



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
The effect of annealing on electrical resistivity and Seebeck coefficient of Iron disilicide with 0.3% atom Sn

ชื่อนิสิต นายจิรัฏฐ์ ติมอัครอังกูร เลขประจำตัว 5933413223

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลของการอบอุ่นที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก
0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม

นายจิรัฏฐ์ ลีมอัครอังกูร


โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


หัวข้อโครงการ	ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสาร ไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
ผู้จัดทำโครงการ	นายจิรัฏฐ์ ลิ้มอัครังกูร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2562

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการได้ตรวจรับรายงานฉบับนี้แล้ว


..... (ประธานกรรมการ)
(อาจารย์ ดร.สมฤทธิ วังศ์มณีโรจน์)


..... (กรรมการ)
(อาจารย์ ดร.อรพิน วรรณดิลก)


..... (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)	ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
ชื่อนิสิต	นายจิรัฏฐ์ ลิ้มอักษรอังกูร รหัสประจำตัวนิสิต 5933413223
ภาควิชา/คณะ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2562
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมและไม่เจือ โดยหลอมด้วยอุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียสในระบบที่มีแก๊สอาร์กอน โดยทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองของชิ้นงานก่อนอบและหลังอบ โดยจะทำการอบที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง โดยมีการหาสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์หัววัด 4 จุด โดยใช้หลักของ แวน เดอ พาเว คำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า หาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยเทคนิคหัววัดร่อน ก่อนอบอ่อนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือด้วยดีบุกมีค่ามากกว่าแบบที่เจือด้วยดีบุก โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $4.89 \mu\Omega.m$ และ $2.24 \mu\Omega.m$ ตามลำดับและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับ $1.15 \mu V/K$ และ $0.89 \mu V/K$ ตามลำดับ ภายหลังจากการอบอ่อนพบว่าทุกชิ้นงานมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นโดยชิ้นงานที่เจือจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของดีบุกที่เร่งปฏิกิริยายูเทคทอยด์และให้เฟสปีตาที่มากขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มตามอุณหภูมิและเวลาสำหรับชิ้นงานที่เจือแต่ไม่สามารถสรุปเช่นเดียวกันได้กับกรณีไม่เจือเพราะมีชิ้นงานไม่ครบถ้วน ภายหลังจากการอบอ่อนค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของทุกชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นเช่นกันโดยชิ้นงานที่เจือดีบุกจะมีสัมประสิทธิ์ซีเบคที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่เจืออันเป็นผลมาจากความเป็นโลหะของดีบุก การอบที่ 860 องศาเซลเซียสจะเริ่มพบค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่เป็นลบที่บางตำแหน่งของการวัด ซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ซีเบคของการอบที่ 860 องศาเซลเซียสน้อยกว่าการอบที่ 750 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่ให้ค่า ZT สูงสุดคือชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุก โดยอบที่ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Project Title	The effect of annealing on electrical resistivity and Seebeck coefficient of Iron disilicide with 0.3% atom Sn	
Author	Mr.Jirath Limakaraungkul	ID. 5933413223
Department/Faculty	Department of Physics, Faculty of Science	
Academic Year	2019	
Advisor	Associate Professor Dr.Somchai Kiatgamolchai	

ABSTRACT

This project studied the effect of annealing on electrical resistivity and Seebeck coefficient of iron disilicide, with 0.3%atom Sn or without Sn, that was melted at a temperature of 1550 °C in an argon atmosphere. The annealing conditions were 750 °C for 1 hour or 2 hours and 860 °C for 1 hour or 2 hours. The electrical resistivity was measured from the 4-point-probe technique following the principle of Van der Pauw method. Seebeck coefficient was measured by the hot probe technique. Before annealing, the resistivity and Seebeck coefficient of iron disilicide without Sn is greater than that with Sn, the electrical resistivity being 4.89 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ and 2.24 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ and Seebeck coefficient being 1.15 $\mu\text{V}/\text{K}$ and 0.89 $\mu\text{V}/\text{K}$, respectively. After annealings, the resistivity of all samples increased. The resistivity of iron disilicide with Sn is greater than that without Sn which shows that Sn accelerates the eutectoid reaction, resulting in the increase of the β phase. By increasing either annealing temperature or annealing time, or both, the resistivity of iron disilicide with Sn will increase further. No similar conclusion for iron disilicide without Sn could be made due to the lack of additional specimen for comparison. After annealings, the Seebeck coefficient of all samples increases where that of iron disilicide with Sn is lower than that without Sn due to the metallic Sn. Annealing at 860 °C yields negative Seebeck coefficient at some positions which causes the average of Seebeck coefficient at 860 °C to be lower than that 750 °C. The iron disilicide without Sn being annealed at 750 °C for 2 hours shows the highest figure of merit.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการของโครงการผลของการอบอุ่นที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทั้งนี้เพราะได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลต่าง ๆ หลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. สมชาย เกียรติกมลชัย ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาในการจัดทำโครงการ ติดตามงาน และแก้ไขข้อบกพร่องตลอดการดำเนินโครงการ รวมถึงช่วยปรับปรุงการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นโครงการจนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ ประธานกรรมการสอบโครงการที่เสียสละเวลาส่วนตัวในการสอบโครงการวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อรพิน วรรณดิลก กรรมการสอบโครงการที่เสียสละเวลาส่วนตัวในการสอบโครงการวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกให้ใช้เครื่องตัดสาร

ขอขอบคุณ นาย สิทธิกร คำทอง และเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจในยามที่ประสบปัญหาทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปด้วยกัน

ผู้วิจัย

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน	6
2.3 หลักการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ แวน เดอ พาเว	7
2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยการใช้หัววัดร้อน	8
บทที่ 3 ขั้นตอนทำการทดลอง	
3.1 สารที่ใช้	9
3.2 วิธีการทดลอง	10
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	18
4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค	22
4.3 ตารางผลการทดลอง	27
บทที่ 5 สรุป	
5.1 ข้อสรุป	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
5.3 ปัญหาและอุปสรรค	31
5.4 แนวทางแก้ไข	32
เอกสารอ้างอิง	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการขับเคลื่อนของโลกปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน เนื่องจากความสำคัญดังกล่าวในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิธีมากมายในการเปลี่ยนรูปของพลังงานเพื่อนำมาใช้สอยอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเฉพาะการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิบนปลายด้านหนึ่งที่สูงกว่ากับปลายอีกด้านหนึ่งทำให้เกิดการสั่นของอนุภาคโฟนอน (Phonon) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron) จนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าได้ แต่ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับสารประกอบของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นๆ ตัวชี้วัดว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีคุณสมบัติดีหรือไม่ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสภาพนำความร้อน โดยในโครงงานนี้ได้ศึกษา สารประกอบของเหล็กและซิลิกอน ซึ่งมีคุณสมบัติโครงสร้างหนึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ คือ เฟสปีตา ($\beta - FeSi_2$) แต่ก็ยังมีปัญหาที่มีเฟสเอพซิลอน ($\epsilon - FeSi$) อยู่ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่ดีไม่เหมาะกับการใช้งาน การอบอ่อนมีผลช่วยเปลี่ยนโครงสร้างและคุณสมบัติของสารให้มีปริมาณเฟสเอพซิลอนลดลงและเพิ่มปริมาณเฟสปีตาได้ ดังนั้นจึงเป็นหัวข้อของโครงการนี้ที่ทำการศึกษาผลของการอบอ่อนของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุกที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบค

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแนวโน้มของสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก ร้อยละ 0.3 โดยอะตอมเทียบกับกรณีที่ไม่เจือ โดยศึกษาทั้งก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 750 และ 860 องศาเซลเซียส โดยอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

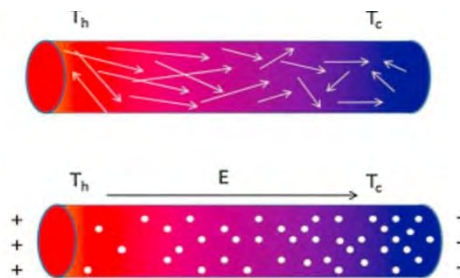
1. ทราบแนวโน้มของสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคก่อนอบและหลังอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ของสารไอรอนไดซัลไฟด์
2. นิสิตได้รับความรู้ ในการทำโครงการตั้งแต่เริ่มจนจบ ทักษะการใช้เครื่องมือวัดต่างๆ การโปรแกรม MATLAB และหลักการทำงานของโปรโตคอล GPIB

บทที่ 2

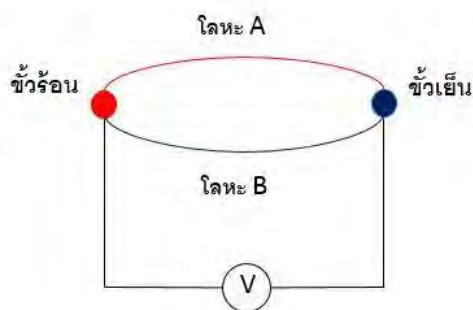
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ในโครงสร้างของของแข็งนั้น พลังงานความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยอาศัยการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็ง เรียกว่าโฟนอน (phonon) และความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกพาไปโดยประจุไฟฟ้าในเนื้อวัสดุ การเคลื่อนที่ของประจุอันเป็นผลมาจากกระแสความร้อนนี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) โดยโฟนอนที่เคลื่อนที่จากด้านที่อุณหภูมิสูงไปยังด้านที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะพาประจุไฟฟ้า (อิเล็กตรอนหรือโฮล) ไปด้วย เมื่อเวลาผ่านไปด้านที่อุณหภูมิต่ำจะมีความหนาแน่นพาหะที่สูงขึ้นในขณะที่ปลายด้านร้อนมีความหนาแน่นพาหะที่ต่ำลง ความแตกต่างของความหนาแน่นพาหะนี้ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสอง ความต่างศักย์นี้ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะขึ้นกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของปลายทั้งสองด้านของวัสดุ



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของโฟนอนและอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 วงจรไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วร้อนและขั้วเย็น

ค่าสัมประสิทธิ์ซีbeckนิยามจาก

$$S = \frac{dV}{dT} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1.1)$$

โดยที่ S คือ สัมประสิทธิ์ซีbeck (V/K)

ΔV คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถมีค่าสัมประสิทธิ์ซีbeckเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำนั้นถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีค่าลบ และสารกึ่งตัวนำชนิด P จะมีค่าบวก และค่าที่จะบ่งชี้ว่าสารนั้นเป็นสารเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีหรือไม่ คือ ค่าฟิกเกอร์ออฟเมอร์ริท (Figure of merit) ซึ่งหาจากสมการ (1.2)

$$Z = \frac{S^2}{\rho\lambda} \quad (1.2)$$

โดยเรานิยามค่า Power factor เท่ากับ

$$P = \frac{S^2}{\rho} \quad (1.3)$$

โดยที่ Z คือ ค่าฟิกเกอร์ออฟ เมอร์ริท (K^{-1})

S คือ สัมประสิทธิ์ซีbeck (V/K)

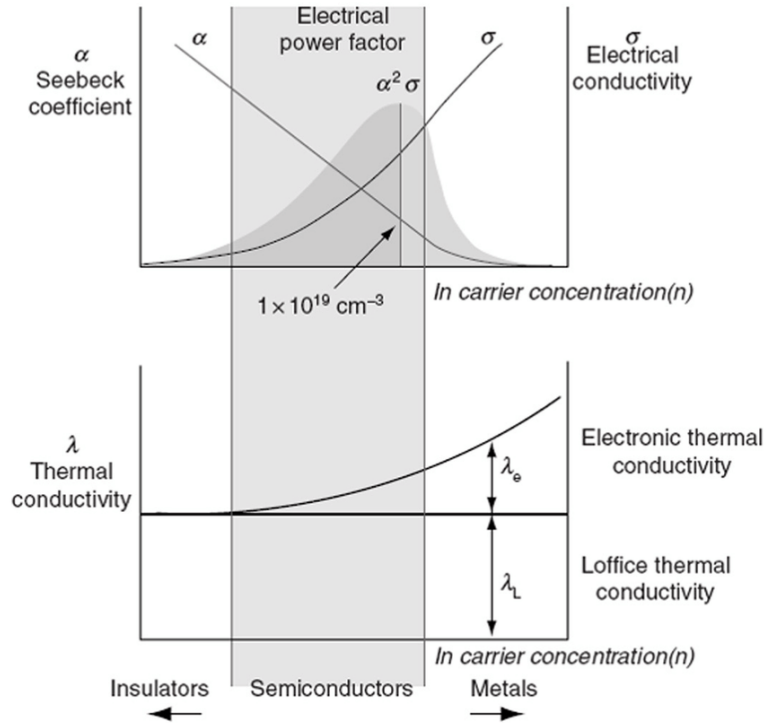
T คือ อุณหภูมิ (K)

