



## โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก  
Electrical resistivity and Seebeck coefficient of Iron disilicide doped with Sn impurity

**ชื่อนิสิต** นางสาววินัส เทศมยา

**เลขประจำตัว** 5833438923

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2561

**คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

# โครงการวิทยาศาสตร์นิสิตชั้นปีที่ 4

## เรื่อง

สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก

นางสาววินัส เทศมยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

หัวข้อโครงการ  
ผู้จัดทำโครงการ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ภาควิชา

ปีการศึกษา

สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอออนโคชิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก  
นางสาววินัส เทศธนา

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกรมอชัย

ฟิสิกส์

2561

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการได้ตรวจรับรองรายงานฉบับนี้แล้ว

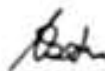


(ประธานกรรมการ)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกคณศ ตุงคะสมิต)

ศุภวี วงศ์มณีโรจน์ (กรรมการ)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภวี วงศ์มณีโรจน์)



(อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกรมอชัย)

หัวข้อโครงการงาน	สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก
ผู้จัดทำโครงการงาน	นางสาววิณัส เทศมยา
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561

---

### บทคัดย่อ

โครงการงานนี้เป็นการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.0 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 โดยอะตอมที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเตรียมสารตัวอย่างโดยการผสมเหล็กและซิลิกอนในอัตราส่วนร้อยละ 1:2 โดยอะตอม และนำไปหลอมเหลวในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 1,550 °C และตัดสารตัวอย่างขนาด 10×10×2 มิลลิเมตร<sup>3</sup> ทั้งหมด 5 ชิ้น การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าใช้วิธีแบบแวน เดอ พาว(van der Pauw) และวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยใช้เทคนิคหัววัดร้อน (hot probe technique) พบว่าเมื่อเจือดีบุกลงในสารตัวอย่างทำให้แนวโน้มของทั้งสองค่าลดลง โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงจาก  $5.38 \pm 0.02 \mu\Omega \cdot m$  สำหรับไม่เจือดีบุก เป็น  $2.438 \pm 0.009 \mu\Omega \cdot m$  สำหรับเจือดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.4 โดยอะตอมตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากดีบุกทำให้ชิ้นงานมีความเป็นโลหะมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับทุกปริมาณของดีบุกที่เจือ ค่า Power factor ของสารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.3 ค่า มากที่สุดเท่ากับ  $1.04 \pm 0.08 \mu V^2 / \Omega \cdot K^2$

<b>Project title</b>	Electrical resistivity and Seebeck coefficient of Iron disilicide doped with Sn impurity
<b>Name</b>	Miss Vinus Thetthomya
<b>Project advisor</b>	Associate Professor Somchai Kiatgamolchai (Ph.D.)
<b>Department</b>	Physics
<b>Academic year</b>	2018

---

### Abstract

The electrical resistivity and Seebeck coefficient of Iron disilicide doped with Sn impurity in the amount of 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 atomic percentage at room temperature were measured. Samples were prepared by mixing of iron and silicon at the 1: 2 atomic ratio and then melting in the argon atmosphere at a temperature of 1,550 °C and cutting into the sample size of 10×10×2 mm<sup>3</sup>. Electrical resistivity measurement was done following the van der Pauw method and Seebeck coefficient measurement by using the hot probe technique. We found that when Sn was added to the samples, the both quantities decreased with increasing Sn amount. The electrical resistivity decreased from 5.38±0.02 μΩ•m for undoped sample to 2.438±0.009 μΩ•m for 0.4%-Sn sample. It can be explained that Sn makes the sample becomes more metallic with less electrical resistant and less Seebeck effect. For Seebeck coefficient, Seebeck coefficient are not significantly different for all Sn. It was found that 0.3%-Sn sample has the highest power factor of 1.04±0.08 μV<sup>2</sup>/Ω•K<sup>2</sup>.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์เรื่อง สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ ตั้งแต่คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนครอบครัวและเพื่อนๆ ทุกคน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความรู้ต่าง ๆ เกี่ยวกับการทดลอง การใช้เครื่องมือต่าง ๆ รวมไปถึงแนวคิดที่มีประโยชน์ต่อการทำงานครั้งต่อ ๆ ไป ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคตเณศ ตุงคะสมิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศรี วงศ์มณีโรจน์ ที่ท่านกรุณาสละเวลาในการมาเป็นกรรมการสอบโครงการนี้

ขอขอบคุณคุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ผู้มีความชำนาญการที่ให้ความช่วยเหลือในการตัดสารที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณนางสาวณิชกานต์ ขาดิชำนาญ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาในการทำโครงการนี้

วินัส เทศมยา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	3
2.2 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน.....	5
2.3 หลักการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดแบบแวน เดอ พาว(van der Pauw) ที่อุณหภูมิห้อง.....	7
2.4 หลักการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยการใช้หัวจ่ายความร้อนที่อุณหภูมิห้อง.....	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนทำการทดลอง</b>	
3.1 สารที่ใช้.....	10
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้.....	10
3.3 เครื่องมือวัด.....	11
3.4 วิธีทำการทดลอง.....	11
3.5 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	14
3.6 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค.....	16
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ความสามารถในการวัดซ้ำของเครื่องมือวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบวิธีแวน เดอ พาว.....	17

4.2 ผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิห้อง.....	18
4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ณ อุณหภูมิห้อง.....	19
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
ข้อเสนอแนะ.....	23
ประสบการณ์ที่ได้จากการทำโครงการ.....	23
เอกสารอ้างอิง.....	24
ภาคผนวก.....	25



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฟนอนในแท่งโลหะ.....	3
รูปที่ 2.2 วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหล.....	4
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเหล็กและซิลิกอน.....	6
รูปที่ 2.4 วิธีการวัดแบบ Van der Pauw.....	7
รูปที่ 2.5 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค.....	8
รูปที่ 3.1 การชั่งผงเหล็กและซิลิกอน.....	11
รูปที่ 3.2 (ก) ถ้วยอะลูมินาพร้อมผงสาร.....	11
(ข) ท่อหลอม.....	11
รูปที่ 3.3 เตาหลอม.....	12
รูปที่ 3.4 (ก) สารตัวอย่างที่หลอมเสร็จแล้ว.....	12
(ข) สารตัวอย่างหล่อด้วยเรซิน.....	12
รูปที่ 3.5 (ก) เครื่องตัดโลหะใบเพชร.....	12
(ข) สารตัวอย่างขนาด 1×1 เซนติเมตร.....	12
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	13
รูปที่ 3.7 8 รูปแบบการเก็บข้อมูลของการวัดแบบวิธีแวน เดอ พาว.....	13
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค.....	13
รูปที่ 3.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล.....	14
รูปที่ 3.10 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลในหนึ่งด้าน.....	14
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์แก้ค่าและอัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.....	15
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก .....	18
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์.....	18

รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วย ดีบุก.....	19
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์ .....	19
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคกำลังสองกับสภาพต้านทานไฟฟ้าในการทดลองสารไอรอนไดซัลไฟด์.....	20
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า power factor กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์.....	21
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสาร.....	21
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า figure of merit กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์ โดยใช้สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C.....	22

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการเกิดเฟสต่าง ๆ สัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ณ อุณหภูมิห้องในงานวิจัยอื่น ๆ.....	9
ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของสารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.4 โดยอะตอม ที่วัดซ้ำตำแหน่ง เดิม 10 รอบ ณ อุณหภูมิห้อง.....	17
ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) สัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และ Power factor (P) ที่วัด ณ อุณหภูมิห้อง.....	20

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันความต้องการด้านพลังงาน ถือเป็นปัญหาใหญ่ของประเทศ และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อการพัฒนาของประเทศไทยมากขึ้น เชื้อเพลิงต่างๆ ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกที และจะต้องหมดไปในอนาคต “พลังงานทางเลือก” จึงมีบทบาทสำคัญที่จะเข้ามาทดแทน และ “เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)” เป็นหนึ่งคุณสมบัติของสารที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพลังงานทางเลือกที่นักวิทยาศาสตร์ กำลังให้ความสนใจและศึกษา วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectrics material) คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดสองจุด โดยอิเล็กตรอนหรือโฮลจะเดินทางจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบนวัสดุ ทำให้เกิดความต่างศักย์ ซึ่งสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาใช้ประโยชน์ได้ ปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในประเทศไทยยังต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ และมีการประยุกต์ใช้อยู่ในวงแคบๆ เนื่องจากยังขาดความรู้ ความเข้าใจในหลักการทำงานของวัสดุชิ้นนี้ หากเราสามารถปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนี้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อันนำไปสู่การเพิ่มแหล่งพลังงานทางเลือกในอนาคต

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่น่าสนใจและอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา คือ สารประกอบเหล็กและซิลิกอน ซึ่ง  $\beta$  -  $\text{FeSi}_2$  มีโครงสร้างที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีความต้านทานเชิงไฟฟ้าต่ำ เป็นธาตุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก ปัจจุบันดังกล่าวทำให้  $\beta$  -  $\text{FeSi}_2$  เป็นวัสดุที่น่าสนใจที่จะนำมาผลิตไฟฟ้า แต่ในกระบวนการสังเคราะห์ให้ได้  $\beta$  -  $\text{FeSi}_2$  นั้นยังมีเฟสอื่นปรากฏอยู่ ได้แก่  $\alpha$  -  $\text{Fe}_2\text{Si}_5$  และ  $\epsilon$  -  $\text{FeSi}$  ซึ่งเฟส  $\alpha$  สามารถกำจัดได้ง่ายโดยการเติม Cu แต่เฟส  $\epsilon$  กำจัดได้ยากที่สุด[4]

จากการศึกษาวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัยและคณะ[4] พบว่าการเจือด้วยดีบุกสามารถลดขนาดเฟส  $\epsilon$  ลงได้แต่เมื่อเจือดีบุก 1% โดยอะตอม ไม่ส่งผลให้ขนาดของเฟส  $\epsilon$  ลดลงหลังการอบ นอกจากนี้ผลการวัด DTA ของ  $\text{FeSi}_2$  ที่เจือดีบุกเกิน 0.4% อะตอม จะทำให้ปฏิกิริยา eutectoid และ peritectoid ถูกยับยั้งได้ ดังนั้นโครงการนี้มีแนวคิดศึกษา สาร  $\text{FeSi}_2$  ที่เจือปนด้วยดีบุกร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 โดยอะตอม และที่ไม่เจือด้วยดีบุก โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ทั้งที่เจือด้วยดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 โดยอะตอมและที่ไม่ได้เจือด้วยดีบุก

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาปริมาณดิบูกที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่อุณหภูมิห้อง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสัมพันธ์ของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือและไม่เจือด้วยดิบูก
2. ทำให้นิสิตผู้ปฏิบัติงานมีทักษะในการใช้เครื่องมือและความเข้าใจในขั้นตอนการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี เช่น การเตรียมสารโดยการหลอมเหลว การชั่งสาร การผสมสาร และการตัดสาร ซึ่งเป็นการฝึกความละเอียดรอบคอบและความอดทนให้แก่ นิสิตผู้ปฏิบัติงาน

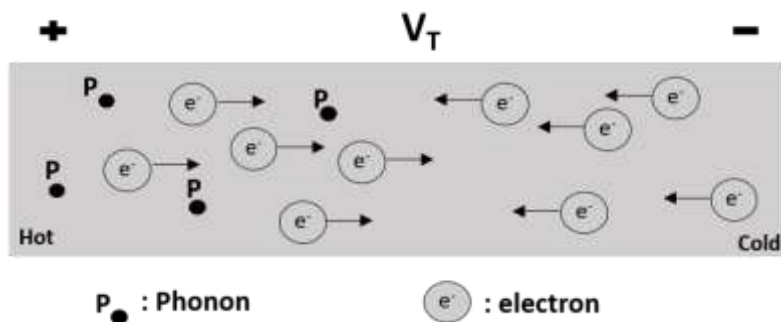
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

พลังงานความร้อนในของแข็งจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งนั้น ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ ความสั่นสะเทือนดังกล่าวนี้เรียกว่า โฟนอน (phonon) โดยในวัสดุหลายชนิดความร้อนจะถ่ายเทโดยโฟนอน จนกระทั่งเมื่อปี ค.ศ. 1821 โทมัส โยฮาน ซีเบ็ค (Thomas Johaan Seebeck) ได้ค้นพบว่าในโลหะหลายชนิด ความร้อนส่วนหนึ่งสามารถถ่ายเทโดยประจุไฟฟ้า ได้แก่ อิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)

กลไกการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในโลหะแสดงดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า โฟนอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า แต่อิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสองทิศทาง โดยอิเล็กตรอนกลุ่มแรก (เรียกว่า อิเล็กตรอน “ร้อน”) จะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า เนื่องจากถูกขับเคลื่อนโดยพลังงานความร้อนที่ได้รับ

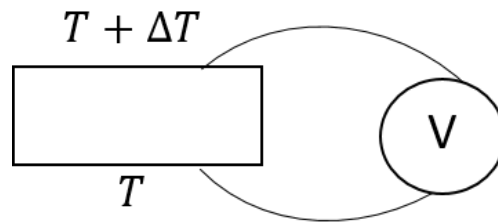


รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฟนอนในแท่งโลหะ

ต่อมากการสะสมของอิเล็กตรอนร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิในเขตเย็นสูงขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ( $V_T$ ) ระหว่างเขตร้อนที่กลายเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและเขตเย็นที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบ แรงขับเคลื่อนนี้ทำให้เกิดกระแสของอิเล็กตรอน “เย็น” อีกกลุ่มที่ไหลเวียนกลับสู่เขตร้อน ในกรณีเช่นนี้ จะเห็นว่าความไม่สมดุลของอุณหภูมิเป็นเหตุให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าหารด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิมีชื่อว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient)

ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้า ในตอนเริ่มแรกตัวนำจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิพาหะอิสระต่าง ๆ ที่ปลายด้านร้อน (Hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การสะสมของประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งพยายามต้านการไหลของประจุ ที่สภาวะสมดุลผลรวม

ของทั้งสองสนามเป็นศูนย์และประจุสุทธิที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆเป็นศูนย์ ความต่างศักย์วงจรถัดเมื่อไม่มีกระแสไหลที่เกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบค ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรถัดเมื่อไม่มีกระแสไหล

สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะได้ว่า

$$S = \frac{dV}{dT} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

โดย  $\Delta V =$  แรงดันไฟฟ้า (V)

$S =$  สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)

$\Delta T =$  ผลต่างอุณหภูมิ (K)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นลบ แต่ชนิด P จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นบวก เป็นต้น

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าสูงแต่เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดขึ้นจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
  2. สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มาก ( แปลง  $\Delta T$  เป็น  $\Delta V$  )
  3. มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุซึ่งจะทำให้คงสภาพ  $\Delta T$  ไว้ได้
- คุณสมบัติทั้ง 3 ประการนี้ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการ (2.2) สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ ( $Z$ )

$$Z = \frac{S^2}{\rho\kappa} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $Z$  คือ ฟิกเกอร์ ออฟ เมอร์ริท ( $1/K$ )

$S$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค ( $V/K$ )

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot m$ )

$K$  คือ สภาพนำความร้อน ( $W/m \cdot K$ )

เนื่องจาก  $Z$  มีหน่วยเป็นต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติค่าบ่งชี้ที่เปรียบเทียบกันได้ง่ายควรจะไม่มีหน่วย เรียกว่า figure of merit ดังนั้นจึงมีการคูณสมการ (2.2) ด้วย  $T$  ได้สมการใหม่เป็น  $ZT$  โดยที่  $T$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน ค่า  $ZT$  จึงเป็นค่า figure of merit ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และคุณสมบัติการทำความเย็นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนองค์ประกอบ (Thermo-element) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก แต่สภาพนำความร้อนจะไม่ถูกนำมาพิจารณามากนัก เนื่องจากในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพนำความร้อนทำได้ค่อนข้างยาก ทำให้ตัวแปรที่สนใจมีเพียง 2 ตัวแปร และนิยามเป็นปริมาณใหม่เรียกว่า Power factor สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.3)

$$P = \frac{S^2}{\rho} \quad (2.3)$$

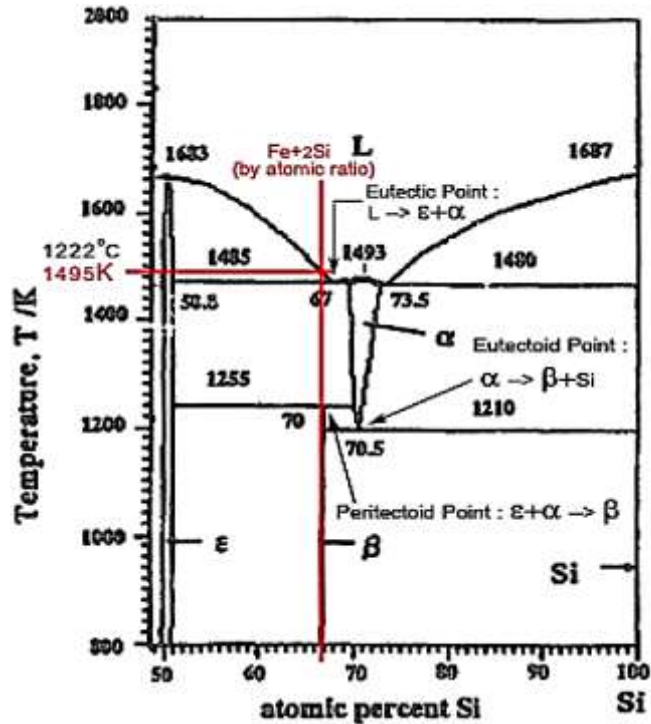
เมื่อ  $P$  คือ Power factor ( $W/m^{-1} \cdot K^2$ )

## 2.2 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน

สารประกอบระหว่างเหล็กและซิลิกอน มีเฟสที่สำคัญ 3 เฟส ได้แก่ เฟส  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>,  $\epsilon$ -FeSi และ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> สำหรับกระบวนการเกิดเฟสต่างๆ สามารถดูได้จากแผนภาพเฟสไดอะแกรมของระบบเหล็ก-ซิลิกอน ดังรูปที่ 2.3 เมื่อนำเหล็กและซิลิกอนมาหลอมรวมกันในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอมและปล่อยให้เย็นตัวลง พบว่าที่อุณหภูมิ 1,410 °C จะเกิดเฟส  $\epsilon$  และที่อุณหภูมิ 1,220 °C จะเกิดเฟส  $\alpha$  ซึ่งเป็นเฟสหลักของเนื้อสาร ทั้งสองเฟสนี้มีความเป็นโลหะสูงจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับเฟสที่เหมาะสมสำหรับเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีคือ เฟส  $\beta$  เพราะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และเฟส  $\beta$  จะเกิดขึ้นจากการอบอ่อน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยา 3 ปฏิกิริยาหลักต่อไปนี้

