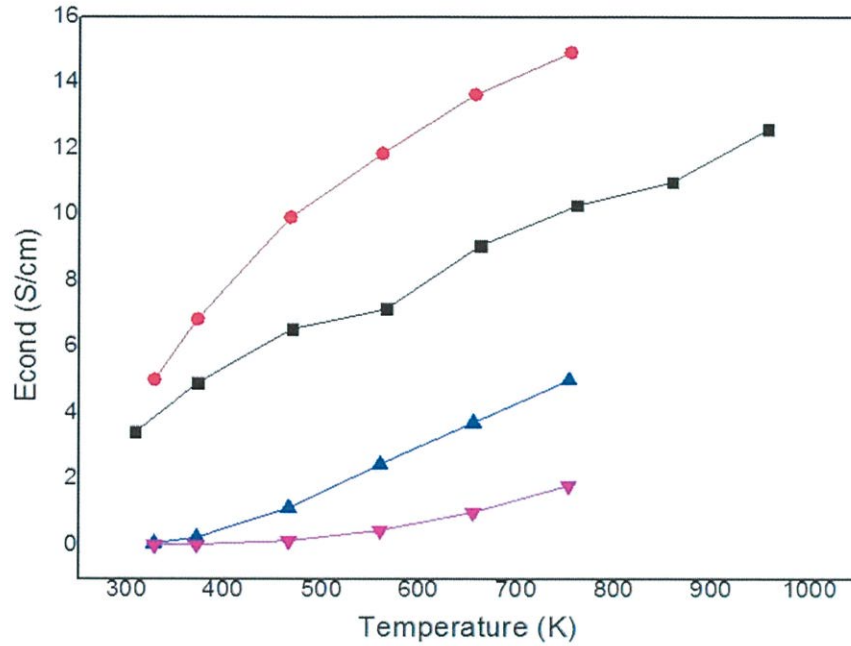


รูป 4.19 ค่า E_{cond} ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า E_{cond} มาตรฐาน

โดย E_{cond} มาตรฐาน	—
E_{cond} Si = 0.01	—
E_{cond} Si = 0.03	—
E_{cond} Si = 0.05	—

จากรูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพนำไฟฟ้า (Si) กับ อุณหภูมิ ในอัตราส่วนทั้งหมดจะเห็นว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าสภาพนำไฟฟ้ามีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 0.05 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดจึงเหมาะแก่การนำไปใช้

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ ค่าความนำไฟฟ้า ของ SnCl_4



รูป 4.20 ค่า E_{cond} ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า E_{cond} มาตรฐาน

โดย E_{cond} มาตรฐาน —

$E_{\text{cond}} \text{ SnCl}_4 = 0.01$ —

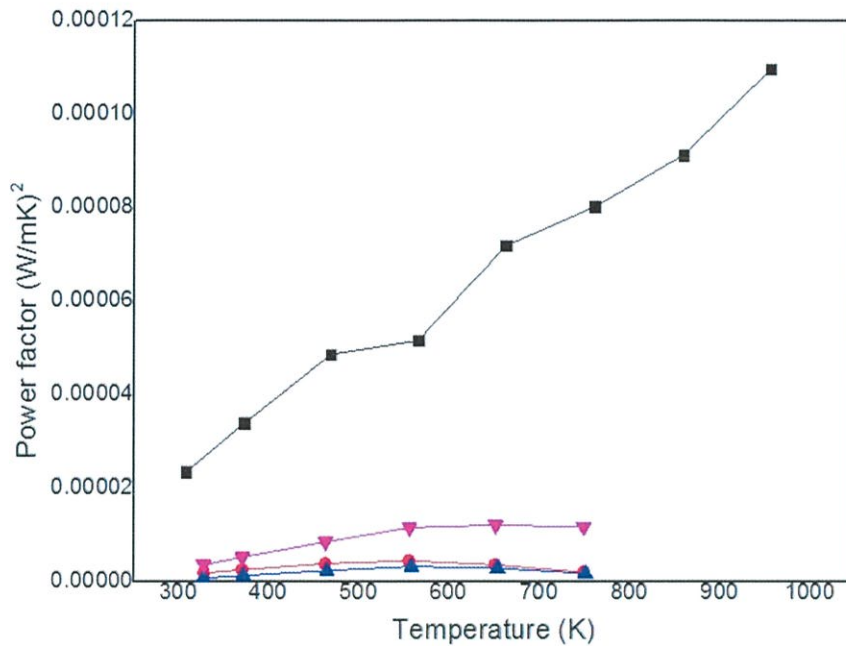
$E_{\text{cond}} \text{ SnCl}_4 = 0.03$ —

$E_{\text{cond}} \text{ SnCl}_4 = 0.05$ —

จากรูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าสภาพนำไฟฟ้า (SnCl_4) กับ อุณหภูมิ จะเห็นว่าในทุกๆ อัตราส่วนจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งจะผันตรงกับกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงอัตราส่วน 0.01 จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

4.3.3 power factor

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ power factor ของ Si

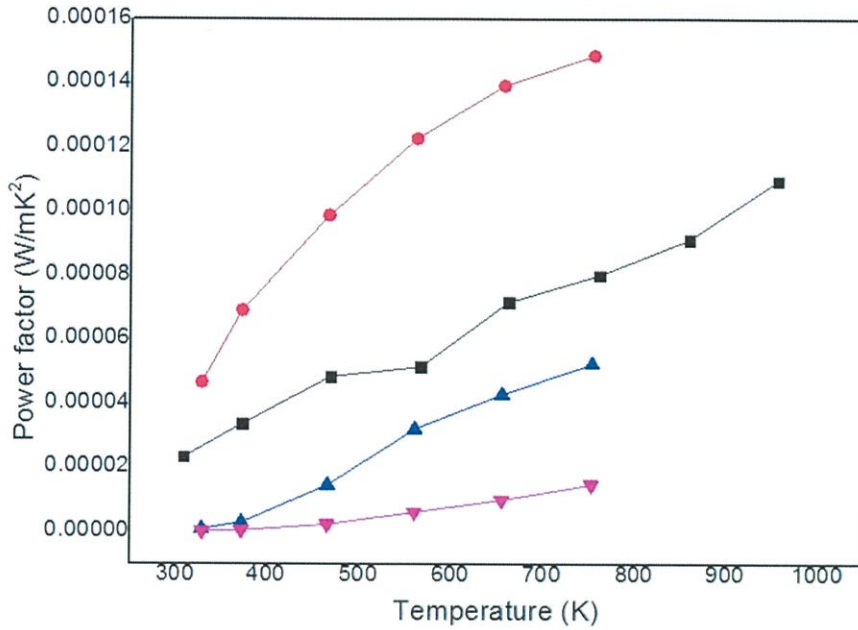


รูป 4.21 ค่า power factor ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า power factor มาตรฐาน

โดย power factor มาตรฐาน ————
 power factor Si = 0.01 ————
 power factor Si = 0.03 ————
 power factor Si = 0.05 ————

จากรูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง power factor กับ อุณหภูมิ จะเห็นว่าในอัตราส่วน 0.05 จะมีค่า power factor ดีที่สุด ต่างจากที่อัตราส่วน 0.01 และ 0.03 ซึ่งจากกราฟนี้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้าที่มีอัตราส่วน 0.05 ดีที่สุดเช่นเดียวกัน จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ $Power\ factor = S^2 \sigma$ และสอดคล้องกับประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริกตามความสัมพันธ์ $ZT = \frac{Power\ factor}{K}$