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า ($1/\Omega \cdot m$)

λ คือ สภาพนำความร้อน (W/mK)

P คือ Power factor ($W/m^{-1} K^{-2}$)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)



รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้าในฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-dependence-of-electrical-conductivity-Seebeck-coefficient-power-factor-and_fig3_318669012

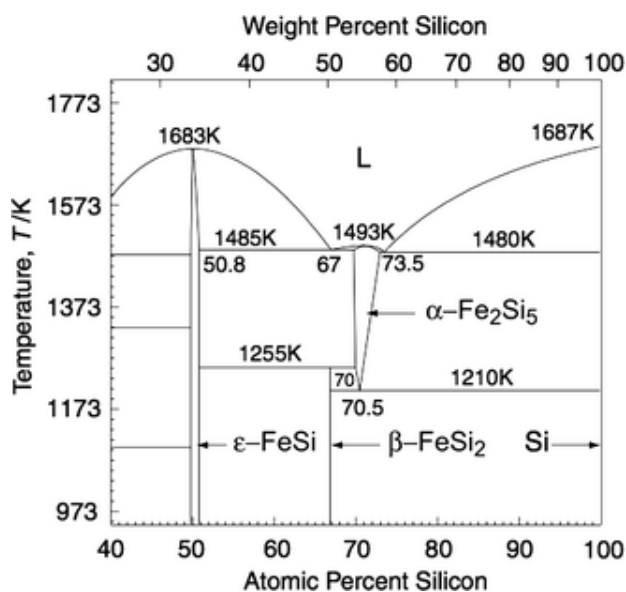
โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีสภาพนำไฟฟ้าที่สูง เพื่อให้เป็นแหล่งจ่ายไฟที่มีความต้านทานภายในน้อยที่สุด
2. สภาพนำความร้อนที่ต่ำ เนื่องจากไม่ให้อุณหภูมิถ่ายเทหากันง่ายจนเข้าสู่สมดุล
3. มีสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงเพื่อให้สร้างแรงดันไฟฟ้าที่สูงเมื่อสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟ

2.2 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน

สารประกอบระหว่างเหล็กและซิลิกอนในงานวิจัยนี้สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบได้ 3 เฟส คือ $\alpha - Fe_2Si_5$, $\beta - FeSi_2$ และ $\epsilon - FeSi$ โดยที่เฟส β มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งให้สมบัติที่ดีทางเทอร์โมอิเล็กทริก ในการทดลองนี้เป็นการนำเหล็กและซิลิกอนมาหลอมรวมกันที่ 1,550 องศาเซลเซียสในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอมตามลำดับและปล่อยให้เย็นตัวลง จากเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 พบว่าจะเกิดเฟส ϵ ก่อนกระจายเป็นผลึกเริ่มต้นขนาดเล็กและเนื้อสารส่วนที่เหลือเย็นตัวลงเป็นของแข็งที่มีสภาพเป็นเฟส α การจะเปลี่ยนสารที่เฟสทั้งสองผสมกันอยู่นั้นเป็นเฟส β จำเป็นต้องอาศัยการอบอ่อนภายหลัง โดยปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ มีดังนี้

1. Peritectoid reaction $\epsilon + \alpha \rightarrow \beta$ ที่ อุณหภูมิ 982 องศาเซลเซียส
2. Subsequent reaction $\epsilon + Si \rightarrow \beta$ ที่ อุณหภูมิ 955 องศาเซลเซียส
3. Eutectoid reaction $\alpha \rightarrow \beta + Si$ ที่ อุณหภูมิ 937 องศาเซลเซียส

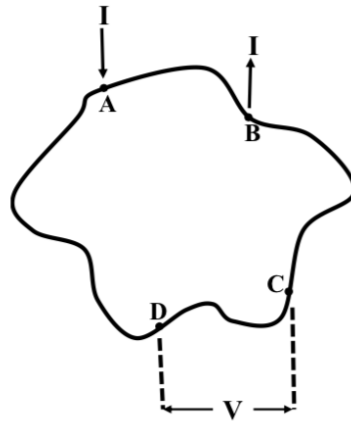


รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของเหล็กและซิลิกอน

https://www.researchgate.net/figure/Binary-phase-diagram-of-the-Fe-Si-system-6-indicating-the-newly-introduced-phase-of_fig1_322812934

2.3 หลักการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีวัดแบบแวน เดอ พาว (Van der Pauw)

การวัดแบบแวน เดอ พาว เหมาะสมที่ใช้กับสารตัวอย่างในโครงการนี้ที่มีลักษณะแผ่นบางเรียบ โดยการวัดแบบ แวน เดอ พาว ไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะรูปแบบการเดินทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นสาร โดยสารชิ้นตัวอย่างจะต้องมีลักษณะ แผ่นของแข็งบางเรียบ มีความหนาสม่ำเสมอ เนื้อสารต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ L. J. van der Pauw [11]



รูปที่ 2.5 การวัดแบบ Van der Pauw

โดยที่จะให้เข็มสัมผัสกับจุด A,B,C และ D เพื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านและวัดความต่างศักย์ของชิ้นสาร สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$\exp\left(\frac{-\pi d}{\rho} R_{AB,CD}\right) + \exp\left(\frac{-\pi d}{\rho} R_{BC,DA}\right) = 1 \quad (1.4)$$

เมื่อ $R_{AB,CD} = \frac{V_{CD}}{I_{AB}}$, $R_{BC,DA} = \frac{V_{CD}}{I_{AB}}$ และ $\bar{R} = \frac{(R_{AB,CD} + R_{BC,DA})}{2}$

โดยมีผลเฉลยเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \bar{R} F(Q) \quad (1.5)$$

โดยที่ d คือ ความหนาของชั้นสาร

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

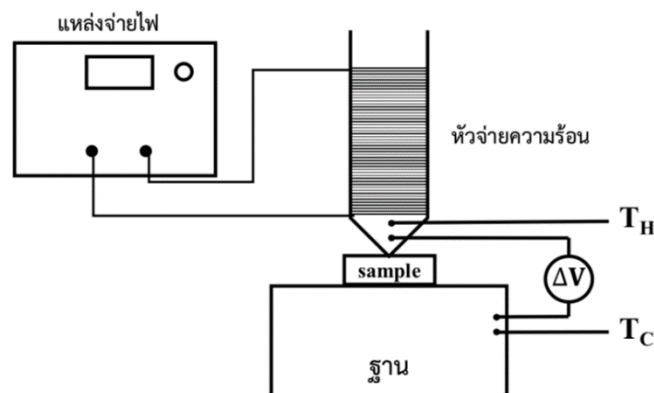
F คือ เฟคเตอร์แก้ค่า ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่า Q ค่า F นี้มีค่ามากกว่า 1 และสามารถหาได้จากสมการไม่เชิงเส้นต่อไปนี้

Q คือ อัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้าสองค่าที่วัดได้ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 เสมอ

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{F}{\ln 2} \cosh^{-1} \left(\frac{\exp\left(\frac{\ln 2}{F}\right)}{2} \right) \quad (1.6)$$

2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยใช้หัวจ่ายความร้อน ณ อุณหภูมิห้อง

วางชั้นสารที่ต้องการวัดบนฐานทองแดงและนำหัวจ่ายความร้อนที่ทำจากทองแดงเช่นกันกดบนชั้นสาร ทำการจ่ายกระแสเพื่อเพิ่มอุณหภูมิหัวจ่าย นำหัวจ่ายความร้อนสัมผัสกับชั้นสารเพื่อถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบนด้านทั้งสองของชั้นสาร ทำการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิและความต่างศักย์ไฟฟ้าของชั้นสารและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจากสมการ(1.1)



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์หัวจ่ายความร้อนและตัววัดศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาสัมประสิทธิ์ซีเบค

บทที่ 3

ขั้นตอนทำการทดลอง

3.1 สารที่ใช้

1. ผงเหล็กความบริสุทธิ์ 99.999%
2. ผงซิลิกอนความบริสุทธิ์ 99.998%
3. ผงดีบุกความบริสุทธิ์ 99.999%

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์
3. ถ้วยบดสาร
4. ถูมือน้อย
5. แม่พิมพ์หล่อเรซิน
6. ถ้วยอะลูมินา เคลือบด้วยผงโบรอนไนไตรด์
7. เตาเผา Lenton tube furnace model LTF 16/50/180
8. เครื่องล้างอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner)
9. เครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000
10. ไม้ตัดเคลือบผงเพชร 3 ขนาด
11. กระดาษทรายเบอร์ P240, P600, P1200
12. เวอร์เนียแคลิเปอร์ (Vernier Caliper)
13. ไมโครมิเตอร์ (micrometer)

3.3 เครื่องมือวัด

1. คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม Matlab
2. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบแวน เดอ พาว (Van der Pauw method)
3. เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค

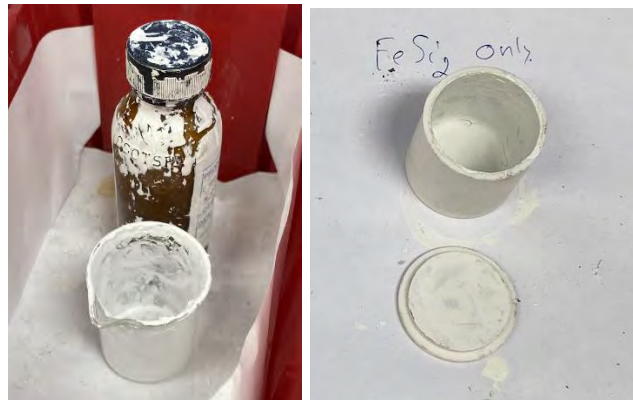
3.4 วิธีการทดลอง

1. เตรียมผงเหล็กความบริสุทธิ์ 99.999% และ ผงซิลิกอนความบริสุทธิ์ 99.998% โดยผสมในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอมตามลำดับ เจือด้วยดีบุกในอัตราส่วนร้อยละ 0.0 และ 0.3 โดยอะตอม (ในปฏิบัติการนี้เตรียมอย่างละ 2 ก้อนและ 3 ก้อนตามลำดับ) ในแต่ละครั้งการชั่งน้ำหนักสารจะใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์อะลูมิเนียมรองบริเวณที่ชั่งทุกครั้ง เทผงเหล็กลงในครกบดสาร ทำการบดสารทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นเวลาประมาณ 15 นาที



รูปที่ 3.1 การชั่งเตรียมผงเหล็กและซิลิกอน

2. ทาด้วยอะลูมินาด้านในด้วยสารโบรอนไนไตรด์ที่ผสมให้เป็นของเหลวเพื่อกันไม่ให้สารติดตัวถ้วยหลังจากเผา



รูปที่ 3.2 ถ้วยอะลูมินาที่ถูกทาด้วยสารโบรอนไนไตรด์

3. ทำการทดสอบจากครกบดสารลงในถ้วยอะลูมินา ทำการเคาะเบาๆเพื่อให้สารเรียงตัวกันแน่นขึ้นและอากาศระหว่างเม็ดสารน้อยลง



