



## โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลไซด์ ( $\text{FeSi}_2$ )  
ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม

The effects of thermal annealing on thermal conductivity  
of Iron disilicide with 0.3 % atom Sn

**ชื่อนิสิต** นายสิทธิกร คำทอง

**เลขประจำตัว** 5833444623

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# โครงการวิทยาศาสตร์นิสิตชั้นปีที่ 4

เรื่อง

ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของ  
สารไอรอนไดซิลิไซด์ ( $\text{FeSi}_2$ ) ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม

นายสิทธิกร คำทอง

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงการ	ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลไซด์ ( $\text{FeSi}_2$ ) ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
ผู้จัดทำโครงการ	นายสิทธิกร คำทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2562

---

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการได้ตรวจรับรองรายงานฉบับนี้แล้ว

  
..... (ประธานกรรมการ)  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรเจริญ ฝิโลทัยดำเกิง)

  
..... (กรรมการ)  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคคณศ ตุงคะสมิต)

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

หัวข้อโครงการ	ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลิไซด์ ( $\text{FeSi}_2$ ) ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
ผู้จัดทำโครงการ	นายสิทธิกร คำทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2562

---

### บทคัดย่อ

ในการทดลองนี้ได้วัดค่าสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลิไซด์ด้วยเครื่องนาโนแฟลช (Nano Flash) โดยทำการวัดขึ้นงานก่อนการอบอ่อนและหลังการอบอ่อน ขึ้นงานมี 2 ประเภทคือไม่เจือดีบุกและเจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ก่อนการอบอ่อนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิของทุกขึ้นงาน มีแนวโน้มคล้ายกันนั่นคือ (1) ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและ (2) ค่าสภาพนำความร้อนของขึ้นงานที่เจือดีบุกมีแนวโน้มสูงกว่าขึ้นงานที่ไม่เจือดีบุก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของขึ้นงานที่เจือดีบุกมีค่าอยู่ในช่วง 17.0-21.0  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  ส่วนขึ้นงานที่ไม่เจือดีบุกจะอยู่ในช่วง 14.5-18.5  $\text{W/m}\cdot\text{K}$

หลังการอบอ่อนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิของทุกขึ้นงานยังเหมือนเดิมคือ (1) ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและ (2) ค่าสภาพนำความร้อนของขึ้นงานที่เจือดีบุกยังคงมีแนวโน้มสูงกว่าขึ้นงานที่ไม่เจือดีบุกที่ทุกค่าของอุณหภูมิตดลอง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของขึ้นงานที่เจือจะอยู่ในช่วง 16.0-33.0  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  ซึ่งสูงขึ้นกว่าก่อนอบ สำหรับขึ้นงานที่ไม่เจือดีบุกหลังอบจะมีค่าอยู่ในช่วง 12.0-25.0  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าก่อนอบเช่นกัน ขึ้นงานที่เจือมี “ผลต่าง” ของสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิตดลอง (50-300  $^{\circ}\text{C}$ ) มากกว่าขึ้นงานที่ไม่ได้เจือ อัตราส่วนของผลต่างนี้หลังอบต่อก่อนอบ (ค่า R) ของขึ้นงานที่เจือจะมีค่ามากกว่าขึ้นงานที่ไม่เจือ การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 750  $^{\circ}\text{C}$  จะทำให้ค่า R สูงขึ้น (ทั้งขึ้นงานที่เจือและไม่เจือ) ในขณะที่การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 860  $^{\circ}\text{C}$  กลับทำให้ค่า R ต่ำลงในขึ้นงานที่เจือ (ไม่มีข้อมูลสำหรับขึ้นงานที่ไม่เจือเพราะไม่มีคู่เทียบ)

<b>Project title</b>	The effects of thermal annealing on thermal conductivity of Iron disilicide with 0.3 % atom Sn
<b>Name</b>	Sittikorn Khamthong
<b>Project advisor</b>	Associate Professor Somchai Kiatgamolchai (Ph.D)
<b>Department</b>	Physics
<b>Academic year</b>	2019

---

### Abstract

The thermal conductivity of iron disilicide was measured by “Nano Flash” technique before and after annealing. There are 2 kinds of samples which are without and with 0.3% atom Sn. It was found that the temperature-dependent thermal conductivity of every piece have similar trends, which are (i) the thermal conductivity decreases with increasing temperature and (ii) the thermal conductivity of sample with Sn is greater than that without Sn. At 50 °C, the thermal conductivities of samples with Sn are in the range of 17.0-21.0 W/m·K and without Sn in the range of 14.5-18.5 W/m·K.

After annealing, the relationships between the thermal conductivity and temperature of every piece also have similar trends, which are (i) the thermal conductivity decreases with increasing temperature and (ii) the thermal conductivity of sample with Sn is still greater than that without Sn . At 50 °C, the thermal conductivities of samples with Sn are in the range of 16.0-33.0 W/m·K which is higher than that before annealing, Samples without Sn have the thermal conductivity in the range of 12.0-25.0 W/m·K which is also higher than that before annealing. After annealing, samples with Sn showed higher change or “difference” in the thermal conductivity within the 50-300 °C temperature range than that without Sn. The ratio of this differences between after-annealing to before-annealing (R) in Sn-added samples is greater than that of without-Sn samples. Increasing the annealing time at 750 °C will increase the R value for both with and without Sn samples. Increasing the annealing time at 860 °C, however, was found to decrease the R value for Sn-added sample but not enough information for comparison for without-Sn samples.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์เรื่อง ผลของการอบอุ่นที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลิไซด์ ( $\text{FeSi}_2$ ) ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคลากรต่าง ๆ ตั้งแต่คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนครอบครัวและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน

รายงานฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกรมลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตา เสียสละเวลาส่วนตัวในการช่วยเหลือของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตา กรุณา สละเวลาส่วนตัวในการช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านโดยเฉพาะการใช้เครื่องนาโนแฟลซ ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ธีรทรง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรเจริญ ผลไทย์ดำเกิง ประธานกรรมการสอบโครงการที่เสียสละเวลาส่วนตัวในการสอบโครงการวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคคณศ ตุงคะสมิต กรรมการสอบโครงการที่เสียสละเวลาส่วนตัวในการสอบโครงการวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิปกา สุขภิรมย์ ที่ให้ความกรุณาในการใช้ในโตรเจนเหลว ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณ Trang Thuy Le Hoang เจ้าหน้าที่ผู้มีความชำนาญที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการใช้ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ผู้มีความชำนาญที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการใช้เครื่องตัดสารที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ นาย จิรฎ ภูมิอัครวางกูร และเพื่อน ๆ น้อง ๆ นิสิต ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจร่วมทุกข์ร่วมสุข และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลกันตลอดมา

โครงการนี้เกิดความสำเร็จขึ้น จากการช่วยเหลือจากอาจารย์ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ รวมถึงบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องของท่านอื่นๆ ที่ผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณจากใจจริงที่ทุกท่านให้ความร่วมมือและให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดแห่งความสำเร็จในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ บุคคลในครอบครัวอันเป็นที่รัก ซึ่งเป็นบุคคลที่ให้อกำลังใจกับผู้วิจัยตลอดมา ดูแล ช่วยเหลือในทุกสิ่ง รวมไปถึงอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความรักและความเคารพเป็นอย่างสูง

สิทธิกร คำทอง

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)

ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)

ข

กิตติกรรมประกาศ

ค

สารบัญ

ง

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2

## บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2 ปรากฏการณ์ซีเบก	3
2.3 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	5
2.4 สารประกอบเหล็ก-ซิลิกอน	6
2.5 การถ่ายเทความร้อน	8
2.6 กฎของฟูเรียร์	8
2.7 สมการนำความร้อน	9
2.8 ค่าสภาพนำความร้อน	10
2.9 วิธีการวัดแบบเลเซอร์แฟลช (Laser Flash Technique)	11

<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลอง</b>	
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	12
3.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องนาโนแฟลช	16
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบ	
4.1.1 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่องนาโนแฟลชก่อนอบ	20
4.1.2 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่องนาโนแฟลชก่อนอบ โดยทำซ้ำกับชิ้นงานเดิมของปี61	22
4.2 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนหลังอบ	
4.2.1 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่องนาโนแฟลชหลังอบ	23
4.2.2 เปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช ก่อนอบ และ หลังอบ	25
4.2.3 แนวโน้มผลต่างของค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบ และหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง 860 ° ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง	31
4.3 ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริก	32
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	34
ภาคผนวก      การหาค่า $C_p$ โดยใช้โปรแกรม LFA analysis	35
เอกสารอ้างอิง	48



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การใช้พลังงานไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม มักมีการสูญเสียพลังงานสู่สิ่งแวดล้อมในรูปแบบของพลังงานความร้อน การนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการขาดแคลนด้านพลังงาน [1] เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของวัสดุ [2] ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงจากปลายด้านหนึ่งของวัสดุถ่ายเทไปยังปลายอีกด้านซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จะส่งผลให้เกิดการสั่นของอนุภาคโฟนอน (phonon) และอิเล็กตรอน (electron) หรือโฮล (hole) เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลให้เกิดพลังงานไฟฟ้า แต่ว่าการใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก เนื่องจากยังมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำและยังคงมีราคาสูง เช่น สารประกอบของบิสมีทและเทลลูเรียม ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงและพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่น่าสนใจและอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาก็คือสารประกอบระหว่างเหล็กและซิลิกอน โดยที่สารประกอบของเหล็กและซิลิกอนนี้มีโครงสร้างหนึ่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ คือ เฟสบีตา หรือ บีตา-ไอรอนไดซิลไซด์ ( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>) ทั้งนี้  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> มีข้อดี ดังนี้

1. เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
2. เหล็กและซิลิกอนเป็นธาตุที่หาได้ง่าย มีราคาถูกกว่าบิสมีทและเทลลูเรียมมาก
3. สารประกอบของเหล็กและซิลิกอนจะไม่ออกซิไดซ์กับอากาศ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 900 °C
4. สารประกอบของเหล็กและซิลิกอนไม่เป็นพิษ

ปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้ทำให้  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> เป็นสารประกอบที่น่าสนใจมากสำหรับการผลิตไฟฟ้าในระบบอุณหภูมิสูง แต่ว่าการสังเคราะห์ให้เป็นสารประกอบ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> นั้นยังติดปัญหาคือ ยังมีเฟส  $\epsilon$ -FeSi<sub>2</sub> ที่เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งหลงเหลืออยู่ในงานวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัยและคณะ (2016) พบว่าการเจือธาตุดีบุกจะช่วยให้เฟสดังกล่าวมีขนาดลดลงและหากตามด้วยการอบอ่อนก็จะยิ่งทำให้มีขนาดเล็กลงมากขึ้น [3] ฉะนั้นการศึกษาผลของการอบอ่อนของสารไอรอนไดซิลไซด์ (FeSi<sub>2</sub>) ที่เจือดีบุกที่มีต่อสภาพนำความร้อนนี้จึงอาจเป็นประโยชน์ในด้านการวิจัยทางเทอร์โมอิเล็กทริกในอนาคต

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลไซด์ (FeSi<sub>2</sub>) ที่เจือดีบุก

#### 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาผลของการเจือสารประกอบเหล็ก - ซิลิกอนด้วยธาตุดีบุก ในปริมาณร้อยละ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
2. วัดสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 – 300 °C ของสารประกอบเหล็ก - ซิลิกอน ที่เจือดีบุก ในปริมาณร้อยละ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม
3. วัดสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 – 300 °C ของสารประกอบเหล็ก - ซิลิกอน ที่เจือดีบุก ในปริมาณร้อยละ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง 860 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้การใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ และหลักการทำงานของเครื่องมือ
2. ทำให้นิสิตผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจในการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอน เช่น การเตรียมสาร การตัดสาร การอบที่อุณหภูมิสูง
3. ทราบสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ทั้งก่อนอบ และหลังอบ

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก

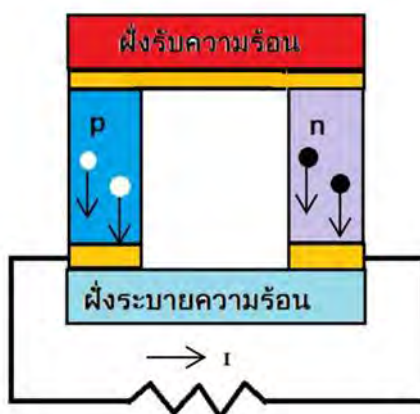
เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) เป็นคำที่เกิดจากการผสมกันระหว่างคำว่า เทอร์โม (thermo) ซึ่งมีความหมายว่าความร้อน และอิเล็กทริก (electric) ซึ่งมีความหมายว่าไฟฟ้านั้นจึงเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและไฟฟ้า กล่าวคือปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนความร้อนให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง และในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความเย็นได้โดยตรง โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกเรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) โดยกระบวนการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและความเย็นจะอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุ เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้ง 2 ข้างพบว่าจะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ นั่นคือมีการสั่นของอนุภาคโฟนอน (phonon) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron) ด้วยซึ่งจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา

#### 2.2 ปรากฏการณ์ซีเบค

ใน ค.ศ. 1821 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck, German Physicist, 1770-1831) กล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำ 2 ชนิดจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด”



รูปที่ 2.1 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค



รูปที่ 2.2 การต่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี และ ชนิดเอ็น เข้าด้วยกัน (วงกลมสีดำ และวงกลมสีขาว คือ พาหะนำไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ) [4]

ปรากฏการณ์ซีเบคมีรากฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้า ความสำคัญทางกายภาพพิจารณาจากปรากฏการณ์ของการบังคับอุณหภูมิกเรเดียนต์สม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้อุณหภูมิกเรเดียนต์ (gradient-temperature) หนึ่ง พาหะอิสระต่างๆที่ปลายด้านร้อน (hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าปลายด้านเย็น (cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุสะสมที่ปลายทั้งสองด้านทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (back electromotive force หรือ back emf) ซึ่งจะต่อต้านการไหลของประจุตัวถัด ๆ มาที่จะมาสะสม จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลและประจุสุทธิที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณใด ๆ เป็นศูนย์ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลเกิดขึ้นถูกเรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบค ถ้าเขียนในรูปของผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าและผลต่างอุณหภูมิจะได้ว่า

$$\frac{dV}{dx} = S \frac{dT}{dx}$$

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

เมื่อ  $\Delta V$  คือ ผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

$S$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)

$\Delta T$  คือ ผลต่างอุณหภูมิ (K)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จัดเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุนั้น ๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นลบแต่สารกึ่งตัวนำชนิดพี(p-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นบวก

## 2.3 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

### 2.3.1 ความหมายของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ วัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้าและผันกระแสไฟฟ้าเป็นความเย็นได้โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุ ซึ่งมีวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 2 ชนิดคือ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพีและชนิดเอ็น

### 2.3.2 หลักการและทฤษฎีของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

หลักการของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมี 2 หลักการ คือ ปรากฏการณ์ซีเบคสำหรับการผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้าและปรากฏการณ์เพลเทียร์สำหรับการผันกระแสไฟฟ้าเป็นความเย็น ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ (2) [5]

$$\eta = \frac{\Delta T}{\Delta T + T + \frac{k}{S^2 \sigma}} = \frac{\eta_c}{\eta_c + \frac{1}{ZT}} \quad (2)$$

ถ้าเราให้  $\eta_c$  คือ ประสิทธิภาพผลหารของเครื่องกลคาร์โนต์สมบูรณ์ (efficiency quotient of a perfect Carnot engine) ซึ่งประสิทธิภาพคาร์โนต์สามารถเขียนได้ในเทอม  $\eta_c = \frac{\Delta T}{T}$  และไดเมนชันเลสฟิเจอร์ออฟเมอริท (dimensionless figure of merit,  $ZT$ ) ดังสมการ

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{k} T \quad (3)$$

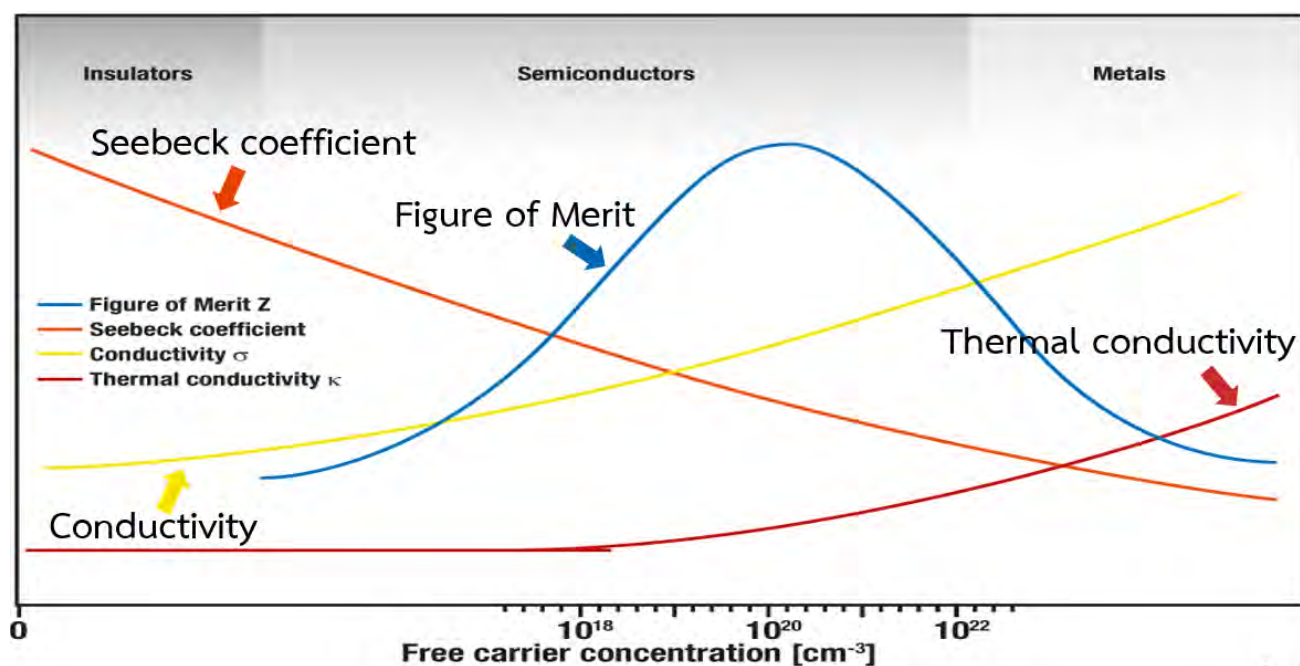
เมื่อ  $Z$  คือ ค่าฟิเจอร์ออฟเมอริท

$S$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)

$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า ( $\Omega/m$ )

$k$  คือ สภาพนำความร้อน (W/mK)

สำหรับประสิทธิภาพที่ดี ค่า  $Z$  ควรจะมีค่ามาก ๆ กล่าวคือวัสดุควรมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูง ค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูง และค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งจะหมายถึงวัสดุให้แรงดันไฟฟ้าที่สูง มีความต้านทานภายในที่ต่ำ และคงสภาพเกรเดียนต์ที่สูงของอุณหภูมิได้ดี ตามลำดับ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าช่วงของสารที่ให้ค่า  $Z$  ที่สูงที่สุดจะอยู่ในย่านของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความหนาแน่นพาหะประมาณ  $10^{20}$ - $10^{21}$  ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งจะหมายถึงสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปสูงมากหรือเกือบจะเข้าสู่ย่านสารกึ่งโลหะ (Semi-metal)



