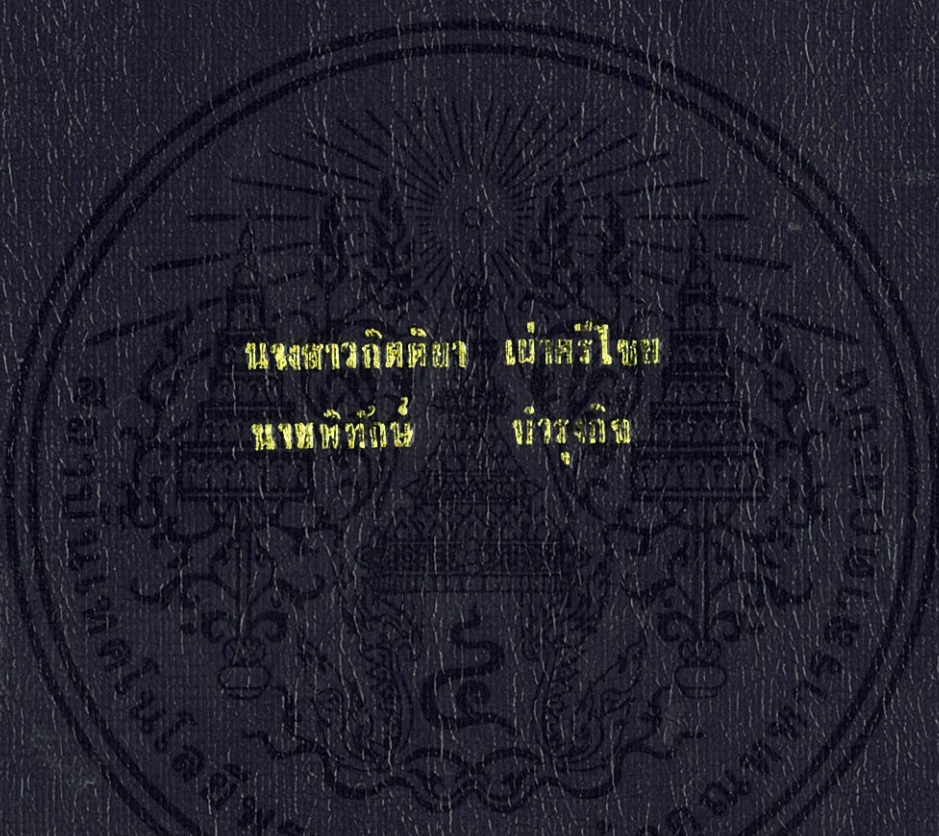


การปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของ $\beta\text{-FeSi}_2$ โดยปฏิกิริยาของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ
THE IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF $\beta\text{-FeSi}_2$ BY LOW TEMPERATURE SOLID STATE REACTION



นางสาวกิตติมา เพ็ชรไชย
นางพิชญ์
นางรุ่งกาน

โครงการพิเศษเห็นส่วนหนึ่งของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

การปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ β -FeSi₂ โดยปฏิกิริยาของแข็ง
ที่อุณหภูมิต่ำ

THE IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF
 β -FeSi₂ BY LOW TEMPERATUER SOLID STATE REACTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**THE IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF
 β - FeSi₂ BY LOW TEMPERATUER SOLID STATE REACTION**



**MISS KITIYA PAOSRICHAJ
MR PITAK BUMRUNGKIT**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ β -FeSi₂ โดยปฏิกิริยาของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ

THE IMPROVEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF β -FeSi₂ BY LOW TEMPERATUER SOLID STATE REACTION

ชื่อนักศึกษา นางสาวกิตติยา เผ่าศรีไชย
นายพิทักษ์ บำรุงกิจ

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ราชศักดิ์ สักदानุภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม	
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
อ.กวางปัญญา สุวรรณสุโข	
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ดร.ราชศักดิ์ สักदानุภาพ	ราชศักดิ์ สักदानุภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ $\beta\text{-FeSi}_2$ โดยปฏิกิริยาของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิตติยา เผ่าศรีไชย นายพิทักษ์ บำรุงกิจ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของสารประกอบ $\beta\text{-FeSi}_2$ โดยการเติมสารเจือที่เหมาะสม ทำการทดลองเป็น 2 การทดลอง คือการทดลองที่ 1 จะนำสารประกอบ $\beta\text{-FeSi}_2$ เจือด้วย Co 4% โดยมวล, Sn 4% โดยมวล, Pb 4% โดยมวล, Cr 4% โดยมวล, Zn 4% โดยมวล และ Ag 4% โดยมวล โดยการเติม PVA จากนั้นนำไปบดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเผาเป็นเวลา 12 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar แล้วนำชิ้นงานทั้งหมดที่ได้ไปวัดด้วย วิธีการวัด Four point probe และจากการวัดนี้ทำให้เราทราบค่าแนวโน้มของการนำไฟฟ้าจากความชันซึ่งชิ้นงานที่ดีที่สุดคือชิ้นงานที่เจือด้วย Ag 4% โดยมวล แต่ชิ้นงานที่ได้ี้จะมีความเป็นฉนวนมาก จึงทำการทดลองที่ 2 โดยที่ใช้ $\beta\text{-FeSi}_2$ เจือด้วย Ag 4% โดยมวล โดยไม่เติม PVA โดยการใส่เงื่อนไขเดิม คือบดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปเผาเป็นเวลา 12 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์ความต้านทานไฟฟ้าและความเป็นเนื้อเดียวกันของสารด้วย four point probe วิเคราะห์ผลเชิงโครงสร้างด้วย XRD และ SEM สูดทำยวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และค่าสภาพการนำไฟฟ้าตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 800 °c ด้วย ZEM-3 จากนั้นคำนวณค่า เพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\alpha^2\sigma$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริกส์, สัมประสิทธิ์ซีเบค, $\beta\text{-FeSi}_2$

Title	The improvement of thermoelectric properties of β -FeSi ₂ by low temperaturesolid state reaction
Students	Miss Kitiya Paosrichai Mr.Pitak Bumrunakit
Degree	Bachelor of Science
Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr. Aparporn Sakulkalavek
Co-Advisor	Dr.Rachsak Sakdanuphab

ABSTRACT

Improve the material properties of thermoplastic electrolyte matrix compound β -FeSi₂ conducted two experiments. Experiment 1 , we will apply the compound β -FeSi₂ was doped with Co 4% mass, Sn 4% mass,. Pb 4% mass, Cr 4% mass, Zn 4% mass and Ag 4% mass by adding PVA were then crushed into a period of 2 hours and then compressed with a hydraulic press machine. Then the specimens were burned for 12 hours in an atmosphere of Ar and bring all pieces that have to be measured with measurement methods Four point probe and by this measure, we know the trend of the electrical conductivity of the slope which specimen is best specimens doped with Ag 4% mass but a piece that is a good insulator. We experiment 2, where we take β -FeSi₂ doped with Ag 4% mass without the addition of PVA , using the same terms. The crusher as a period of 2 hours and then compressed with compressors, hydraulic Then the specimens were burned for 12 hours in an atmosphere of Ar from the sample was analyzed electrical resistance and homogeneity of the compounds with four point probe structural analysis by XRD and SEM measurements last coefficient C Beck . And the electrical conductivity at room temperature up to 800 ° c , but with ZEM-3 then calculated the Power Factor ($\alpha^2\sigma$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords : Thermoelectric , Seebeck coefficient , Semiconductor

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ดร.อาภาภรณ์ สุกุลกระเวก อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อน นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนในการศึกษา จนสามารถทำวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นางสาวกิตติยา เผ่าศรีไชย

นายพิทักษ์ บำรุงกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงานพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการงานพิเศษ	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีในการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปฏิกิริยาการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริกส์	4
2.2 สารประกอบ Fe และ Si	5
2.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD)	7
2.3.1 คุณสมบัติของ X-ray	8
2.3.2 การเลี้ยวเบนของ X-ray (X-ray diffraction)	9
2.4 ทฤษฎีและหลักการของระบบเครื่องSEM (Scanning Electron Microscope)	10
2.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)	12
2.6 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้า ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ถึงอุณหภูมิ 700 °C ด้วยเครื่อง ZEM-3	13
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	15
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเชิงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การวัดวิเคราะห์ความสม่ำเสมอและค่าความต้านทานไฟฟ้า ของสารในชิ้นงาน ด้วย Four point probe	22
4.2 ผลการวัดลักษณะโครงสร้างสารกึ่งตัวนำโดยเทคนิค XRD	25
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเชิงโครงสร้าง SEM	26
4.4 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้า ZEM-3	27

