



โครงการ

## การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	สภาพนำความร้อนของไอรอนไดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก Thermal Conductivity of Iron disilicide with Sn impurity		
ชื่อนิสิต	นางสาวณิชกานต์ชาติชำนาญ	เลขประจำตัว	5833418323
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
ปีการศึกษา	2561		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงงานทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด  
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

สภาพนำความร้อนของไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก

นางสาวณิชกานต์ ชาติชำนาญ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ชื่อโครงการ	สภาพนำความร้อนของไอออนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก
ชื่อนิสิต	นางสาวณิกานต์ ชาติชำนาญ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561

---

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561


คณะกรรมการได้ตรวจรับรองรายงานฉบับนี้แล้ว

 (ประธานกรรมการ)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์รณรงค์)

 (กรรมการ)

(อาจารย์ ดร.สันติพงศ์ บริบาล)

 (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย)

ชื่อโครงการ	สภาพนำความร้อนของไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก
ชื่อนิสิต	นางสาวณิชากรนต์ ชาติชำนาญ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการหาค่าสภาพนำความร้อนของสารไอรอนไดซัลไฟด์ที่หลอมในเตาอบที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน โดยมีการเจือดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 ด้วยเครื่อง Nano Flash ในอุณหภูมิช่วง 50-300 องศาเซลเซียส ค่าสภาพนำความร้อนถูกคำนวณโดย 3 แบบได้แก่ (1) ค่าที่ได้โดยตรงจากโปรแกรมของเครื่อง Nano Flash (2) ค่าที่ได้จากการพิชผลเฉลยของสมการนำความร้อนกับสัญญาณทั้งหมด และ (3) ค่าที่คำนวณจากเวลาเมื่อสัญญาณขึ้นไปเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากทั้ง 3 วิธี มีค่าแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 13% และมีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่นที่มีการทดลองลักษณะคล้ายๆกัน ค่าสภาพนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณดีบุกที่เจือ จากการทดลองพบว่าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงสุดประมาณ 18 W/m-K ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการเจือดีบุกที่ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยอะตอม ค่าสภาพนำความร้อนที่สูงเป็นผลเนื่องจากสารที่ใช้ในการทดลองมีเฟสแอลฟาและอ์ซิลอนจำนวนมาก และมีดีบุกปริมาณมากที่สุด จึงนำความร้อนได้ดี

Project title	Thermal Conductivity of Iron disilicide with Sn impurity
Name	Miss Nichakan Chatchumnan
Project advisor	Associate Professor Somchai Kiatgamolchai (Ph.D.)
Department	Physics
Academic year	2018

---

### Abstract

This project measured the thermal conductivity of Iron disilicide prepared by melting method in the furnace at 1550 °C under Argon atmosphere with Sn impurity in atomic percentage 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4. The thermal conductivity was measured with Nano Flash apparatus in temperature range 50-300 °C. The thermal conductivity was calculated by 3 methods (i) by the computer program of Nano flash apparatus (ii) by fitting the solution of thermal conductivity equation to the whole time-range of signal (iii) by using the time when the signal rises to half of its maximum. It was found that those 3 methods differ no more than 13% and the value of thermal conductivity is quite high. All samples show decreasing trend when the temperature increases and tend to increase with increasing amount of Sn impurity. From experiment the thermal conductivity have maximum value of 18 W/m•K at 50 °C for 0.4 percentage Sn impurity. The highest thermal conductivity is due to the majority of  $\alpha$ -phase and  $\epsilon$ -phase, and the highest amount of Sn.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์เรื่อง สภาพการนำความร้อนของไอรอนไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยดีบุก เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคลากรต่างๆ ตั้งแต่คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนครอบครัวและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน

รายงานฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งโครงการนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตา การเสียสละเวลาส่วนตัวในการช่วยเหลือของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตา กรุณา การเสียสละเวลาส่วนตัวในการช่วยเหลือในหลายๆด้านโดยเฉพาะการใช้เครื่อง Nano Flash ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์รณรงค์ ประธานกรรมการสอบโครงการ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สันติพงศ์ บริบาล กรรมการสอบโครงการที่กรุณาเสียสละเวลาส่วนตัวในการสอบความก้าวหน้า

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ผู้มีความชำนาญที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการใช้เครื่องตัดสารที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ บุคลากรในภาควิชาฟิสิกส์ที่คอยอำนวยความสะดวกในใช้อุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นต่อโครงการนี้

ขอขอบคุณ นางสาววินัส เทศมยา และเพื่อนนิสิต ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ ร่วมทุกข์ร่วมสุข และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลตลอดมา

โครงการนี้เกิดความสำเร็จขึ้น จากการช่วยเหลือของอาจารย์ พี่ๆ เพื่อนๆ รวมถึงบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องท่านอื่นๆ ที่ผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณจากใจจริงที่ทุกท่านให้ความร่วมมือและให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดแห่งความสำเร็จในการศึกษานี้ ขอขอบคุณพระคุณ บุคคลในครอบครัวอันเป็นที่รัก ซึ่งเป็นบุคคลที่ทำให้กำลังใจกับผู้วิจัยตลอดมา คุณแม่ ช่วยเหลือในทุกๆ สิ่ง รวมไปถึงอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความรักและความเคารพเป็นอย่างสูง

ณิชากรนต์ ชาติชำนาญ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม</b>	
2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2 ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ	5
2.3 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน	5
2.4 การถ่ายเทความร้อน	6
2.5 กฎของฟูเรียร์	7
2.6 สมการนำความร้อน	7
2.7 ค่าสภาพการนำความร้อน	9
2.8 วิธีการวัดแบบ Nano Flash	9

### บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลอง

3.1	สารที่ใช้	12
3.2	อุปกรณ์	12
3.3	เครื่องมือวัด	12
3.4	ขั้นตอนและการเตรียมสารตัวอย่างและขั้นตอนการทดลอง	13
3.5	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Nano Flash	19
		หน้า
3.6	คำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน	20

### บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1	ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนทั้ง 3 วิธี	
4.1.1	ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง Nano Flash	22
4.1.2	ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการพิทผลเฉลยของสมการนำความร้อนกับสัญญาณทั้งหมด โดยใช้โปรแกรม Origin <sup>TM</sup>	23
4.1.3	ค่าสภาพนำความร้อนที่คำนวณจากเวลาเมื่อสัญญาณขึ้นไปเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดโดยใช้โปรแกรม Origin <sup>TM</sup>	25
4.2	การวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนทั้ง 3 วิธี	27
4.3	การเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนจากงานวิจัยอื่นๆ	28
4.4	ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริก	31

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

ภาคผนวก	การหาค่า $C_p$ โดยใช้โปรแกรม LFA analysis	33
เอกสารอ้างอิง		46



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	3
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	4
รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	4
รูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง	5
รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเหล็กและซิลิกอน	6
รูปที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็กๆ	7
รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเครื่อง Nano Flash	10
รูปที่ 3.1 (ก) ผงเหล็ก ซิลิกอน และดีบุก	12
(ข) การชั่งเตรียมสาร	12
รูปที่ 3.2 (ก) การบดสาร	12
(ข) ถ้วยหลอมที่ทำเคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์	12
รูปที่ 3.3 (ก) นำถ้วยหลอมสารไปไว้ที่ตรงกึ่งกลางของท่อหลอม	13
(ข) จัดเตรียมระบบเตาหลอม	13
รูปที่ 3.4 การตั้งโปรแกรมการหลอมสาร	13
รูปที่ 3.5 (ก) ชั่งสารที่นำไปหล่อเรซิน	14
(ข) เครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000	14
รูปที่ 3.6 (ก) ตัดชิ้นสารตามแนวขวางของชิ้นสาร	14

(ข) ชี้นสารขนาด 1x1 cm	14
รูปที่ 3.7 การพ่นสเปรย์แกรไฟต์เคลือบชี้นสาร	14
รูปที่ 3.8 การใส่ชี้นสารลงไปเครื่อง Nano flash พร้อมกับชี้นงานตัวอย่าง	15
รูปที่ 3.9 การเติมไนโตรเจนเหลว	15
รูปที่ 3.10 ตั้งค่าโปรแกรม Nanoflash 1.28a	16
รูปที่ 3.11 คำนวณค่าความจุความร้อน และค่าสภาพนำความร้อนจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	16
	หน้า
รูปที่ 3.12 แปลงข้อมูลออกมาในรูปของไฟล์ Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล	17
รูปที่ 3.13 การหาแนวโน้มกราฟ โดยทำการเปลี่ยนค่า $n_{max}$	18
รูปที่ 3.14 การทดลอง fit กราฟกับ ข้อมูลที่สร้างขึ้น ในโปรแกรม matlab	18
รูปที่ 3.15 การคำนวณค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง	19
รูปที่ 3.16 การ fitting ข้อมูลทุกจุดด้วยโมเดลกราฟ	19
รูปที่ 3.17 การเลือกจุดข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปทีครั้งหนึ่งของค่าสูงสุดเพื่อดูค่า พารามิเตอร์ $t_{50}$	20
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่เจือตีบุกในปริมาณร้อยละ ต่างๆ	21
รูปที่ 4.2 การfitting จุดข้อมูลจากการทดลองด้วยโมเดลกราฟ	22
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิที่เจือตีบุกในปริมาณร้อยละ ต่างๆ	23
รูปที่ 4.4 การเลือกจุดข้อมูลที่สัญญาณขึ้นไปทีครั้งหนึ่งของค่าสูงสุด เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ $t_{50}$	24
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิที่เจือตีบุกในปริมาณร้อยละ ต่างๆ	25
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณตีบุก ที่อุณหภูมิ 50°C	26

รูปที่ 4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณดื่บูก ที่อุณหภูมิ 300°C	27
รูปที่ 4.8	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ	29
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ กับปริมาณดื่บูกที่เจือ	30

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนจากงานวิจัยอื่นๆ	28

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีถึงปัญหาด้านพลังงาน เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การคมนาคมสื่อสาร รวมไปถึงจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พลังงานหลักที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินหรือน้ำมันมีแนวโน้มที่จะลดลงในอนาคต[1] การผลิตพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงพลังงานเหลือใช้ ซึ่งพลังงานต่างๆที่นำมาเป็นพลังงานทางเลือก ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานความร้อนก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ผ่านเทคโนโลยีอุปกรณ์หนึ่งๆที่เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” [2] การใช้พลังงานไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม มักมีการสูญเสียพลังงานสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของพลังงานความร้อน การนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกแก้ปัญหาคาขาดแคลนด้านพลังงานเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติในการผันกลับระหว่างความต่างของอุณหภูมิและความต่างศักย์ไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งก็คือสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของวัสดุ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก เนื่องจากมีราคาสูงและยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ โดยปัจจุบันสารเทอร์โมอิเล็กทริกที่นิยมใช้คือ บิสมัทและเทลลูไรด์ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง ในโครงการนี้จึงเลือกใช้เหล็กและซิลิกอน เป็นผลเนื่องมาจากเหล็กและซิลิกอนเป็นธาตุที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย อีกทั้งสารประกอบเหล็กและซิลิกอนมีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี มีความต้านทานต่ำ และไม่เป็นพิษ ในการเตรียม  $FeSi_2$  นั้นทำได้โดยการนำผง Fe และ Si ผสมกันในอัตราส่วน 1:2 โดยมวลละต่อม และหลอมเหลวในเตาหลอมบรรยากาศก๊าซอาร์กอน จากงานวิจัยของสมชาย เกียรติกมลชัยและคณะ (2016) พบว่าการเจือด้วยดีบุกช่วยให้สมบัติเชิงโครงสร้างดีขึ้น กล่าวคือ เกิดสารประกอบเฟสแอลฟา ( $FeSi$ ) ที่มีขนาดเกรนเล็กลง ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติเชิงเทอร์โมอิเล็กทริกส์ [3] ซึ่งคาดว่าจะทำให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มีการเปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของสภาพนำความร้อนว่าดีบุกที่เจือนั้นมีผลอย่างไร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาสภาพนำความร้อนของไอรอนไดซิลิไซด์ที่เจือด้วยดีบุกในปริมาณร้อยละ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โดยอะตอม