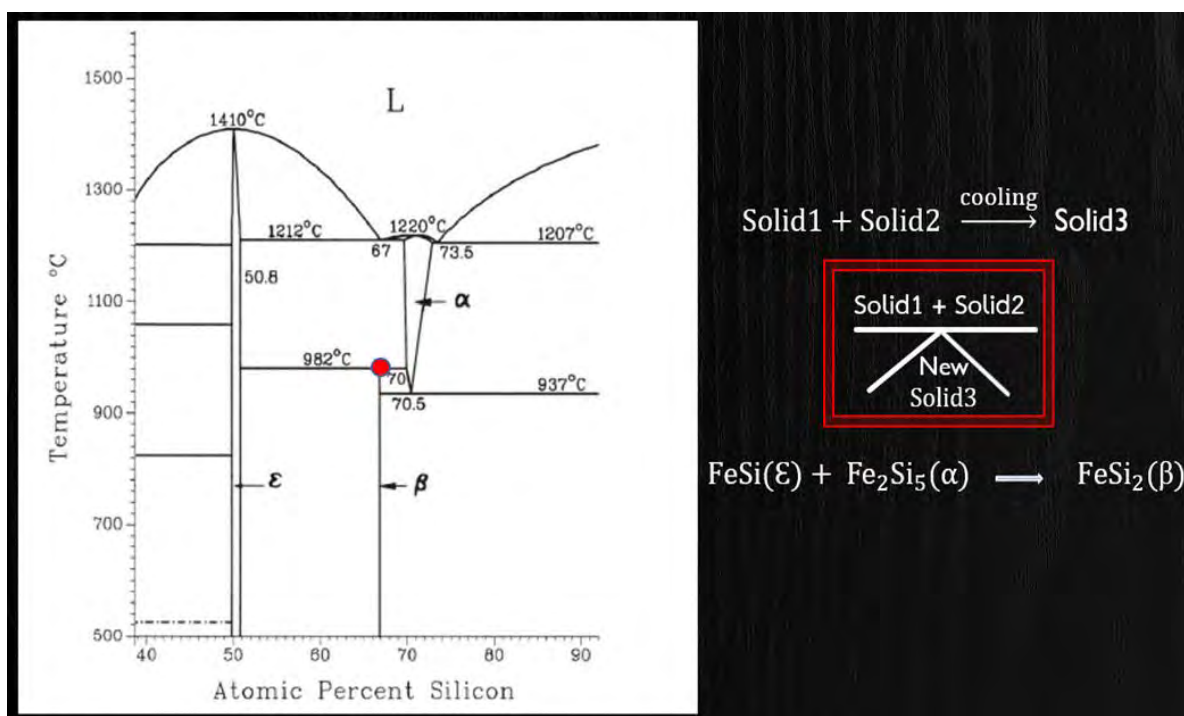
[linseis.com/en/properties/seebeck-coefficient/](http://linseis.com/en/properties/seebeck-coefficient/)

รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของพาหะ ประจักษ์สระ [6]

## 2.4 สารประกอบเหล็ก-ซิลิกอน

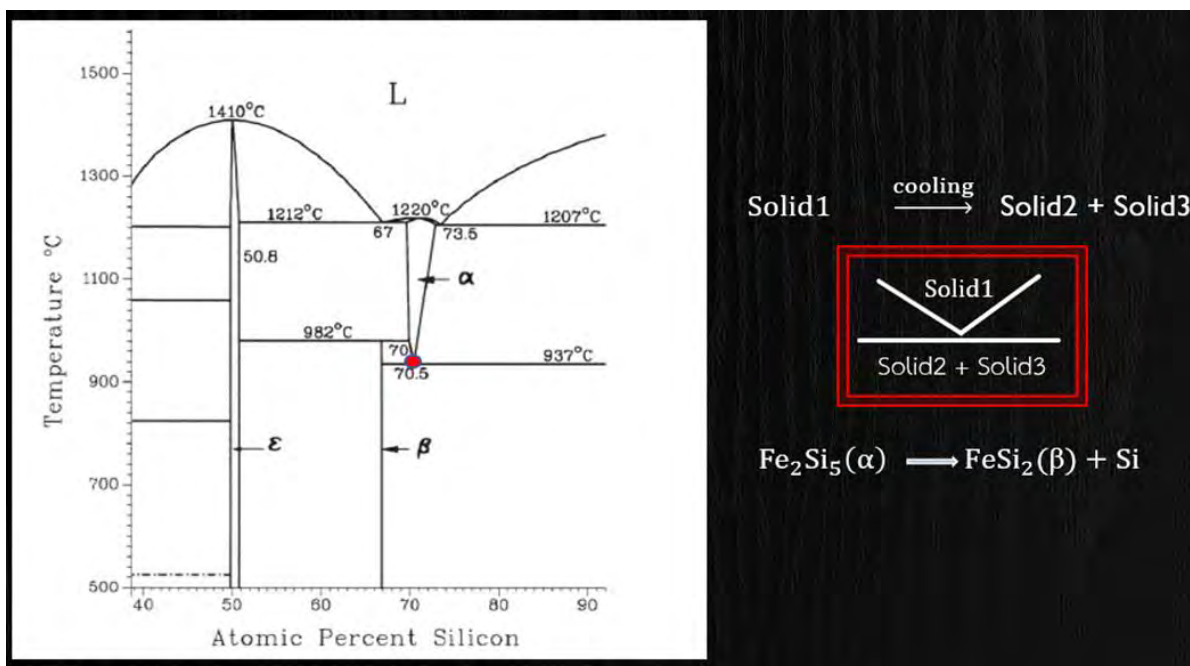
ธาตุเหล็กและซิลิกอนสามารถอยู่ในรูปสารประกอบได้หลายรูปแบบหรือหลายเฟสซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะ 3 เฟสได้แก่  $\alpha$  -  $\text{Fe}_2\text{Si}_5$   $\epsilon$  -  $\text{FeSi}$  และ  $\beta$  -  $\text{FeSi}_2$  เมื่อพิจารณาสมบัติการนำไฟฟ้าของทั้ง 3 เฟสพบว่าเฟส  $\alpha$  และเฟส  $\epsilon$  มีความเป็นโลหะซึ่งจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าไม่เหมาะสมในการใช้เป็นสารเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนเฟส  $\beta$  นั้นมีสมบัติในย่านสารกึ่งตัวนำดังนั้นจึงมีความเหมาะสมเพราะจะให้ค่าฟิเจอร์ออฟเมอริทสูงกว่าโลหะ สำหรับกระบวนการเกิดเฟส  $\beta$  นั้น ดูได้จากรูป 2.4 ซึ่งเป็นแผนภาพเฟสไดอะแกรมของระบบเหล็ก-ซิลิกอน เมื่อหลอมเหลวเหล็กและซิลิกอนในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอม จนเกิดเฟสที่เป็นของเหลว (Liquid phase, L) แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1220 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic reaction,  $L \rightarrow \text{Fe}_2\text{Si}_5 + \text{FeSi}$ ) เกิดเฟส  $\alpha$  และเฟส  $\epsilon$  โดยทั้งสองเฟสนี้มีความเป็นโลหะ ซึ่งไม่เหมาะสำหรับงานทางเทอร์โมอิเล็กทริก เฟส  $\beta$  สามารถเกิดได้จากการอบอ่อนตามปฏิกิริยาดังนี้[7]

1. ปฏิกิริยาเพอริเทคตอยด์ ( Peritectoid reaction ) ที่อุณหภูมิประมาณ 982 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาเพอริเทคตอยด์

## 2. ปฏิกริยายูเทคทอยด์ (Eutectoid reaction) ที่อุณหภูมิประมาณ 937 องศาเซลเซียส



### 2.5 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ โดยมีกลไกการถ่ายเทความร้อนได้ 3 วิธี คือ การนำความร้อน การแผ่รังสี และการพาความร้อน [8]

1. การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งส่งผ่านเนื้อของสสารไปยังอีกจุดหนึ่งโดยเนื้อของสสารที่นิ่งอยู่กับที่เป็นการส่งผ่านในลักษณะการสั่นของอะตอม เช่น การนำความร้อนในข้อโลหะ

2. การพาความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งในสสารเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งในสสารโดยติดไปกับสสารที่เกิดการเคลื่อนที่ เช่น การพัดของลมร้อน

3. การแผ่รังสี คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งโดยการที่จุดที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และไม่ใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่



## 2.6 กฎของฟูเรียร์

การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนถ่ายเทผ่านสสารโดยที่สสารไม่เกิดการเคลื่อนที่พาความร้อน นั้นไปแต่ความร้อนไหลผ่านสสารนั้นเองโดยการสั่นของอะตอม โดยสมการแสดงพฤติกรรมของการนำความร้อนได้ ถูกนำเสนอโดยฟูเรียร์ และถูกรู้จักกันในนาม กฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์ สำหรับการนำความร้อนโดยกฎของฟูเรียร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ พลิกซ์ของความร้อนที่การถ่ายเท ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ จะเป็นปริมาณตรงกับค่าลบของ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้น และสามารถเขียนเป็นสมการ การนำความร้อนในแนวแกนเดียวได้ ดังต่อไปนี้

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

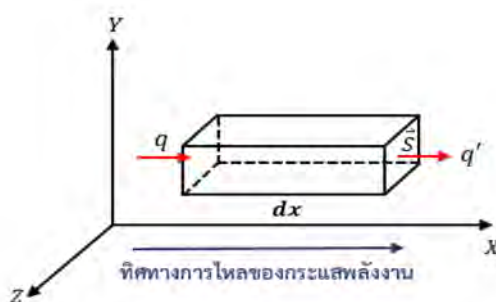
เมื่อ  $q$  คือ ความหนาแน่นกระแสพลังงานที่เกิดการถ่ายเท ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\kappa$  คือ สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )

$\frac{\partial T}{\partial x}$  คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน  $X$  ( $\text{K}/\text{m}$ )

## 2.7 สมการนำความร้อน

เราสามารถหาสมการนำความร้อนได้โดยอาศัยหลักที่ว่าพลังงานมีค่าคงที่ดังต่อไปนี้ พิจารณาการ นำความร้อนผ่านปริมาตรเล็ก ๆ  $dV$  ซึ่งมีความยาว  $dx$  และพื้นที่หน้าตัด  $S$  โดยให้  $q$  เป็นความหนาแน่น กระแสพลังงานที่ไหลเข้าผนังด้านซ้าย และ  $q'$  เป็นความหนาแน่นกระแสพลังงานที่ไหลออกจากผนังด้านขวา ของปริมาตร  $dV$



รูปที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็ก ๆ

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานผลต่างของพลังงานที่เข้ามาทางซ้ายและไหลออกไปในทางขวาใน 1 หน่วย เวลาเท่ากับอัตราการเพิ่มพลังงานในปริมาตร  $dV$

ดังนั้น อัตราการเพิ่มพลังงานในปริมาตร  $dV$  เท่ากับ

$$qS - q'S = -(q' - q)S = -(dq)S = -\frac{\partial q}{\partial x} S dx \quad (5)$$

ถ้าให้  $c$  เป็นค่าความจุความร้อนของสาร มีหน่วยเป็น  $(\text{J kg}^{-1}\text{k}^{-1})$  และสารมวล 1 หน่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้น  $dT$  ในช่วงเวลา  $dt$  จะได้อัตราการเพิ่มพลังงานเท่ากับ  $c\frac{\partial T}{\partial t}$  กำหนดให้  $\rho$  เป็นความหนาแน่นของสาร ดังนั้นมวลในปริมาตร  $dV$  จะเท่ากับ  $\rho S dx$

$$\text{อัตราการเพิ่มพลังงานในปริมาตร } dV \text{ จะเท่ากับ } (\rho S dx)(c\frac{\partial T}{\partial t}) \quad (6)$$

สมการที่ (5) เท่ากับสมการที่ (6)

$$(\rho S dx)(c\frac{\partial T}{\partial t}) = -\frac{\partial q}{\partial x} S dx$$

ดังนั้น

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}$$

แทนค่า  $q$  จากสมการ (4)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

หรือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

เมื่อ  $\frac{\partial T}{\partial t}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$\alpha$  คือ ค่าสภาพแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)  $= \frac{\kappa}{\rho c_p}$

จะได้ว่าสมการ (7) เป็นสมการนำความร้อน (equation of thermal conduction) ซึ่งบอกการกระจายของอุณหภูมิของสารที่ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ กัน

## 2.8 ค่าสภาพนำความร้อน

ในการวัดสมบัติการนำความร้อนของวัสดุจะมีค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ คือ ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity,  $\kappa$ ) ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลของพลังงานความร้อนที่จุดใด ๆ ผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ ถ้าวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดี ก็จะมีค่า  $\kappa$  สูง แต่ถ้าวัสดุใดนำความร้อนได้น้อย ก็จะมีค่า  $\kappa$  ต่ำ โดยการวัดค่าสภาพนำความร้อน สามารถแบ่งตามเทคนิคของการวัดได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) การนำความร้อนในสภาวะคงตัว (steady state heat transfer) คือ การถ่ายเทความร้อนในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุในตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบอาจจะไม่เท่ากันได้ (Non-homogenous temperature)

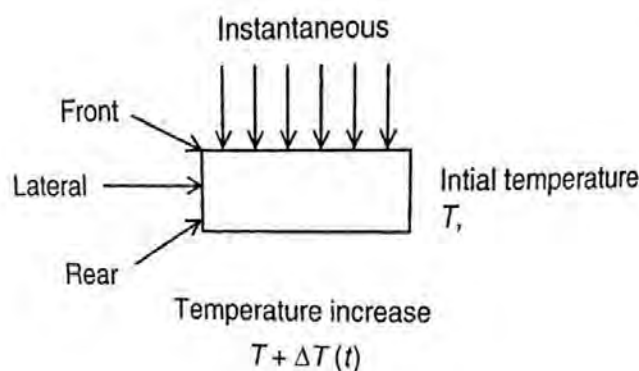
2) การนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (transient heat transfer คือ การวัดความร้อนในขณะที่มีการให้ความร้อนเข้าไป เป็นการวัดแบบเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งการวัดแบบนี้มีข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ตัวอย่างวิธีการวัดแบบสภาวะไม่คงตัว เช่น Laser flash method วิธีนี้จะวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานแผ่นบางเมื่อมีการให้พลังงานจาก laser pulse หรือ light pulse การวัดแบบนี้มีความรวดเร็ว เหมาะกับวัสดุหลายชนิด ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการวัดที่กว้าง ตั้งแต่ประมาณ  $-120$  ถึง  $2800$  °C [9]

## 2.9 วิธีการวัดแบบ Laser Flash

วิธี laser flash นี้จะวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) และคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนจากสมการ(8) [10] โดยที่ค่าของปริมาณอื่น ๆ จะต้องทราบด้วย

$$k = \alpha \rho c_p \quad (8)$$

- เมื่อ  $\alpha$  คือ สภาพแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)  
 $k$  คือ สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่น (Bulk density)  
 $c_p$  คือ ความจุความร้อน (Heat capacity)



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของวิธีการวัดแบบ Laser Flash

วิธีการวัดแบบ Laser Flash จะใช้กับชิ้นงานที่เป็นรูปทรงกระบอกบาง โดยจะทำการยิงพัลส์ความร้อนไปที่ด้านหนึ่งของชิ้นงานและตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของด้านตรงข้ามเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่เปลี่ยนแปลง พลังงานความร้อนจะแพร่จากด้านที่ถูกยิงไปอีกด้านหนึ่งตามสมการนำความร้อนหนึ่งมิติของฟูเรียร์

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

โดยที่

$$T(x, t) := T_{sample}(x, t) - T_{sur}$$

เมื่อ  $T_{sample}(x, t)$  คือ อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ตำแหน่ง  $x$  เวลา  $t$ ,  $T_{sur}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและ  $\alpha$  คือ สภาพแพร่ความร้อน ถ้าหากความยาวพัลส์ของเลเซอร์และความลึกทะลุทะลวงในชิ้นงานสั้นพอที่จะถูกละเลย(เทียบกับความหนาของชิ้นงาน) การกระจายอุณหภูมิเริ่มต้นภายในชิ้นงานสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเคลต้า สำหรับเงื่อนไขขอบ อะเดียแบติก

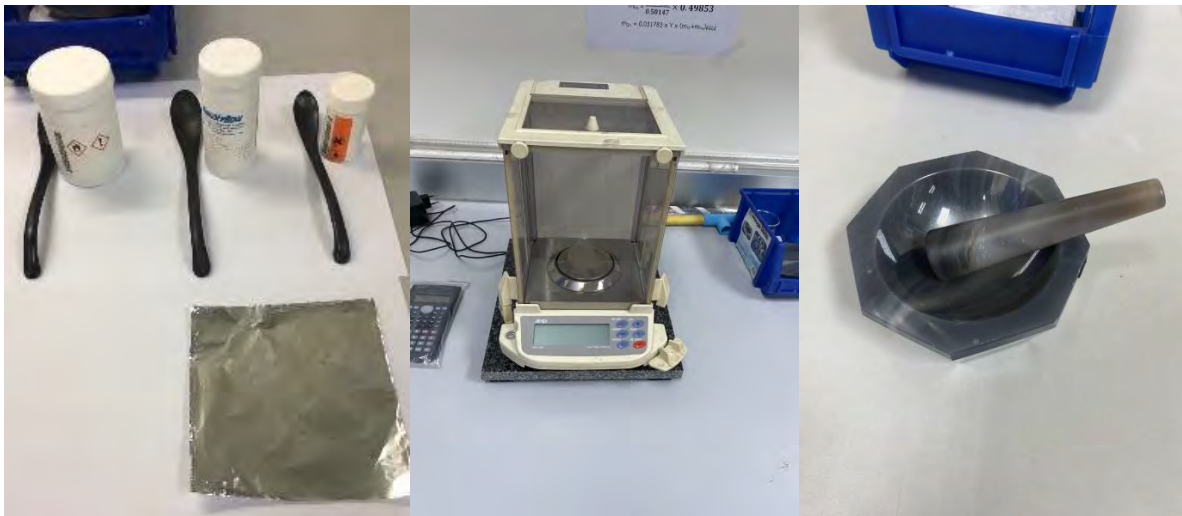
$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{และ} \quad \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

วิธีการวัดแบบ Laser Flash นี้ถูกนำมาใช้โดย Parker [10] เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการกักสมการนำความร้อนหนึ่งมิติในชิ้นงานที่มีความหนา  $L$  เริ่มทำการวัดค่า โดยที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิคงที่และให้ความร้อนบนด้านหนึ่งของชิ้นงานซึ่งให้พลังงาน Laser เข้าไปแบบ pulse เป็นการให้ความร้อนเพียงชั่วขณะ พลังงานความร้อนดังกล่าวจะแพร่ผ่านชิ้นงานไปยังตำแหน่งฝั่งตรงข้าม ในงานวิจัยนี้เราจะใช้เครื่องที่เรียกว่า นาโนแฟลช (Nano Flash) ซึ่งจะใช้แสงแฟลชจากหลอดซีนอนแทนแสงเลเซอร์