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

1 แนวทางการดำเนินการ

หน้า

3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1. ปรัชญาการณ้ซีเบค (Seebeck effect)	4
2. โครงสร้างผลึกของ β -FeSi ₂ , α -Fe ₂ Si ₃ และ ϵ -FeSi	6
3. เฟสไดอะแกรมของระบบ Fe-Si	6
4. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)	7
5. หลักการณ้ของ Bragg's law	8
6. การเลี้ยวเบนของ X-ray (X-ray diffraction)	9
7. ส่วนประกอบของเครื่อง SEM	10
8. อุปกรณ์วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีโพร์พอยด์โพรบ	13
9. เครื่อง ZEM-3 (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System)	13
10. หลักการทำงานของเครื่อง ZEM-3	14
11. เครื่องอัดไฮโดรลิก	15
12. mortar	15
13. อุปกรณ์อัดเม็ด	16
14. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AZ Series	16
15. อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงาน	17
16. เตาเผาในบรรยากาศของ Ar	17
17. ผง FeSi ₂ ความบริสุทธิ์ 99.9 %	18
18. ผง Sn, Cr, Co, Zn, Ag และ Pb	18
19. การบดด้วย mortar	19
20. แสดงการเตรียม PVA ความเข้มข้น 10 %	19
21. ลักษณะชิ้นงาน	21
22. ลักษณะความชันของชิ้นงาน β -FeSi ₂ + PVA	22
23. ลักษณะความชันของชิ้นงาน β -FeSi ₂ + PVA และเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล	23
24. ลักษณะความชันของชิ้นงาน β -FeSi ₂ ไม่เติม PVA และเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล	24
25. โครงสร้าง XRD ของสารตั้งต้น β -FeSi ₂	25
26. โครงสร้าง XRD ของ Ag 4 % โดยมวล โดยการไม่เติม PVA	26
27. แสดงผลการวัด SEM ในโหมด Backscattered	27
28. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
29.กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ	28
30. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
W	กำลังไฟฟ้า
T_H	อุณหภูมิค้ำร้อน
T_C	อุณหภูมิค้ำเย็น
T_R	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
I	กระแสไฟฟ้า
V	ความต่างศักย์
$\beta\text{-FeSi}_2$	เบต้าไอรอนไดซิลิไซด์
Co	โคบอลต์
Sn	ดีบุก
Pb	ตะกั่ว
Cr	โครเมียม
Zn	สังกะสี
Ag	เงิน
α	สัมประสิทธิ์ซีเบค
T	เวลา
k	ค่าการนำความร้อน
σ	สภาพนำไฟฟ้า
Z	Figure of merit
ρ	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า
d	ระยะระหว่างระนาบของผลึก
θ	มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และชิ้นงาน
λ	ความยาวคลื่น รังสีเอกซ์
n	จำนวน 1,2,3...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อนและความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยผู้คนต่างเริ่มให้ความสำคัญและตระหนักในเรื่องการใช้พลังงานต่างๆ ในปัจจุบันทั่วโลกใช้พลังงานในรูปแบบเชื้อเพลิงฟอสซิล (หรือไฮโดรคาร์บอน) ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินมากที่สุด โดยที่แหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นต้นเหตุให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ภาวะโลกร้อน การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สำคัญในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ และการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ ซึ่งในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยเรียกว่าเข้าสู่ภาวะวิกฤติ มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรมนุษย์ การขยายตัวทางด้านธุรกิจ และการขยายตัวเพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรมอย่างมากและรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการมุ่งเน้นวิจัยและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นที่สะอาด ปลอดภัย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยด้านวัสดุพลังงาน (Energy material) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) หรืองานวิจัยด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectric material) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำที่สามารถผันพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิของปลายทั้งสองด้านของวัสดุ โดยแหล่งความร้อนจะมาจากความร้อนที่ปล่อยทิ้ง (wasted heat) จากชีวิตประจำวัน จากภาคครัวเรือน หรือจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การผลิตอุปกรณ์ที่ให้พลังงานที่มีราคาถูก และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ในต่างประเทศการผลิตและพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ได้ทำมาเป็นเวลานาน สำหรับประเทศไทยเริ่มมีความสนใจมากขึ้นทั้งในด้านการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์และการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์มาประยุกต์ใช้งานจริง ตัวอย่างเช่น Yodovard และคณะ (2001) ได้ศึกษาถึงศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูลโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้ง จากโรงงานในประเทศไทยจำนวน 27,000 โรงงาน พบว่าสามารถผลิตไฟฟ้ามีกำลังมากถึง 100 MW

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน คือ สารประกอบระหว่าง Bi และ Te อาจมีการเจือปนสารอื่นเพื่อปรับสภาพเชิงกล เชิงไฟฟ้าและเชิงความร้อน ข้อดีของสารประกอบระหว่าง Bi และ Te คือเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่มีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิห้อง มีงานวิจัยระบุว่า Bi_2Te_3 มี $ZT = 2.4$ ที่อุณหภูมิห้องแต่ข้อจำกัดของ Bi_2Te_3 คือ สารตั้งต้นมีราคาสูง และ Te จะเป็นพิษที่อุณหภูมิสูง (Kenfaui, 2010)

การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ $\beta\text{-FeSi}_2$ ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ที่มีความซับซ้อนและใช้เวลานาน หลายขั้นตอน กว่าจะได้โครงสร้างสารกึ่งตัวนำ $\beta\text{-FeSi}_2$ และยังใช้งบประมาณมากและที่สิ้นเปลือง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ $\beta\text{-FeSi}_2$ ออกวางขายแล้ว ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาประยุกต์มาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เป็น n-type และ p-type โดยการนำมาเจือด้วยสารชนิดต่างๆ ต่อไป เพราะจะทำให้ประหยัดและลดกระบวนการในการสังเคราะห์โครงสร้าง $\beta\text{-FeSi}_2$ ลงได้อย่างมาก

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ $\beta\text{-FeSi}_2$ และปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ $\beta\text{-FeSi}_2$ และปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า โดยการเติมสารเจือ Co, Sn, Pb, Cr, Zn และ Ag เพื่อนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ $\beta\text{-FeSi}_2$ โดยการเจือ Co 4 % โดยมวล, Sn 4 % โดยมวล, Pb 4 % โดยมวล, Cr 4 % โดยมวล, Zn 4 % โดยมวล และ Ag 4 % โดยมวล

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้งานวิจัยนี้มีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 12 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนมีนาคม 2556 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2557 ซึ่งมีการดำเนินการแสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แนวทางการดำเนินการ

แผนการ ดำเนินการ	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษา และ รวบรวม ข้อมูล												
2. เตรียม ชิ้นงาน												
3. การวัด สมบัติทาง โครงสร้าง และ สมบัติทาง เทอร์โมอิ เล็กทริกส์ เบื้องต้น												
4. การ วิเคราะห์ ชิ้นงาน												
5. สรุป												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้มีความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติและ โครงสร้างของ $\beta\text{-FeSi}_2$
2. นำความรู้ที่ได้จากการวิจัย ไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้
3. นำความรู้ที่ได้จากการวิจัย ไปพัฒนาและเผยแพร่ให้แก่ผู้ที่มีความสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

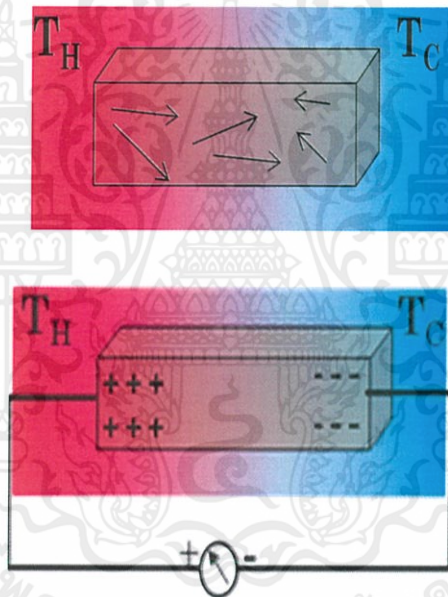
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางตรงกันข้ามจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์สามารถอธิบายได้ตามหลักการงาน โดย ปรากฏการณ์สำคัญ ได้แก่ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ซีเบค

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้าเช่นตัวอย่างจากรูปที่ 1 จะพบว่าชิ้นงานชิ้นหนึ่งเป็นวัสดุที่เป็นโลหะ หรือวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำโดยที่ปลายด้านหนึ่งเป็นอุณหภูมิสูง (T_H) อีกด้านหนึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำ (T_C) พบว่าด้านที่อุณหภูมิสูงพาหะมีพลังงานสูงกว่าด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยสุทธิตัวพาหะจะเคลื่อนที่จากด้านอุณหภูมิสูงไปยังด้านอุณหภูมิต่ำ เมื่อพาหะเคลื่อนที่ เช่น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านอุณหภูมิสูงมาทางด้านอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการสะสมของพาหะประจุลบทางด้านที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดการสะสมของพาหะประจุบวกทางด้านที่อุณหภูมิสูง และเมื่อวัดความต่างศักย์ จะเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น สามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคหรือ Thermoelectric power ดังสมการ

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค
 V คือ ความต่างศักย์
 ΔT คือ ความต่างของอุณหภูมิ

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ N-type จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบค เป็นลบ แต่ P-type จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบค เป็นบวก เป็นต้น

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจะสามารถคำนวณได้จากค่า Figure of merit (Z) และเมื่อค่า Z สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \quad (2)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน หรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 σ คือ สภาพนำไฟฟ้า

ซึ่งค่าสภาพนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

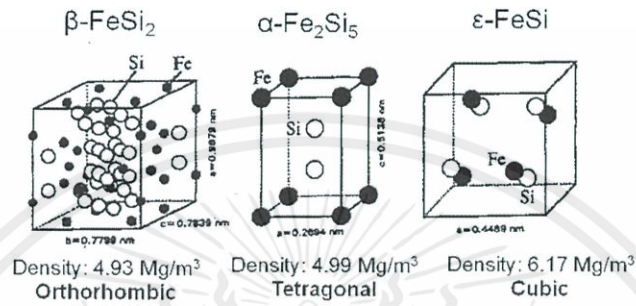
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

2.2 สารประกอบ Fe และ Si

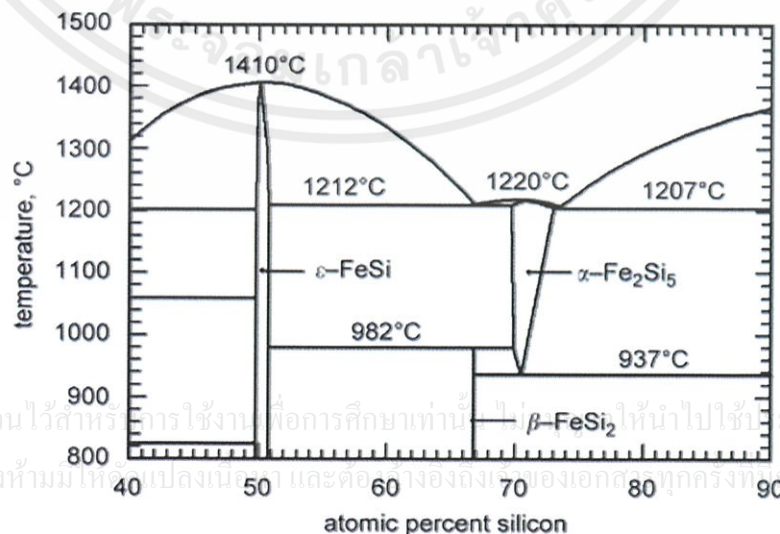
สารประกอบที่เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกของเหล็กและซิลิกอน เนื่องจากว่าทั้งสารประกอบเหล็กและซิลิกอนนี้เป็นสารประกอบที่มีข้อดี ก็คือ ราคาไม่แพงและไม่เป็นพิษ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ยาก นอกจากนี้มันยังมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้นได้อีกด้วย

โดยธรรมชาติสารประกอบ Fe-Si มีโครงสร้างที่เสถียร 3 โครงสร้าง คือ ϵ -FeSi มีโครงสร้างแบบคิวบิก α -Fe₂Si₅ มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล และ β -FeSi₂ มีโครงสร้างแบบอโธโรมบิกแสดงในรูป 2 โดยที่ α -Fe₂Si₅ และ ϵ -FeSi เป็นโครงสร้างที่แสดงสมบัติของโลหะ ในขณะที่ β -FeSi₂ เป็นโครงสร้างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่า Z สูง จึงเป็นโครงสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของ β -FeSi₂, α -Fe₂Si₅ และ ϵ -FeSi