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ power factor ของ SnCl_4



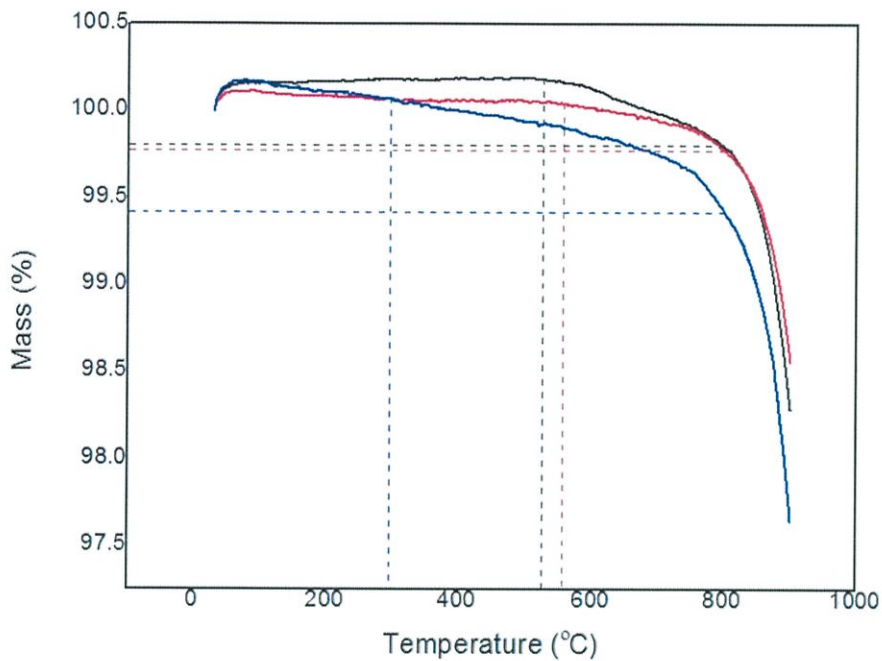
รูป 4.22 ค่า power factor ที่ทดลองเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่า power factor มาตรฐาน

โดย power factor มาตรฐาน —————
 power factor $\text{SnCl}_4 = 0.01$ —————
 power factor $\text{SnCl}_4 = 0.03$ —————
 power factor $\text{SnCl}_4 = 0.05$ —————

จากรูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง poer factoe กับ อุณหภูมิ จะคล้ายคลึงกับ power factor ของ Si แต่ในกราฟนี้จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 0.01 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดและสอดคล้องกับความสัมพันธ์ $\text{power factor} = S^2 \sigma$ กับ ZT เช่นเดียวกันกับของ Si

4.3.4 TGA

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ Mass ของ Si

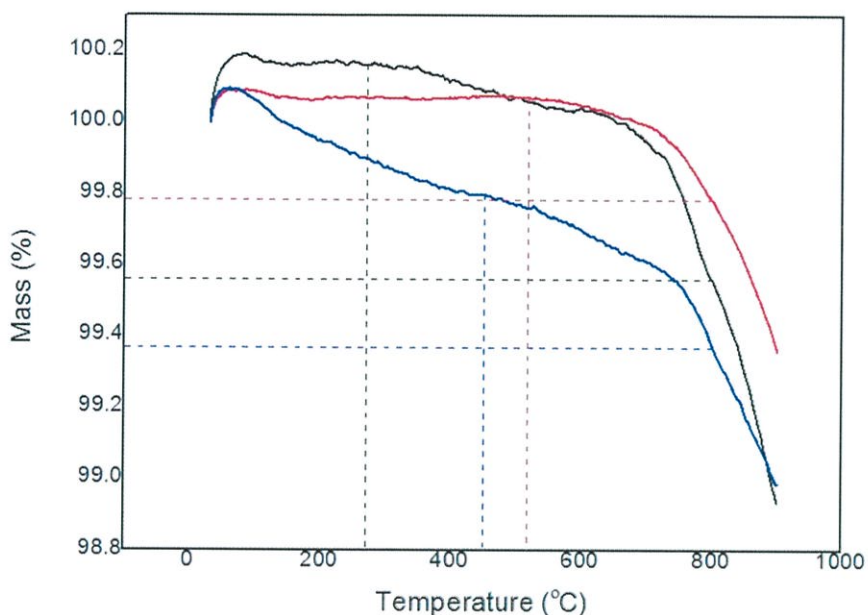


รูป 4.23 ค่า Mass ที่ทดลองเปลี่ยนเทียบกับค่า Mass มาตรฐาน

โดย Mass Si = 0.01 —————
 Mass Si = 0.03 —————
 Mass Si = 0.05 —————

จากรูปที่ 4.23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า TGA และ อุณหภูมิ การที่จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยออกซิเจน ที่อัตราส่วน 0.01 มีอัตราการปลดปล่อย 0.4% และที่อัตราส่วน 0.03 มีอัตราการปลดปล่อย 0.25% และที่อัตราส่วน 0.05 มีอัตราการปลดปล่อย 0.6% พบว่าที่อัตราส่วน 0.05 มีการปลดปล่อยออกซิเจนที่ดีที่สุด ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด ในอัตราส่วนนี้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ Mass ของ SnCl_4



รูป 4.24 ค่า Mass ที่ทดลองเปลี่ยนเทียบกับค่า Mass มาตรฐาน

โดย Mass $\text{SnCl}_4 = 0.01$ —————

Mass $\text{SnCl}_4 = 0.03$ —————

Mass $\text{SnCl}_4 = 0.05$ —————

จากรูปที่ 4.24 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TGA และอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ว่า ที่อัตราส่วน 0.01 มีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจน 0.62% ที่อัตราส่วน 0.03 จะมีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจน 0.3% และที่อัตราส่วน 0.05 มีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจน 0.44% ซึ่งที่อัตราส่วน 0.01 มีอัตราการปลดปล่อยมากที่สุด ทำให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าที่อัตราส่วน 0.03 และ 0.05 ในอัตราส่วน 0.01 ยังสอดคล้องกับค่า สัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพการนำไฟฟ้าอีกเช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปและอภิปรายผล

5.1.1 ชิ้นงาน

ชิ้นงานที่เราทำขึ้นมาจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะเม็ดจะใช้ปริมาตร 1 กรัม ในการนำมาอัดให้อยู่ในลักษณะเม็ด และ ลักษณะแท่งจะใช้ปริมาตร 1.2 กรัม ในการนำมาอัดให้เป็นแท่ง ซึ่งในการทดลองนี้จะทำเพื่อนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ โดยการวัดค่าพารามิเตอร์นั้นมีตัวแปรต้นเป็นความเข้มข้นของสารได้ไปเท่านั้น ดังนั้น ขนาดและรูปร่างของสารจะต้องเท่ากัน ซึ่งจะเป็นตัวแปรควบคุม

5.1.2 XRD

ในการศึกษา การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสารประกอบดีลาฟอสไฟท์ CuFeMO_2 ($M=\text{Si}, \text{Sn}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง จะใช้การโคปสาร 4 อัตราส่วนเพื่อนำมาเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของผลึกมาตรฐานว่าที่อัตราส่วนใดมีค่าใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งในบทที่ 4 จากกราฟที่แสดงค่าเฉลี่ยของ a และ c จะเห็นว่า ค่า c มีค่ามาตรฐานจะอยู่ที่ $17.1243 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$ และค่า a ที่มีค่ามาตรฐานอยู่ที่ $3.0337 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$ ซึ่งค่า a และ c จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของระนาบผลึก

- การโคป Si ค่า c จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดในช่วงอัตราส่วน 0.05 มีค่าเท่ากับ $17.1754 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$ และค่า a ที่มีค่ามากที่สุดในช่วงเดียวกับค่า c คือช่วงอัตราส่วน 0.05 มีค่าเท่ากับ $3.0550 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$
- การโคป SnCl_4 ค่า c จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดในช่วงอัตราส่วน 0.01 มีค่าเท่ากับ $17.097 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$ และค่า a ที่มีค่ามากที่สุดคือช่วงอัตราส่วน 0.01 มีค่าเท่ากับ $3.0255 \text{ (}\text{\AA}\text{)}$
- ค่า a และ c เมื่อนำค่าเฉลี่ยมาคิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแล้วค่าที่วัดได้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้

5.1.3 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์

- สัมประสิทธิ์ซีเบค การวัดผลความสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยการทดลองหาสัมประสิทธิ์ซีเบค โดยเมื่อวัดผลแล้วสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิของ Si และ SnCl_4 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าลดลงตามอุณหภูมิทั้งหมด แต่สำหรับ Si ยิ่งความเข้มข้นมากเท่าไร ก็ยังมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคดีก่าเท่านั้น แต่ SnCl_4 ค่าจะมีการลดลงตามอุณหภูมิลดลงด้วยอัตราส่วนน้อยกว่า มีความคงที่มากกว่า Si แต่ที่ SnCl_4 ความเข้มข้นสูงสุด อัตราการลดลงสัมประสิทธิ์ซีเบคเทียบอุณหภูมิเยอะมากกว่าปกติ

- สภาพนำไฟฟ้า ของ Si มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งเช่นเดียวกับ SnCl_4 แต่มีความแตกต่าง 2 ลักษณะสำคัญ คือ ที่การได้ป Si ยังมีความเข้มข้นสูงเท่าไร ค่าสภาพนำไฟฟ้าก็ยิ่งดีเท่านั้น แต่ที่ SnCl_4 ความเข้มข้นต่ำๆจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งสูงมากขึ้น ความเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าจะผูกพันกับความเข้มข้นของสาร SnCl_4 ที่ Si ค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่าค่ามาตรฐานแต่ที่ SnCl_4 เพิ่มขึ้น 0.01 มีค่าสภาพนำไฟฟ้ามากกว่ามาตรฐาน
- Power Factor เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน(อุณหภูมิ)นำไปสู่กำลังไฟฟ้าที่จะเกิดได้ ซึ่งได้จากการคำนวณค่า $P = S^2\sigma$ จากกราฟจะเห็นว่า Si มีค่า power factor เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งมาตามความเข้มข้นต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ตรงข้ามกับของ SnCl_4 ซึ่งมากที่สุดที่ความเข้มข้นต่ำสุดและมากกว่าค่ามาตรฐาน
- TGA จากการวัดค่าพบว่าอัตราส่วนการปลดปล่อยออกซิเจนของการได้ป Si และ SnCl_4 ว่าที่อัตราส่วนใดที่มีการปลดปล่อยออกซิเจนและนำไฟฟ้าดีที่สุด เมื่อได้ป Si พบว่าที่อัตราส่วน 0.03 มีการปลดปล่อยที่ดีที่สุดคือ 0.6% และเมื่อมีการได้ป SnCl_4 พบว่าที่อัตราส่วน 0.01 มีการปลดปล่อยที่ดีที่สุดคือ 0.62% ซึ่งการปลดปล่อยออกซิเจนออกไปนี้มีผลต่อการนำไฟฟ้า ซึ่งสารตัวอย่างที่เราสังเคราะห์ไม่จำเป็นต้องพึ่งออกซิเจนในการช่วยให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น อด่ในทางกลับกันเมื่อปลดปล่อยออกซิเจนออกไปเยอะก็จะยิ่งเป็นการเพิ่มที่ว่างที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น เป็นผลทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย

5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

5.2.1 ซึ่่งงาน

ในขั้นตอนการอัดสารลงในบด็อกนั้นสารอาจจะมึบงส่วนที่หลุดออกจากบด็อกบ้างและในการเผาซึ่่งงานอาจจะมีการหดตัวลงไปบ้าง ทำให้ซึ่่งงานที่ออกมามึขนาดที่ไม่เท่ากันซึ่่งขนาดอาจจะแตกต่างกันไปเล็กน้อย

5.2.2 XRD

การวัดเพื่อหารูปแบบของโครงสร้างผลึกและขนาดของผลึกภายในสารประกอบจะเห็นได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยระนาบ a และ c จะเห็นว่า SnCl_4 มีค่าเฉลี่ยระนาบใกล้เคียงกับมาตรฐานมากกว่าจึงคาดว่าจะส่งผลดีต่อความสามารถทางกายภาพของthermoelectric ได้

5.2.3 ผลจากพารามิเตอร์

- ที่ SnCl_4 มีส่วนช่วยทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบคมีความคงที่มากขึ้น แต่จะมีอัตราความเข้มข้นของสาร SnCl_4 ระดับหนึ่งเท่านั้น ที่จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ที่มีค่าเป็มาตรฐานเข้าได้ปมากไป อัตราการลดลงของ สัมประสิทธิ์ซีเบคจะเยอะมากและไม่ส่งผลดีเท่าที่ควร

- สภาพการนำไฟฟ้าของ SnCl_4 มีค่าลดลงเมื่อมีการได้ปัสสาร SnCl_4 เข้มข้นมากขึ้นมีผลทำให้สภาพนำไฟฟ้าดีขึ้น แต่จะดีมากที่ความเข้มข้นระดับหนึ่งเท่านั้น ถ้าได้ปัสมากจะไม่ส่งผลดีเช่นเดียวกัน
- power factor มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิมีจุดนำสังเกตที่ค่า power factor มีแนวโน้มไปทางเดียวกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าอย่างเด่นชัด ซึ่งที่เยอะที่สุดมีค่า SnCl_4 มีความเข้มข้นค่าหนึ่งๆ เท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=organic-d&month=13-07-2011&group=3&gblog=1>
- [2] http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php
- [3] <http://www.gotoknow.org/posts/443859>
- [4] <http://www.oknation.net/blog/DoSEM/2012/12/21/entry-1>
- [5] http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569
- [6] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/thermal-analysis-instrument-menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html>
- [7] http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electromagnetism/sub_lesson/5_6.htm
- [8] <http://th.wikipedia.org/wiki/ความต้านทานไฟฟ้า>
- [9] http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=906
- [10] <http://www.vcharkarn.com/vblog/36108>
- [11] http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/TN%20214A_p62-65.pdf
- [12] Visser, J.. TechnischPhysischeDienst, Delft,Nethherlands, ICDD Grant-in Aid, (1978)
- [13] Keskar, N.R..Chelikowsky, J.R.. Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 1 (1992)
- [14] หนังสือเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกของสาขาวิชาฟิสิกส์ม.ราชภัฏสกลนคร
- [15]<http://www.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Fwww.sci.rmutsb.ac.th%2F2009%2Fimages%2Fmain%2Fload%2FThermo%2520Electric.pdf&h=0AQFfjBZx>
- [16] <http://www.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Fwww.ulvac.com%2Fvacuum-pumpscomponents%2Fsystem.cfm%3Fcid%3D48%26scid%3D82%26sid%3D56&h=0AQFfjBZx>