### บทที่ 3

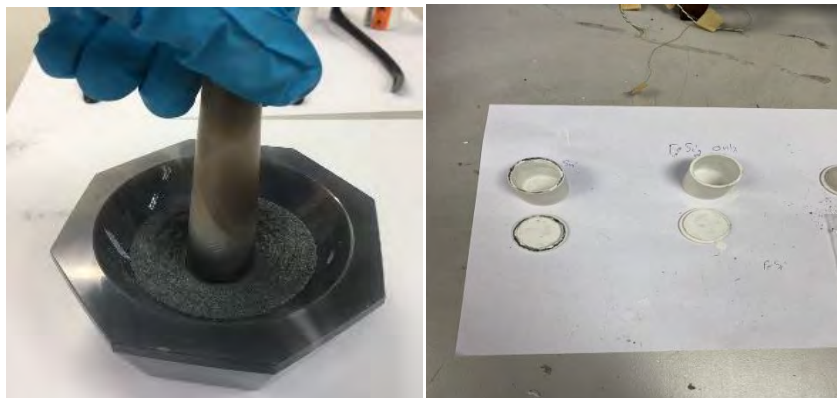
#### ขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลอง

1. ทำการเตรียมผงเหล็กและซิลิกอนโดยคำนวณและชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง โดยมีอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอมแล้วเติมผงดีบุกผสมลงไปปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม หรือไม่เจือเลย ซึ่งการเจือ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม หมายถึง การเตรียมสาร  $\text{FeSi}_2$  จำนวน 100 อะตอม (Fe 33.33 อะตอมและ Si 66.67 อะตอม) จะเจือดีบุกลงไป 0.3 อะตอม โดยให้มวลรวมของสารที่ผสมมีมวลประมาณ 15 กรัม และการชั่งสารจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์รองไว้เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย เมื่อชั่งสารได้ตามที่ต้องการแล้วจึงใส่ลงในถ้วยบดสาร



รูปที่ 3.1 ผงเหล็ก ซิลิกอน และดีบุก, เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง, สากและครกบดสาร

2. นำผงเหล็ก ซิลิกอน และดีบุกที่เจือในปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมที่ต้องการบดผสมกันลงในถ้วยบด ทำการบดสารโดยใช้ครกบดสารคนเป็นวงกลมไปเรื่อย ๆ ประมาณ 20 นาทีโดยระวังมิให้สารหกจากครกบดสาร จากนั้นนำใส่ถ้วยหลอมอะลูมินาที่ทาเคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์



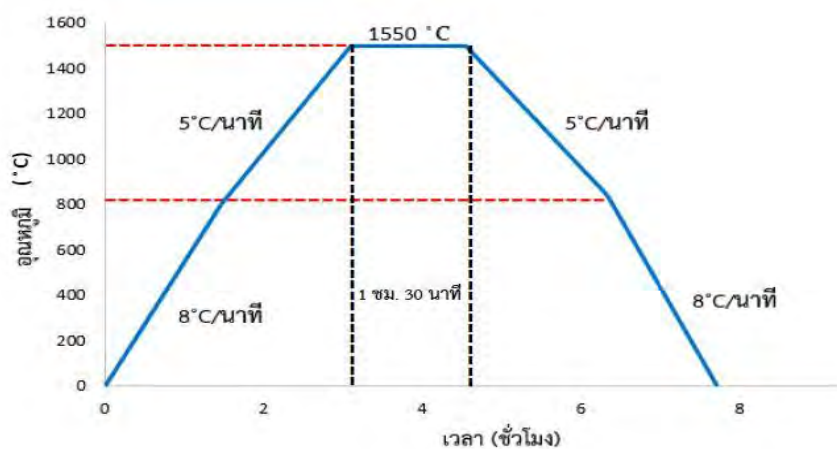
รูปที่ 3.2 การบดสารและถ้วยหลอมอะลูมินา

3. นำถ้วยอะลูมินาเข้าไปวางไว้ตรงกลางท่อหลอม ปิดฝาท่อหลอมทั้งสองด้านดังรูปที่ ด้วยแท่งอะลูมินา แล้วทำการดูดอากาศออกและแทนที่ด้วยก๊าซอาร์กอน ทำซ้ำอย่างน้อย 10 รอบ เพื่อให้ในระบบมีอากาศปกติในสัดส่วนที่น้อยที่สุด



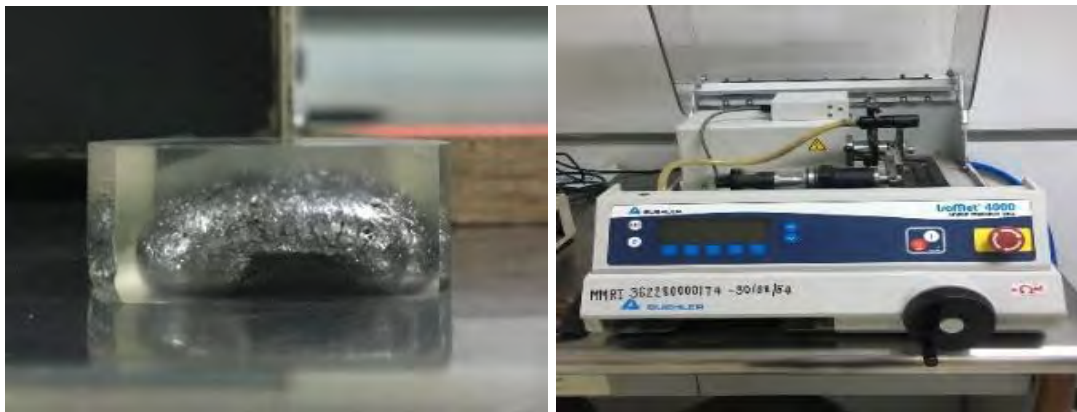
รูปที่ 3.3 นำถ้วยหลอมสารเข้าไปไว้ที่ตรงกึ่งกลางของท่อหลอมและการจัดเตรียมระบบเตาหลอม

4. ปรับบรรยากาศในท่อหลอมให้เป็นแก๊สอาร์กอน ซึ่งมีอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นหลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยเริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาหลอมด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสต่อนาที (เป็นข้อจำกัดของเตาหลอมที่อัตราการเปลี่ยนแปลงต้องไม่เกิน 8 องศาเซลเซียสต่อนาที) จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 800 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานไส้ฮีทเตอร์) ไปจนถึงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้ที่ 1550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิไปจนถึง 800 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 8 องศาเซลเซียสต่อนาทีไปจนถึงอุณหภูมิห้อง การที่ตั้งโปรแกรมการหลอมให้เป็นไปดังนี้ เนื่องด้วยคุณสมบัติของเตาหลอมมีข้อจำกัด



รูปที่ 3.4 การตั้งโปรแกรมการหลอมสาร

5. เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง นำชิ้นงานไปหล่อด้วยเรซิน เพื่อเพิ่มความสะดวกในการตัดชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานที่หล่อเรซินแล้วไปตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่นำไปหล่อเรซินและเครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000

6. ทำการตัดชิ้นงานโดยตัดตามแนวขวางของชิ้นงานให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดขอบด้านข้างจนได้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1x1 เซนติเมตร ซึ่งชิ้นงานที่ต้องการจะต้องไม่มีรูพรุน โดยแต่ละบริเวณของชิ้นงานนั้นจะประกอบไปด้วยเฟส  $\alpha$  -  $\text{Fe}_2\text{Si}_5$   $\epsilon$  -  $\text{FeSi}$  และ  $\beta$  -  $\text{FeSi}_2$  ซึ่งสารแต่ละชิ้นนั้นมีการเรียงตัวของเฟสแบบ Non-Homogeneous



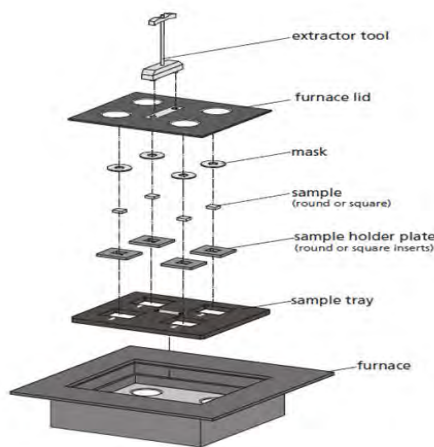
รูปที่ 3.6 ตัดชิ้นงานตามแนวขวางของชิ้นงาน สารที่ตัดจนมีขนาด 1x1 เซนติเมตร

7. นำชิ้นงานไปวัดค่าสภาพนำความร้อนด้วยเครื่อง นาโนแฟลช โดยพ่นชิ้นงานด้วยสเปรย์ graphite



รูปที่ 3.7 พ่นสเปรย์แกรไฟต์เคลือบชิ้นงานให้ทั่วทั้งชิ้น

8. ใส่ชิ้นงานลงใน holder ที่มีลักษณะเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน จากนั้นปิดทับด้วยที่ปิดอีกชั้นหนึ่ง และนำไปใส่ในเครื่อง นาโนแฟลช โดยใส่ชิ้นงานตัวอย่าง Alumina ลงไปด้วยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่ามาตรฐาน



รูปที่ 3.8 ใส่ชิ้นงานลงไปไนเครื่องนาโนแฟลช พร้อมกับชิ้นงานตัวอย่าง



9. ค่อย ๆ ทำการเติมไนโตรเจนเหลวลงในเครื่อง นาโนแฟลช ทีละเล็กน้อยจนกว่าจะเต็ม(ควันฟุ้งออกมา) เมื่อเต็มแล้วให้ปิดด้วยฝาทองเหลืองและตรวจดูว่าฝาปิดสนิทไม่มีแรงดัน ดันออกมา



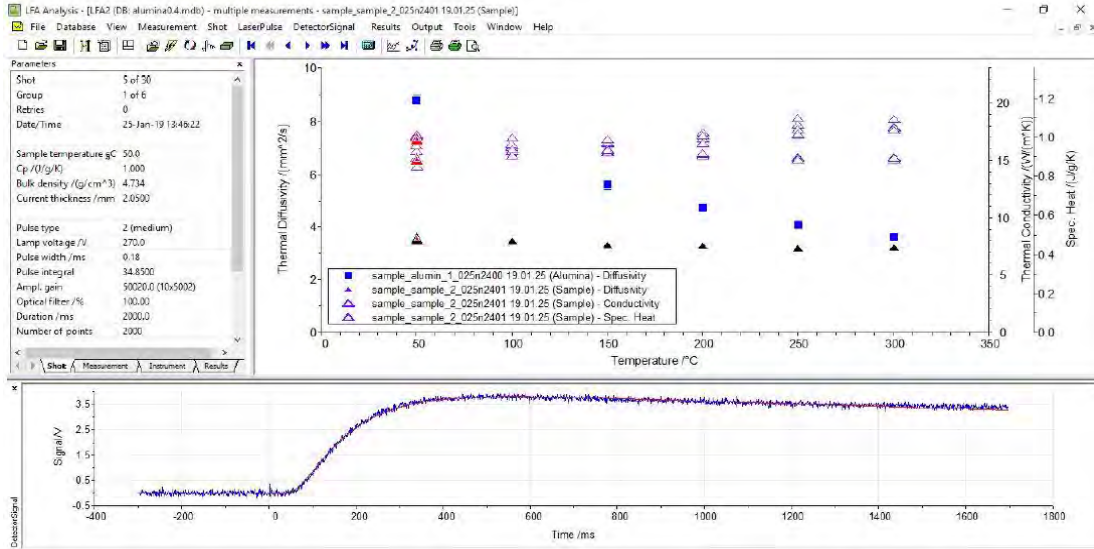
รูปที่ 3.9 การเติมไนโตรเจนเหลว

10. ตั้งค่าโปรแกรม นาโนแฟลช 1.28a เพื่อใช้ในการวัด โดยตั้งค่าเลือกใช้อุณหภูมิที่ 50, 100, 150, 200, 250, และ 300 องศาเซลเซียส โดยให้มีการยิงรังสีแสงจากหลอด Xenon ซ้ำ 3 ครั้ง โดยมีพลังงาน 10จูล/พัลส์(สามารถปรับค่าได้) ที่อุณหภูมินั้น ๆ เมื่อโปรแกรมทำงานเสร็จสิ้น ให้ export ข้อมูลจากโปรแกรมเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป(โดยถ้าหากมีการแจ้งเตือนว่าไนโตรเจนเหลวหมดในระหว่างการทำงานของเครื่อง สามารถหยุดเติมไนโตรเจนแล้วให้เครื่องทำงานต่อได้ตามปกติ หรือ ระหว่างเครื่องทำงานแล้วมีการแสดงผลผิดปกติสามารถหยุดโปรแกรมแล้วทำการเติมไนโตรเจนก่อนได้แล้วกดปุ่มเริ่มทำงานต่อได้เลย)



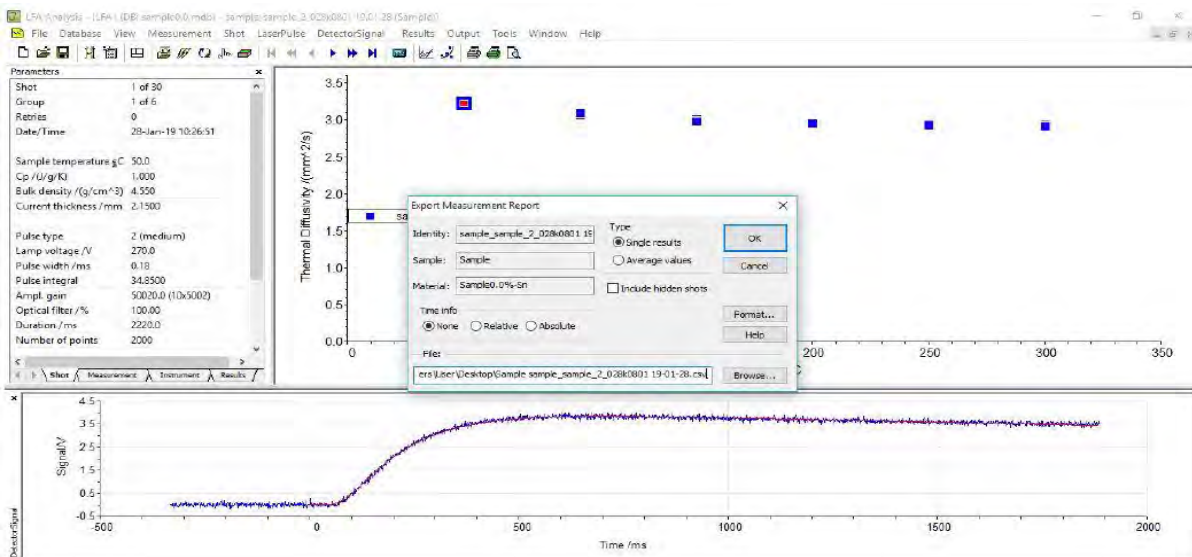
รูปที่ 3.10 ตั้งค่าโปรแกรม นาโนแฟลช 1.28a

11. นำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม นาโนแฟลช 1.28a มาเปิดโดยใช้โปรแกรม LFA Analysis และหาค่า ความจุความร้อน ( $C_p$ ) จากการเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของชิ้นงานมาตรฐาน (อะลูมินา) ที่ใส่ลงไปพร้อมกับชิ้นงานที่ทำการทดลอง ( ดูวิธีการโดยละเอียดในภาคผนวก )



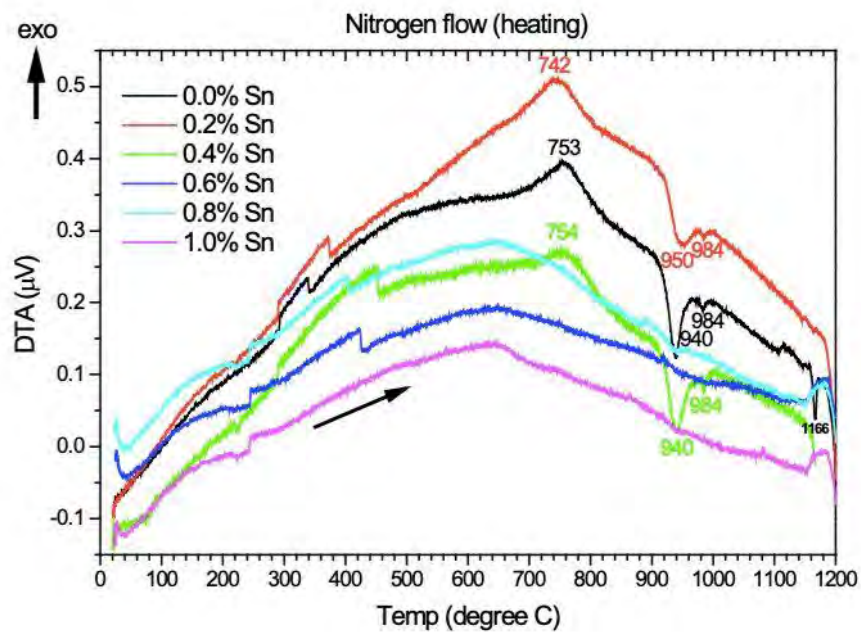
รูปที่ 3.11 คำนวณค่าความจุความร้อน และค่าสภาพนำความร้อนจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

12. แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองให้ออกมาเป็นไฟล์ Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.12 แปลงข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล

13. จากนั้นรื้อให้เครื่องเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานออกจากเครื่องไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner เพื่อกำจัด graphite ที่เคลือบออกและนำไปอบตามเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้  
 อบอุ่นที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง, 860 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง โดยอบอุ่นที่อุณหภูมิ 750 °C ตามอุณหภูมิของพีคใน DTA และอบอุ่นที่อุณหภูมิ 860 °C ตามอุณหภูมิในงานวิจัยของ Isao Nishida และคณะ [12] และทำซ้ำตามข้อ 7-12



รูปที่ 3.13 สัญญาณ DTA (ถูกทำให้เรียบขึ้นโดยการเฉลี่ยแบบ 10 จุด) ของกระบวนการให้ความร้อน (heating) ใน ผงสาร  $\text{FeSi}_{2-y}\%$  เมื่อ  $y = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  และ  $1.0$  ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