โครงสร้างของ β -FeSi₂, α -Fe₂Si₅ และ ϵ -FeSi เนื่องจากโครงสร้างของ α -Fe₂Si₅ และ ϵ -FeSi นี้เป็นโครงสร้างของโลหะ จึงไม่ต้องการนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เพราะโครงสร้างโลหะนั้นนำความร้อนสูง และมีค่า Z ต่ำ จึงพิจารณาที่โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งโครงสร้างของ β -FeSi₂ เป็นโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเพราะมีค่า Z สูง จึงนำโครงสร้างนี้มาสังเคราะห์ โดยที่โครงสร้างของ β -FeSi₂ นี้สามารถทำให้เป็น p-type โดยการเติมด้วย แมงกานีส (Mn) และ n-type โดยการเจือด้วยโคบอลต์ (Co)



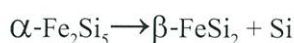
รูปที่ 3 เฟสไดอะแกรมของระบบ Fe-Si

จากรูปที่ 3 กระบวนการที่จะสังเคราะห์ $\beta\text{-FeSi}_2$ มี 3 กระบวนการ

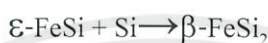
1. กระบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic reaction) ที่อุณหภูมิ 982°C



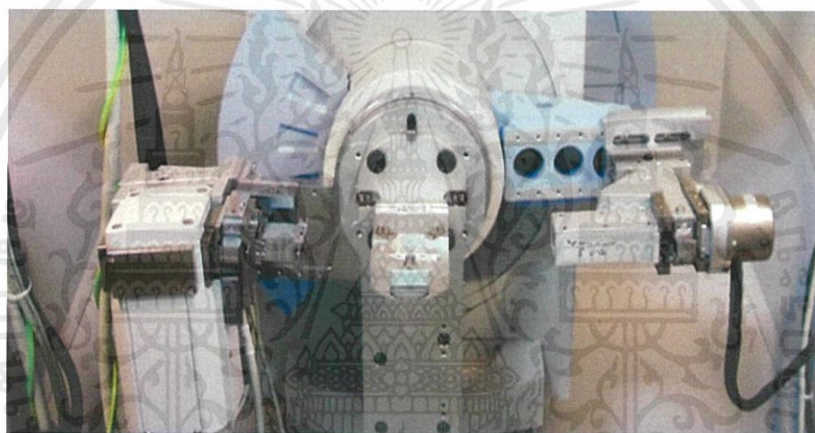
2. กระบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic reaction) ที่อุณหภูมิ 937°C



3. กระบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาสืบซึ่งกันและกัน (subsequent reaction) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 937°C



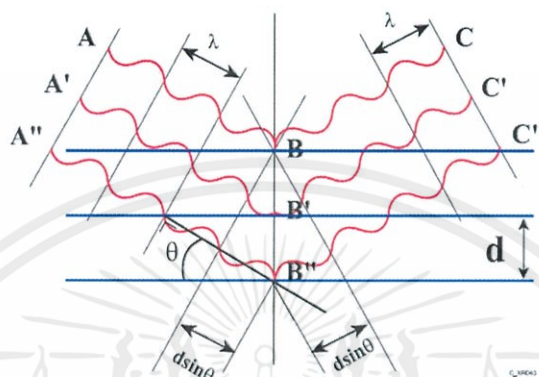
2.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราสามารถทราบได้ว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้างนอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลำดับของอะตอมในผลึกของตัวอย่างได้เช่นกัน ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในตัวอย่าง ไม่ว่าจะปริมาณใดก็ตาม อีกทั้งยังมีให้คิดแปลผลเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และ

คำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วยเครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ละเอียดของรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



รูปที่ 5 หลักการของ Bragg's law

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

d = ระยะระหว่างระนาบของผลึก

θ = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และชั้นงาน

λ = ความยาวคลื่น รังสีเอกซ์

$n = 1, 2, 3, \dots$

2.3.1 คุณสมบัติของ X-ray ได้ถูกนำมาใช้ ที่สำคัญมี 4 แบบ คือ

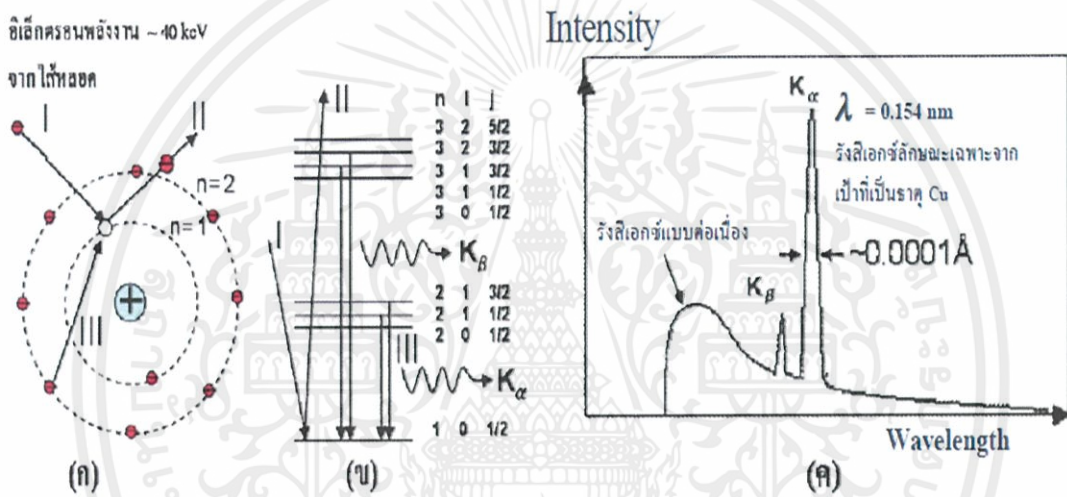
1. ใช้งานทางด้าน Radiography ซึ่งเป็นเทคนิคเกี่ยวกับการดูคลื่น X-ray ในทางอุตสาหกรรมได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยไม่มีการทำลายตัวอย่าง (non-destructive testing) วิธีที่ง่าย ๆ คือ ผ่านลำแสง X-ray เข้าไปในวัสดุที่จะทดสอบแล้วบันทึกรังสีที่ผ่านออกมาบนแผ่นฟิล์ม หรือ จอฟลูออเรสเซนต์ หรือ กับทางการแพทย์ที่ตรวจการหักของกระดูก

2. งานทางด้านผลึกวิทยา (X-ray Crystallography) เป็นเทคนิคที่ใช้สมบัติของ X-ray เกี่ยวกับความยาวคลื่น ตำแหน่งและความเข้มของ X-ray ที่เลี้ยวเบนไป (diffracted) ด้วยผลึกแข็งทำให้ทราบข้อมูลในโครงสร้างของผลึก องค์ประกอบของผลึก ขนาดของอนุภาค หลักฐานของการสลายตัวสถานะพหุสัณฐาน (polymorphism) การจัดตัวของอะตอมในผลึก เป็นต้น

3. การนำ X-ray มาใช้งานวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และเป็นแบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive testing) X-ray beam ที่มีพลังงานสูงผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างจะทำให้เกิด X-ray (K-X-ray, L-X-ray) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวสามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพได้และความเข้มของ X-ray ที่เกิดขึ้นให้หาปริมาณของสารได้

4. X-ray สามารถนำไปใช้เป็นรังสีบำบัด (Radiotherapy) ได้เพราะ X-ray สามารถทำลายเซลล์ได้หรือฆ่าสิ่งที่มีชีวิตได้จึงนำมาใช้รักษาโรคมะเร็ง

2.3.2 การเลี้ยวเบนของ X-ray (X-ray diffraction)

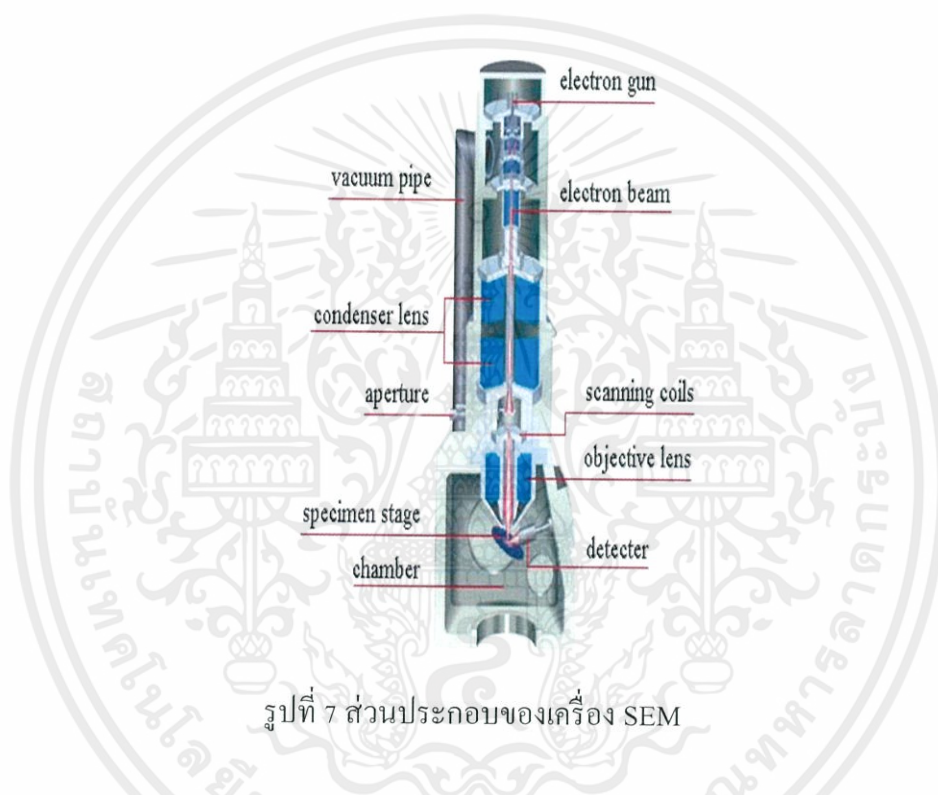


รูปที่ 6 การเลี้ยวเบนของ X-ray (X-ray diffraction)

ในงานวิจัยนี้ นำ X-ray มาใช้ประโยชน์ในด้านฟิสิกส์ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสี X-ray มาจากการใช้ความต่างศักย์สูงเร่งให้อิเล็กตรอนของไส้หลอด จากแผนภาพแสดงกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะในหลอดผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้: (I) การใช้ความต่างศักย์สูงเร่งให้อิเล็กตรอนจากไส้หลอดให้มีพลังงานจลน์มากพอที่จะวิ่งเข้าชนอะตอมเป้าโลหะ แล้วทำให้ (II) อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นในสุดของอะตอมเป้าโลหะหลุดออกมา (III) อิเล็กตรอนในอะตอมเป้าที่ระดับพลังงานสูงกว่าเข้าไปแทนที่ช่องว่างอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน $n = 1$ (ชั้น K) และปลดปล่อยรังสีเอกซ์โดยรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาจากการแทนที่ในชั้นนี้เรียกว่า “รังสีเอกซ์ชั้น K” (K-shell X-ray) ซึ่งรังสีเอกซ์นี้เปล่งออกมาจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น L ($n = 2$) หรือ M ($n = 3$) หรือ N ($n = 4$) ฯลฯ โดยกำหนดเรียกรังสีเอกซ์ชั้น K ที่เกิดจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น L ว่ารังสีเอกซ์ชั้น K_{α} และกำหนดเรียกรังสีเอกซ์ชั้น K ที่เกิดจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น M และ N ว่ารังสีเอกซ์ชั้น K_{β} และ K_{γ} ตามลำดับ