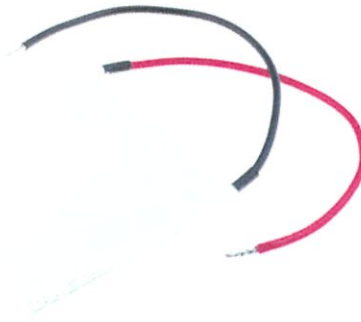
ภาคผนวก

ก. เทอร์โมอิเล็กทริกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า
เพลเทียร์ (Peltier)

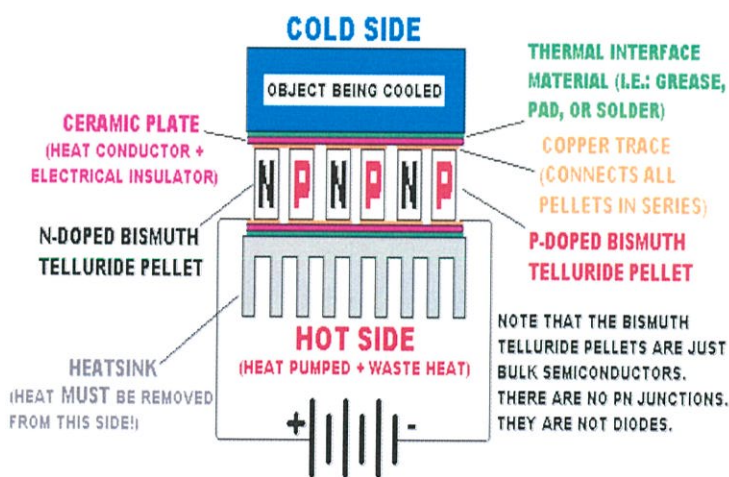
ก. เทอร์โมอิเล็กทริกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเพลเทียร์ (Peltier)

เป็นอุปกรณ์ทางเลือกหนึ่งสำหรับทำความเย็น หลักการทำงานของเพลเทียร์ คือ เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเพลเทียร์ที่สารกึ่งตัวนำแบบ พี-เอ็น (P-N type) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ทำให้เกิดการดูดกลืนของของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากพลังงานระดับต่ำในสารกึ่งตัวนำแบบพีสู่พลังงานระดับสูงในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนความร้อนที่ด้านเย็น (Heat absorbed at cold side) และในขณะเดียวกันก็เกิดการดูดกลืนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากพลังงานระดับสูงในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น สู่พลังงานระดับต่ำในสารกึ่งตัวนำแบบพี ส่งผลให้เกิดการคายความร้อนที่ด้านร้อนขึ้น ประวัติความเป็นมาของการค้นพบปฏิกิริยา Peltier ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เพลเทียร์เอฟเฟกต์ (Peltiereffect) ได้ถูกค้นพบมากกว่า 176 ปีแล้ว โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส 2 คนที่ชื่อ เฟรนซ์ วัตซ์เมคเกอร์ (French Watchmaker) และจีน ชาร์เลส เอธานัสซี เพลเทียร์ (Jean Char Athanase Peltier) เมื่อปี ค.ศ. 1834 พบว่า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสองด้านจะกลายเป็นผิวร้อน (hot surface) และผิวเย็น (cold surface) ขึ้นกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltiereffect) ในทางกลับกัน ถ้าถ่ายเทความร้อนให้กับผิวด้านหนึ่งจะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า ซีเบ็คโวลต์เตจ (Seebeck Voltage) สารกึ่งตัวนำดังกล่าวเรียกว่า P-n junction โดยที่การผลิตกระแสไฟฟ้าจะต่อแบบอนุกรม การทำความเย็นจะต่อแบบขนานเป็นแบบเซนวิช ระหว่างแผ่นฉนวนเซรามิกมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์ซึ่งจัดเป็นปั๊มความร้อน (Heat Pump) เรียกว่าเทอร์โมอิเล็กทริก เพลเทียร์มีชีวิตอยู่ในช่วงปี ค.ศ.1785-1845 ความสำเร็จจากการค้นพบปรากฏการณ์เพลเทียร์เอการทดลองของโรมัส โจแอน ซีเบ็ค (Thomas Johann Seebeck) ซึ่งเขาได้แสดงผลการทดลองค้นคว้าของเขาที่เรียกว่า ซีเบ็คเอฟเฟกต์ (Seebeck Effect) หลักการของซีเบ็ค เป็นหลักการทางไฟฟ้า โดยซีเบ็ค นำเอาสายไฟ 3 ชิ้น ที่ทำมาจากโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิดมาต่อเป็นวงจรโดยการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 1 เมื่อนำเอาลวดต่างชนิด(ชนิด B) มาต่อเข้าระหว่างลวดชนิดเดียวกัน(ชนิด A) ทำให้เกิดจังก์ชันระหว่างลวดทั้งคู่จังก์ชันที่ว่านี้ คือนจังก์ชัน A และจังก์ชัน B เมื่อเริ่มให้ความร้อนกับจังก์ชันด้านหนึ่ง และพบว่ามีการแสไฟฟ้า เล็ก ๆ ไหลได้เมื่อต่อครบวงจร ซึ่งในที่นี้ใช้การแสดงผลของมิเตอร์วัดกระแสเป็นค่าหน่วยไมโครแอมป์ต่อเป็นโวลต์ในวงจร โครสร้างและหลักการทำงานของเพลเทียร์ (Peltier) โครสร้างเบื้องต้นของอุปกรณ์เพลเทียร์ ประกอบด้วยสารชนิดเอ็น (N-type)และ(P-type) ของบิสมัท เทลลูไรด์ (สร้างมาจากสารผสมบิสมัท (Bi) กับเทลลูเรียม (Te) วางลงบนฐานรองเซรามิก) ที่สร้างเป็นรูปลูกเต๋าเล็ก ๆ จำนวนมาก แล้วนำเอาแผ่นเซรามิกมาประกบไว้ทั้งสองด้าน ในขณะที่สารพีและเอ็นซึ่งทำเป็นเนื้ออัลลอยส์ ระหว่างบิสมัท (Bismuth) และเทลลูเรียม (Tellurium) ทั้งสองมีความต่างในความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิเท่ากัน

ลูกเต๋าด้านพี เป็นโลหะที่มีอิเล็กตรอนไม่พอเพียง (Deficiency of electrons) ในขณะที่ลูกเต๋าด้านเอ็น เป็นโลหะที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมากจนเหลือเฟือ (Excess of electrons)



เมื่อกระแสไหลผ่านตัวโมดูล มันจะพยายามสร้างคุณภาพ (Attempts to establish) ขึ้นในมวลภายในกระแสที่กระทำกับสารชนิดพี ทำให้จั้งชั้นเกิดความร้อนขึ้น ต้องการทำให้เกิดความเย็นและสารชนิดเอ็นเกิดความร้อนขึ้น ต้องการทำให้เกิดความร้อน ทั้งนี้เพื่อดำรงคุณภาพตัวเองไว้ให้ได้ เมื่ออุปกรณ์นี้ทำงานในระดับอุณหภูมิต่างกัน ทำให้ด้านที่เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น และด้านที่เกิดความเย็น มีความเย็นมากขึ้น โดยทั่วไป เพลเทียร์ทำงานด้วยกระแส 4-10 แอมป์ ที่แรงดันไฟ 12 โวลต์ แต่ในการผลิตเพื่องานอุตสาหกรรม ผลิตเพลเทียร์ให้ทำงานด้วยกระแส 100 แอมป์หรือมากกว่านี้