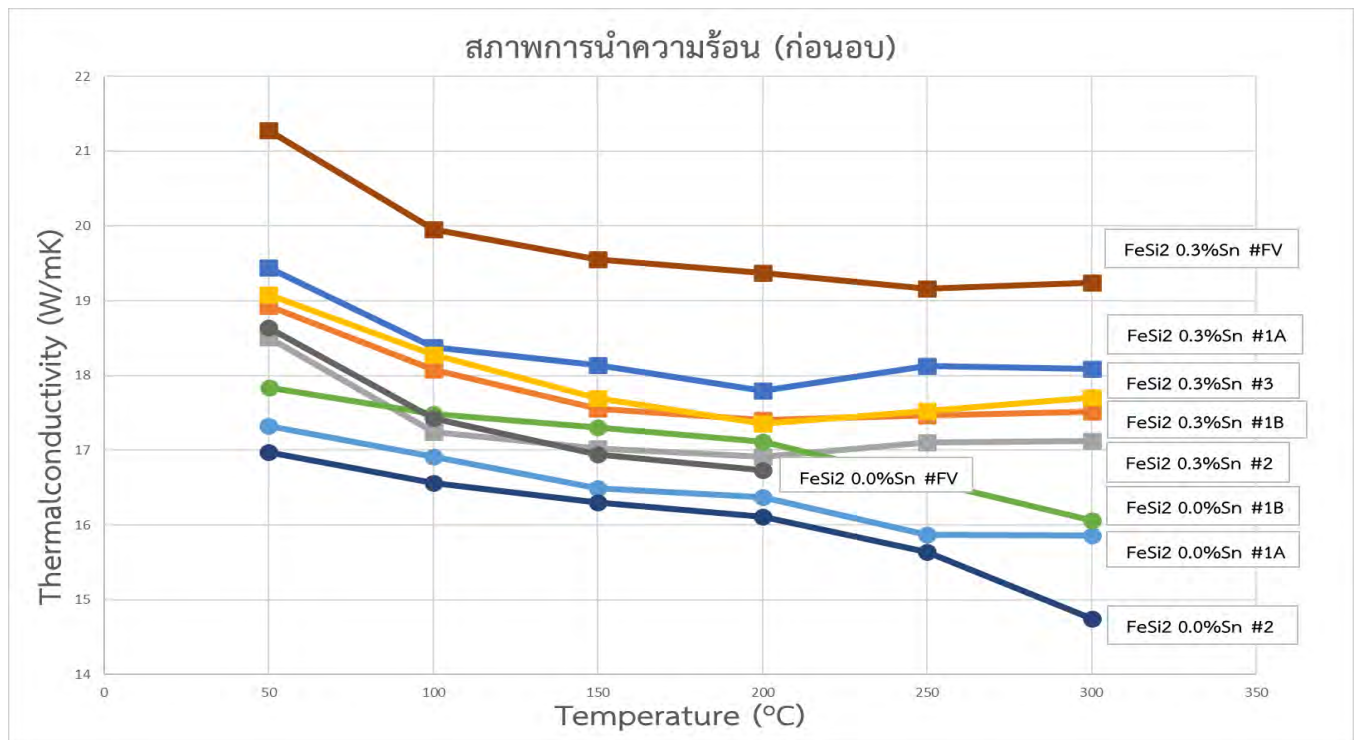
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบ

##### 4.1.1 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช ก่อนอบ

จากการทดลองได้ทำการทดลองด้วยชิ้นงาน 9 ชิ้น โดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ต่ออะตอม 5 ชิ้น และไม่เจือดีบุก 4 ชิ้น โดยมีป้ายกำกับดังนี้  $\text{FeSi}_2$  x%Sn #y เมื่อ x คือปริมาณดีบุกที่เจือและ y คือหมายเลขของก้อนชิ้นงาน(#1A กับ #1B ตัดมาจากสารก้อนเดียวกัน) ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของสารแต่ละชิ้น แสดงได้ดังนี้



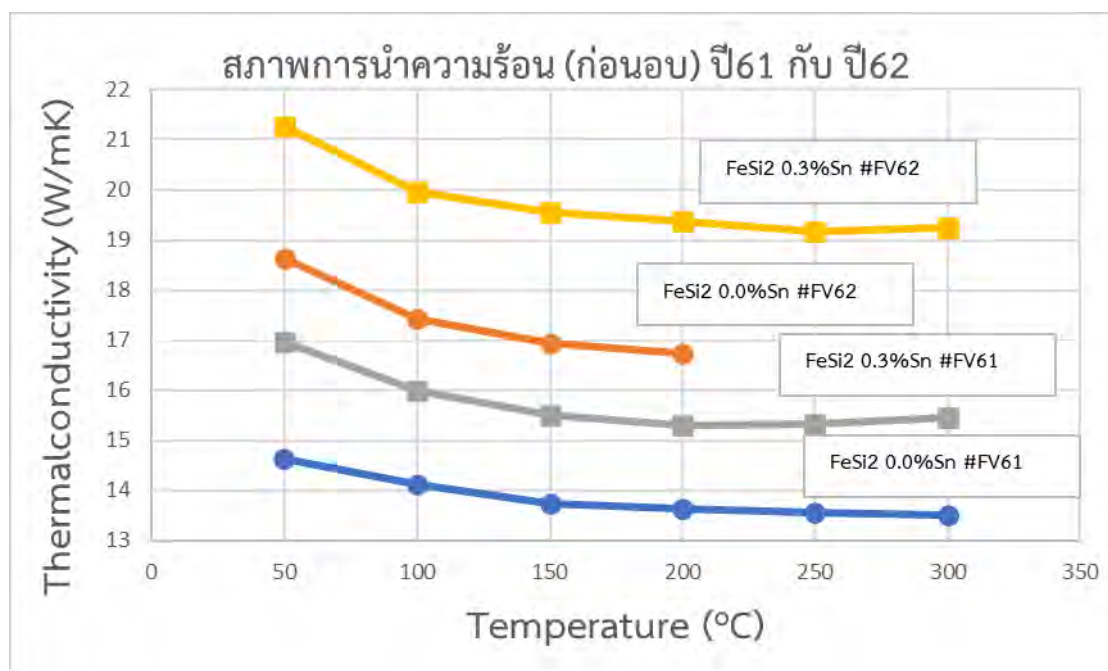
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิก่อนอบ

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิก่อนอบแต่ละชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ความหมาย	อุณหภูมิและระยะเวลา	$K$ (W/m·K)
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #FV	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นงาน ของปี 61(0.3Sn)	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	21.28 – 32.63
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #1A	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นที่ 1A	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	17.80 – 19.44
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #1B	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นที่ 1B	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	17.40 – 18.93
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #2	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นที่ 2	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	17.11 – 18.5
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #3	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นที่ 3	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	17.36 – 19.08
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #FV	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชิ้นงานของปี 61(0.0 Sn)	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	16.74 – 18.64
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #1A	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชิ้นที่ 1A	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	15.86 – 17.32
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #1B	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชิ้นที่ 1B	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	16.06 – 17.84
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #2	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชิ้นที่ 2	หลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที	14.74 – 16.97

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ โดยที่มีการเจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมและที่ไม่เจือ มีแนวโน้มคล้ายกันนั่นคือ มีค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นงานที่เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมมีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือตีบุก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นงานที่เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอมจะมีค่าอยู่ในช่วง 17.0-21.0 W/m·K ส่วนชิ้นงานที่ไม่เจือตีบุกจะอยู่ในช่วง 14.5-18.5 W/m·K และจะเห็นว่าสารสองชิ้นแม้จะตัดมาจากสารก้อนเดียวกันก็ให้ค่าที่แตกต่างกัน เช่น ชิ้นที่ไม่เจือตีบุก 1A กับ 1B จะมีค่าแตกต่างกันประมาณ 2.6 % ชิ้นที่เจือตีบุก 0.3เปอร์เซ็นต์อะตอม 1A กับ 1B จะมีค่าแตกต่างกันประมาณ 2.4 %

#### 4.1.2 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช ก้อนอบ โดยทำซ้ำกับชิ้นงานเดิมของปี 61



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิโดยทำซ้ำกับชิ้นงานเดิม

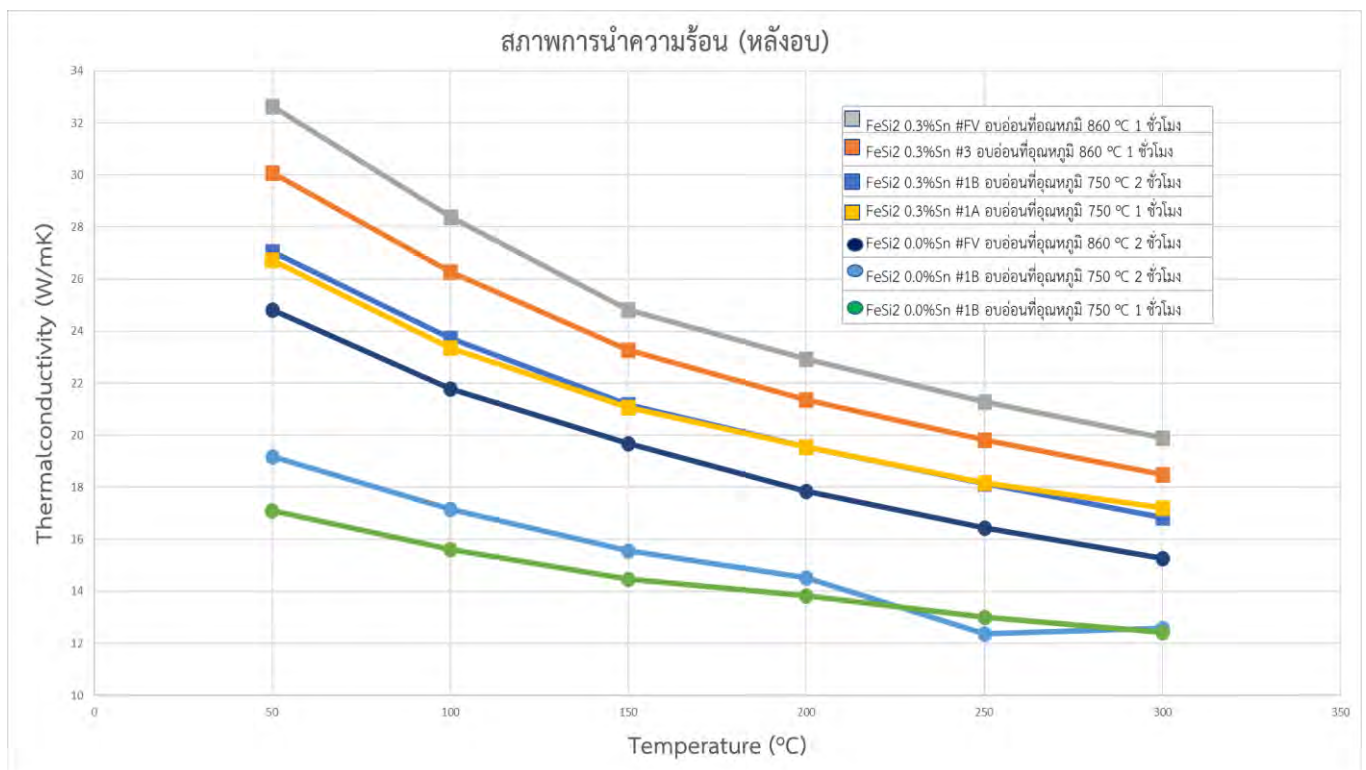
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า การวัดชิ้นงานเดียวกัน การวัดในครั้งนี้ (ปี 62) จะมีค่าสูงกว่าการวัดในครั้งก่อน (ปี 61) ประมาณ 3-4 W/m·K โดยเป็นจริงที่ทุกอุณหภูมิของการวัด ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงสองปัจจัยคือ ปัจจัยแวดล้อมของการวัดของเครื่องมือที่ไม่เหมือนเดิม หรือปัจจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพของชิ้นงานตาม

กาลเวลาที่เปลี่ยนไป แต่ทั้งนี้จะไม่มีการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เพราะเป็นการวัดในช่วงเวลาใกล้ ๆ กัน ซึ่งสันนิษฐานว่าสภาพปัจจัยต่าง ๆ จะใกล้เคียงกันทุกครั้งสำหรับการวัดแต่ละชิ้นงาน

## 4.2 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนหลังอบ

### 4.2.1 ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช หลังอบ

จากการทดลองได้ทำการทดลองด้วยชิ้นงาน 7 ชิ้น โดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ต่ออะตอม 4 ชิ้น โดยนำไปอบอ่อนภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง, 860°C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง และไม่เจือดีบุก 3 ชิ้น โดยนำไปอบอ่อนภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง, 860°C 2 ชั่วโมง ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของสารแต่ละชิ้น แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิหลังอบ

ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิหลังอบแต่ละชิ้นงาน

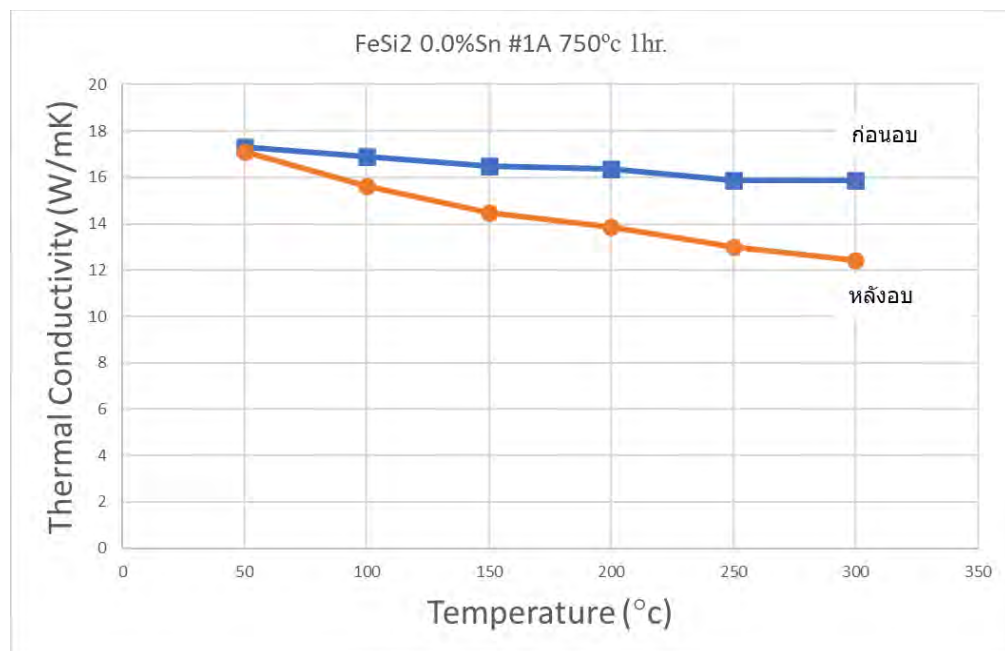
รหัสชิ้นงาน	ความหมาย	อุณหภูมิและระยะเวลา	K ที่ 50 °C	K ที่ 300 °C
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #FV	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชิ้นงานของปี 61	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 860 °C 1 ชั่วโมง	32.63	19.91
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #1A	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชั้นที่ 1A	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง	26.74	17.20
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #1B	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชั้นที่ 1B	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 2 ชั่วโมง	27.05	16.85
FeSi <sub>2</sub> 0.3%Sn #3	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ชั้นที่ 3	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 860 °C 1 ชั่วโมง	30.09	18.50
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #FV	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชิ้นงานของปี 61	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 860 °C 2 ชั่วโมง	24.83	15.28
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #1A	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชั้นที่ 1A	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง	17.10	12.42
FeSi <sub>2</sub> 0.0%Sn #1B	สารไอรอนไดซิลิไซด์ที่ไม่เจือดีบุก ชั้นที่ 1B	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 2 ชั่วโมง	19.18	12.60

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิของชิ้นงานที่เจือดีบุกและไม่เจือมีแนวโน้มคล้ายกัน กล่าวคือ ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นงานที่เจือดีบุกมีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุกที่ทุกค่าของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นงานทุกชั้นที่เจือดีบุกอยู่ในช่วง 16.0-33.0 W/m·K ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าก่อนอบ (ก่อนอบมีค่าอยู่ในช่วง 17.0-21.0 W/m·K) และชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุกหลังอบจะมีค่าอยู่ในช่วง 12.0-25.0 W/m·K ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าก่อนอบเช่นกัน (ก่อนอบมีค่าอยู่ในช่วง 14.5-18.5 W/m·K)

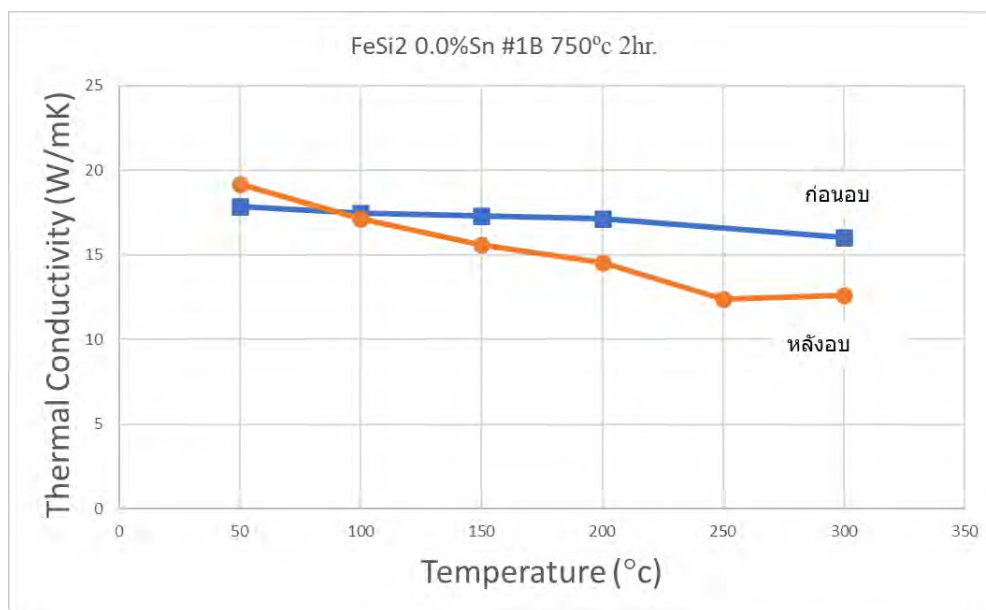


#### 4.2.2 เปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช ก่อนอบ และหลังอบ

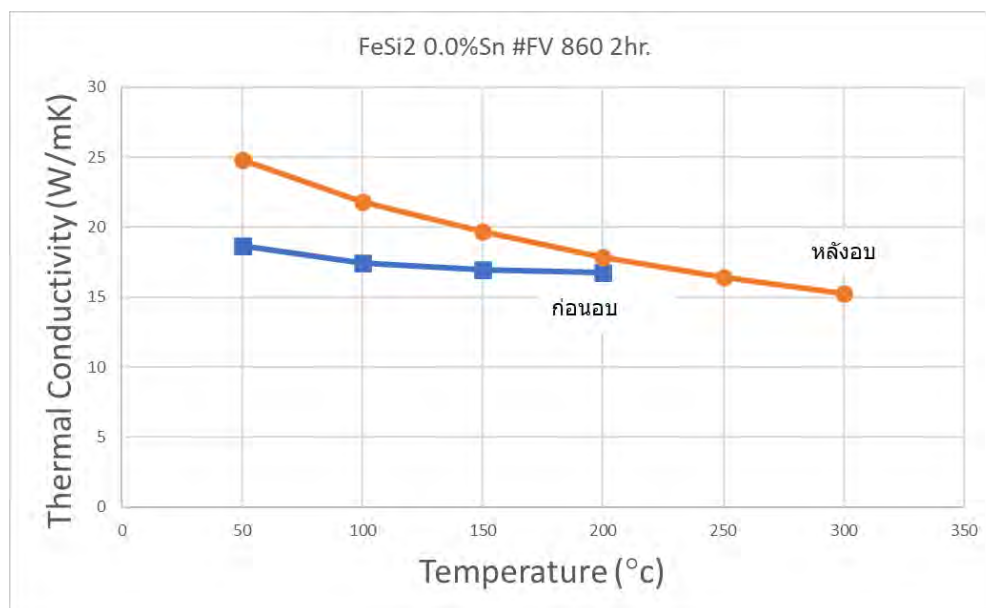
จากการทดลองได้ทำการทดลองด้วยชิ้นงาน 7 ชิ้น โดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ เจือดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ต่ออะตอม 4 ชิ้น โดยนำไปอบอ่อนภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง, 860°C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง และไม่เจือดีบุก 3 ชิ้น โดยนำไปอบอ่อนภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ 750 °C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง, 860°C 2 ชั่วโมง ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของก่อนอบและหลังอบของสารแต่ละชิ้นแสดงได้ดังนี้