รูปที่ 3.3 ถ้วยอะลูมินาที่ใส่สารแล้ว

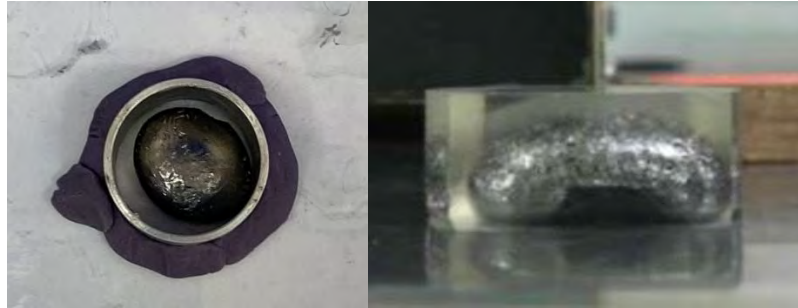
4. ใส่ถ้วยอะลูมินาที่มีสารไว้กึ่งกลางของเตาหลอม นำก้อนอะลูมินาโพมทรงระบอบปิดปลายท่อเพื่อกันไม่ให้ความร้อนออกจากระบบทั้งสองด้าน ทำการปิดระบบของเตาหลอมไม่ให้มีอากาศไหลเข้าและปั๊มอากาศออกโดยเครื่องปั๊มให้ความดันมีค่า 150 mbar หลังจากนั้นเปิดแก๊สอาร์กอนเข้าไปในท่อให้ได้ความดัน 1 bar แล้วทำการปั๊มและใส่แก๊สอาร์กอนใหม่ ทำแบบเดิม 10 รอบ เพื่อเจือจางออกซิเจนให้มากที่สุดโดยให้อาร์กอนแทนที่ จากนั้นต่อระบบแก๊สอาร์กอนให้วิ่งผ่านมิเตอร์วัดอัตราการไหล โดยให้อัตราการไหลที่ต้องการในที่นี้ใช้อัตราประมาณ 100-120 cc ต่อนาที



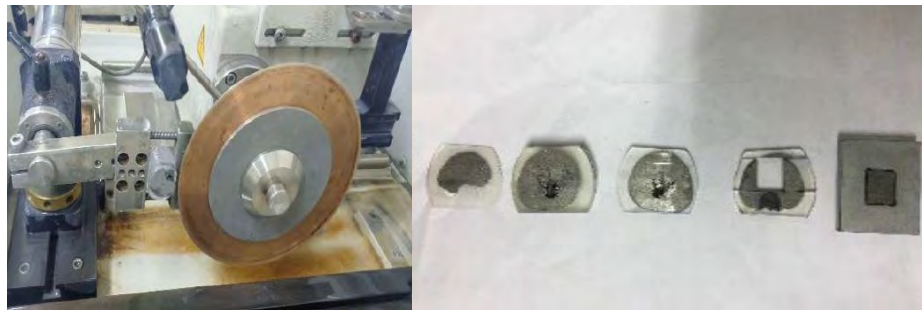
รูปที่ 3.4 ระบบเตาหลอมที่ใช้แก๊สอาร์กอน

5. หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยตั้งค่าให้อุณหภูมิภายในเตาหลอมเพิ่มขึ้น 8 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 800 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปจนถึง 1550 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงทีละ 5 องศาเซลเซียสต่อ

นาที่จนถึง 800 องศาเซลเซียสและทำการลดอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสต่อนาที่จนถึงอุณหภูมิห้อง นำสารที่ได้จากการหลอม มาหล่อเรซินขึ้นรูปเพื่อทำการตัด

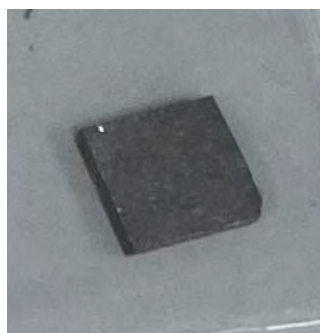


รูปที่ 3.5 สารที่ผ่านการหลอมและหล่อเรซิน



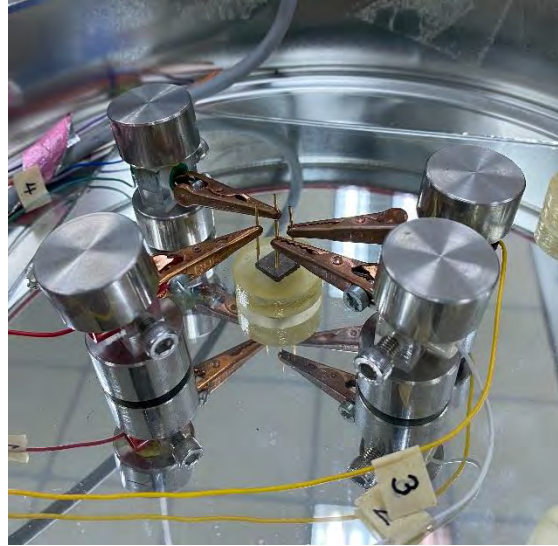
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดใบเพชรและชิ้นงานที่ถูกตัดตามขวาง

6. นำสารมาตัดด้วยเครื่องตัดใบเพชรให้ได้ ขนาด 1x1 เซนติเมตร และมีความหนา 2 มิลลิเมตร จากสาร 5 ก้อนจะได้ชิ้นงานทั้งหมด 7 ชิ้นงานเนื่องจากบางก้อนสามารถตัดออกมาได้หลายชิ้นงาน โดยจะได้เป็น 0.0% 3 ชิ้นงาน 0.3% 4 ชิ้นงาน

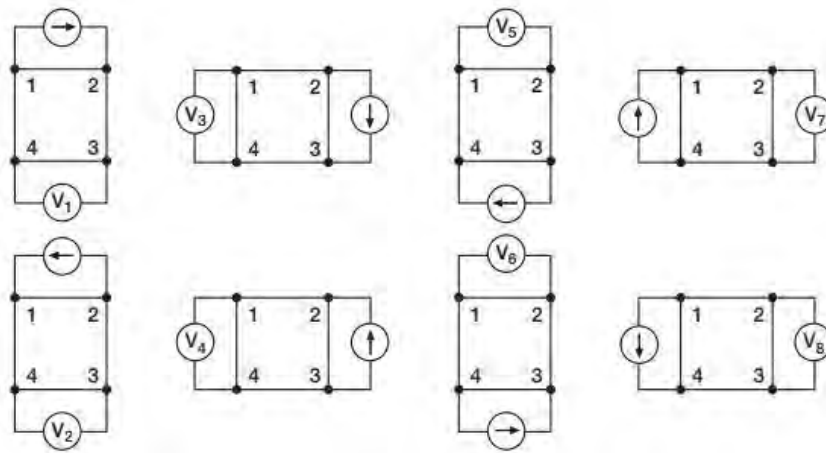


รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ถูกตัดให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร

7. นำชิ้นงานที่ตัดแล้วดังรูปที่ 3.6 มาวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักของ แวน เดอ พาว โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานและวัดค่าความต่างศักย์ โดย กระแส 1 ค่า วัดความต่างศักย์ 10 ค่า โดยเพิ่มกระแสขึ้นทีละ 1mA จาก 1mA จนถึง 7mA โดยมีการสลับทิศของกระแสด้วย ทำการวัดแบบนี้ 4 รูปแบบต่อด้าน ซึ่งถ้ารวมกลับทิศกระแสทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยวัดทั้งสองด้านของชิ้นงาน



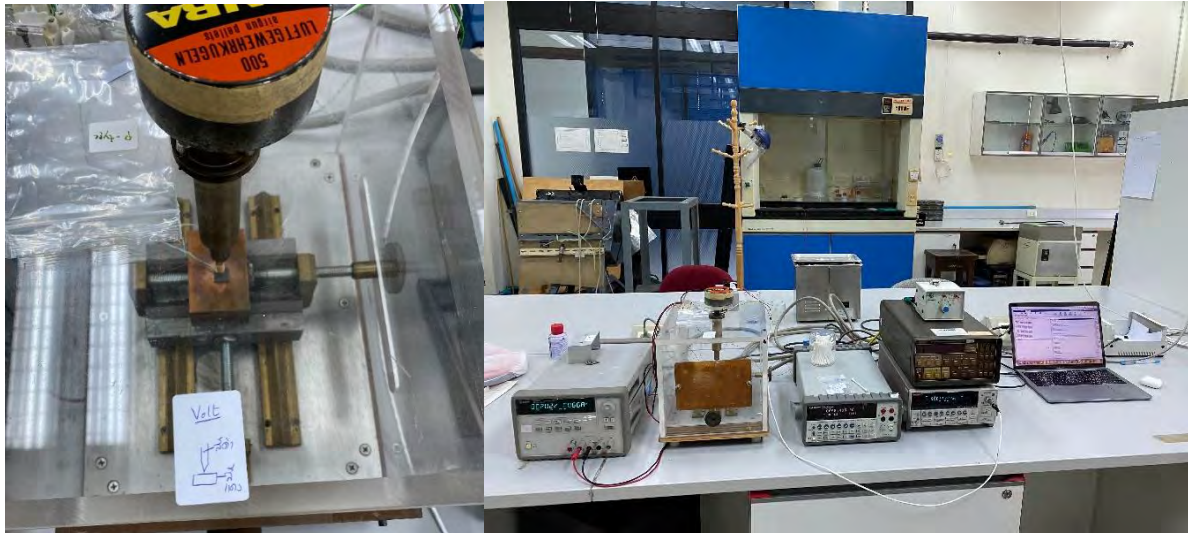
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 รูปแบบการเก็บข้อมูลของการวัดแบบแวน เดอ พาว

8. นำชิ้นงานมาวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคด้วยเครื่องหัวจ่ายความร้อน โดยอาศัยโปรแกรม Matlab ส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหัวจ่ายความร้อน นำหัวจ่ายความร้อนสัมผัสกับชิ้นงานซึ่งวางอยู่บนก้อนทองแดง วัดผลต่างของ

อุณหภูมิระหว่างด้านบนชิ้นงานกับด้านล่างชิ้นงานและวัดศักย์ตกคร่อมชิ้นงาน โดยเพิ่มความต่างศักย์ที่จ่ายให้หัวจ่ายความร้อนตั้งแต่ 0.2 โวลต์ทีละ 0.2 โวลต์ จนถึง 1.0 โวลต์เพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของหัวจ่ายความร้อน วัดผลต่างอุณหภูมิและศักย์ตกคร่อม 20 ค่า ต่อ 1 ค่าความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไป ทำการวัดชิ้นงานด้านละ 5 ตำแหน่งอย่างสุ่มทั้งสองด้าน



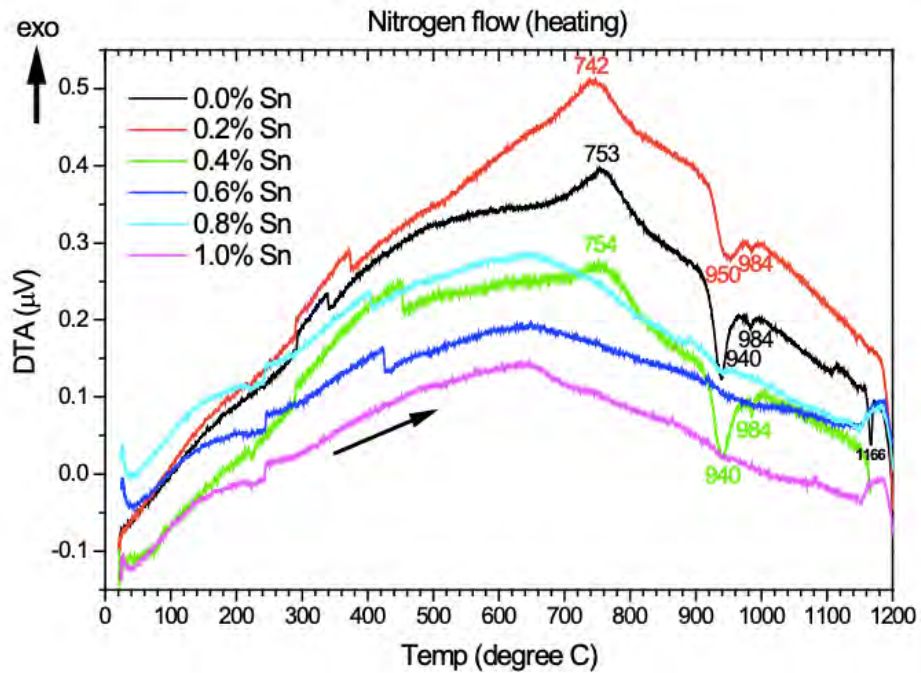
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

เงื่อนไขการเจือตีบุก	เจือด้วยตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม					ไม่เจือด้วยตีบุก			
ชิ้นงาน	#1A	#1B	#2	#3	Vinus	#1A	#1B	#2	Vinus
อุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อน	750°C 1 ชั่วโมง	750 °C 2 ชั่วโมง	ไม่อบ	860 °C 1 ชั่วโมง	860 °C 2 ชั่วโมง	750 °C 1 ชั่วโมง	750 °C 2 ชั่วโมง	ไม่อบ	860 °C 2 ชั่วโมง