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาผลของการเจือสารประกอบเหล็ก-ซิลิกอนด้วยธาตุดีบุก ในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โดยอะตอม
2. วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ( ประมาณ 24-26 °C ) ของสารประกอบเหล็ก-ซิลิกอนที่เจือธาตุดีบุก ในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 โดยอะตอม
3. พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง และค่าทางทฤษฎี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้การใช้งานเครื่องมือต่างๆ และหลักการทำงานของเครื่องมือ
2. ทำให้นิสิตผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจในการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอน เช่น การเตรียมสาร การตัดสาร การขัดสาร ถือเป็นฝึกความละเอียดรอบคอบและความอดทน
3. ทราบสภาพนำความร้อนของไอรอนไดซิลิไซด์ที่ เจือด้วยดีบุกในปริมาณที่แตกต่างกัน
4. ทราบสภาพนำความร้อนของไอรอนไดซิลิไซด์ที่ เจือด้วยดีบุกที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

## บทที่ 2

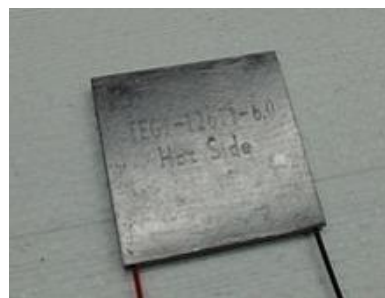
### ทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric devices) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และในทางกลับกันก็ยังสามารถเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนได้เช่นเดียวกัน สำหรับคำว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” มาจากคำว่า “เทอร์โม (thermo)” ซึ่งมีความหมายว่าความร้อน และคำว่า “อิเล็กทริก (electric)” ซึ่งมีความหมายว่าไฟฟ้า เมื่อนำความหมายรวมกัน จะเป็น “ความร้อนและไฟฟ้า” ดังนั้นเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานระหว่าง พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) ซึ่งจะทำการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุเชิงฟลักสควอนตัม เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่าง ปลายทั้งสองข้างพบว่าจะมีการถ่ายเทอุณหภูมิจาก อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคือมีการสั่นของ อนุภาคโฟนอน (phonon) และการเคลื่อนที่ของพาหะ มีทั้ง อิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) จะได้พลังงานไฟฟ้า และในทางตรงข้ามเมื่อวัสดุเทอร์โม อิเล็กทริก มีความต่างศักย์ไฟฟ้า จะมีการถ่ายเทความต่างศักย์ไฟฟ้า จากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังความต่าง ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะ ได้ พลังงานความร้อน แสดงดังรูปที่ 1



TEC [4]



TEG [5]

รูปที่ 2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

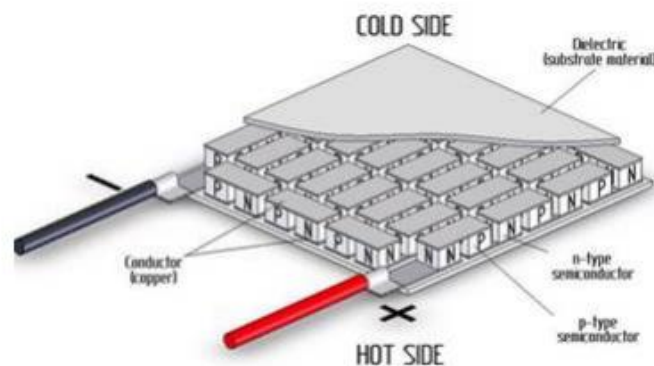
ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) โดยทั่วไปปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงาน ความร้อน มี 3 ปรากฏการณ์ได้แก่

1. ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด”

2. ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น หรือ ลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า”

3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับ การไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อน หรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น”

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการนำเอาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มาประกอบให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถ นำไปใช้งานได้ เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)” โดยการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) ชนิดเอ็น (N type) และชนิดพี (P type) มาต่อกันเป็นคู่ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกจนถึงตัวสุดท้าย และดานบนกับดานล่างถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิค แสดงดังรูปที่ 2

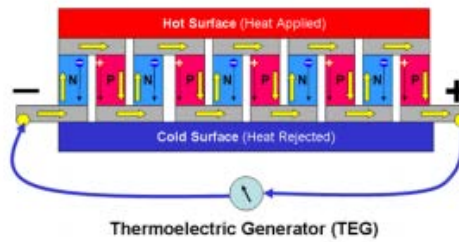


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [6]

เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แลวทำให้อุณหภูมิแผ่นเซรามิคดานบนและดานล่างแตกต่างกัน ทำให้เกิดปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้ และเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (load) หรือภาระไฟฟ้าจะทำให้มี

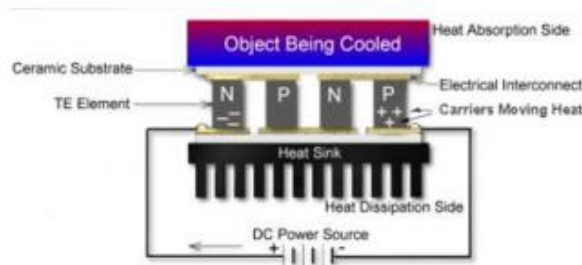


กระแสไฟฟ้าไหล ตามปรากฏการณ์ของซีเบค โดยทั่วไปเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริก เจนเนอเรเตอร์(thermoelectric generator ; TEG) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์[7]

ในทางกลับกัน เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่าง ตามปรากฏการณ์ของเพลทีเยอร์โดยทั่วไปเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง (thermoelectric cooling ; TEC) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง [8]

## 2.2 ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ

ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุสามารถวัดได้ในรูปของค่า Figure of merit หรือ ZT ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck coefficient,  $\alpha$ ) ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity,  $\rho$ ) และสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity,  $K$ ) ของสารดังนี้

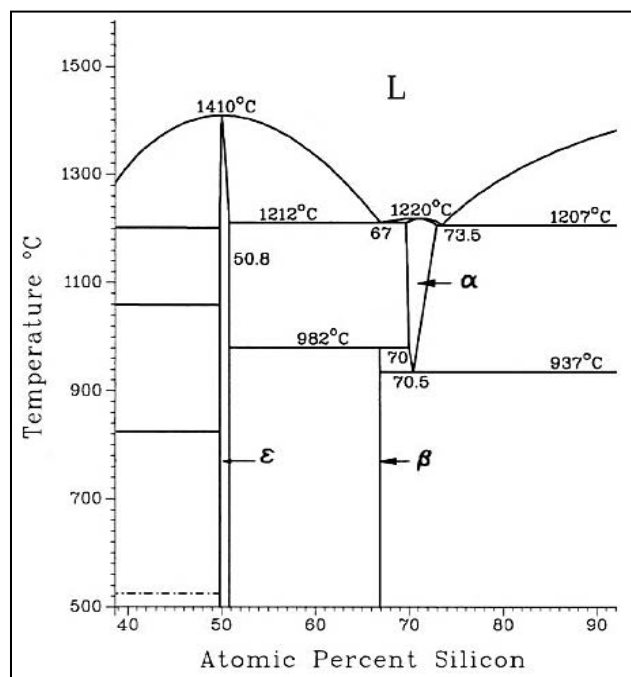
$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (10)$$

ดังนั้นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีควรมีความนำไฟฟ้าและค่าคงตัวของซีเบคสูงแต่มีความนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งการจะควบคุมค่าสมบัติเหล่านี้ในสารนั้นเป็นเรื่องยากเนื่องจากค่าทุกค่ามีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากและสารที่มีความนำไฟฟ้าสูงมักจะมีความร้อนสูงแต่มีค่าคงที่ของซีเบคต่ำไปด้วย

### 2.3 สารประกอบเหล็กและซิลิกอน

สารประกอบระหว่างเหล็กและซิลิกอน มีเฟสที่สำคัญ 3 เฟส ได้แก่ เฟส  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>  $\epsilon$ -FeSi และ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> เฟส  $\alpha$  และ  $\epsilon$  มีสมบัติเป็นโลหะ ในขณะที่เฟส  $\beta$  มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและเป็นวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี ซึ่งกระบวนการเกิดเฟสต่าง ๆ สามารถดูได้จากแผนภาพเฟสไดอะแกรมของเหล็ก และซิลิกอนในรูปที่ 2.3 เมื่อนำสารประกอบระหว่างเหล็กและซิลิกอนมาการหลอมรวมกันในอัตราส่วนอะตอม 1:2 แล้วปล่อยให้เย็นตัวลง พบว่าเฟสที่เกิดขึ้น มี 2 เฟส ได้แก่ เฟส  $\epsilon$  เริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 1410 องศาเซลเซียส และเฟส  $\alpha$  เริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ส่วนเฟส  $\beta$  จะเกิดขึ้นจากการ อบอุ่นภายหลัง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยา 3 ปฏิกิริยาหลักต่อไปนี้

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



## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ โดยมีกลไกการถ่ายเทความร้อนได้ 3 วิธี คือ การนำความร้อน การแผ่รังสี และการพาความร้อน [10]

1. การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งส่งผ่านเนื้อของสสารไปยังอีกจุดหนึ่งโดยเนื้อของสสารที่นิ่งอยู่กับที่
2. การแผ่รังสี คือ การที่ความร้อนจากจุดจุดหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดอีกจุดหนึ่งโดยการที่จุดที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และไม่ใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
3. การพาความร้อน คือ การที่ความร้อนจากจุดหนึ่งในสสารเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่งในสสารโดยติดไปกับสสารที่เกิดการเคลื่อนที่

## 2.5 การนำความร้อน

การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนถ่ายเทผ่านสสารโดยที่สสารไม่เกิดการเคลื่อนที่พาความร้อนนั้นไปแต่ความร้อนไหลผ่านสสารนั่นเอง โดยสมการแสดงพฤติกรรมของการนำความร้อนนั้น ได้ถูกนำเสนอโดยฟูเรียร์ และถูกรู้จักกันในนาม กฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์สำหรับการนำความร้อน โดยกฎของฟูเรียร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ฟลักซ์ของความร้อนที่การถ่ายเท ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ จะเป็นปฏิภาคตรงกับค่าลบของ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้น และสามารถเขียนเป็นสมการการนำความร้อนในแนวแกนเดียวได้ดังต่อไปนี้

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

เมื่อ  $q$  = ความร้อนที่เกิดการถ่ายเท มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร

$k$  = สภาพนำความร้อน (Conductivity) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน  $x$  มีหน่วยเป็น เคลวินต่อเมตร

หน่วยของค่าทั้งสามสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามหน่วยการวัดที่ใช้วัดความร้อน อุณหภูมิ และความยาว นอกจากนี้ในกรณีที่ความร้อนมีการถ่ายเทในสามแนวแกนพร้อมกันเราจะเขียนสมการ กฎข้อที่ 1 ของฟูรีเยร์ สำหรับการนำความร้อนได้ดังนี้

$$q = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -k \nabla T \quad (2)$$

และเมื่อทำประยุกต์รวมกฎข้อที่ 1 ของฟูรีเยร์สำหรับการนำความร้อน เข้ากับกฎข้อที่ 1 ของทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่าพลังงานในจักรวาลนี้เป็นปริมาณคงที่ และสมมติให้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนใน ระบบที่การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนเท่านั้น เราจะได้สมการดังสมการข้างล่างสำหรับกรณี การนำความร้อนแกนเดียว ซึ่งเราเรียกสมการดังกล่าวว่า กฎข้อที่ 2 ของฟูรีเยร์สำหรับการนำความร้อน

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (3)$$

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

$$\alpha = \text{ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)} = \frac{k}{\rho C_p}$$

และสำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในระบบที่มีการนำความร้อนอย่างเดียวนั้นกฎข้อที่ 2 ของฟูรีเยร์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\alpha \nabla T) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

## 2.6 ค่าสภาพการนำความร้อน

ในการวัดสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ จะมีค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของ วัสดุ คือ ค่าสภาพการนำความร้อน(Thermal conductivity, k) ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลของพลังงานความร้อน ที่จุดใดๆผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ ถ้าวัสดุ

สามารถนำความร้อนได้ดี ก็จะมีค่า  $k$  สูง แต่ถ้าวัสดุได้นำความร้อนได้น้อย ก็จะมีค่า  $k$  ต่ำ โดยการวัดค่าสภาพการนำความร้อน สามารถแบ่งตามเทคนิคของการวัดได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ

1) การนำความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady state heat transfer, ไม่มีการสะสมพลังงานในทุกจุดภายในระบบ) คือ การถ่ายเทความร้อนในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ของระบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจะไม่เท่ากันทุกจุด (Non-homogenous temperature) ซึ่งการไม่เท่ากันของอุณหภูมินี้ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนขึ้น

2) การนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (Transient heat transfer, มีการสะสมพลังงานในจุดต่างๆของระบบ) คือ การวัดความร้อนในขณะที่มีการให้ความร้อนเข้าไป เป็นการวัดแบบเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งการวัดแบบนี้มีข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่ สภาวะคงที่ ตัวอย่างวิธีการวัดแบบสภาวะไม่คงที่ เช่น Laser flash method วิธีนี้จะวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานแผ่นบางเมื่อมีการให้พลังงานจาก laser pulse การวัดแบบนี้มีความรวดเร็ว เหมาะกับวัสดุหลายชนิด ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการวัดที่กว้าง ตั้งแต่ประมาณ  $-120$  ถึง  $2800$  °C [11]

## 2.7 วิธีการวัดแบบ Laser Flash

วิธี laser flash นี้ จะวัดค่า Thermal diffusivity เป็นหลักและคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนจากสมการ

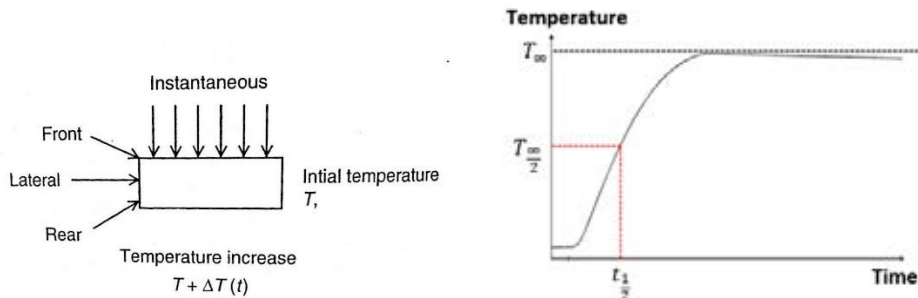
$$k = \alpha \rho C_p \tag{5}$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)

$k$  คือ สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

$\rho$  คือ ความหนาแน่น (Bulk density)

$C_p$  คือ ความจุความร้อน (Heat capacity)



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเครื่อง Laser Flash

วิธีการวัดแบบ Laser Flash นี้ เป็นวิธีการที่นิยมใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อนในชิ้นงานที่มีความหนา  $L$  เริ่มทำการวัดค่า โดยที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิคงที่และให้ความร้อนบนด้านหนึ่งของชิ้นงานซึ่งให้พลังงาน laser เข้าไปแบบ pulse เป็นการให้ความร้อนเพียงชั่วขณะ สามารถเขียนอุณหภูมิของชิ้นงานอีกด้านในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ดังสมการนี้ [12]

$$\frac{T(L,t)}{T_\infty} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \pi^2 \frac{t}{t_c}) \quad (6)$$

โดยที่  $T_\infty$  คือ อุณหภูมิที่สมดุล  $= \frac{Q}{\rho CL}$

$Q$  คือ ความเข้มของพลังงานความร้อน และ  $t_c = \frac{L^2}{\alpha}$

$L$  คือ ความหนาของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

โดยถ้าหากเราเลือกจุดที่  $(T_{\frac{\infty}{2}}, t_{\frac{1}{2}})$  แล้วนำไปแทนลงในสมการที่ (6) จะสามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่า  $\alpha$  (Parker et al. [13]) ได้ดังนี้

$$\alpha = 0.1388 \frac{L^2}{t_{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

โดยที่  $t_{\frac{1}{2}}$  คือ เวลาที่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นสูงสุดของ  $\frac{T(L,t)}{T_\infty}$  ครึ่งหนึ่ง

เมื่อทำการ fitting ข้อมูลจากการทดลองด้วยสมการ (6) พบว่า วิธีการวัดแบบ Laser Flash Method แสดงค่าข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี ได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดวิธีอื่นๆ [14]

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลอง

#### 3.1 สารที่ใช้

1. ผงเหล็กความบริสุทธิ์ 99.99+%
2. ผงซิลิกอนความบริสุทธิ์ 99.99%
3. ผงดีบุกความบริสุทธิ์ 99.99%
4. เรซินหล่อใส่
5. สารดูดความชื้น(ซิลิกาเจล)
6. น้ำกลั่น
7. ไนโตรเจนเหลว

#### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
3. โกร่งหรือถ้วยบดสาร
4. ถ้วยอะลูมิเนียม เคลือบด้วยผงโบรอนไนไตรด์
5. เตาเผา Lenton tube furnace model LTF 16/50/180
6. เวอร์เนียแคลิเปอร์
7. ถังมือยาง
8. ถังมือหนัง

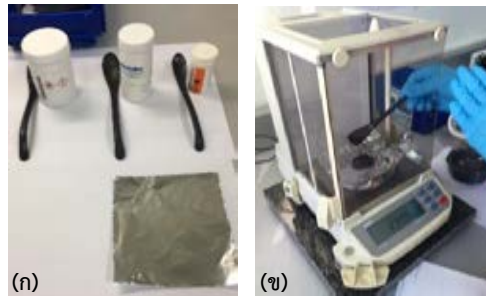
#### 3.3 เครื่องมือวัด

1. เครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000
2. เครื่อง Laser flash ยี่ห้อ Nertzch

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

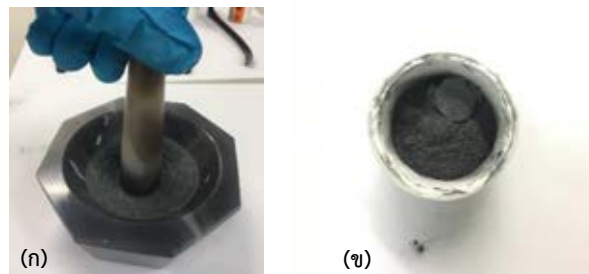
การเตรียมสารตัวอย่างเริ่มจากการผสมผงเหล็กและผงซิลิกอนเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอม จากนั้นผสมผงดีบุกในปริมาณร้อยละต่างๆที่กำหนดไว้ แล้วบดส่วนผสมเข้าด้วยกัน นำสารที่บดเรียบร้อยแล้วใส่ถ้วยหลอมอะลูมินา จากนั้นนำสารดังกล่าวไปหลอมที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เมื่อสารตัวอย่างเย็นตัวจึงนำไปตัดเป็นแผ่นให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวัดเพื่อหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยเครื่อง Laser Flash โดยมีขั้นตอนอย่างละเอียดดังนี้

1. เตรียมผงเหล็กและซิลิกอนโดยคำนวณและชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ให้มีอัตราส่วน 1:2 โดยอะตอม แล้วเติมผงดีบุกในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และไม่เจือเลย ซึ่งการเจือในสัดส่วนร้อยละ 0.1 โดยอะตอม หมายถึง การเตรียมสาร  $\text{FeSi}_2$  จำนวน 100 อะตอม (Fe 33.33 อะตอมและ Si 66.67 อะตอม) จะเจือดีบุกลงไป 0.1 อะตอม โดยให้มวลรวมของสารที่ผสมประมาณ 15 กรัม และการชั่งสารจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์รองไว้เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย เมื่อชั่งสารได้ตามที่ต้องการแล้วจึงเทสารลงในถ้วยบดสาร



รูปที่ 3.1 (ก) ผงเหล็ก ซิลิกอน และดีบุก (ข) การชั่งเตรียมสาร

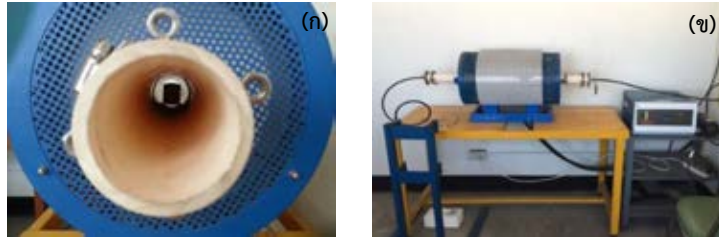
2. นำผงเหล็ก ซิลิกอน และดีบุกที่เจือในปริมาณที่ต้องการบดผสมกันในถ้วยบดสาร บดสารโดยใช้แท่งบดสารคนเป็นวงกลมไปเรื่อยๆประมาณ 15 นาที จากนั้นนำใส่ถ้วยหลอมอะลูมินาที่ทาเคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์



รูปที่ 3.2 (ก) การบดสาร (ข) นำสารใส่ถ้วยหลอมที่ทาเคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์

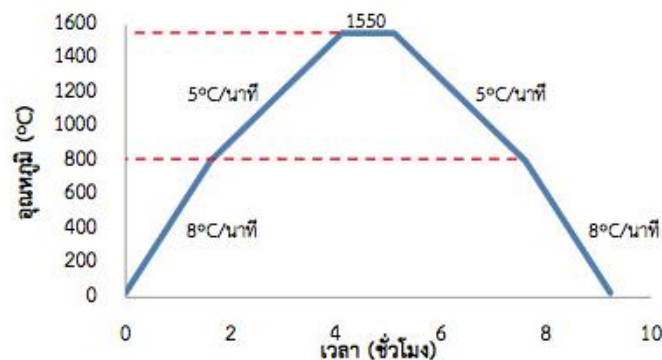


- นำถั่วอะลูมินาเข้าไปวางไว้ตรงกลางท่อหลอม ปิดฝาท่อหลอมทั้งสองด้านดังรูปที่ แล้วทำการปั๊มไล่อากาศออกและแทนที่ด้วยก๊าซอาร์กอน ทำซ้ำอย่างน้อย 10 รอบ เพื่อให้ระบบมีอากาศปกติในสัดส่วนที่น้อยที่สุด (ประมาณ  $0.15^{10}$  ส่วน)



รูปที่ 3.3 (ก) นำถั่วหลอมสารไปไว้ที่ตรงกึ่งกลางของท่อหลอม (ข) จัดเตรียมระบบเตาหลอม

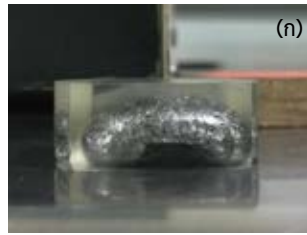
- ปรับบรรยากาศในท่อหลอมให้เป็นแก๊สอาร์กอน ซึ่งมีอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นหลอมสารที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยเริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาหลอมด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 800 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปจนถึงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้ที่ 1550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิไปจนถึง 800 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 การตั้งโปรแกรมการหลอมสาร

- เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงแล้ว นำชิ้นงานไปหล่อด้วยเรซิน เพื่อความสะดวกในการตัดชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานที่หล่อเรซินแล้วไปตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000

(ข)



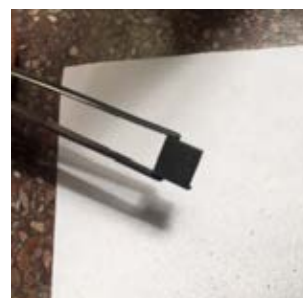
รูปที่ 3.5 (ก) ชิ้นสารที่นำไปหล่อเรซิน (ข) เครื่องตัดโลหะ IsoMet 4000

6. ทำการตัดชิ้นงานโดยตัดตามแนวขวางของชิ้นงานให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดขอบด้านข้างจนได้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1x1 เซนติเมตร ซึ่งชิ้นงานที่ต้องการจะต้องไม่มีรูพรุน



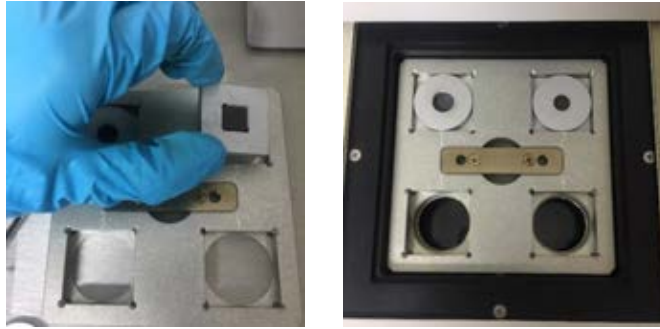
รูปที่ 3.6 (ก) ตัดชิ้นสารตามแนวขวางของชิ้นสาร (ข) สารที่ตัดจนมีขนาด 1x1cm

