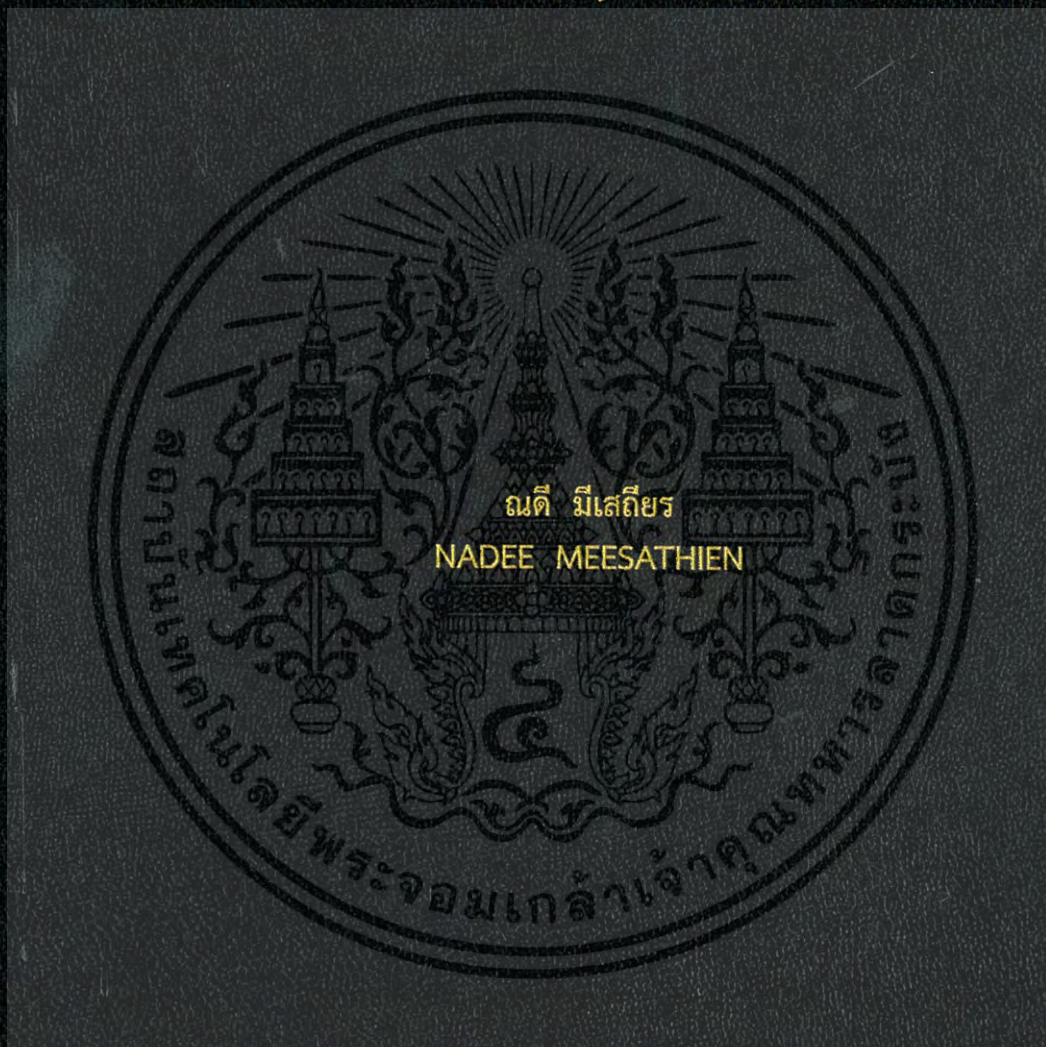


การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติ  
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND ZINC OXIDE NANO-PARTICLES  
ON PROPERTIES OF SAC0307-xIn-yZnO LEAD-FREE SOLDER PASTE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-217-012

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติ  
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND ZINC OXIDE NANO-PARTICLES  
ON PROPERTIES OF SAC0307-xIn-yZnO LEAD-FREE SOLDER PASTE



เลขที่... 148766  
เลขทะเบียน...  
ชั้นเดือนปี 23 พ.ค. 2560

b. 00267065  
l. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-217-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON INFLUENCE OF INDIUM AND ZINC OXIDE NANO-PARTICLES  
ON PROPERTIES OF SAC0307-xIn-yZnO LEAD-FREE SOLDER PASTE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017  
KMITL-2017-EN-M-217-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะ  
บัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO  
Thesis Title A Study on Influence of Indium and Zinc Oxide Nano-Particles on Properties  
of SAC0307-xIn-yZnO Lead-Free Solder Paste  
นักศึกษา นางสาวณดี มีเสถียร  
รหัสประจำตัว 58601278  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-217-012

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบบุญ	หล่อทองคำ	กอบบุญ
ผศ.ดร.วินัดดา	วงศ์วิริยะพันธ์	วินัดดา
ดร.นิรันดร์	พิสุทธอานนท์	26 นิรันดร์
ดร.จิตราภรณ์	วงศ์งาม	จิตราภรณ์
รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	กรรณชัย

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปเผยแพร่ภายนอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO
นักศึกษา	นางสาวณดี มีเสถียร
รหัสประจำตัว	58601278
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของอินเดียม (In) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO กับแผ่นรองทองแดง จากผลการทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลวพบว่า ระดับการเติมที่สูงขึ้นของอนุภาคนาโน ZnO ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรี ในขณะที่อุณหภูมิ Liquidus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการเติม In พบว่าช่วยให้อุณหภูมิ Solidus อุณหภูมิ Liquidus และช่วงการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี มีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับในการทดสอบความสามารถในการเปียกพบว่า การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนส่งผลให้การกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในทุกเงื่อนไข นั่นคือ ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนประกอบการกระจายตัวมีค่าสูงขึ้น โดยค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามหากมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป สามารถทำให้ค่าความสามารถในการเปียกมีแนวโน้มที่ลดลงได้เช่นกัน ในด้านความสามารถในการพิมพ์พบว่า ระดับการเติมของ In ที่สูงขึ้น และอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนไม่เกิน 0.5 wt% ให้ค่าความสามารถในการพิมพ์บนแผ่นรองทองแดงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในเรื่องของ การหลุดตัวของโลหะบัดกรีพบว่า การหลุดตัวที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าการหลุดตัวที่อุณหภูมิต่ำ และในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์พบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นรอยต่อเป็นเฟส  $Cu_6Sn_5$  รวมทั้งยังมีเฟส  $Cu_6(Sn, In)_5$  เกิดขึ้นในเงื่อนไขที่มีการเติม In ด้วย ทั้งนี้พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO และ In ในสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านต่างๆ สามารถพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบครีมจากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 ได้ โดยพบว่าโลหะบัดกรี SAC0307-0.1In-0.25ZnO หรือ SAC0307-0.1In-0.5ZnO เป็นโลหะบัดกรีที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	A Study on Influence of Indium and Zinc Oxide Nano-Particles on Properties of SAC0307-xIn-yZnO Lead-Free Solder Paste
Student	Ms. Nadee Meesathien
Student ID.	58601278
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

This thesis was aimed to study the influence of indium (In) and zinc oxide (ZnO) nano-particles on the melting temperatures, wettability, printability, slump and interfacial microstructure of SAC0307-xIn-yZnO lead-free solder paste on copper substrate. The findings indicated that the addition of ZnO had no effect on the solidus temperature, while it slightly changed the liquidus temperature. With the introduction of In, the solidus temperature, the liquidus temperature, and the pasty range were clearly decreased. In spread test, the addition of ZnO and In improved the solder's wettability in all cases. The wettabilities in terms of spread factor ( $S_f$ ) and spread ratio ( $S_r$ ) were increased and contact angle was decreased. However, excessive addition of ZnO beyond 0.5 wt% could degrade the wettability of the solder on copper substrate. With the addition of ZnO no more than 0.5 wt%, the printability of the solder on copper substrate was increased with the increase of In particles. It was found that the average slump on copper substrate was much higher at high temperature than that of low temperature. After reflow soldering, either  $Cu_6Sn_5$  or  $Cu_6(Sn,In)_5$  intermetallic compound was found at the interface of solder/copper substrate depending on the solder's composition. Optimal amount of In and ZnO could reduce the thickness of intermetallic layer. In conclusion, based on the tested properties, SAC0307-0.1In-0.25ZnO or SAC0307-0.1In-0.5ZnO was the best solder paste found in this research.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้นั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นผู้มอบโอกาส ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ สอนให้รู้จักวิธีการแก้ปัญหา รวมถึงคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านของวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณ พี่ๆทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท อัลมิต ประเทศไทย จำกัด (ALMIT (THAILAND) CO., LTD.) ที่ให้การสนับสนุนโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307 เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนสำหรับความช่วยเหลือในงานวิจัย ทั้งการให้คำแนะนำ แสดงความคิดเห็น แลกเปลี่ยนประสบการณ์ ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจที่ตีเสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจอันอบอุ่น จากครอบครัว มีเสถียร ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการให้แก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

ณดี มีเสถียร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1.1 อุดมภูมิจุดหลอมเหลว.....	5
2.1.2 ความสามารถในการเปียก.....	6
2.1.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว .....	9
2.1.4 โครงสร้างจุลภาค .....	10
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.1 การบัดกรี.....	12
2.2.2 โลหะขึ้นงาน .....	12
2.2.3 โลหะบัดกรี .....	13
2.2.3.1 โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง.....	17
2.2.4 วัสดุเชิงประกอบ.....	19
2.2.5 การเลือกใช้อุณหภูมิในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....	20
2.2.5.1 อนุภาคนาโนเชิงค้อกไซด์.....	21
2.2.5.2 อนุภาคคอลลอยด์.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5.3 การเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน .....	23
2.2.6 วิธีการบัดกรี .....	24
2.2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี .....	26
2.2.7.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน .....	26
2.2.7.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง .....	27
2.2.7.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง .....	28
2.2.7.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง .....	29
2.2.8 เครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติ .....	31
2.2.8.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน .....	31
2.2.8.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	32
2.2.8.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง .....	34
2.2.8.4 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer .....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	36
3.1 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน .....	37
3.1.1 โลหะบัดกรี SAC0307 .....	37
3.1.2 อินเดียม .....	39
3.1.3 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ .....	40
3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน .....	42
3.3 การเตรียมโลหะชิ้นงานสำหรับการบัดกรี .....	43
3.4 ขั้นตอนการทดสอบ .....	43
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติ .....	46
3.5.1 จุดหลอมเหลว .....	46
3.5.2 ความสามารถในการเปียก .....	46
3.5.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว .....	48
3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี .....	50
3.5.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดย ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา V จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบ	
ทางเคมี.....	52
3.5.4.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	52
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
4.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว.....	54
4.2 ความสามารถในการเปียก.....	57
4.2.1 การกระจายตัว.....	57
4.2.2 มุมสัมผัส.....	63
4.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว.....	69
4.3.1 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี.....	69
4.3.2 การหลุดตัวของโลหะบัดกรี.....	75
4.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	100
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	114
ภาคผนวก ข. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี.....	122
ภาคผนวก ค. ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว.....	142
ภาคผนวก ง. ค่าทดสอบความสามารถในการกระจายตัว.....	153
ภาคผนวก จ. การวัดพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	160
ภาคผนวก ฉ. ค่าทดสอบความสามารถในการพิมพ์.....	162
ภาคผนวก ช. ค่าทดสอบการหลุดตัวของโลหะบัดกรี.....	166
ภาคผนวก ซ. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย FE-SEM.....	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VLSI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ. ปริมาณธาตุผสมในโลหะบัดกรี.....	191
ประวัติผู้เขียน.....	212



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	13
2.2 สมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรี.....	14
2.3 สมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว.....	15
2.4 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว.....	15
2.5 ข้อเด่น-ด้อยของธาตุเจือที่นิยมใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรี ไร้สารตะกั่ว.....	16
2.6 การรวมตัวกันของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละเฟส.....	19
2.7 สมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	21
2.8 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน.....	26
2.9 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง.....	27
2.10 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง.....	29
3.1 สมบัติพื้นฐานของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307.....	38
3.2 สมบัติพื้นฐานของผงโลหะอินเดียม.....	39
3.3 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	41
4.1 อุณหภูมิโซลิดัส-ลิกวิดัสและช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลว.....	56
4.2 ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัว.....	63
4.3 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี.....	64
4.4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่ามุมสัมผัส.....	67
4.5 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่ามุมสัมผัส.....	68
4.6 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการพิมพ์เฉลี่ยของโลหะบัดกรีแบบครีม.....	73
4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่าการพิมพ์.....	74
4.8 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่าการพิมพ์.....	75
4.9 ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี.....	82
4.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่าการทรุดตัวของ โลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25°C.....	84
4.11 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่าการทรุดตัว ของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25°C.....	84
4.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่าการทรุดตัวของ โลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่าการทรุดตัว ของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C .....	87
4.14 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .....	94
4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	98
4.16 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	98



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาคคอลลอยด์ .....	24
2.2 การบัดกรีแบบคลื่น.....	24
2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ .....	25
2.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน .....	26
2.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง.....	27
2.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง .....	28
2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง.....	29
2.8 ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง .....	30
2.9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC .....	31
2.10 แผนภาพเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC.....	32
2.11 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	33
2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	33
2.13 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง .....	34
2.14 แบบจำลองอะตอมของโบร์ .....	35
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน .....	36
3.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307.....	37
3.3 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วพื้นฐานแบบครีม SAC0307 .....	38
3.4 ผงโลหะอินเดียมบริสุทธิ์ 99.99%.....	39
3.5 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	40
3.6 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน ZnO .....	40
3.7 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	42
3.8 แผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ 99.99%.....	43
3.9 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3 .....	43
3.10 เต้าอบรีโฟลว์.....	44
3.11 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการรีโฟลว์ตามมาตรฐาน J-STD-020 .....	44
3.12 ชิ้นงานตัวอย่างหลังการบัดกรี .....	45
3.13 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DSC).....	46
3.14 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี .....	47
3.15 มุมสัมผัสบนแผ่นรองทองแดง.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ลักษณะการแผ่กระจายของชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านข้าง.....	48
3.17 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม.....	49
3.18 ตู้อบลมร้อน.....	49
3.19 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง.....	50
3.20 เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด.....	51
3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM).....	51
3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (FESEM) และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS).....	52
3.23 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	53
4.1 อุณหภูมิโซลิตัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%).....	54
4.2 อุณหภูมิโซลิตัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%).....	55
4.3 อุณหภูมิโซลิตัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน SAC0307-xIn- yZnO ทุกเงื่อนไข.....	56
4.4 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัว (n) – (ข) ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%).....	59
4.5 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัว (n) – (ข) ของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%).....	61
4.6 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว ( $S_f$ ) และอัตราส่วนการกระจายตัว ( $S_r$ ) (n) – (ข) ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน SAC0307-xIn-yZnO ทุกเงื่อนไข.....	62
4.7 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%).....	65
4.8 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%).....	65
4.9 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	66
4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่ามุมสัมผัส.....	67
4.11 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการทดสอบการกระจายตัว.....	68
4.12 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง.....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ $1.0 \text{ wt}\%$ ).....	70
4.14 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307-yZnO ลงบนแผ่นรองทองแดง.....	70
4.15 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$ และ $0.5 \text{ wt}\%$ ).....	71
4.16 ขนาดและรูปร่างของอินเดียม.....	72
4.17 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	72
4.18 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าความสามารถในการพิมพ์.....	74
4.19 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีพื้นฐานแบบครีม SAC0307.....	76
4.20 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ $1.0 \text{ wt}\%$ ) ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ .....	77
4.21 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ (ก) – (จ).....	77
4.22 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ $1.0 \text{ wt}\%$ ) ที่อุณหภูมิ $150^{\circ}\text{C}$ .....	78
4.23 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ $150^{\circ}\text{C}$ (ก) – (ง) ตามลำดับ.....	79
4.24 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแบบครีม (ก) – (ง).....	79
4.25 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$ และ $0.5 \text{ wt}\%$ ) ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ .....	80
4.26 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$ และ $0.5 \text{ wt}\%$ ) ที่อุณหภูมิ $150^{\circ}\text{C}$ .....	81
4.27 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบแบบครีม (ก) – (ค).....	81
4.28 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ .....	82
4.29 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ .....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่อุณหภูมิ 150°C.....	85
4.31 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าการทรุดตัว ของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C .....	86
4.32 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี SAC0307.....	88
4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของ SAC0307 บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> .....	89
4.34 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี SAC0307-0.3In-0.75ZnO.....	89
4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของ SAC0307-0.3In-0.75ZnO บริเวณชั้น สารประกอบเชิงโลหะ Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> .....	90
4.36 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 และแผ่นรองทองแดง.....	91
4.37 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307-yZnO (y ≤ 0.25 wt%) และแผ่นรองทองแดง .....	91
4.38 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307-yZnO (y > 0.25 wt%) และแผ่นรองทองแดง .....	92
4.39 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%).....	92
4.40 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%).....	93
4.41 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเฉลี่ยหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	93
4.42 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> (ก) – (ค) .....	96
4.43 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าความหนา ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	97

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกต่างมีความจำเป็นต้องปรับตัวในการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) เข้ามาใช้งานทดแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่เป็นโลหะผสม (Alloy) ระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb solders) หลังจากที่หลายประเทศได้มีการตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว จนนำไปสู่การออกข้อบังคับเพื่อควบคุมการใช้สารพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น สำหรับข้อบังคับที่สำคัญ คือ ข้อบังคับ RoHS (Restriction of use of certain Hazardous Substance in electrical and electronic equipment) ซึ่งออกโดยสหภาพยุโรป โดยสารพิษที่ถูกควบคุมหนึ่งในนั้นก็คือ ตะกั่ว (Pb) [1] ทำให้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วหลายกลุ่มถูกพัฒนาขึ้นในเวลาต่อมา เช่น กลุ่ม Sn-Ag กลุ่ม Sn-Cu และกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) เป็นต้น โดยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม SAC เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมกับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การบัดกรีด้วยวิธี Wave Soldering หรือ Reflow soldering โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะบัดกรี SAC305 (Sn-3.0Ag-0.5Cu) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง [2] แต่ก็ยังคงมีข้อด้อยอยู่หลายประการเช่นกัน คือ มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ในช่วง 217-221°C ในขณะที่โลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมมีจุดหลอมเหลวเพียง 183°C โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือแผ่นวงจรพิมพ์มีโอกาสเกิดความเสียหายได้ง่าย และจำเป็นต้องใช้พลังงานในการผลิตเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [2, 3] และจากการที่โลหะบัดกรี SAC305 มีส่วนประกอบของธาตุเงิน (Ag) ในปริมาณสูงกว่า 3% โดยน้ำหนัก ทำให้มีความหนาของแผ่นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ชนิด  $Ag_3Sn$  ในเนื้อโลหะบัดกรีมาก อันเป็นสาเหตุของการเปราะของรอยบัดกรี ซึ่งหากรอยบัดกรีได้รับความเค้นมากๆจะทำให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าวของรอยบัดกรีมากขึ้นตามไปด้วย [4-7] ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาโลหะบัดกรี SAC อีกกลุ่มขึ้นมา คือ กลุ่ม SAC ที่มีธาตุเงินต่ำอย่าง SAC0307 (Sn-0.3Ag-0.7Cu) ขึ้น ปริมาณของ Ag ที่ลดลง จะช่วยลดความหนาของแผ่นสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $Ag_3Sn$  ที่จะเกิดขึ้นได้ [8, 9] อย่างไรก็ตาม SAC0307 ยังคงมีช่วงจุดหลอมเหลวที่สูงใกล้เคียงกับ SAC305 ที่ 217-227°C และทั้งในโลหะบัดกรี SAC305 และ SAC0307 ยังคงมีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ มีความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ที่ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมมาก ซึ่งจัดว่าเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ SAC ในการบัดกรี [4-7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดความล้าและการคืบ จัดเป็นการวิบัติทางโลหะวิทยาที่สำคัญ โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรี เพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยเป็นที่ทราบกันดีว่า วัสดุเชิงประกอบมีองค์ประกอบแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ เนื้อพื้น (Matrix) และเฟสกระจาย (Dispersed phase) และด้วยความก้าวหน้าด้านนาโนเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการนำอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ เช่น อนุภาคนาโนของโลหะบริสุทธิ์ อนุภาคนาโนเซรามิก หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย ทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) โดยอนุภาคนาโนที่เติมลงไปนี้จะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) รวมถึงการเลื่อนของขอบเกรน ทำให้รอยบัดกรีมีความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นได้ [5, 6, 10-20] และจากงานวิจัยในอดีตยังพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีที่ระดับการเติม 0.5 wt% จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีให้มีความสามารถต่อการต้านทานต่อความล้าและการคืบได้สูงสุด [21, 22] อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนเพื่อปรับปรุงความต้านทานความล้าและความคืบจะส่งผลต่อคุณสมบัติในด้านอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และโครงสร้างจุลภาค เป็นต้น [23-25]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริสม SAC0307 เป็นเฟสเนื้อพื้น โดยมีการเติมอินเดียม (In) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ลงไปในโลหะบัดกรีเพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย เพื่อพัฒนาเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบคริสมชนิดใหม่ SAC0307-xIn-yZnO ขึ้น โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ ซึ่งจากงานวิจัยในอดีต [26] พบว่าอินเดียมสามารถลดจุดหลอมเหลวและเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีได้ และในส่วนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เลือกใช้เป็นเฟสกระจายนี้ยังเป็นอนุภาคนาโนที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมประเทศไทย ทำให้มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ โดยคาดว่าจะใช้เป็นเฟสกระจายในโลหะบัดกรีที่ดี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง (1975 °C) ทำให้มีความเสถียรสูงที่อุณหภูมิบัดกรี ซึ่งผลจากการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ขึ้นแล้ว ยังเป็นการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาใหม่ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วอีกด้วย

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn-yZnO
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการพิมพ์ และการหลุดตัวของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจากการบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง
5. เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307

### 1.3 สมมติฐานการศึกษา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลในอดีต รวมถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องสามารถตั้งสมมติฐานเพื่อการศึกษาได้ดังนี้

1. ปริมาณของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีผลต่อช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี
2. ปริมาณของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีผลต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง
3. ปริมาณของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีผลต่อความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง
4. ปริมาณของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะปริมาณอินเดียม (In) ที่ระดับการเติม 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%
2. ศึกษาเฉพาะอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ระดับการเติม 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%
3. ศึกษาเฉพาะการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO กับแผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ 99.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว รวมถึงวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีให้มีประสิทธิภาพที่ดีเทียบเท่ากับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม
2. ศึกษาวิธีการและขั้นตอนการบัดกรีตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 เพื่อใช้ออกแบบการทดลองที่เหมาะสม
3. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้
4. ทำการทดลองโดยการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีการเติมธาตุอินเดียม (In) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงไป ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์บนแผ่นรองทองแดง เพื่อศึกษาความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบในด้านต่างๆของโลหะบัดกรี ได้แก่ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังการบัดกรี
6. สรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันโลหะบัดกรีหลายชนิดถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพให้ใกล้เคียงเทียบเท่ากับตะกั่วบัดกรีที่ใช้กันในอดีต การศึกษาจุดอ่อนของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วอย่างครอบคลุมในแง่ของคุณสมบัติในด้านต่างๆจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง อาทิเช่น เรื่องจุดหลอมเหลว (Solidus-liquidus temperature) ความสามารถในการเปียก (Wettability) ความสามารถในการพิมพ์ (Printability) การทรุดตัว (Slump test) และ โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี (Microstructure) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีမ် ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

#### 2.1.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus-Liquidus)

ในงานวิจัยของ Kanlayasiri และคณะ [26] ได้ศึกษาอิทธิพลของอินเดียม (In) ที่มีต่ออุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ความสามารถในการเปียก ความแข็งแรงดึงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn โดยมีการเติมอินเดียม (In) ที่ระดับการเติม 0-3 wt% ทำการวัดช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) อัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/s ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (Ar) พบว่าการเติม In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 อย่างไรก็ดีตามแนวอุณหภูมิดังกล่าวจะลดลงแต่พบว่าช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับการเติมของ In

ในงานวิจัยของ Dong และคณะ [27] ได้ศึกษาอิทธิพลของอินเดียม (In) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-2.5Bi-1Zn-0.3Ag โดยมีการเติม In ที่ความเข้มข้น 0.0, 0.7, 1.4, 2.1 และ 2.8 wt% ทำการวัดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC กำหนดช่วงอุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 25-250°C อัตราการให้เพิ่ม-ลดอุณหภูมิที่ 5°C/min โดยจากผลการทดสอบพบว่าทั้งอุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มที่ลดลงตามระดับการเติมที่เพิ่มขึ้นของ In ขณะที่ช่วงของอุณหภูมิ Solidus-Liquidus กลับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ

ในงานวิจัยของ Nai และคณะ [28] ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาคุณสมบัติทางกายภาพ ความร้อน และทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu ที่มีการเติมอนุภาคนาโนคาร์บอน (CNTs) ที่ 0.01, 0.04 และ 0.07 wt% ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC กำหนดช่วงอุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 25-250°C อัตราการให้เพิ่ม-ลดอุณหภูมิที่ 5K/min โดยพบว่า

การเติมอนุภาคนาโน CNTs ในระดับการเติมที่สูงขึ้น ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนขึ้นอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยของ Xiang และคณะ [29] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมอนุภาคนาโนแมงกานีส (Mn) ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่มีต่อความสามารถในการเปียก และการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยมีการเติมอนุภาคนาโน Mn ในสัดส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 wt% ผสมกันด้วยวิธีทางกล ทำการวัดการอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC โดยพบว่าการเติมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไป ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในจุดที่โลหะบัดกรีเริ่มหลอมละลาย หรือ ที่อุณหภูมิ Solidus อย่างมีนัยสำคัญ

ในงานวิจัยของ Tay และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมอนุภาคนาโนนิกเกิล (Ni) ลงในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.8Ag-0.7Cu โดยมีเติมอนุภาคนาโน Ni ที่สัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 wt% ทำการผสมกันด้วยวิธีเชิงกล วัดการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC กำหนดช่วงอุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 25-280°C อัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/min ซึ่งพบว่าการเติมอนุภาคนาโน Ni ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรีเชิงนาโนอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [31] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยมีการเติมอนุภาคนาโน TiC ที่ความเข้มข้น 0.0, 0.05, 0.10 และ 0.20 wt% ทำการวัดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวอย่างเด่นชัด โดยอุณหภูมิ Solidus มีแนวโน้มคงที่ ขณะที่อุณหภูมิ Liquidus มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 2.1.2 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในงานวิจัยของ Jian-Chun และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอินเดียม (In) ที่มีต่อสมบัติทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-8Zn-3Bi โดยเติมอินเดียม (In) ที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 wt% และทำการผสมกับโลหะบัดกรีด้วยวิธีการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 450°C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (Ar) ทำการหลอมละลายซ้ำอีกครั้ง เมื่อเย็นตัวลงทำการอัดเข้าไปในแผ่น solder discs และอัดแผ่น solder discs ดังกล่าวอีกครั้งลงบนแผ่นรองทองแดง ทำการบัดกรีบนเครื่อง Hotplate ที่อุณหภูมิ 240°C เป็นเวลา 1 min วัดความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีด้วยเครื่อง Digital microscope และวัดค่ามุมสัมผัสด้วยภาพตัดขวางจากเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) โดยการทดสอบพบว่าโลหะบัดกรี Sn-Zn-Bi-In มีความสามารถในการเปียกที่ดีขึ้นอย่างเด่นชัด โดยการเติมอินเดียมที่ 1.0 wt% ให้พื้นที่การกระจายตัวที่เพิ่มสูงขึ้นถึง 34 % และค่ามุมสัมผัสลดลง 52.5% เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน

ในงานวิจัยของ Li และคณะ [33] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอินเดียม (In) ที่มีต่อการพัฒนาคุณสมบัติในด้านต่างๆของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu0.2Ni โดยมีการเติม In ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 wt% ตามลำดับ สำหรับความสามารถในการเปียกจะทำการทดสอบบนแผ่นรองทองแดง และทำการบัดกรีในเตาหลอม ที่อุณหภูมิ 270°C เป็นเวลา 5 min วัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรี โดยพบว่าที่ระดับการเติมของ In 0.3 wt% วัดพื้นที่การกระจายตัวได้ 60.54 mm<sup>2</sup> เพิ่มขึ้นกว่าในเงื่อนไขที่ไม่ได้มีการเติม In ถึง 15.6 % ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเติม In ลงในโลหะบัดกรีในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวให้กับโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยของ Tay และคณะ [30] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนนิกเกิล (Ni) ที่มีผลต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.8Ag-0.7Cu บนแผ่นรองทองแดง โดยมีการเติมอนุภาคนาโน Ni ที่ปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 wt% ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์บนเตา Hotplate ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 45 s วัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าอนุภาคนาโน Ni ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงถึงความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีที่ลดลงเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโน Ni ลงไป อย่างไรก็ตามช่วงของค่ามุมสัมผัสดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 19.5-29.9° ซึ่งถือเป็นค่าที่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [31] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu มีการเติมอนุภาคนาโน TiC ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.0, 0.05, 0.1 และ 0.2 wt% ตามลำดับ ทำการวัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดพื้นที่การกระจายตัว และค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรีด้วยวิธีรีโฟลว์ จากผลการทดสอบพบว่าอนุภาคนาโน TiC ในระดับการเติมที่น้อยช่วยเพิ่มความสามารถการเปียกให้กับโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี โดยที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่ 0.1 wt% ให้พื้นที่การกระจายตัวสูงสุดที่ 2.168 mm<sup>2</sup> และมีค่ามุมสัมผัสลดลงต่ำสุดที่ 30.3° ทั้งนี้พื้นที่การกระจายตัวและค่ามุมสัมผัส จะมีแนวโน้มที่ลดลงและสูงขึ้นที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวที่ลดลง

ในงานวิจัยของ Fallahi และคณะ [34] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติม Fe และ In ในโลหะบัดกรีทั้งหมดสี่ชนิด ได้แก่ Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6Fe และ Sn-3.6Ag-0.9Cu-1.7In-0.3Ce บนแผ่นรองทองแดงแบบธรรมดาและแบบเคลือบด้วย Ni-P ขนาด 1.5x1.5x0.5 mm ใช้น้ำยาประสานชนิด ZnCl<sub>2</sub> จุ่มลงที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 s ที่ความเร็ว 5 mm/s ลึก 5 mm วัดการกระจายตัวด้วยวิธี Wetting balance และการกระจายตัว (Spread test) พบว่าในเงื่อนไขที่มีการเติมอินเดียมช่วยลดค่ามุมสัมผัสจาก 29.6 เหลือเพียง 18° ค่ามุมสัมผัสที่ลดลงแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวที่ดีขึ้นหลังการบัดกรี

ในงานวิจัยของ Guang และคณะ [35] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค ความสามารถในการเปียก สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 96.5Sn-3Ag-0.5Cu ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมอนุภาคนาโนฟลูออไรด์ (FNSs) เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงที่ปริมาณ 0, 0.05, 0.1 และ 0.2 wt% ทำการผสมกับโลหะบัดกรีด้วยเครื่องบด (Ball mill) นำไปอัดและให้ความร้อนในสภาวะสุญญากาศ ทิ้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนดังกล่าวที่เตรียมได้อัดลงบนแผ่นรองทองแดง บัดกรีที่อุณหภูมิ 250°C วัดความสามารถในเปียกด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นรองทองแดงด้วยกล้องสำหรับวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าการเติมอนุภาคนาโน FNSs ช่วยลดค่ามุมสัมผัสจาก 37.1 เป็น 30.1° เมื่อเติมอนุภาคนาโน FNSs ที่ 0.1 wt% อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันเป็น 33.2° ที่ระดับการเติม 0.2 wt% ซึ่งการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อยช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างโลหะบัดกรีกับฟลักซ์ขณะการบัดกรีได้ ทำให้โลหะบัดกรีสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น มีค่ามุมสัมผัสที่ลดลง แต่หากใส่อนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคนาโนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีกับฟลักซ์เนื่องจากอนุภาคนาโน FNSs มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ จึงมีความสามารถในการดูดซับพวกอนุภาคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือนกัน หรือพวกโมเลกุลขนาดเล็ก (เช่น โมเลกุลออกซิเจน) ในฟลักซ์ได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้การรวมตัวของอนุภาคนาโนดังกล่าวภายในบริเวณนี้ในปริมาณมากจึงส่งผลให้แรงตึงผิวตรงรอยต่อบัดกรีให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีลดลงและมีค่ามุมสัมผัสที่สูงขึ้นนั่นเอง

ในงานวิจัยของ Yue และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่มีผลต่อความสามารถในการเปียกและการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดที่มีปริมาณของ Ag ต่ำบนแผ่นรองทองแดง ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และผสมลงในโลหะบัดกรีด้วยวิธีการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 hrs เพื่อให้ได้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน  $\text{Sn-1.0Ag-0.7Cu-xFe}_2\text{O}_3$  สำหรับปริมาณของอนุภาคนาโน  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ที่ทำการผสมเข้าไปในโลหะบัดกรีจะอยู่ในช่วง 0-1 wt% โดยความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีจะถูกวิเคราะห์จากค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่ทำการวัดจากค่าแรงการกระจายตัว (Fw) ด้วยการทดสอบตามกรรมวิธีของ SAT5200T ที่ทำการจุ่มแผ่นรองทองแดงลงในโลหะบัดกรีนาโนเชิงประกอบที่หลอมละลายแล้วที่ความเร็ว 0.1 mm/s ความลึก 0.05 mm เป็นเวลา 5 s และยกขึ้นเป็นเวลา 5 mm/s โดยควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบไว้ที่ 260°C พบว่าการเติมอนุภาคนาโน  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ลงในโลหะบัดกรีปริมาณ 0.4 wt% จะให้ค่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีสูงสุด

ในงานวิจัยของ Tang และคณะ [37] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่มีต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยมีการเติมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  อยู่ในช่วง 0-1 wt% จากการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ลงในโลหะบัดกรีในปริมาณที่มากกว่า 0.6 wt% สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะบัดกรีได้ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการเปียกเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยของ Tsao และคณะ [38] ได้ศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu ที่มีการเติมอนุภาคนาโนอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ลงไป ทำการวัดความสามารถในการเปียกของอนุภาคนาโนออกไซด์ในโลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปียกของโลหะบัดกรีด้วยวิธีการวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าการเติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ที่ปริมาณ 0.5 wt% จะให้ค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุดที่  $28.9^\circ$  ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ดีขึ้น ขณะที่การเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีลดลงเช่นกัน

### 2.1.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว (Printability and Slump)

ในงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาคุนสมบัติของโลหะบัดกรีในกลุ่มที่มีส่วนผสมของธาตุ Ag ต่ำ และไม่มี Ag เปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันแพร่หลายอย่าง Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) แบบครีม ทั้งในด้านความสามารถในการพิมพ์ ความสามารถในการเปียกและการหลุดตัว ในการทดสอบจะทำการพิมพ์โลหะบัดกรีลงบนแผ่น Stencil คุณลักษณะการคงตัวที่เวลา 0 และ 4 hrs อัตราเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 50-70 mm/s หรือสูงกว่าเล็กน้อย ขณะที่ทำการทดสอบการหลุดตัวจะเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการทดสอบการพิมพ์โดยนำแผ่น stencil ที่ถูกอัดด้วยโลหะบัดกรีที่ทิ้งไว้ที่ 0 และ 4 hrs นำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 125-150°C เป็นเวลา 20 min จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีในกลุ่มที่มีส่วนผสมของธาตุ Ag ต่ำ และไม่มี Ag นั้นให้ประสิทธิภาพในการพิมพ์ที่ดีใกล้เคียงกับในโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 อย่างไรก็ตามพบว่าในโลหะบัดกรีบางกลุ่ม เช่น SAC0307, 99.2Sn-3Bi-0.5Cu-Co และ Sn-0.1Ag-0.7Cu-0.03Co เป็นต้น ยังคงมีความคงตัวที่ไม่ดีเทียบเท่ากับ SAC305 เมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 4 hrs และในผลการทดสอบการหลุดตัว พบว่ามีความใกล้เคียงกับในโลหะบัดกรี SAC305 เช่นกันโดยพิจารณาจากจำนวนที่สัมผัสกันระหว่างช่องว่างของ Stencil ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อน

ในงานวิจัยของ An และคณะ [40] ได้ศึกษาความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการพิมพ์สามารถควบคุมการทำมุมของ Squeegee แรงกดในการพิมพ์ และความเร็วในการพิมพ์ ให้มีความเหมาะสมกับโลหะบัดกรีแบบครีมในหลากหลายชนิดได้ สำหรับแผ่น Stencil ที่ใช้ในการทดสอบถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายลูกกลิ้งที่สามารถทำการพิมพ์ได้อย่างต่อเนื่อง ขณะทดสอบมีการใช้ J-shape probe ให้คอยสัมผัสบริเวณพื้นผิวของโลหะบัดกรีเพื่อป้องกันแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในระหว่างการพิมพ์ จากการทดสอบในโลหะบัดกรีทั้งสองประเภท คือ โลหะบัดกรีตะกั่ว (Sn-Pb) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการพิมพ์ที่ดีกว่าในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Sn-Ag-Cu) สังเกตได้จากแรงตึงผิวในแนวสัมผัสซึ่งในโลหะบัดกรีตะกั่วจะมีค่าที่สูงและสามารถพิมพ์ในอัตราที่รวดเร็วกว่าในส่วนของโลหะบัดกรี SAC มาก ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าโลหะบัดกรีแบบ SAC ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโลหะบัดกรีตะกั่วทุกประการ

ในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกรรมกรไหลและความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC การตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำของโลหะบัดกรีจะแสดงถึงสมบัติการหยุ่นหนืดของโลหะบัดกรีแบบครีม ที่สังเกตได้จากในกระบวนการพิมพ์ โดยจากการทดสอบพบว่ากรณีที่โลหะบัดกรีบัดกรีแบบครีมแสดงพฤติกรรมของของแข็ง ( $G'$ ) สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลว ( $G''$ ) มากจะทำให้โลหะบัดกรีแบบครีมสามารถติดบนบริเวณฐานรองรับได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการการศึกษาด้านการไหลของโลหะบัดกรีที่พบว่า ยิ่งโลหะบัดกรีแบบครีมมีความต้องการในการไหลมากขึ้นจะสามารถยึดเกาะติดกับฐานรองรับได้มากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาของโลหะบัดกรีแบบครีมชนิดใหม่ขึ้นมา

ในงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [42] ได้ศึกษาวิธีการในการเลือกโลหะบัดกรีแบบครีมที่ดีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการทดสอบทั้งความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และความสามารถในการเปียก รวมทั้งการเลือกชนิดของโลหะบัดกรีเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบด้วยโลหะบัดกรีแบบครีมทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ ชนิดที่มีฮาโลเจน ชนิดปราศจากฮาโลเจน และชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ พบว่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความเร็วในการพิมพ์อยู่เฉลี่ยที่ 50-70 mm/s หรือสูงกว่าเล็กน้อย และในส่วนของ การหลุดตัว พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้อัตราการหลุดตัวของโลหะบัดกรีเกิดขึ้นสูงกว่าที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามแม้ว่าในบางเงื่อนไขให้ค่าการหลุดตัวที่ต่ำเมื่อทดสอบในอุณหภูมิต่ำ แต่โลหะบัดกรีที่ดีควรให้ค่าการหลุดตัวที่ต่ำในทุกสถานะ

#### 2.1.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ในงานวิจัยของ Kanlayasiri และคณะ [43] ที่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอินเดียม (In) ที่มีต่อการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307 และแผ่นรองทองแดง โดยที่มีระดับการเติมของ In ที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt% ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง SEM พบว่าการปริมาณการเติมของ In ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งก่อนและหลังการบ่มเพาะความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

ในงานวิจัยของ Xiang และคณะ [29] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมอนุภาคนาโนแมงกานีส (Mn) ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่มีผลต่อการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยมีการเติมอนุภาคนาโน Mn ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 wt% ผสมกันด้วยวิธีการกล ทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยภาพจากเครื่อง FE-SEM พบว่าเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นเพียงชนิดเดียว คือ  $Cu_6Sn_5$  โดยที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโน Mn สูงสุดที่ 1.5 wt% ให้ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.50  $\mu\text{m}$  จาก 2.51  $\mu\text{m}$  ในเงื่อนไขที่ไม่ได้มีการเติมของอนุภาคนาโน ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีช่วยยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [31] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอนุภาคนาโนไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยมีระดับการเติมที่ 0.0, 0.05, 0.10 และ 0.20 wt% ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง SEM สำหรับก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบ่มเพาะความร้อน พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป หลังการเติมของอนุภาคนาโน คือ จากทรงกลมเปลี่ยนเป็นรูปร่างคล้ายแท่งไม้ขนาดสั้น และเมื่อทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กลง จาก  $1.75 \pm 0.3 \mu\text{m}$  ลดลงเหลือเพียง  $0.72 \pm 0.2 \mu\text{m}$  ที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนสูงสุด 0.2 wt%

ในงานวิจัยของ Sobhy และคณะ [44] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu โดยมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.5 wt% และทำการผสมกันด้วยวิธีการหลอมละลายในเตาอบที่สถานะสุญญากาศ อุณหภูมิ 603 K เป็นเวลา 2 hrs อัดลงในแม่พิมพ์ Stainless Steel ทิ้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรี SAC355 สามารถช่วยยับยั้งการเติบโตของเกรนได้เป็นอย่างดี รวมทั้งในบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  และ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  มีความหนาที่ลดลง

ในงานวิจัยของ Tang และคณะ [45] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่มีต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu บนแผ่นรองทองแดง โดยจะทำการเติมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่ปริมาณ 0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.6 wt% ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ พบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ลงในโลหะบัดกรีที่ปริมาณ 0.1 wt% ความหนาและขนาดเกรนของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเติมอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณที่มากขึ้น

ในงานวิจัยของ Chellvarajoo และคณะ [46] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีแบบคริม Sn-3.0Ag-0.5Cu ที่มีการเติมอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ปริมาณ 0.5, 1.5 และ 2.5 wt% ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์บนแผ่นรองทองแดง พบว่ามีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อบัดกรี ได้แก่  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  และ  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  เกิดขึ้น โดยการเติมอนุภาคนาโน NiO ในปริมาณดังกล่าว พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะข้างต้นมีขนาดลดลง 36.1, 58.6, and 60% ตามลำดับ นอกจากนี้อนุภาคนาโน NiO ยังทำให้เกิดเฟสใหม่ คือ  $(\text{Cu},\text{NiO})_6\text{Sn}_5$  แทนเฟส  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ที่มีความเสถียรมากกว่าในเฟสของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  อีกด้วย ซึ่งเป็นการช่วยลดอัตราการเติบโตของ  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  โดยยับยั้งการแพร่ของ Sn ผ่านขอบเกรนได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยของ Liu [47] และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu จากการศึกษาพบว่าการเติมอนุภาคนาโน SiC ที่ปริมาณ 0.01 และ 0.05 wt% ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กลงกว่าในโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-3.8Ag-0.7Cu ขณะที่การเติมอนุภาคนาโน SiC ที่ปริมาณ 0.2 wt% ผลที่ได้ คือ ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-3.8Ag-0.7Cu แสดงถึงความสามารถในการรวมตัวและการแยกตัวของอนุภาคนาโน SiC ภายในเนื้อโลหะบัดกรี โดยสาเหตุของการรวมตัวของอนุภาคอาจเกิดจากการที่แรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ที่ช่วยยึดอนุภาคนาโน SiC แต่ละอันเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี หรือ การบัดกรีอ่อน หมายถึง กรรมวิธีการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะใช้วิธีนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรีหรือตะกั่วบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะชิ้นงานนำมาใช้บัดกรี ทำหน้าที่เป็นตัวประสานชิ้นงานให้ติดกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกิน  $450^{\circ}\text{C}$  การบัดกรีต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดบริเวณผิวหน้าของโลหะชิ้นงานก่อน ให้ปราศจากออกไซด์และคราบน้ำมันมาเกาะ สำหรับช่องว่างระหว่างโลหะชิ้นงานที่โลหะบัดกรีแทรกอยู่ควรมีระยะห่างอยู่ระหว่าง 0.076-0.0127 mm สำหรับการบัดกรีนั้นถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และงานโลหะแผ่นอย่างกว้างขวาง

การบัดกรีมีข้อดี คือ ใช้พลังงานความร้อนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อม (Welding) และการบัดกรีแข็ง (Brazing) สามารถเลือกพลังงานความร้อนได้หลายรูปแบบ รอยบัดกรีมีค่าการนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี แก๊สและซ่อมแซมบริเวณรอยบัดกรีได้ง่าย แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ รอยบัดกรีอาจมีความแข็งแรงต่ำ และจะยิ่งลดลงต่ำลงอีกเมื่อใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงอีกด้วย

การบัดกรีที่ดีอันจะทำให้ได้รอยบัดกรีที่มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบสำคัญ คือ

- 1) ธรรมชาติของผิวโลหะ (Base metal) ซึ่งครอบคลุมถึงชนิดของโลหะและสภาพผิวหน้าด้วย
- 2) ชนิดของโลหะบัดกรีที่ใช้ (Soldering metal)
- 3) ตัวประสานหรือฟลักซ์ (Soldering flux)

โดยองค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่า องค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันอยู่ด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี [48]

### 2.2.2 โลหะชิ้นงาน (Base metal)

สำหรับในโลหะชิ้นงานทั่วไปแล้วจะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็มีการนำมาใช้งานบ้าง เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา แต่จะทำการบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และอัลลอยของเหล็กกับทองแดง ดังในตารางที่ 2.1 ที่แสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี และสิ่งสำคัญคือต้องคำนึงถึงการใช้ฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการบัดกรีทั้งสิ้น

โดยโลหะบัดกรีที่เป็นดีบุก แคดเมียม และทองแดง พบว่าง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยที่ไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และสามารถใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ แต่ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของอัลไฟต์บนผิว ทำให้ประสิทธิภาพการบัดกรีลดลง ส่วนตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้น และควรทำความสะอาดก่อนทำการบัดกรี ขณะที่ในทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็ก อาจเกิดออกไซด์ได้บางบริเวณ ควรทำความสะอาดด้วยสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ หรือล้างด้วยกรดอ่อนก่อนนำไปใช้งาน [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี [49]

โลหะชิ้นงานหรือโลหะชิ้นงาน	ความสามารถในการบัดกรี
เงิน ดีบุก แคดเมียม แพลเลเดียม โรเดียม	ดีเยี่ยม
บรอนซ์ ทองเหลือง ตะกั่ว นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบริลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก สังกะสี นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมบรอนซ์ เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ โครเมียม ไททาเนียม แทนทาลัม แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะบัดกรีก่อน

### 2.2.3 โลหะบัดกรี (Solder)

โลหะบัดกรี หมายถึง โลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานในการบัดกรี ในอดีตจะใช้เป็นโลหะบัดกรีผสมระหว่างธาตุดีบุก และตะกั่ว มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดหลอมเหลวต่ำ จุดบัดกรีมีความแข็งแรง มีความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น โดยโลหะบัดกรีที่ดีมักมีดีบุกผสมอยู่ในสัดส่วนที่มากกว่า เนื่องจากดีบุกมีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดี แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะชิ้นงานที่จะนำมาบัดกรีด้วยที่ จำเป็นต้องมีส่วนผสมของโลหะที่เป็นชนิดเดียวกันกับชิ้นงานผสมอยู่ด้วย เช่น ถ้าต้องการบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงตัวโลหะบัดกรีจะต้องมีส่วนผสมระหว่างดีบุกกับทองแดงอยู่ด้วย เป็นต้น [50] นอกจากนี้ดีบุกยังเป็นส่วนผสมหลักของตะกั่วบัดกรีที่หลายคนคุ้นเคย คือ 63Sn/37Pb อีกด้วยแต่เนื่องจากในปัจจุบันมีการตระหนักถึงความเป็นพิษของตะกั่วที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์เพิ่มสูงขึ้น มีการออกข้อบังคับเกี่ยวกับการควบคุมการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อมาใช้ทดแทนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่ก็จะมีส่วนประกอบของธาตุดีบุกเป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดิม โดยมีการเติมธาตุอื่นๆลงในโลหะบัดกรีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบัดกรี เช่น Cu, Ag, Zn, Bi, Sb และ Ni เป็นต้น ท่ามกลางโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วระบบสมดุลสองธาตุในกลุ่มต่างๆ กลุ่ม Sn-Ag, Sn-Zn และ Sn-Cu และ Sn-Zn เป็นกลุ่มที่ได้รับความนิยมเพื่อนำไปใช้งานทดแทนตะกั่วบัดกรีมากที่สุด ส่วนในระบบสมดุลสามธาตุของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว กลุ่ม Sn-Ag-Cu เป็นกลุ่มที่ถูกจัดว่ามีประสิทธิภาพดีเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ และมีสมบัติทางกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วนผสมอื่นๆ อย่างไรก็ตามในส่วนของการผลิต หรือการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการพัฒนาในเรื่องคุณสมบัติบางประการของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว เช่น จุดหลอมเหลวที่ยังคงสูงเกินไป ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้แผงวงจรหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เกิดการเปลี่ยนสีหรือเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปได้, การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Ag<sub>3</sub>Sn สูงอันเป็นสาเหตุของความเปราะและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกหักของรอยบัดกรี, การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ที่มากขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรีให้มีประสิทธิภาพที่ลดลงหลังการบัดกรี, ความง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และความสามารถในการกระจายตัวที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม นอกจากนี้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนใหญ่ที่มีส่วนผสมของดีบุก (Sn) เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนที่สูง อาจทำให้ง่ายต่อการเกิดผลึกของดีบุกที่มีลักษณะเป็นเส้นคล้ายหนวดแมว (Tin whisker) ขึ้นบริเวณผิวของดีบุกเป็นแนวยาว ซึ่งไม่สามารถควบคุมทิศทางและจุดที่จะเกิดได้ ทำให้เมื่อนำไปใช้งานจริงมีโอกาสที่จะเกิดการช็อตกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในแผงวงจรพิมพ์ได้ง่าย [51]

ด้วยเหตุนี้การพิจารณาคุณสมบัติของโลหะบัดกรีที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นไปอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะคุณสมบัติหลักที่สำคัญ ด้านไฟฟ้า และทางกล เพราะแสดงถึงอายุการใช้งานของอุปกรณ์ อีกทั้งคุณสมบัติดังกล่าวควรอยู่ภายใต้ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงเกินไปด้วย ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ควรพิจารณาทั้งในส่วนของการผลิตและเมื่อนำไปใช้งานจริง ดังจะแสดงดังตารางที่ 2.2

ในวงการอุตสาหกรรมเรื่องต้นทุนการผลิตถือเป็นเรื่องสำคัญ เพราะในอดีตสามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำได้ เนื่องจากราคาของตะกั่วในท้องตลาดมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะชนิดอื่น เมื่อเวลาผ่านไปการแข่งขันในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้น ทุกฝ่ายต่างพยายามที่จะลดค่าใช้จ่ายโดยรวมในการผลิตเพื่อให้มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยคุณสมบัติบางประการรวมถึงต้นทุนของธาตุโลหะแต่ละชนิดที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นโลหะบัดกรีผสมทดแทนตะกั่ว แสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 แสดงถึงส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีตะกั่วโดยมีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลักได้

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรี [52]

ในกระบวนการผลิต	การนำไปใช้งานจริง
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	การนำไฟฟ้า
ความสามารถในการกระจายตัว	การนำความร้อน
ต้นทุนการผลิต	ค่าการขยายตัวทางความร้อน
ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	ความทนทานต่อแรงเฉือน
จำนวนของผู้จัดซื้อ	ความทนทานต่อแรงดึง
เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิต	ความทนทานต่อความเค้น
ความสามารถในการทำโลหะบัดกรีแบบแข็ง/ครีม	ความทนทานต่อความล้า
อัตราการทำปฏิกิริยากับโลหะชิ้นงาน โดยทั่วไปจะเป็น แผ่นรองทองแดง	ความทนทานต่อการกัดกร่อน และการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ
ความสามารถในการทำให้กลับมาใช้งานได้อีก	การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว [49]

โลหะ	ราคา โดยประมาณ (US\$) ต่อปอนด์	ความหนาแน่นที่ อุณหภูมิ 25°C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ นิ้ว)	จำนวนที่สามารถ ผลิตได้ต่อปี (ล้านปอนด์)	ความยากง่าย ในการนำมาใช้ งาน
สังกะสี (Zn)	0.50	0.258	1560	หาง่าย
พลวง (Sb)	0.80	0.239	100	หาง่าย
ดีบุก (Sn)	3.50	0.264	180	หาง่าย
เงิน (Ag)	84.20	0.379	3.5	มีจำกัด
บิสมัท (Bi)	3.40	0.354	9	มีจำกัด
อินเดียม (In)	125.00	0.264	0.2	ขาดแคลน
ตะกั่ว (Pb)	0.45	0.41	170	หาง่าย
ทองแดง (Cu)	0.65	0.324	4900	หาง่าย

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว [49]