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาดองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD กำหนดหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ ได้โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.4 ทฤษฎีและหลักการของระบบเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 7 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเป็นรูปภาพ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับ

มากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

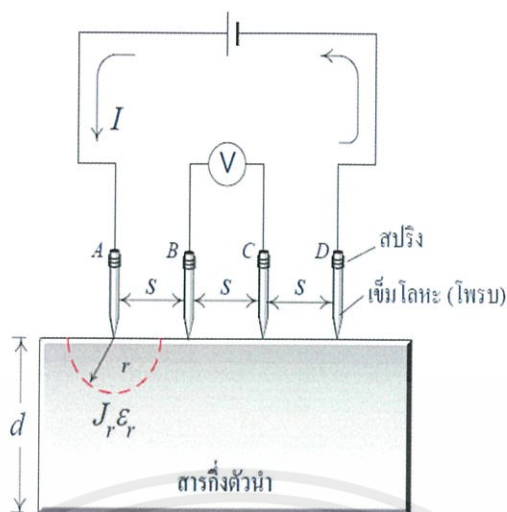
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนท์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบเนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความเร่งจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้

สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) โดยเครื่อง SEM ของ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง มีชุดตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์แบบ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของตัวอย่างได้เพิ่มเติม

2.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)

ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของแท่งสารกึ่งตัวนำ สามารถทำได้โดยง่ายในกรณีที่สามารถเตรียมให้แท่งสารนั้น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมพื้นที่หน้าตัด A มีขนาดยาว l และที่สำคัญก็คือ ต้องทำ ขั้วไฟฟ้า (metal contact) ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้สมบูรณ์เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ได้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลโดยตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร ซึ่งกรณีนี้ เมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์ และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ เราจะสามารถ คำนวณ หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของสารได้อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกสารกึ่งตัวนำออกมาจากแผ่นผลึกและทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมได้ เพราะจะทำให้แผ่นผลึกเสียหายได้และการทำจุดสัมผัสโอห์มมิกที่ปลายของแท่งผลึกให้สม่ำเสมอก็ทำได้ยากและ เมื่อทำรอยสัมผัสแล้วสารกึ่งตัวนำนั้นก็ไม่สามารถนำกลับไปใช้งานอื่นได้อีก รวมทั้งการกำหนดขนาดความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดให้แน่นอนก็ทำได้ยาก ดังนั้นการวัดด้วยวิธีนี้จึงเป็นปัญหาและไม่นิยมกัน เราจึงเลือกวิธีการคือ วิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four points probe) หรือ “เข็ม 4 จุด” ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ทำการวัดได้ง่ายและสะดวก สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสารไม่ว่าจะมีขนาดรูปร่างอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สามารถวัดบนแผ่นผลึก ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกได้และไม่ต้องตัดแยกออกมา ยิ่งกว่านั้น ยังเป็นวิธีการวัดที่ไม่จำเป็นต้องทำ รอยสัมผัสโอห์มมิกจึงไม่สิ้นเปลืองเวลาและวัสดุอีกด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดลอง ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วยทำให้ ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่ขัดมันของชิ้นสารกึ่งตัวนำ ได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ A, B, C และเข็ม D อยู่ห่างกันเป็นระยะ s เท่าๆกัน ซึ่งในทางปฏิบัติทุกๆไป จะมีค่าราว 0.5 - 1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 11 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกันในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด คือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ ไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำ ค่ากระแสที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีโพรบยอดโพรบ

ในการวัด โพรบยอดโพรบนี้เราจะทำการวัดเพื่อหาค่าแนวโน้มของค่าสภาพการนำไฟฟ้า โดยที่เราจะสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโวลต์ (V) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) โดยที่แกน y คือค่า V ส่วนแกน x คือค่า I เมื่อเรานำค่า V และ I นำมาเขียนกราฟเราจะได้ความชันซึ่งค่าความชันของกราฟนี้คือค่าความต้านทาน (R) ซึ่งค่าความชันนี้จะทำให้เราสามารถทราบได้ว่าสารที่เราเจอเข้าไปนั้นมีการนำไฟฟ้าที่ดีหรือไม่ดี โดยที่เราสังเกตจากค่าความชันถ้ามีค่าความชันมากแสดงว่า สารที่เราเจอนั้น มีค่าความต้านทานสูงซึ่งถ้าสารที่เราเจอมีความต้านทานที่สูงจะไม่เหมาะสำหรับการทำงานวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์

2.6 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้า ด้วยเครื่อง ZEM-3 (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System)



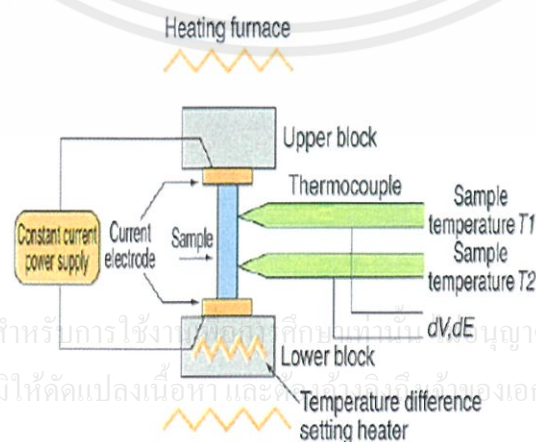
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9 เครื่อง ZEM-3 (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System)

คุณสมบัติของเครื่อง ZEM-3 (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System) สามารถใช้สำหรับการวัดทั้งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าพร้อมกันทั้งสองค่าและเป็นเครื่องช่วยวัดระยะของปริซึมและทรงกระบอกของตัวอย่างได้ทั้ง 6 – 12 มิลลิเมตร สารตัวอย่างถูกยึดติดกับกลไกที่มีความสมดุลเป็นเอกลักษณ์ทำให้ทำการวัดซ้ำๆ ได้และยังสามารถพล็อตกราฟระหว่างกระแสกับแรงดันเพื่อนำไปสู่การตรวจสอบว่าอยู่ใกล้กับชุดตัวอย่างหรือไม่โดยที่ ระบบการตรวจสอบโดยอัตโนมัติถูกยึดติดหัววัดตัวอย่างทั้งสองโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดเพื่อตรวจสอบความต้านทานของตัวอย่าง โดยไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและในการวัดจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์เพื่อวัดโดยอัตโนมัติ ของความแตกต่างของอุณหภูมิที่กำหนดขึ้นและการกำจัดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มากโดยที่ ข้อมูลที่วัดได้จะถูกบันทึกในรูปแบบข้อความ

โดยหลักการการทำงานของเครื่อง (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring) คือนำปริซึมหรือทรงกระบอกตัวอย่างมาวางอยู่ในตำแหน่งแนวตั้งระหว่าง บล็อก ด้านบนและด้านล่างของเตาเผาความร้อน ในขณะที่ทรงกระบอกตัวอย่างถูกทำให้ร้อนด้วยเครื่อง heating furnace แต่ด้านล่างจะมี Lower block จะให้อุณหภูมิต่ำกว่าด้านบนเพื่อให้เกิดผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในทรงกระบอกตัวอย่างการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยจะใช้ thermocouples ในการวัดอุณหภูมิ ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานเป็นแสดงเป็น T_1 และ T_2 แนบด้านข้างของพื้นผิวตัวอย่าง ด้วยการวัดแรงดัน - ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างสายเดียวกันในเครื่องเตาเผาความร้อนและในการการหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้า หาโดยวิธีการวัดแบบ dc fourterminal ซึ่งจะแสดงที่ค่า I จะถูกนำมาใช้กับการวัดและตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงในสายวัดเดียวกัน

โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเกิดจาก ผลต่างของแรงดัน ไฟฟ้าที่ลดลงของสายวัดทั้งสองจุดโดยแสดงหลักการการทำงานของเครื่องได้จากรูปที่ 10



รูปที่ 10 หลักการทำงานของเครื่อง ZEM-3

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องอัดไฮโดรลิก

ที่อ่านค่าความดัน มีทั้งหมด 3,500 ตัน



ที่เพิ่มความดัน

แท่นรองโมลเวลาอัด

รูปที่ 11 เครื่องอัดไฮโดรลิก

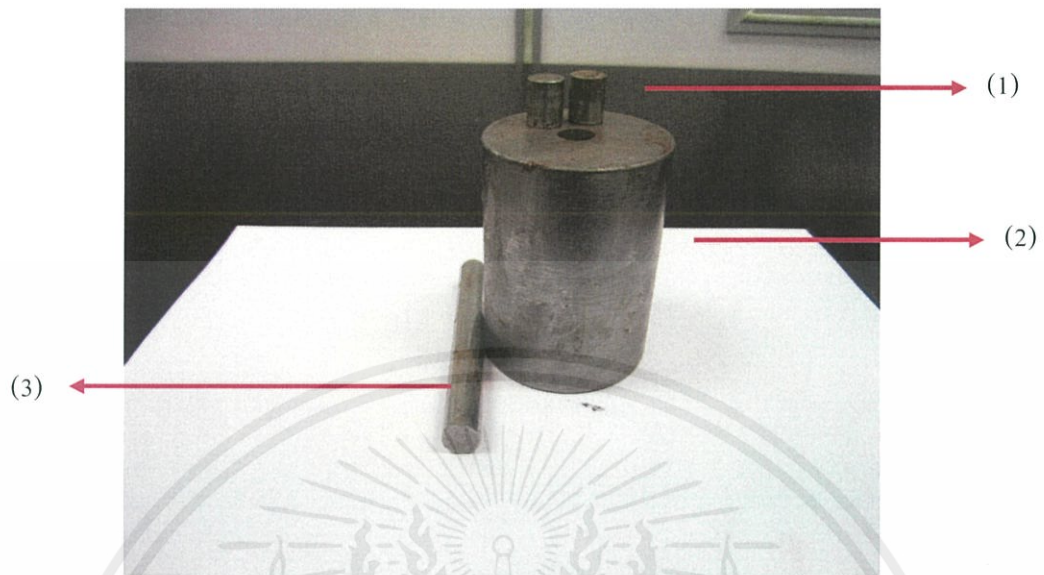
2. mortar



รูปที่ 12 mortar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เอกสารนี้แก่บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์อัดเม็ด



รูปที่ 13 อุปกรณ์อัดเม็ด

(1) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง 1.5 ซม.