7. นำชิ้นงานไปวัดค่าสภาพนำความร้อนด้วยเครื่อง laser flash ฟันชิ้นงานด้วยสเปรย์ graphite ให้ทั่วทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 ฟันสเปรย์แกรไฟต์เคลือบชิ้นสารให้ทั่วทั้งชิ้น

8. ใส่ชิ้นงานลงใน holder ที่มีลักษณะเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน จากนั้นปิดทับด้วยที่ปิดอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง Laser Flash โดยใส่ ชิ้นงานตัวอย่าง Alumina ลงไปด้วยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน



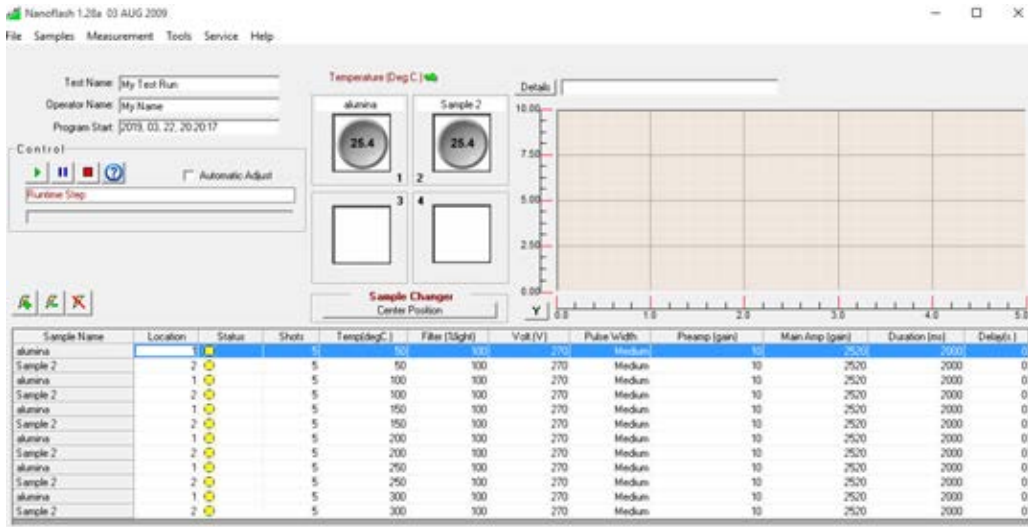
รูปที่ 3.8 ใส่ชิ้นสารลงไปในเครื่อง Laser flash พร้อมกับชิ้นงานตัวอย่าง

9. ค่อยๆทำการเติมไนโตรเจนเหลวลงไปในเครื่อง Laser Flash ทีละเล็กน้อยจนกว่าจะเต็ม(ควันพุ่งออกมา) เมื่อเต็มแล้วปิดด้วยฝาทองเหลืองเช็คว่าฝาปิดได้สนิทไม่มีแรงดัน ดันออกมา



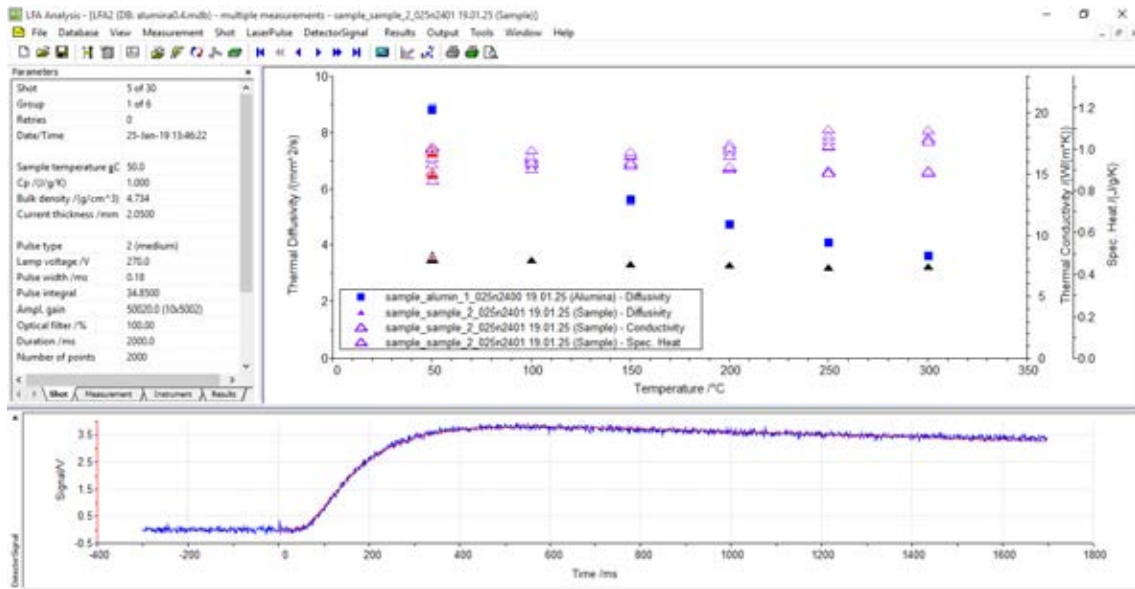
รูปที่ 3.9 เติมไนโตรเจนเหลวลงไป

10. ตั้งค่าโปรแกรม Nanoflash 1.28a เพื่อใช้ในการวัด เลือกใช้อุณหภูมิที่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส โดยให้มีการยิงรังสีอินฟราเรดซ้ำ 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อโปรแกรมทำงานเสร็จสิ้น รอจนอุณหภูมิลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้องจากนั้นทำการพลิกด้านของชิ้นงานแล้วทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่ง export ข้อมูลจากโปรแกรมเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป (โดยถ้าหากมีการแจ้งเตือนว่าไนโตรเจนเหลวหมดในระหว่างการทำงานของเครื่อง สามารถหยุดเติมไนโตรเจนแล้วให้เครื่องทำงานต่อไปได้เลย)



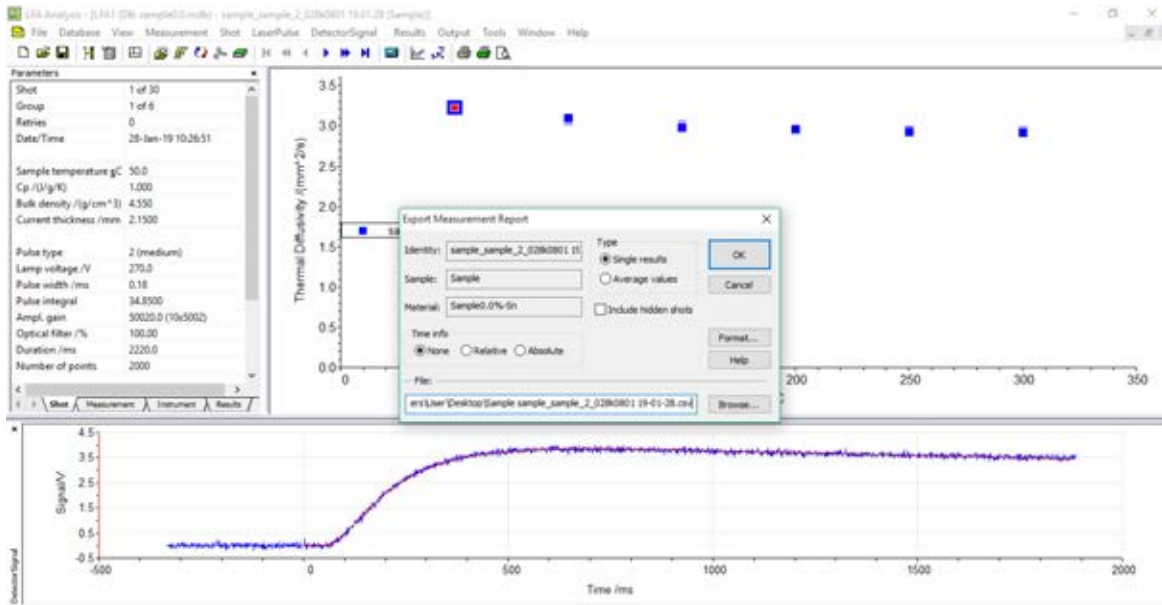
รูปที่ 3.10 ตั้งค่าโปรแกรม Nanoflash 1.28a

11. นำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม Nanoflash 1.28a มาเปิดและหาค่า ความจุความร้อน ( $C_p$ ) จากการเปรียบเทียบค่ากับค่าความจุความร้อนของชิ้นงานมาตรฐานที่ใส่ลงไปพร้อมกับชิ้นงานที่ใช้ทำการทดลอง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน โดยใช้โปรแกรม LFA Analysis



รูปที่ 3.11 คำนวณค่าความจุความร้อน และค่าสภาพนำความร้อนจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

## 12. แปลงข้อมูลจากการทดลองให้ออกมาเป็นไฟล์ Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



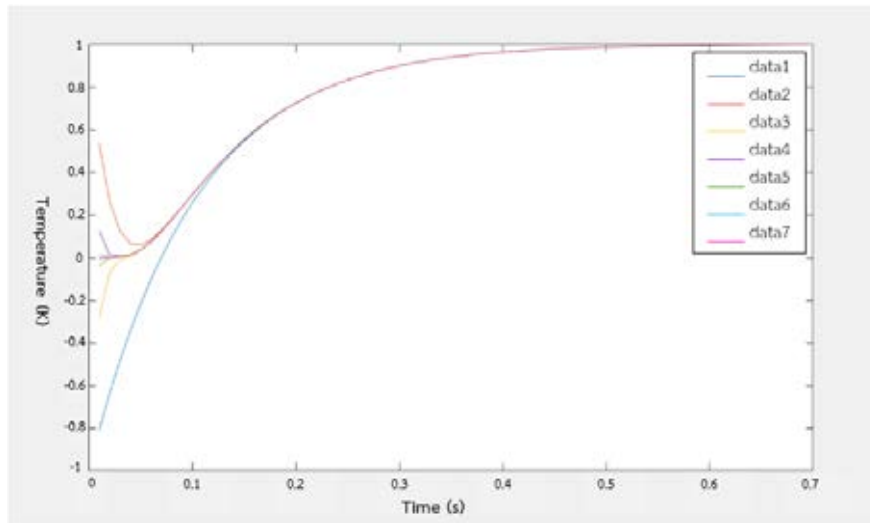
รูปที่ 3.12 แปลงข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Laser Flash

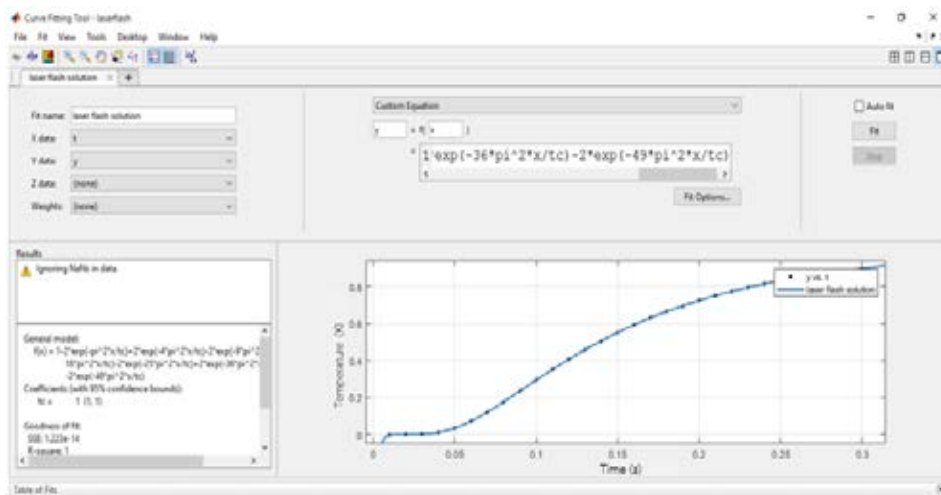
หลังจากทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Laser Flash โดยจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบแนวโน้มกราฟของข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองและค่าที่ได้จากทางทฤษฎี (สร้างกราฟจากสมการทางทฤษฎี) และวิเคราะห์กราฟที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม origin โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.5.1 วิเคราะห์โมเดลกราฟที่ได้จากสมการทางทฤษฎีโดยโปรแกรม Matlab