ส่วนผสม	ช่วงอุณหภูมิ จุดหลอมเหลว (°C)	ราคา (US\$) ต่อปอนด์	ราคา (US\$) ต่อลูกบาศก์ นิ้ว	ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 25 °C (ปอนด์ต่อ ลูกบาศก์นิ้ว)
63Sn/37Pb	183	2.37	0.75	0.318
42Sn/58Bi	139	3.44	1.09	0.316
77.2Sn/20In/2.8Ag	179-189	30.06	8.02	0.267
91Sn/9Zn	199	2.32	0.85	0.263
91.8Sn/3.4Ag/4.8Bi	208-215	6.24	1.70	0.272
90sn/7.5Bi/2.0Ag/0.5Cu	186-212	5.09	1.39	0.273
96.2Sn/2.5Ag/0.8Cu/0.5Sb	213-219	5.84	1.46	0.267
95.5Sn/4.0Ag/0.5Cu	217-218	6.55	1.76	0.269
95Sn/3.5Ag/1.5In	218	8.15	2.18	0.268
93.5Sn/3.5Ag/3.0Bi	216-220	5.92	1.59	0.269
96.5Sn/3.5Ag	221	6.32	2.33	0.368
99.3Sn/0.7Cu	227	3.48	0.92	0.264
95Sn/5.0Sb	232-240	3.37	0.88	0.263

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางดังกล่าว พบว่าธาตุโลหะที่มีราคาถูกที่สุดคือ ตะกั่ว (Pb) และ สังกะสี (Zn) เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน จะพบว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb) จะมีราคาอยู่ที่ 2.37 ดอลลาร์/ปอนด์ ขณะที่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทุกชนิดต่างมีราคาที่สูงกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม โดยมีราคาอยู่ในช่วง 3.37 – 30.06 ดอลลาร์/ปอนด์ ดังนั้นการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม จึงควรพิจารณาคุณสมบัติต่างๆอย่างครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องของต้นทุนการผลิตก็ถือว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึง โดยโลหะแต่ละชนิดที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนตะกั่วบัดกรี ต่างมีข้อเด่นและข้อด้อยที่ควรพิจารณาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและเป้าหมายในการนำไปใช้งานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 [52]

ตารางที่ 2.5 ข้อเด่น-ด้อยของธาตุเจือที่นิยมใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว [49]

โลหะ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
สังกะสี (Zn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูก (ใกล้เคียงกับตะกั่ว)</li> <li>- อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในบรรยากาศ</li> </ul>
พลวง (Sb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยเพิ่มสมบัติด้านความต้านทานต่อความเคืบและความล้า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำให้ความสามารถในการเปียกและการแผ่กระจายตัวของโลหะบัดกรีลดลง</li> </ul>
ดีบุก (Sn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูก</li> <li>- นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี</li> <li>- ทนต่อการกัดกร่อน</li> <li>- มีความสามารถในการเปียกและการแผ่กระจายตัวขณะทำการบัดกรีที่ดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในบรรยากาศ</li> </ul>
เงิน (Ag)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความสามารถทำให้โลหะบัดกรีมีการแผ่กระจายตัวที่ดีขึ้น</li> <li>- ช่วยลดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีให้ต่ำลง</li> <li>- เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาสูง</li> </ul>
บิสมัท (Bi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ</li> <li>- มีความสามารถในการเชื่อมประสานดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาสูง</li> </ul>
อินเดียม (In)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยลดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีให้ต่ำลง</li> <li>- ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน</li> <li>- เพิ่มสมบัติความเหนียวให้ดียิ่งขึ้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาสูง</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ข้อเด่น-ด้อยของธาตุเจือที่นิยมใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (ต่อ)

โลหะ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
ทองแดง (Cu)	- เพิ่มความแข็งแรงให้โลหะบัดกรี	- กรณีโลหะบัดกรีผสมกับธาตุดีบุก Sn-Cu อาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin whisker) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่อาจทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้

2.2.3.1 โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste)

เป็นที่ทราบกันดีว่าในขั้นตอนของการบัดกรีอุปกรณ์ต่างๆ ให้เชื่อมติดกับแผ่นวงจรพิมพ์จะใช้วัสดุที่เรียกว่า โลหะบัดกรี โดยรูปแบบของโลหะบัดกรีที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นโลหะบัดกรีแบบแข็ง แต่สำหรับในงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการในการผลิตชิ้นงานจำนวนมากจะนิยมใช้โลหะบัดกรีชนิดหลอมเหลว หรือ โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) โดยเมื่อพิมพ์โลหะบัดกรีดังกล่าวลงบนตำแหน่งที่ต้องการบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว จะทำการวางอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมติดลงบนโลหะบัดกรี จากนั้นจะทำการให้ความร้อนเพื่อให้โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เกิดการหลอมตัวและประสานเชื่อมติดระหว่างอุปกรณ์กับแผ่นวงจรพิมพ์

โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเนื้อครีมมีลักษณะคล้ายยาสีฟัน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีความคงตัวทางจลนศาสตร์สูง (Kinetically stable) มีส่วนประกอบหลักเป็นผงโลหะผสม (Solder powder) และฟลักซ์ (Flux) คุณสมบัติหลายประการของโลหะบัดกรีต่างส่งผลกระทบต่อ การเกิดของรอยบัดกรีบัดกรี โดยทั้งโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคในโลหะบัดกรี สัดส่วนของโลหะบัดกรี และ พฤติกรรมการไหลของโลหะบัดกรี จัดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดสำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนโลหะชิ้นงาน

โดยข้อที่ควรทราบเกี่ยวกับโลหะบัดกรีแบบครีมมีรายละเอียดดังนี้

1) ผงโลหะ (Solder powder) สำหรับคุณสมบัติของผงโลหะที่สำคัญ คือ จะต้องมิลักษณะเป็นทรงกลม เพื่อสมบัติการไหลที่ดีขณะการพิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ควรมีโลหะออกไซด์เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อย และมีการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยความเรียบของผิวโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีสามารถบ่งบอกถึงการเกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวที่น้อยมากได้ แสดงถึงความสำคัญของรูปร่าง และขนาดของผงโลหะที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการบัดกรี

ขนาดอนุภาคของผงโลหะสามารถวัดขนาดโดยการร่อนผ่านชุดตะแกรงทดสอบ (Test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่างๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้ อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ส่วนช่องบนตะแกรง (Sieve) เกิดจากการนำลวดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (Mesh) ซึ่งหมายถึงจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวและกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมชขนาดเดียวกันอาจแตกต่างกันถ้าทำจากเส้นลวดที่ต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องบอกขนาดช่องหรือ aperture size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วยเสมอ โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงมาตรฐานแต่ละแบบอาจจะมีขนาดช่องที่ต่างกันด้วยได้เช่นกัน ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียด ทั้งขนาดเมช และขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรงทุกครั้งเพื่อความถูกต้องในการนำไปใช้งาน

ขนาดอนุภาคโดยทั่วไปของโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ พื้นผิวของโลหะบัดกรีจะมีความเรียบมากกว่าในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งการเกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวของโลหะควรมีการควบคุมอย่างดีเพื่อให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด จากการศึกษาพบว่า โลหะเงิน ทองแดง และตะกั่ว เป็นโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ยาก เพราะมีค่าพลังงานอิสระการเกิดออกไซด์สูง สำหรับการใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศการผลิตสูง ขนาดอนุภาคของผงโลหะขนาดเล็ก จะทำให้โลหะบัดกรีมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับออกซิเจนมากขึ้น รวมถึงส่วนประกอบของผงโลหะ และวิธีการจัดเก็บรักษาเหล่านี้ต่างเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลทำให้เกิดออกไซด์ได้ง่าย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีขณะเกิดการแข็งตัวบริเวณรอยบัดกรีบัดกรีได้ [53]

2) ฟลักซ์ (Flux) เป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง โดยหน้าที่หลักของฟลักซ์คือการกำจัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะชิ้นงาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนตรงบริเวณที่ทำการบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวและมีการไหลตัวที่ดีขึ้น โดยฟลักซ์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic fluxes) ซึ่งเป็นฟลักซ์ประเภทที่ไม่มีการกัดกร่อน เช่น ยางไม้ ยางสน แอลกอฮอล์ เป็นต้น และ ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic fluxes) เป็นฟลักซ์ประเภทที่มีการกัดกร่อน (Corrosive fluxes) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในจำพวกกรดและเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ สำหรับปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์กับฟลักซ์จะเกิดขึ้นช้าที่อุณหภูมิห้อง ในทางตรงกันข้ามสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ซึ่งส่วนใหญ่การใช้งานจะนิยมใช้ฟลักซ์อินทรีย์มากกว่า เพราะไม่ทำให้เหลือสารจำพวกไฮโดรเจนตกค้างมากเกินไปจนกำหนด โดยฟลักซ์อินทรีย์จำเป็นต้องมีน้ำหนักรีดออกซิเจนที่มากพอที่จะไม่ระเหยไปก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์โลหะ ขณะเดียวกันฟลักซ์อินทรีย์ก็ไม่ควรเหลือตกค้างบริเวณรอยบัดกรีด้วยเช่นกัน เนื่องจากอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยบัดกรีเกิดความบวมพร่อง และมีความแข็งแรงที่ลดลง [50]

3) รีโวลยี (Rheology) หรือ พฤติกรรมการไหลของโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) จัดเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในขั้นตอนการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็งลงบนแผ่นวงจรพิมพ์โดยตรง รวมไปถึงความสามารถในการทนทานต่อการทรุดตัว (Slump resistance) หลังการพิมพ์อีกด้วย สำหรับการพิมพ์นั้นเป็นกระบวนการที่ต้องการความเร็ว และเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่พบเฉพาะในโลหะบัดกรีแบบครีมเท่านั้น ที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมให้เกิดการยึดติดกันระหว่างอุปกรณ์ หรือชิ้นส่วนประกอบกับแผ่นวงจรพิมพ์ [54, 55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบเป็นสิ่งใดก็ได้ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในระดับของอะตอมของวัสดุ เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้ชัดเจน โดยจะมีองค์ประกอบสองส่วน คือ เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ขณะที่อีกเฟสเรียกว่า เฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (Reinforcement) เป็นเฟสที่ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น มีลักษณะหลากหลายรูปแบบ เช่น เส้นใยเสริมแรง (Fibers) และอนุภาค (Particles) เป็นต้น วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ดีเป็นพิเศษ หรือมีลักษณะสำคัญบางอย่างที่แตกต่างไปจากเดิม

สำหรับในเฟสเนื้อพื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามชนิดของวัสดุ ได้แก่ พอลิเมอร์, โลหะ และเซรามิก ขณะที่ในเฟสเสริมแรงก็อาจแบ่งเป็นชนิดได้หลายประเภททั้ง พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิก เช่นเดียวกับในเฟสเนื้อพื้น หรือ คาร์บอน และโบรอน ก็ได้ด้วยเช่นกัน สำหรับการรวมตัวของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละเฟส แสดงดังตารางที่ 2.6 จากตารางจะพบว่าจะมีวัสดุสองชนิดที่ไม่พบข้อมูลว่าสามารถผสมกันได้ เช่น เฟสเนื้อพื้นเป็นเซรามิกและเฟสกระจายเป็นพอลิเมอร์ เป็นต้น [48]

ตารางที่ 2.6 การรวมตัวของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละเฟส [48]

ชนิดของเฟสเสริมแรง	ชนิดของเฟสเนื้อพื้น		
	โลหะ	เซรามิก	พอลิเมอร์
โลหะ	- อยู่ในรูปของผงโลหะสามารถผสมเข้ากับโลหะด้วยกันได้	ไม่พบข้อมูล	- พลาสติกผสม - ยางล้อรถ
เซรามิก	- โลหะผสมซีเมนต์คาร์ไบด์ - เส้นใยเสริมแรงโลหะ	- เส้นใย SiC Whiskers - อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	- พลาสติกผสม - เส้นใยแก้ว
พอลิเมอร์	- ผงโลหะที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุพอลิเมอร์	ไม่พบข้อมูล	- พลาสติกผสม - เส้นใยเคฟลาร์
ส่วนประกอบอื่นๆ (C,B)	- เส้นใยเสริมแรงโลหะ	ไม่พบข้อมูล	- ยางผสมคาร์บอนแบล็ค - เส้นใยคาร์บอนหรือ โบรอน

หมายเหตุ : C คือ ธาตุคาร์บอน และ B คือ ธาตุโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 การเลือกใช้อุณหภูมิในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับวิธีการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม Sn-Pb พบว่ามีสองวิธีการด้วยกัน วิธีการแรก คือการทำให้เป็นโลหะผสม เช่น การเติมธาตุโลหะที่บางชนิดลงไปซึ่งสามารถเพิ่มความสามารถในการเปียกให้กับโลหะบัดกรีได้ [56, 57] อาทิเช่น การเติมธาตุ Ag ลงไป ถึงแม้จะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเชิงกลที่ลดลง แต่ก็ทำให้มีความเหนียวที่มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก Ag ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และการกระจายตัวของเฟสในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [58] วิธีการที่สอง คือ การเติมอนุภาคขนาดเล็กลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง เช่น การเติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  และ  $TiO_2$  จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับโลหะบัดกรี โดยทำให้สามารถทนทานต่อความเค้นและความล้าได้ดียิ่งขึ้น [59, 60]

จากคุณสมบัติที่ดีของการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) และความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) ชนิดต่างๆ ได้แก่ อนุภาคนาโนของโลหะบริสุทธิ์ อนุภาคนาโนเซรามิก หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) มาใช้เป็นเฟสกระจาย ทำให้โลหะบัดกรีดังกล่าวเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) [11-17, 26] โดยในกลุ่มของอนุภาคนาโนเซรามิก เช่น  $ZrO_2$ ,  $AlO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Cu_2O$ ,  $SnO_2$ ,  $La_2O_3$  และ  $ZnO$  เป็นต้น เป็นกลุ่มของอนุภาคนาโนที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้เป็นเฟสกระจายมากที่สุด เนื่องจากสามารถช่วยยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและสามารถกระจายตัวในเฟสเนื้อพื้นได้เป็นอย่างดี [44] โดยในวิธีการที่มีการเติมอนุภาคขนาดเล็กลงไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนี้ ถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน [61, 62] แต่พบว่างานวิจัยที่มีการเติมอนุภาคขนาดเล็กลงไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้งในแบบครีมและแบบแข็งนั้น ยังคงไม่มีผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการที่กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ของโลหะบัดกรีดังกล่าวในการนำไปใช้งานจริง หรือในเชิงพาณิชย์ออกมา

อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงไปเนื้อโลหะบัดกรีจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ในการบัดกรีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น จุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก (Wettability) และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี โดยพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงไปจะส่งผลเสียต่อโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ได้ คือ ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการเปียกที่ลดลง แต่ส่งผลดี คือ ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ในรอยบัดกรีน้อยลงนั่นเอง [23, 27, 63-66]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิของซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) เติมลงไปโลหะบัดกรีเพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายให้กับวัสดุประกอบ ซึ่งเป็นอนุภาคที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ และคาดว่าน่าจะทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงในโลหะบัดกรีแบบครีมที่ดี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงถึง  $1975^{\circ}C$  ทำให้มีความเสถียรที่อุณหภูมิการบัดกรี (ไม่เกิน  $450^{\circ}C$ ) นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5.1 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nano-particles)

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นที่รู้จักกันในนามของ คาลาไมล์ เป็นธาตุธรรมชาติจาก สินแร่สมิธโซไนต์ (Smithsolnite) ซิงค์ออกไซด์เมื่อทำให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจะเรียกว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยจะอยู่ในรูปของผงอนุภาคละเอียด (Powder form) มีความบริสุทธิ์สูง สีขาว และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี มีคุณสมบัติสามารถป้องกันแสง UV-A และ UV-B ได้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติสามารถต้านทานแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ และสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นอีกด้วย จากการที่อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้านจึงมีวิธีการสังเคราะห์หลายวิธีด้วยกัน ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างหลากหลายรูปแบบ อาทิ เช่น อนุภาคนาโน (Nano-particles), ลวดนาโน (Nanowires), แท่งนาโน (Nanorods) และท่อนาโน (Nanotubes) เป็นต้น โดยในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Synthesis of ZnO Nano-particles) สามารถทำได้ 4 วิธีการ ได้แก่ วิธี Co-precipitation, Sol-gel, Hydrothermal และ Flame spray pyrolysis โดยในวิธี Sol-gel และ Hydrothermal เป็นวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนจากสารละลายที่เป็นที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในกระบวนการผลิตที่ต่ำ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดของอนุภาคได้อย่างแม่นยำ โดยสมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nano-particles) จะแสดงดังตารางที่ 2.7 [67]

ตารางที่ 2.7 สมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [67]

สมบัติทางกายภาพ	
ชื่อผลิตภัณฑ์	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
สูตรเคมี	ZnO
ลักษณะภายนอก	ผงโลหะสีขาว
โครงสร้างผลึกทั่วไป	Wurtzite (Hexagonal)
น้ำหนักโมเลกุล	81.39 g/mol
ความหนาแน่น	5.61 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1975 °C
จุดเดือด	2360 °C
ดัชนีการหักเหแสง	2.008
ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap)	3.37 eV
ค่าขยายตัวทางความร้อน	2.90 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$
ค่าการนำความร้อน	60 W/m.K
มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5.2 อนุภาคคอลลอยด์ (Colloids)

การศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคคอลลอยด์เริ่มได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันกับที่นาโนเทคโนโลยี และเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค (microfluidics) เริ่มเข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมหลายแขนง โดยอนุภาคคอลลอยด์มีการใช้งานมานานแล้วในหลากหลายสาขา ทั้งในอุตสาหกรรมสี เซรามิก อาหาร สกินแคร์ กระดาษ และเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น สำหรับปัจจัยหลักที่อนุภาคคอลลอยด์แตกต่างจากอนุภาคขนาดใหญ่ชนิดอื่น คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เนื่องจากมีขนาดของอนุภาคเล็กซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยอนุภาคเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลในรูปของ Surface force มากกว่า Body forces นั่นคือ การที่อนุภาคคอลลอยด์ไปกระทำต่อเส้นแสดงขอบเขต (Boundary) ของของไหล มีลักษณะสัมผัสโดยตรงกับผิวของเส้นแสดงขอบเขตของของไหลมากกว่าการไม่สัมผัสโดยตรงนั่นเอง

คอลลอยด์ เป็นสารผสมที่ดูเสมือนจะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแบ่งเป็นส่วนเนื้อเดียว (Continuous phase) และอนุภาคคอลลอยด์ (Dispersed phase) เป็นการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กในหลายทิศทาง โดยอนุภาคคอลลอยด์จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 nm จนถึง 10 mm ลอยตัวอยู่ในของไหล รวมตัวกันใหญ่กว่าโมเลกุลแต่จะไม่ใหญ่มากจนแยกชั้นชัดเจน จากอิทธิพลของ Surface force ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคขนาดเล็กขึ้นในของไหลส่งผลให้ของไหลมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น อนุภาคขนาดเล็กที่มารวมตัวกันจะขัดขวางการตกตะกอน และการแยกตัวของคอลลอยด์ โดยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคทรงกลมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1 [66] โดยที่  $x$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคอลลอยด์

$$\frac{\text{Surface Area}}{\text{Volume}} = \frac{\pi x^2}{\frac{\pi}{6} x^3} = \frac{6}{x} \quad (2.1)$$

มวลของอนุภาคนั้นจะมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับปริมาตร นั่นคือ ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่เล็กลงจะส่งผลต่อ Surface forces และ Body forces สำหรับ Body forces เป็นแรงที่มีลักษณะไม่สัมผัสโดยตรงกับผิวของ Boundary ซึ่งไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 2 ที่กล่าวว่าความเร่งของวัตถุจะแปรผันตามแรงที่กระทำต่อวัตถุ แต่จะแปรผกผันกับมวลของวัตถุ หรือ  $F = ma$  ตัวอย่างเช่น แรงโน้มถ่วง (Gravitational force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ที่เกิดขึ้นภายในของไหล เป็นต้น

ยิ่งมวลของอนุภาคและคอลลอยด์มีขนาดเล็ก (ในระดับนาโนเมตร) จะยิ่งทำให้เกิดพฤติกรรมในรูปของ Body forces ลดลงมากขึ้นไปอีก โดย Surface forces นั้นจะเป็นการแสดงถึงการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคด้วยแรงต่างๆ เช่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Van de Waals interaction) เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมนี้จะควบคุมการลอยตัวของคอลลอยด์ โดยแรงดังกล่าวอาจช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์ด้วยกันดึงดูด หรือผลักออกจากกันก็ได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของอนุภาค

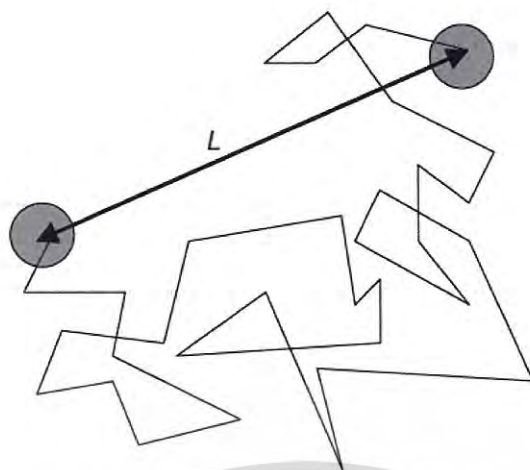
ชนิดของของไหล รวมทั้งระยะห่างระหว่างอนุภาค ซึ่งปกติแล้วถ้าอนุภาคไม่ได้ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ก็จะรวมตัวกันด้วยอิทธิพลของแรงแวนเดอร์วาล์วเสมออยู่แล้ว ด้วยเหตุนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ทำไมผงอนุภาคขนาดเล็กเมื่อมารวมตัวกันถึงทำให้ของไหลมีความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น หรือไหลได้ยากขึ้น นอกจากนี้มวลขนาดเล็กของอนุภาคคอลลอยด์ยังแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกับโมเลกุลเมื่อกระจายตัวอยู่ภายในของไหล ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคคอลลอยด์นี้สามารถแพร่กระจายในของไหลและเคลื่อนที่แบบสุ่มในทิศทางที่ๆไม่แน่นอนได้ ซึ่งต่อมาเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน [68]

### 2.2.5.3 การเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion)

จากการค้นพบว่าอนุภาคคอลลอยด์มีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน โดย โรเบิร์ต บราวน์ นักพฤกษศาสตร์ชาวสก๊อต ในปี ค.ศ. 1827 ได้รายงานการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางของ Pollen Grain (อนุภาคขนาด  $5 \mu\text{m}$ ) ในน้ำเป็นครั้งแรก เนื่องจากพลังงานความร้อนจะทำให้โมเลกุลของของไหลเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ไม่แน่นอน แสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ในของไหลถูกระบายโดยโมเลกุลของของเหลวตัวกลาง อนุภาคอื่น หรือผนังของภาชนะที่บรรจุ เป็นผลทำให้แต่ละอนุภาคมีเส้นทางการเดินในลักษณะ zigzag โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะถูกชนโดยโมเลกุลของของไหลตัวกลางที่อัตราเร็ว  $10^{21}$  R/s อัตราเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลของอนุภาคมีขนาดเล็กลง ถ้าอนุภาคมีขนาดมากกว่า  $5 \mu\text{m}$  แรงที่เกิดจากการชนจะไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้จึงไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน และอนุภาคจะเกิดการนอนก้น ทั้งนี้ถ้าความหนืดของตัวกลางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนลดลงจนกระทั่งหยุดการเคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนจึงเหมาะสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ในของไหลได้ ดังในสมการที่ 2.2 โดยที่  $L$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาค  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และ  $t$  คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัดกรี ดังนี้

$$L = \sqrt{2\alpha t} \quad (2.2)$$

แต่ถึงอย่างไรก็ตามสมการข้างต้นไม่สามารถนำมาใช้คำนวณระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากจุดเริ่มต้นที่แท้จริงได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่ได้เป็นเส้นตรงดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 แต่ในสมการดังกล่าวจะบ่งบอกว่า ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กจะส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนในอัตราที่สูงขึ้น [68]

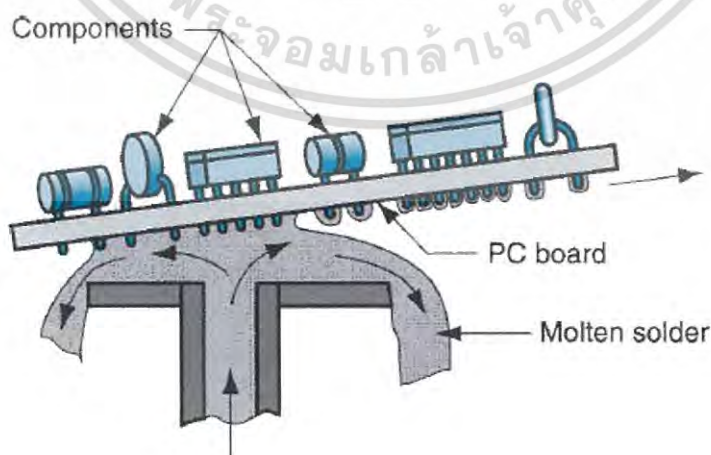


รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาคคอลลอยด์ [68]

### 2.2.6 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

โดยทั่วไปแล้วการบัดกรีจะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการเล่นประสาน (Brazing) แตกต่างกันที่โลหะเติมที่ใช้ในการบัดกรีจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  โดยนอกจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการอื่นๆดังต่อไปนี้

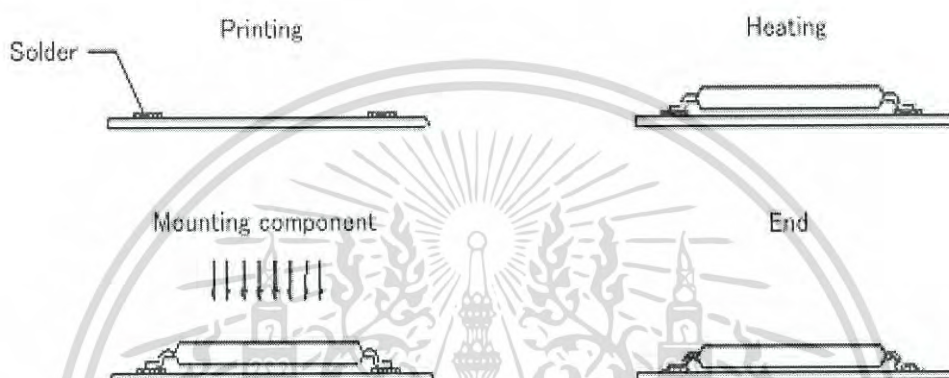
1) การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board: PCB) โดยแผ่น PCB ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่เคลื่อนที่ผ่านไปยังอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลว และของเหลวดังกล่าวจะถูกดูดและพ่นไปยังด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้โลหะบัดกรีสามารถทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบคลื่น [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้สำหรับการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Surface mount components กับแผ่นวงจรพิมพ์ หรือแผ่น PCB โดยในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Solder paste) โลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกพิมพ์ลงบนตำแหน่งที่ต้องการบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายแล้วเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [48, 50]



รูปที่ 2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ [69]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี

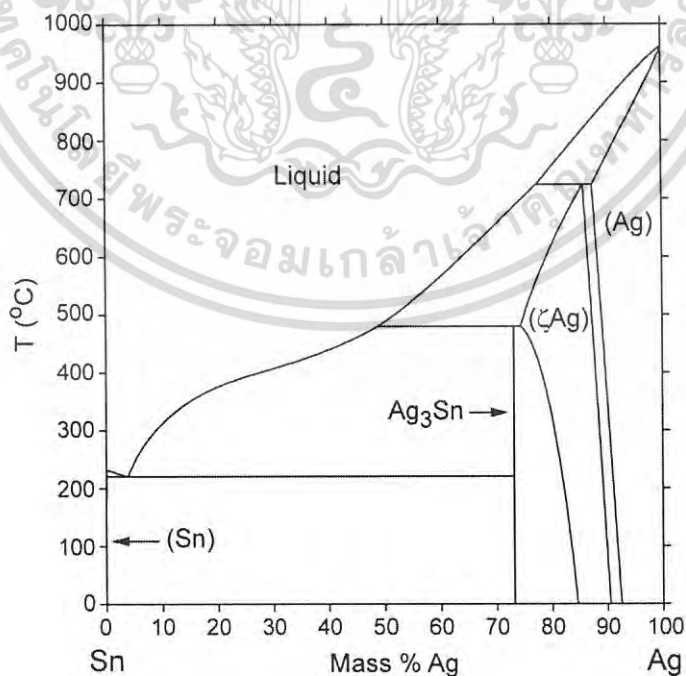
### 2.2.7.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน (Sn-Ag)

ปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงิน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $220.3^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมินี้จะถูกเรียกว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งอุณหภูมิยูเทคติกเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เฟสของของเหลวจะยังคงอยู่ในระบบ และสภาวะที่จุดยูเทคติกนี้ เฟสของเหลวจะเปลี่ยนสภาพเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส โดยในสมการที่ 2.3 จะแสดงถึงปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุกและเงิน ซึ่งจะเกิดเป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  และเฟสของ Sn-rich ขณะที่ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน จะแสดงดังตารางที่ 2.8



ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน

เฟส	Mass %Ag	Mass %Sn
Liquid	3.58	96.42
$\text{Ag}_3\text{Sn}$	73.17	26.83
Sn	0.07	99.93

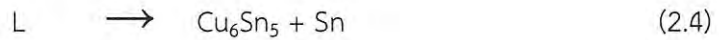


รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

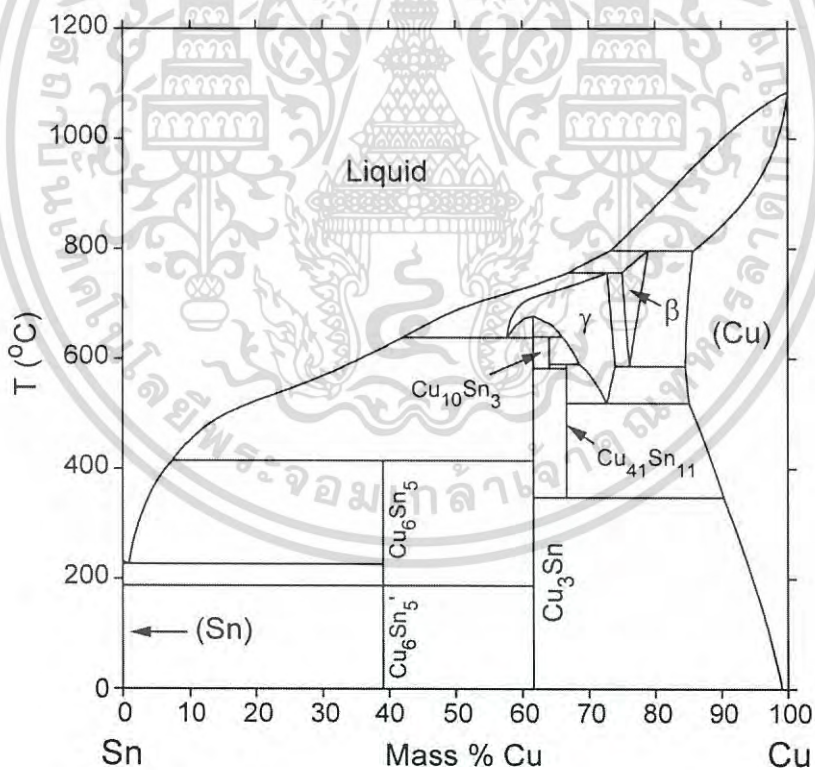
### 2.2.7.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง ก็คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่จุดยูทเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  กับเฟส Sn-rich ดังสมการที่ 2.4 ขณะที่ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง จะแสดงดังตารางที่ 2.9



ตารางที่ 2.9 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง

เฟส	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	0.89	99.11
$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$	39.07	60.93
Sn	0.01	99.99

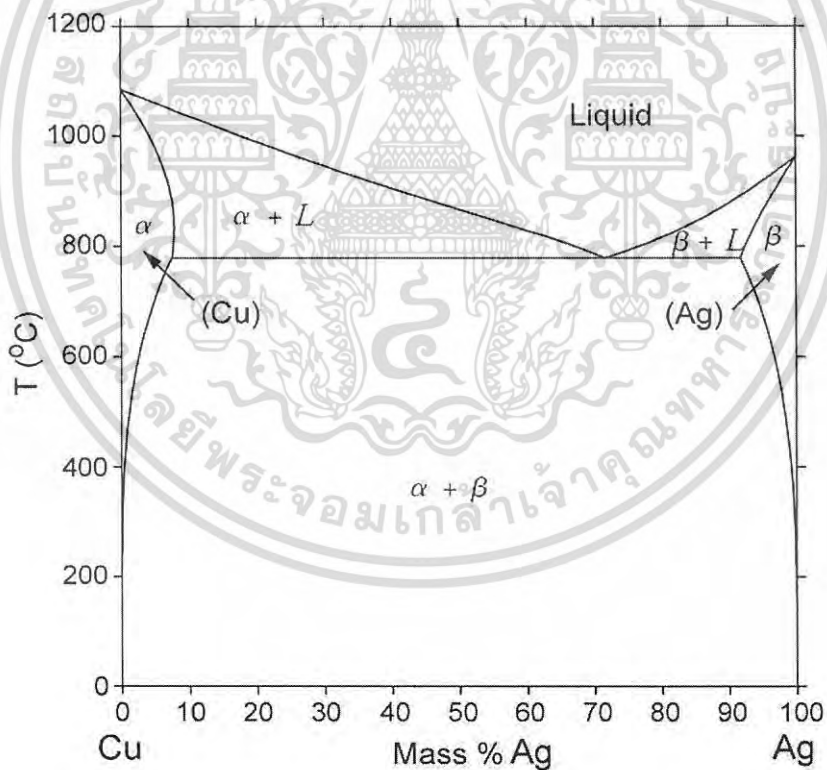


รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง (Ag-Cu)

โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งสมบูรณ์ได้ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเดียวกัน (FCC) โดยโครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณที่น้อย อีกนัยหนึ่งก็คือ มีปริมาณของอะตอมเงินน้อยที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมทองแดง และในขณะเดียวกันความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สารละลายของแข็งที่มีปริมาณเงินอยู่มาก (Ag-rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงอยู่ในปริมาณมาก (Cu-rich) สารละลายของแข็งดังกล่าวถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดที่ละลายได้บางส่วน (Partial solid solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา ( $\alpha$ ) และเบตา ( $\beta$ ) อยู่ด้วยกัน และในบริเวณระหว่างเส้นของแข็งสมบูรณ์ (สารละลายของแข็งทั้งสองเฟส) นี้กับเส้นของเหลวสมบูรณ์จะมีส่วนประกอบของของเหลวอัลฟา และของเหลวเบตา และสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งของเฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับทองแดง ก็คือ ณ จุดที่เกิดการบรรจบกันของเส้นของเหลวสมบูรณ์กับเส้นของแข็งสมบูรณ์ ที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 wt% และที่อุณหภูมิเท่ากับ  $780^{\circ}\text{C}$  โลหะผสมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ยูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.6

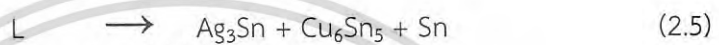


รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

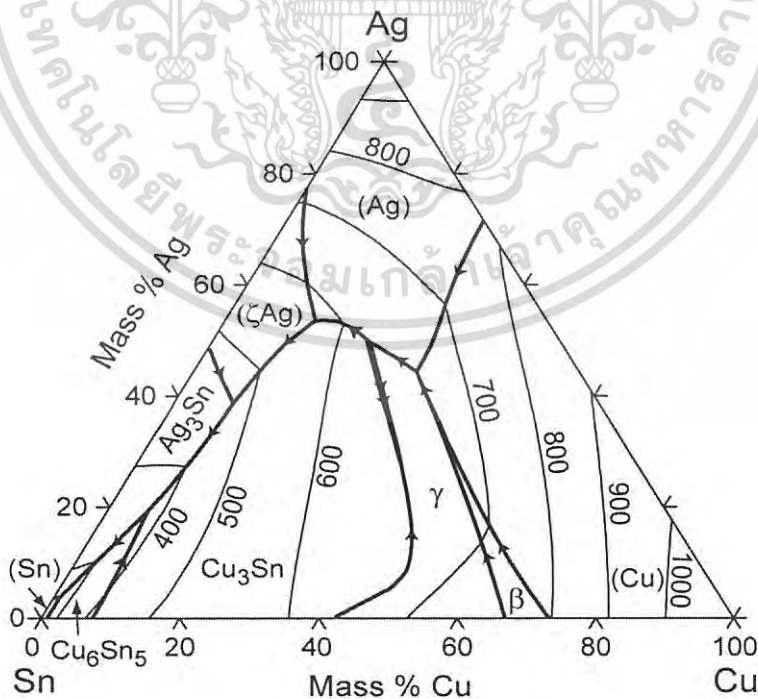
### 2.2.7.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu)

จากเฟสไดอะแกรม 3 ธาตุ (Ternary equilibrium diagram) ของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง ซึ่งส่วนผสมที่นำมาทำการศึกษานี้จะเป็นส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม 3 ธาตุ ซึ่งเฟสไดอะแกรมโลหะผสมดีบุก-เงิน-ทองแดง ในรูปที่ 2.7 ปฏิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง นี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 217°C โดยเฟสของเหลวจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแข็ง 3 เฟส คือสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$ ,  $Cu_6Sn_5$  และเฟส Sn-rich ดังแสดงดังสมการที่ 2.5 ขณะที่ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง จะแสดงดังตารางที่ 2.10 ตามลำดับ



ตารางที่ 2.10 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง

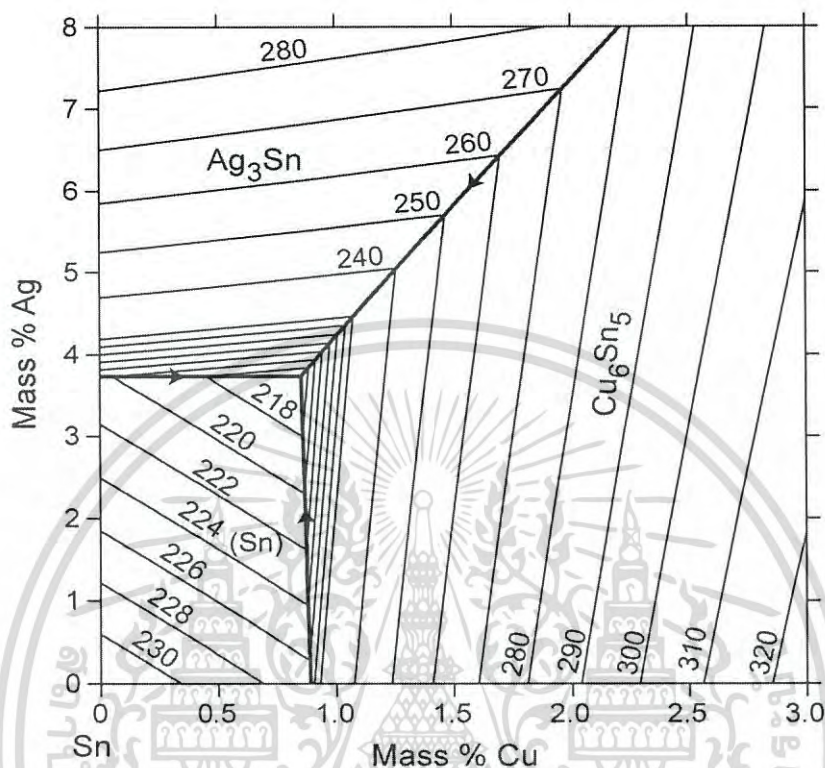
เฟส	Mass %Ag	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	3.73	0.85	95.42
$Ag_3Sn$	73.17	0	26.83
$Cu_6Sn_5$	0	39.07	60.93
Sn	0.07	0	99.93



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 2.8 ได้แสดงให้เห็นถึงส่วนขยายของอัตราส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง ซึ่งอัตราส่วนผสมที่จุดยูเทคติกโดยประมาณ คือ  $95.44\text{Sn}-3.7\text{Ag}-0.86\text{Cu}$  ที่อุณหภูมิ  $217^{\circ}\text{C}$



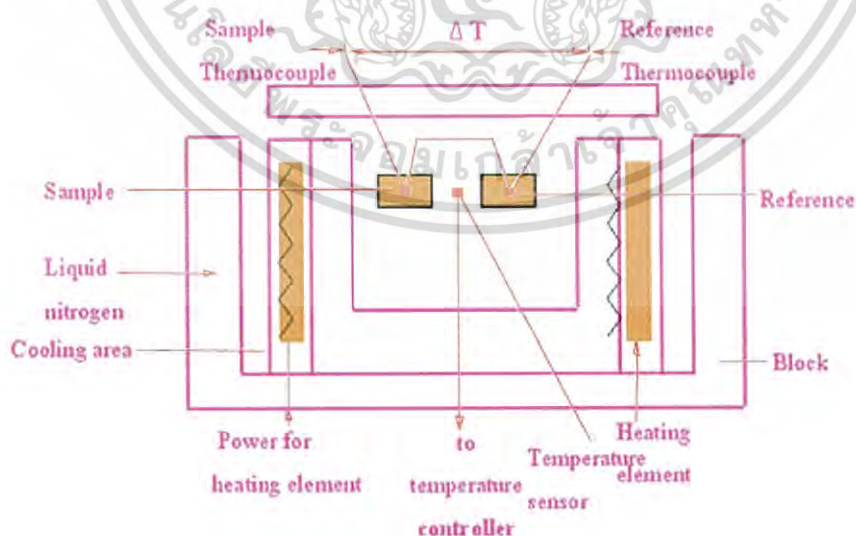
รูปที่ 2.8 ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง [70]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.8 เครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติ

### 2.2.8.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือที่เรียกกันสั้นๆ ว่าเครื่อง DSC เป็นเครื่องที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่างเมื่อถูกเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุมไว้ โดยยังมีอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้วัดปริมาณความร้อนเช่นกัน เรียกว่า DTA แต่ DSC เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากกว่า โดยทั้ง DTA และ DSC มีหลักการทำงานเหมือนกัน คือ สารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาจะถูกบรรจุอยู่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาดเล็ก หากการทดสอบจำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ถ้วยที่ใช้บรรจุสารควรทำจากทองแดงหรือแกรไฟต์ จากนั้นสารดังกล่าวจะถูกให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจะถูกตรวจวัดและแปรผล โดยทั่วไปขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 mg ทั้งนี้การให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง (Heat flow) และสารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ค่าพลังงานความร้อน ( $d\Delta Q/dt$ ) ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกให้ในปริมาณที่เท่ากัน และจะถูกบันทึกไว้ เพื่อนำมาพลอตกราฟหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ กราฟที่ได้จะเรียกว่า เทอร์โมแกรม (Thermogram) ข้อดีของเทคนิค DSC คือ พื้นที่ใต้พีคจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเอนทัลปี (Enthalpy) หรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน ความร้อนของการหลอมเหลว หรือ เอนทัลปีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยตัวอย่างของ

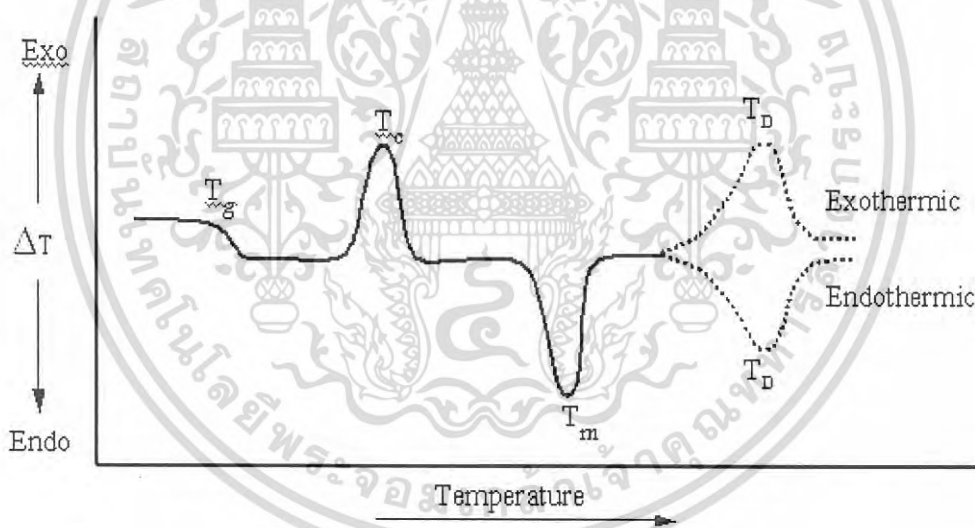


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC [71]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมแกรมที่ได้จาก DSC แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานจะเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว ต้องให้ความร้อนสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้อ่างอิงเพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของสารตัวอย่าง และสารอ่างอิงให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังสารตัวอย่างมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังสารอ่างอิงนั้น จะขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นว่าเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือ DSC นั้นถือเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และใช้สำหรับการวิจัยจำนวนมาก ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น จุดหลอมเหลว (Melting Point), อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature;  $T_g$ ) และความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability) เป็นต้น [71]

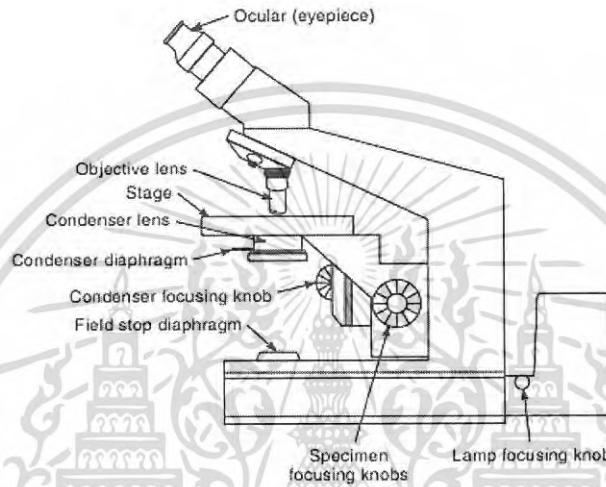


รูปที่ 2.10 แผนภาพเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC [71]

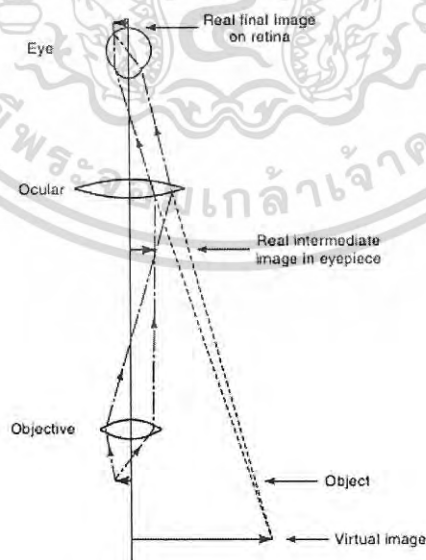
### 2.2.8.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้นโดยใช้หลักการสะท้อนแสง เหมาะสำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์ บางชนิดอาจมีความมิดของภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Metallography) เป็นการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก โดยการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบพื้นผิวของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อแสงไฟจากหลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสงจะถูกรวบรวมแสงโดยเลนส์รวมแสงไปตกที่วัตถุที่วางบนแท่นวางวัตถุ จากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุจะเป็นตัวขยายวัตถุให้ได้ภาพที่ใหญ่ขึ้น แล้วจะส่งต่อไปยังเลนส์ใกล้ตา เพื่อขยายภาพเป็นสุดท้าย โดยสามารถปรับกำลังขยายสูงสุดได้ถึง 500 เท่าอีกด้วย



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [72]

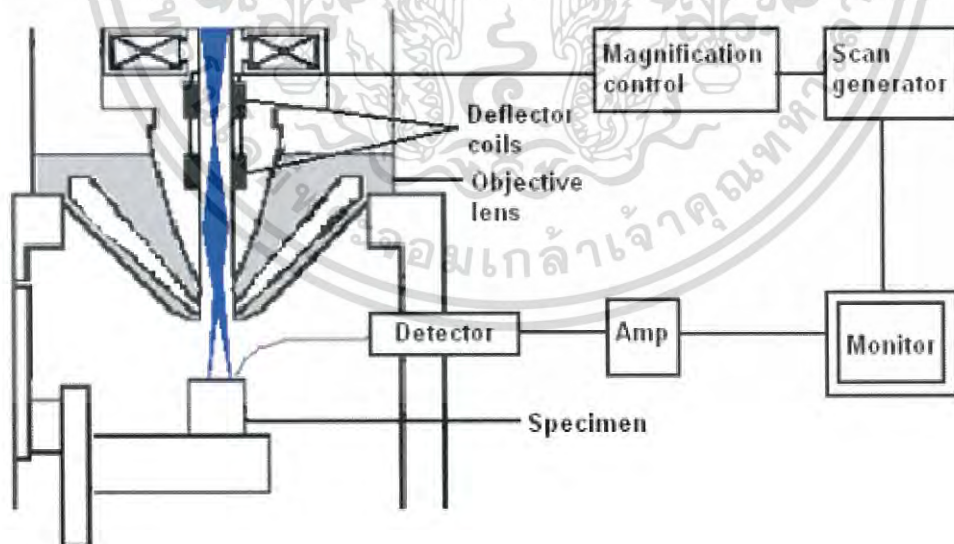


รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [72]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.8.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron microscope, FESEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง (FESEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ เป็นอุปกรณ์ยิ่งลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนเป้าหมายซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง และสแกนได้ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดด้วยพลังงานสูง ภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะหักเหโดยเลนส์ไฟฟ้าได้ออกมาเป็นลำแสงขนาดเล็กตกกระทบไปยังวัตถุ จุดบนวัตถุ และมุม โดยความเร็วของอิเล็กตรอนจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นผิวของวัตถุก่อให้เกิดเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ออกมา โดยสัญญาณนี้จะถูกขยายและเปลี่ยนไปภาพที่สามารถมองเห็นได้บนจอภาพ สามารถบันทึกและนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปได้ โดยแผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูงจะแสดงดังรูปที่ 2.13 ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ SEM โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) รุ่น S-4700 ยี่ห้อ HITASHI เนื่องจากให้ภาพที่มีความละเอียดสูงและใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ที่ 2.5 nm ที่ 1 kv และ 1.5 nm ที่ 15 kv ตามลำดับ สำหรับตัวชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจำเป็นต้องผ่านการขัดผิวหน้าและทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าชิ้นงานดังกล่าวไม่นำไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำ แพททินัม หรือคาร์บอน เป็นต้น [73, 74]

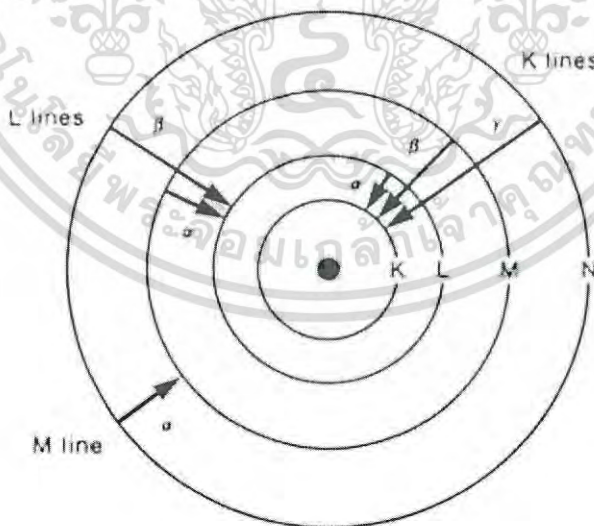


รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.8.4 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

เป็นเครื่องวิเคราะห์หาธาตุ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียม มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือที่มีลักษณะเป็นผงได้ กล่าวคือการวิเคราะห์ EDS ใน FE-SEM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ โดยใช้หลักการยิงรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ไปที่ชิ้นงานตัวอย่างและวัดระดับการกระจายของพลังงาน (Energy dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ทำให้ทราบว่าภายในชิ้นงานดังกล่าวมีธาตุอะไรอยู่บ้าง ในปริมาณเท่าไร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศปกติ สุญญากาศ และก๊าซฮีเลียมเพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานจริง สำหรับรังสีเอ็กซ์ คือ โฟตอน (Photon) เป็นรังสีที่มีพลังงานมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) แต่น้อยกว่ารังสีแกมมา (Gamma rays) โดยรังสีเอ็กซ์จะมีพลังงานต่ำสุดที่ 10 eV และสูงสุดที่ 100 keV ซึ่งการมีอยู่ของอิเล็กตรอนในอะตอมจะอยู่ในสภาวะการยึดเหนี่ยวกัน และจากแบบจำลองอะตอมของโบร์และกลศาสตร์ควอนตัมมีสมมติฐานว่าอิเล็กตรอนมีวงโคจรและตำแหน่งที่แน่นอนอยู่รอบนิวเคลียส และจากหลักการควอนตัมพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีค่าเฉพาะ คือ อิเล็กตรอนสามารถมีพลังงานในบางค่าเท่านั้น โดยระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนแปลงไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่ประกอบด้วยระดับชั้นพลังงานย่อย (sub shell) ได้ มีเลขควอนตัมที่บ่งบอกถึงระดับชั้นพลังงานหลัก (Shell) แสดงด้วยเลขควอนตัมหลัก (Principal quantum number)  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็มเริ่มจากหนึ่ง หรือบางครั้งอาจแสดงด้วยอักษร K, L, M แทนเลข 1, 2 และ 3 ได้ ดังรูปที่ 2.14