ข. EPMA (อี พี เอ็ม เอ)

electron probe microanalyzer

ข. EPMA (อี พี เอ็ม เอ) electron probe microanalyzer

เครื่อง EPMA จะเหมือนเป็นการรวมเครื่อง SEM/FE-SEM เข้ากับ WDX/EDS ให้เป็นเครื่องเดียว ผ่านชุดควบคุมการทำงานชุดเดียวกัน จะต่างกับการใช้ WDX/WDS ที่ติดตั้งกับเครื่อง SEM, เมื่อมาเป็นเครื่อง EPMA มันก็ต้องมีการพัฒนาที่ดีกว่าแน่นอนโดยทั่วไปชุดควบคุมการทำงานหรือ PC ระบบปฏิบัติการจะเป็น UNIX/Windows ที่สามารถรองรับการทำงานแบบ multitasking และระบบเลนส์ก็จะแตกต่าง SEM พอสมควร Probe ของ EPMA จะใหญ่กว่า SEM filament จะเป็นชนิดเดียวกันกับเครื่อง SEM แต่ใช้กับเครื่อง SEM จะสามารถใช้งานได้ 40-80 ชั่วโมง แต่พอมาใช้กับเครื่อง EPMA อายุของ Filament แบบเดียวกันแต่ใช้ได้ 400-800 ชั่วโมง ต่างกัน 10 เท่าเลยทีเดียว สาเหตุเพราะการออกแบบระบบเลนส์และระบบไฟ, กระแสที่จ่ายให้ Filament แตกต่างกัน Load current ของ EPMA จะอยู่ที่ 15-20 uA แต่ Load current ของ SEM จะอยู่ที่ 50-60 uA โดยที่ Acc. 15-20kv เท่ากัน

ข้อดีของเครื่อง EPMA

- สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ที่ให้ผลละเอียดกว่า EDS/EDX และ WDX/WDX
- สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ B โบรอน -U ยูเรเนียม **Be
- สเปกตรัมเกิด Peak overlap น้อยมาก
- สเปกตรัมพีคค่อนข้างแคบ (Resolution 10 ev.)
- สามารถวิเคราะห์ธาตุ ที่มีปริมาณธาตุตั้งแต่ 0.01 wt% ขึ้นไป
- สามารถวิเคราะห์ธาตุแบบ Overnight ได้, Run ตัวอย่างเย็นเก็บผลเข้าได้
- ตัวอย่าง burn น้อยกว่าการใช้ WDX/WDX มาก
- Spectro สามารถทำงานพร้อมกันหลายแชนแนล (5 CH.)
- สามารถวิเคราะห์ธาตุ ที่ระดับผิวได้ดีขึ้นกว่าการใช้ WDX/WDX

ข้อเสียของเครื่อง EPMA

- วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ช้ากว่า EDS/EDX มาก
- วิเคราะห์แบบ Mapping และ Linescan ได้ช้ากว่า EDS/EDX มาก
- เครื่องราคาแพงกว่า WDX/WDX ประมาณ 6-10 เท่าขึ้นอยู่กับ option (25-40 ล้านบาท)
- ค่าบำรุงรักษาเครื่องแพง
- End User จะไม่สามารถ Calibrate ได้เอง หรือทำได้ค่อนข้างยากไม่สะดวก

ก. Ball Mill

ค. Ball Mill

ใช้สำหรับบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดนั้นสามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้เป็นสองประเภทคือ แบบ Batch Mill และแบบ Continuous Mill

-Batch mill เป็นการบดโดยใช้ Ball mill โดยการเติมวัตถุ และ Medium เช่น น้ำ, อัลกอกฮอล, โพลีเอธิลีน และ Additive ต่าง ๆ เช่น ตัวช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant) ลงไปใน Ball Mill แล้วทำการปิดฝา Ball Mill และจึงเริ่มดำเนินการบด จนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการ จึงทำการถ่ายน้ำสลิป ออกมา ซึ่งเป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การบดแบบ Batch Mill นี้ สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ คุณภาพของน้ำสลิป หรือสีเคลือบที่สม่ำเสมอในแต่ละ batch, ต้นทุนในการผลิตและ ประสิทธิภาพในการบด การบดโดยใช้ Batch Mill นั้น สามารถบดได้ทั้งแบบแห้ง และแบบเปียก โดยวัตถุดิบที่ต้องการบดนั้น สามารถบดแยกส่วนระหว่างพวกวัตถุดิบที่มีความแข็งมาก (Hard Material) อย่างเดียว โดยมีการเติมดินลงไปบางส่วน เพื่อช่วยในการกระจายลอยตัว แล้วจึงนำสลิปที่ได้ไปผสมรวมกันกับพวกวัตถุดิบที่ไม่แข็ง แต่มีการจับตัวกันอย่างอ่อนๆ (Soft Material) ในการบดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีปัจจัยที่จะต้องควบคุมดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด
2. ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่เติมลงในหม้อบด
3. ชนิดของลูกบด (Type of Grinding Media)
4. ชนิดของตัวกรูหม้อบด (Liner)
5. ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)
6. ปริมาณของวัตถุดิบที่เติมและปริมาณของ Medium ที่เติม
7. ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ และความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ
8. ความละเอียดของวัตถุดิบ
9. ความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) ของน้ำดินหรือสีเคลือบ
10. ปริมาณการเติม Deflocculant และชนิดของ Deflocculant
11. วิธีการเติมวัตถุดิบและตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ (Additive)

ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด

การเลือกใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ กันนั้น ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เราจะบด ถ้าเป็นเนื้อดินของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเน้นเรื่องความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์มากนัก เช่น เนื้อของกระเบื้องปูพื้น, บุผนัง, เนื้อดินสโตนแวร์, เนื้อดินกระเบื้องหลังคา เราอาจเลือกใช้ลูกบดที่มีมลทิน (Impurities) ปนอยู่ในเนื้อของลูกบดได้ราคาของลูกบดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากบางโรงงานยังมีเงินลงทุนที่ไม่สูงนักจึงมักเลือกใช้ลูกบดที่มีราคาไม่สูงนักมาใช้งาน รวมทั้งประสิทธิภาพในการบดของลูกบดแต่ละชนิดด้วย แต่ถ้าได้มีการคำนวณเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบดของลูกบดที่มีค่าความหนาแน่นสูงเช่น

ลูกบดเนื้อลูมิน่าแล้ว เราอาจจะลดงบประมาณการลงทุนรวมลงไปได้เนื่องจากประสิทธิภาพในการบดที่สูงขึ้นทำให้ลดชั่วโมงบดลงไปได้มาก ซึ่งเราอาจพบว่าเราไม่จำเป็นต้องติดตั้งหม้อบด (ซึ่งมีราคาสูงกว่าราคาลูกบดมาก) เท่ากับตอนที่ศึกษาโครงการในการสร้างโรงงาน แต่สามารถผลิตน้ำดินหรือสีเคลือบได้เช่นกัน ซึ่งจะทำให้งบประมาณการลงทุนลดลงได้

ชนิดของลูกบด	ส่วนประกอบ	ความถ่วงจำเพาะ	ประสิทธิภาพในการบด	ราคา	% การสึกหรอ
Flint/Pebble Stone	SiO ₂	2.5 - 2.6	ปานกลางถึงต่ำ	ถูก	สูง
Porcelain	Al ₂ O ₃ , SiO ₂	2.3 - 2.6	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
Steatite	SiO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃	2.6 - 2.8	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Alumina	Al ₂ O ₃	3.5 - 3.7	สูง	สูง	น้อย
Zirconia	ZrO ₂	5.8 - 6.0	สูงมาก	สูงมาก	ต่ำ