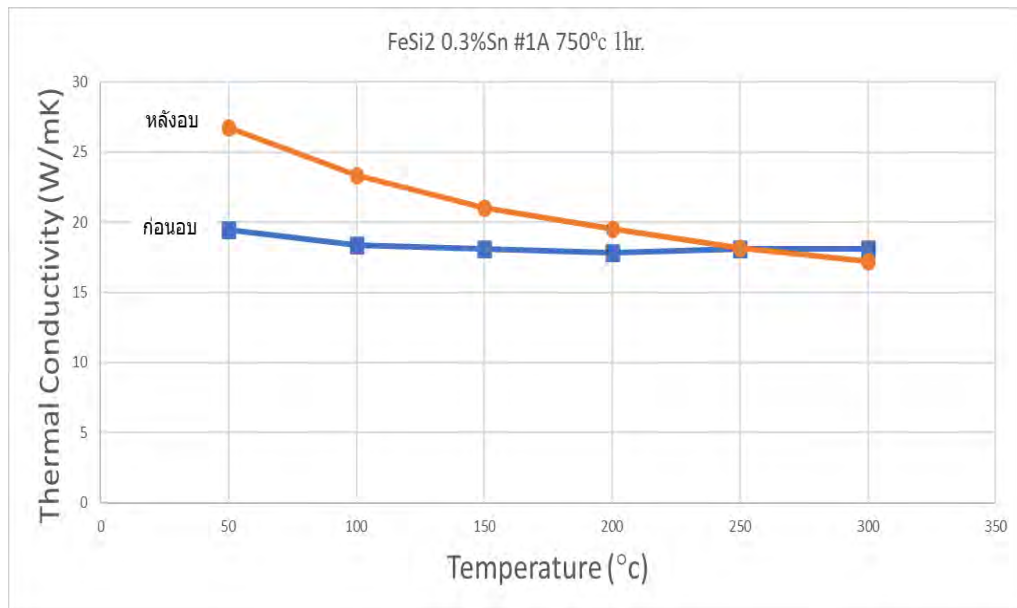
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ  
(ไม่เจือดีบุก) ชิ้นที่ 1A อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง



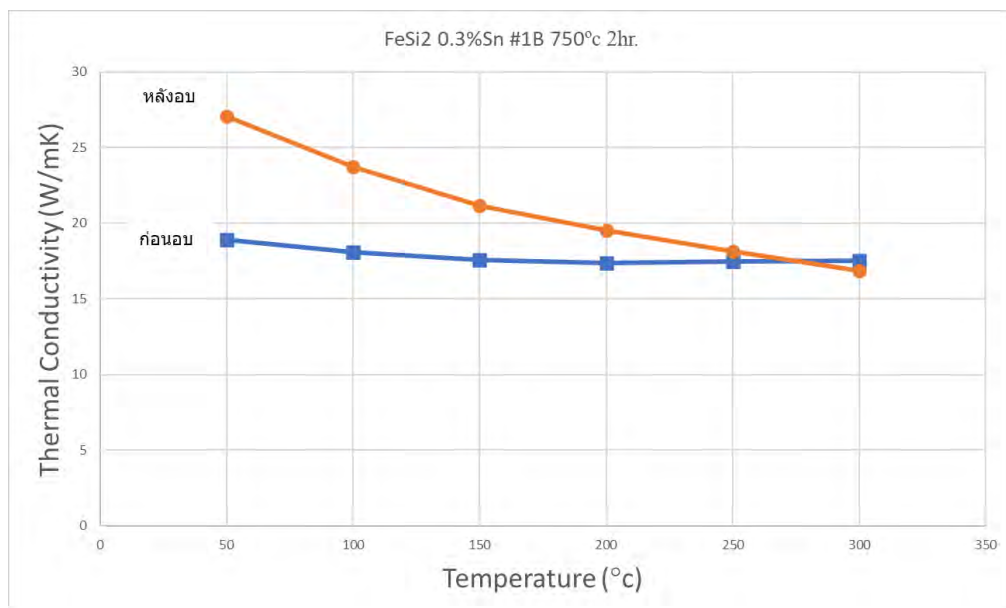
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (ไม่เจือสีบุก) ชั้นที่ 1B อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 2 ชั่วโมง



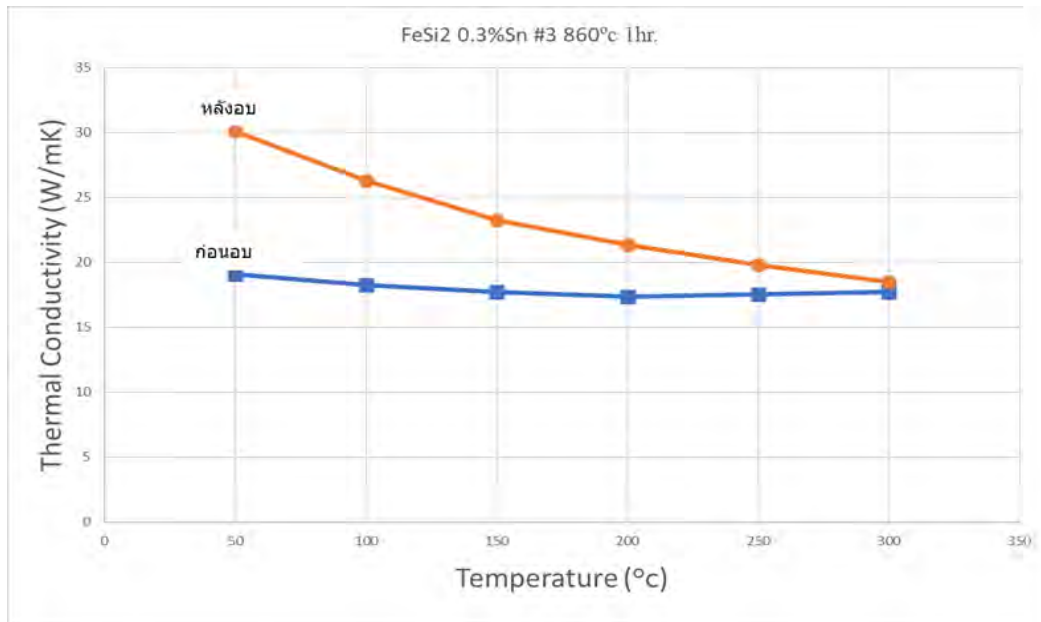
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (ไม่เจือสีบุก) ชั้นงานของปี61 อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 2 ชั่วโมง



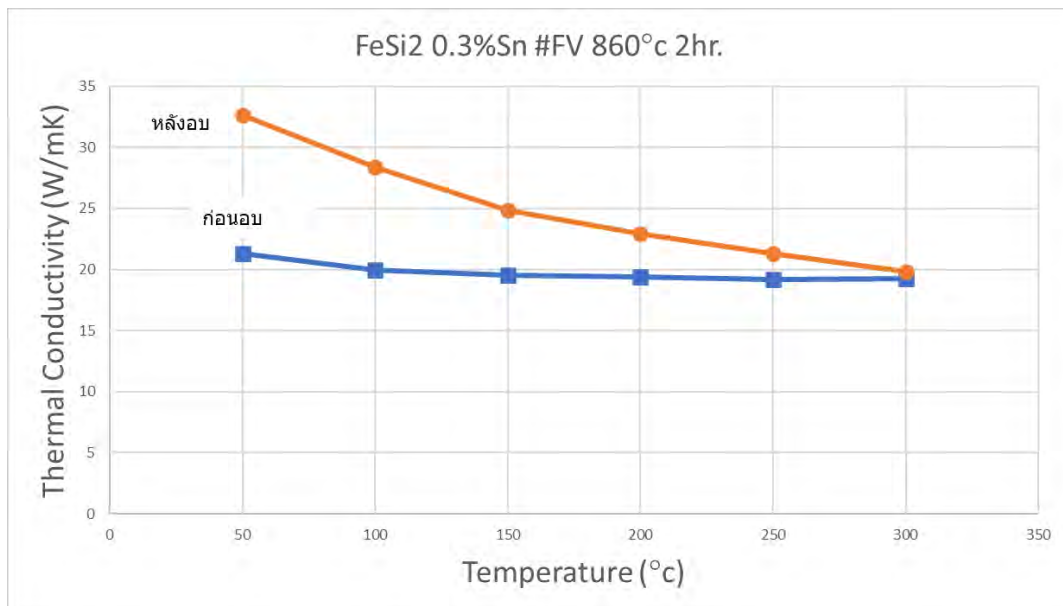
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม) ชั้นที่ 1A อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม) ชั้นที่ 1B อบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 °C 2 ชั่วโมง



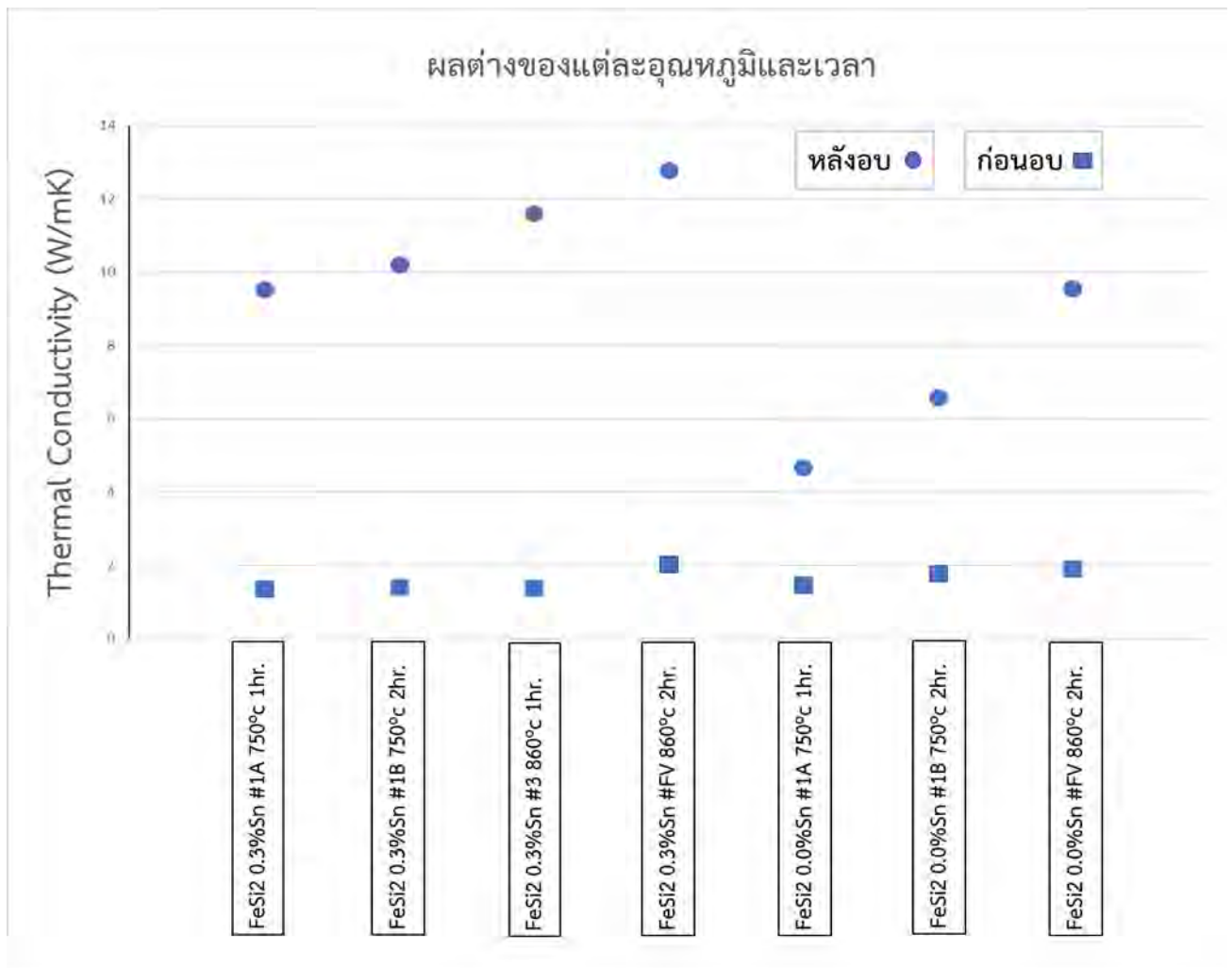
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม) ชั้นที่ 3 อบอ่อนที่อุณหภูมิ 860 °C 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ (เจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม) ชั้นงานของปี 61 อบอ่อนที่อุณหภูมิ 860 °C 2 ชั่วโมง

จากรูปทั้งหมดเราจะเห็นว่า

1. การอบอ่อนทำให้สภาพนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 50-300 °C สำหรับชิ้นงานที่เจือและไม่เจือดีบุก
2. การเจือดีบุกทำให้สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า การเพิ่มดีบุกเป็นการเพิ่มความเป็นโลหะเข้าไปในสารไอรอนไดซิลิไซด์ ดังนั้นจึงควรมีสภาพนำความร้อนที่สูงขึ้น
3. ชิ้นงานที่ไม่เจือดีบุก ต้องอาศัยการอบที่อุณหภูมิ 850 °C นาน 2 ชั่วโมง จึงจะทำให้สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าสูงขึ้นพอ ๆ กับชิ้นงานที่เจือดีบุกที่อบที่อุณหภูมิ 750 °C นาน 1 ชั่วโมง นั้นแสดงว่าดีบุกช่วยเร่งปฏิกิริยาบางอย่างภายในเนื้อสาร
4. หลังอบอ่อน สภาพนำความร้อนของทุกชิ้นงานจะมีความ "ไว" ต่ออุณหภูมิมากขึ้น (ขึ้นกับอุณหภูมิมากขึ้น)
5. การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำความร้อนภายหลังการอบอาจบ่งบอกว่าชิ้นสารนั้นมีความเป็นโลหะที่มากขึ้น ซึ่งจะขัดแย้งกับความรู้ที่ว่า การอบจะช่วยให้เฟสโลหะ ( $\alpha$  และ  $\epsilon$ ) ให้กลายเป็นเฟสสารกึ่งตัวนำ ( $\beta$ ) ที่มากขึ้นซึ่งควรจะนำความร้อนได้ลดลง ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าการอบนั้นไปมีผลต่อสภาพเนื้อสาร เช่น ลดจุดบกพร่อง (defect) ได้มากกว่าการเกิดเฟสสารกึ่งตัวนำ เมื่อจุดบกพร่องต่าง ๆ ลดลงสารจึงนำความร้อนได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบกับหลังอบ

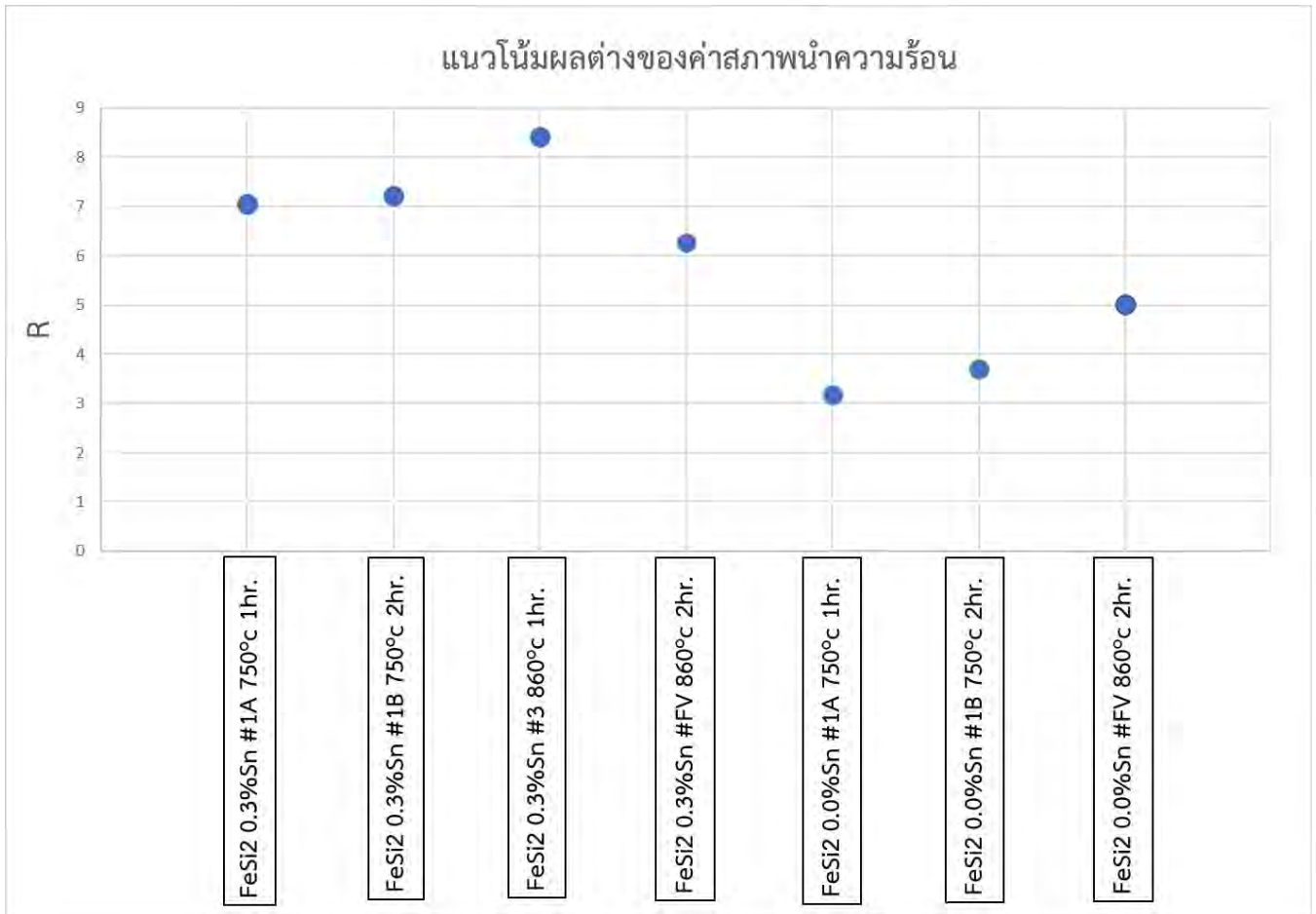
ผลต่าง คือ ค่าสัมบูรณ์ของค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C - ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C

$$\Delta := | \kappa_{300^{\circ}\text{C}} - \kappa_{50^{\circ}\text{C}} |$$

เพื่อให้เห็นว่าสภาพนำความร้อนมีความไวต่ออุณหภูมิอย่างไร ในที่นี้จะขอพิจารณา “ผลต่าง” ของสภาพนำความร้อนที่ 50 กับ 300 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า

1. ก่อนอบ ผลต่างของทุกชิ้นงานมีค่าน้อย ใกล้เคียงกัน
2. หลังอบ ชิ้นงานที่มีการเจือจะมีผลต่างมากกว่าชิ้นงานที่ไม่เจือ
3. ผลต่างนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลา หรือทั้งสองอย่าง