(2) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.0 ซม. ความสูง 8.0 ซม.

(3) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ความสูง 10.0 ซม.

4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AZ Series



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 14 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AZ Series

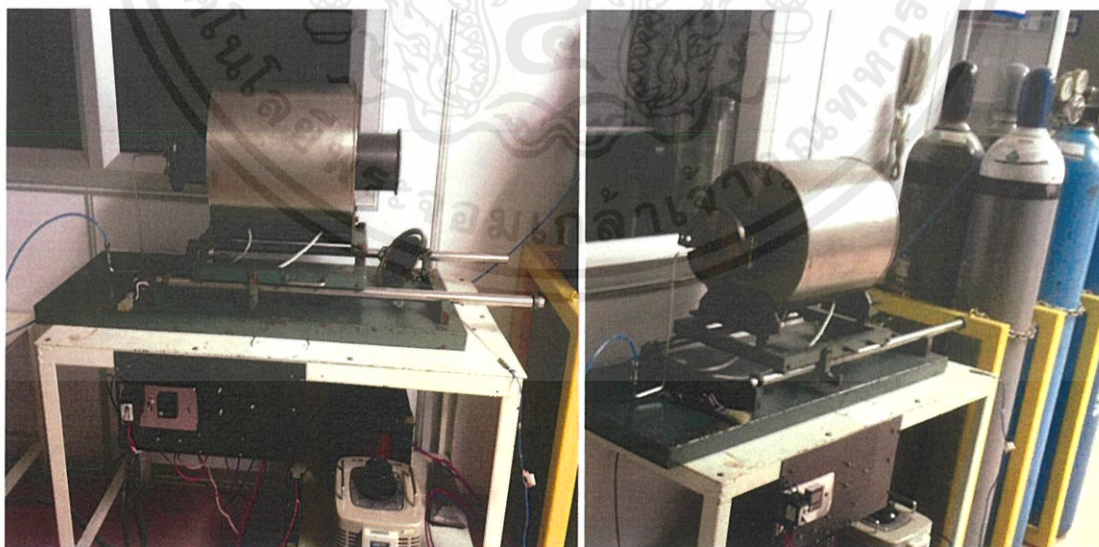
5. อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 15 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงาน

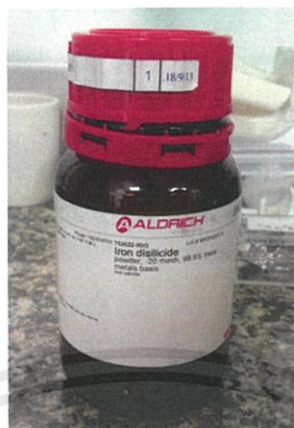
6.เตาเผา

6.1 เตาเผาในบรรยากาศของ Ar



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.สารตั้งต้น

รูปที่ 17 ผง FeSi_2 ความบริสุทธิ์ 99.9%

รูปที่ 18 ผง Sn, Cr, Co, Zn, Ag และ Pb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.1 การสังเคราะห์โครงสร้าง β -FeSi₂ จากสารตั้งต้น β -FeSi₂ ความบริสุทธิ์ 99.9%

การสังเคราะห์โครงสร้าง β -FeSi₂ จากสารตั้งต้น β -FeSi₂ ความบริสุทธิ์ 99.9 % จะแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังต่อไปนี้

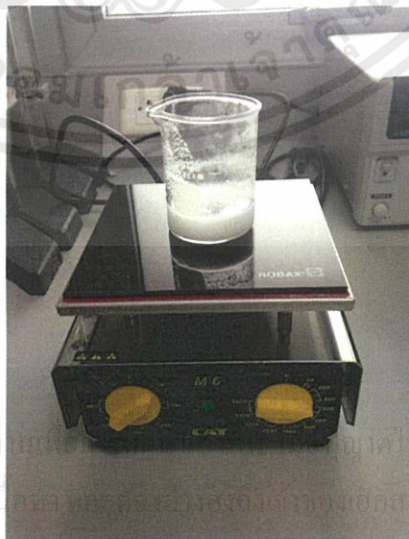
ตอนที่ 1

- สารตั้งต้น β -FeSi₂ ความบริสุทธิ์ 99.9% เจือด้วย Co, Sn, Pb, Cr, Zn และ Ag ในปริมาณ 4 % โดยมวล
- บดให้เข้ากัน โดยใช้ mortar นาน 3 ชั่วโมง



รูปที่ 19 การบดด้วย mortar

- เติมน้ำ Polyvinyl alcohol (PVA) binder 10 % (ปริมาณ 0.2 cc ต่อสาร 1 g)



รูปที่ 20 การเตรียม Polyvinyl alcohol (PVA) ความเข้มข้น 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา หรือเผยแพร่ข้อมูลจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำไปอัดให้เป็นเม็ดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. โดยเครื่องอัดไฮดรอลิก
- นำไปใส่ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอาร์กอน
- วิเคราะห์แนวโน้มการนำไฟฟ้าและความสม่ำเสมอของโครงสร้างของชิ้นงาน โดยการวัด Four point probe
- วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD,SEM
- วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและการนำไฟฟ้าด้วย ZEM-3 ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 °C

ตอนที่ 2

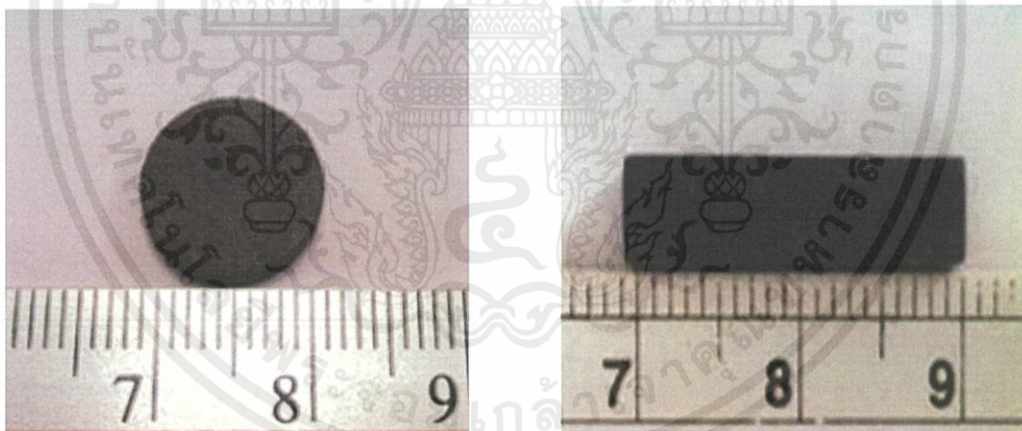
- สารตั้งต้น β -FeSi₂ ความบริสุทธิ์ 99.9% เจือด้วย Ag ในปริมาณ 4% โดยมวล
- บดให้เข้ากันโดยใช้ mortar นาน 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 19
- นำไปอัดให้เป็นเม็ดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. โดยเครื่องอัดไฮดรอลิก
- นำไปใส่ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอาร์กอน
- วิเคราะห์แนวโน้มการนำไฟฟ้าและความสม่ำเสมอของโครงสร้างของชิ้นงาน โดยการวัด Four point probe
- วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD,SEM
- วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและการนำไฟฟ้าด้วย ZEM-3 ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของ $\beta\text{-FeSi}_2$ โดยแบ่งออกเป็นสองตอนคือในตอนแรก 1 เป็นชิ้นงานที่ทำการเตรียมโดยใช้สารตั้งต้น $\beta\text{-FeSi}_2$ ทำการเจือด้วย Sn 4 % โดยมวล , Ag 4 % โดยมวล, Co 4 % โดยมวล , Pb 4 % โดยมวล, Cr 4 % โดยมวล , Zn 4 % โดยมวล และเติมด้วย PVA ความเข้มข้น 10 % จำนวน 0.2 cc ต่อสาร 1 กรัม มาบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar ในตอนที่ 2 เป็นการเตรียมชิ้นงานโดยใช้สารตั้งต้น $\beta\text{-FeSi}_2$ ทำการเจือด้วย Ag 4% โดยมวล บดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar ซึ่งลักษณะชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะรูปทรง 2 แบบคือแบบแรกมีลักษณะเป็นเม็ด รูปที่ 21 ก). และลักษณะแบบแท่ง ดังรูปที่ 21 ข).



ก). ลักษณะแบบเม็ด

ข). ลักษณะแบบแท่ง

รูปที่ 21 ลักษณะเม็ดชิ้นงาน

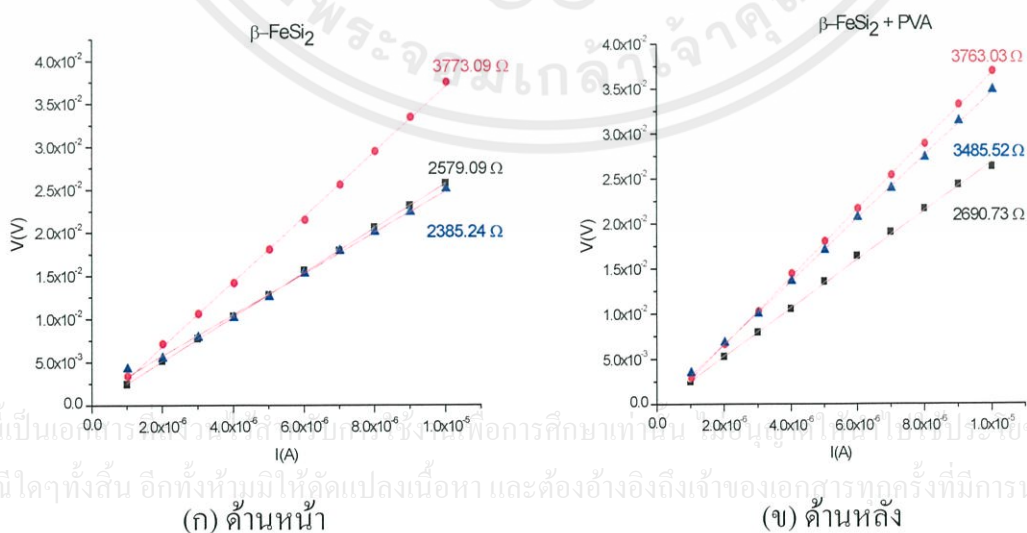
ชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์ความต้านทานไฟฟ้าและความเป็นเนื้อเดียวกันของสารด้วย four point probe วิเคราะห์ผลเชิงโครงสร้างด้วย XRD และ SEM สดทำยวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้สภาพการนำไฟฟ้าตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 800 °C ด้วย ZEM-3 จากนั้นคำนวณค่า เพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\alpha^2\sigma$)

4.1 การวัดด้วย Four point probe

การวัดชิ้นงานด้วย Four point probe เป็นการวัดผลเพื่อวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้า และการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของสารในชิ้นงาน โดยทำการจ่าย I และวัด V ในบริเวณที่ แตกต่างกัน ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