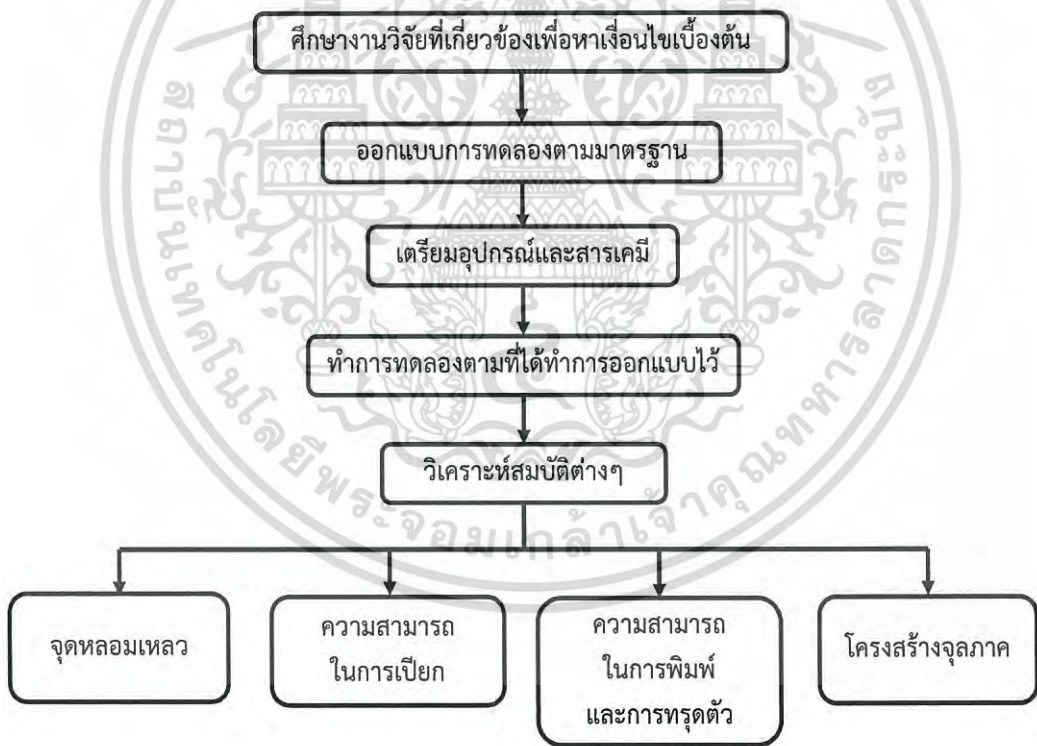
รูปที่ 2.14 แบบจำลองอะตอมของโบร์ [75]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO ชนิดใหม่ขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการออกแบบการทดลองตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การทรวดตัว และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพเป็นโลหะบัดกรีแบบครีมชนิดใหม่จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 รวมทั้งเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วอีกด้วย



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

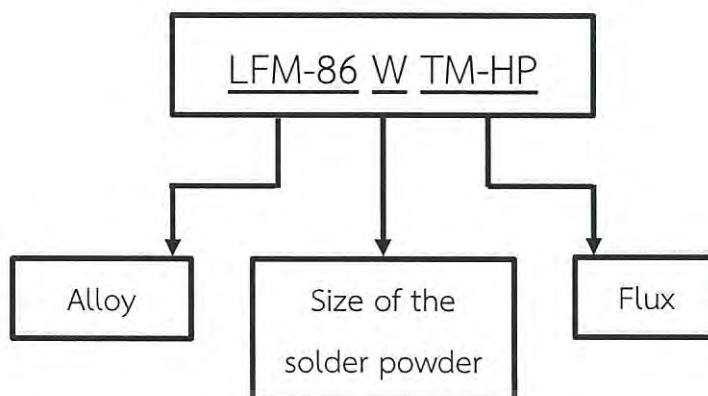
#### 3.1.1 โลหะบัดกรี SAC0307

สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu (SAC0307) รุ่น LFM-86W TM-HP จาก บริษัท อัลมิต ไทยแลนด์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะบัดกรี SAC ที่มีองค์ประกอบของธาตุ Ag ต่ำ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วน ได้แก่ ผงโลหะผสม (Solder powder) และ ฟลักซ์ (Flux) โดยขนาดของผงโลหะบัดกรีจัดอยู่ในกลุ่ม W ตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 20-38  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 3.3 สำหรับในโลหะบัดกรีชนิดนี้มีส่วนผสมของฟลักซ์ 12 % อยู่ในกลุ่มของ TM-HP ที่มีคุณสมบัติที่ดี คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากช่วยให้ความหนืดของโลหะบัดกรีลดลง ส่งผลดีต่อกระบวนการพิมพ์บนแผ่นรองทองแดงที่สามารถทำได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ฟลักซ์ในกลุ่มดังกล่าวยังช่วยให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิบัดกรีที่สูงขึ้น และยังทำให้ผิวหน้าของโลหะพื้นมีสิ่งสกปรกจำพวกออกไซด์มาเกาะลดลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี SAC0307 นี้ยังคงมีจุดหลอมเหลวที่สูงอยู่ในช่วง 217-227°C และเมื่ออยู่ในรูปของโลหะบัดกรีแบบครีม ความหนาแน่นของโลหะบัดกรีจะลดลงเหลือเพียง 4.16  $\text{g/cm}^3$  ขณะที่หากอยู่ในรูปอัลลอยจะมีความหนาแน่นที่ 7.4  $\text{g/cm}^3$  สำหรับสมบัติพื้นฐานอื่นๆของโลหะบัดกรี SAC0307 รุ่น LFM-86W TM-HP แสดงดังตารางที่ 3.1 [76]



รูปที่ 3.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วพื้นฐานแบบครีม SAC0307 [76]

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307 [76]

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด
ชื่อผลิตภัณฑ์	SRC Solder Paste LFM-86W TM-HP
องค์ประกอบหลัก	Sn 87.12 %, Ag 0.26 %, Cu 0.62 % และ Flux 12 %
ขนาดอนุภาคของผงโลหะ	20-38 $\mu\text{m}$
ลักษณะภายนอก	เนื้อครีมสีเทาคล้ายยาสีฟัน
ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus-Liquidus Temperatures)	217-227°C
ความหนาแน่น	4.16 $\text{g/cm}^3$
ความสามารถในการละลายน้ำ/สารละลาย	ไม่ละลาย
ความหนืด	150-300 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
การเก็บรักษา	หลีกเลี่ยงการเก็บรักษาสารใกล้กับสารชนิดที่ทำให้ปฏิกิริยาอย่างกับบรรยากาศ หรือ สารที่มีความเป็นกรด/เบสสูง และควรเก็บรักษาในภาชนะปิด ภายใต้ อุณหภูมิต่ำ 1-10°C
ข้อควรระวัง	หลีกเลี่ยงการสูดดม หรือสัมผัสบริเวณผิวหนัง โดยตรง เพราะอาจทำให้เกิดอาการแพ้ หรือระคายเคือง รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของอวัยวะภายในในระยะยาวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 อินเดียม

ในงานวิจัยนี้อินเดียม (In) เป็นหนึ่งในสารที่ใช้ในการพัฒนาโลหะบัดกรีในงานวิจัยนี้ เป็นผงโลหะบริสุทธิ์ 99.99 % จาก บริษัท Aldrich จำกัด ดังรูปที่ 3.4 โดยอินเดียมนี้จัดเป็นธาตุในกลุ่มของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ คือ  $156.6^{\circ}\text{C}$  มีขนาดอนุภาคเล็ก คือ -100 mesh หรือ  $< 149\ \mu\text{m}$  มีความสามารถในการยับยั้งการเกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวของโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี มีความมันวาวรวมทั้งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนสูง สำหรับสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของอินเดียมทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2 [77]



รูปที่ 3.4 ผงโลหะอินเดียมบริสุทธิ์ 99.99%

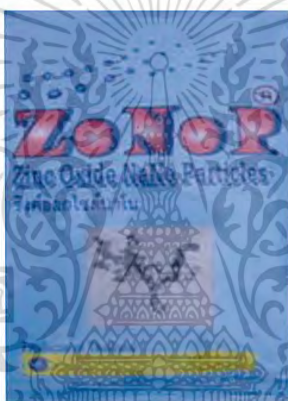
ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของผงโลหะอินเดียม [77]

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด
ชื่อผลิตภัณฑ์	Indium-powder, 99.99 % trace metals basis
สูตรเคมี	In
น้ำหนักโมเลกุล	114.82 g/mol
ขนาดอนุภาคของผงโลหะ	-100 mesh หรือ $< 149\ \mu\text{m}$
ลักษณะภายนอก	เป็นผงโลหะสีเทาโทนสว่าง
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	$156.6^{\circ}\text{C}$
ความหนาแน่น	$7.3\ \text{g/cm}^3$
การเก็บรักษา	เป็นสารประเภทไวไฟ ควรเก็บในภาชนะปิดและอากาศถ่ายเทสะดวก
ข้อควรระวัง	หลีกเลี่ยงการสัมผัสบริเวณดวงตา และผิวหนังโดยตรง เพราะอาจทำให้เกิดอาการแพ้ หรือระคายเคืองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nano-particles) เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดใหม่ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 3.5 โดยจะทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรี SAC0307 เปลี่ยนไปจากเดิมทั้งทางบวกและลบ มีลักษณะเป็นผงสีขาวบริสุทธิ์ 93.73 % มีจุดหลอมเหลวสูง 1970°C และมีอนุภาคขนาดเล็ก 20-40 nm ดังผลการทดสอบลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโน ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) ในรูปที่ 3.6 นอกจากนี้ยังเป็นอนุภาคนาโนที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมประเทศไทย โดย บริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด ทำให้มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับสมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ดังกล่าวจะแสดงดังตารางที่ 3.3 [78]



รูปที่ 3.5 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [78]



รูปที่ 3.6 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน ZnO [79]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

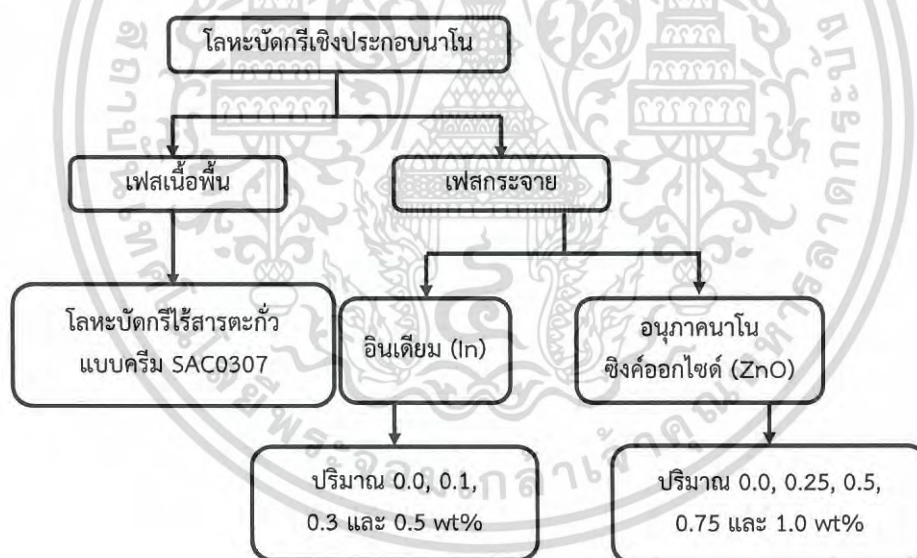
ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [78]

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด
ชื่อผลิตภัณฑ์	ZnO Oxide Nanopowder
สูตรเคมี	ZnO
ลักษณะภายนอก	เป็นผงสีขาว
ขนาดอนุภาค	20 – 40 nm
ค่า pH	8 - 9
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	1970°C
ความหนาแน่น	5.61 g/cm <sup>3</sup>
พื้นที่ผิวจำเพาะ	26.22 m <sup>2</sup> /g
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีในกรดและเบส
การเก็บรักษา	ควรเก็บรักษาในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้อง หรือที่อุณหภูมิ < 50°C
ข้อควรระวัง	หลีกเลี่ยงการสูดดม หรือ การสัมผัสบริเวณดวงตาและผิวหนังโดยตรง เพราะอาจทำให้เกิดอาการแพ้ หรือระคายเคืองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

สำหรับการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน SAC0307-xIn-yZnO ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งองค์ประกอบของวัสดุประกอบได้เป็นสองส่วน คือ เฟสเนื้อพื้น (Matrix) และ เฟสกระจาย (Dispersed phase) ดังรูปที่ 3.7 นั่นคือ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม SAC0307 อินเดียม (In) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ตามลำดับ โดยที่  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% และ  $y$  มีค่าเท่ากับ 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 wt% ใช้แท่งคนสารคนโลหะบัดกรีเล็กน้อยเพื่อให้ฟลักซ์เข้ากับเนื้อโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี จากนั้นนำองค์ประกอบต่างๆตามเงื่อนไขที่กำหนดในแต่ละอันผสมกันในบีกเกอร์ด้วยวิธีเชิงกล โดยใช้แท่งแก้วคนสารดังกล่าวให้เข้ากัน เพื่อให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอินเดียมสามารถกระจายตัวเข้ากับโลหะบัดกรีแบบคริม SAC0307 ได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 min โลหะบัดกรีจะกลายเป็นโลหะบัดกรีนาโนเชิงประกอบอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

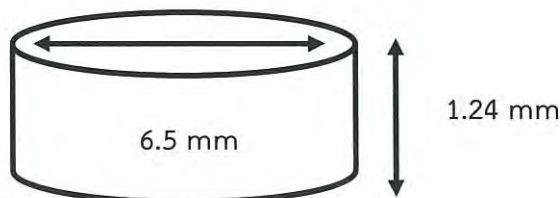
### 3.3 การเตรียมโลหะขึ้นงานสำหรับการบัดกรี

การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะใช้แผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 mm [78] เป็นโลหะพื้นในการบัดกรี ซึ่งมีความหยาบผิว  $R_a$  0.06  $\mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยก่อนนำมาใช้งานควรทำความสะอาดแผ่นรองทองแดง ด้วยการนำแผ่นรองทองแดงแช่ลงในสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมบนแผ่นรองทองแดงให้หลุดออกไป ซึ่งก่อนนำไปใช้งานทุกครั้งควรทำการเป่าให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และเก็บรักษาไว้ในกล่องสุญญากาศ เพื่อป้องกันการความชื้นและสิ่งแปลกปลอมมาเกาะบริเวณพื้นผิวแผ่นรองทองแดง

รูปที่ 3.8 แผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ 99.99%

### 3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

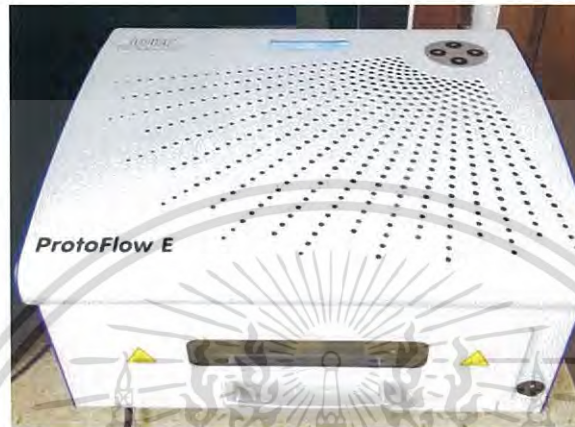
ทำการเตรียมบล็อกพิมพ์โลหะบัดกรี โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 50x50x1.24 mm สำหรับทำขึ้นทดสอบทรงกระบอก กำหนดขนาดของรูสำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีลงไป ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm และปริมาตร 0.041  $\text{cm}^3$  ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบและขนาดของบล็อกพิมพ์ได้เป็นไปตามมาตรฐานของ JIS Z3198-3:2003 [80] ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3

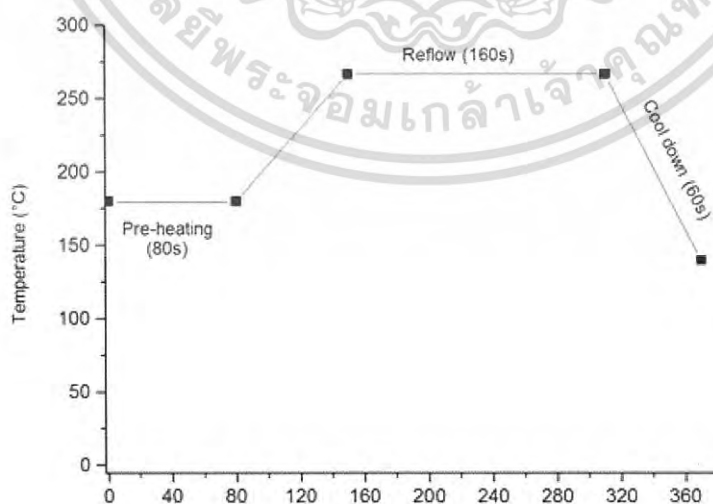
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ทำการผสมไว้ในแต่ละเงื่อนไข พิมพ์อัดลงในบล็อกพิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยมีแผ่นรองทองแดงที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ววางอยู่ด้านล่าง จะได้แผ่นรองทองแดงที่ถูกพิมพ์ด้วยโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน จากนั้นนำไปทำการบัดกรีด้วยวิธีรีโฟลว์ (Reflow soldering) ในเตาอบรีโฟลว์ รุ่น ProtoFlow E ยี่ห้อ LPKF Laser & Electronics AG ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เตาอบรีโฟลว์

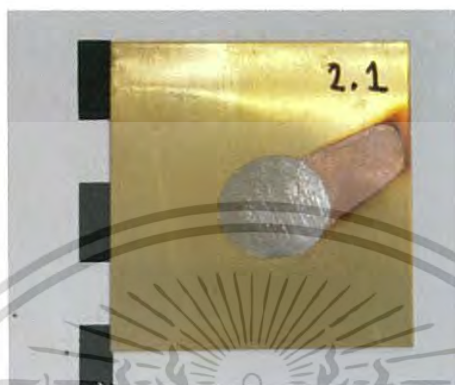
สำหรับช่วงอุณหภูมิในการรีโฟลว์ได้กำหนดให้มีความเหมาะสมตามมาตรฐาน J-STD-020 [81] โดยกำหนดช่วง Preheat and Soak ที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 80 s ช่วง Reflow ที่อุณหภูมิ  $267^{\circ}\text{C}$  (เหนืออุณหภูมิ Liquidus  $40^{\circ}\text{C}$ ) เป็นเวลา 210 s และช่วง Cool down เป็นเวลา 60 s ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการรีโฟลว์ตามมาตรฐาน J-STD-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้ว จะนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สมบัติต่างๆเป็นลำดับถัดไป ซึ่งการทดสอบในแต่ละเงื่อนไขจะทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ รวมทั้งเพื่อช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และในรูปที่ 3.12 จะแสดงให้เห็นถึงชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานตัวอย่างหลังการบัดกรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติ

#### 3.5.1 จุดหลอมเหลว

นำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ทำการผสมได้ในแต่ละเงื่อนไข นำไปทดสอบอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนไปจากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 ในรูปของอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature) และอุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือ Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® ดังรูปที่ 3.13 กำหนดช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 25 ถึง 350°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 20 mL/min และควบคุมอัตราการให้ความร้อน (Heating) และอัตราการเย็นตัว (Cooling) ที่ 10°C /min



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DSC)

#### 3.5.2 ความสามารถในการเปียก

หลังจากการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ สามารถวัดความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง โดยทดสอบการกระจายตัว (Spread test) ในรูปของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

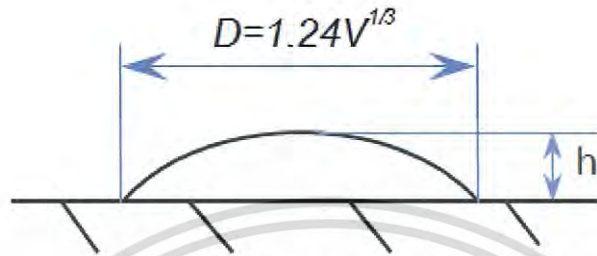
การวัดการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง จะใช้วิธีการวัดค่าความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ (Micrometer) เพื่อนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณเป็นค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor:  $S_f$ ) ดังสมการที่ 3.1 [82]

$$S_f = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย และ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ โดยมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 3.2 [82] โดย  $V$  คือปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ และรูปที่ 3.14 แสดงลักษณะรูปร่าง ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 3.14 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรี

$$D = 1.24V^{1/3} \tag{3.2}$$

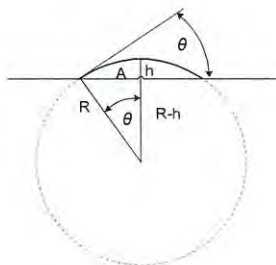
2) คำนวณหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio:  $S_r$ ) ได้ดังสมการที่ 3.3 [82]

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \tag{3.3}$$

นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงยังสามารถวัดได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 [82] และในรูปที่ 3.15 ได้แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ามุมสัมผัส

$$\sin \theta = \frac{2}{(A/h + h/A)} \tag{3.4}$$

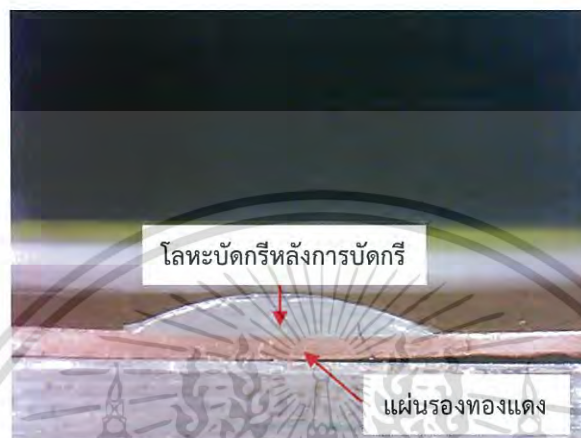
เมื่อ  $\theta$  คือ มุมสัมผัส  $A$  คือ รัศมีของโลหะบัดกรี และ  $h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรี



รูปที่ 3.15 มุมสัมผัสบนแผ่นรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ในการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง จะมีการนำซอฟต์แวร์ Image-pro Express มาใช้ในการวัด เพื่อช่วยคำนวณหาพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีจากภาพถ่ายหลังการหลอมละลายและแข็งตัวของบนแผ่นรองทองแดง ซึ่งลักษณะชิ้นงานหลังการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะการแผ่กระจายของชิ้นงานทดสอบบริเวณด้านข้าง

### 3.5.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว

สำหรับความสามารถในการพิมพ์จะทำการวัดโดยใช้การพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง แล้วทำการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ติดบนแผ่นรองทองแดง เพื่อนำไปคำนวณค่าความสามารถในการพิมพ์ ดังสมการที่ 3.5 ดังนี้ [83]

$$P \% = \frac{V_1}{V_0} * 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	P%	คือ ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี
	$V_0$	คือ ปริมาตรในอุดมคติของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง
	$V_1$	คือ ปริมาตรจริงของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง

สำหรับการทดสอบการหลุดตัวหลังการพิมพ์ตามวิธีการของ Evans และ Beddow [84] จะเริ่มจากการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง ซึ่งโดยทั่วไปในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมจะทำการพิมพ์ผ่าน Stencil ที่มีลวดลายใช้เครื่องพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นเครื่องช่วยยึดแผ่น Stencil ให้ตำแหน่งการพิมพ์มีความถูกต้องและแม่นยำ ช่วยให้สามารถทำการพิมพ์โลหะบัดกรีได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับลวดลายในการพิมพ์ควรมีการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีด้วย จากการศึกษาที่ได้นำโลหะบัดกรีแบบครีมที่นำมาใช้งานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) จะพบว่าภายในโลหะบัดกรีแบบครีมจะประกอบด้วยโลหะบัดกรีแบบเม็ด (Solder ball) เรียงตัวกันลักษณะเป็นแถวอยู่ในแนวยาว ซึ่งการออกแบบลวดลายของแผ่น Stencil ให้มีความเหมาะสมกับขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีนั้น ขนาดของ Stencil ในแต่ละช่องควรมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีคูณด้วย 5 [55] แต่สำหรับในงานวิจัยนี้เมื่อพิมพ์โลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงผ่าน Stencil เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะนำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C เป็นเวลา 30 min ด้วยเครื่องตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNIVERSAL OVEN U ที่สามารถตั้งค่ากำหนดเวลา อุณหภูมิ อัตราการเป่าลม และอัตราการเปิดช่องลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม



รูปที่ 3.18 ตู้อบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 ดังนี้ [55, 84]

$$S_L \% = 100 \left[ \frac{D_{stencil} - D_{pattern}}{2} \right] \quad (3.6)$$

เมื่อ  $S_L\%$  คือ การหลุดตัวของโลหะบัดกรี  
 $D_{stencil}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Stencil (mm)  
 $D_{pattern}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีหลังการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ (mm)

### 3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี

#### 3.5.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

สำหรับในเบื้องต้นของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เพื่อตรวจสอบเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง และลักษณะการกระจายตัวของโลหะบัดกรี เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อบัดกรี เริ่มต้นด้วยการนำชิ้นงานที่เย็นตัวหลังจากการทดสอบการกระจายตัว มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ตัดชิ้นงานบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่หลอมบนแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 3.19 เครื่องตัดแบบแรงโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดแล้วไปขึ้นรูปตัวเรือนด้วยการหล่อเรซิน และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 100, 300, 600, 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ เริ่มขัดจากกระดาษเบอร์ที่มีความหยาบมากไปน้อย แล้วจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 และ 1.0  $\mu m$  ด้วยเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด

หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงานเรียบร้อยแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เพื่อตรวจสอบขอบชิ้นงานบริเวณแผ่นรองทองแดง และโลหะบัดกรีว่ายังมีรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดกระดาษอยู่หรือไม่ รวมทั้งดูความสะอาดของชิ้นงาน และเก็บรักษาชิ้นงานในกล่องสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้นหลังทำการตรวจสอบ

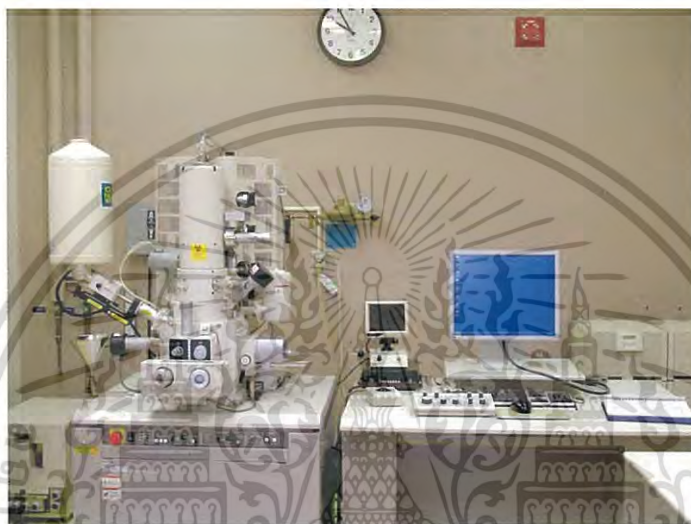


รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบเคมี

ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-4700 ดังรูปที่ 3.22 และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ยี่ห้อ IXRF SYSTEMS รุ่น Sphinx- 130 S-4700 ตามลำดับ



รูปที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (FESEM) และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) [85]