1. peritectoid reaction  $\epsilon + \alpha \rightarrow \beta$  (เกิดที่อุณหภูมิ 982 องศาเซลเซียส)
2. eutectoid reaction  $\alpha \rightarrow \beta + Si$  (เกิดที่อุณหภูมิ 937 องศาเซลเซียส)
3. subsequent reaction  $\epsilon + Si \rightarrow \beta$  (เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 955 องศาเซลเซียส)





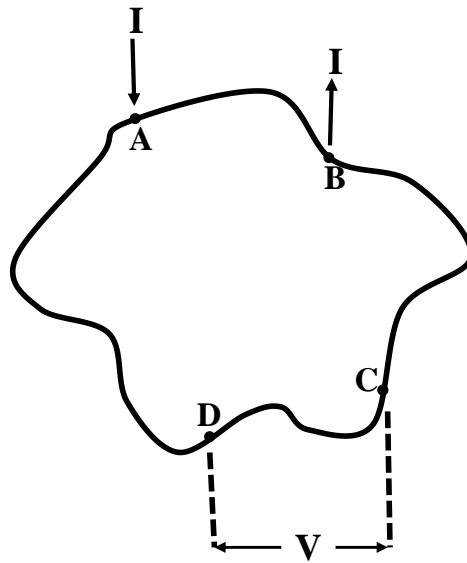
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเหล็กและซิลิกอน[4]

## 2.3 หลักการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดแบบแวน เดอ พาว(van der Pauw) ที่อุณหภูมิห้อง

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวน เดอ พาว (van der Pauw method) เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ conformal mapping โดยแวน เดอ พาว (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างแผ่นบางที่มีขอบเป็นรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นสาร โดยที่ชิ้นสารตัวอย่างต้องประพฤติตัวตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสารตัวอย่าง
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสารตัวอย่าง
3. ชิ้นสารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อชิ้นสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

ทฤษฎีวิธีการวัดแบบ van der Pauw



รูปที่ 2.4 วิธีการวัดแบบ Van der Pauw

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าจุดสัมผัสเล็กๆ  $A$   $B$   $C$  และ  $D$  ถูกจัดเรียงอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆบนเส้นรอบรูป ทั้งนี้เพื่อให้ กระแสไหลผ่านและวัดความต่างศักย์ตกคร่อมชิ้นสาร ถ้าค่า  $R_{AB,CD}$  หาได้จากอัตราส่วนของ  $V_{CD}$  ที่วัดคร่อม ระหว่างจุด  $C$  และ  $D$  ต่อกระแส  $I_{AB}$  ที่ไหลผ่านระหว่างจุด  $A$  และ  $B$  สามารถแสดงได้ว่า

$$\exp\left(\frac{-\pi d}{\rho} R_{AB,CD}\right) + \exp\left(\frac{-\pi d}{\rho} R_{BC,DA}\right) = 1 \quad (2.4)$$

โดย  $\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้า

$d$  = ความหนา

และสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \bar{R} F(Q) \quad (2.5)$$

โดย  $\bar{R} = (R_{AB,CD} + R_{BC,DA})/2$

$F$  = แฟคเตอร์แก้ค่า (Correction factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $Q$

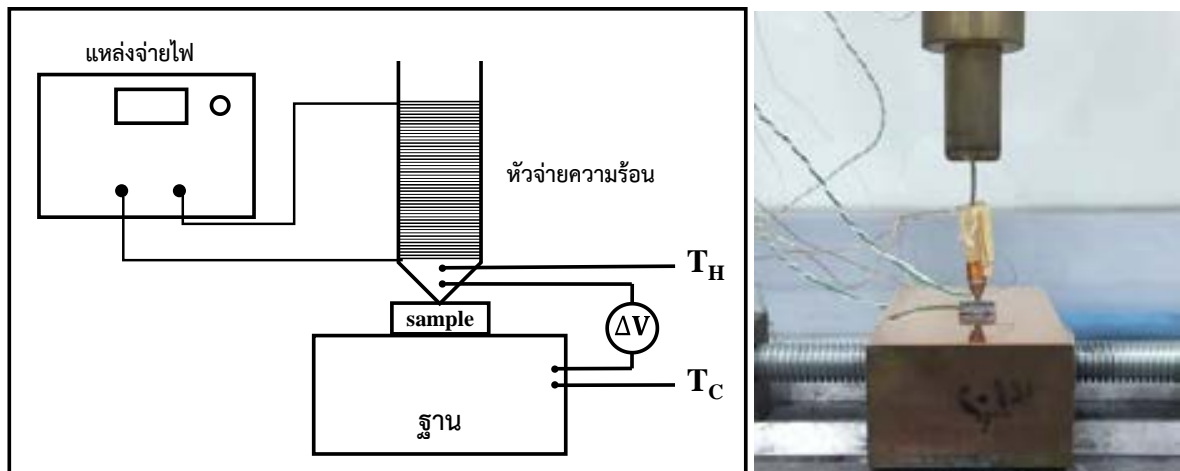
$Q$  = อัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งให้ค่ามากกว่า 1

โดยปกติการวัดทั่วไปจะมีแฟคเตอร์แก้ค่าคือ  $F$  ซึ่งต้องหาจากสมการ

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{F}{\ln 2} \cosh^{-1} \left( \frac{\exp(\ln 2 / F)}{2} \right) \quad (2.6)$$

## 2.4 หลักการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยการใช้หัวจ่ายความร้อนที่อุณหภูมิห้อง

การทดลองวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคทำได้โดยการวางสารตัวอย่างลงบนฐานที่ทำมาจากทองแดงและวางหัวจ่ายความร้อนที่ทำจากทองแดงเช่นเดียวกันลงบนสารตัวอย่าง แล้วจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับหัวจ่ายความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิหัวจ่ายให้สูงขึ้น ทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของสารตัวอย่าง จากนั้นวัดผลต่างของอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่าง โดยมีการเชื่อมต่อสายไฟบริเวณปลายหัวจ่ายกับฐานสำหรับวัดอุณหภูมิและสายไฟที่ทำจากทองแดงสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.5 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการเกิดเฟสต่าง ๆ สัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ณ อุณหภูมิห้องในงานวิจัยอื่น ๆ

เรื่อง	สารตัวอย่าง	อุณหภูมิที่ใช้ อบอ่อน (K)	S  ( $\mu\text{V}/\text{K}$ )	$\rho$ ( $\mu\Omega\cdot\text{m}$ )	Ref.
Formation of $\text{FeSi}_2$ from Sintered $\text{FeSi-Fe}_2\text{Si}_5$ Eutectic Alloy*	$\text{FeSi}_2$	-	-	2.5	[6]
Preparation and properties of $\text{FeSi}$ , $\alpha\text{-FeSi}_2$ and $\beta\text{-FeSi}_2$ single crystals	$\alpha\text{-FeSi}_2$	-	-	7.6	[5]
Anisotropic Seebeck coefficient in $\beta\text{-FeSi}_2$ single crystal	$\beta\text{-FeSi}_2$	High temperature	258	-	[8]
Comparison of thermoelectric properties of nanostructured $\text{Mg}_2\text{Si}$ , $\text{FeSi}_2$ , $\text{SiGe}$ , and nanocomposites of $\text{SiGe-Mg}_2\text{Si}$ , $\text{SiGe-FeSi}_2$	$\beta\text{-FeSi}_2$	1100	218	-	[7]
Effects of P doping on the thermoelectric properties of $\beta\text{-FeSi}_2$	$\beta\text{-FeSi}_2$	-	ที่อุณหภูมิ 351 K = 189	ที่อุณหภูมิ 386 K = 3669	[3]

## บทที่ 3

### ขั้นตอนทำการทดลอง

#### 3.1 สารที่ใช้

1. ผงเหล็กบริสุทธิ์ 99.99+% ยี่ห้อ Good fellow
2. ผงซิลิกอนบริสุทธิ์ 99.998% ยี่ห้อ Good fellow
3. น้ำกลั่น

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

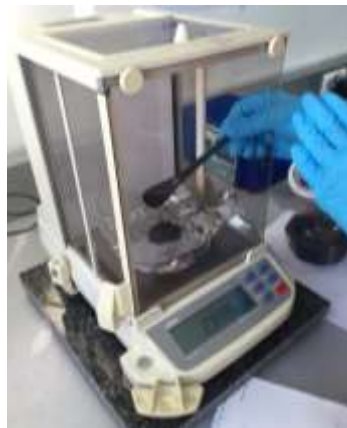
1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
3. ถ้วยบดสาร
4. ถ้วยอะลูมินา เคลือบด้วยผงโบรอนไนไตรด์
5. เตาไฟฟ้าแบบแผ่นความร้อน (hotplate)
6. เครื่องตัด
7. ใบตัดเคลือบผงเพชร
8. เตาเผา Lenton tube furnace model LTF 16/50/180
9. ลวดทองแดง
10. แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า Keithley model 220 programmable current source
11. มัลติมิเตอร์ Keithley model 2182A nanovoltmeter
12. แอมมิเตอร์ HP E3634A triple output DC power supply
13. Picotest M3500A 6 ½ digit multimeter
14. เวอร์เนียแคลิเปอร์ (Vernier caliper)
15. มัลติมิเตอร์ Keithley model 2700 multimeter