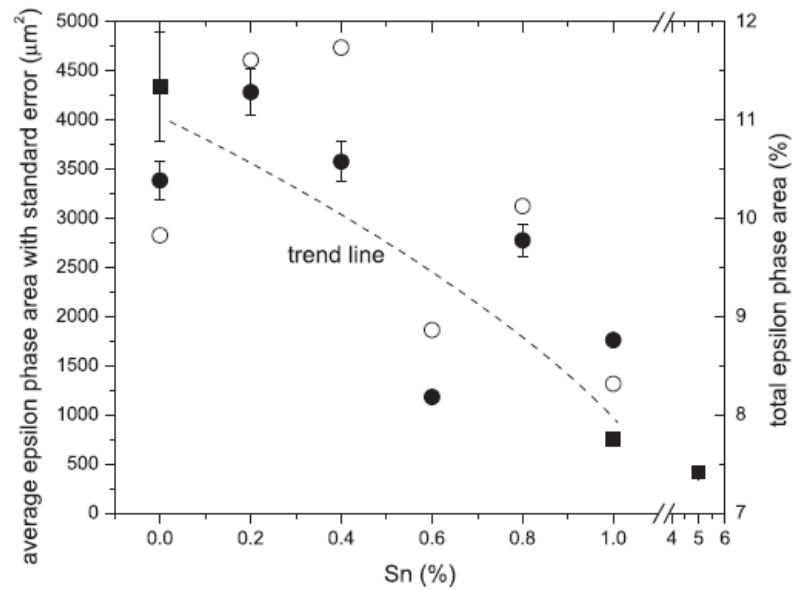
หลักการทำงานของการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิเตาในการอบอ่อน เตาสามารถใช้อัตราเพิ่ม/ลดอุณหภูมิสูงสุดที่ 8 °C ต่อนาทีโดยอุณหภูมิไม่เกิน 800 °C เมื่อเกินอุณหภูมินี้เตาจะสามารถใช้อัตราเพิ่ม/ลดอุณหภูมิสูงสุดที่ 5 °C ต่อนาที ทั้งในกรณีขาขึ้นและขาลง (ลดอุณหภูมิ)

โดยชิ้นงาน Vinus คือชิ้นงานของ วินัส เทคสมยา [8] ผู้ทดลองที่ทำการหลอมชิ้นงาน

เงื่อนไขการเลือกอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสในการอบอ่อนได้เลือกตามผลของค่า DTA รูปที่ 3.11 และ 860 องศาเซลเซียสจากงานวิจัยของ Y. Maeda [10] ในส่วนของเงื่อนไขที่เจือด้วยดีบุกที่ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ สมชาย เกียรติกมลชัย [9]



รูปที่ 3.11 สัญญาณ DTA (ถูกทำให้เรียบขึ้นโดยการเฉลี่ยแบบ 10 จุด) ของกระบวนการให้ความร้อน heating ในผง $FeSi_2$ -y%Sn เมื่อ $y = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 1.0 ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของงานวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัย [9]



รูปที่ 3.12 แสดงถึงขนาดพื้นที่ ϵ โดยเฉลี่ยต่อเปอร์เซ็นต์ของดีบุกจากโดยจุด (■, ●) แสดงถึงพื้นที่เฉลี่ยของ ϵ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์อะตอมดีบุกและ (○) แสดงถึงร้อยละของ ϵ ทั้งหมดต่อพื้นที่ทั้งหมดของภาพถ่าย SEM ของงานวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัย [9]



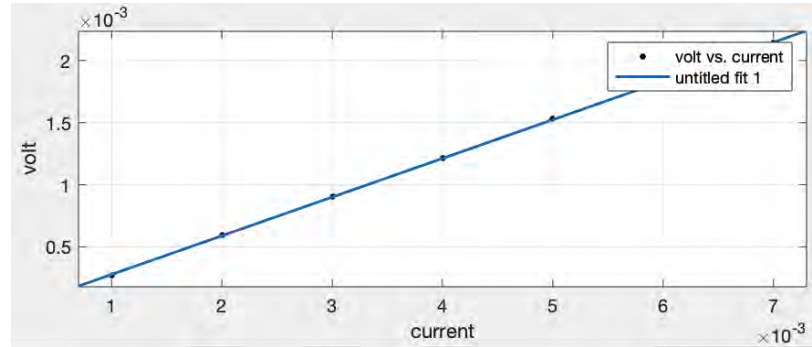
รูปที่ 3.12 ชิ้นงานหลังจากการอบอ่อน

10. ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของชิ้นงานที่ผ่านการอบทั้งหมดตามขั้นตอนที่ 7. และ 8.

3.5 วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทานไฟฟ้า

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 0.3115 (0.3093, 0.3138)$
 $p2 = -3.37e-05 (-4.385e-05, -2.356e-05)$

Goodness of fit:
 SSE: 1.09e-10
 R-square: 1
 Adjusted R-square: 1
 RMSE: 4.67e-06



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างผลการฟิตด้วยสมการเส้นตรงด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งแสดงความคลาดเคลื่อนของความชัน

- นำข้อมูลจากการ fitting ของ Matlab จากรูปที่ 3.10 มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทานไฟฟ้า (ΔR) เช่น $\frac{(0.3138-0.3093) \times 10^{-3}}{2}$ โดยนำค่าความคลาดเคลื่อนของความชันทั้งกระแสต้านลบและกระแสด้านบวกมาเฉลี่ยโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย

- นำค่าความคลาดเคลื่อนมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทานไฟฟ้าผ่านสมการ

$$\frac{\Delta p_i}{p_i} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_i}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_i}{L_i}\right)^2}$$

โดยที่ L คือความหนาของชิ้นงาน เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนสภาพต้านทานไฟฟ้าแต่ละตำแหน่งทั้งหมด 8 ค่ามาเฉลี่ยจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนข้อมูลเฉลี่ย

3.6 วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

ใน 1 ชิ้นงานจะวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคได้ทั้งหมด 10 ค่า โดยด้านละ 5 ค่า ทั้งหมด 2 ด้าน

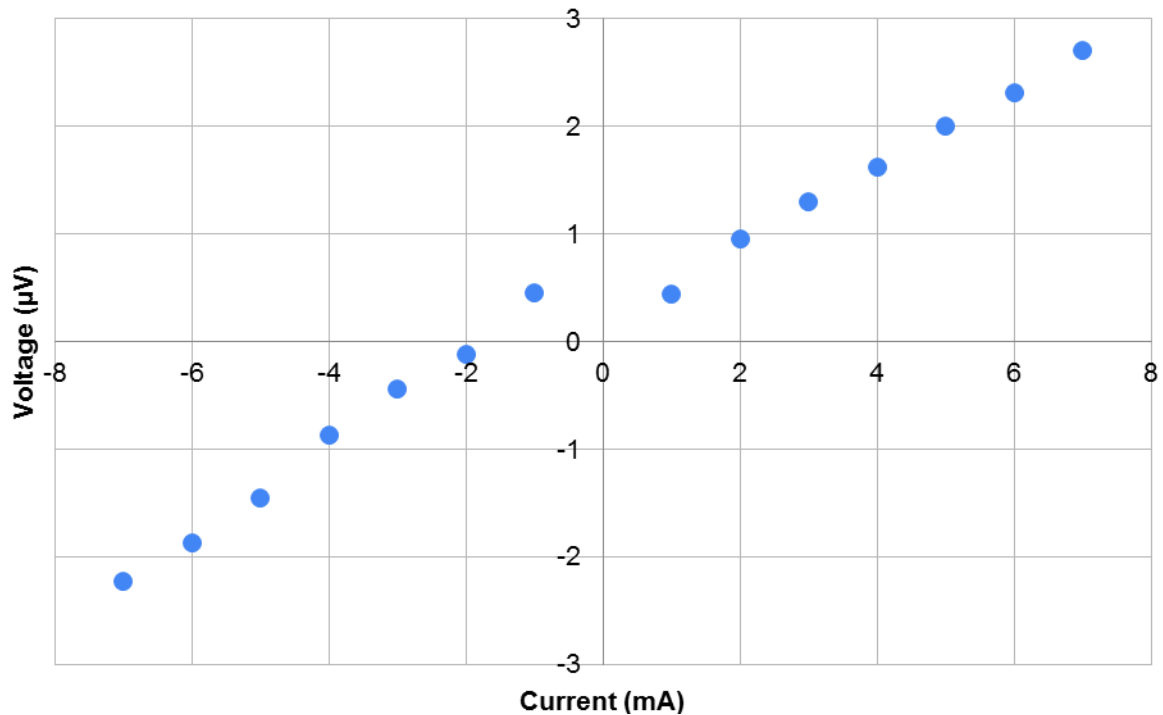
กำหนดให้ $S_i \pm \Delta S_i$ คือค่าที่วัดได้ที่ตำแหน่ง i

โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (S_i - \bar{S})^2}{10 \times 9}}$ และ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $\frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta S_i}{10}$