พิจารณาแนวโน้มของกราฟจากสมการทางทฤษฎีโดยโปรแกรม Matlab โดยทำการเปลี่ยนจำนวนเทอมที่ใช้ในสมการไปเรื่อยๆ เริ่มจาก 1 เทอม ซึ่งพบว่า กราฟมีแนวโน้มที่ดีและมีค่าเริ่มต้นที่ 0 เมื่อเลือกใช้ 7 เทอม ดังนั้นจึงนำกราฟนี้ไปใช้เพื่อเป็นโมเดลในการ fit จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลอง แสดงได้ ดังรูป



รูปที่ 3.13 พิจารณากราฟ โดยทำการเปลี่ยนจำนวนเทอมในสมการ ให้data แทน จำนวนเทอม

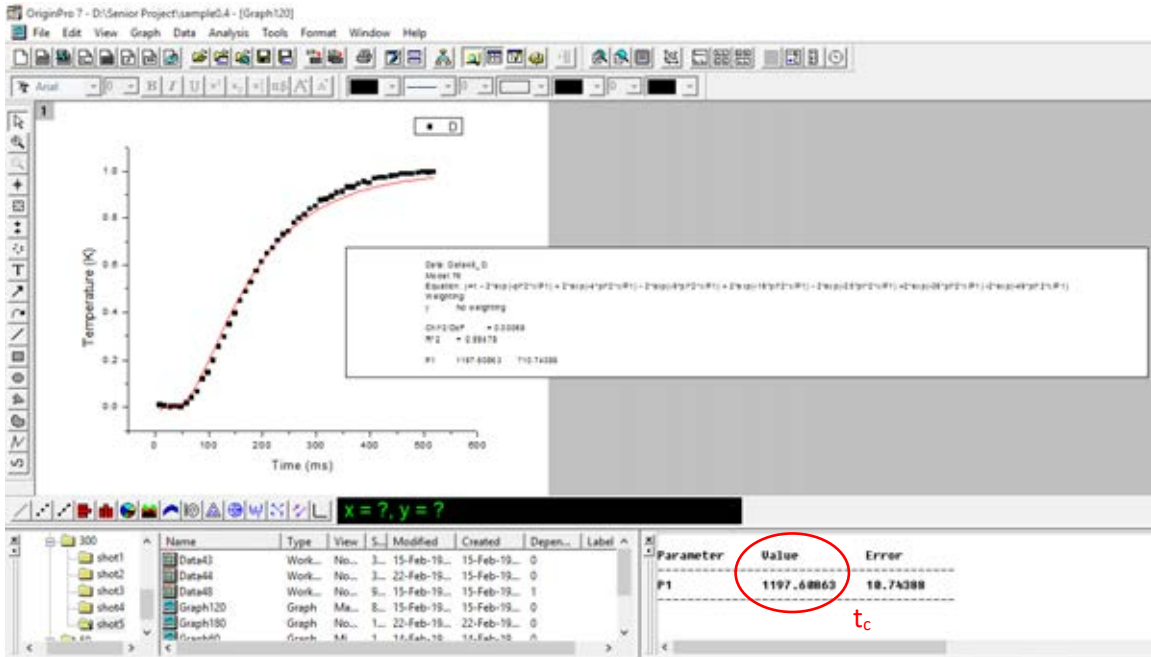


รูปที่ 3.14 ทดลอง fit กราฟกับ ข้อมูลที่สร้างขึ้น

### 3.5.2 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Laser Flash โดยโปรแกรม Origin

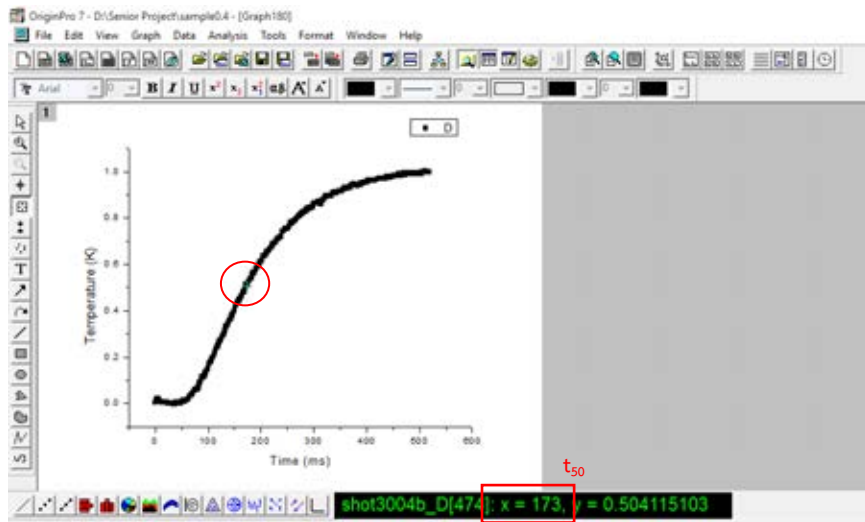
นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลในโปรแกรม origin เพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลโดยจะใช้ไมเทลกราฟเป็นตัว fitting ข้อมูลจากการทดลองละเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

- 1.) ใช้ข้อมูลทุกจุดที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์  $t_c$



รูปที่ 3.15 fitting ข้อมูลทุกจุดด้วยโมเดลกราฟ

2.) ใช้เพียงจุดข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดเพื่อหาค่า พารามิเตอร์  $t_{50}$



รูปที่ 3.16 เลือกจุดข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดเพื่อหาค่า พารามิเตอร์  $t_{50}$

### 3.5.3 คำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนได้ 3 วิธี ดังนี้

1. ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากเครื่อง Laser Flash ( $K_{exp}$ )

คำนวณได้จากโปรแกรม LFA Analysis

- ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้จุดข้อมูลทั้งหมดจากการทดลอง ( $\kappa_{fit}$ )

ใช้ค่า  $t_c$  ในการคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อน ( $\alpha_{fit}$ ) แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนโดยใช้การเปรียบเทียบอัตราส่วน  $\frac{\kappa_{exp}}{\kappa_{fit}} = \frac{\alpha_{exp}}{\alpha_{fit}}$

- ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้การเลือกจุดข้อมูลเพียงจุดเดียว ( $\kappa_{50}$ )

ใช้ค่า  $t_{50}$  ในการคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อน ( $\alpha_{50}$ ) แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนโดยใช้การเปรียบเทียบอัตราส่วน  $\frac{\kappa_{exp}}{\kappa_{50}} = \frac{\alpha_{exp}}{\alpha_{50}}$

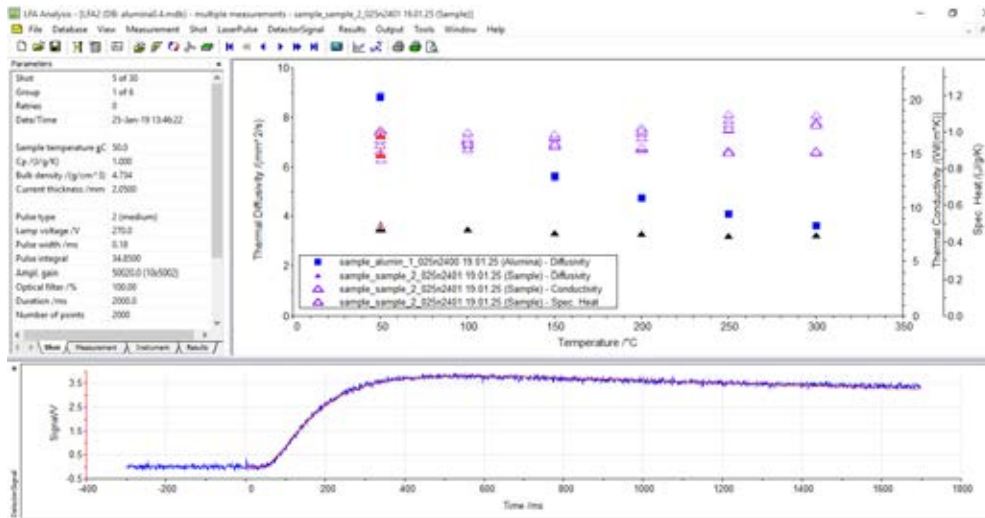


# บทที่ 4

## ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง Laser Flash

จากการทดลองด้วยเครื่อง Laser Flash เมื่อนำมาคำนวณโปรแกรม LFA Analysis ทำให้ทราบค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นงาน โดยทำการหาความจุความร้อน ( $C_p$ ) จากการเปรียบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานที่ทราบค่าความจุความร้อนอยู่แล้ว ซึ่งทำการใส่ลงในเครื่อง Laser Flash พร้อมกับชิ้นงานที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.1 คำนวณค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง

The figure shows a screenshot of an Excel spreadsheet with the following data table:

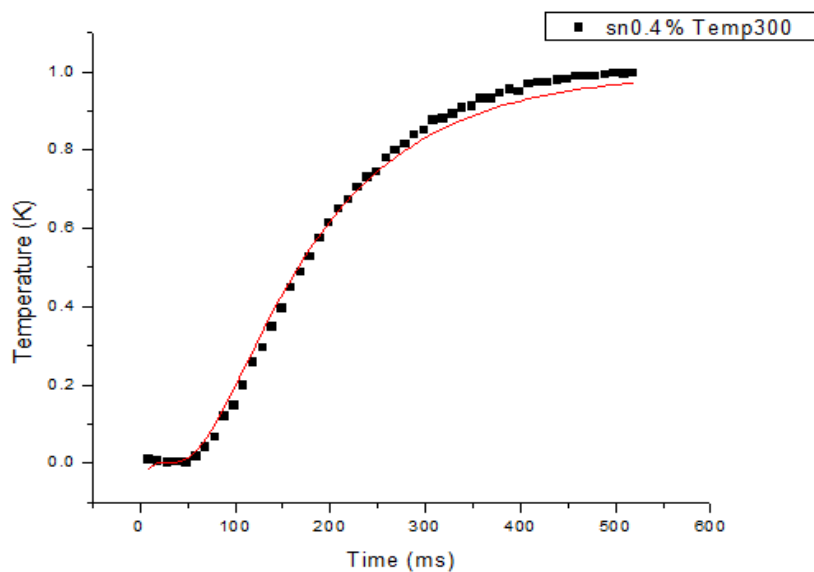
#Results	#Shot_number	Temperature/gC	#Model	#Diffusivity/(	#Conductivity	#Cp/(J/g/K)	#Pulse_type
	1	50.1	Cowan + pc.	3.564	16.873	0.93	2
	2	50	Cowan + pc.	3.59	16.996	0.977	2
	3	50	Cowan + pc.	3.604	17.063	0.942	2
	4	50	Cowan + pc.	3.58	16.946	0.974	2
	5	50	Cowan + pc.	3.602	17.052	0.966	2
#Mean		50		3.588	16.986	0.958	
#Std_Dev		0		0.017	0.079	0.021	
	6	100	Cowan + pc.	3.431	16.241	1.017	2
	7	100	Cowan + pc.	3.416	16.17	1.021	2
	8	100	Cowan + pc.	3.394	16.065	0.963	2
	9	100	Cowan + pc.	3.41	16.145	0.993	2
	10	100	Cowan + pc.	3.401	16.099	1.012	2
#Mean		100		3.41	16.144	1.001	
#Std_Dev		0		0.014	0.068	0.024	
	11	149.9	Cowan + pc.	3.307	15.655	1.019	2
	12	150	Cowan + pc.	3.312	15.681	0.976	2
	13	150.1	Cowan + pc.	3.321	15.72	0.98	2
	14	149.9	Cowan + pc.	3.305	15.645	1.012	2
	15	150.1	Cowan + pc.	3.308	15.66	0.968	2
#Mean		150		3.311	15.672	0.991	
#Std_Dev		0.1		0.006	0.03	0.025	

## 4.2 ผลและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรม Origin

### 4.2.1 ผลและการวิเคราะห์โดยการ fitting กราฟด้วยข้อมูลทุกจุด

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมา fitting ด้วยโมเดลกราฟ โดยทำการเลือกข้อมูลในช่วงที่เหมาะสม....