โดยปกติแล้วลูกบดชนิด Flint หรือ Pebble Stone ซึ่งเป็นหินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ตามชายหาด, แม่น้ำ จะใช้สำหรับการบดเนื้อดินที่ไม่ต้องการความขาวมากนัก เพราะลูกบดที่เป็น Pebble จะมีมลทินของเหล็กอยู่เป็นจำนวนมากพอสมควร ราคาของลูกบดชนิดนี้จะไม่แพงมากนัก เมื่อเทียบกับลูกบดชนิดอื่น ๆ เมื่อบดไปเรื่อย ๆ ลูกบดก็จะสึกกร่อนไป ซึ่งสิ่งที่สึกออกมาก็คือ ตัว SiO₂ ซึ่งก็สามารถปนไปกับเนื้อดินได้เลย ไม่ถือว่าเป็นมลทิน หรือสิ่งแปลกปลอมอื่นใด เราเรียกการบดโดยใช้ลูกบดที่มีเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่เราจะบดว่า Autogenous Milling

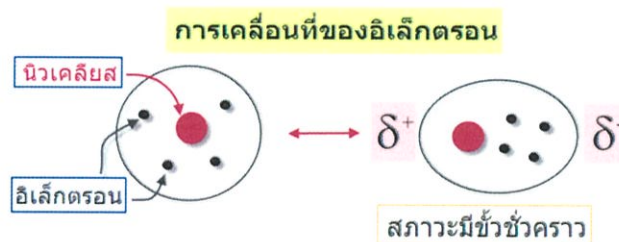
ลูกบดชนิดเนื้อ Porcelain จะมีราคาสูงกว่า Pebble Stone แต่ถ้าเทียบกับลูกบดลูมิน่าแล้ว ก็ยังมีราคาต่ำกว่าอยู่มาก ลูกบด Porcelain มีประสิทธิภาพในการบดที่ดีกว่า Pebble Stone และมีมลทินปนลงไปในตัวน้อยกว่าด้วย การสึกหรอของลูกบดแบบ Porcelain ยังสูงกว่าลูกบดลูมิน่าอยู่มาก สำหรับลูกบดเนื้อ Steatite นั้นจะมีราคาสูงกว่าเนื้อ Porcelain แต่ประสิทธิภาพในการบดจะดีกว่าเล็กน้อย การสึกหรอจะต่ำกว่าเนื้อ Porcelain เนื่องจากกระบวนการผลิตที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า (Porcelain เผาที่ 1250-1300 °C Steatite เผาที่ 1350 °C) เนื้อของลูกบดจะมีความแข็งกว่า มีความหนาแน่นสูงกว่า มีรูปร่างทรงกลมที่แน่นอนเนื่องจากใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดด้วยแรงดันสูง ข้อดีอีกอย่างของการใช้ลูกบดเนื้อ Steatite คือในการบดจะมีอุณหภูมิของน้ำสลิบต่ำกว่า Alumina ในระหว่างการบด

ง. แรงแวนเดอร์วาลส์
(Van der Waals Force)

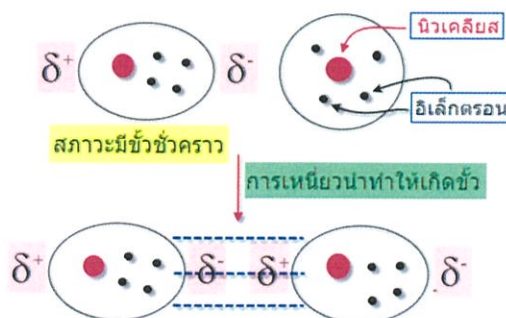
ง. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force)

จัดเป็นแรงระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจน(Hydrogen bonding)ซึ่งแบ่งเป็นสามประเภทคือ แรงลอนดอน(London dispersion forces) แรงขั้วขั้ว(Dipole-dipole forces)และแรงขั้วไอออนกับขั้ว(Ion-dipole forces)

-แรงลอนดอน (London dispersion force) จัดเป็นแรงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดในชนิดของแรงแวนเดอร์วาลส์ จึงต้องการพลังงานในการสลายพันธะหรือแรงระหว่างโมเลกุลน้อยมาก โมเลกุลที่ยึดจับกันด้วยแรงชนิดนี้มีจุดเดือด และจุดหลอมเหลวต่ำมาก โดยปกติโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะประพฤติตัวเป็นกลางในบางครั้งอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอะตอมหรือโมเลกุลทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้น ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมกันจะเกิดสภาพที่เป็นประจุลบ (δ^-) และตำแหน่งที่ไม่มีอิเล็กตรอนจะเกิดสภาพประจุที่เป็นบวก (δ^+)



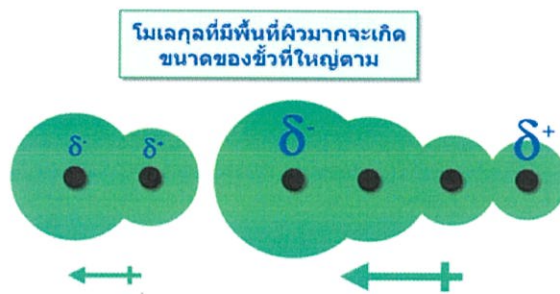
โมเลกุลที่มีสภาพขั้วแบบชั่วคราวสามารถเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลในสภาวะปกติมีสภาพขั้วโดยที่ตำแหน่งที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมีประจุเป็นลบจะไปผลักอิเล็กตรอนของอีกโมเลกุลให้ไปอยู่ด้านตรงข้ามทำให้เกิดอีกโมเลกุลมีสภาพขั้วชั่วคราวอีกโมเลกุล ทำให้โมเลกุลทั้งสองมีประจุบวกและลบเรียกว่า Polarizability และเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและลบ ซึ่งแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เราเรียกว่าแรง ลอนดอน (London dispersion force)



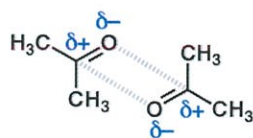
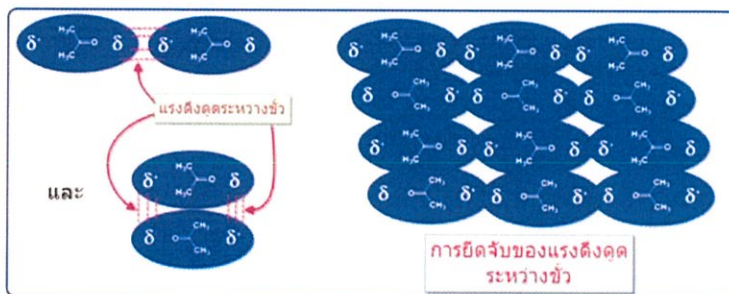
แรงที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของโมเลกุลทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้นและไม่สามารถเกิดขึ้นแบบถาวรจึงมีความแข็งแรงจึงน้อยมากพบว่าเมื่อโมเลกุลหรืออะตอมมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีความสามารถทำให้เกิดขั้ว(Polarizability) ได้ง่าย เนื่องจากเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งดังรูปพบว่าในกรณีโมเลกุลขนาดใหญ่จะ

มีความแตกต่างระหว่างขั้วมากกว่าจึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่มากกว่าเช่นกัน ดังตัวอย่าง Cl_2 และ Br_2 พบว่า Br_2 มีขนาดใหญ่กว่าจึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากกว่าทำให้จุดเดือดและจุดหลอมเหลวมากกว่า Cl_2