บทที่ 4

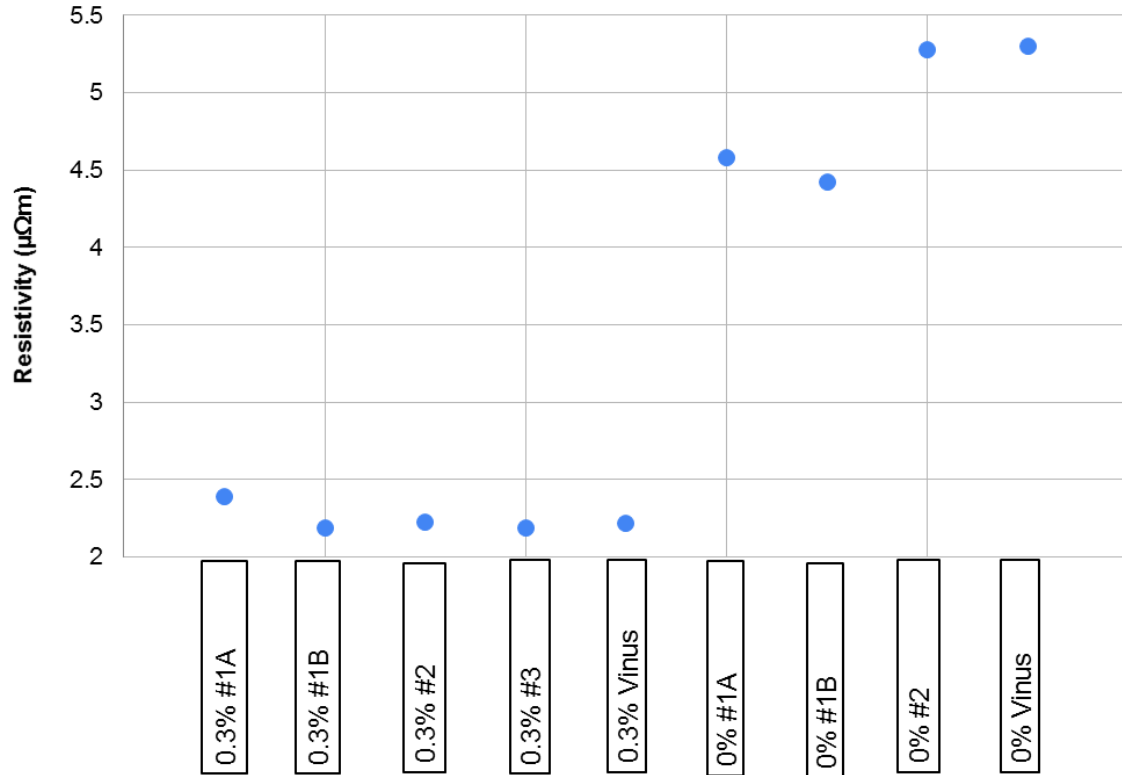
ผลการทดลอง

4.1 ผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง



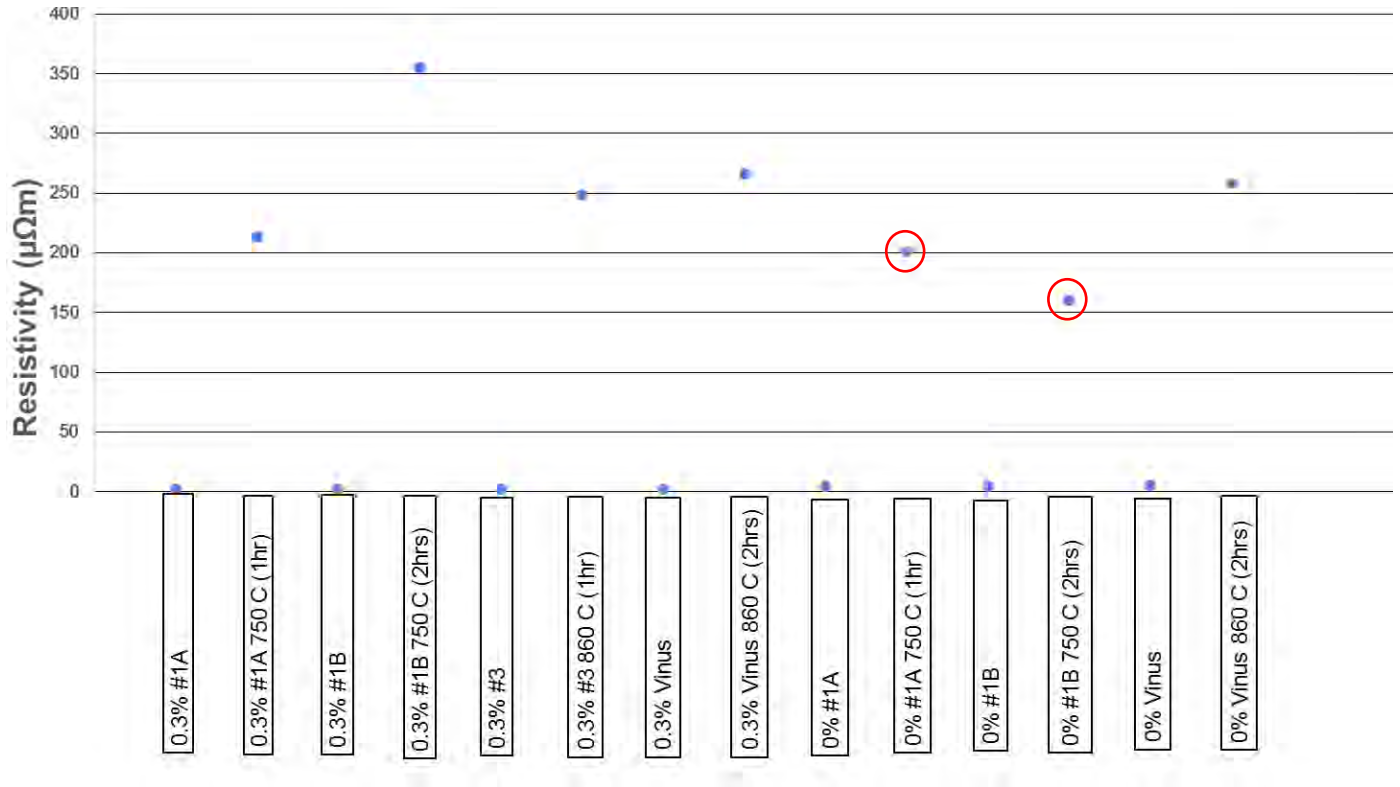
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของสารไอออนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วย ดีบุกเพื่อคำนวณหาความต้านทานในแต่ละรูปแบบของการวัดแบบแวน เดอ พาเว

จากรูปที่ 4.1 พบว่ากราฟมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์มแต่ในการวัดบางครั้งจะเกิดปัญหาตามรูปคือจุดข้อมูลทั้งหมดไม่ได้เรียงตัวเป็นเส้นตรงเดียวกันโดยการวัดในแต่ละทิศของกระแส กระแสจะถูกเพิ่มจากศูนย์เสมอ ทำให้จุดข้อมูลเกิดความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเลือกที่จะคำนวณความต้านทานในแต่ละทิศก่อนแล้วจึงนำมาเฉลี่ย



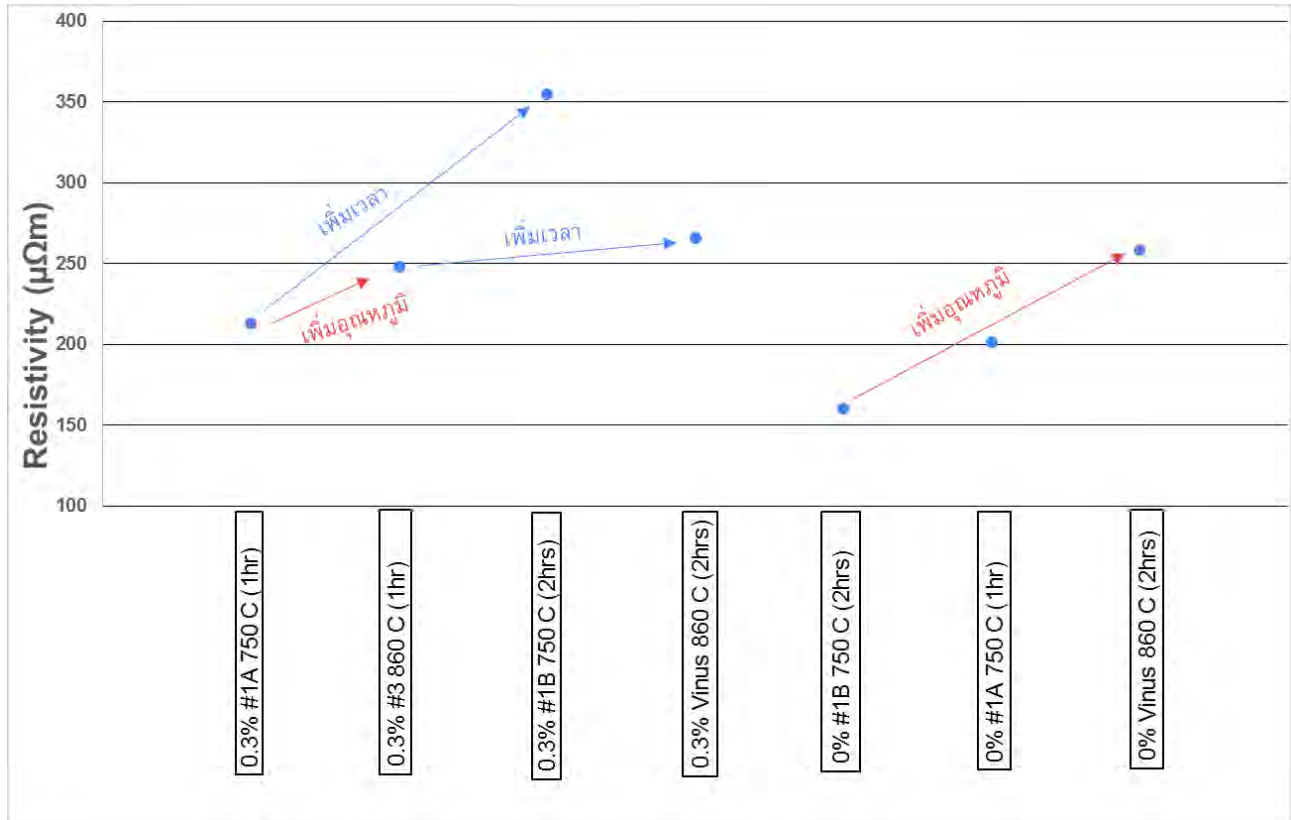
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับชิ้นงานในกรณีที่เจือด้วยดีบุกและไม่เจือ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าชิ้นสารที่เจือด้วยดีบุกมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าชิ้นสารที่ไม่เจืออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเจือดีบุกซึ่งเป็นโลหะทำให้สารไอรอนไดซัลไฟด์มีความเป็นโลหะมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของแต่ละชิ้นงาน ทั้งกรณีที่เจือด้วยดีบุกและแบบที่ไม่เจือ และกรณีก่อนอบอ่อนและหลังอบอ่อน

จากรูปที่ 4.3 พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของทุกกรณีมีค่าสูงขึ้นหลังจากการอบอ่อน โดยสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้และเวลาที่ใช้ ซึ่งคาดว่าเนื่องเกิดปฏิกิริยา eutectoid ซึ่งเฟส α มีการสลายตัวให้เฟส β และ Si ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำทั้งคู่ (เฟส α และ ϵ มีสมบัติเป็นโลหะ) ยกเว้นกรณีจุดที่ 10 เทียบกับจุดที่ 12 ซึ่งมีการอบที่นานขึ้นแต่กลับให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า

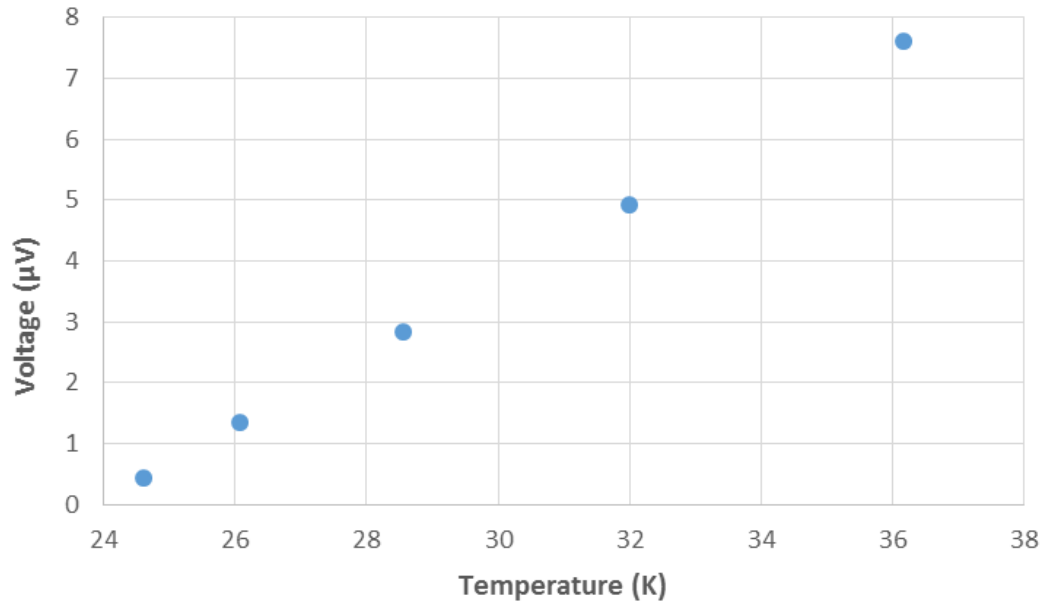


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีที่เจือด้วยดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมและแบบไม่เจือ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่เงื่อนไขการอบเดียวกันภายหลังจากการอบอ่อน ชิ้นงานที่เจือด้วยดีบุกมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มากกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือ ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัย [9] ที่ว่าดีบุกช่วยเร่งปฏิกิริยา eutectoid ทำให้สร้างเฟส β ได้มากขึ้นดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มากขึ้น (สภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น)