### 3.3 เครื่องมือวัด

1. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก – โปรแกรม Matlab
2. เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค
3. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยใช้วิธีวัดแบบแวน เดอ พาว (van der Pauw method)

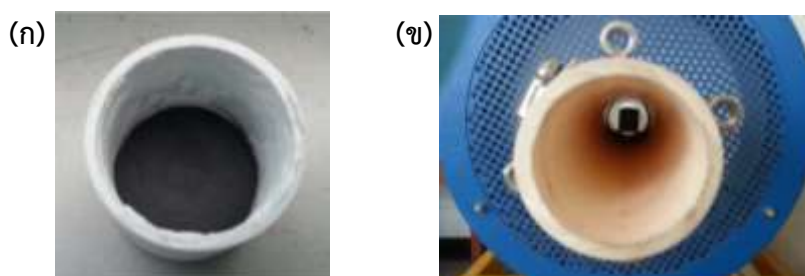
### 3.4 วิธีการทดลอง

1. ผสมผงเหล็กและผงซิลิกอนในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอมและเจือด้วยดีบุก ในอัตราส่วนร้อยละ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โดยอะตอม ตามลำดับ จะเตรียมทั้งหมด 5 สารตัวอย่าง ในสารซึ่งสารแต่ละครั้ง จะใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์รองบริเวณที่ชั่ง ดังรูปที่ 3.1 เพื่อสะดวกต่อการเทสารลงในถ้วยบด



รูปที่ 3.1 การชั่งผงเหล็กและซิลิกอน

2. นำผงเหล็กและซิลิกอนบดผสมกันในถ้วยบดสาร จากนั้นนำใส่ถ้วยอะลูมินาที่ทำผิวภายในด้วย โบรอนไนไตรด์ ดังรูปที่ 3.2 (ก) และนำถ้วยใส่เข้าไปในบริเวณตรงกลางท่อหลอมของเตา



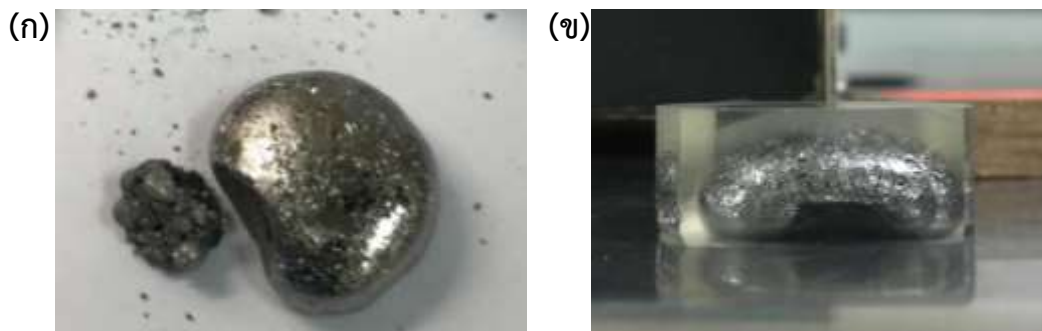
รูปที่ 3.2 (ก) ถ้วยอะลูมินาพร้อมผงสาร (ข) ท่อหลอม

3. ปิดฝาท่อหลอมทั้งสองด้านดังรูปที่ 3.3 แล้วทำการปั๊มไล่อากาศออกและแทนที่ด้วยก๊าซอาร์กอน ทำซ้ำอย่างน้อย 10 รอบ เพื่อให้ระบบมีอากาศปกติในสัดส่วนที่น้อยที่สุด (ประมาณ  $0.15^{10}$  ส่วน)



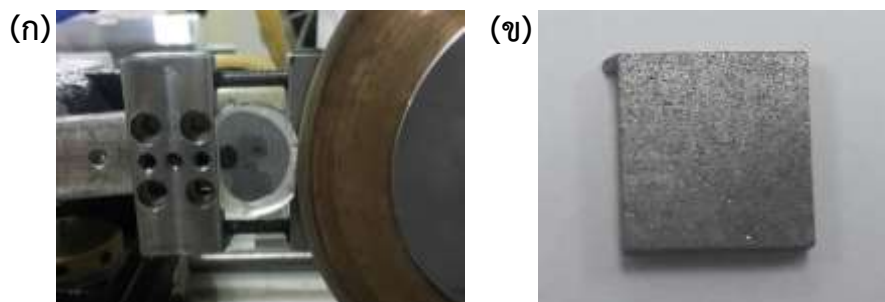
รูปที่ 3.3 เตาลอมน

4. หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาลอมนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 800 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีไปจนถึงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้ที่ 1550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิไปจนถึง 800 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง



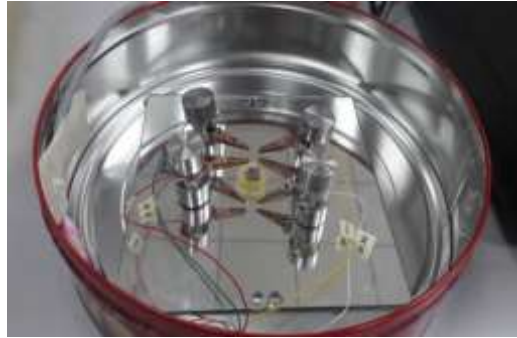
รูปที่ 3.4 (ก) สารตัวอย่างที่หลอมเสร็จแล้ว (ข) สารตัวอย่างหลอมด้วยเรซิน

5. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการเผา ดังรูปที่ 3.4 (ก) มาหล่อสารเรซิน ดังรูปที่ 3.4 (ข) และนำมาตัดด้วยเครื่องตัดใบเพชร ดังรูปที่ 3.5 (ก) ให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร และมีความหนา 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5 (ข)

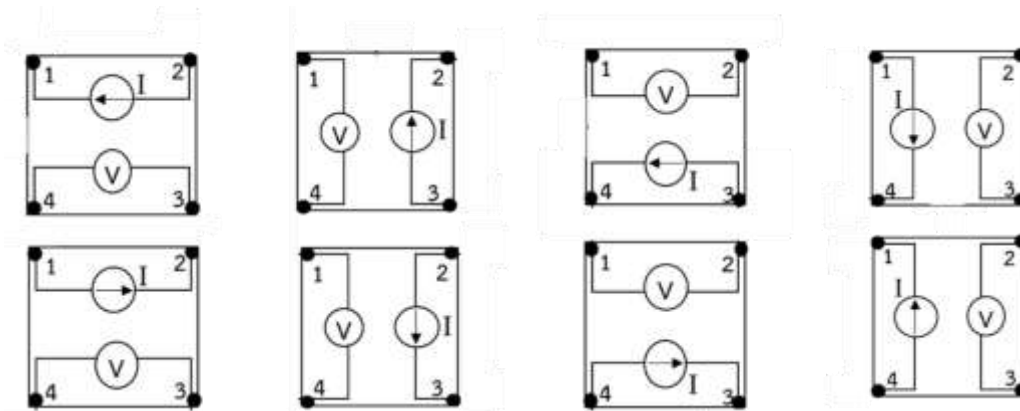


รูปที่ 3.5 (ก) เครื่องตัดโลหะใบเพชร (ข) สารตัวอย่างขนาด 1x1 เซนติเมตร

6. นำสารตัวอย่างดังรูป 3.5 (ข) มาวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 โดยใช้โปรแกรม Matlab ที่เขียนขึ้นมาสั่งให้จ่ายกระแสให้กับสารตัวอย่างและวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้ 10 ค่าต่อกระแส 1 ค่า โดยเพิ่มค่ากระแสขึ้นครั้งละ 1 mA จนถึง 7 mA รวมถึงสลบทิศของกระแสด้วย และทำการวัดค่าความต่างศักย์ในแต่ละกระแสจนครบ ทำแบบนี้ทั้งสองด้านของสารตัวอย่าง โดยแต่ละด้านจะทำทั้งหมด 8 รูปแบบ (configuration) ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 8 รูปแบบการเก็บข้อมูลของการวัดแบบวิธีแวน เดอ พาเว

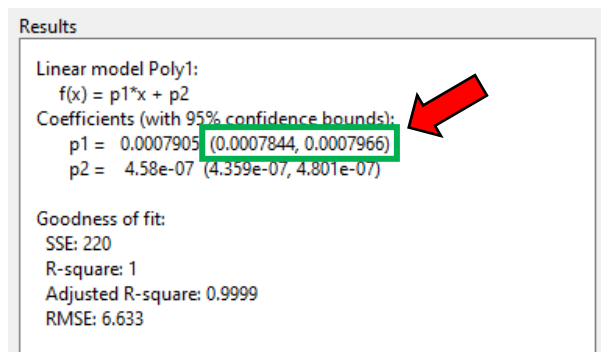
7. นำสารตัวอย่างดังรูป 3.5 (ข) มาวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคดังรูปที่ 3.8 โดยใช้โปรแกรม Matlab ที่เขียนขึ้นมาสั่งให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้หัวจ่ายความร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิหัวจ่ายสูงขึ้นและวัดผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ตกคร่อมสารตัวอย่าง โดยทำทั้งหมดสองด้านด้านละ 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค



### 3.5 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

1. นำข้อมูลที่ได้จากการ fitting ของโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.9 ในกรณีการทดลองสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.9 มาลบกันและหารสอง เช่น  $\frac{0.0007966 - 0.0007844}{2}$  จึงจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ตำแหน่งนั้น

2. ที่รูปแบบเดียวกันแต่คนละทิศกระแสไฟฟ้าก็นำค่าความคลาดเคลื่อนมาเฉลี่ยดังรูปที่ 3.10 โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย เพราะเครื่องหมายบอกทิศของกระแสไม่ได้ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ทำแบบเดียวกันทั้งสองด้าน รวมทั้งหมด 8 ค่า

current	config1	errorR1	config2	errorR2	config3	errorR3	config4	errorR4
+	0.00035	0.00001	0.000791	0.000006	0.0003	0.00001	0.00082	0.00001
-	0.000358	0.00002	0.000783	0.000008	0.0004	0.00001	0.00079	0.000006
average	0.000354	0.00001	0.000787	0.000007	0.0004	0.00001	0.000805	0.000008

รูปที่ 3.10 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลในหนึ่งด้าน

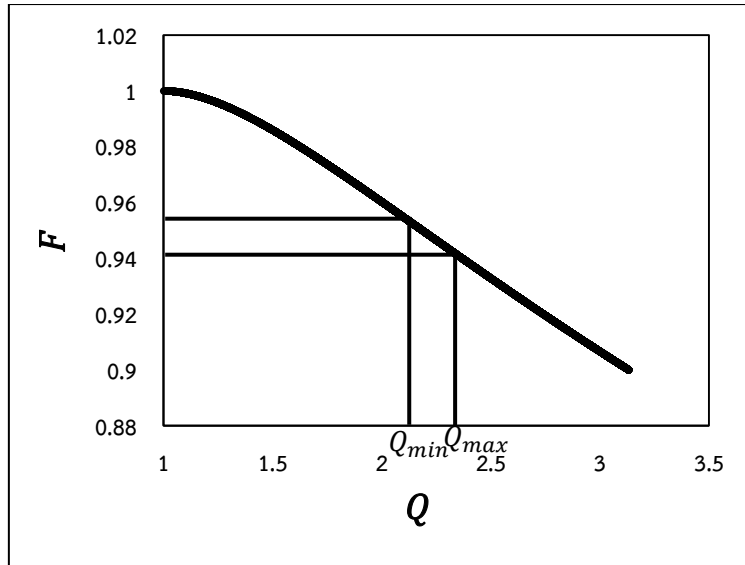
3. นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ในแต่ละรูปแบบมาคำนวณตามสมการ

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

เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทานแต่ละตำแหน่งแล้วก็นำ

ค่าทั้งหมด 8 ค่าของทั้งสองด้านมาเฉลี่ยกันก็จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเฉลี่ยออกมา

4. จากนั้นหาค่าความคลาดเคลื่อนของแฟคเตอร์แก้ค่า  $\Delta F(Q)$



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์แก้ค่าและอัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่ามากกว่า 1

โดยการแทนค่า  $F$  ลงในสมการ (2.6) ดังรูปที่ 3.15 เพื่อให้ได้ค่า  $Q$  ออกมา จากนั้นหาค่า  $Q$  อีก 2 ค่าคือ  $Q_{max}$  และ  $Q_{min}$  โดยแบ่งเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของแฟคเตอร์แก้ค่า  $\Delta F(Q)$  เมื่อค่า  $Q_{max}$  และ  $Q_{min} > 1$

ค่า  $Q_{max}$  คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดที่เป็นไปได้ เช่น  $Q_1 = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 - \Delta R_2} = \frac{0.000787 + 0.000007}{0.000354 - 0.00001} \approx 2.334853$  และ ค่า  $Q_{min}$  คือค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่เป็นไปได้ เช่น  $Q_1 = \frac{R_1 - \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} = \frac{0.000787 - 0.000007}{0.000354 + 0.00001} \approx 2.185464$

กรณีที่ 2 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของแฟคเตอร์แก้ค่า  $\Delta F(Q)$  เมื่อค่า  $Q_{min} < 1$

กรณีที่ค่า  $Q_{min} < 1$  จะไม่นิยม แต่จะให้กลับเศษส่วนเพื่อให้ได้ค่าใหม่ที่มากกว่า 1 เช่น

$$Q_{min} = \frac{R_1 - \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} = \frac{0.000265 - 0.00002}{0.000246 + 0.00001} \approx 0.967067331 < 1 \text{ ดังนั้นจึงกลับเศษส่วนจะได้}$$

$$Q_{min} = \frac{1}{\frac{R_1 - \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2}} = \frac{1}{\frac{0.000265 - 0.00002}{0.000246 + 0.00001}} \approx 1.034054$$

เมื่อได้ค่า  $Q_{max}$  และ  $Q_{min}$  แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่า  $F$  จากรูปที่ 3.11 จะได้ค่า  $\Delta F_{min}$  และ  $\Delta F_{max}$  ตามลำดับ นำมาคำนวณหา  $\Delta F = \frac{|F_{max} - F_{min}|}{2}$

5. นำค่า  $\Delta F$  ไปหา  $\Delta \rho$  จากสมการ  $\frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_i}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_i}{F_i}\right)^2}$  จะได้ค่า  $\rho_i \pm \Delta \rho_i$

จำนวนทั้งหมด 8 ค่า กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ  $\frac{\sum_{i=1}^8 \Delta \rho_i}{8}$  และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\rho_i - \bar{\rho})^2}{8 \times 7}}$

### 3.6 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

ชิ้นงาน 1 ชิ้นจะถูกวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจำนวน 10 ตำแหน่ง โดยเป็นการวัดด้านละ 5 ตำแหน่ง ถ้า  $S_i \pm \Delta S_i$  คือค่าที่วัดได้ตำแหน่งที่  $i$

- ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ  $\frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta S_i}{10}$

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

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

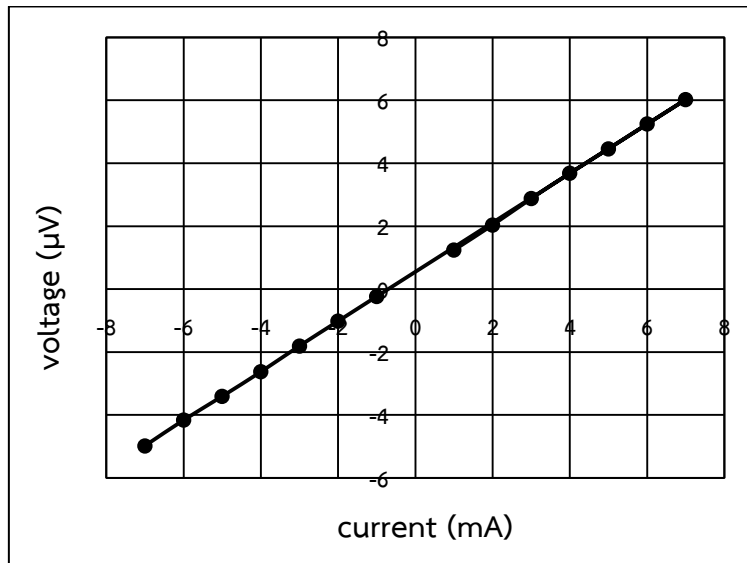
#### 4.1 ความสามารถในการวัดซ้ำของเครื่องมือวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบวิธีแวน เดอ พาว

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของสารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.4 โดยอะตอม ที่วัดซ้ำตำแหน่งเดิม 10 รอบ ณ อุณหภูมิห้อง

ครั้งที่	สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\mu\Omega \cdot m$ )	ความคลาดเคลื่อน ( $\mu\Omega \cdot m$ )
1	2.51	0.03
2	2.45	0.06
3	2.48	1.85
4	2.47	0.01
5	2.46	0.03
6	2.48	0.03
7	2.51	1.24
8	2.52	1.27
9	2.41	1.17
10	2.40	1.16
ค่าเฉลี่ย	2.47	0.7
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย เท่ากับ $0.01 \mu\Omega \cdot m$		

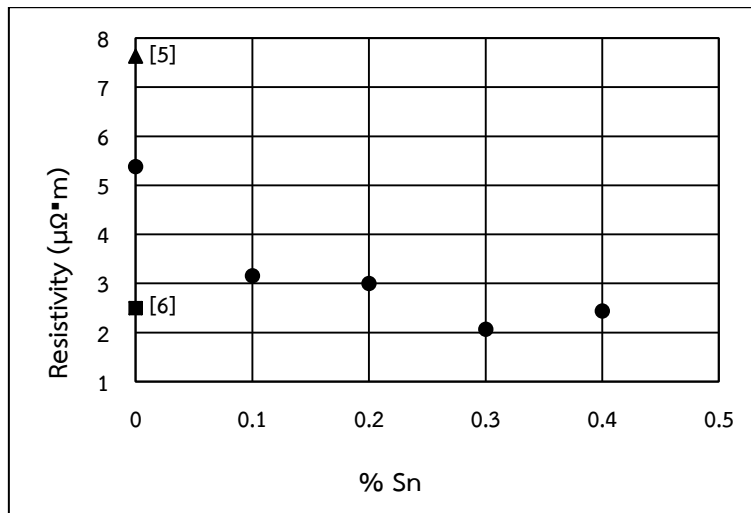
ตารางที่ 4.1 แสดงถึงการวัดค่าสภาพต้านทานซ้ำ 10 รอบ โดยการเปลี่ยนการวางเข็มใหม่ที่รูปแบบเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแต่ละครั้งมีค่าอยู่ในระดับเดียวกันคือ  $10^{-6}$  และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย นั่นหมายความว่าเราสามารถใช้อุปกรณ์นี้ในการวัดค่าสภาพต้านทานซ้ำได้