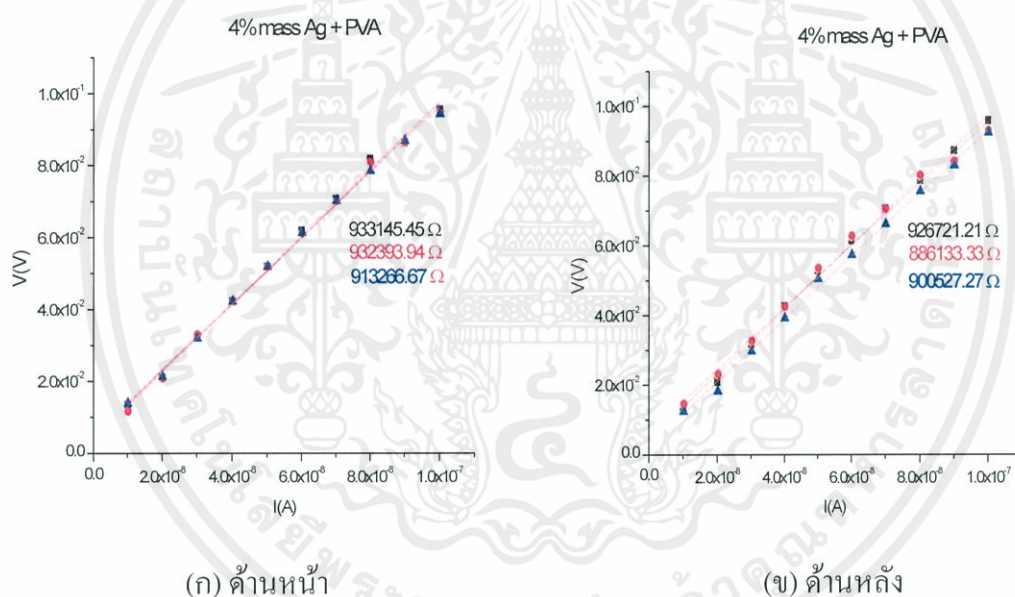
ตอนที่ 1

การวัดผลด้วย Four point probe ของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่ทำการเจือด้วย Sn 4 % โดยมวล, Co 4 % โดยมวล, Pb 4 % โดยมวล, Cr 4 % โดยมวล, Zn 4 % โดยมวลและเติมด้วย PVA ความเข้มข้น 10 % เมื่อนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I จะได้กราฟออกมาดังรูปที่ 26 ในรูปจากการวัดด้านหน้า และการวัดด้านหลังจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าโวลต์ที่ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่จะพบว่าในการวัดแต่ละครั้งในบริเวณที่ แตกต่างกัน ค่าโวลต์ที่ได้จะมีค่าไม่ใกล้เคียงกันและมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่า ความชันนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปที่ 22 (ก) ด้านหน้า ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่า ความชันเท่ากับ $3773.09 \text{ M}\Omega$, $2579.09 \text{ M}\Omega$ และ $2385.24 \text{ M}\Omega$ และจากกราฟรูปที่ 22 (ข) ด้านหลัง ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่าความชันเท่ากับ $3763.03 \text{ M}\Omega$, $3495.52 \text{ M}\Omega$ และ $2690.73 \text{ M}\Omega$ ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของชิ้นงานได้ว่า ชิ้นงานนั้นมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีการกระจายตัวของสารไม่สม่ำเสมอ และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมากซึ่งอาจเป็นผล มาจากการเติม PVA ทำให้ชิ้นงานมีความเป็นฉนวน



รูปที่ 22 ลักษณะความชันของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2 + \text{PVA}$

แต่จะพบว่าในส่วนการวัด Four point probe ของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2 + \text{PVA}$ และเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล ทั้ง 2 ด้านและนำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟ จะได้กราฟออกมามีลักษณะดังรูปที่ 23 ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่าความชันนั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน จากรูปที่ 23 ในรูปจากการวัดด้านหน้าและการวัดด้านหลังจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าโวลต์ที่ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังเช่นกราฟรูปที่ 23 (ก) ด้านหน้า ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่าความชันเท่ากับ $933145.45 \text{ M}\Omega$, $932393.94 \text{ M}\Omega$ และ $913266.67 \text{ M}\Omega$ และจากกราฟรูปที่ 23 (ข) ด้านหลัง ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่าความชันเท่ากับ $926721.21 \text{ M}\Omega$, $886133.33 \text{ M}\Omega$ และ $900527.27 \text{ M}\Omega$ และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของชิ้นงานได้ว่า ชิ้นงานชิ้นนี้มีลักษณะการกระจายตัวของสารอย่างสม่ำเสมอ จนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ยังคงพบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้ายังมีค่าสูงมาก



รูปที่ 23 ลักษณะความชันของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2 + \text{PVA}$ และเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล

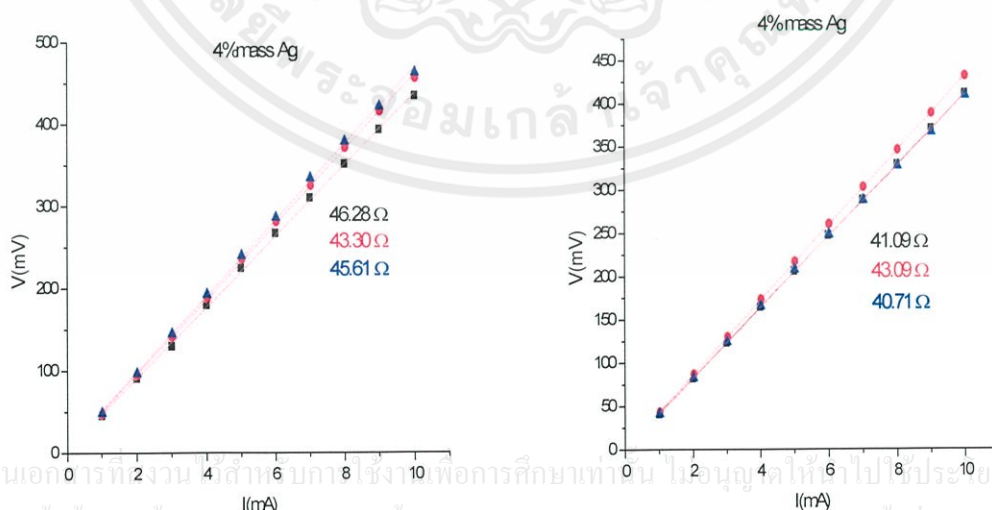
ดังนั้นจากการวัด Four point probe ของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ และชิ้นงานที่ทำกรเจือ Sn 4 % โดยมวล , Co 4 % โดยมวล , Pb 4 % โดยมวล , Cr 4 % โดยมวล , Zn 4 % โดยมวล โดยที่เติม PVA พบว่า ชิ้นงานเกือบทั้งหมดมีการกระจายตัวของสารไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงซึ่งไม่เป็นผลดีในการนำมาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ทั้งนี้อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากการเติม PVA ทำให้สารยึดติดกันได้ดี แต่ทำให้ชิ้นงานมีความเป็นฉนวน แต่จะพบว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ชิ้นงานที่ทำกรเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล ชิ้นงานมีลักษณะการกระจายตัวของสารอย่างสม่ำเสมอ จนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน และมีค่าความชันที่สูงอยู่ แต่เป็นชิ้นงานที่มีความเหมาะสมที่สุด เป็น

เหตุผลให้ทำการศึกษาและทำงานวิจัยแก้ไขเพิ่มเติม โดยใช้เงื่อนไขในการทำทดลองเหมือนเดิม โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากการเจือ Ag 4 % โดยมวล โดยที่ไม่เติม PVA ดังผลการทดลองในตอนี่ 2

ตอนที่ 2

ผลการทดลองในตอนี่ 2 การทดลองที่ได้จากการเจือ Ag 4 % โดยมวล โดยที่ไม่เติม PVA ซึ่งจากการทดลองจะพบว่า จากการเจือสารที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาศึกษาทำการวิจัยต่อการเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล ซึ่งจะได้กราฟออกมามีลักษณะดังรูปที่ 24 และสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

การวัด Four point probe ของชิ้นงาน ทั้ง 2 ด้านและนำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟ จะได้กราฟออกมามีลักษณะดังรูปที่ 24 ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่าความชันนั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันจากรูปที่ 24 ในรูปจากการวัดด้านหน้า และการวัดด้านหลังจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าโวลต์ที่ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วย และจะพบว่าในการวัดแต่ละครั้งค่าโวลต์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังเช่นกราฟรูปที่ 24 (ก) ด้านหน้า ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่าความชันเท่ากับ $46.28\ \Omega$, $43.30\ \Omega$ และ $45.61\ \Omega$ และจากกราฟรูปที่ 24 (ข) ด้านหลัง ทำการวัด 3 ค่า ในจุดที่ต่างกัน มีค่าความชันเท่ากับ $41.09\ \Omega$, $43.09\ \Omega$ และ $40.71\ \Omega$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของชิ้นงานได้ว่า ชิ้นงานชิ้นนี้มีลักษณะการกระจายตัวของสารอย่างสม่ำเสมอ จนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน และมีค่าสภาพนำไฟฟ้ามากขึ้นเนื่องจากมีค่าความชันที่ต่ำลง