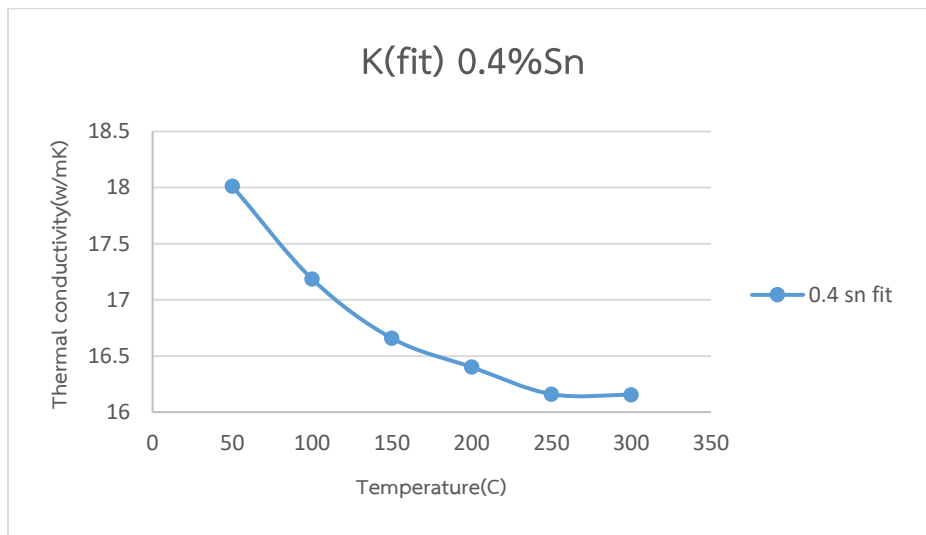
จากนั้นเมื่อทำการ fitting กราฟด้วยข้อมูลทั้งหมดแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์  $t_c$



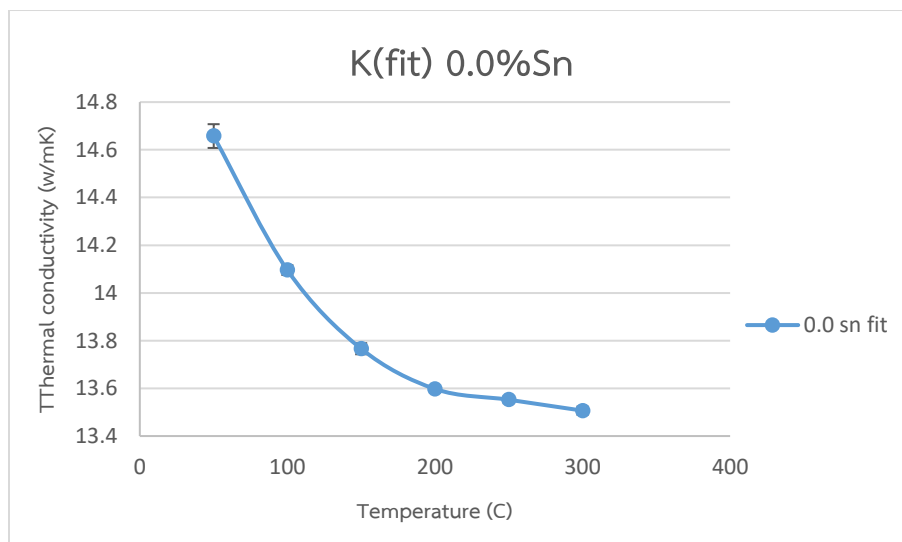
รูปที่ 4.3 fitting จุดข้อมูลจากการทดลองด้วยโมเดลกราฟ

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการ fitting ข้อมูลที่ได้จากการทดลองชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น ที่เจือติดบุกในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และไม่เจือเลย ด้วยโมเดลที่สร้างขึ้นจากสมการทางทฤษฎี(6) จะเห็นว่ากราฟช่วงปลายมีลักษณะไม่ค่อยสอดคล้องกับโมเดลที่ใช้ในการ fit โดยโมเดลมีค่าต่ำกว่ากราฟที่ได้จากการทดลอง ซึ่งกราฟที่ได้จากชิ้นงานทุกชิ้นนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน กล่าวคือ กราฟที่ได้ในช่วงปลายจะมีลักษณะที่ไม่ค่อยสอดคล้องกับโมเดลทางทฤษฎี ซึ่งการที่เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ขึ้น เนื่องจาก ช่วงแกน y ยังไม่ใช่ temp ยังเป็น volt อยู่ ซึ่งยังไม่แน่นอนว่าความสัมพันธ์ระหว่าง temp กับ volt เป็นเส้นตรงจริงหรือไม่ อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเพียงแค่ว่าในช่วงต้นจึงทำให้ช่วงปลายมีลักษณะไม่ค่อยซ้อนทับกัน

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์  $t_c$  นำไปคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ) และนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน ได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่เจือตีบุกร้อยละ 0.4



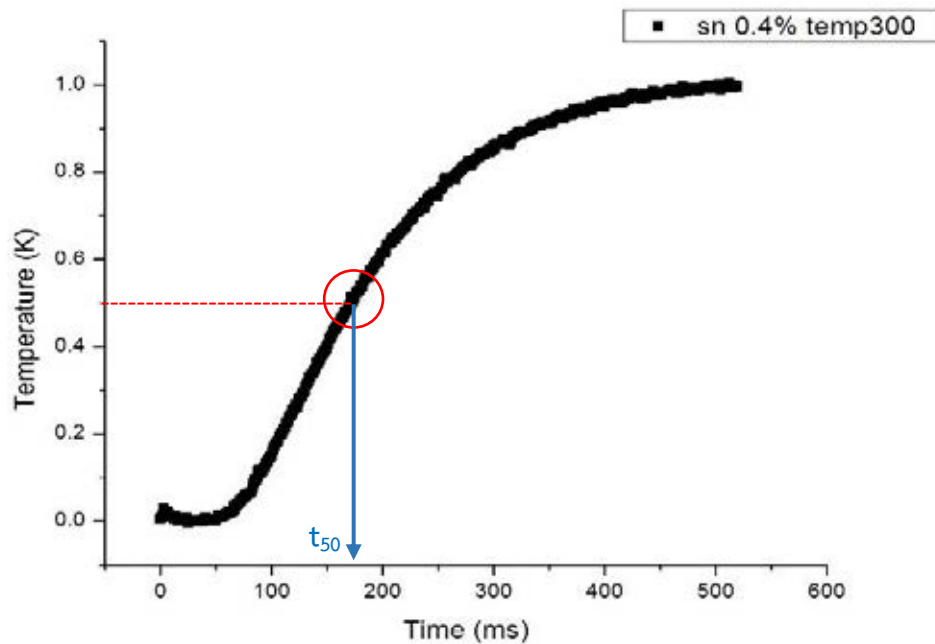
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่ไม่เจือตีบุก

จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและอุณหภูมิ โดยที่มีการเจือตีบุกในปริมาณที่แตกต่างกัน มีแนวโน้มที่คล้ายกันนั่นคือ มีค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสภาพนำความร้อน

จะมีค่าสูงสุดคือ ประมาณ 18 w/mK เมื่อเจือด้วยดีบุกปริมาณ 0.4 โดยอะตอม และมีค่าต่ำสุดคือ ประมาณ 13.5 w/mK เมื่อไม่ได้เจือดีบุกเข้าไปในชั้นสาร

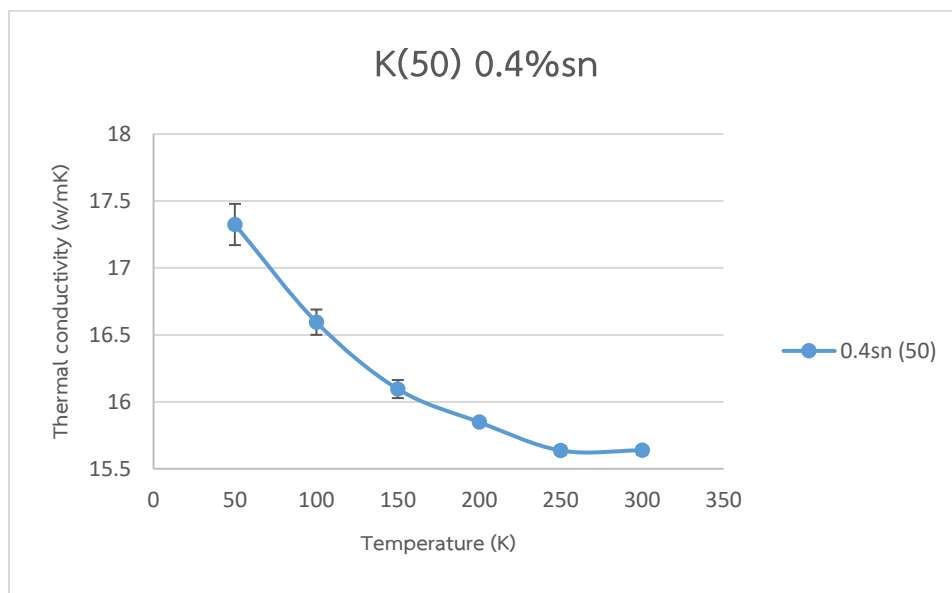
#### 4.2.2 ผลและการวิเคราะห์โดยการ fitting กราฟด้วยการเลือกจุดข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในช่วงที่เหมาะสมมาพล็อตกราฟจากนั้นทำการเลือกจุดข้อมูลที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด จะได้ค่าพารามิเตอร์  $t_{50}$

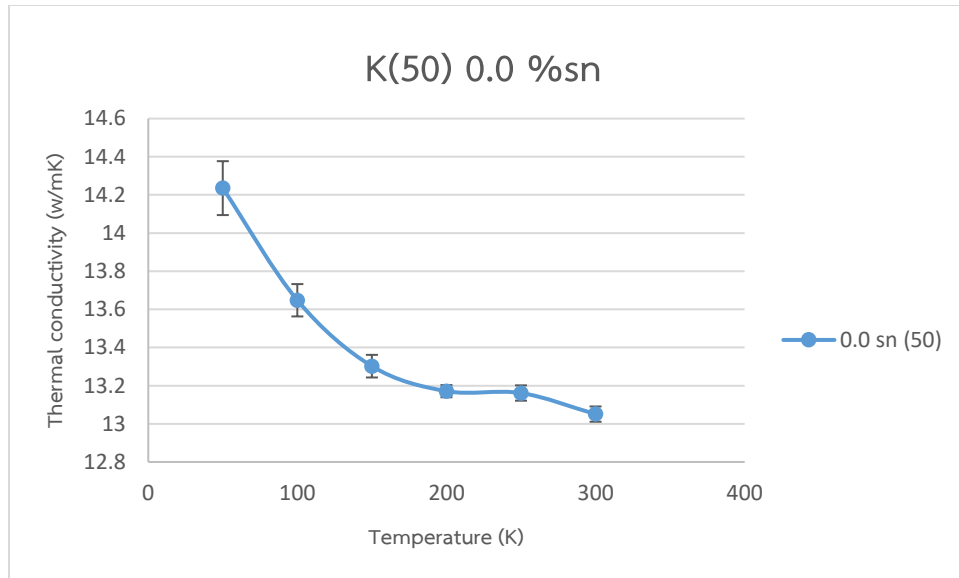


รูปที่ 4.6 เลือกจุดข้อมูลที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด เพื่อดูค่าพารามิเตอร์  $t_{50}$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์  $t_{50}$  นำไปคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ) และนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อน ได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่เจือติบุกร้อยละ 0.4



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่ไม่เจือตีบุก

จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและอุณหภูมิ โดยที่มีการเจือตีบุกในปริมาณที่แตกต่างกัน มีแนวโน้มที่คล้ายกันนั่นคือ มีค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนจะมีค่าสูงสุดคือ ประมาณ 17 w/mK เมื่อเจือด้วยตีบุกปริมาณ 0.4 โดยอะตอม และมีค่าต่ำสุดคือ ประมาณ 13 w/mK เมื่อไม่ได้เจือตีบุกลงไปในพื้นที่นั้น