4.2.3 แนวโน้มผลต่างของค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบ และหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง 860 ° ที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 กราฟแนวโน้มผลต่างของค่าสภาพนำความร้อนก่อนอบ และหลังอบ

เพื่อให้เห็นว่าก่อนอบและหลังอบ สภาพนำความร้อนมีความไวต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกี่เท่า ในที่นี้จึงนิยามปริมาณดังต่อไปนี้

ค่า R คือ จำนวนเท่าการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของสภาพนำความร้อนหลังอบเทียบกับก่อนอบ

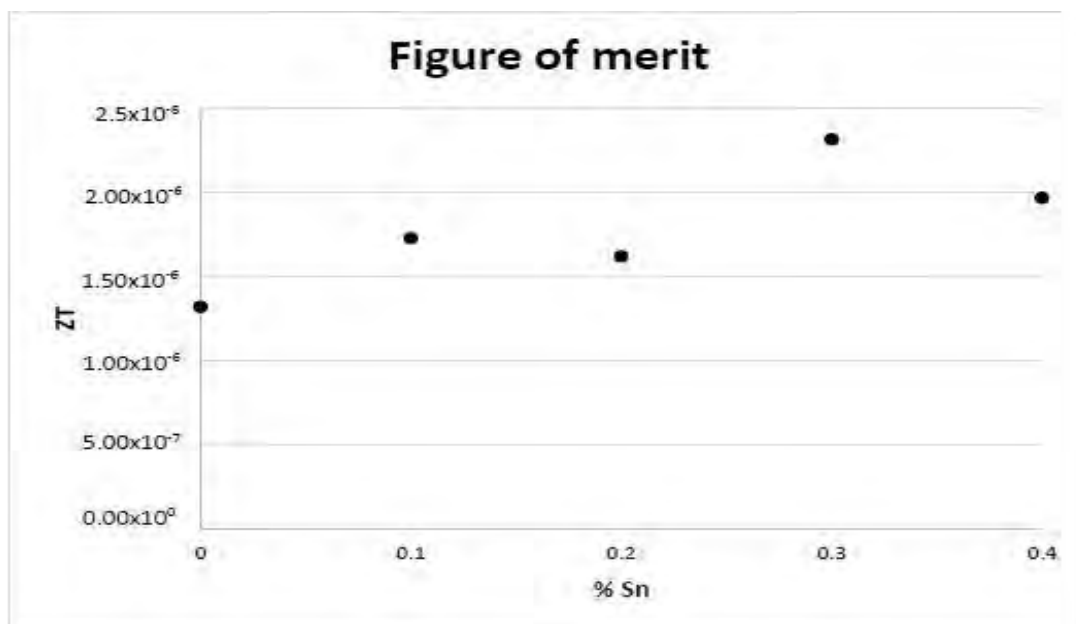
$$R := \frac{|K_{300^{\circ}\text{C}} - K_{50^{\circ}\text{C}}|_{\text{หลังอบ}}}{|K_{300^{\circ}\text{C}} - K_{50^{\circ}\text{C}}|_{\text{ก่อนอบ}}}$$

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า

1. ชั้นงานที่เจือจะมีค่า R สูงกว่าชั้นงานที่ไม่เจือ
2. การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 750 °C จะทำให้ค่า R สูงขึ้น (ทั้งชั้นที่เจือและไม่เจือ) ในขณะที่การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 860 °C กลับทำให้ค่า R ต่ำลงในชั้นที่เจือ (ไม่มีข้อมูลสำหรับชั้นที่ไม่เจือเพราะไม่มีคู่เทียบ)

### 4.3 ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริก

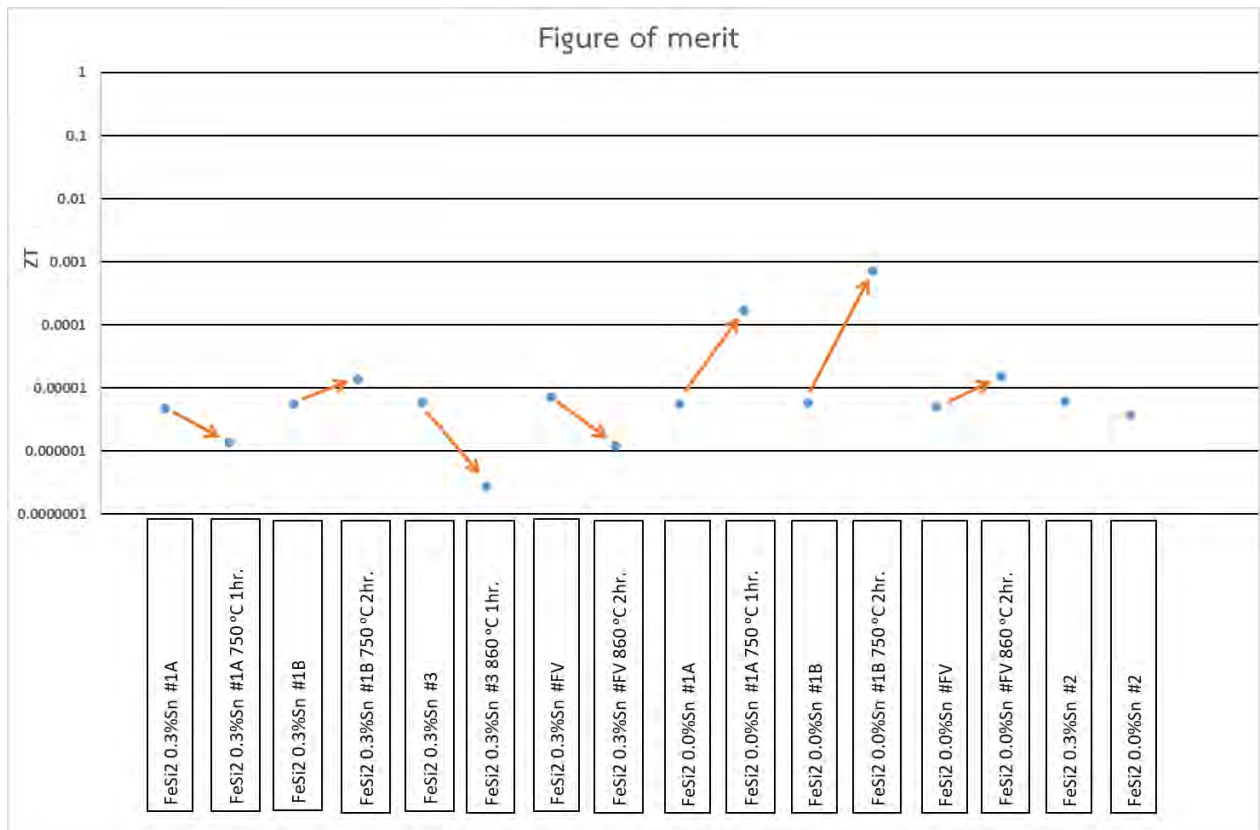
ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุนั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งถ้าหากในวัสดุใดมีค่าสภาพนำความร้อนสูง หมายถึง วัสดุนั้นมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่ในทางกลับกันในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นต้องการให้ค่าสภาพนำความร้อนนั้นมีค่าต่ำ ๆ จึงจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีโดยการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สามารถคำนวณคำนวณได้จากฟิสิกเกอร์ออฟเมอร์ริท โดยจะใช้ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับสัมประสิทธิ์ซีเบค [13] คำนวณได้จากสมการที่ (3) ผลออกมาแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุกับปริมาณดีบุกที่เจือ[14]

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุนั้น มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่เจือเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชั้นงานมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกดีมากขึ้น แต่ค่า ZT ที่ได้ก็ยิ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่า ZT ของอุปกรณ์ที่จะคุ้มค่าต่อการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ใช้จริงที่ค่า  $ZT \approx 1$  [11]





รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Figure of merit ของสารไอรอนไดซิลไซด์ก่อนและหลังอบอ่อนในกรณีต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ก่อนอบชิ้นสารที่เจือดีบุกจะมีค่า ZT มากกว่าชิ้นสารที่ไม่เจือ และในทางกลับกันหลังจากอบอ่อนชิ้นสารที่ไม่เจือกลับมีค่า ZT เพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนชิ้นสารที่เจือดีบุกหลังจากการอบอ่อนจะมีค่า ZT ลดลง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นสารที่มีการทำซ้ำกับชิ้นเดียวกันของปี 61 ค่า ZT ที่วัดได้ในครั้งนี้ (ปี 62) พบว่าก่อนอบชิ้นที่เจือดีบุกจะมีค่า ZT มากกว่าชิ้นที่ไม่เจือ และค่า ZT ที่ได้ในการวัดครั้งนี้ (ปี 62) มากกว่าปี 61 แต่ยังคงอยู่ในลำดับขนาดเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้สามารถหาค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง นาโนแฟลช โดยทำการวัด 2 ประเภทคือ ชีงงานก่อนการอบอ่อนและหลังการอบอ่อน ชีงงานมี 2 ประเภทคือไม่เจือตีบุกและเจือตีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม ก่อนการอบอ่อนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิของทุกชีง มีแนวโน้มคล้ายกันนั่นคือ (1) ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและ (2) ค่าสภาพนำความร้อนของชีงงานที่เจือตีบุกมีแนวโน้มสูงกว่าชีงงานที่ไม่เจือตีบุก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของชีงงานที่เจือตีบุกมีค่าอยู่ในช่วง 17.0-21.0 W/m·K ส่วนชีงงานที่ไม่เจือตีบุกจะอยู่ในช่วง 14.5-18.5 W/m·K

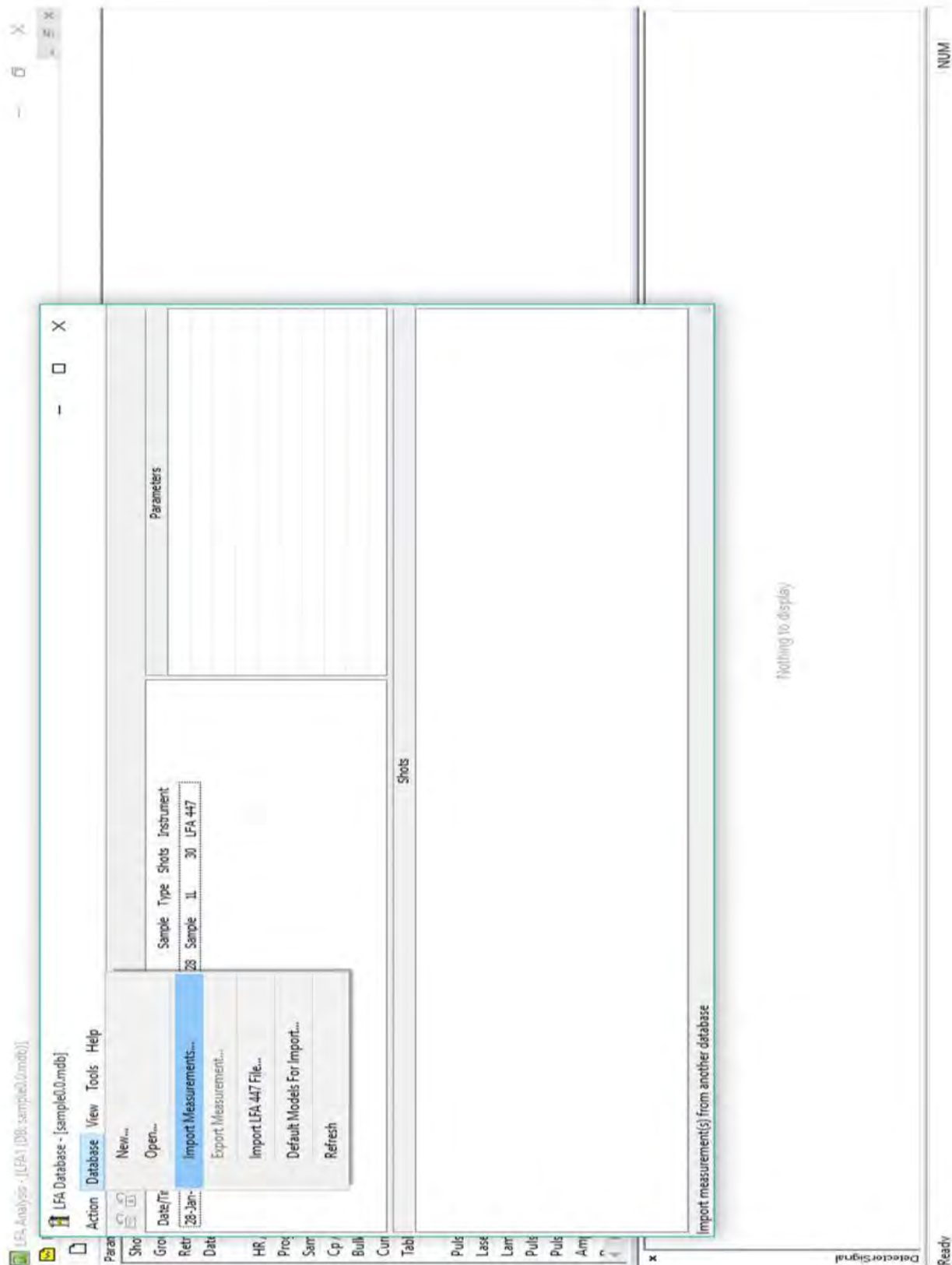
หลังการอบอ่อนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิของทุกชีงงานยังเหมือนเดิมคือ (1) ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและ (2) ค่าสภาพนำความร้อนของชีงงานที่เจือตีบุกยังคงมีแนวโน้มสูงกว่าชีงงานที่ไม่เจือตีบุกที่ทุกค่าของอุณหภูมิตดลอง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสค่าสภาพนำความร้อนของชีงงานที่เจือจะอยู่ในช่วง 16.0-33.0 W/m·K ซึ่งสูงชันกว่าก่อนอบคิดเป็น 22.4% และสำหรับชีงงานที่ไม่เจือตีบุกหลังอบจะมีค่าอยู่ในช่วง 12.0-25.0 W/m·K ซึ่งมีค่าสูงชันกว่าก่อนอบเช่นกันคิดเป็น 10.8% ชีงงานที่เจือมี “ผลต่าง” ของสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิทดลอง (50-300 °C) ที่มากกว่าชีงที่ไม่ได้เจือ และอัตราส่วนของผลต่างนี้หลังอบต่อก่อนอบ (ค่า R) ของชีงที่เจือจะมีค่ามากกว่าชีงที่ไม่เจือ การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 750 °C จะทำให้ค่า R สูงชัน (ทั้งชีงที่เจือและไม่เจือ) ในขณะที่การเพิ่มเวลาอบสำหรับการอบที่ 860 °C กลับทำให้ค่า R ต่ำลงในชีงที่เจือ (ไม่มีข้อมูลสำหรับชีงที่ไม่เจือเพราะไม่มีคู่เทียบ) โดยการอบอ่อนนั้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงขององค์ประกอบของชีงงานเป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้สภาพการแพร่ความร้อนดีขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากไม่ได้มีการส่องชีงงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าขนาดของเฟส  $\epsilon$ -FeSi<sub>2</sub> นั้นมีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างไร และการที่ชีงงานที่ตัดออกมาจากก้อนเดียวกันกลับให้ค่าต่าง ๆ ที่แตกต่างกันนั้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากบริเวณการเกิดเฟสในแต่ละชีงงานมีความแตกต่างกันออกไปหรือมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

### ภาคผนวก

การหาค่า  $C_p$  และค่าสภาพนำความร้อน( $K$ ) จากโปรแกรม LFA analysis



ขั้นตอนที่ 1 เปิดโปรแกรม LFA analysis และ Import Measurements

LFA Analysis - [LFA1 (DB: sample0.0.mdb)]

LFA Database - [sample0.0.mdb]

Action Database View Tools Help

Measurement: sample\_alumin\_1\_025n2400\_19.01.25 Parameters

Identity: sample\_alumin\_1\_025n2400\_19.01.25  
 Instrument: LFA 447  
 Operator: My Name  
 Date/Time: 25-Jan-19 13:35:46  
 Remark: sample Op-4 back

Sample name: Alumina  
 Type: Single layer  
 Material: Alumina  
 Sample diameter (mm): 12.630

25-Jan-19 13:42:14 sample\_sample\_2\_025n2401\_19.01.25 Sample 1L 30 LFA 447  
 25-Jan-19 13:35:46 sample\_alumin\_1\_025n2400\_19.01.25 Alumina 1L 30 LFA 447

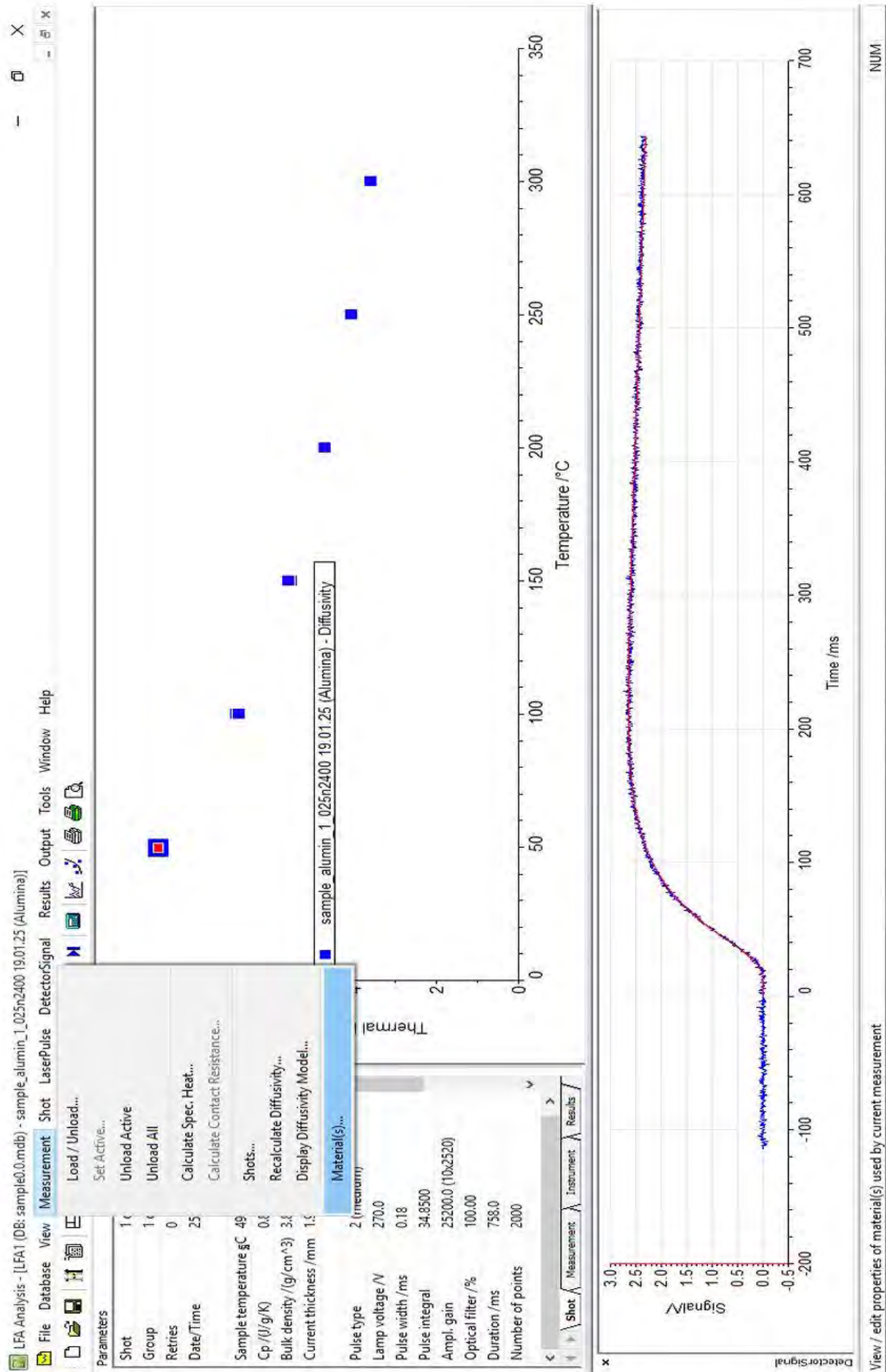
Shots For Measurement: sample\_alumin\_1\_025n2400\_19.01.25