## 4.2 ผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรง แต่ไม่ผ่านจุด (0,0) และบางครั้งกราฟของกระแสไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นตรงเดียวกัน ดังนั้นค่าความต้านทานจะหาจากการเฉลี่ยค่าความต้านทานในแต่ละทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า

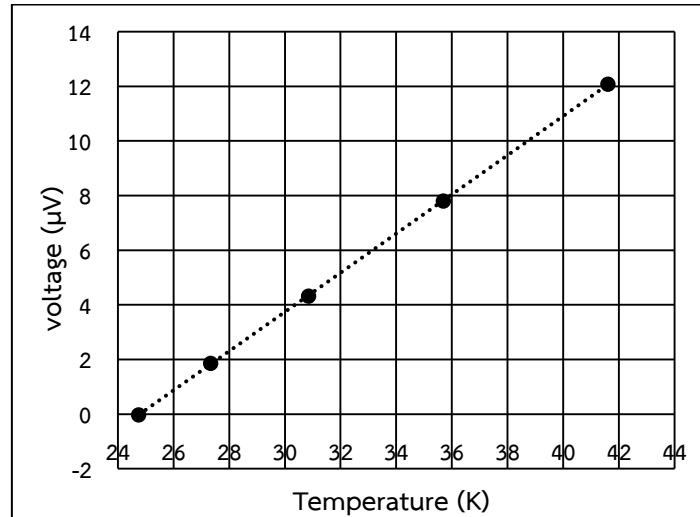


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซัลไฟด์

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเจือดีบุกจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีขนาด error bar จากการคำนวณหัวข้อ 3.5 ที่เล็กมากเมื่อเทียบกับสารตัวอย่างที่ใช้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเจือดีบุกทำให้สารไอรอนไดซัลไฟด์มีความเป็นโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง ค่า

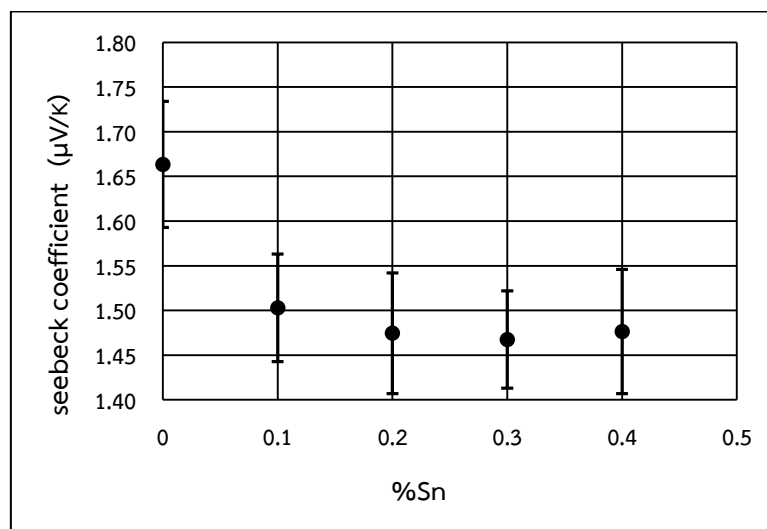
สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารไอรอนโดซิลิไซด์ซึ่งมีเฟส  $\alpha$  เป็นองค์ประกอบหลัก [5,6] ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ด้วย ซึ่งยืนยันว่าสารไอรอนโดซิลิไซด์ที่เตรียมได้นั้นมีเฟส  $\alpha$  เป็นองค์ประกอบหลัก

#### 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารไอรอนโดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุก

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ก็คือ  $S = \Delta V / \Delta T$  และความชันของกราฟเป็นบวกล้วนหมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) มีค่าเป็นบวก ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำก็จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P-type

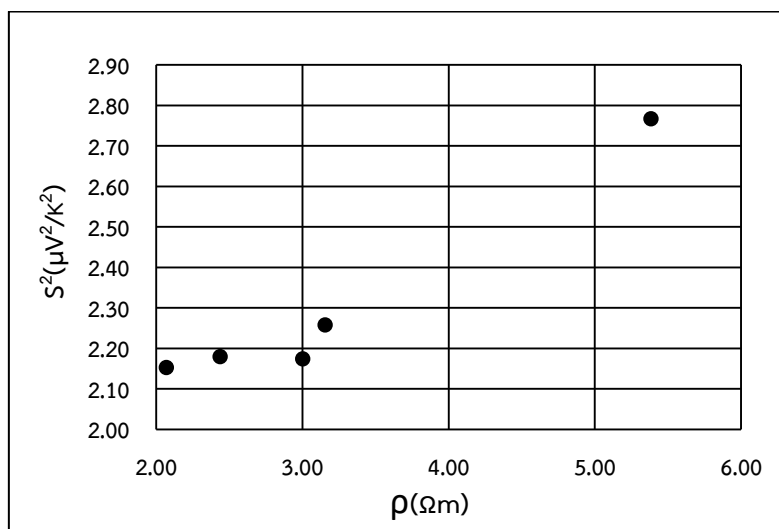


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนโดซิลิไซด์

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเจือติบูกจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าลดลง ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎีที่บอกว่าคุณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุที่มีสถานะเป็นโลหะจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุที่มีสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำ สอดคล้องกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของรูปที่ 4.2 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อเจือติบูกในปริมาณร้อยละ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 โดยอะตอมมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจาก Sn กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้วัดค่า S แล้วแตกต่างกันมากในชิ้นสารตัวอย่างเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีเฟส  $\beta$  เป็นองค์ประกอบหลัก [7,8] ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีเฟส  $\alpha$  เป็นองค์ประกอบหลักมาก เนื่องจากเฟส  $\beta$  บอกถึงความเป็นสารกึ่งตัวนำ และถ้ามีความเป็นสารกึ่งตัวนำมากก็จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก แสดงว่าสารตัวอย่างนั้นเหมาะสำหรับการเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

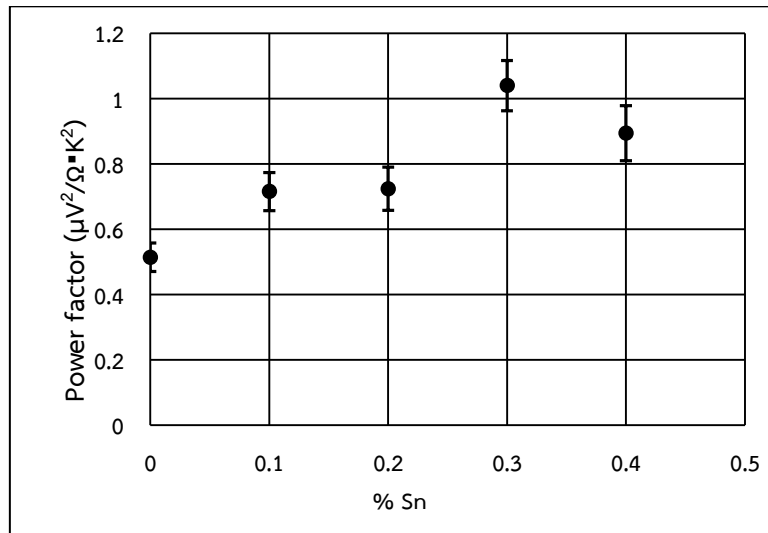
ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) สัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และ Power factor (P) ที่วัด ณ อุณหภูมิห้อง

ร้อยละของติบูก	$\rho \pm \Delta\rho$ ( $\mu\Omega \cdot m$ )	$S \pm \Delta S$ ( $\mu V/K$ )	$P \pm \Delta P$ ( $\mu V^2/\Omega \cdot K^2$ )
0.0	5.38 $\pm$ 0.02	1.66 $\pm$ 0.07	0.51 $\pm$ 0.04
0.1	3.16 $\pm$ 0.05	1.50 $\pm$ 0.06	0.72 $\pm$ 0.06
0.2	3.004 $\pm$ 0.008	1.47 $\pm$ 0.07	0.72 $\pm$ 0.07
0.3	2.071 $\pm$ 0.009	1.47 $\pm$ 0.05	1.04 $\pm$ 0.08
0.4	2.438 $\pm$ 0.009	1.48 $\pm$ 0.07	0.89 $\pm$ 0.08