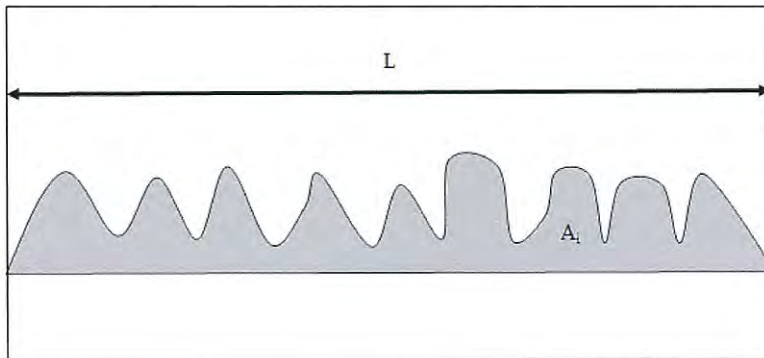
### 3.5.4.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

โดยหลังจากการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแล้ว จะทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อบัดกรี โดยเลือกภาพ FESEM ของแต่ละเงื่อนไขที่ขนาดกำลังขยายภาพเท่ากันมาใช้ในการคำนวณ สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการวัด คือ Image-Pro Express ดังแสดงในรูปที่ 3.23

ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในแต่ละชั้นหารด้วยความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังสมการการคำนวณที่ 3.7 [86]

$$h = \frac{A}{L} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

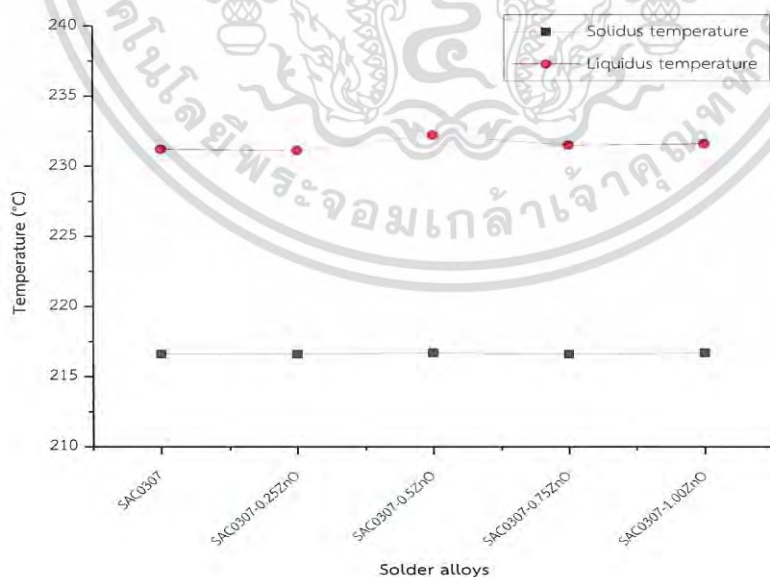
เมื่อ  $h$  คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )  $A_i$  คือ พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}^2$ ) และ  $L$  คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ ) สำหรับการวัดความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จะทำการแยกวัดแต่ละชั้นในกรณีที่เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากกว่าสองชั้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดง

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว

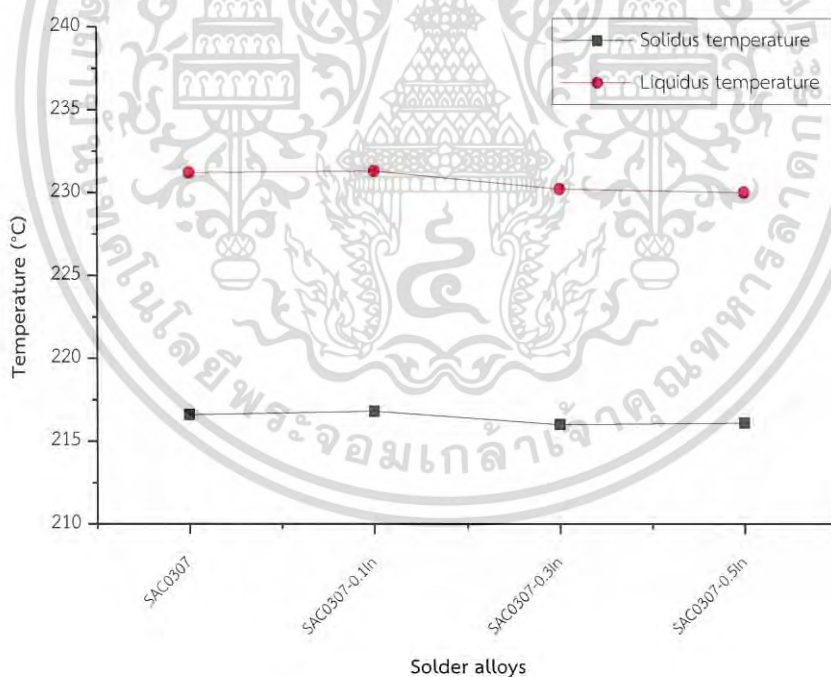
สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus and liquidus temperatures) ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โดยจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งในการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของสารทั้ง 2 ชนิดที่มีผลต่อโลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307 นั่นคือ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และอินเดียม (In) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบจะเริ่มต้นตั้งแต่ช่วงที่โลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature;  $T_S$ ) และหลอมละลายหมดที่อุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature;  $T_L$ ) จากรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 ที่ทำการทดสอบได้ คือ 216.6 และ 231.2°C หลังจากนั้นอุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรียังคงมีแนวโน้มที่คงที่ ขณะที่อุณหภูมิ Liquidus กลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยหลังการเติมอนุภาคนาโนในสัดส่วนที่สูงขึ้นที่ 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 wt% ตามลำดับ



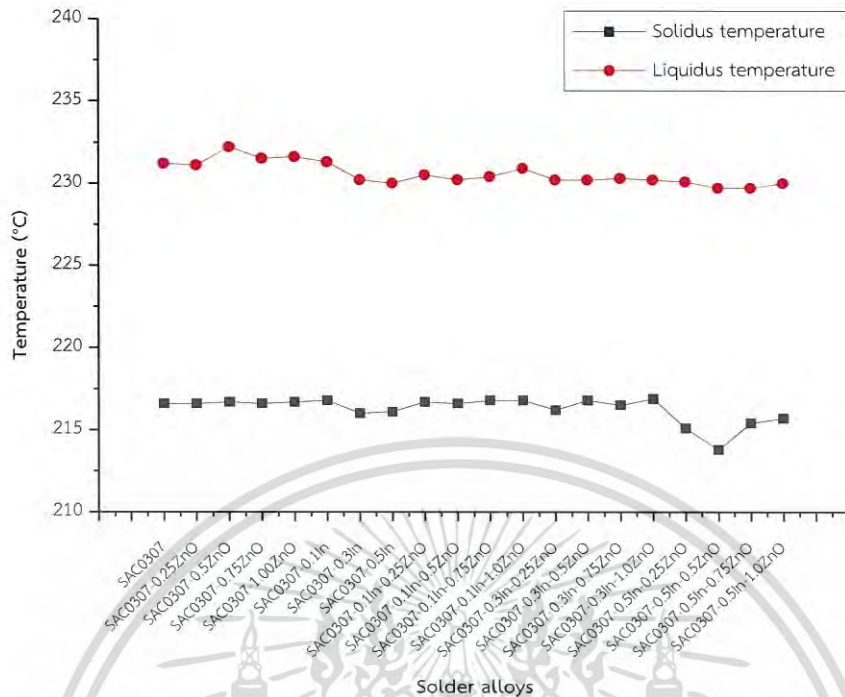
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิโซลิดัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1.0$  wt%) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Liquidus เพียงเล็กน้อยนั้นแสดงถึงการเติมอนุภาคนาโน ZnO ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของโลหะบัดกรีมากนัก แตกต่างกับในรูปที่ 4.2 ที่ระดับการเติมของ In ที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% พบว่าอุณหภูมิ Solidus และ Liquidus เริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีระดับการเติม In ตั้งแต่ 0.3 wt% ขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเติม In ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีอย่างเด่นชัด เนื่องจากมีปริมาณของ In ค่อนข้างน้อย ส่วนในเงื่อนไขที่มีการนำสารทั้งสองชนิด คืออนุภาคนาโน ZnO และ In ผสมเข้าด้วยกันในโลหะบัดกรี จะแสดงผลดังรูปที่ 4.3 จากกราฟจะพบว่าในเงื่อนไขที่มีปริมาณ In เท่ากัน และระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ที่สูงขึ้น จะเห็นได้ชัดว่าสัดส่วนอนุภาคนาโน ZnO ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้อุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ตรงกันข้ามกับเงื่อนไขที่มีปริมาณอนุภาคนาโน ZnO เท่ากัน และมีระดับการเติมของ In ที่สูงขึ้น เพราะจากอิทธิพลของ In ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น ส่งผลให้อุณหภูมิ Liquidus ของโลหะบัดกรีลดต่ำลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เพราะการเติม In ลงไปจะช่วยให้โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงได้ เนื่องจากการรวมตัวกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน [26]



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิโซลิดัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$  และ  $0.5$  wt%) ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิโซลิดัสและลิควิดัสของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn-yZnO ทุกเงื่อนไข

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิโซลิดัส-ลิควิดัสและช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว

โลหะบัดกรี	อุณหภูมิโซลิดัส (°C)	อุณหภูมิลิควิดัส (°C)	ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)
1. SAC0307	216.6	231.2	14.6
2. SAC0307-0.25ZnO	216.6	231.1	14.5
3. SAC0307-0.5ZnO	216.7	232.2	15.5
4. SAC0307-0.75ZnO	216.6	231.5	14.9
5. SAC0307-1.0ZnO	216.7	231.6	14.9
6. SAC0307-0.1In	216.8	231.3	14.5
7. SAC0307-0.3In	216.0	230.2	14.2
8. SAC0307-0.5In	216.1	230.0	13.9
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	216.7	230.5	13.8
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	216.6	230.2	13.6
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	216.8	230.4	13.6
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	216.8	230.9	14.1
12. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	216.2	230.2	14.0
13. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	216.8	230.2	13.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิโซลิตัส-ลิกวิดัสและช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (ต่อ)

โลหะบัดกรี	อุณหภูมิโซลิตัส (°C)	อุณหภูมิลิกวิดัส (°C)	ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)
14. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	216.5	230.3	13.8
15. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	216.9	230.2	13.3
16. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	215.1	230.1	15.0
17. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	213.8	229.7	15.9
18. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	215.4	229.7	14.3
19. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	215.7	230.0	14.3

## 4.2 ความสามารถในการเปียก

### 4.2.1 การกระจายตัว

ในการทดสอบการกระจายตัว (Spread test) ของโลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง สามารถคำนวณผลของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor;  $S_f$ ) และอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio;  $S_r$ ) ของโลหะบัดกรีได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.3 โดยผลจากการคำนวณค่าดังกล่าวพบว่าในโลหะบัดกรีพื้นฐานมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวอยู่ที่  $90.17 \pm 0.28$  % และอัตราส่วนการกระจายตัว  $1.31 \pm 0.042$  ส่วนในการทดสอบที่มีการเติมเฉพาอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt% มีแนวโน้มของการกระจายตัวที่ขึ้นตั้งรูปที่ 4.4 สังเกตได้จากค่าการกระจายตัวที่เพิ่มสูงขึ้น และจะเริ่มลดลงเมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป คือ  $95.76 \pm 0.21$ ,  $94.89 \pm 0.12$ ,  $93.58 \pm 0.22$  และ  $92.54 \pm 0.08$  % ตามลำดับ จากผลการทดสอบนี้สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ภายในของไหลที่ดูเสมือนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยในการผสมของอนุภาคนาโนดังกล่าวในโลหะบัดกรีจนกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนนี้เป็นการผสมกันแบบคอลลอยด์ นั่นคือ โลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนไม่ได้อยู่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันในระดับอะตอม เมื่อได้รับความร้อนจะส่งผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์เกิดการสั่นไปกระทบกับอนุภาคข้างเคียง โดยจะมีการเคลื่อนที่ไปมาในลักษณะไร้ทิศทาง (Random walk) ดังในสมการที่ 2.2 โดยที่  $L$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาค  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และ  $t$  คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี โดยทั่วไปแล้วสำหรับระบบที่มีความหนาแน่นน้อยๆ สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานของอนุภาคที่สูงขึ้นจะทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น [68] ทั้งนี้ในสมการที่ 2.2 นั้นไม่สามารถคำนวณหาระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ที่แท้จริงได้ เพราะในความเป็นจริงอนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง แต่ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

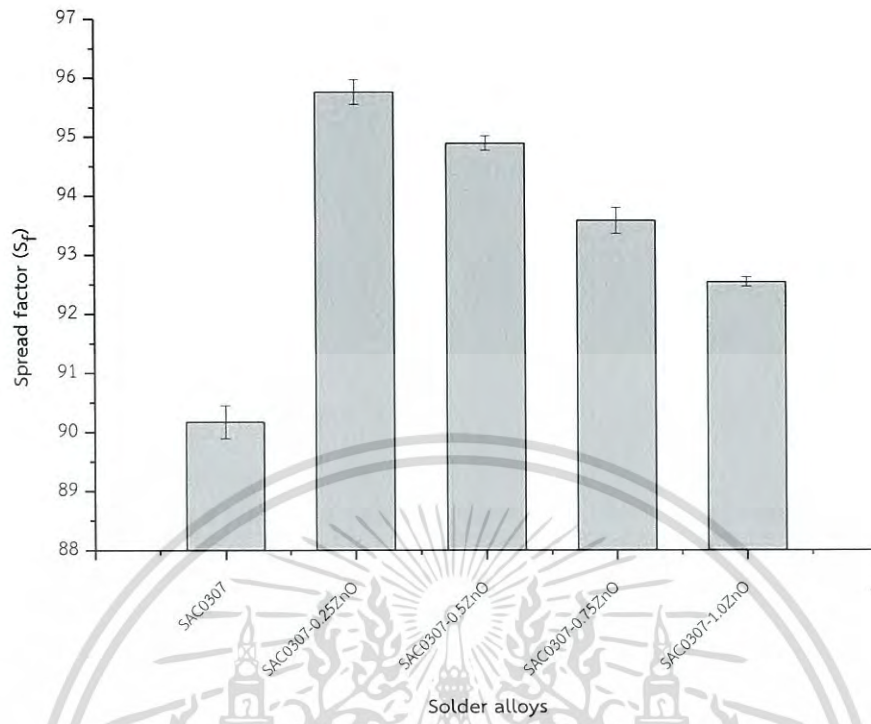
สามารถบอกได้ถึงการที่ระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาคคอลลอยด์ในโลหะบัดกรีแบบครีมได้มากยิ่งขึ้น [68]

$$L = \sqrt{2\alpha t} \quad (2.2)$$

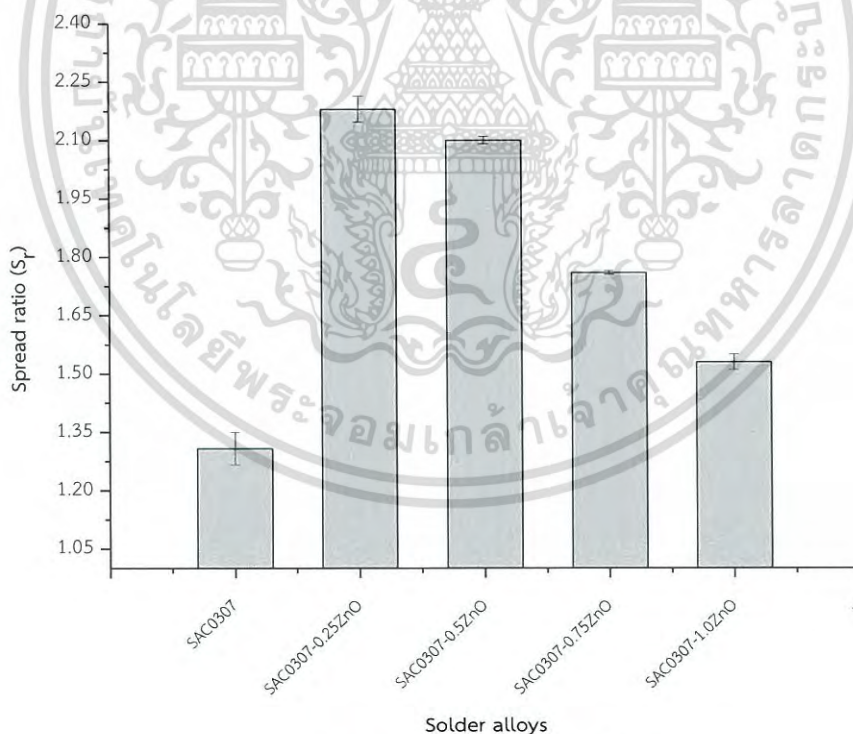
ซึ่งในงานวิจัยนี้การเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่มีขนาดเล็กระดับนาโน (20-40 nm) [78] ในปริมาณมากขึ้น อนุภาคนาโนที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะไร้ทิศทางจะเริ่มมารวมกันจนกลายเป็นกลุ่มก้อน โดยที่ปราศจากการตกตะกอนหรือแยกตัวออกจากกัน โดยพลังงานพื้นผิวที่มากของอนุภาคนาโนสามารถลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี ทำให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อเติมในปริมาณน้อย แต่ถ้ามีการเติมอนุภาคดังกล่าวในปริมาณที่มาก จะทำให้ความสามารถในเปียกสลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนจะรวมตัวกันเป็นจำนวนมาก นำไปสู่ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของโลหะบัดกรีจนทำให้ค่าการกระจายตัวมีแนวโน้มที่ลดลงได้ [87, 88]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว ( $S_p$ )



(ข) อัตราส่วนการกระจายตัว ( $S_r$ )

รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัว (ก) – (ข) ของโลหะ

บัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1.0$  wt%)

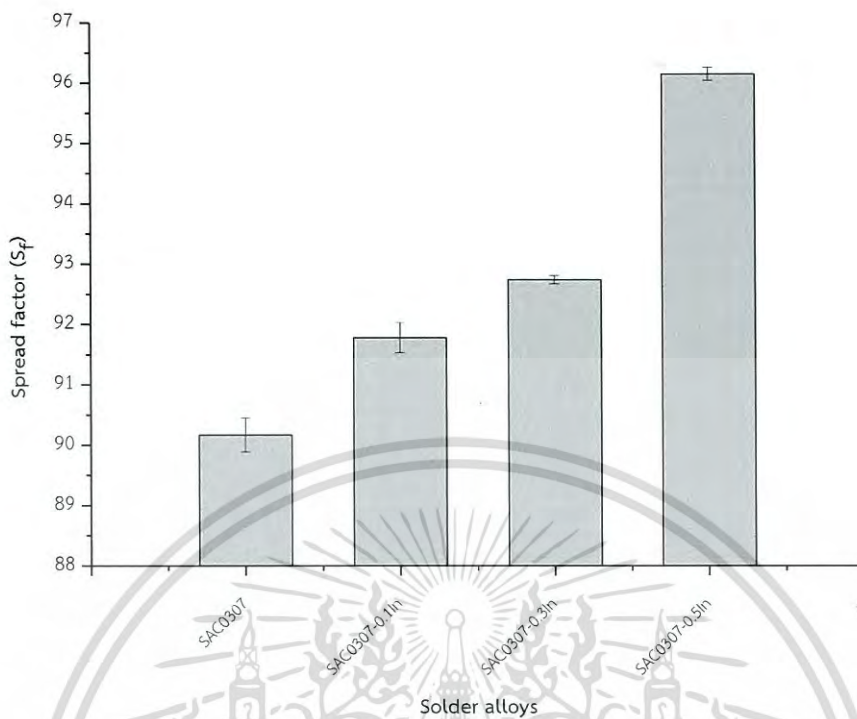
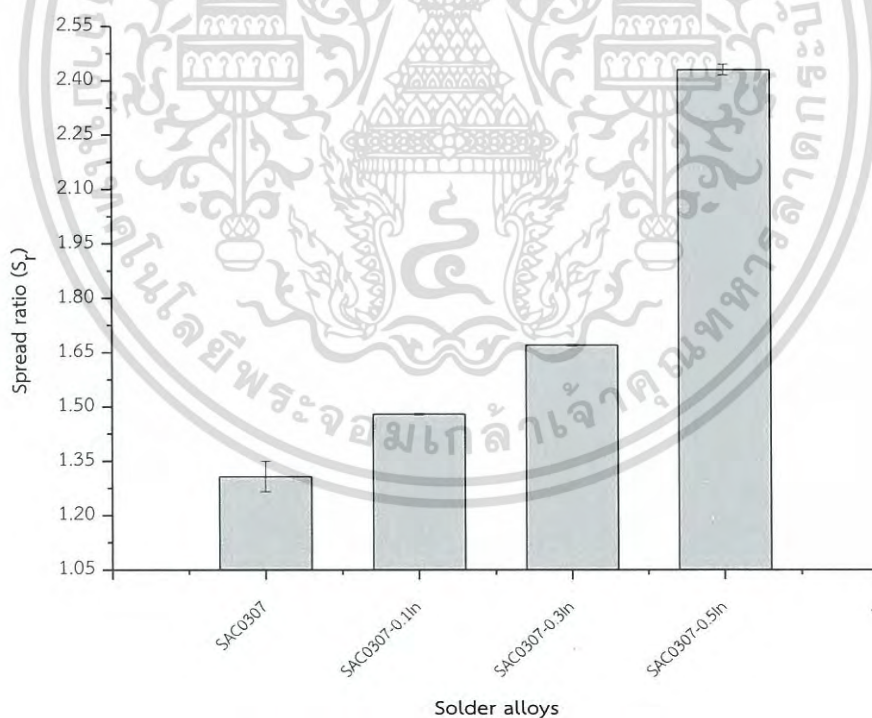
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรงกันข้ามการเติมธาตุ In ลงในโลหะบัดกรีที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 สังเกตได้จากค่าตัวประกอบการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นตามระดับการเติมที่สูงขึ้นที่  $91.78 \pm 0.25$ ,  $92.74 \pm 0.07$  และ  $96.15 \pm 0.11$  % ตามลำดับ เนื่องจาก In เมื่อหลอมเหลวสามารถช่วยลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีได้ ค่าความหนืดจึงลดลง และมีความสามารถในการเปียกที่ดีขึ้น [26, 89]

ส่วนในเงื่อนไขที่มีการเติมของสารทั้งสองชนิดลงในโลหะบัดกรีดังรูปที่ 4.6 ที่ปริมาณ In เท่ากับการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวเพิ่มสูงขึ้นและจะเริ่มลดลงเมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป และในเงื่อนไขที่มีปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO เท่ากันผสมกับ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นพบว่าระดับการเติม In ที่มากขึ้นไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการกระจายตัวอย่างชัดเจน

แต่ทั้งนี้การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนนั้น พบว่าการกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในทุกเงื่อนไข โดยในเงื่อนไขที่มีระดับการเติม In 0.1 wt% และอนุภาคนาโน ZnO 0.25 wt% ให้ค่าเฉลี่ยตัวประกอบกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวสูงสุดที่  $96.10 \pm 0.17$  % และ  $2.37 \pm 0.003$  ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณค่าเฉลี่ยตัวประกอบและอัตราส่วนการกระจายตัวของทุกเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 4.2

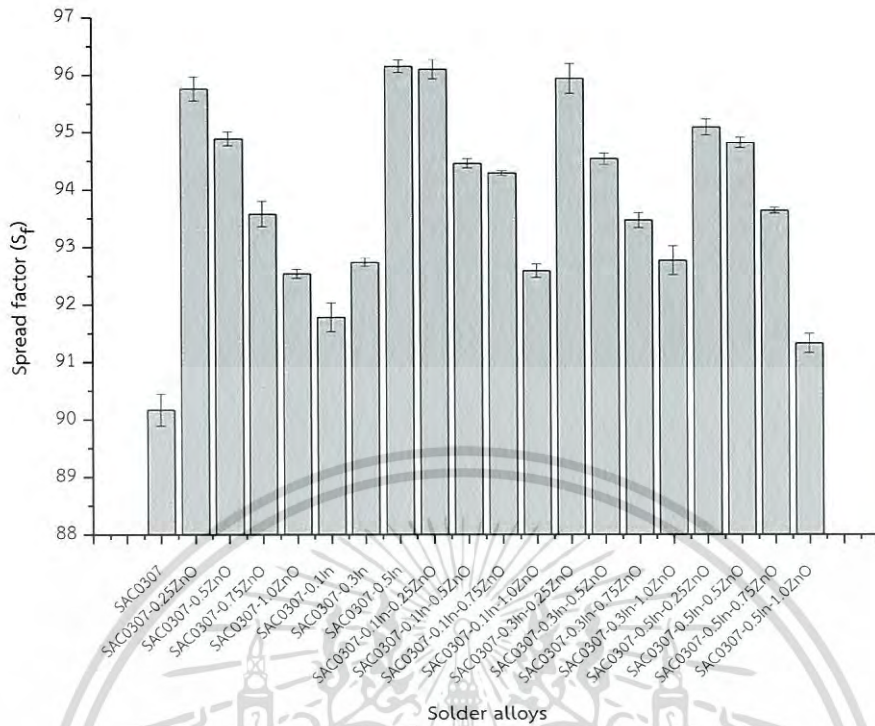


(ก) ค่าเฉลี่ยตัวประกอบกระจายตัว ( $S_f$ )(ข) ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการกระจายตัว ( $S_r$ )

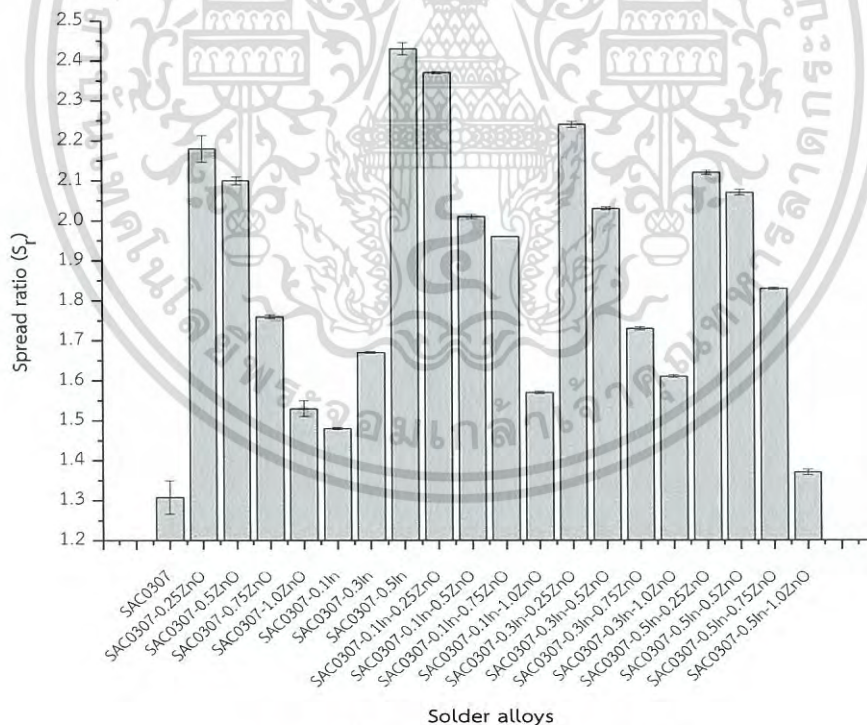
รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัว (ก) – (ข) ของโลหะ

บัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$  และ  $0.5$  wt% )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว ( $S_f$ )



(ข) ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการกระจายตัว ( $S_r$ )

รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว ( $S_f$ ) และอัตราส่วนการกระจายตัว ( $S_r$ ) (ก) – (ข) ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน SAC0307-xIn-yZnO ทุกเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัว

โลหะบัดกรี	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (%)	อัตราส่วนการกระจายตัว
1. SAC0307	90.17 ± 0.28	1.31 ± 0.042
2. SAC0307-0.25ZnO	95.76 ± 0.21	2.18 ± 0.034
3. SAC0307-0.5ZnO	94.89 ± 0.12	2.10 ± 0.009
4. SAC0307-0.75ZnO	93.58 ± 0.22	1.76 ± 0.005
5. SAC0307-1.0ZnO	92.54 ± 0.08	1.53 ± 0.020
6. SAC0307-0.1In	91.78 ± 0.25	1.48 ± 0.002
7. SAC0307-0.3In	92.74 ± 0.07	1.67 ± 0.002
8. SAC0307-0.5In	96.15 ± 0.11	2.43 ± 0.015
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	96.10 ± 0.17	2.37 ± 0.003
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	94.46 ± 0.08	2.01 ± 0.005
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	94.29 ± 0.04	1.96 ± 0.001
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	92.59 ± 0.12	1.57 ± 0.003
13. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	95.94 ± 0.26	2.24 ± 0.008
14. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	94.54 ± 0.10	2.03 ± 0.004
15. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	93.47 ± 0.13	1.73 ± 0.004
16. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	92.77 ± 0.25	1.61 ± 0.003
17. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	95.09 ± 0.14	2.12 ± 0.005
18. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	94.82 ± 0.09	2.07 ± 0.007
19. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	93.64 ± 0.05	1.83 ± 0.003
20. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	91.33 ± 0.17	1.37 ± 0.007

#### 4.2.2 มุมสัมผัส

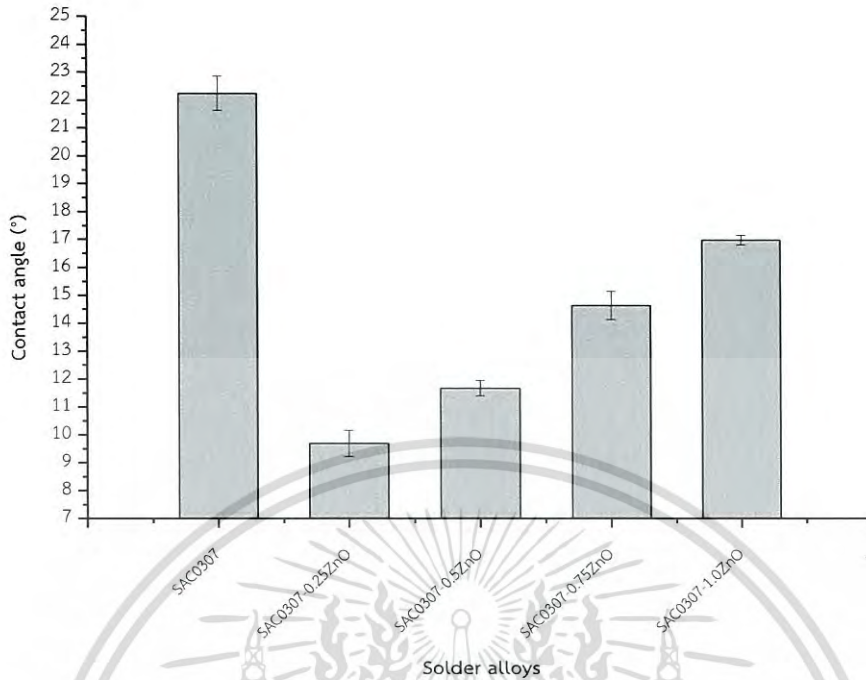
นอกจากนี้การทดสอบความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงยังสามารถวัดได้จากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีภายหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์ได้ด้วยวิธีการคำนวณหาค่ามุมสัมผัสจากสมการที่ 3.4 โดยจากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7-4.9 พบว่าค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีค่าลดลงในทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐานที่มีค่ามุมสัมผัส  $22.24 \pm 0.61^\circ$  จากนั้นค่ามุมสัมผัสจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงหลังการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25 wt% และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังการเติมอนุภาคนาโนในระดับที่สูงขึ้น คือ  $9.69 \pm 0.47$ ,  $11.67 \pm 0.27$ ,  $14.63 \pm 0.50$  และ  $16.97 \pm 0.17^\circ$  ตามลำดับ ขณะที่ในเงื่อนไขการเติมเฉพา In ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% กลับให้ค่ามุมสัมผัสที่ลดลง คือ  $18.67 \pm 0.56$  และ  $16.23 \pm 0.16^\circ$  และที่ 0.5 wt% จะให้ค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุด คือ  $8.81 \pm 0.25^\circ$  โดยค่ามุมสัมผัสที่น้อยลงนี้แสดงถึงว่าโลหะบัดกรีเหล่านั้นมีความสามารถในการกระจายตัวที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

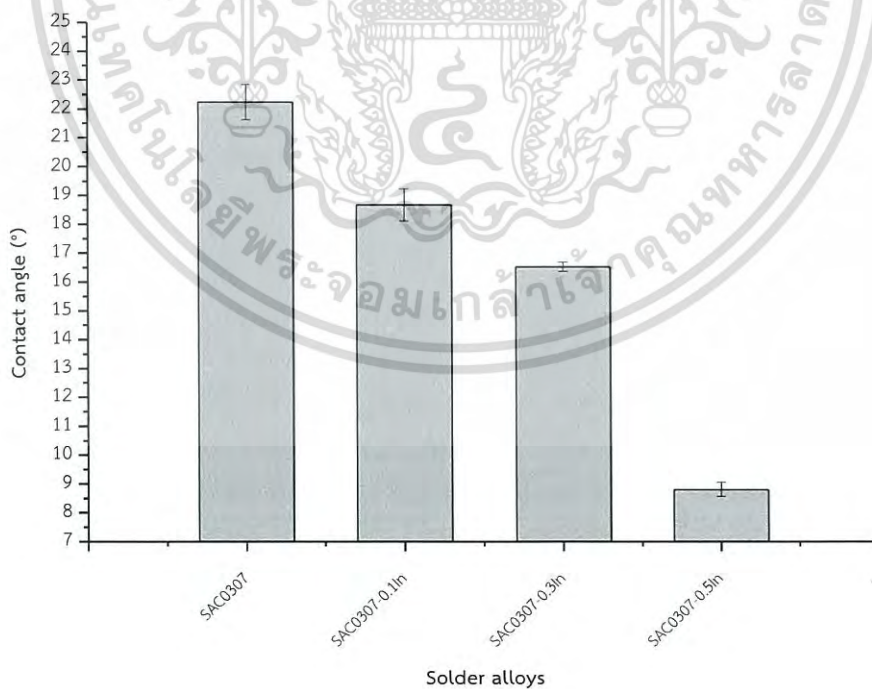
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี	ค่าการคำนวณ (°)
1. SAC0307	22.24 ± 0.61
2. SAC0307-0.25ZnO	9.69 ± 0.47
3. SAC0307-0.5ZnO	11.67 ± 0.27
4. SAC0307-0.75ZnO	14.63 ± 0.50
5. SAC0307-1.0ZnO	16.97 ± 0.17
6. SAC0307-0.1In	18.67 ± 0.56
7. SAC0307-0.3In	16.53 ± 0.16
8. SAC0307-0.5In	8.81 ± 0.25
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	8.92 ± 0.40
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	12.65 ± 0.18
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	13.03 ± 0.09
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	16.86 ± 0.26
13. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	9.28 ± 0.59
14. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	12.46 ± 0.24
15. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	14.88 ± 0.29
16. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	16.46 ± 0.56
17. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	11.22 ± 0.32
18. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	11.83 ± 0.19
19. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	14.50 ± 0.11
20. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	19.67 ± 0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

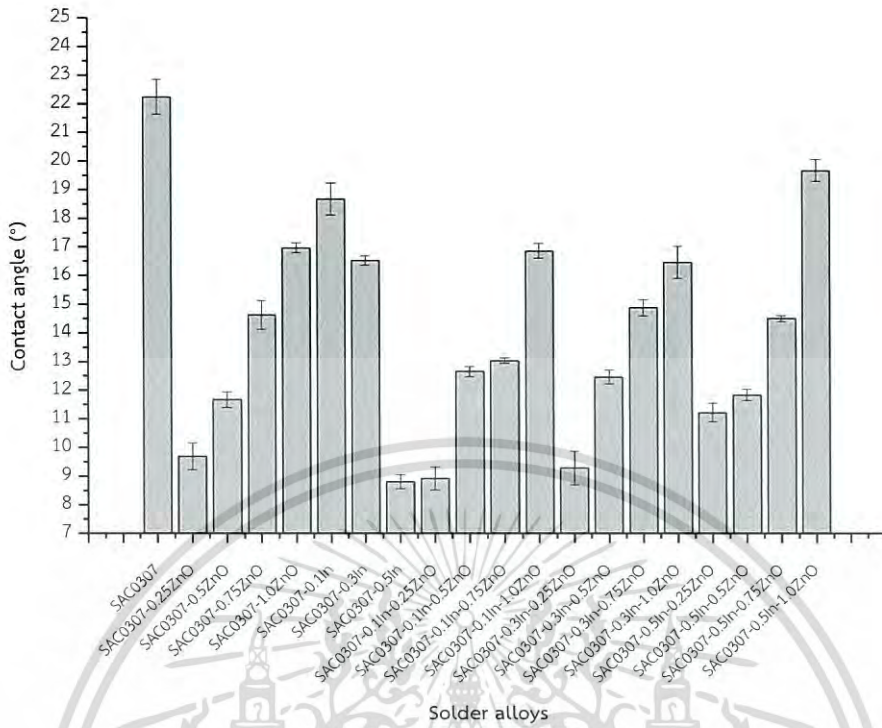


รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt% )



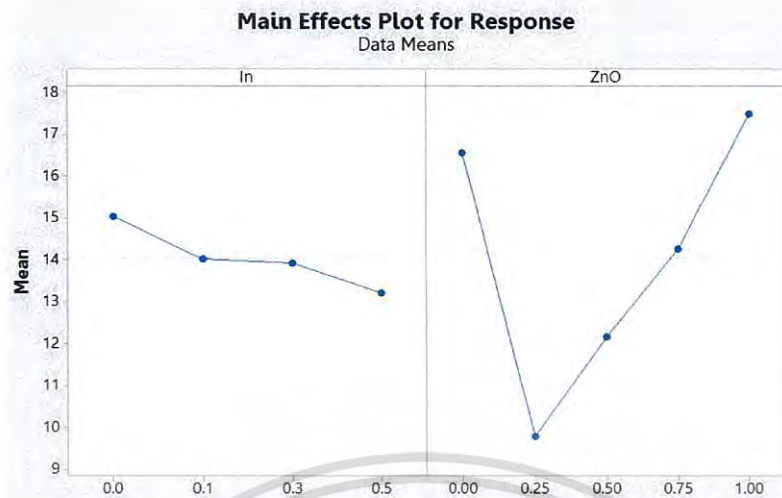
รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์

ในกรณีของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีการเติมสารทั้งสองชนิดในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ได้มีการวิเคราะห์ผลโดยวิธีการทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ In และ ZnO ที่มีระดับของปัจจัย 4 และ 5 ระดับ ตามลำดับ ที่มีการทำซ้ำ (Replicate) ทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ ANOVA ที่  $\alpha = 0.05$  พบว่า ทั้ง In และ ZnO ต่างมีผลต่อค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P\text{-value} < 0.05$ ) มีความสอดคล้องกับกราฟอิทธิพลหลัก (Main Effects Plot) ในรูปที่ 4.10 และจากค่า F-value ยังแสดงให้เห็นว่า ZnO มีอิทธิพลต่อมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีมากกว่า In อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงทำให้อิทธิพลของ In ไม่ชัดเจนในเงื่อนไขที่มีการเติมของ ZnO และ In พร้อมๆกัน



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่ามอดุลัส

จากผล ANOVA ในตารางที่ 4.4-4.5 ที่ได้ทำการตัดต่อของปัจจัยที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติ ออกไป ให้ค่า R-squared เท่ากับ 84.94 %

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่ามอดุลัส

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
In	1	219.806	219.806	95.15	<0.001
ZnO	1	330.118	330.118	142.91	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	1	169.452	169.452	73.35	<0.001
In*ZnO	1	120.874	120.874	52.33	<0.001
(ZnO) <sup>3</sup>	1	77.393	77.393	33.50	<0.001
In*(ZnO) <sup>2</sup>	1	62.182	62.182	26.92	<0.001
Error	53	122.431	2.310		
Total	59	812.933			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่ามุมสัมผัส

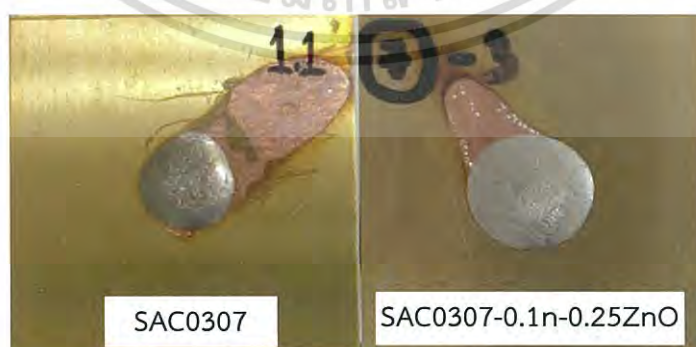
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-value
Constant	21.129	0.651	32.45	<0.001
ln	-20.980	2.150	-9.75	<0.001
ZnO	-59.660	4.990	-11.95	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	98.200	11.500	8.56	<0.001
ln*ZnO	73.700	10.200	7.23	<0.001
(ZnO) <sup>3</sup>	-42.830	7.400	-5.79	<0.001
ln*(ZnO) <sup>2</sup>	-50.690	9.770	-5.19	<0.001

โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของ ZnO และ ln ให้อยู่ในรูปของสมการ Regression ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Contact Angle} = 21.129 - 20.98 \ln - 59.66 \text{ ZnO} + 98.2 (\text{ZnO})^2 + 73.70 \ln * \text{ZnO} - 42.83 (\text{ZnO})^3 - 50.69 \ln * (\text{ZnO})^2 \quad (4.1)$$

ในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการเติม ln ในสัดส่วนที่สูงขึ้นให้แนวโน้มของค่ามุมสัมผัสที่ลดลง ขณะเดียวกันการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่น้อยก็ช่วยให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มที่ลดลงด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างลักษณะของพื้นผิวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ โดยจะเห็นว่าโลหะบัดกรีในเงื่อนไขข้างต้นมีการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการทดสอบการกระจายตัว

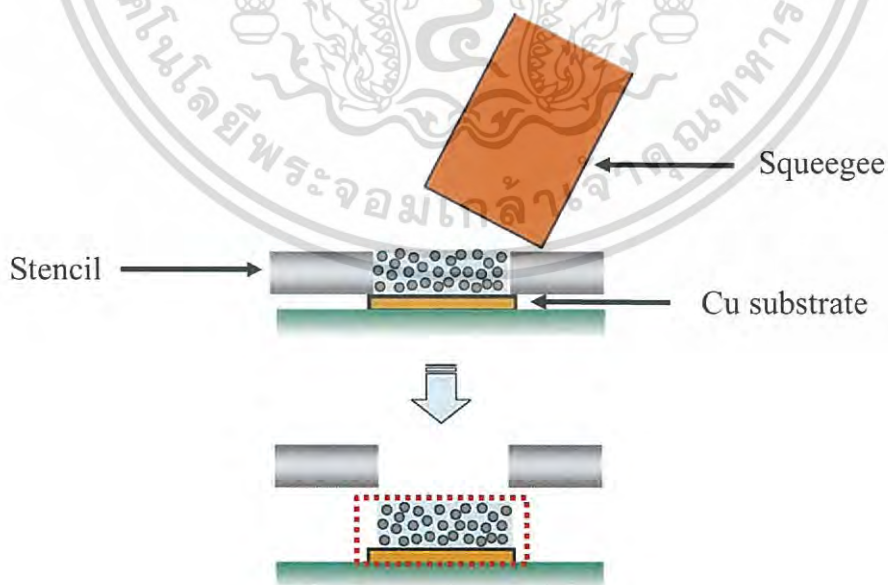
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ความสามารถในการพิมพ์และทรวดัว

#### 4.3.1 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

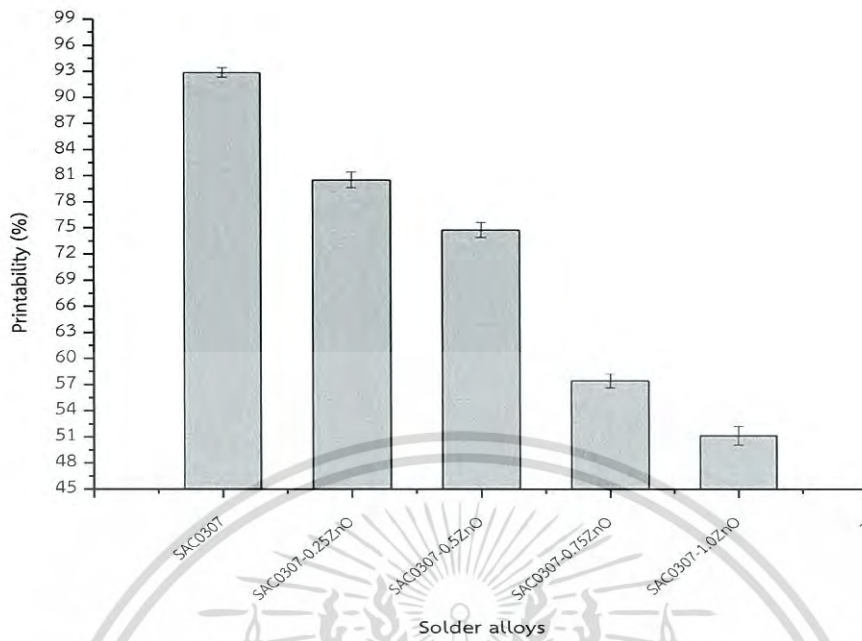
สำหรับความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม สามารถทดสอบด้วยวิธีการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ติดบนแผ่นรองทองแดงเปรียบเทียบกับปริมาตรของโลหะบัดกรีในอุดมคติบนแผ่นรองทองแดงเพื่อนำไปคำนวณค่าความสามารถในการพิมพ์ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งในขั้นตอนของการทดสอบดังกล่าวจะกระทำทันทีภายหลังกระบวนการพิมพ์เสร็จสิ้นดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากโลหะบัดกรีแบบครีมจัดเป็นของไหลประเภท Thixotropic ที่มีค่าความหนืดลดลงตามระยะเวลาเมื่อได้รับแรงเฉือนในอัตราคงที่ในระหว่างการพิมพ์โลหะบัดกรี อีกทั้งควรมีการควบคุมเงื่อนไขบางประการ อาทิเช่น การทำมุมของ Squeegee แรงกดในการพิมพ์ หรือความเร็วในการพิมพ์ เป็นต้น ให้มีความใกล้เคียงกันใน ทุกเงื่อนไขเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด

ซึ่งจากผลการคำนวณของค่าดังกล่าวในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรีนั้นส่งผลต่อค่าความสามารถในการพิมพ์อย่างเด่นชัด โดยที่ค่าความสามารถในการพิมพ์จะเริ่มมีแนวโน้มลดลงหลังการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากขึ้น จาก  $92.87 \pm 0.56 \%$  ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 เหลือเพียง  $51.15 \pm 1.08 \%$  เมื่อระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO สูงสุดที่ 1.0 wt% การเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากขึ้นลงในโลหะบัดกรีแบบครีมเป็นสาเหตุให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ทำการพิมพ์ได้ยากขึ้น เนื่องจากโลหะบัดกรีเกาะติดกับ Stencil ดังแสดงในรูปที่ 4.14

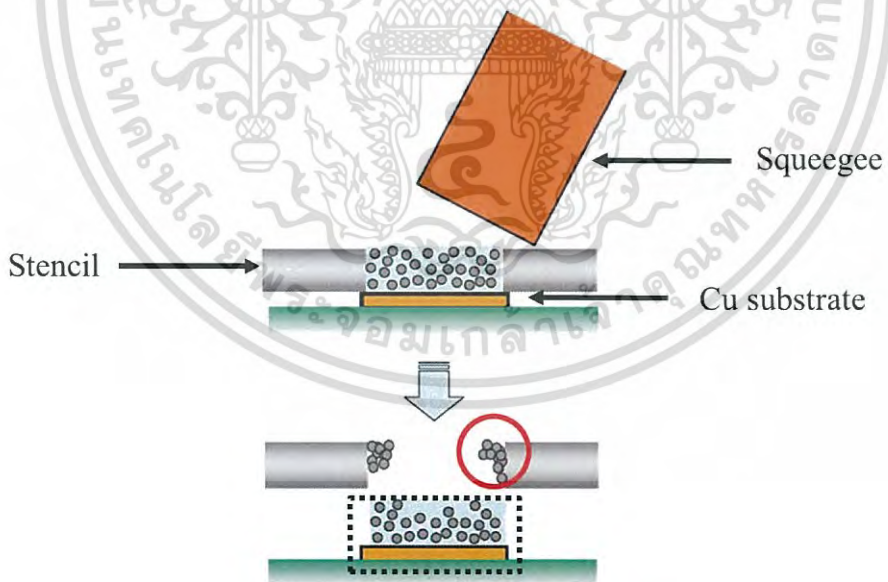


รูปที่ 4.12 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง [90]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y=0.0, 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1.0$  wt%)

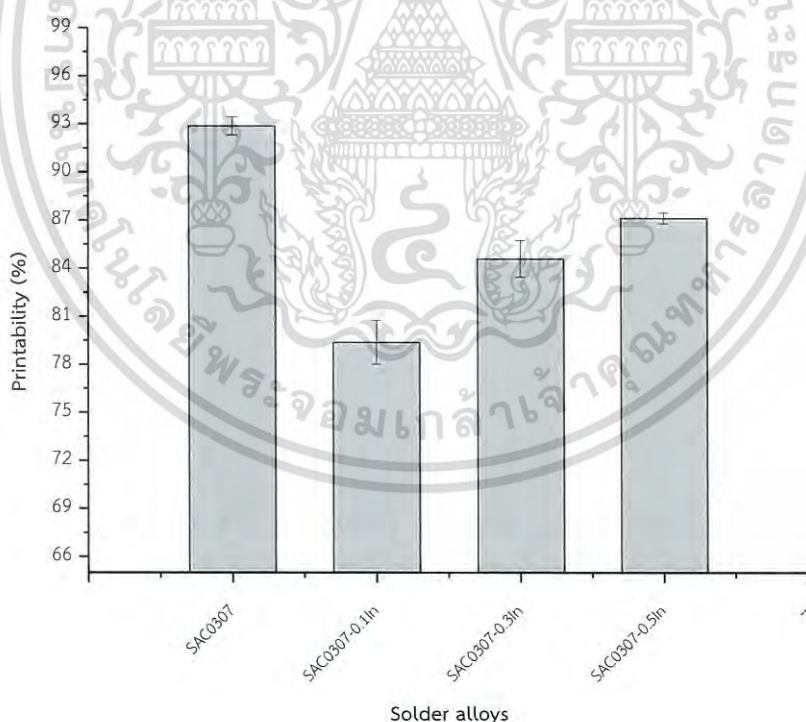


รูปที่ 4.14 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307-yZnO ลงบนแผ่นรองทองแดง [90]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของการเติม In เพียงชนิดเดียวดังรูปที่ 4.15 ในปริมาณที่มากขึ้นที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% จะสังเกตเห็นว่าแม้ความสามารถในการพิมพ์จะมีค่าลดลง แต่ยังคงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นตั้งแต่  $79.38 \pm 1.37$ ,  $84.59 \pm 1.15$  และ  $87.11 \pm 0.34\%$  ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดที่ใหญ่ระดับไมโครเมตรของ In ( $< 149 \mu\text{m}$ ) ดังรูปที่ 4.16 ที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะบัดกรี ส่งผลให้ค่าความสามารถในการพิมพ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐาน แต่ด้วยลักษณะรูปร่างของ In ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวสัมผัสน้อย เป็นผลให้โลหะบัดกรีที่มีการเติม In ลงไปมากขึ้นสามารถพิมพ์เนื้อของโลหะบัดกรีลงบนแผ่นรองทองแดงได้ง่ายโดยอาศัยแรงอัดในการพิมพ์เพียงเล็กน้อย [82]

ส่วนในเงื่อนไขที่มีการเติมของสารทั้งสองชนิดลงในโลหะบัดกรีดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.6 ที่ปริมาณ In เท่ากันการเติมอนุภาคนาโน ZnO จะทำให้ค่าความสามารถในการพิมพ์ลดต่ำลงอย่างชัดเจนตามระดับการเติมที่สูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป ให้ค่าการพิมพ์ลดต่ำกว่า 68 % [91] ขณะที่ในเงื่อนไขที่มีปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO เท่ากันผสมกับ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าระดับการเติมของ In ที่มากขึ้นไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการพิมพ์อย่างเด่นชัด

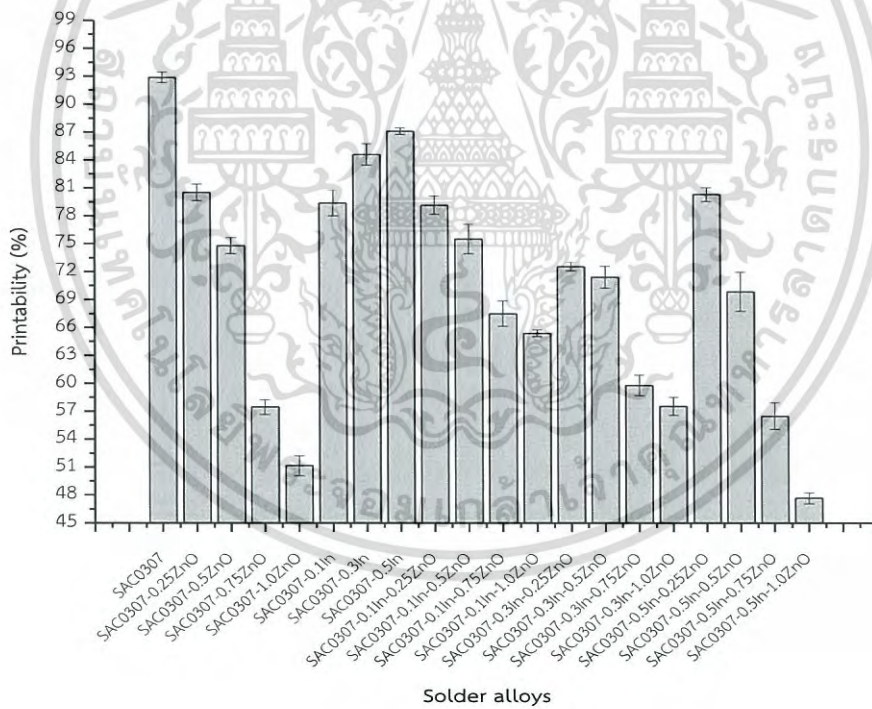


รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x = 0.0, 0.1, 0.3$  และ  $0.5 \text{ wt}\%$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ขนาดและรูปร่างของอินเดียม