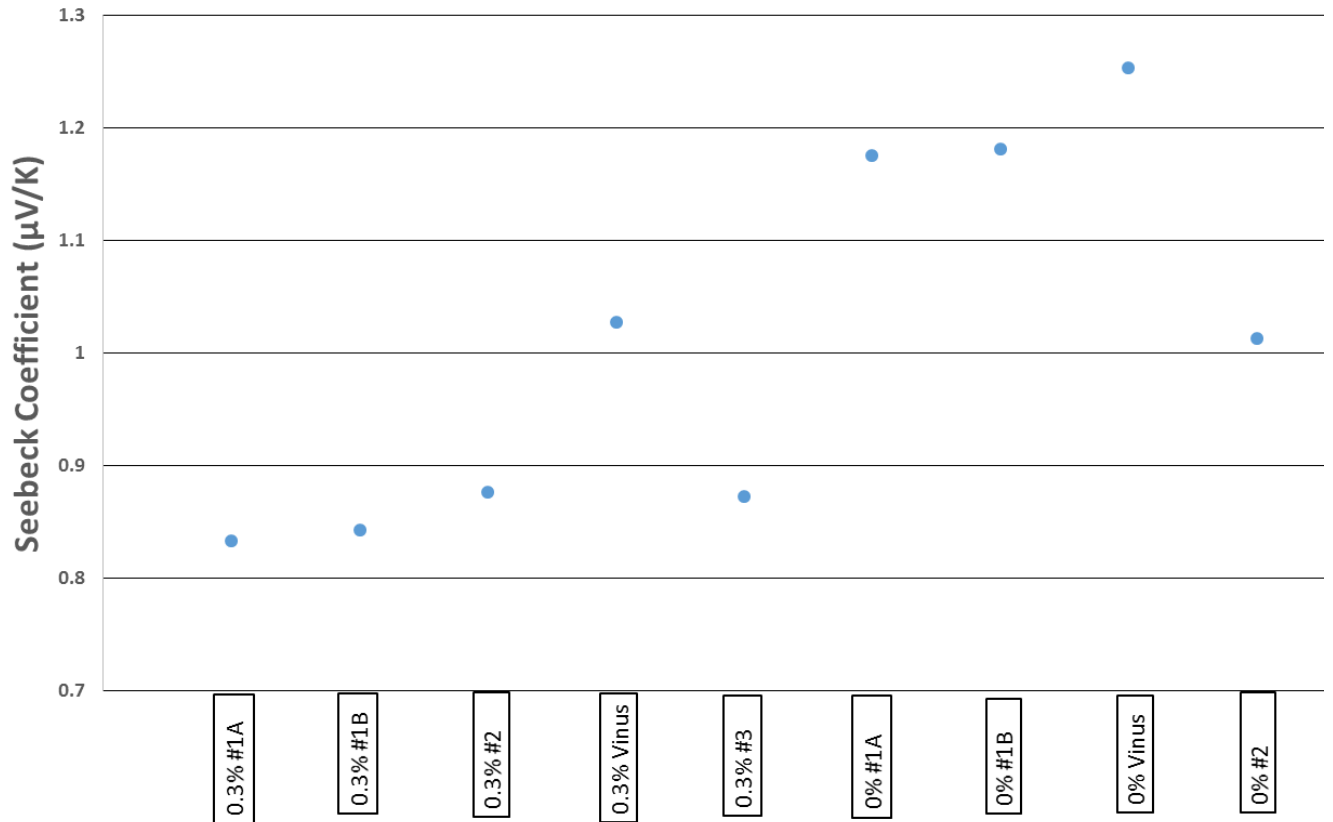
ชิ้นงานที่เจือดีบุกจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบดังแสดงในจุดข้อมูล 4 จุดแรกของรูปที่ 4.4 แต่สำหรับชิ้นงานที่ไม่เจือซึ่งมีจุดข้อมูลจำนวน 3 จุดนั้นกลับพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานที่อบที่ 750 องศาเซลเซียสนาน 2 ชม มีค่าน้อยกว่าการอบที่ 1 ชม ในขณะที่การอบนาน 2 ชม ที่ 860 องศาเซลเซียสให้ค่าสูงกว่าการอบที่ 1 ชม ซึ่งสอดคล้องกับกรณีทั้งหมดของชิ้นงานที่เจือดีบุก ดังนั้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนสำหรับชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุก

4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิห้อง



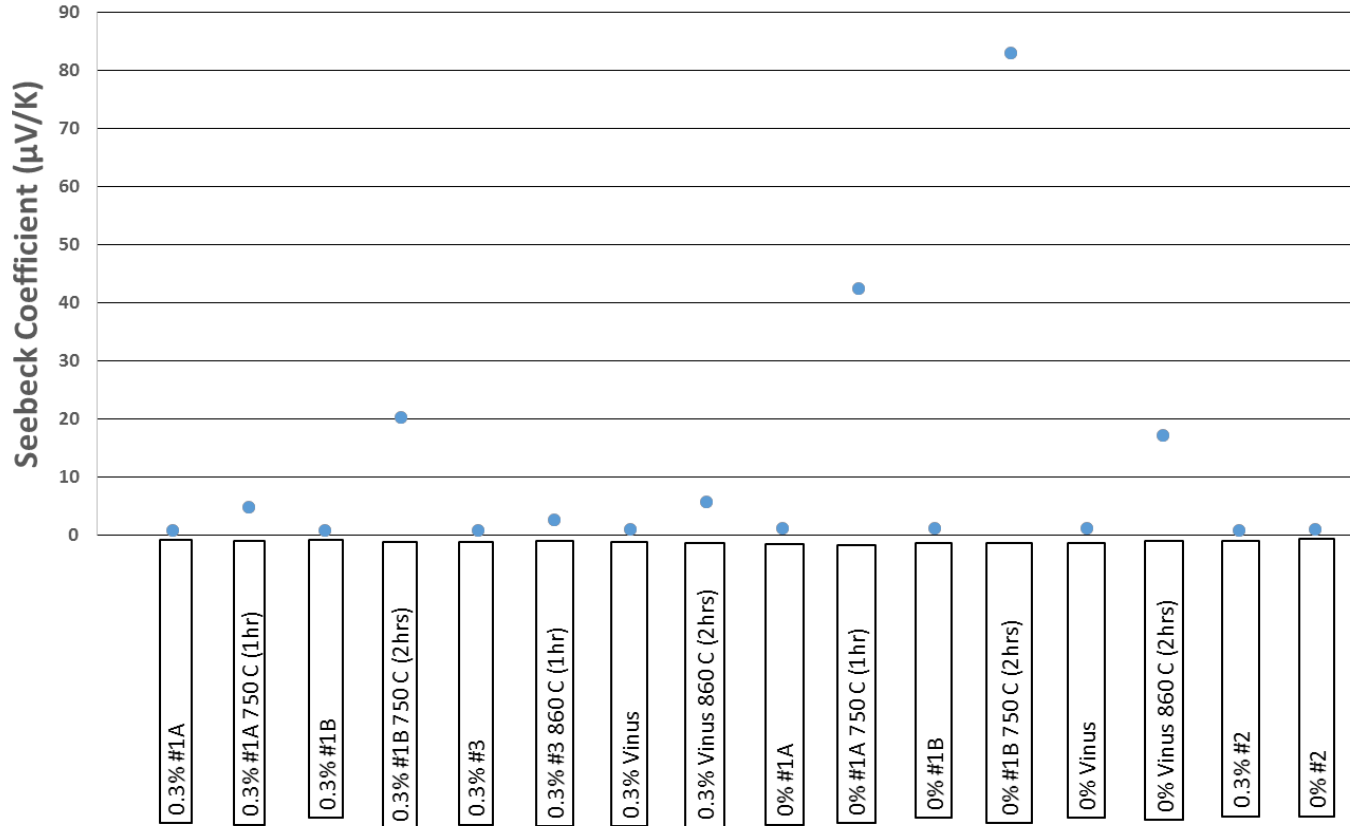
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของหัวจ่ายความร้อน

จากรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้านร้อนมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับสมการของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค คือ $S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$ (เนื่องจากอุณหภูมิด้านเย็นมีค่าคงตัวเพราะฐานเป็นก้อนทองแดงขนาดใหญ่) สำหรับระบบการวัดที่สร้างไว้ ถ้าความชันของกราฟเป็นบวกให้แปลว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นบวกและเป็นสารชนิด p-type ในทางกลับกันถ้าความชันเป็นลบค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคตีความหมายความเป็นสารชนิด n-type



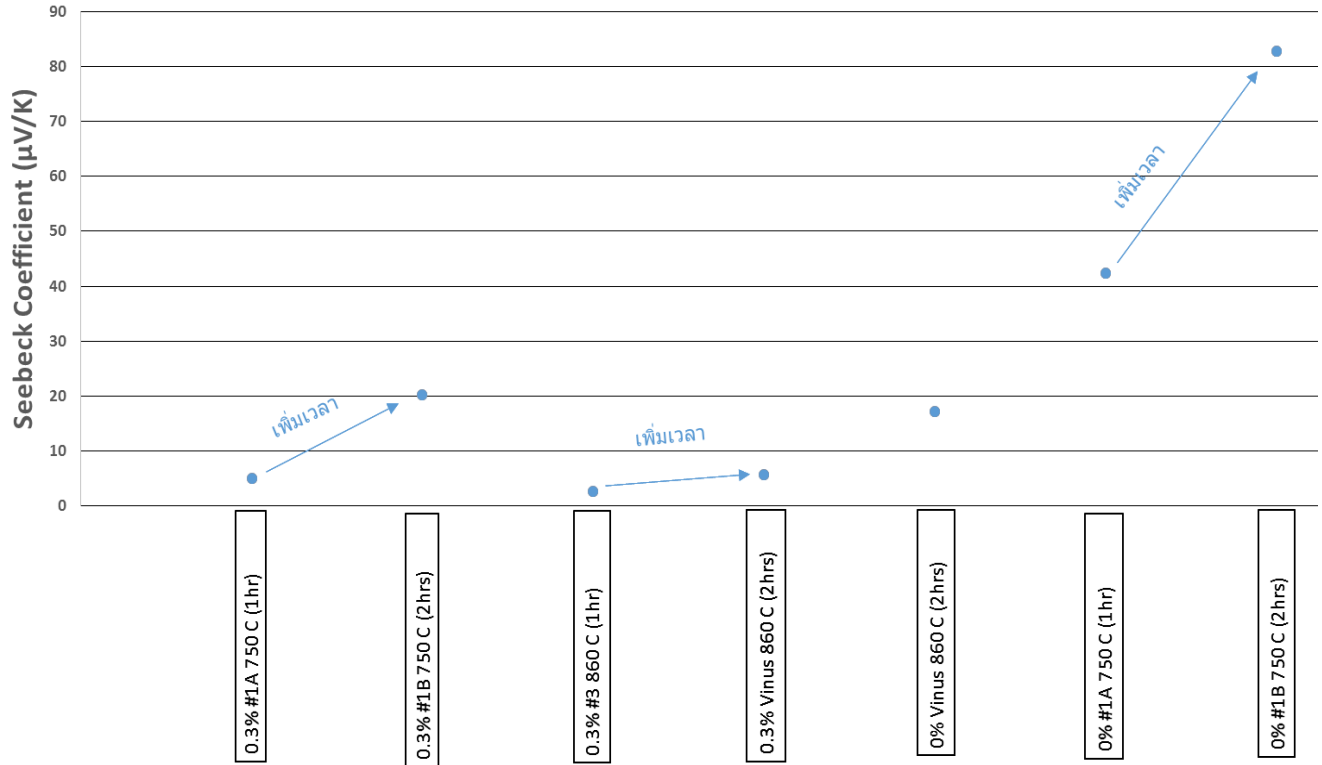
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเทียบกับสารตัวอย่างชนิดต่างๆในกรณีที่ไม่เจือด้วย ดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมและแบบที่ไม่เจือ ก่อนอบ

จากรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟก่อนอบ ได้แนวโน้มว่าชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุกมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูงกว่าชิ้นงานที่เจือด้วยดีบุกและมีแถบความผิดพลาดที่น้อยมากโดยมีขนาดใกล้เคียงกับสัญลักษณ์จุดข้อมูลบนกราฟ เนื่องจากการเจือดีบุกลงไปชิ้นงานเพิ่มความเป็นโลหะให้กับสารไอรอนไดซัลไฟด์ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุที่มีสถานะเป็นโลหะจะน้อยกว่าวัสดุที่มีสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำ และจะเห็นว่าชิ้นงานที่ตัดออกมาจากสารก้อนเดียวกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่เกือบจะเท่ากัน เช่น ชิ้นงาน 0.3% #1A กับ ชิ้นงาน 0.3% #1B และ ชิ้นงาน 0% #1A กับ ชิ้นงาน 0% #1B