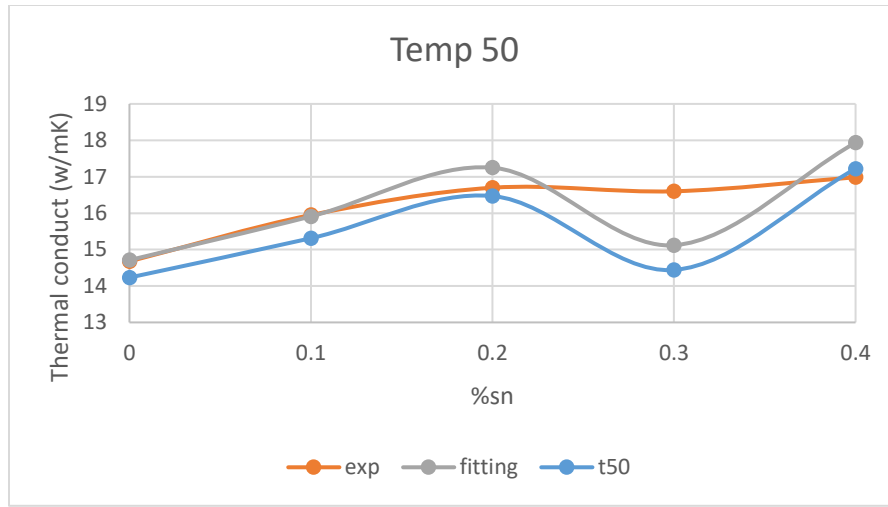
### 4.3 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อน

#### 4.3.1 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนทั้ง 3 วิธี

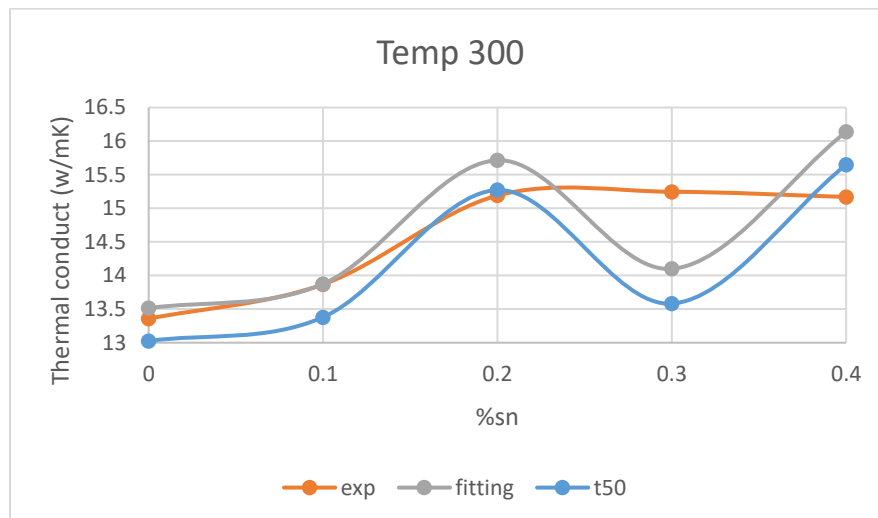
จากการใช้โปรแกรม Origin เพื่อวิเคราะห์การหาค่าสภาพนำความร้อน ทั้งสองวิธี คือ

1. เลือกใช้จุดข้อมูลทุกจุด (fitting)
2. เลือกใช้จุดข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด  $t_{50}$

และเมื่อนำทั้งสองวิธีนี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากเครื่อง Laser Flash โดยนำไปเขียนในรูปแบบของกราฟ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและปริมาณของตีบุกที่เจือเข้าไป โดยกราฟที่แต่ละอุณหภูมิ (50, 100, 150, 200, 250 และ 300 °C) มีลักษณะเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็น ได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณดีบุก ที่อุณหภูมิ 50 °C

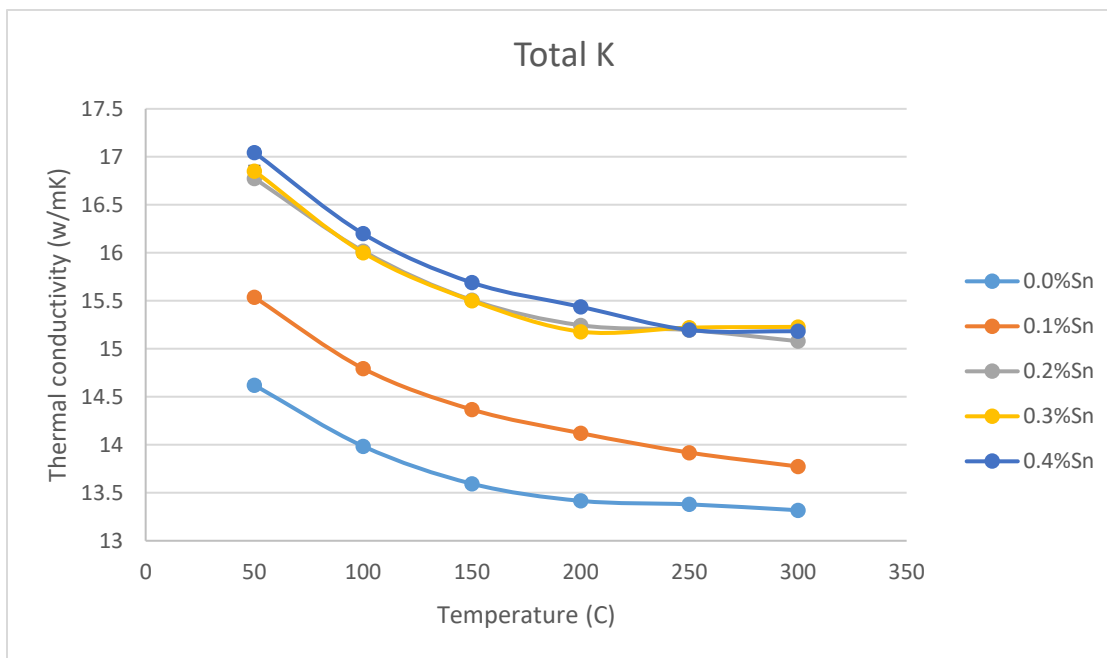


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณดีบุก ที่อุณหภูมิ 300 °C

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันที่สังเกตเห็นได้โดยชัดเจนเลย คือ กราฟที่ได้จากการ fitting จุดข้อมูลทั้งหมดและกราฟที่ได้จากการเลือกจุดที่ข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปทีครั้งหนึ่งของค่าสูงสุด  $t_{50}$  กราฟทั้งสองนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณดีบุกที่เจอเข้าไป ส่วนกราฟที่ได้จากการทดลองมีลักษณะที่แตกต่างออกไป แต่ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยกราฟที่แต่ละอุณหภูมิ (50, 100, 150, 200, 250 และ 300 °C) มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่สังเกตได้คือ ค่าสภาพนำความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มมากขึ้น

#### 4.3.2 ผลและการวิเคราะห์ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองด้วยเครื่อง Laser Flash

จากการทดลองได้ทำการทดลองด้วยชิ้นสาร 5 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นมีการเจือตีบุกในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ เจือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และไม่เจือเลย โดยที่ทำการทดลองทั้งสองด้านของชิ้นสาร ซึ่งผลการทดลองของทั้งสองด้าน นั้นมีค่าใกล้เคียงกันจึงนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์ผล ค่าสภาพนำความร้อนของสารแต่ละชิ้น แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่แต่ละปริมาณตีบุกที่เจือ

จากรูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและอุณหภูมิ จะเห็นว่าค่าสภาพนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่า  $K$  ที่ได้มีค่าสูง อาจเป็นเพราะว่า สารที่ใช้ในการทดลองเป็นสารประเภทโลหะมีเฟสเป็น  $\alpha$  เยอะ เลยนำความร้อนได้ดีกว่า เปรียบเทียบกับเปเปอร์อื่นๆ ดังตาราง

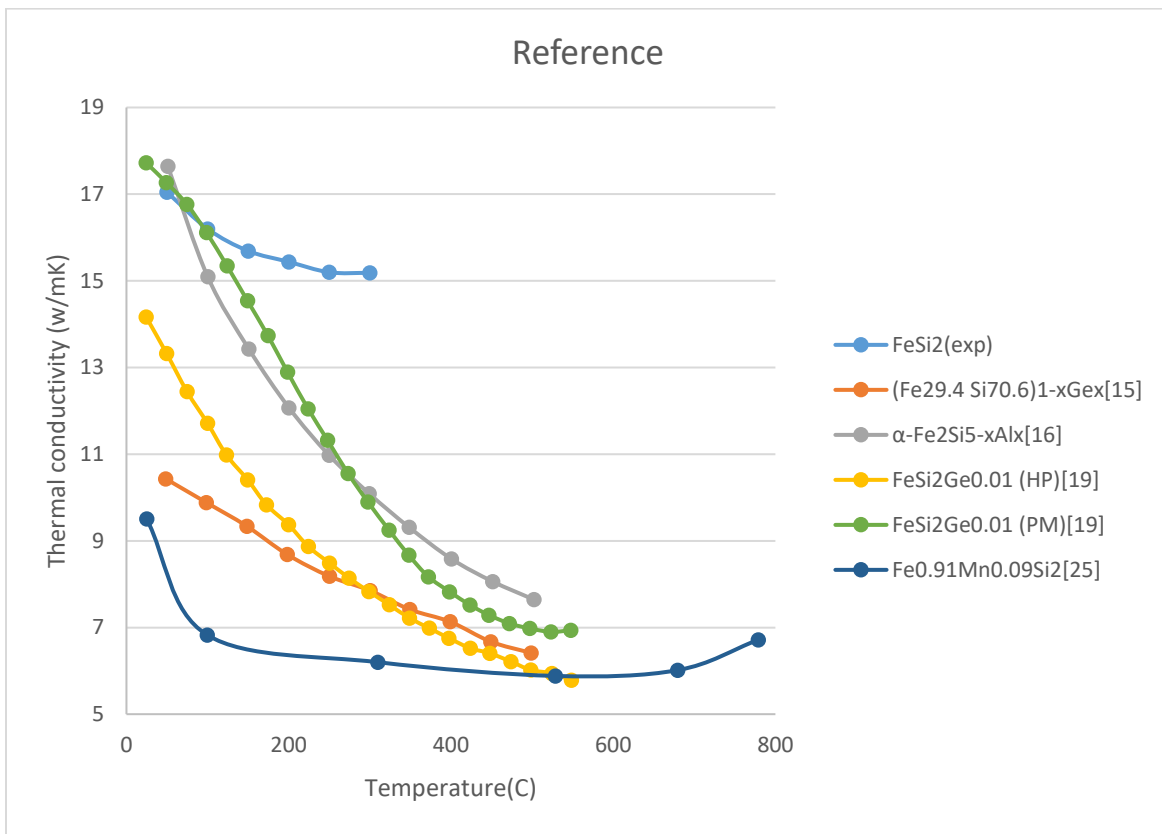
ตารางที่ 4.1

สาร	วิธีที่ใช้	$K$ (w/mK)	อ้างอิง
$(\text{Fe}_{29.4}\text{Si}_{70.6})_{1-x}\text{Ge}_x$	Spark Plasma Sintering (300-800 K)	10.5-7	[15]



$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> Si <sub>5-x</sub> Al <sub>x</sub>	Arc melted and Hot pressed (300-773 K)	17.57 - 7.55 (non-doped)	[16]
Fe <sub>28.91</sub> Co <sub>0.59</sub> Si <sub>70.5-x</sub> P <sub>x</sub>	Powder mixtures and sintered at 1000 °C (200-800 °C)	7.4 - 5.5 (non-doped)	[17]
Fe <sub>0.98</sub> Co <sub>0.02</sub> Si <sub>2</sub>	Hot pressing (HP) and Spark plasma sintering (SPS) (300-1100 K)	2.73 (SPS)	[18]
FeSi <sub>2</sub> Ge <sub>0.01</sub>	Field-activated and pressure- assisted synthesis (FAPAS) (300-725 K)	17.8-7.5 (PM) 14-6 (HP) 3-4 (FAPAS)	[19]
Fe <sub>0.98</sub> Co <sub>0.02</sub> Si <sub>2</sub> sintered with Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mechanical alloying (300-1100 K)	5-6 (non-doped)	[20]
SiGe	Spark plasma sintering (900 °C)	2.1	[21]
Fe <sub>1-x</sub> M <sub>x</sub> Si <sub>2</sub> doped with Ti, Nb and Zr	Hot-pressed (300-1100 K)	12.4-7.3 (non-doped) 10-7 (doped Ti) 9-6 (doped Nb) 11-9 (doped Zr)	[22]
Fe <sub>0.95</sub> Co <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>	Hot-pressing and annealing processing (923 K)	4.5	[23]
Fe <sub>0.95</sub> Co <sub>0.05</sub> Si <sub>1.958</sub> Ge <sub>0.042</sub>	Powder metallurgy technique (845 K)	16-9 (non-doped) 4-5 (doped Ge)	[24]
Fe <sub>0.91</sub> Mn <sub>0.09</sub> Si <sub>2</sub>	Hot pressing (HP) and Spark plasma sintering (SPS) (300-1100 K)	9.7-6.8 (HP) 7.7-6 (SPS)	[25]
Fe <sub>0.98</sub> Co <sub>0.02</sub> Si <sub>2</sub>	High energy ball milling (HEBM) and annealing (0-800 K)	4.4-5.5 (non-doped)	[26]