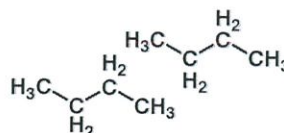
พื้นที่ผิวของโมเลกุล : โมเลกุลที่มีพื้นที่ผิวมากจะทำให้ขนาดของประจุมีขนาดใหญ่ตาม เมื่อเปรียบเทียบสถานะของ Neopentane และ n-Pentane พบว่าที่อุณหภูมิห้อง Neopentane มีสมบัติเป็นก๊าซ แต่ n-Pentane เป็นของเหลว แสดงว่า n-Pentane มีแรงระหว่างโมเลกุลมากกว่า Neopentane ทั้งนี้เป็นเพราะ n-Pentane มีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้ประจุที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ แรงระหว่างพันธะจึงมากตามไปด้วย



แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole forces) จัดเป็นแรงที่เกิดจากขั้วถาวรดึงดูดกันเองระหว่างขั้วบวกและขั้วลบซึ่งดึงดูดได้สองแบบดังตัวอย่าง



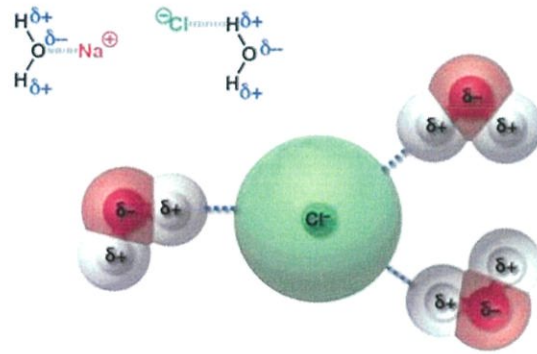
propanone
acetone
Mol Wt. 58; bp 56°C
permanent dipole



butane
Mol Wt. 58; bp -0.6°C
no dipole
London force

การเปรียบเทียบระหว่างแรงระหว่างขั้ว และแรงลอนดอน

เมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างแรงดึงดูดระหว่างขั้ว(Dipole-dipole forces) กับ แรงลอนดอน (London dispersion forces) โดยที่โมเลกุลมีขนาดพอๆกัน พบว่าแรงดึงดูดระหว่างขั้วมีความแข็งแรงมากกว่าดังตัวอย่างของ อะซิโตน มีจุดเดือดเท่ากับ 56 °C กับ Butane มีจุดเดือดเท่ากับ -0.6 °C (พิจารณาจากสารประกอบที่มีจุดเดือดสูงกว่าต้องมีแรงระหว่างโมเลกุลมากกว่า)แรงดึงดูดระหว่างไอออนกับขั้ว(Ion-dipole forces) เป็นแรงที่เกิดจากไอออนกับสารประกอบที่มีขั้วจัดเป็นแรงที่มีความแข็งแรงมากกว่าแรงระหว่างขั้ว(Dipole-dipole forces) เช่นการละลายของ NaCl ใน น้ำ Na^+ ที่มีประจุเป็นบวกจะเกิดแรงดึงดูดกับออกซิเจนซัของน้ำ และ Cl^- จะเกิดแรงดึงดูดกับ H ของน้ำเช่นกัน ดังตัวอย่าง



จ. การคำนวณค่า a และ c

การคำนวณค่าระนาบจาก x-ray Diffraction

ที่ 0.01

กำหนดให้ $n = 1$, $\lambda = 1.54056 \times 10^{-10}$

Peak 1 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$ ----- (1); $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(15.6208)} = 2.8606 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ

จะได้ว่า

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \text{-----} (2)$$

$$\frac{1}{(2.8606 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{0^2 + 0 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{6^2}{c^2} \frac{1}{(2.8606 \times 10^{-10})^2} = \frac{6^2}{c^2}$$

$$c^2 = 6^2 \cdot (2.8606 \times 10^{-10})^2 = 2.9459 \times 10^{-18}; c = \sqrt{2.9459 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.716 \times 10^{-9}$$

Peak 2 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(17.2556)} = 2.5967 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \text{-----} (2)$$

แทนค่า $c^2 = 2.9459 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2 + 1 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{1^2}{2.9459 \times 10^{-18}}$$

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} - \frac{1^2}{2.9459 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4491 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4491 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.2011 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.2011 \times 10^{-20}} = 3.0333 \times 10^{-10}$$

เอา $a^2 = 9.2011 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{l^2}{9.2011 \times 10^{-20}} \right] + \frac{l^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.5967 \times 10^{-10})^2} - 1.4491 \times 10^{19} = \frac{l^2}{c^2}$$

$$3.3958 \times 10^{17} = \frac{l^2}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{l^2}{3.3958 \times 10^{17}} = 2.9453 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{2.9453 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7162 \times 10^{-9}$$

Peak 3 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(17.8510)} = 2.5128 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ -----(2)

ใช้ค่า c^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\frac{1}{c^2} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i^2}{n}$

ซึ่งจะได้ค่า $c^2 = 2.9456 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า $\frac{1}{(2.5128 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{0^2 + 0 \cdot 1 + 1^2}{a^2} \right] + \frac{2^2}{2.9456 \times 10^{-18}}$

$$\frac{1}{(2.5128 \times 10^{-10})^2} - \frac{2^2}{2.9456 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4479 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4479 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.2087 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.2087 \times 10^{-20}} = 3.0346 \times 10^{-10}$$

ใช้ค่า a^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{a^2} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n}$

เอา $a^2 = 9.2049 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.5128 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2}{9.2049 \times 10^{-20}} \right] + \frac{2^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.5128 \times 10^{-10})^2} - 1.4485 \times 10^{19} = \frac{4}{c^2}$$

$$1.3524 \times 10^{18} = \frac{4}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{4}{1.3524 \times 10^{18}} = 2.9577 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{2.9577 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7198 \times 10^{-9}$$

Peak 4 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(20.1134)} = 2.2400 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ -----(2)

ใช้ค่า c^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{c^2} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i^2}{n}$

ซึ่งจะได้ค่า $c^2 = 2.9496 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า
$$\frac{1}{(2.2400 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2 + 1 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{4^2}{2.9496 \times 10^{-18}}$$

$$\frac{1}{(2.2400 \times 10^{-10})^2} - \frac{16}{2.9496 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4505 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4505 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.192 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.192 \times 10^{-20}} = 3.0319 \times 10^{-10}$$

ใช้ค่า a^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{a^2} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n}$

เอา $a^2 = 9.2007 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.2400 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2}{9.2007 \times 10^{-20}} \right] + \frac{4^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.2400 \times 10^{-10})^2} - 1.4492 \times 10^{19} = \frac{16}{c^2}$$

$$5.4378 \times 10^{18} = \frac{16}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{16}{5.4378 \times 10^{18}} = 2.9424 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{2.9424 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7153 \times 10^{-9}$$

Peak 5 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(21.5771)} = 2.0946 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ -----(2)

ใช้ค่า c^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{c^2} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i^2}{n}$

ซึ่งจะได้ค่า $c^2 = 2.9478 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า $\frac{1}{(2.0946 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{0^2 + 0 \cdot 1 + 1^2}{a^2} \right] + \frac{5^2}{2.9478 \times 10^{-18}}$

$$\frac{1}{(2.0946 \times 10^{-10})^2} - \frac{25}{2.9478 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4312 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4312 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.3162 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.3162 \times 10^{-20}} = 3.0522 \times 10^{-10}$$

ใช้ค่า a^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{a^2} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n}$

เอา $a^2 = 9.2296 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(2.0946 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2}{9.2296 \times 10^{-20}} \right] + \frac{5^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(2.0946 \times 10^{-10})^2} - 1.4446 \times 10^{19} = \frac{25}{c^2}$$

$$8.3468 \times 10^{18} = \frac{25}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{25}{8.3468 \times 10^{18}} = 2.9952 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{2.9952 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7307 \times 10^{-9}$$