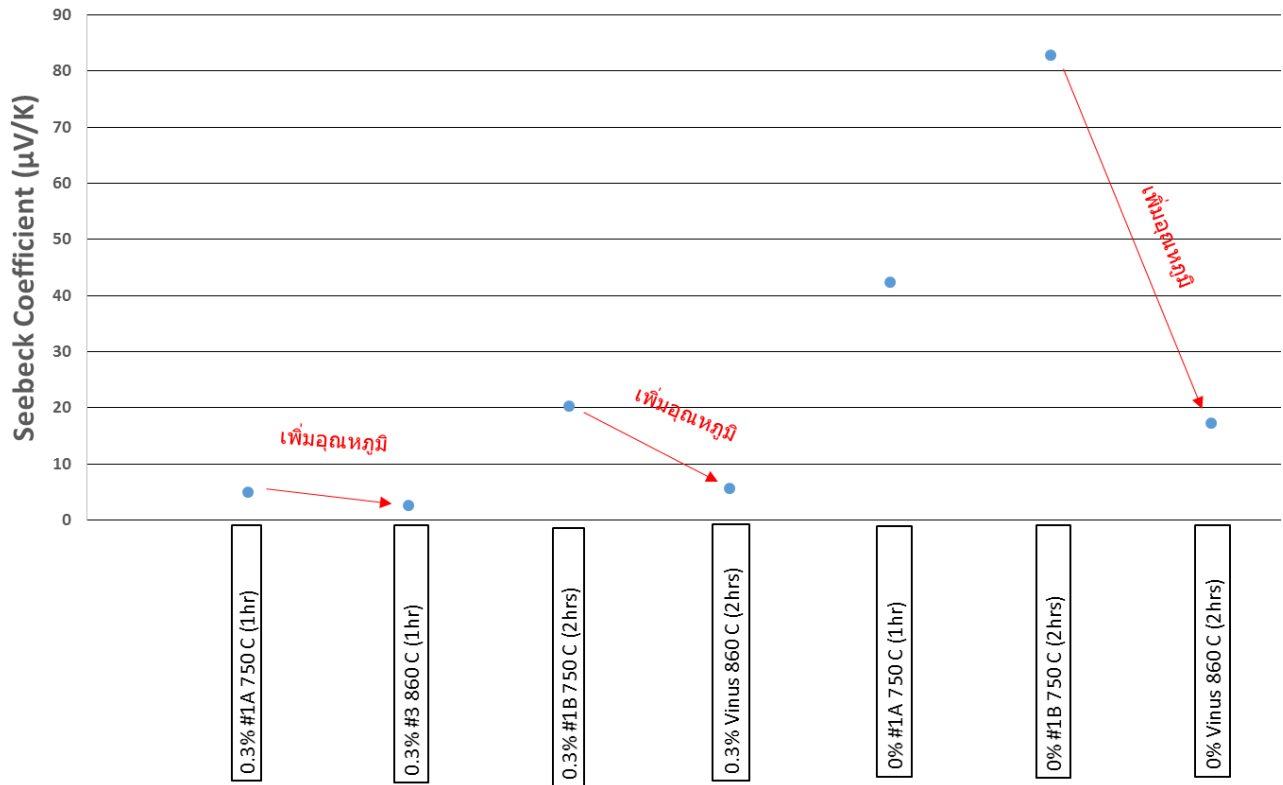
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์ซีเบคของชิ้นงานต่าง ๆ เปรียบเทียบก่อนอบกับหลังอบ

จากรูปที่ 4.7 พบว่า หลังอบอ่อนชิ้นงานมีแนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นค่าบวก



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์หลังอบอ่อนในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันชิ้นงานที่อบอ่อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมากกว่าชิ้นที่อบแค่ 1 ชั่วโมงทั้งในกรณีที่เจือด้วยดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมและแบบไม่เจือ และในกรณีที่ไม่มีเจือพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงกว่าแบบเจือด้วยดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่ว่ามีเจือซึ่งมีความเป็นโลหะน้อยกว่าย่อมมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงกว่าแบบเจือ โดยการที่อบอ่อนนานกว่าหมายถึงสารภายในชิ้นงานมีการเกิดปฏิกิริยาที่ยาวนานกว่าชิ้นงานที่อบอ่อนในระยะเวลาที่น้อยกว่า



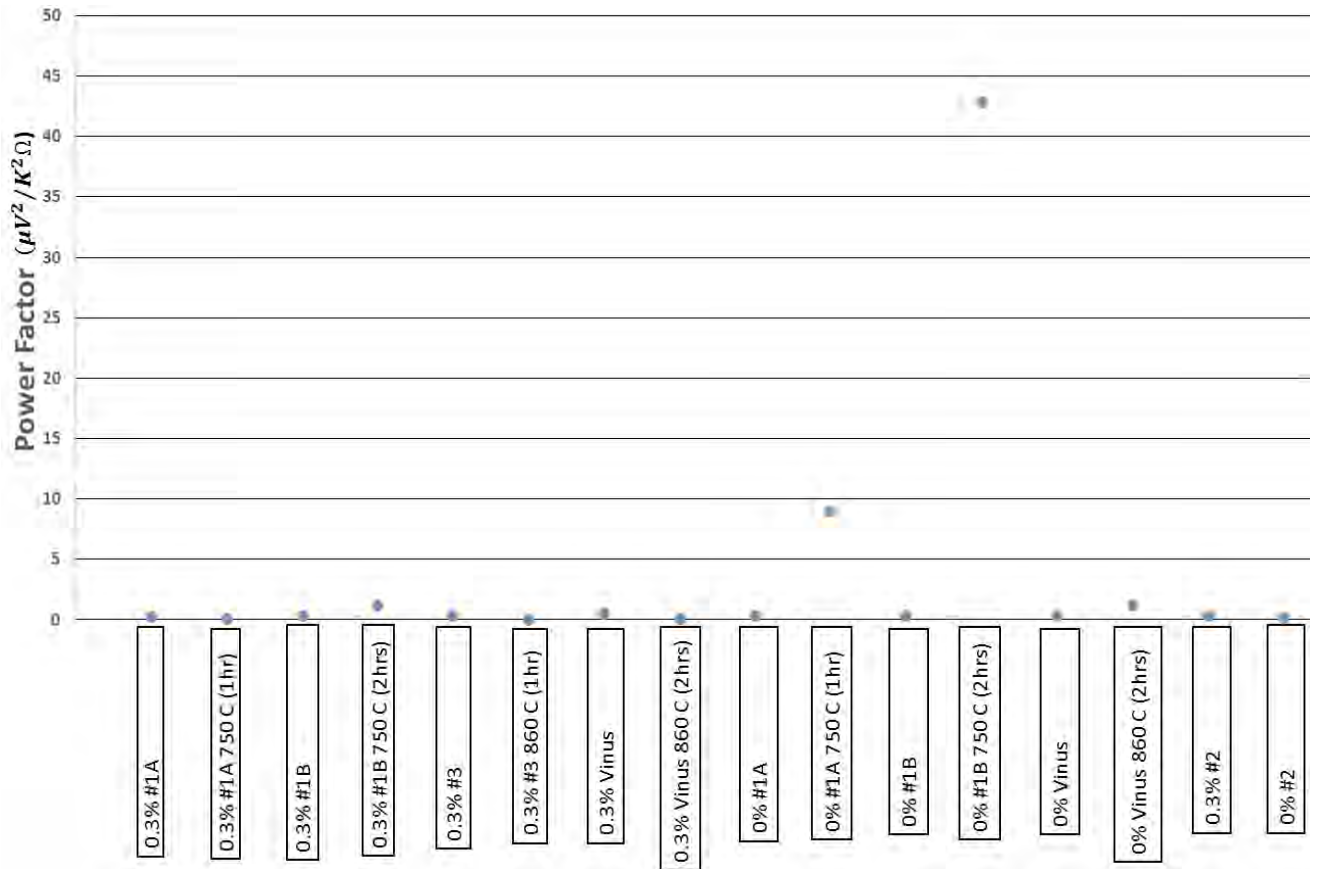
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบอ่อนที่ใช้เวลาการอบเท่ากันกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์หลังอบอ่อนในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 860 องศาทั้ง 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคน้อยกว่าชิ้นงานที่อบด้วยอุณหภูมิ 750 ในระยะเวลาเท่ากัน โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนพบว่าในบางจุดที่วัดได้มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นลบ โดยพบมากในชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียสจากการวัด 10 ครั้ง จะพบประมาณ 3-4 รอบ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของการอบที่อุณหภูมิ 860 องศาเซียสซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าบวกและลบจึงมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่ากรณีอบที่ 750 องศาเซลเซียสซึ่งให้ผลการวัดที่เป็นค่าบวกทุก ๆ จุดที่วัด ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยของ Y. Maeda [10] ที่ว่าเฟส β มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นลบ

ชิ้นงานหลังอบอ่อนที่ไม่เจือด้วยดีบุกมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มากกว่าชิ้นงานที่เจือด้วยดีบุกทุกกรณี และเนื่องจากผลสภาพต้านทานไฟฟ้าบ่งบอกว่าชิ้นงานที่เจือดีบุกหลังอบจะมีการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือซึ่งได้ข้อสรุปว่าเป็นเพราะดีบุกช่วยเร่งการเกิดเฟสบีตาจากปฏิกิริยายูเทคทอยด์ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ซีเบคไม่มาก (เพราะเป็นการเฉลี่ยของค่าบวกและลบ) จึงเป็นผลมาจากการมีปริมาณเฟสบีตาที่มากกว่าชิ้นอื่นนั่นเอง

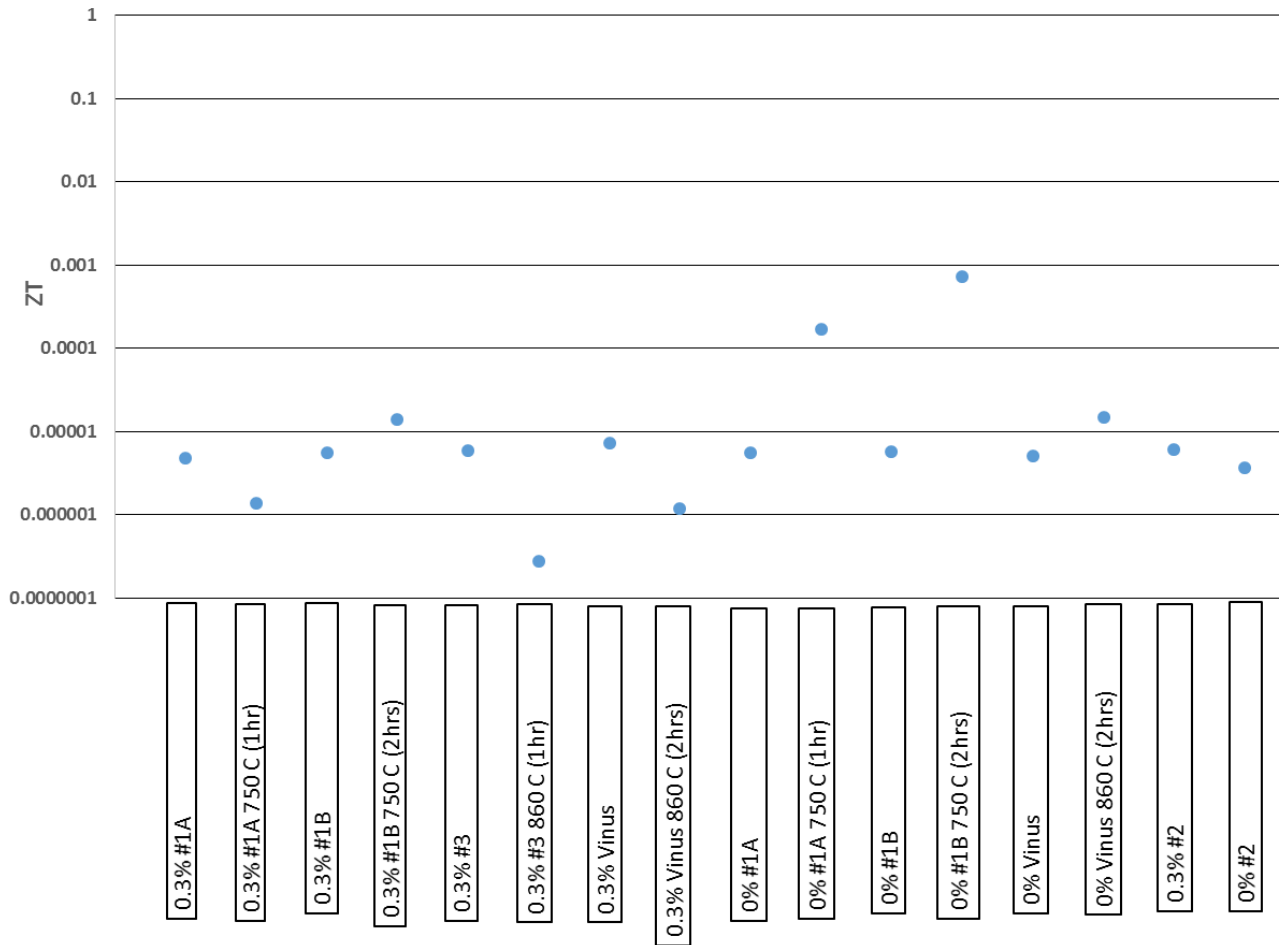
ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สัมประสิทธิ์ซีเบค และ Power factor ณ อุณหภูมิห้อง