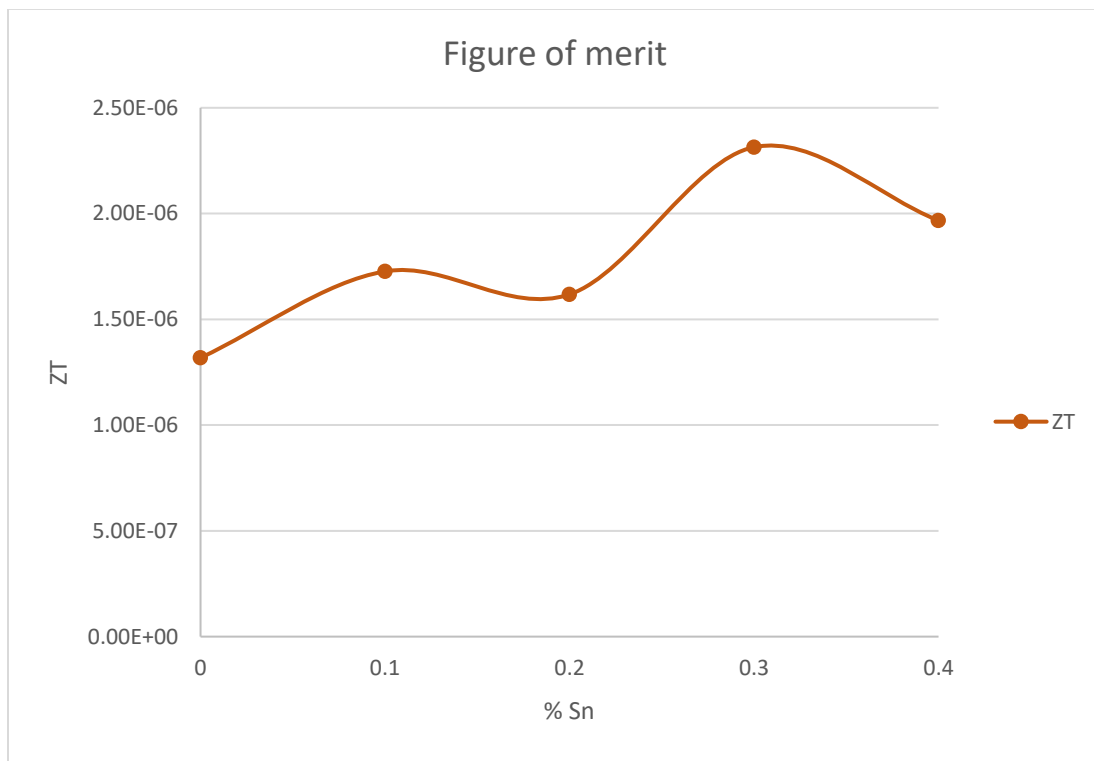
จากตาราง 4.1 จะเห็นว่าการเตรียมชิ้นงานด้วยชนิดของสารและวิธีการเตรียมมีแตกต่างกันออกไปแต่แตกต่างกันแค่เพียงชนิดของสารที่เจอเข้าไปเท่านั้น โดยสังเกตเห็นว่าค่าสภาพนำความร้อนในบางงานวิจัยนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง จึงได้ทำการสร้างกราฟโดยรวมค่าสภาพนำความร้อนของแต่ละงานวิจัยให้อยู่ในกราฟเดียวกันเพื่อวิเคราะห์ผลและดูแนวโน้มของค่าสภาพนำความร้อนที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สร้างกราฟได้ดังรูป



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อนำกราฟค่าสภาพนำความร้อนของชิ้นสาร ( $\text{FeSi}_2\text{-0.4\%Sn}$ ) ที่ได้จากการทดลอง มาพล็อตกราฟเทียบกับค่าสภาพนำความร้อนของสาร  $\text{FeSi}_2$  โดยมีการเจือสารที่ต่างกันออกไป จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเหมือนกัน กล่าวคือ ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่าค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลองของเรานั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากชิ้นงานของเราไม่ได้ผ่านการอบ จึงทำให้มีเฟส  $\alpha$  ค่อนข้างมาก จึงทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี

ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุนั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งถ้าหากในวัสดุใดมีค่าสภาพนำความร้อนสูงหมายถึงวัสดุนั้นมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่ในทางกลับกันในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นต้องการให้ค่าสภาพนำความร้อนนั้นมีค่าต่ำๆ จึงจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดี โดยการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นสามารถคำนวณได้จากค่า Figure of merit โดยใช้ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง และค่าความต้านทานไฟฟ้า กับสัมประสิทธิ์ซีเบค จากงานวิจัยของนางสาววินัส[ ] โดยคำนวณออกมาได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุกับปริมาณดีบุกที่เจือ

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ นั้น มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่เจือเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกดีมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยเครื่อง Laser Flash พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้มีค่าประมาณ 18 w/mK ที่อุณหภูมิ 50 °C และมีค่า ลดลงเหลือประมาณ 13 w/mK เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300 °C และเมื่อทำการหาค่าสภาพนำความร้อนเพื่อเปรียบเทียบโดยการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Origin โดยได้ทำการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ 1.เลือกใช้จุดข้อมูลทั้งหมด และ 2.เลือกใช้จุดที่ข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปทีครั้งหนึ่งของค่าสูงสุด พบว่า ทั้งสองวิธีนี้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและปริมาณดีบุกที่เจือเข้าไปมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ค่าสภาพนำความร้อนของวิธีที่ 1 ที่เลือกใช้จุดข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด จะมีค่าสูงกว่า วิธีที่ 2 ที่เลือกใช้เพียงจุดที่ข้อมูลเวลาที่สัญญาณขึ้นไปทีครั้งหนึ่งของค่าสูงสุดเสมอ เนื่องจากการที่เลือก ใช้จุดข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองนั้น ทำให้เกิดความแม่นยำในการคำนวณมากกว่าการเลือกใช้จุดข้อมูล ที่น้อยกว่า จึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่ามากกว่า และเมื่อนำค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปเปรียบเทียบกับค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Laser Flash พบว่าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของดีบุกที่เจือเข้าไป เช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนคือ ค่าสภาพนำความร้อนที่มีค่าค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อทำการค้นคว้างานวิจัยอื่นๆเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพบว่า ผลของงานวิจัยอื่น มีค่าสภาพนำความร้อนที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ค่าสภาพนำความร้อนของงานวิจัยอื่นจะมีค่าต่ำกว่าค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลองเนื่องจากในงานวิจัยอื่นได้ทำการอบเพื่อทำให้เฟส  $\alpha$  ที่มีผลต่อการนำความร้อน หายไป จึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของงานวิจัยอื่นมีค่าน้อย ซึ่งชิ้นงานที่ผู้ทดลองใช้ทดลองในงานวิจัยนั้นไม่ได้ผ่านการอบ จึงทำให้ยังคงมีเฟส  $\alpha$  เหลืออยู่ค่อนข้างเยอะ ส่งผลทำให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูง ทั้งนี้หากจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์นั้น จะต้องคำนึงถึงค่า figure of merit ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยยังมีค่ามากแสดงว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Thermoelectric [Online]. Available from: <https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/high-power/> [15,October,2018]
- [2] Thermoelectric generator [Online]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator) [15,October,2018]
- [3] Somchai Kiatgamolchai et al, “The effects of elements with different melting points on  $\epsilon$ -FeSi size in FeSi<sub>2</sub> alloy,” Journal Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University. [11 January 2016]
- [4] Thermoelectric cooler [Online]. Available from: <https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/high-power> [20,March,2019]
- [5] Thermoelectric generator [Online]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator) [20,March,2019]
- [6] Thermoelectric module [Online]. Available from: <http://www.kryotherm.ru> [20,March,2019]
- [7] 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,March,2019]
- [8] Thermoelectric cooling [Online]. Available from: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref02/> [20,March,2019]
- [9] Phase diagram [online]. Available from: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Fe-Si.php> [7 may 2015]

- [10] 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) [15,October,2018]
- [11] Thermal conductivity measurement [Online].Available from:  
<http://www.eic.co.th/Portals/4//Thermal%20conductivity%20measurement.pdf>  
[15,October,2019]
- [12] F. Cernuschi<sup>1</sup>, P.G. Bison<sup>2</sup>, S. Marinetti<sup>2</sup>, “Comparison of thermal diffusivity measurement techniques,” J. Appl. Phys. (1967)
- [13] W.P. PARKER, R.J. JENKINS, C. P. BUTTLER and G.L. ABBOTT, J. Appl. Phys., 32, pp.1679, (1961).
- [14] F. CERNUSCHI, A. FIGARI, L. FABBRI, Journal of Materials Science 35, (2000), 5891-5897.
- [15] Naiming Liu et al, “Tunable  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> – Si<sub>1-y</sub>Ge<sub>y</sub> nanocomposites by a novel React/Transform Spark Plasma Sintering approach for thermoelectric applications,” Materials Today Physics 4 (2018): 19-27.
- [16] P.Rajasekar and Arun M. Umarji, “Effect of Al-doping on suppression of thermal conductivity in Si dispersed  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>,” Intermetallics 89 (June 2017): 57-64.
- [17] Farah Liana Binti Mohd Redzuan, Mikio Ito and Masatoshi Takeda, “Phosphorus doping in n-type  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si composites and its effects on thermoelectric properties,” Intermetallics 108 (February 2019): 19-24.
- [18] Xiurong Qu, Shuchen Lu, Jianmin Hu and Qingyu Meng, “Microstructure and thermoelectric properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> ceramics fabricated by hot-pressing and spark plasma sintering,” Journal of Alloys and Compounds 509 (August 2011): 10217-10221.

- [19] Q.S.Meng, W.H.Fan, R.X.Chen and Z.A.Munir, "Thermoelectric properties of nanostructured FeSi<sub>2</sub> prepared by field-activated and pressure-assisted reactive sintering," Journal of Alloys and Compounds 492 (2010): 303-306.
- [20] Mikio Ito, Tomoyuki Tada and Shigeta Hara, "Thermoelectric properties of hot-pressed  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> with yttria dispersion by mechanical alloying," Journal of Alloys and Compounds 408-412 (2006): 363-367.
- [21] Avinash Vishwakarma et al, "Facile synthesis of nanostructured n-type SiGe alloys with enhanced thermoelectric performance using rapid solidification employing melt spinning followed by spark plasma sintering," Current Applied Physics 18 (2018): 1540-1545.
- [22] Mikio Ito et al, "Effects of Ti, Nb and Zr doping on thermoelectric performance of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>," Journal of Alloys and Compounds 315 (2001): 251-258.
- [23] Zeming He et al, "Thermoelectric properties of hot-pressed Al- and Co-doped iron disilicide materials," Journal of Alloys and Compounds 438 (2007): 303-309.
- [24] S.W.Kim et al, "High temperature thermoelectric properties of p- and n-type  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> with some dopants," Intermetallics 11 (2003): 399-405.
- [25] K.Nogi and T.Kita, "Rapid production of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> by spark plasma sintering," Journal of materials science 35 (2000): 5845-5849.
- [26] Xiurong Qu et al, "Growth mechanism and thermoelectric properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> matrix with Si nanowires," Materials Science and Engineering B 176(2011): 1291-1296.