No.	ShotTime	Temp./°C	Diffus./mm <sup>2</sup> /s	Std.Dev.	Model	Voltagge/V	Pulse/ms	Ampl. gain	Opt.Filter/%	Hidden
1	13:35:46	49.9	8.784	2.909e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
2	13:36:46	50.1	8.869	2.6994e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
3	13:37:47	49.8	8.813	2.9684e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
4	13:38:47	50.1	8.827	3.0241e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
5	13:39:48	49.9	8.823	2.8673e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
6	13:54:25	100.1	6.861	1.2395e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
7	13:55:26	99.9	6.896	1.2002e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
8	13:56:28	100.2	6.896	1.2025e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
9	13:57:29	100.0	6.898	1.2742e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
10	13:58:31	100.0	6.837	1.3376e-002	Cowan + pc.	270.0	0.18	25200.0 (10x2520)	100.00	No
11	14:15:38	150.1	5.593	9.7008e-003	Cowan + pc.	270.0	0.18	12600.0 (10x1260)	100.00	No

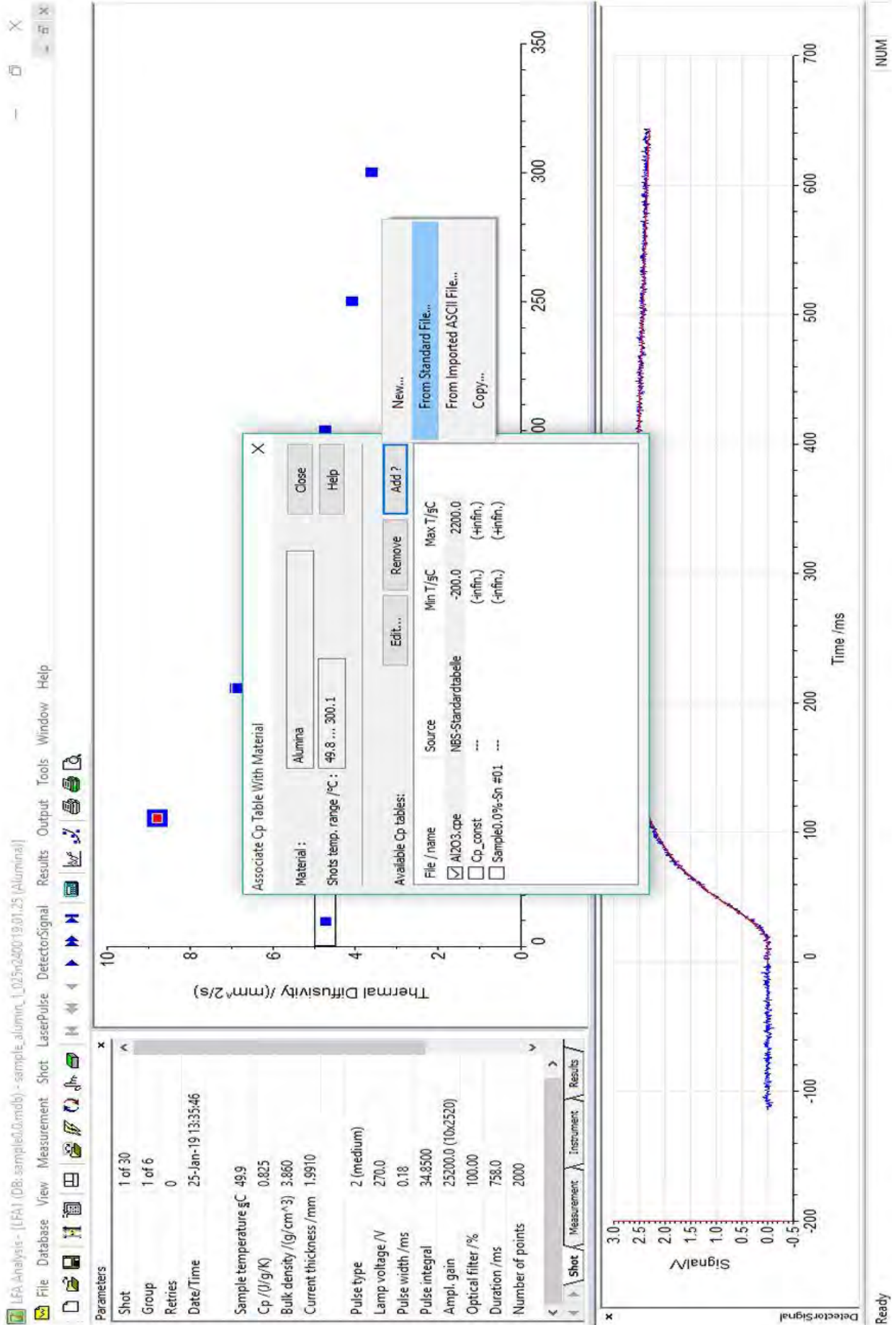
Nothing to display

Ready

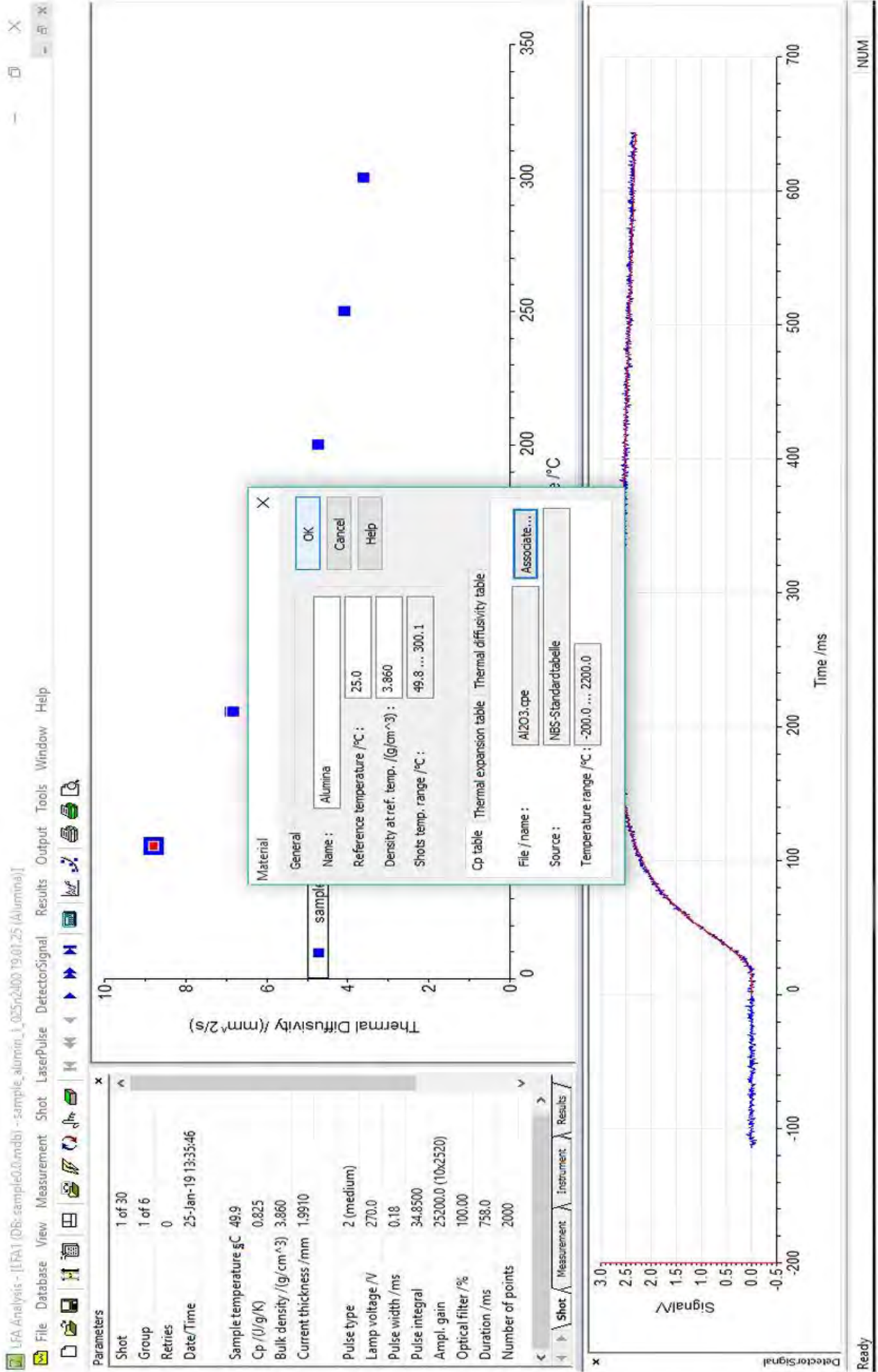
ขั้นตอนที่ 2 เลือกไฟล์การทดลองของสารที่ใช้เป็นมาตรฐาน



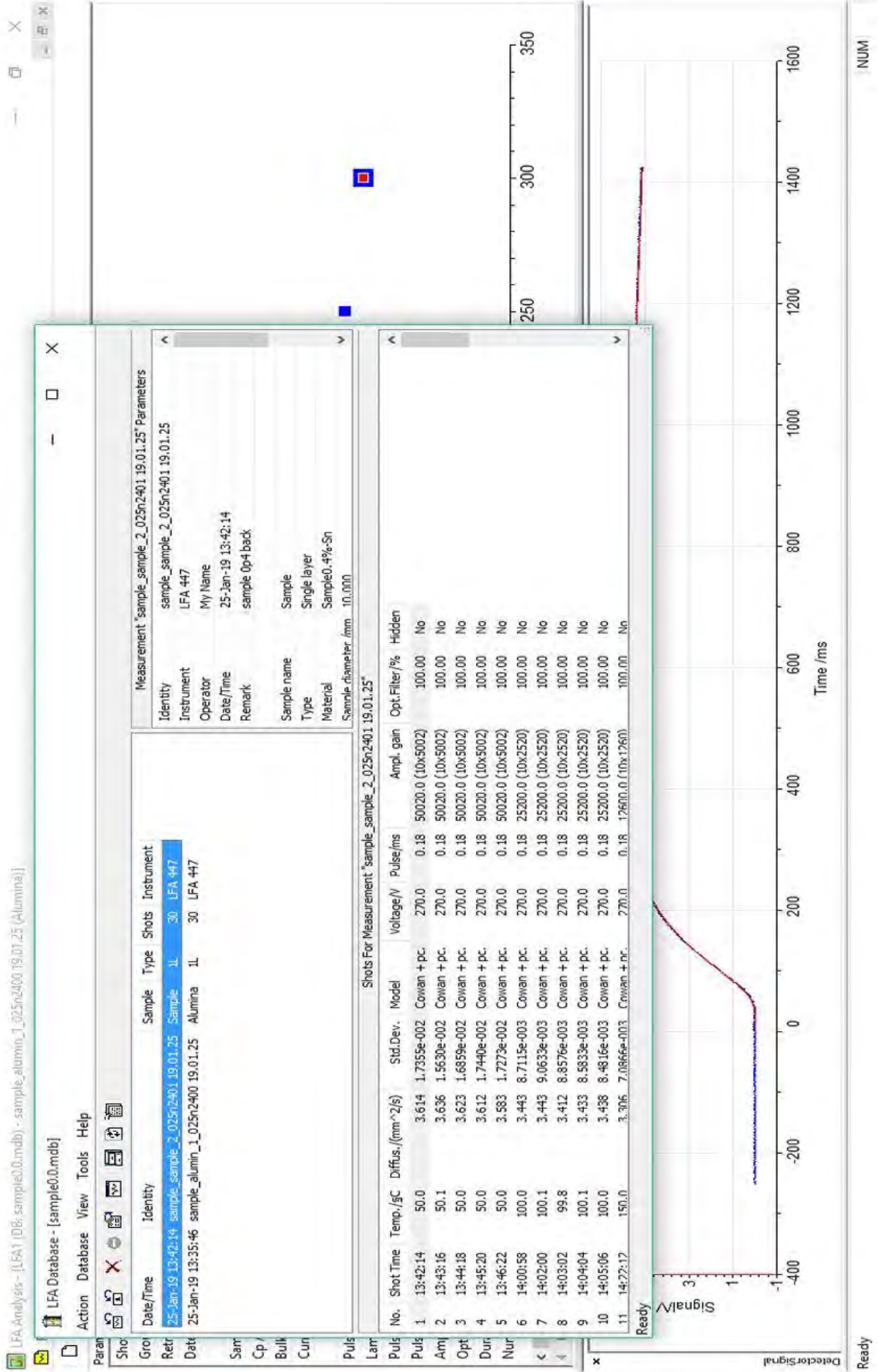
ขั้นตอนที่ 3 เลือกแถบ Measurement > Material