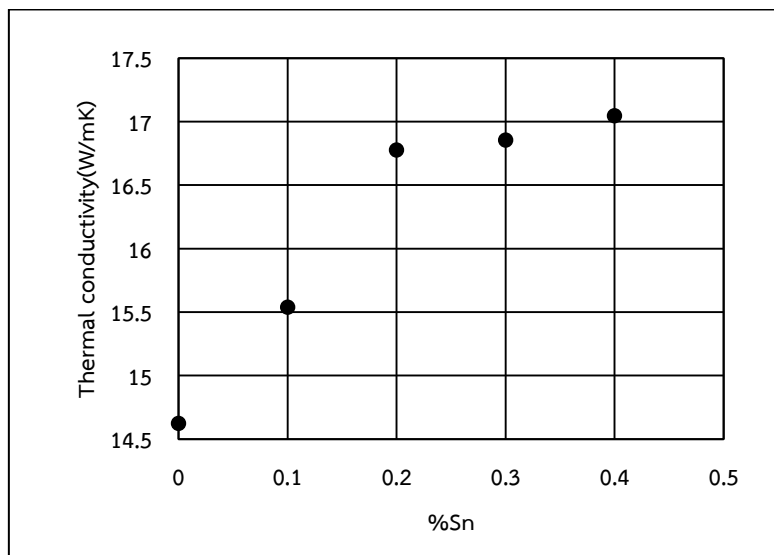


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคกำลังสองกับสภาพต้านทานไฟฟ้าในการทดลองสารไอโรนไดซิลไซด์

จากรูป 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคกำลังสองกับสภาพต้านทานไฟฟ้าในการทดลองสารไอรอนไดซิลิไซด์ จากสมการ(3) ความชันก็คือ ค่า power factor และเมื่อสังเกตกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกำลังสองก็ลดลงด้วย บ่งบอกถึงค่า power factor ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

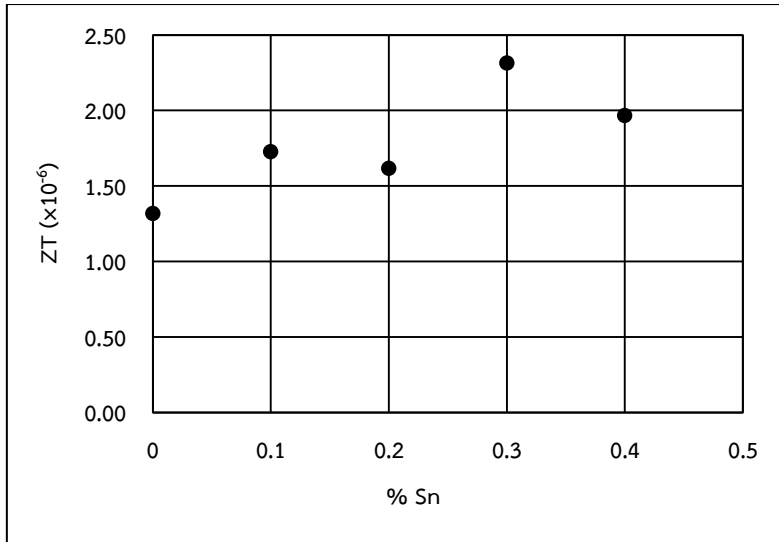


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า power factor กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซิลิไซด์



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสาร [1]





รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า figure of merit กับปริมาณร้อยละของดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซิลไซด์ โดยใช้สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C [1]

จากรูป 4.6 และ 4.8 จะเห็นได้ว่าสารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมมีค่า Power factor และค่า Dimensionless figure of merit อยู่ในระดับ  $10^{-6}$  และมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งหมด 5 ชั้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้เงื่อนไขการเจือด้วยดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.0 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 โดยอะตอม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคกับปริมาณดีบุกที่เจือลงในสารไอรอนไดซิลิไซด์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเจือดีบุกลงในสารไอรอนไดซิลิไซด์ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคมีแนวโน้มลดลง โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟาลดลงจาก  $5.0 \mu\Omega \cdot m$  สำหรับสารตัวอย่างที่ไม่เจือดีบุกเป็น  $2.4 \mu\Omega \cdot m$  สำหรับสารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.4 โดยอะตอม ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าลดลงจาก  $1.66 \mu V/K$  สำหรับไม่เจือเป็น  $1.48 \mu V/K$  สำหรับการเจือ แต่ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับปริมาณดีบุกที่เจือ

สำหรับค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์และ dimensionless figure of merit สารตัวอย่างที่เจือดีบุกร้อยละ 0.3 โดยอะตอมมีค่าอยู่ในระดับ  $10^{-6}$  ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งหมด 5 ชิ้น

### ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าควรทำให้มีมาตรฐานกว่านี้ โดยเฉพาะฐานที่วางเข็มควรทำให้มั่นคงเพื่อลดการเลื่อนของเข็มเมื่อได้รับการสั่นสะเทือนขณะทำการทดลอง
2. ควรนำสารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุกไปอบอ่อนก่อนและนำมาวัดค่าต่างๆ เพราะการที่นำสารไปอบอ่อนจะทำให้เฟสของสารเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟส  $\beta$  ซึ่งเฟส  $\beta$  เป็นเฟสที่เหมาะสมกับการเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

### ประสบการณ์ที่ได้จากการทำโครงการ

1. ได้ฝึกเขียนโปรแกรม Matlab ในการสั่งเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลอง
2. ได้เทคนิคและรู้จักการใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์มากยิ่งขึ้น
3. ได้ใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์มากมาย บางเครื่องมือก็มีราคาสูง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ณิกษานต์ ชาติชำนาญ. สภาพนำความร้อนของไอรอนโดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก. โครงการงานวิทยาศาสตร์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย, 2561
- [2] นภัส เกียรติวิศาลกิจ. การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงไฟฟ้าของไอรอนโดซิลไซด์ที่ผ่านการอบอ่อนอย่างช้าๆ. โครงการงานวิทยาศาสตร์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย, 2558
- [3] Ito, M., Nagai, H., Oda, E., Katsuyama, S. and Majima, K. (2001). Effects of P doping on the thermoelectric properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>. Journal of applied physics. 91(4) : 2138 – 2142
- [4] Kiatgamolchai, S., Nilpairach, S. and Wanichsampan, J. The effects of elements with different melting points on  $\epsilon$  – FeSi<sub>2</sub> size in FeSi<sub>2</sub> alloy. Journal of Alloys and Compounds. 666 (2016) : 237-242
- [5] Kloc, Ch., Arushanov, E., Wendl, M., Hohl, H., Malang, U. and Bucher, E. Preparation and properties of FeSi,  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub> and  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> single crystals. Journal of Alloys and Compounds. 219 (1995) : 93-96
- [6] Nishida, I., Masumoto, K., Okamoto M. and Kojima, T. (1985). Formation of FeSi<sub>2</sub> from Sintered FeSi-Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub> Eutectic Alloy\*. Transactions of the Japan Institute of Metals. 26(5) : 369 – 374
- [7] Nozariasbmarz, A., Roy, P., Zamanipour, Z., HoustonDycus, J., Cabral, M.J., LeBeau, J.M., Krasinski, J.S. and Vashaee, D. Comparison of thermoelectric properties of nanostructured Mg<sub>2</sub>Si, FeSi<sub>2</sub>, SiGe, and nanocomposites of SiGe–Mg<sub>2</sub>Si, SiGe–FeSi<sub>2</sub>. APL Materials. (2016) : 1 – 9
- [8] Takeda, M., Kuramitsu, M. and Yoshio, M. Anisotropic Seebeck coefficient in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> single crystal. Sciencedirect. (2004) : 179 – 181

ภาคผนวก

## Code ที่ใช้ในการทดลองสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารไอออนไดซิลิไซด์

### 1. เริ่มจากการเชื่อมต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

```
%% Instrument Connection

% Find a VISA-GPIB object.
obj1 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::16::INSTR',
'Tag', '');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = visa('NI', 'GPIB0::16::INSTR');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1);
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);

%%
% Find a VISA-GPIB object.
obj2 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::12::INSTR',
'Tag', '');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj2)
    obj2 = visa('NI', 'GPIB0::12::INSTR');
else
    fclose(obj2);
    obj2 = obj2(1);
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj2);

%%
%% Instrument Connection

% Find a VISA-GPIB object.
obj3 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::7::INSTR', 'Tag',
'');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj3)
    obj3 = visa('NI', 'GPIB0::7::INSTR');
else
    fclose(obj3);
    obj3 = obj3(1);
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj3);
```

```
%% Instrument Configuration and Control
```