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

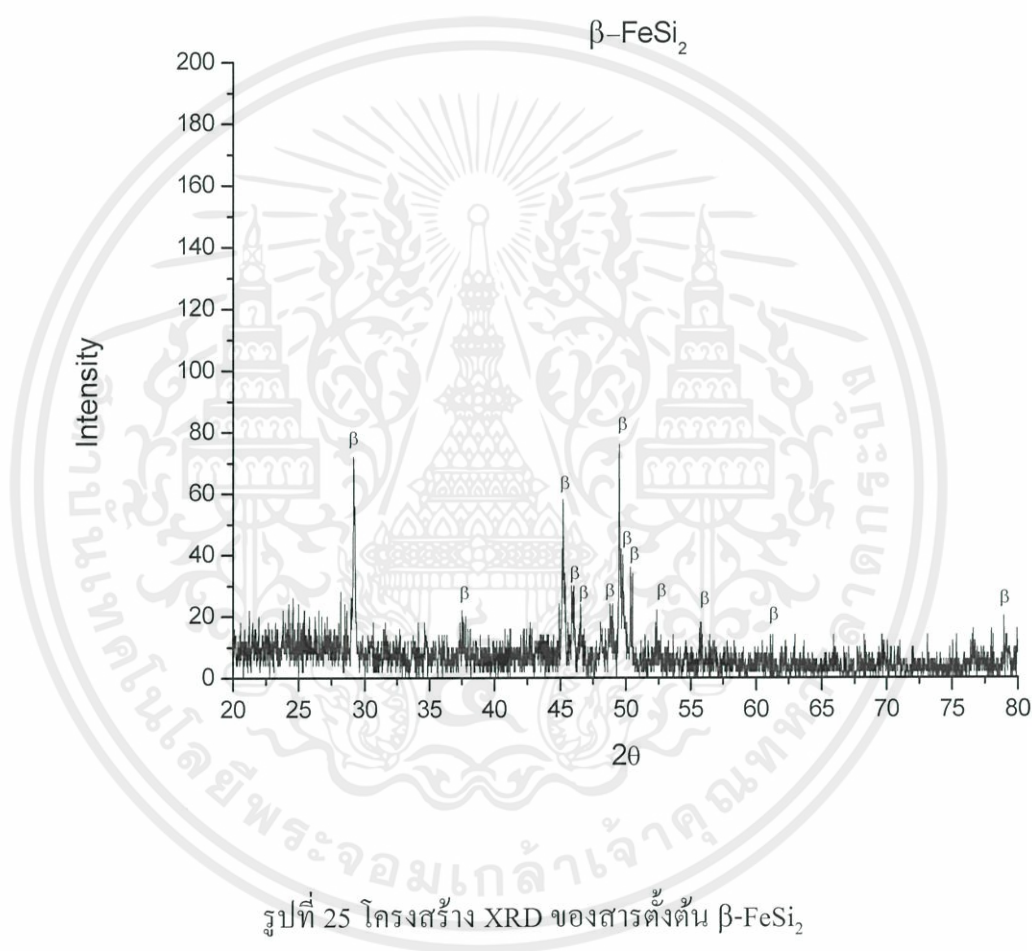
รูปที่ 24 ลักษณะความชันของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่ไม่เติม PVA และเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล

4.2 ผลการวัด XRD

ผลการวัดและวิเคราะห์ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

ตอนที่ 1

ในงานวิจัยนี้ได้วัดลักษณะโครงสร้างโดยเทคนิค XRD ของสารตั้งต้น β -FeSi₂ ที่ไม่ทำการเจือสารเจือ ซึ่งได้ผลแสดงดังรูป



จากรูปที่ 25 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อนำกราฟที่ได้นี้ไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (PDF # 710642) แล้วจะพบว่า ซึ่ในงานเกิดเป็นโครงสร้างของ β

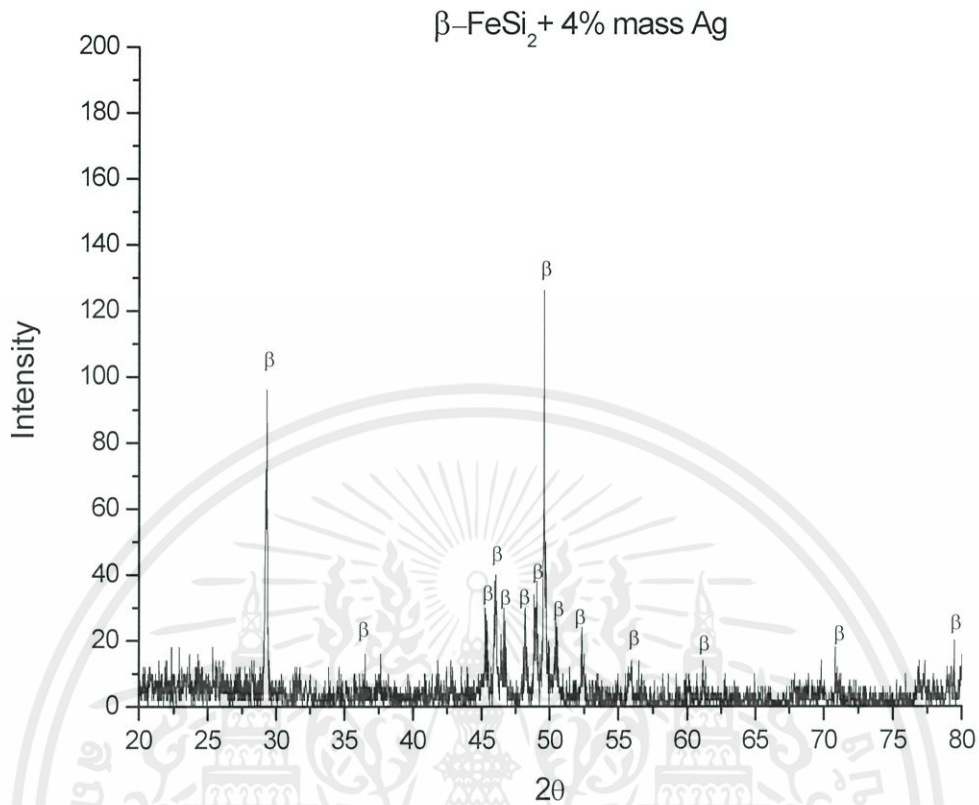
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตอนที่ 2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้วัดลักษณะโครงสร้างโดยเทคนิค XRD ของสารตั้งต้นที่มีอยู่ คือ Ag 4 %

โดยมวล โดยการไม่เติม PVAซึ่งได้ผลแสดงดังรูป

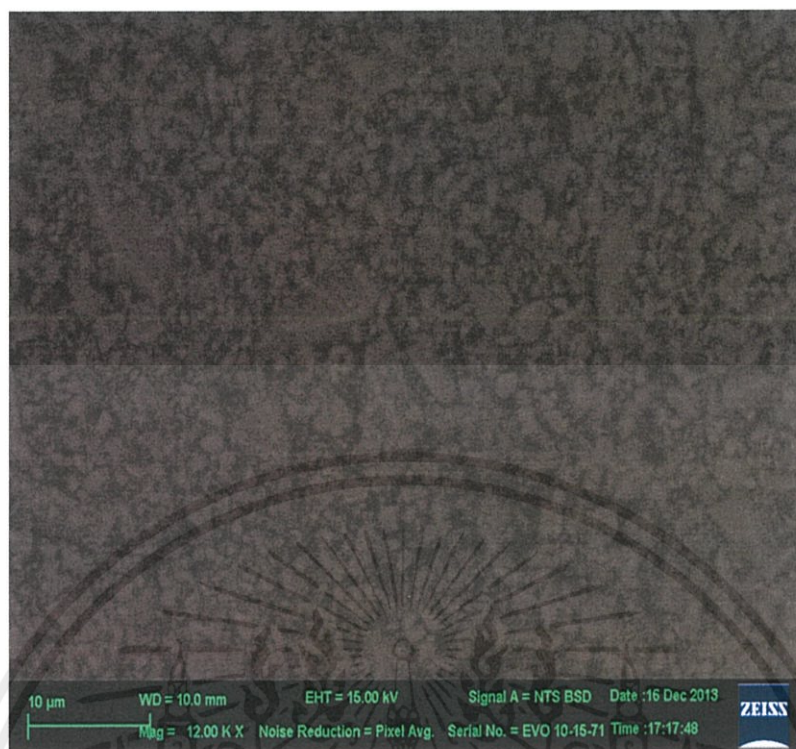


รูปที่ 26 โครงสร้าง XRD ของ Ag 4 % โดยมวล โดยการไม่เติม PVA

จากรูปที่ 26 แสดงให้เห็นถึงลักษณะเชิงโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อนำกราฟที่ได้นี้ไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานแล้วจะพบว่า ชิ้นงานเกิดเป็นโครงสร้างของ β แล้วเช่นกันกับในตอนที่ 1 ซึ่งอาจจะวิเคราะห์ผลได้ว่า สารที่ทำการเจือเข้าไปซึ่งก็คือ Ag 4 % โดยมวล นั้น มีการกระจายและรวมตัวกับสารตั้งต้นคือ β -FeSi₂ ได้ดีจนอาจจะเป็นเนื้อเดียวกัน และสังเกตได้ว่ามีความเข้มสูงขึ้นกว่าชิ้นงาน β -FeSi₂ ซึ่งทำให้ทราบว่าชิ้นงานมีความเป็นโครงสร้างผลึกสูง จึงนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ SEM ต่อไป

4.3 ผลการวัด SEM

จากการวัด SEM ของชิ้นงานที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเชิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โครงสร้างของชิ้นงานซึ่งมีลักษณะดังรูป 27 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



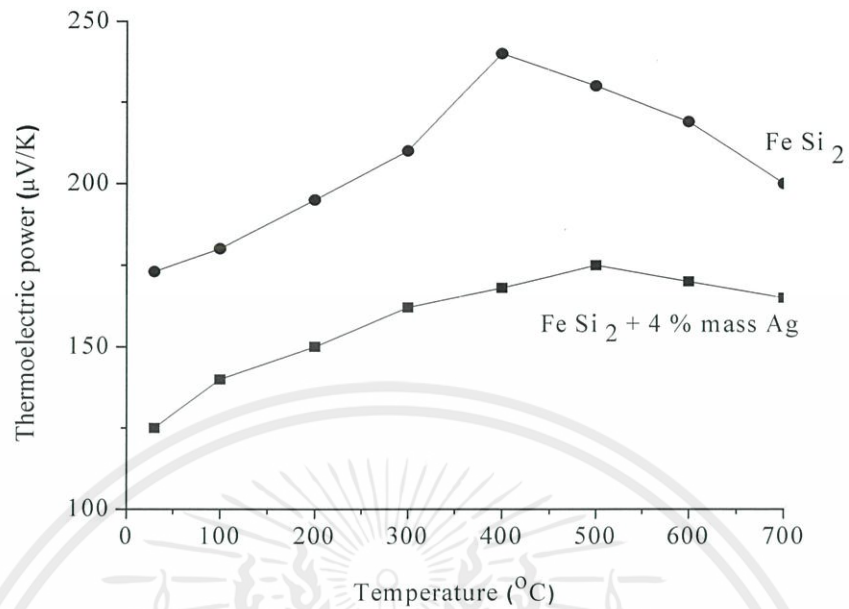
รูปที่ 27 แสดงผลการวัด SEM ในโหมด Backscattered

จากรูปที่ 27 แสดงผลการวัด SEM ในโหมด Backscattered ของชิ้นงานที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายได้ว่า ชิ้นงานนั้นมีความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งถือว่าเป็นผลดีและเป็นผลสำเร็จในงานวิจัยนี้ จากนั้นจะทำการวัดคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ต่อไป