ชิ้นสารตัวอย่าง	$\rho \pm \Delta\rho$ ($\mu\Omega\text{m}$)	$S \pm \Delta S$ ($\mu\text{V}/\text{K}$)	$P \pm \Delta P$ ($\mu\text{V}^2/\Omega\text{K}^2$)
0.3% #1A	2.388±0.01	0.83±0.01	0.29±0.031
0.3% #1A 750 C (1hr)	213.41±1.45	4.93±0.44	0.11±0.18
0.3% #1B	2.18±0.003	0.84±0.02	0.33±0.05
0.3% #1B 750 C (2hrs)	354.93±0.01	20.3±2.03	1.16±0.19
0.3% #3	2.18±0.004	0.87±0.02	0.35±0.04
0.3% #3 860 C (1hr)	248.23±1.14	2.63±0.40	0.03±0.3
0.3% Vinus	2.22±0.04	1.03±0.02	0.48±0.03
0.3% Vinus 860 C (2hrs)	265.79±1.60	5.69±0.29	0.12±0.10
0.0% #1A	4.58±0.005	1.18±0.03	0.30±0.05
0.0% #1A 750 C (1hr)	201.28±2.80	42.4±1.43	8.90±0.07
0.0% #1B	4.42±0.01	1.18±0.04	0.32±0.06
0.0% #1B 750 C (2hrs)	160.34±3.90	82.8±1.22	42.8±0.04
0.0% Vinus	5.30±0.007	1.25±0.02	0.30±0.04
0.0% Vinus 860 C (2hrs)	258.24±0.68	17.18±1.28	1.14±0.15
0.3% #2	2.23±0.004	0.877±0.01	0.35±0.03
0.0% #2	5.27±0.009	1.01±0.02	0.19±0.03



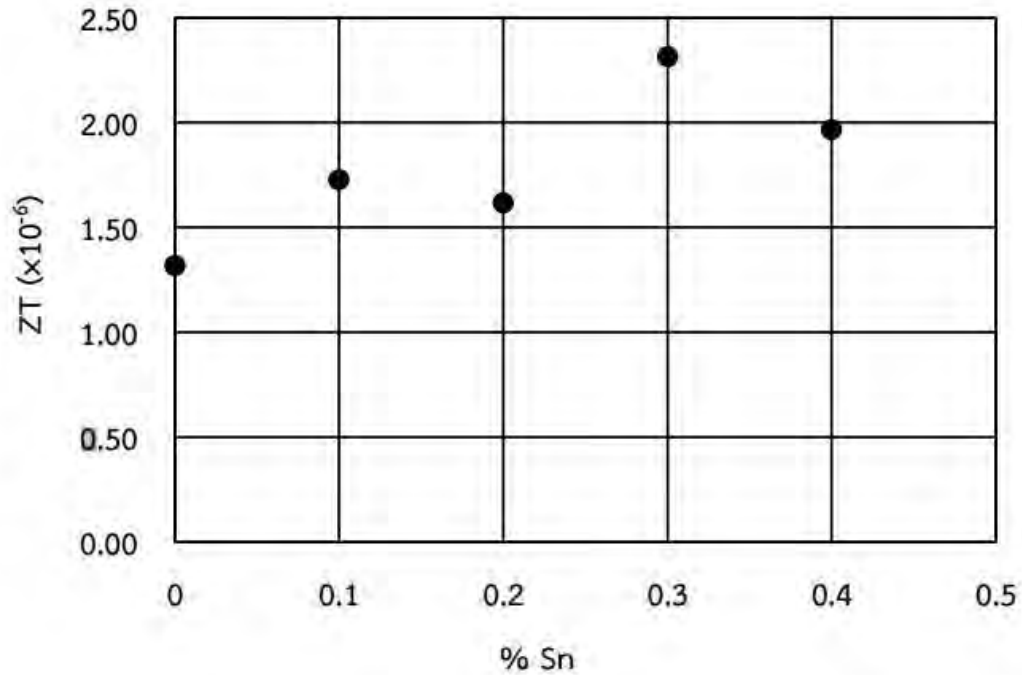
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพาวเวอร์เฟคเตอร์ของสารไอรอนไดซัลไฟด์ก่อนและหลังอบอ่อนในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าค่าพาวเวอร์เฟคเตอร์ของชิ้นงานที่ไม่ได้เจือด้วยดีบุกมีแนวโน้มมากกว่าชิ้นงานที่เจือด้วยดีบุกและค่าพาวเวอร์เฟคเตอร์สูงสุดของชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุกและอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 กราฟ log-scale แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า dimensionless figure of merit ของสารไอรอนไดออกไซด์ก่อนและหลังอบอ่อนในกรณีต่างๆ

ค่า dimensionless figure of merit (ZT) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1.2 โดยใช้ข้อมูลสภาพนำความร้อนจากรายงานของ สิทธิกร คำทอง [12] แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุกและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ให้ค่า ZT สูงที่สุด ชิ้นงานที่เจือด้วยดีบุกมีค่า ZT ที่มีแนวโน้มส่วนใหญ่ลดลงจากการอบอ่อน ในทางกลับกันชิ้นงานที่ไม่เจือด้วยดีบุกมีแนวโน้มค่า ZT ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า dimensionless figure of merit กับปริมาณร้อยละของ ดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์โดยใช้สภาพต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสของ วินัส เทศมยา [8]

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า dimensionless figure of merit ของชิ้นสารเดิมของ วินัส เทศมยา [8] โดยผู้ทดลองวัดได้มีค่าเท่ากับ 5.1×10^{-6} ซึ่งมากกว่าที่วัดโดยวินัส เทศมยา ที่มีค่าเท่ากับ 1.3×10^{-6} แต่ยังคงอยู่ในระดับขนาดเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ชนิดที่เจือตีบุก ร้อยละ 0.3 โดยอะตอมและไม่เจือตีบุก และเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวทั้งก่อนการอบอ่อนและภายหลังการอบอ่อน จากการทดลองพบว่า ก่อนอบอ่อนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่ไม่เจือด้วยตีบุกมีค่ามากกว่าแบบที่เจือตีบุก โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $4.89 \mu\Omega\text{m}$ และ $2.24 \mu\Omega\text{m}$ ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับ $1.15 \mu\text{V/K}$ และ $0.89 \mu\text{V/K}$ ตามลำดับ

หลังการอบอ่อน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเพิ่มขึ้นจากก่อนการอบอ่อนในทุกกรณี โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในกรณีที่ไม่เจือมีแนวโน้มมากกว่ากรณีที่เจือ ชั้นสารที่เจือและอบที่ 860 องศาเซลเซียสจะ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่เป็นลบที่บางตำแหน่งของการวัด ซึ่งส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ซีเบคน้อยกว่าการอบที่ 750 องศาเซลเซียส ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีไม่เจือกลับมีแนวโน้มน้อยกว่ากรณีที่เจือทั้งนี้สันนิษฐานว่าการเจือตีบุกช่วยเร่งปฏิกิริยาอุทกทอยด์ซึ่งเปลี่ยนเฟสแอลฟา (สภาพโลหะ) เป็นบีตา (สภาพสารกึ่งตัวนำ) ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจึงสูงขึ้น การเพิ่มเวลาของการอบอ่อนหรือเพิ่มอุณหภูมิของการอบอ่อนจะทำให้ชั้นสารที่เจือตีบุกจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในขณะที่ชั้นสารที่ไม่เจือตีบุกไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนเพราะจำนวนชิ้นงานไม่เพียงพอต่อการสรุป

สภาพเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ให้ค่า ZT สูงสุดคือ ชิ้นงานที่ไม่เจือตีบุกซึ่งอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5.1 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือที่ใช้วัดในการทดลองบางเครื่องควรมีมาตรฐานมากขึ้น อย่างเช่นในกรณีของเครื่องหัวจ่าย ความร้อนที่หัวเริ่มบิ่นทำให้ไม่สามารถสัมผัสกับผิวชิ้นงานได้อย่างเต็มที่
2. ในขั้นตอนการอบอ่อนหลังจากถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตามเวลาที่กำหนดควรทำให้ชิ้นงานกลับมา อุณหภูมิห้องให้เร็วที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างขาลง
3. ทำชิ้นงานเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะเปรียบเทียบได้ทุกกรณี

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. เนื่องจากโครงการส่วนใหญ่เป็นการทดลอง เพราะฉะนั้นผลลัพธ์ที่ได้ออกมาแต่ละขั้นตอนย่อมอาจทำให้ แผนงานที่วางเอาไว้มีการเปลี่ยนแปลงหรือเลื่อนเวลาออกไป

2. ผู้วิจัยไม่มีประสบการณ์ในการทำงานด้านการใช้เครื่องวัดชนิดนี้และเตาหลอมจึงต้องใช้เวลาในการศึกษา
3. ในขั้นตอนการวัดผลอาจจะมีปัจจัยภายนอกทั้งตัวผู้วัด, ตัวอย่าง และ ทางระบบทำให้ค่าที่ได้ออกมามีความคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎี

5.3 แนวทางแก้ไข

1. ต้องหมั่นตรวจสอบผลและการดำเนินงานอยู่เสมอ และทำการปรับเปลี่ยนแผนงานให้เข้ากับสถานการณ์มากที่สุด
2. ใช้เวลาในการศึกษาเครื่องมือให้มากขึ้นรวมทั้งควรรหาข้อมูลจากตำราหรืออินเทอร์เน็ตเพิ่มเติม
3. ควรคอยสังเกตปัจจัยที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อน ทำความเข้าใจอุปกรณ์และหลักการทำงานเพื่อจะได้วิเคราะห์หาปัญหาที่เกิดขึ้นและแก้ไข

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiatgamolchai S., Sakulalavek A. Distribution of Elements in a Cu-Added FeSi₂ Alloy Under Peritectoid and Eutectoid Reactions. *Journal of Electronic Materials* 40 (2011): 1029-1034.
- [2] นัทธมนสุวรรณหาญ. ผลของการเลือธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันในสารไอรอนไดซิลไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการหลอมเหลวโครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [3] นายภานุพงศ์กาฬภักดี, การวิเคราะห์ขนาดของเฟสเอปไซลอนในสารไอรอนไดซิลไซด์จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงโครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [4] ชนกานต์พันสา, ผลของการเลื้อตีบุกร้อยละ 1 โดยอะตอมและการอบอ่อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆต่อการเกิดเฟส B-FeSi; ในสารไอรอนไดซิลไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการหลอมเหลวรายงานผลการทดลองหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [5] พิชญ์พรวิสาขะ, ผลของปริมาณตีบุกที่มีต่อขนาดของเฟสเอปไซลอนในสารไอรอนไดซิลไซด์โครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [6] รุ่งทิพย์สุนันตา. ผลของการอบอ่อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆต่อขนาดของเฟสเอปไซลอนในสารไอรอนไดซิลไซด์ (Fe₅Si₁₂) โครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [7] วรรณญาโกศล. ผลของตีบุกที่มีต่อขนาดของเฟส 2 ในอัลลอยด์ไอรอนไดซิลไซด์ก่อนและหลังอบโครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [8] วินัสเทศมยา, สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือด้วยตีบุกโครงการงานวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [9] Somchai Kiatgamolchai, Siriphan Nilpairach, Jumpot Wanichsampan, and Adisak Tueploy. The effects of elements with different melting points on ϵ -FeSi size in FeSi₂ alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 666, (May 2016): 237-242.

[10] Maeda, K.P. Homewood, T. suemasu, T. Sadoh, H. Udono and K. Yamaguchi. Structural and electrical properties of β -FeSi₂ single crystals grown using Sb solvent. Journal of Crystal Growth 275 (1-2), (August 2004): 110-115 Y.

[11] L. J. van der Pauw. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. Philips Research Reports, Vol. 13, February 1958, pp. 1-9.

[12] สิทธิกรคำทอง, ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์โครงการงานวิทยาสตรหลักสูตรวิทยาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ภาควิชาฟิสิกส์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.