ขั้นตอนที่ 4 เลือกไฟล์ค่า Cp มาตรฐานจากโรงงานที่มีโปรแกรม

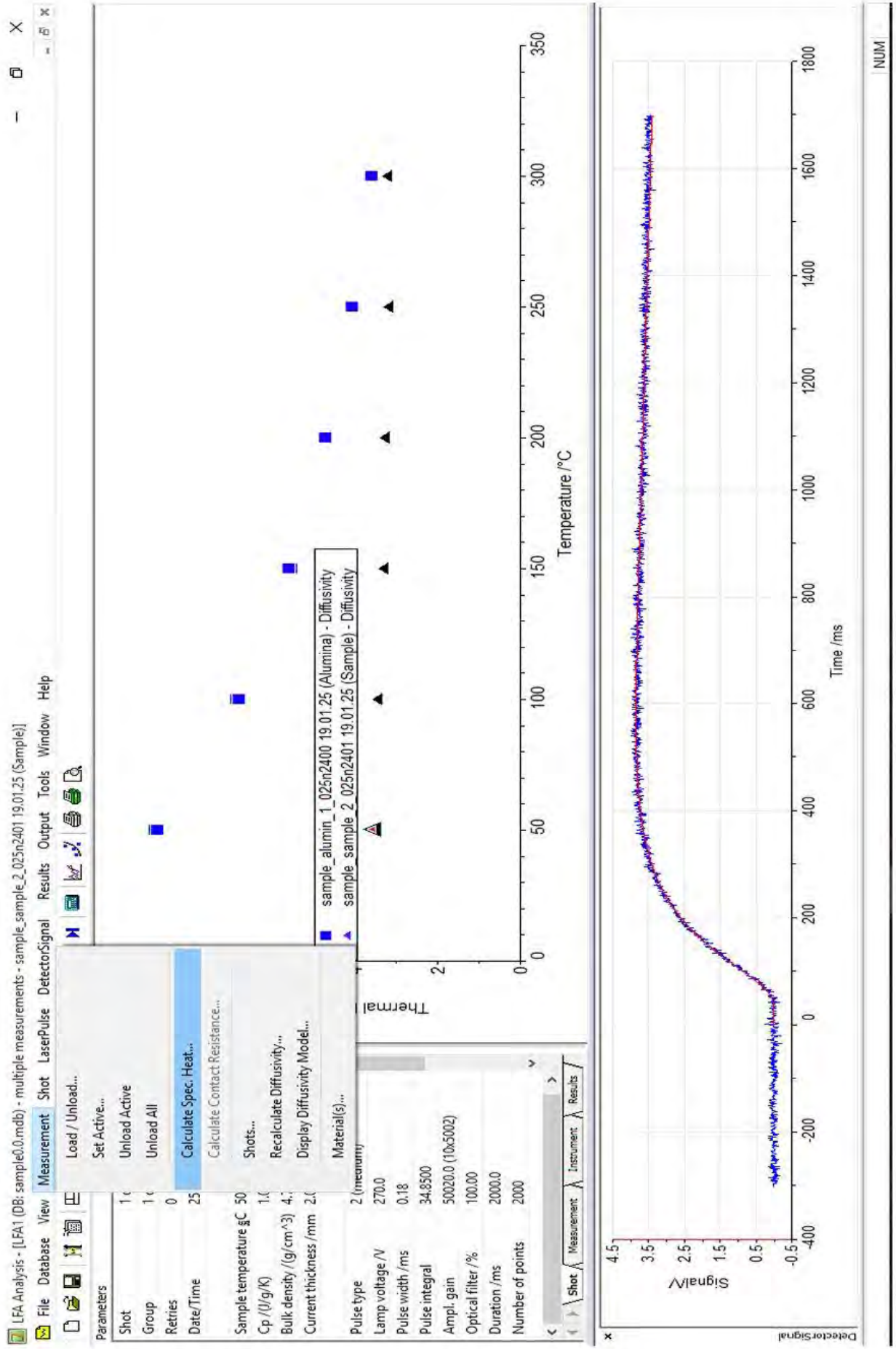


ขั้นตอนที่ 5 เลือก Al203 ในกรณีที่เราเลือกใช้สารมาตรฐานเป็น Alumina

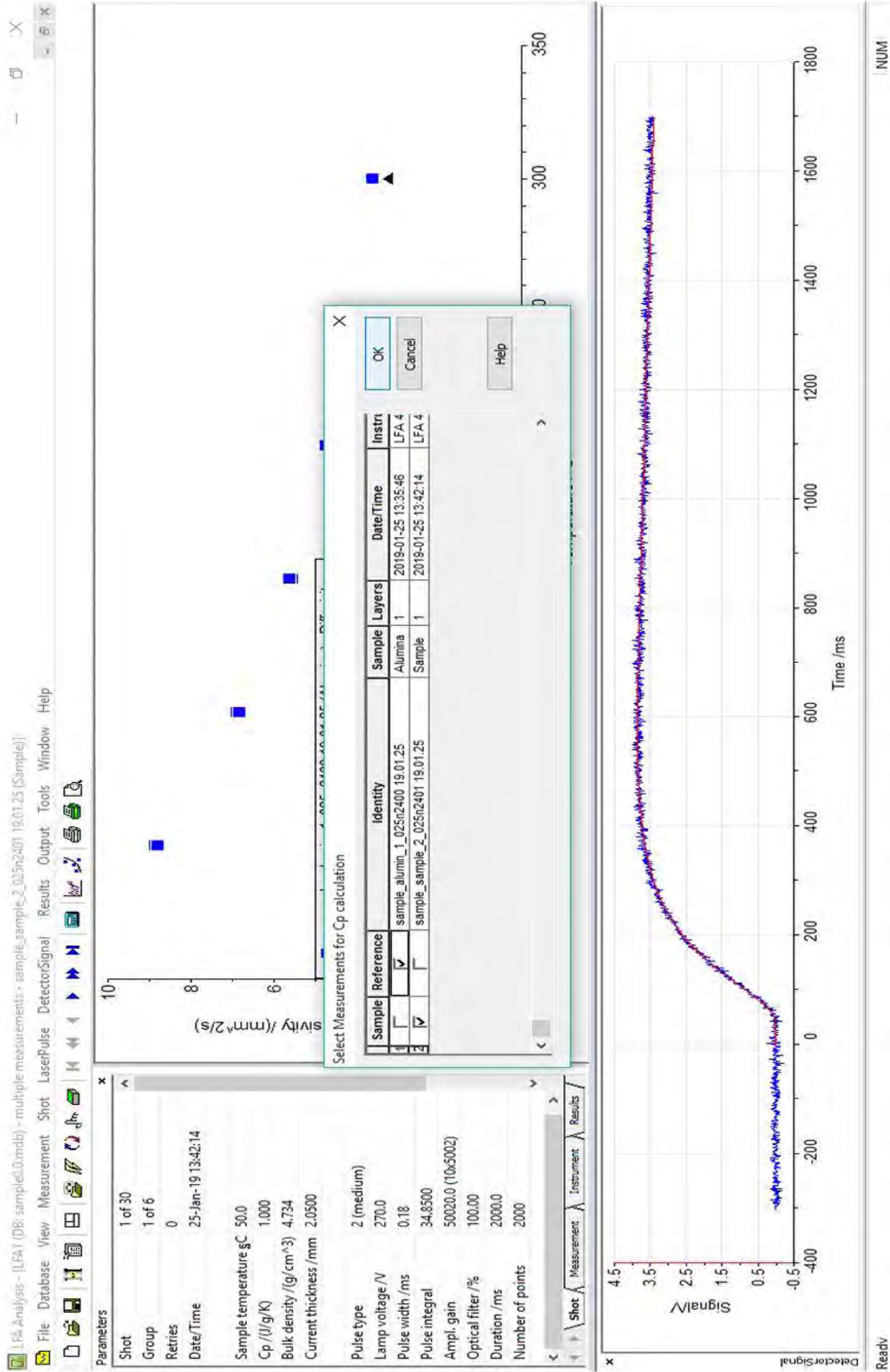


ขั้นตอนที่ 6 Import ไฟล์ sample ของเราที่ต้องการหาค่า  $C_p$

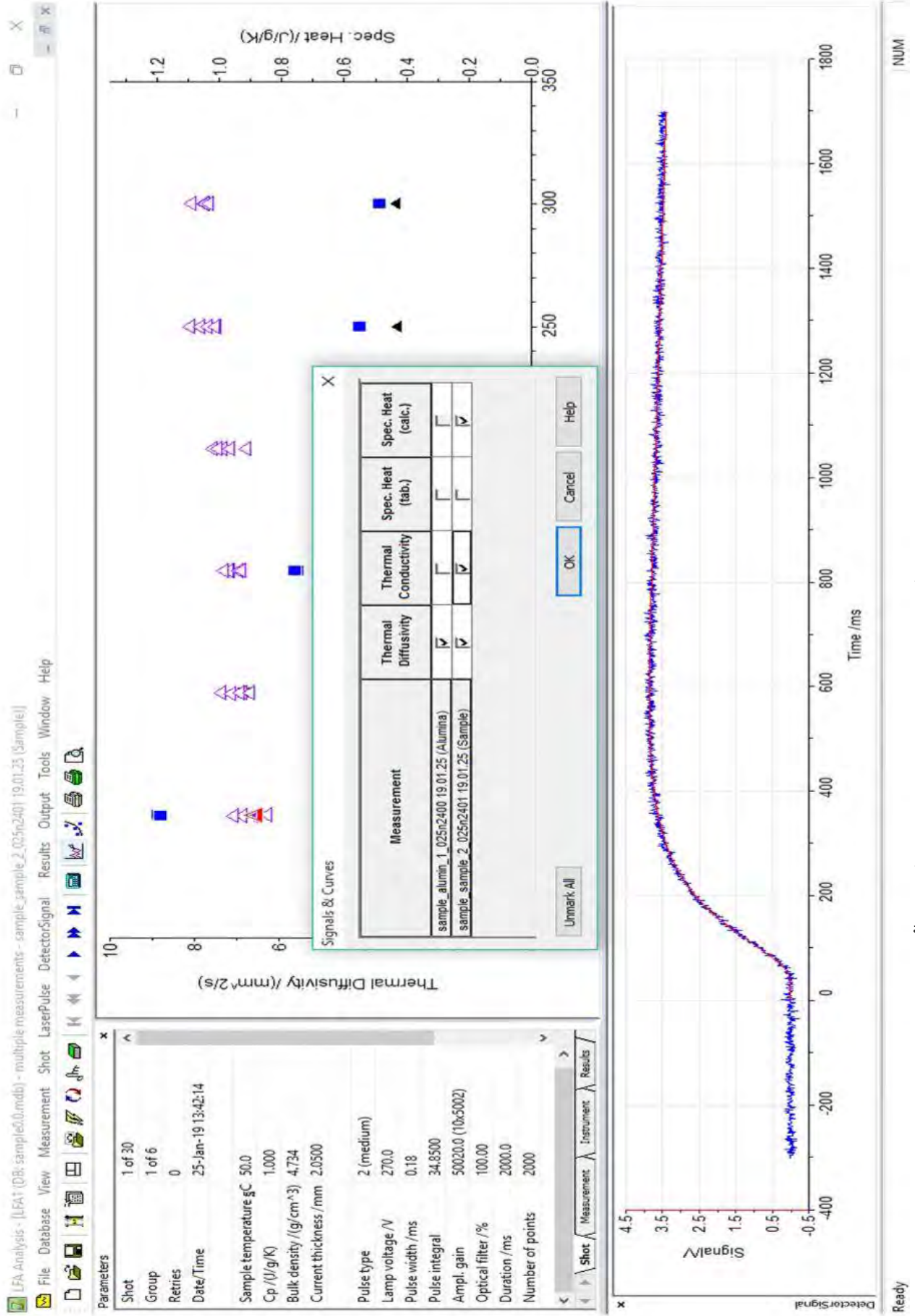




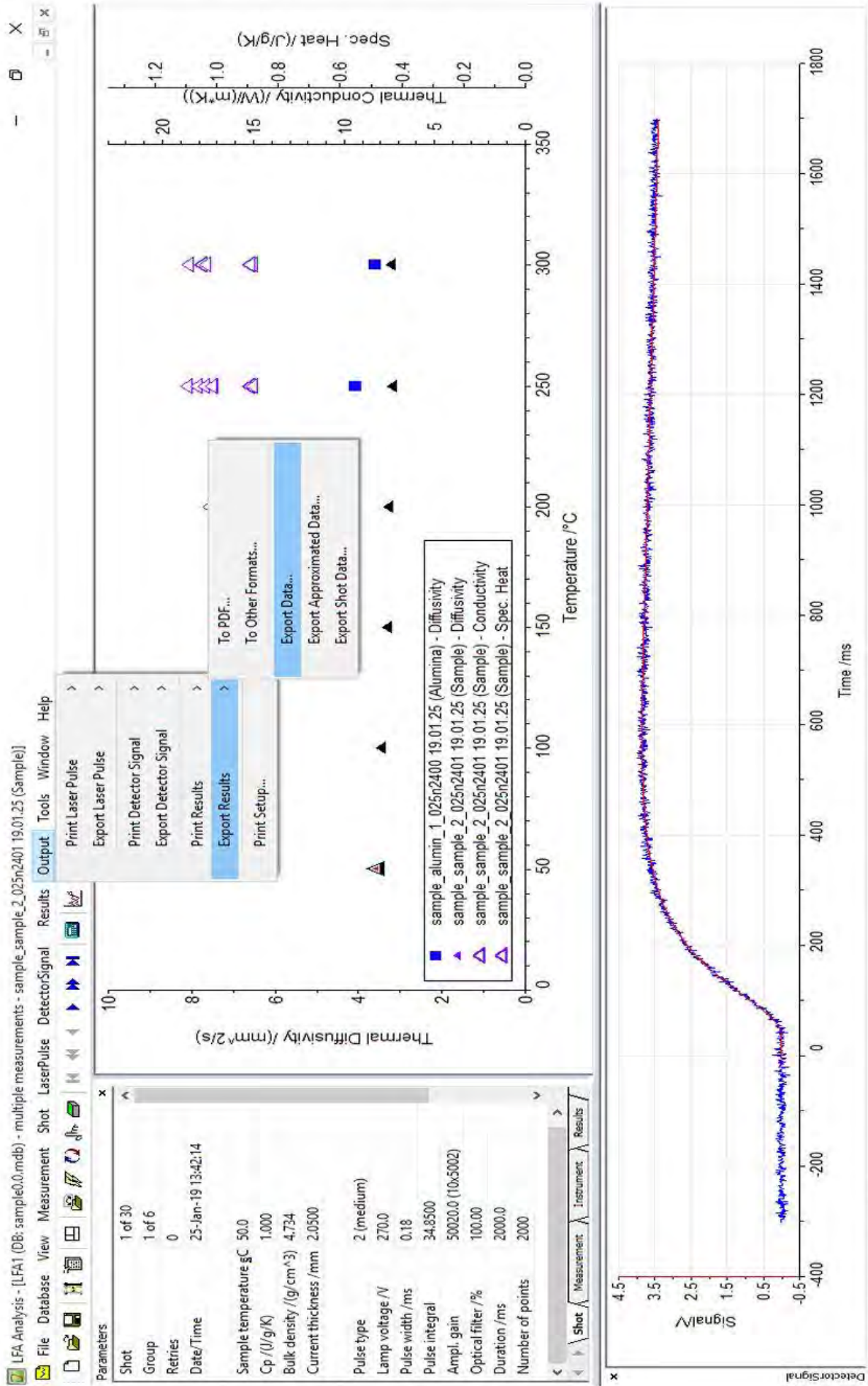
ขั้นตอนที่ 7 เลือก Measurement > Calculate Spec...Heat...



ขั้นตอนที่ 8 คลิกเครื่องหมายของ Reference สำหรับ Alumina และ คลิกช่อง Sample สำหรับชิ้นงานที่ต้องการวัด



ขั้นตอนที่ 9 คลิก Icon Signals & Curves เพื่อหาค่า Thermal conductivity



Report the active measurement to a file

NUM

ขั้นตอนที่ 10 เมื่อได้ค่าแล้วทำการ Export ข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel

LF4 Analysis - [LF4] (DB: sample0.0.mdb) - multiple measurements - sample\_sample\_2\_025n2401\_19-01-25 [Sample]

File Database View Measurement Shot LaserPulse DetectorSignal Results Output Tools Window Help

Parameters

Shot	1 of 30
Group	1 of 6
Retries	0
Date/Time	25-Jan-19 13:42:14
Sample temperature $\mu$ C	50.0
Cp / (J/g/K)	1.000
Bulk density / (g/cm <sup>3</sup> )	4.734
Current thickness /mm	2.0500
Pulse type	2 (medium)
Lamp voltage /V	270.0
Pulse width /ms	0.18
Pulse integral	34.9500
Ampl. gain	50020.0 (10x5002)
Optical filter /%	100.00
Duration /ms	2000.0
Number of points	2000

Export Measurement Report

Identity: sample\_sample\_2\_025n2401\_19-01-25

Sample: Sample

Material: Sample0\_4%Sn

Type:  Single results  Average values  Include hidden shots

Time info:  None  Relative  Absolute

File: E:\User\Desktop\Sample sample\_sample\_2\_025n2401\_19-01-25.csv

OK Cancel Format... Help Browse...

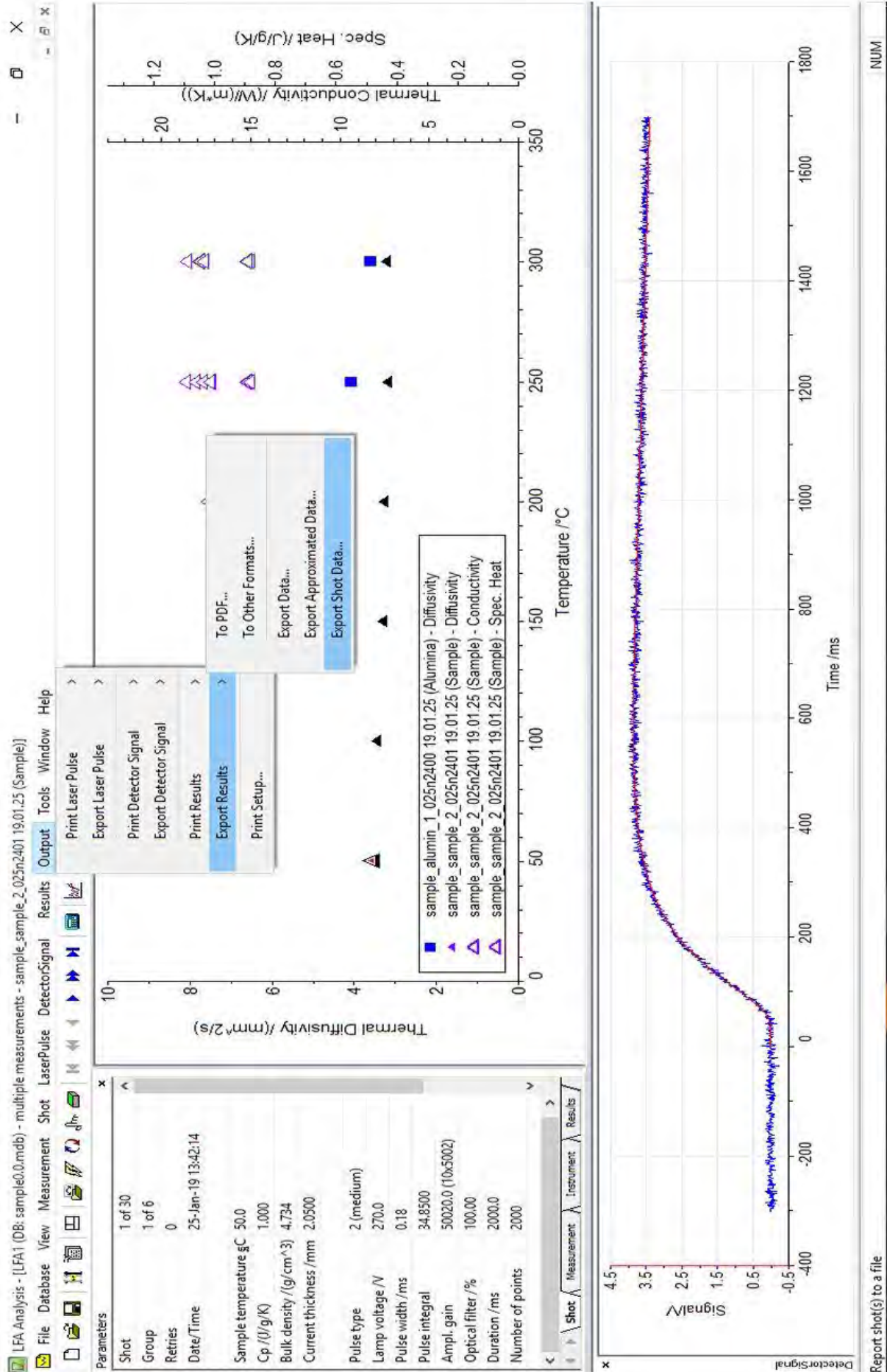
DetectorSignal

Signal

Time /ms

NUM

Ready



ขั้นตอนที่ 11 เลือก Export Shot Data เพื่อเลือกข้อมูลทุกจุดที่ใช้ในการทดลอง

LEA Analysis - [LEA1 (DB: sample20.mdb) - multiple measurements - sample\_sample\_2\_025n2401 19:01:25 (Sample)]

File Database View Measurement Shot LaserPulse DetectorSignal Results Output Tools Window Help

Parameters

Shot	1 of 30
Group	1 of 6
Retries	0
Date/Time	25-Jan-19 13:42:14
Sample temperature/gC	50.0
Cp/(J/g/K)	1.000
Bulk density/(g/cm^3)	4.734
Current thickness/mm	2.0500
Pulse type	2 (medium)
Lamp voltage/V	270.0
Pulse width/ms	0.18
Pulse integral	34.8500
Ampl. gain	50020.0 (10x5002)
Optical filter/%	100.00
Duration/ms	2000.0
Number of points	2000

Export Results

No.	Time	Temp.	Diffus.
<input checked="" type="checkbox"/>	1 13:42:14	50.0	3.614
<input checked="" type="checkbox"/>	2 13:43:16	50.1	3.636
<input checked="" type="checkbox"/>	3 13:44:18	50.0	3.623
<input checked="" type="checkbox"/>	4 13:45:20	50.0	3.612
<input checked="" type="checkbox"/>	5 13:46:22	50.0	3.583
<input checked="" type="checkbox"/>	6 14:00:58	100.0	3.443
<input checked="" type="checkbox"/>	7 14:02:00	100.1	3.443
<input checked="" type="checkbox"/>	8 14:03:02	99.8	3.412

Thermal Diffusivity/(mm^2/s)

Thermal Conductivity/(W/(m^2K))

Spec. Heat/(J/g/K)

Detector Signal

NUM

Ready

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Thermoelectric [Online]. Available from: <https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/high-power/> [17, January, 2020]
- [2] Thermoelectric generator [Online]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator) [17, January, 2020]
- [3] Somchai Kiatgamolchai, Siriphan Nilpairach, Jumpot Wanichsampan and Adisak Thueploy  
“The effects of elements with different melting points on  $\epsilon$ -FeSi size in FeSi<sub>2</sub> alloy,”  
Journal of Alloys and Compounds 666 (2016): 237-242
- [4] Thermoelectric generator [Online]. Available from: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/apr/thermoelectric-energy-generation-takes-flight-for-aircraft-and-spacecraft-monitoring> [20, February, 2020]
- [5] D.M. Rowe, Handbook of Thermoelectrics: Macro to Nano, CRC Press Inc: London, 2005, p.9-12
- [6] Seebeck coefficient [Online]. Available from: <http://www.linseis.com/en/properties/seebeck-coefficient/>
- [7] Phase diagram [online]. Available from: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Fe-Si.php> [15, February, 2020]
- [8] Thermal conductivity [Online]. Available from: [http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/3\\_1.pdf](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/3_1.pdf) [7, February, 2020]



[9] Thermal conductivity measurement [Online]. Available from:

<http://www.eic.co.th/Portals/4//Thermal%20conductivity%20measurement.pdf>

[7, February, 2020]

[10] W.P. Parker, R.J. Jenkins, C. P. Buttler and G.L. Abbott, J. Appl. Phys., 32, pp.1679, (1961)

[11] Somchai Kiatgamolchai, Siriphan Nilpairach, Jumpot Wanichsampan and Adisak Thueploy

“The effects of elements with different melting points on  $\epsilon$ -FeSi size in FeSi<sub>2</sub> alloy,”

Journal of Alloys and Compounds 666 (2016): 237-242

[12] Isao Nishida, Katashi Masumoto, Masa-aki Okamoto and Tsutomu Kojima. Transactions of the Japan Institute of Metals, Vol. 26, No.5 (1985), pp. 369 to 374

[13] จิรัฏฐ์ ลิ้มอักษรอังกูร. ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคสำหรับสาร  
ไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์อะตอม. โครงการงานวิทยาศาสตร์ปริญญาบัณฑิต,  
ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562

[14] นิชกานต์ ซาติขำนาญ. สภาพนำความร้อนของไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก. โครงการงานวิทยาศาสตร์  
ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561