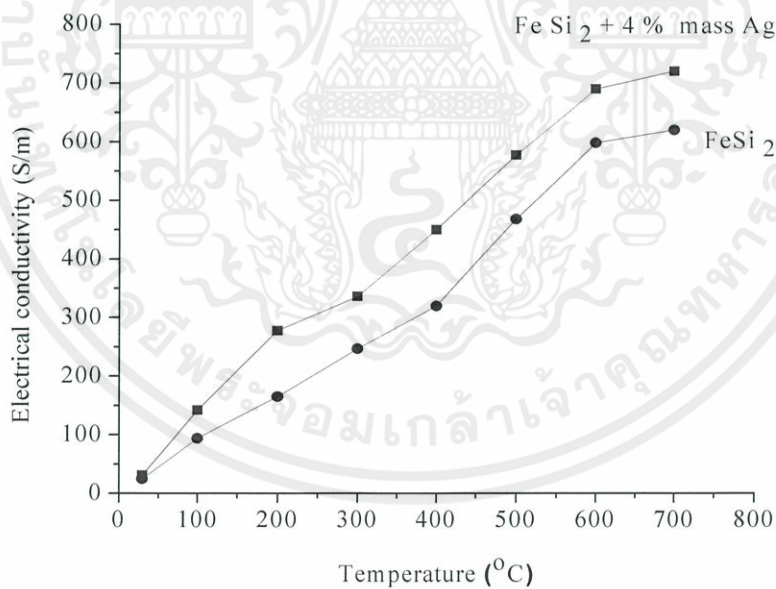
4.4 ผลการวัด ZEM-3

การวัด ZEM-3(Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System) จะทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 °c ของชิ้นงาน β -FeSi₂ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล โดยในการวัดผล ZEM-3 นี้ได้ทำการอัดชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งผลจากการวัดค่าที่ได้จะสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ

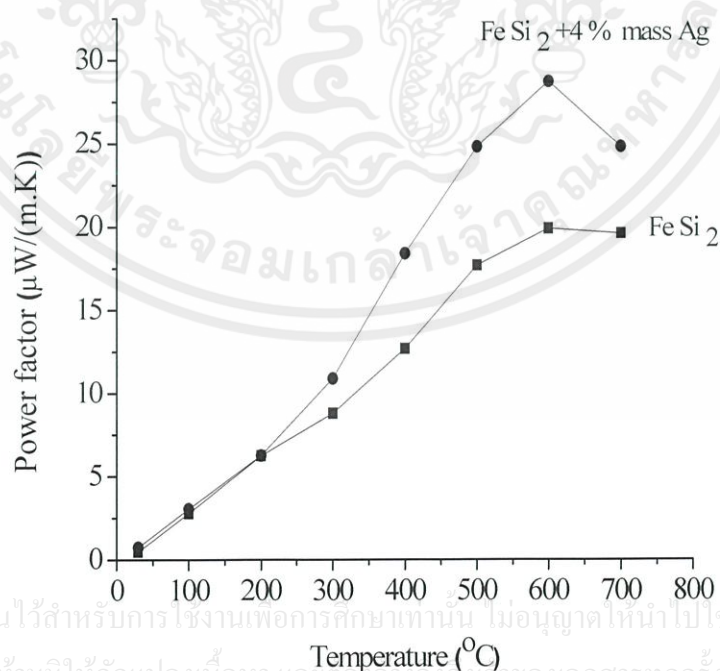


รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าพร้อมกัน จากเครื่อง ZEM-3 (Seebeck Coefficient / Electric Resistance Measuring System) จากรูปที่ 28 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ ของชิ้นงาน β -FeSi₂ และ ชิ้นงาน β -FeSi₂ ที่

เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล จะพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ก็คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัมประสิทธิ์ซีเบคจะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังสมการ $S \approx -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{2eE_{F0}}$ และเมื่อถึงจุดหนึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าสูงที่สุดและจะค่อยๆลดลง ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจาก เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีอนุภาคพาหะเพิ่มมากขึ้นจนมีสภาพเกือบเป็น โลหะ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลง และจะพบว่าชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูงกว่า ชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4% และจากรูปที่ 29 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ ของชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ และชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวลจะพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ก็คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการชนกันและเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาหะเพิ่มมากขึ้น และมีความหนาแน่นของอนุภาคพาหะสูงขึ้น จึงทำให้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และจะพบว่าชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่า ชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล

ทำการคำนวณค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จากสมการเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\alpha^2 \sigma$) และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ จะได้กราฟออกมามีลักษณะดังรูปที่ 30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 30 นี้ แสดงให้เห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นมีทิศทางหรือแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนถึงจุดหนึ่ง จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยจะพบว่าชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ประมาณ $18\ \mu\text{W}/(\text{m.K})$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ประมาณ $28\ \mu\text{W}/(\text{m.K})$ ดังนั้นจากกราฟนี้สามารถพบว่า ในชิ้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมีผล นั้นทำให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ $\beta\text{-FeSi}_2$ มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์และมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ดีขึ้นในอุณหภูมิสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของ β -FeSi₂ และปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยใช้สารกึ่งตัวนำ β -FeSi₂ มาทำการการเจือด้วย Co 4 % โดยมวล , Sn 4 % โดยมวล , Pb 4 % โดยมวล , Cr 4 % โดยมวล , Zn 4 % โดยมวล และ Ag 4 % โดยมวล โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือในตอนแรก 1 เป็นชิ้นงานที่ทำการเตรียมโดยใช้สารตั้งต้น β -FeSi₂ ทำการเจือด้วย Sn 4% โดยมวล, Ag 4 % โดยมวล , Co 4 % โดยมวล , Pb 4 % โดยมวล , Cr 4 % โดยมวล , Zn 4 % โดยมวล และเติมด้วย PVA ความเข้มข้น 10 % บดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar และตอนที่ 2 เป็นการเตรียมชิ้นงานโดยใช้สารตั้งต้น β -FeSi₂ ทำการเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล บดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงในบรรยากาศของ Ar

ผลวิเคราะห์ความต้านทานไฟฟ้าและความสม่ำเสมอของโครงสร้างของชิ้นงาน ความเป็นเนื้อเดียวกันของสารด้วย four point probe ในบริเวณที่แตกต่างกัน ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน β -FeSi₂ ที่เจือด้วย Co 4 % โดยมวล , Sn 4 % โดยมวล , Pb 4 % โดยมวล , Cr 4 % โดยมวล , Zn 4 % โดยมวล และ Ag 4 % โดยมวล และเติม PVA ในตอนที่ 1 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีค่าความต้านสูง มีความต้านทานสูง จนมีค่าเป็นฉนวน และชิ้นงานทั้งหมดไม่มีความสม่ำเสมอของโครงสร้างของชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ยกเว้นชิ้นงานที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวลชิ้นงานนี้มีลักษณะความชันที่ใกล้เคียงกันมาก และในทุกๆบริเวณ ดังนั้นการเติม PVA จึงไม่เป็นผลดีกับชิ้นงานและในตอน 2 โดยการเตรียมชิ้นงานโดยใช้สารตั้งต้น β -FeSi₂ ทำการเจือด้วย Ag 4 % โดยมวล พบว่าชิ้นงานมีค่าความชันที่ต่ำกว่าในตอน 1 มากมีค่าความต้านทานต่ำ มีสภาพนำไฟฟ้ามากขึ้น และชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างของชิ้นงานและการกระจายตัวของสารได้จนเกือบจะเป็นเนื้อเดียวกัน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโดยเทคนิค XRD ของ β -FeSi₂ ในตอนที่ 1 เมื่อนำกราฟที่ได้ไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (PDF # 710642) แล้วจะพบว่า ชิ้นงานเกิดเป็นโครงสร้างของ β และในตอน 2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ β -FeSi₂ ที่เจือด้วย

Ag 4 % โดยมวล เมื่อนำกราฟที่ได้นี้ไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานแล้วจะพบว่า ชั้นงานยังคงโครงสร้างของ β อยู่เหมือนเดิม เช่นกันกับในตอนที่ 1 ซึ่งอาจจะวิเคราะห์ผลได้ว่า สารที่ทำการเจือเข้าไปซึ่งก็คือ Ag 4 % โดยมวลนั้นมีการกระจายและรวมตัวกับสารตั้งต้นคือ $\beta\text{-FeSi}_2$ ได้ดีจนอาจจะเป็นเนื้อเดียวกัน

ผลวัดลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค SEM ในโหมด Backscattered ของชั้นงานที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล พบว่าชั้นงานนั้นมีความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกัน

ผลการวัดค่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าพร้อมกัน จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 °C ด้วยเครื่อง ZEM-3 ของชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ และ $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ มีค่าสูงกว่า ชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวลและมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล

การคำนวณค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ พบว่าชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ประมาณ $18 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวล ซึ่งมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ประมาณ $28 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ดังนั้นชั้นงาน $\beta\text{-FeSi}_2$ ที่เจือด้วย Ag 4 % โดยมวลนั้นทำให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ $\beta\text{-FeSi}_2$ มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์และมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกส์ที่ดีขึ้นในอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kenfaui,D.; Chateigner,D.; Gomina,M.; Noudem,J.G. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 490, issue 1-2 (February 4, 2010), p. 472-479.
- [2] I. Nishida : Phys. Rev. B 7 (1973) 2710-2713. And U. Birkholz and J. Schelm: Phys. Status Solidi 27 (1968) 413-425.
- [3] H.Nagai *et al.*, *Mater.Trans. JIM*, 39, No.4, (1998), 515.
- [4] R.M.German, *Liquid Phase Sintering*, Plenum Publishing Co. (New York, 1985), 65.
- [5] M. Ito, H. Nagai, D. Harimoto, S. Katsuyama, K. Majima *J. Allos and Compd*,2, 28 (200)1, 226.
- [6] M. Ito, T. Tada and S. Katsuyama, *J. Alloy Compd.* 350 (2003), 296.
- [7] M Ito , T. Tada and S. Hara, *J. Alloy Compd.* 408 (2006), 363.
- [8] Sakata, T., et al. Studies on the formation of FeSi₂ from the FeSi-Fe₂Si₅ utectic .J. Less Common Metals 61 (October 1978): 301-308.
- [9] Yamauchi, I., et al. Effect of Cu addition on the β-phase formation rate in Fe₂Si₅ thermoelectric materials. *J. Mater. Sci.* 33 (1998): 385-394.
- [10] Yamauchi, I., et al. Effect of copper addition on the β-phase formation rate in FeSi₂ thermoelectric materials. *J. Mater. Sci.* 32 (1997): 4603-4611.
- [11] Kojima, T., et al. Formation of β-FeSi₂ from the sintered eutectic alloy FeSi-Fe₂Si₅ doped with cobalt. *J. Less-Comm.Met.* 159 159 (1990):299-305.
- [12] Ur, S.C., and Kim, I. H. Thermoelectric properties of mechanically alloyed iron disilicides consolidated by various processes. *Met. Mater. Int.* 11 (2005):301-30.
- [13] Yamauchi, I., et al. β-FeSi₂ phase formation from a unidirectionally solidified rod-type eutectic structure composed of both α-phases and ε- phases. *Mater.Sci. Eng. A* 208 (1996):108-115.
- [14] Tani, J. and Kido, H. Hall effect and thermoelectric properties of FeSi_x. *J.Appl. Phys.* 39 (2000) :1054-1057.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้