---

2. เขียนคำสั่ง โดยสั่งให้เปิดไฟล์เพื่อใช้เก็บข้อมูลและสั่งให้จ่ายกระแสทั้งหมด 7 ค่า แต่ละกระแสสั่งให้รอ 5 วินาทีและเก็บค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 ค่าจากนั้นทำการเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อทำครบทั้งหมด 5 ค่ากระแสไฟฟ้าให้แสดงกราฟคร่าวๆระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อดูความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูล

```
% Communicating with instrument object, obj1.
fprintf(obj1, '*IDN?');
%data1 = fscanf(obj1);
%disp(data1);

fprintf(obj2, '*IDN?');
%data2 = fscanf(obj2);
%disp(data2);

fileID = fopen('FeSi2-1-config2.txt','w');

Y = ["1E-3", "2E-3", "3E-3", "4E-3", "5E-3", "6E-3", "7E-3"];
N = size(Y,2);
X = zeros(N,11);

for(i=1:N)
    fprintf(obj2, 'D1X');
    fprintf(obj2, 'V10.0X');

    fprintf(obj2, 'D0X');
    fprintf(obj2, 'I'+Y(i)+'X');

    fprintf(obj2, 'F1X');
    pause(0.2);

    X(i,1)=Y(i);
    pause(5);

    for(j=2:11)
        fprintf(obj3,'FETCh?');
        data{j} = fscanf(obj3); %read string
        pause(0.3);
        %disp(data{j});
        %example -1.10568607E+00VDC,+7431.449SECS,+58044RDNG#
        data{j} = extractBefore(data{j},16);
        %disp(data{j});
        X(i,j) = str2double(data{j});

    end

    Result = 'value';
    pause(0.30);
end

for (i=1:N)
```

```

        for(j=1:11)
            fprintf(fileID,'%12.9f',X(i,j));
        end
        fprintf(fileID,'\n');
    end
    fclose(fileID);
    %disp(X);
    current = X(:,1);
    %disp(current);
    volt = zeros(N,1);
    Vsd = zeros(N,1);
    W = zeros(N,1);
    for(k=1:N)
        volt(k) = mean(X(k,2:11));
    end
    for(n=1:N)
        Vsd(n) = std2(X(n,2:11));
    end
    for(p=1:N)
        W(p) = (1/std2(X(p,2:11)))^2;
    end

    %disp(volt);
    %disp(Vsd);
    %plot(current,volt);
    %plot data
    plot(current,volt, '.');
    %fit
    xlim([0 0.008]);
    ft = fittype('poly1');
    cf = fit(current,volt,ft,'weight',W);
    % Plot fit
    hold on
    plot(cf,'fit',0.99);
    e = errorbar(current,volt,Vsd,'o');
    %e.Line = 'none';

```

---

### 3. สั่งให้ปิดคำสั่งของเครื่องมือที่ใช้ทั้งหมด

```
%% Disconnect and Clean Up
```

```
% The following code has been automatically generated to ensure that any
% object manipulated in TMT00L has been properly disposed when executed
% as part of a function or script.
```

```
% Disconnect all objects.
```

```
fclose(obj1);
fclose(obj2);
fclose(obj3);
```

```
% Clean up all objects.
```

```
delete(obj1);
clear obj1;
delete(obj2);
clear obj2;
delete(obj3);
clear obj3;
```

## Code ที่ใช้ในการทดลองสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซิลไซด์

### 1. เริ่มจากการเชื่อมต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

```
%% Instrument Connection

% Find a VISA-GPIB object.
obj1 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::5::INSTR', 'Tag',
 '');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = visa('NI', 'GPIB0::5::INSTR');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1);
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);

%%
%% Instrument Connection

% Find a VISA-GPIB object.
obj2 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::22::INSTR',
 'Tag', '');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj2)
    obj2 = visa('NI', 'GPIB0::22::INSTR');
else
    fclose(obj2);
    obj2 = obj2(1);
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj2);
%% Instrument Connection

% Find a VISA-GPIB object.
obj3 = instrfind('Type', 'visa-gpib', 'RsrcName', 'GPIB0::7::INSTR', 'Tag',
 '');

% Create the VISA-GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj3)
    obj3 = visa('NI', 'GPIB0::7::INSTR');
else
    fclose(obj3);
    obj3 = obj3(1);
end
```

---



2. สั่งให้เปิดไฟล์เพื่อใช้เก็บข้อมูลและสั่งให้จ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 ค่า โดยแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าต้องผ่านเงื่อนไขว่า ถ้าอุณหภูมิหลังมากกว่าอุณหภูมิก่อน  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  ให้วัดอุณหภูมิต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งอุณหภูมิหลังมากหรือน้อยกว่าอุณหภูมิก่อนไม่เกิน  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  ให้เก็บค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ซึ่งจำนวนรอบที่วนในเงื่อนไขต้องไม่เกิน 48 รอบ ถ้าเกินก็สั่งให้ออกจากลูปได้ จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าความต่างศักย์ที่เก็บมาทั้งหมด 20ค่าต่อค่าแรงดันไฟฟ้า และเมื่อทำครบทั้งหมด 5 ค่าแรงดันไฟฟ้าให้แสดงกราฟคร่าวๆระหว่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อดูความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูล

```
% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj3);

%% Instrument Configuration and Control

% Communicating with instrument object, obj1.

fileID = fopen('Cu.txt','w');

Y = ["0.2", "0.4", "0.6", "0.8", "1.0"];
N = size(Y,2);
X = zeros(N,11);

fprintf(obj1, 'OUTP ON');

fprintf(obj1, 'VOLT:PROT 1.1');
fprintf(obj1, 'VOLT:PROT:STAT 1');

fprintf(obj1, 'CURR:PROT 0.5');
fprintf(obj1, 'CURR:PROT:STAT 1');

for(q=1:N)

    fprintf(obj1, 'VOLT '+Y(q));

    count = 0;

    fprintf(obj1, 'MEAS:VOLT?');
    Volt = fscanf(obj1);
    disp(Volt);

    fprintf(obj1, 'MEAS:CURR?');
    Curr = fscanf(obj1);
    disp(Curr);

    fprintf(obj2, 'ROUTE:CLOSe 1');

    fprintf(obj2, 'TCouple:TYPE K');
    fprintf(obj2, 'MEASure:TCouple?');
    data{q} = fscanf(obj2);

    pause(0.3);

    X(q,1) = str2double(data{q});

    pause(10);
```

```

fprintf(obj2,'ROUTE:CLOSE 1');

fprintf(obj2,'TCouple:TYPE K');

fprintf(obj2,'MEASure:TCouple?');
data{q} = fscanf(obj2);

pause(0.3);

X(q,2) = str2double(data{q});

Told = X(q,1);
Tnew = X(q,2);

while Tnew-Told > 0.02 && count <= 48

    pause(10);
    Told=Tnew;

    fprintf(obj2,'ROUTE:CLOSE 1');

    fprintf(obj2,'TCouple:TYPE K');

    fprintf(obj2,'MEASure:TCouple?');
    data{q} = fscanf(obj2);

    pause(0.3);

    X(q,1) = str2double(data{q});

    Tnew = X(q,1);

    count=count+1;

end

for(i=1:20)
    fprintf(obj2,'ROUTE:CLOSE 1');

    fprintf(obj2,'TCouple:TYPE K');

    fprintf(obj2,'MEASure:TCouple?');
    data{i} = fscanf(obj2);

    pause(0.3);

    X(q,i) = str2double(data{i});

    fprintf(obj2,'ROUTE:CLOSE 2');

    fprintf(obj2,'TCouple:TYPE K');

    fprintf(obj2,'MEASure:TCouple?');
    data1{i} = fscanf(obj2);

```

```

        pause(0.3);

        %X(i,2) = str2double(data1{i});

        for(j=20+i:20+i)
            fprintf(obj3,'FETCh?');
            data{i} = fscanf(obj3); %read string
            pause(0.3);

            data{i} = extractBefore(data{i},16);

            X(q,j) = str2double(data{i});
        end

    end

    Result = 'value';
    pause(3);
end

for (q=1:N)
    for(i=1:20)
        fprintf(fileID,'%12.9f ',X(q,i));
    end
    fprintf(fileID,'\n');
    for(j=21:40)
        fprintf(fileID,'%12.9f ',X(q,j));
    end
    fprintf(fileID,'\n');
end
fclose(fileID);
Temp = zeros(N,1);
volt = zeros(N,1);
Vsd = zeros(N,1);
W = zeros(N,1);

for(r=1:N)
    Temp(r) = mean(X(r,1:20));
end
for(t=1:N)
    volt(t) = mean(X(t,21:40));
end
for(n=1:N)
    Vsd(n) = std2(X(n,21:40));
end
for(p=1:N)
    W(p) = (1/std2(X(p,21:40)))^2;
end
%disp(Temp);
%disp(volt);
%disp(Vsd);
%disp(W);
plot(Temp,volt,'.');

xlim([24 45]);
ft = fittype('poly1');
cf = fit(Temp,volt,ft,'weight',W);

```

```
hold on
plot(cf,'fit',0.99);
e = errorbar(Temp,volt,Vsd,'o');

fprintf(obj1, 'OUTP OFF');
```

---

### 3. สั่งให้ปิดคำสั่งของเครื่องมือที่ใช้ทั้งหมด

```
%% Disconnect and Clean Up
```

```
% The following code has been automatically generated to ensure that any
% object manipulated in TMT00L has been properly disposed when executed
% as part of a function or script.
```

```
% Disconnect all objects.
```

```
fclose(obj1);
fclose(obj2);
fclose(obj3);
```

```
% Clean up all objects.
```

```
delete(obj1);
clear obj1;
delete(obj2);
clear obj2;
delete(obj3);
clear obj3;
```

ตารางแสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์

ครั้งที่	สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\mu \cdot \Omega m$ )	ความคลาดเคลื่อน ( $\mu \cdot \Omega m$ )
0	5.38	0.016527
0.1	3.16	0.045017
0.2	3.00	0.007482
0.3	2.07	0.008657
0.4	2.44	0.009026

ตารางแสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารไอรอนไดซัลไฟด์

ครั้งที่	สัมประสิทธิ์ซีเบค ( $\mu V/K$ )	ความคลาดเคลื่อน ( $\mu V/K$ )
0	1.66346	0.070489
0.1	1.50289	0.060141
0.2	1.47456	0.067551
0.3	1.46746	0.054403
0.4	1.47647	0.069497