Peak 6 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(27.6330)} = 1.6608 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ -----(2)

ใช้ค่า c^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{c^2} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i^2}{n}$

ซึ่งจะได้ค่า $c^2 = 2.9573 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า $\frac{1}{(1.6608 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{0^2 + 0 \cdot 1 + 1^2}{a^2} \right] + \frac{8^2}{2.9573 \times 10^{-18}}$

$$\frac{1}{(1.6608 \times 10^{-10})^2} - \frac{64}{2.9573 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.4613 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.4613 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 9.1243 \times 10^{-20}$$

$$a = \sqrt{9.1243 \times 10^{-20}} = 3.0206 \times 10^{-10}$$

ใช้ค่า a^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{a^2} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n}$

เอา $a^2 = 9.2085 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(1.6608 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{l^2}{9.2085 \times 10^{-20}} \right] + \frac{8^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(1.6608 \times 10^{-10})^2} - 1.4479 \times 10^{19} = \frac{64}{c^2}$$

$$2.1776 \times 10^{19} = \frac{64}{c^2}$$

$$c^2 = \frac{64}{2.1776 \times 10^{19}} = 2.9390 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{2.9390 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7143 \times 10^{-9}$$

Peak 7 $d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$ ----- (1); $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2 \sin(30.5335)} = 1.5162 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ ----- (2)

จะได้ว่า $\frac{1}{(1.5162 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{l^2 + 1 \cdot 1 + l^2}{a^2} \right] + \frac{0^2}{c^2}$

$$\frac{1}{(1.5162 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{3}{a^2} \right]$$

$$a^2 = 4 \cdot (1.5162 \times 10^{-10})^2 = 9.1954 \times 10^{-20}; a = \sqrt{9.1954 \times 10^{-20}}$$

$$a = 3.0324 \times 10^{-10}$$

Peak 8 $d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta}$; $d = \frac{(1) \cdot (1.54056 \times 10^{-10})}{2\sin(30.9807)} = 1.4964 \times 10^{-10}$

หาค่าพารามิเตอร์ a, c จากสมการ $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$ -----(2)

ใช้ค่า c^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{c^2} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i^2}{n}$

ซึ่งจะได้ค่า $c^2 = 2.9543 \times 10^{-18}$ จาก Peak 1 แทนลงในสมการ

จะได้ว่า $\frac{1}{(1.4964 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2 + 1 \cdot 0 + 0^2}{a^2} \right] + \frac{10^2}{2.9543 \times 10^{-18}}$

$$\frac{1}{(1.4964 \times 10^{-10})^2} - \frac{100}{2.9543 \times 10^{-18}} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$1.0810 \times 10^{19} = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{a^2} \right]$$

$$a^2 = \frac{4}{3} \left[\frac{1}{1.0810 \times 10^{19}} \right]$$

$$a^2 = 1.2334 \times 10^{-19}$$

$$a = \sqrt{1.2334 \times 10^{-19}} = 3.5120 \times 10^{-10}$$

ใช้ค่า a^2 จากค่าเฉลี่ย Peak ก่อนหน้านี้ จากสมการ $\overline{a^2} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n}$

เอา $a^2 = 9.6526 \times 10^{-20}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการ(2) จะได้ว่า

$$\frac{1}{(1.4964 \times 10^{-10})^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{1^2}{9.6526 \times 10^{-20}} \right] + \frac{10^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{(1.4964 \times 10^{-10})^2} - 1.3813 \times 10^{19} = \frac{100}{c^2}$$

$$3.0846 \times 10^{19} = \frac{100}{c^2}$$

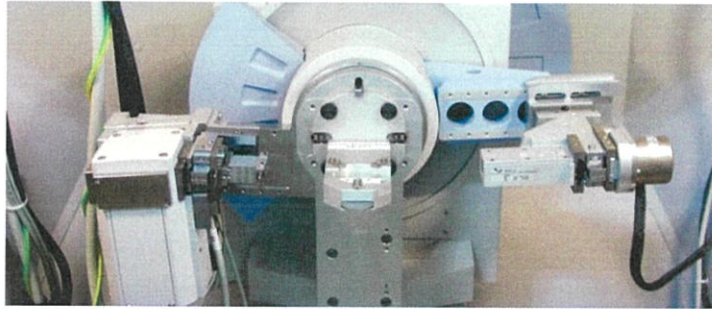
$$c^2 = \frac{100}{3.0846 \times 10^{19}} = 3.2149 \times 10^{-18}$$

$$c = \sqrt{3.2149 \times 10^{-18}}$$

$$c = 1.7930 \times 10^{-9}$$

น. เครื่องวัดค่า XRD

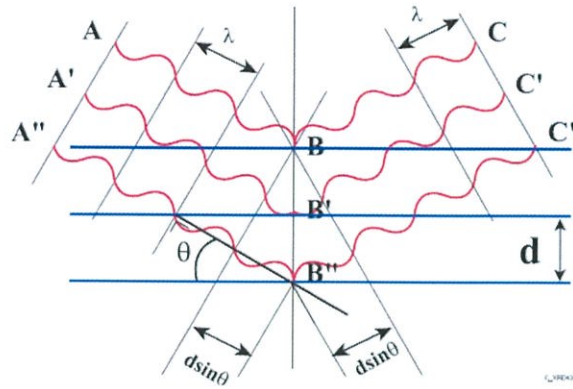
ฉ.เครื่องวัดค่า XRD



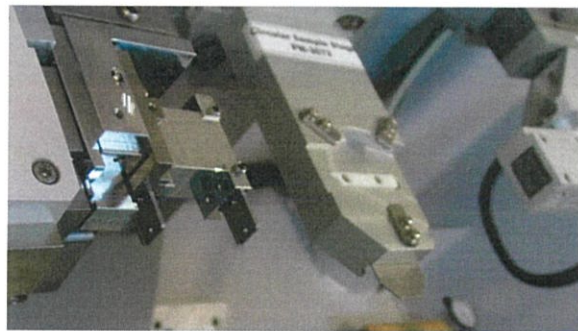
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วย



เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยการใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน



เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมียขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาวไม่เกิน 10cm ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10mm เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่าง มีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบ ในกรณีที่ต้องการทดสอบ ThinFilm เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มที่เตรียมต้องอยู่ระหว่าง 10nm - 100nm ต่ำกว่า 10nm ผลการทดสอบจะ Error มาก และหากหนาเกิน 100nm จะไม่สามารถคำนวณความหนาได้

ช. เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

และ

สภาพต้านทานไฟฟ้า

ช.เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และสภาพต้านทานไฟฟ้า



ZEM-3 MODELS, SEEBECK COEFFICIENT / ELECTRIC RESISTANCE MEASURING SYSTEM

The ZEM-3 models are systems that collect easy-to-use high precision measuring technologies based on the requests of domestic and international academic societies and our customers. Conforms to JIS standards for Seebeck coefficient measuring systems for thermoelectric materials. Thermoelectric power JIS R 1650-1 Electric resistance JIS R 1650-2

Applications

- Thermoelectric characteristics evaluation of a wide range of materials such as semiconductors, ceramics, and metals.

Features

- Employs an Infrared Gold Image Heating Furnace with excellent temperature controllability and a microheater for temperature difference control. Measurements are computer controlled and performed per temperature difference at the specified temperatures which eliminates dark electromotive force and allows automatic measurements. Ohmic contact auto check function (V-I plot) is standard equipment.