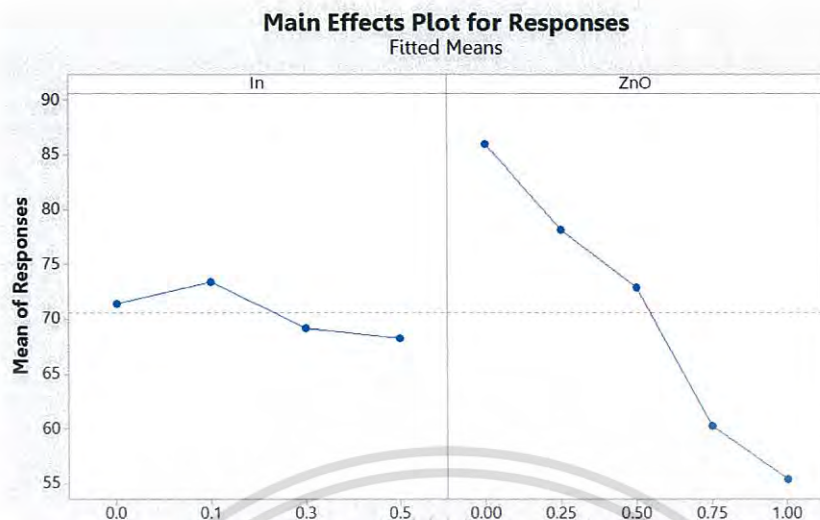
รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการพิมพ์เฉลี่ยของโลหะบัดกรีแบบคริม

โลหะบัดกรี	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรที่พิมพ์ได้ จริง (cm <sup>3</sup> )	ความสามารถในการพิมพ์ของ โลหะบัดกรี (%)
1. SAC0307	4.1600	0.0381	92.87 ± 0.56
2. SAC0307-0.25ZnO	4.1626	0.0330	80.52 ± 0.89
3. SAC0307-0.5ZnO	4.1654	0.0307	74.79 ± 0.86
4. SAC0307-0.75ZnO	4.1681	0.0236	57.45 ± 0.79
5. SAC0307-1.0ZnO	4.1708	0.0210	51.15 ± 1.08
6. SAC0307-0.1In	4.1618	0.0326	79.38 ± 1.37
7. SAC0307-0.3In	4.1654	0.0347	84.59 ± 1.15
8. SAC0307-0.5In	4.1689	0.0357	87.11 ± 0.34
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	4.1645	0.0324	79.15 ± 0.97
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	4.1672	0.0310	75.53 ± 1.60
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	4.1699	0.0277	67.50 ± 1.36
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	4.1726	0.0268	65.39 ± 0.36
13. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	4.1681	0.0299	72.55 ± 0.45
14. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	4.1708	0.0293	71.41 ± 1.18
15. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	4.1735	0.0245	59.80 ± 1.10
16. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	4.1762	0.0236	57.55 ± 0.97
17. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	4.1717	0.0329	80.31 ± 0.74
18. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	4.1744	0.0287	69.88 ± 2.10
19. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	4.1771	0.0232	56.50 ± 1.43
20. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	4.1798	0.0195	47.67 ± 0.59

โดยในกรณีที่มีการเติมสารทั้งสองชนิดลงในโลหะบัดกรีพร้อมกัน เพื่อแสดงให้เห็นอิทธิพลของสารแต่ละชนิด ได้มีการนำข้อมูลมาเปรียบเทียบในทางสถิติด้วย ANOVA ด้วยวิธีการเติมเช่นเดียวกับในเรื่องความสามารถในการเปียก ซึ่งพบว่าทั้ง In และอนุภาคนาโน ZnO ต่างมีผลต่อความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังกราฟ Main Effects Plot ในรูปที่ 4.18 และเมื่อพิจารณาจากค่า F-value จะพบว่าอิทธิพลของการเติม In เพียงชนิดเดียวมีค่าต่ำกว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO เพียงชนิดเดียวมาก ทั้งนี้อาจทำให้เมื่อมีการเติมสารทั้งสองชนิดพร้อมกัน ผลการวิเคราะห์อาจไม่แสดงอิทธิพลของของอนุภาคนาโน In ออกมาได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าความสามารถในการพิมพ์

จากผล ANOVA ในตารางที่ 4.7 ที่ได้มีการตัดทอนของตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติออกไป ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ Regression ดังตารางที่ 4.8 ที่ให้ค่า R-squared เท่ากับ 93.34%

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced model ของค่าการพิมพ์

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
In	1	372.09	372.09	33.87	<0.001
ZnO	1	3248.41	3248.41	295.74	0.029
In*ZnO	1	518.54	518.54	47.21	<0.001
(In) <sup>3</sup>	1	400.72	400.72	36.48	<0.001
(In) <sup>2</sup> *ZnO	1	640.82	640.82	58.34	<0.001
Error	54	593.14	10.98		
Total	59	8906.32			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced model ของค่าการพิมพ์

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-value
Constant	90.70	1.30	69.75	<0.001
ln	-56.80	9.76	-5.82	<0.001
ZnO	-37.88	2.20	-17.20	<0.001
ln*ZnO	163.40	23.80	6.87	<0.001
(ln) <sup>3</sup>	220.10	36.40	6.04	<0.001
(ln) <sup>2</sup> *ZnO	-348.00	45.60	-7.64	<0.001

โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Regression ได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{Printability} = 90.70 - 56.80 \ln - 37.88 \text{ ZnO} + 163.4 \ln * \text{ZnO} + 220.1 (\ln)^3 - 348.0 (\ln)^2 * \text{ZnO} \quad (4.2)$$

ซึ่งจะเห็นว่าระดับการเติม ln ที่มากขึ้นให้แนวโน้มของค่าการพิมพ์ที่สูงขึ้น แตกต่างกับการเติมเฉพาะอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ค่าความสามารถในการพิมพ์ลดต่ำลง

โดยจากผลการทดสอบในทุกเงื่อนไขอาจจะกล่าวได้ว่าการเติมสารทั้งสองลงในโลหะบัดกรีพร้อมกันที่ ln ตั้งแต่ 0.1 wt% ขึ้นไปและอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 wt% ช่วยให้ความสามารถในการพิมพ์ยึดเกาะของโลหะบัดกรีบนโลหะพื้นมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีใกล้เคียงกับค่าการพิมพ์สูงสุดที่ทำการทดสอบได้ โดยใช้ ln ในสัดส่วนที่น้อย แต่หากมีการเติมอนุภาคนาโนในระดับที่สูงเกินไป โลหะบัดกรีจะเกิดความหนืดมากขึ้น ทำให้เมื่อทำการพิมพ์เนื้อของโลหะบัดกรีอาจติดบริเวณ Stencil มากกว่าที่แผ่นรองทองแดง และนำไปสู่ประสิทธิภาพในการพิมพ์ที่ลดลงได้ [92]

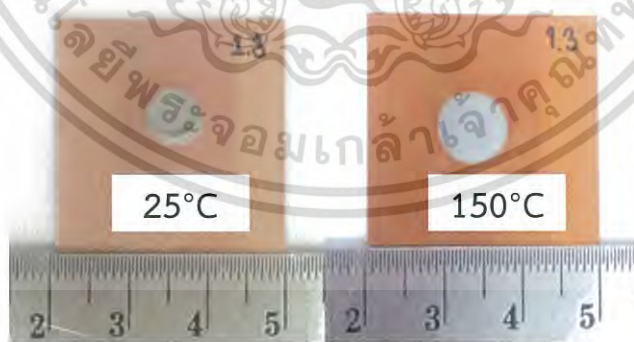
#### 4.3.2 การทรุดตัวของโลหะบัดกรี

สำหรับการทรุดตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมเป็นการแผ่กระจายตัวรอบทิศทางของโลหะบัดกรีหลังการพิมพ์ หากการทรุดตัวเกิดในช่วงก่อนการบัดกรีแบบรีโฟลว์ จะเรียกว่า การทรุดตัวที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature slump) แต่ถ้าการทรุดตัวเกิดขึ้นในช่วง Preheat ของการบัดกรีจะเรียกว่า การทรุดตัวที่อุณหภูมิสูง (Hot slump) ซึ่งการทรุดตัวลงของโลหะบัดกรีในทั้งสองอุณหภูมิอาจนำไปสู่การเสียรูปของรอยบัดกรีหรือลัดวงจรของอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงกันได้ [55] สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการทรุดตัวเป็นเวลา 30 min ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิสูง 150°C ด้วยเครื่องตุ๋นบลมร้อน เพื่อสังเกตการทรุดตัวของโลหะบัดกรีจากแหล่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยจากการทดสอบจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำ 25°C โลหะบัดกรีเกิดการทรุดตัวน้อยกว่าที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิสูง 150°C อย่างชัดเจนตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะ

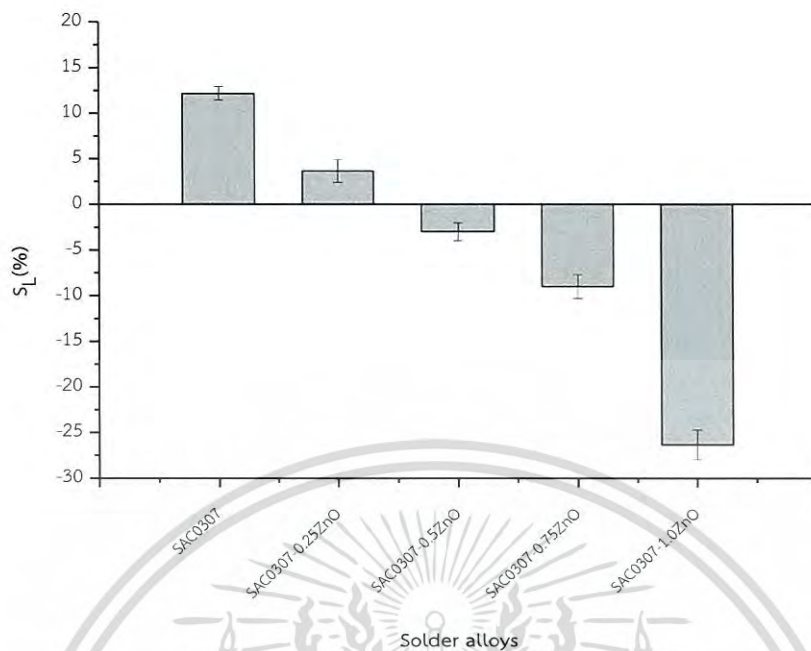
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีที่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไข ดังตัวอย่างชิ้นงานในรูปที่ 4.19 ที่เปรียบเทียบการหดตัวของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 เมื่อเวลาผ่านไป 30 min ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C โดยพบว่าโลหะบัดกรีได้เกิดการหดตัวและหดตัวลงที่  $12.17 \pm 0.76$  % และ  $-99.50 \pm 0.50$  % ตามลำดับ และสำหรับค่าการหดตัวของทุกเงื่อนไขทดสอบจะแสดงในตารางที่ 4.9

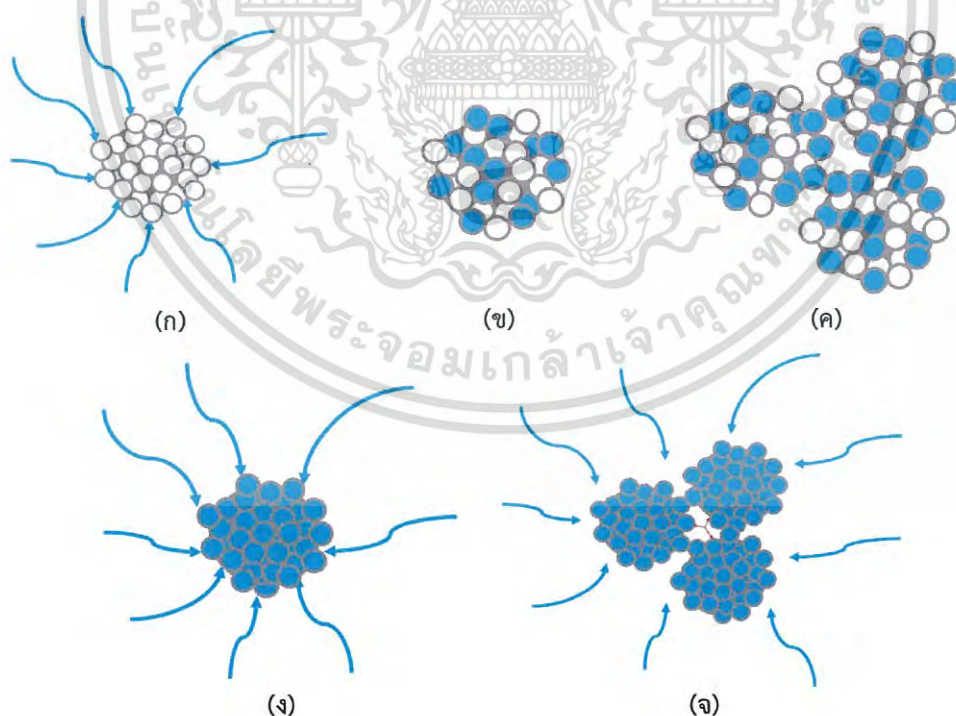
จากกราฟในรูปที่ 4.20 ในกรณีที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเมื่อมีการเติมเฉพาอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt% ลงในโลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307 พบว่าระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้นส่งผลให้โลหะบัดกรีมีการหดตัวเพิ่มขึ้น คือ  $3.67 \pm 1.26$ ,  $-3.0 \pm 1.0$ ,  $-9.0 \pm 1.32$  และที่ระดับการเติม 1.0 wt% โลหะบัดกรีเกิดการหดตัวสูงสุดที่  $-26.33 \pm 1.61$  % ตามลำดับ โดยหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการหดตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมที่มีการเติมอนุภาคนาโนลงไป นั่นคือ ความชื้น เพราะอนุภาคนาโน ZnO ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอนุภาคนาโนเซรามิกที่มีความเป็นรูพรุนสูง โดยผิวหน้าของอนุภาคนาโนจะทำหน้าที่ดูดความชื้นจากฟลักซ์ โดยความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไปในอนุภาคนาโนจะเกิดการระเหยและควบแน่นบริเวณพื้นผิวของอนุภาค ทำให้บริเวณพื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะชื้น ส่งผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ข้างเคียงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Liquid Bridge โดยขนาดของ Liquid Bridge จะขึ้นอยู่กับกับความชื้นที่อนุภาคได้ดูดซับไว้ เมื่ออนุภาคได้รับความชื้นจนถึงจุดๆหนึ่งจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว โดยถ้ายังคงได้รับความชื้นต่อไปจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเริ่มลดต่ำลง และบริเวณที่เชื่อมต่อกันระหว่างพื้นผิวอนุภาคนาโนจะเริ่มมีความเสถียรน้อยลง เป็นผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ติดกันสามารถแยกออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้น [68] ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การหดตัวที่เพิ่มขึ้นของโลหะบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.19 การหดตัวของโลหะบัดกรีพื้นฐานแบบครีม SAC0307

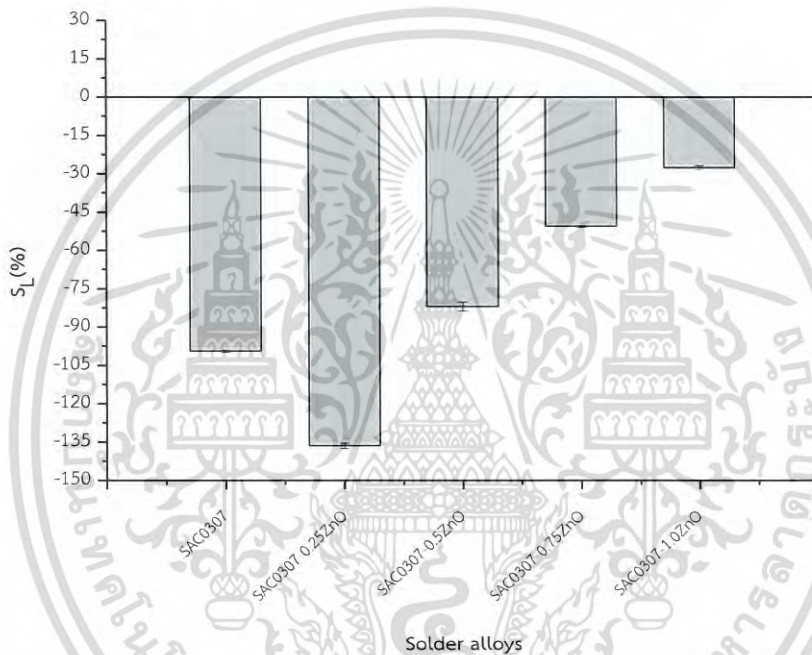


รูปที่ 4.20 ค่าการหลุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC307-yZnO ( $y=0.0, 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1.0$  wt%) ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

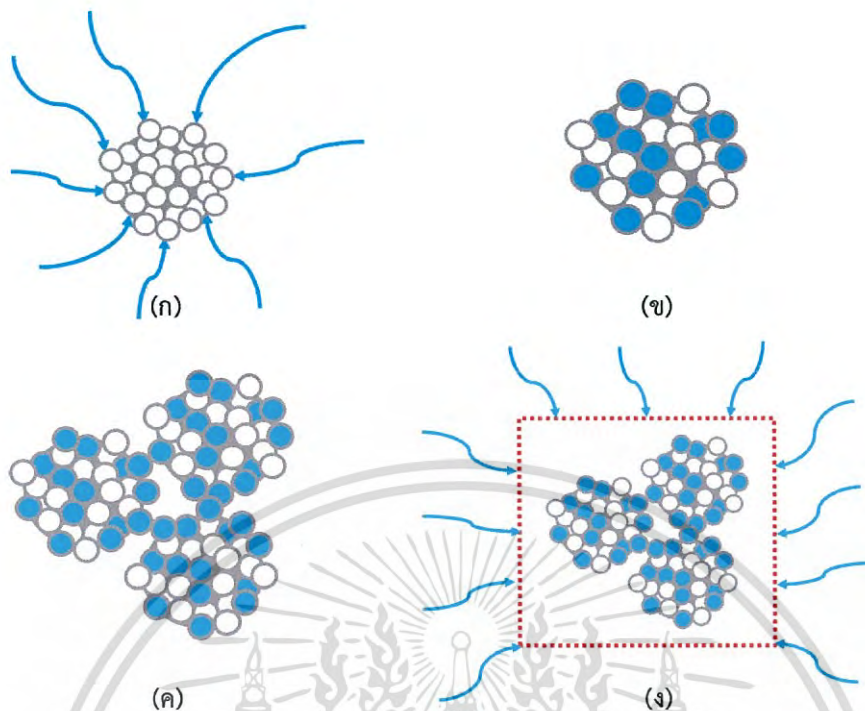


รูปที่ 4.21 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC307-yZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  (ก) - (จ) ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

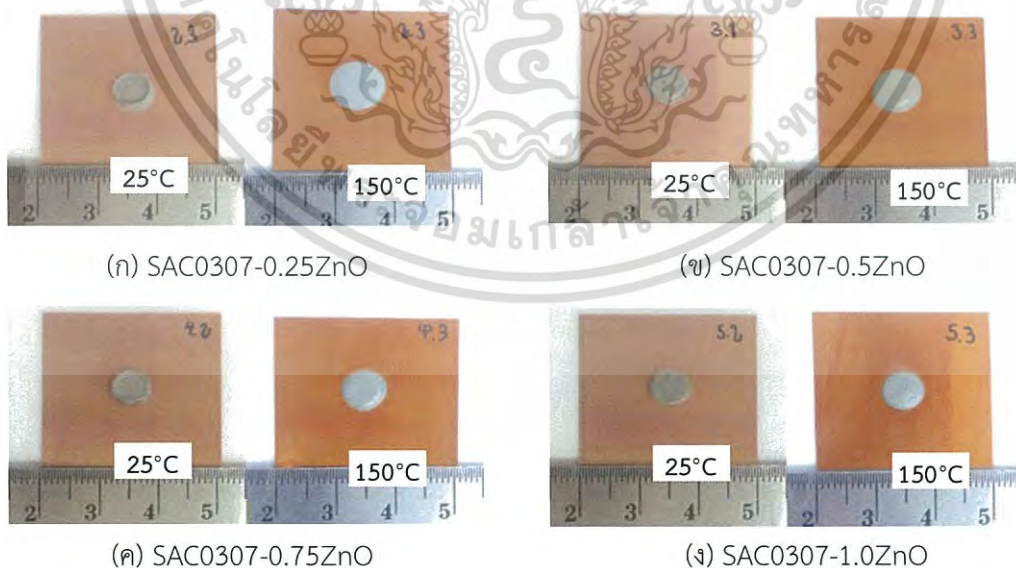
ในทางกลับกันดังกราฟในรูปที่ 4.22 ที่อุณหภูมิสูง พบว่าแนวโน้มการหลุดตัวของโลหะบัดกรีกลับลดลง เนื่องจากได้ทำการทดสอบภายในตู้อบลมร้อน โดยความร้อนจากการอบทำให้ความชื้นในอนุภาคนาโนมีแนวโน้มที่ลดลง และจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนโดยไม่แยกออกจากกัน ทำให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบัดกรี ดังแสดงในแผนภาพจำลองในรูปที่ 4.23 ทั้งนี้ความหนืดของโลหะบัดกรีจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ส่งผลให้โอกาสที่โลหะบัดกรีจะเกิดการหลุดตัวเกิดขึ้นได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐานดังรูปที่ 4.19 และ 4.24-ก-ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ค่าการหลุดตัวเฉื่อยของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO (y= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%) ที่อุณหภูมิ 150°C



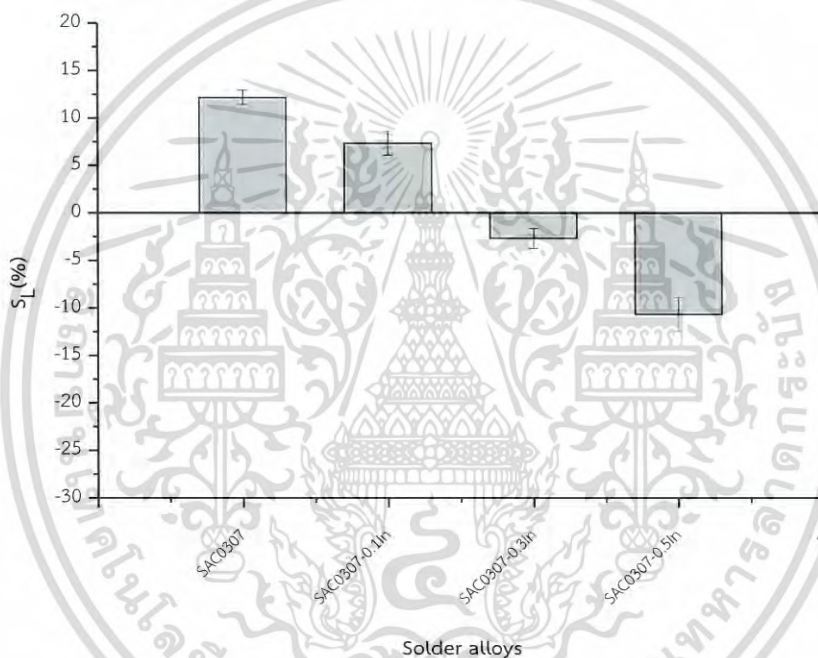
รูปที่ 4.23 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ 150°C (ก) – (ง) ตามลำดับ



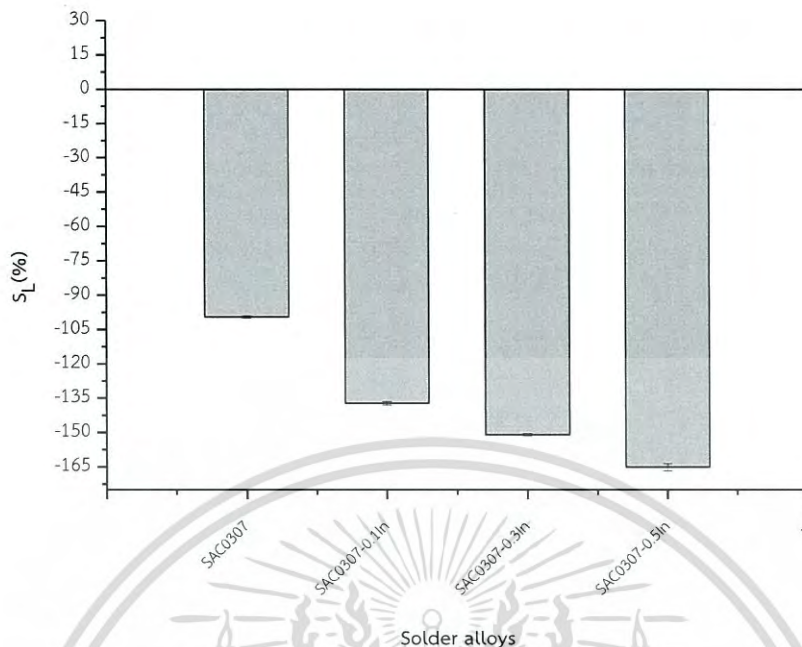
รูปที่ 4.24 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแบบครีม (ก) – (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ 4.25-4.26 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีของเงื่อนไขที่มีการเติมเฉพา In ที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 wt% โดยพบว่า การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองอุณหภูมิ คือ มีการทรุดตัวเพิ่มขึ้นตามระดับการเติมของ In ที่เพิ่มขึ้น คือ โดยการเติม In ที่ 0.5 wt% พบว่าโลหะบัดกรีเกิดการทรุดตัวสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง  $-10.67 \pm 1.76$  % และที่อุณหภูมิสูง  $-165.17 \pm 1.61$  % ดังตัวอย่างชิ้นงานในรูปที่ 4.27ก-ค ซึ่งมีความสอดคล้องกับที่กล่าวได้ไว้ในข้างต้นเกี่ยวกับรูปร่างของ In ว่ามีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างผิวน้อย เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย และส่งผลให้เกิดการทรุดตัวได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%) ที่อุณหภูมิ 25°C

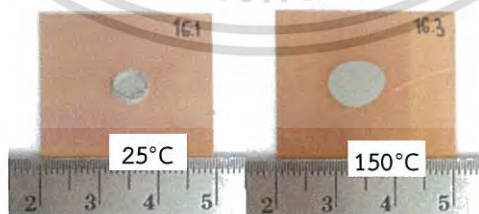


รูปที่ 4.26 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%) ที่อุณหภูมิ 150°C



(ก) SAC0307-0.1In

(ข) SAC0307-0.3In

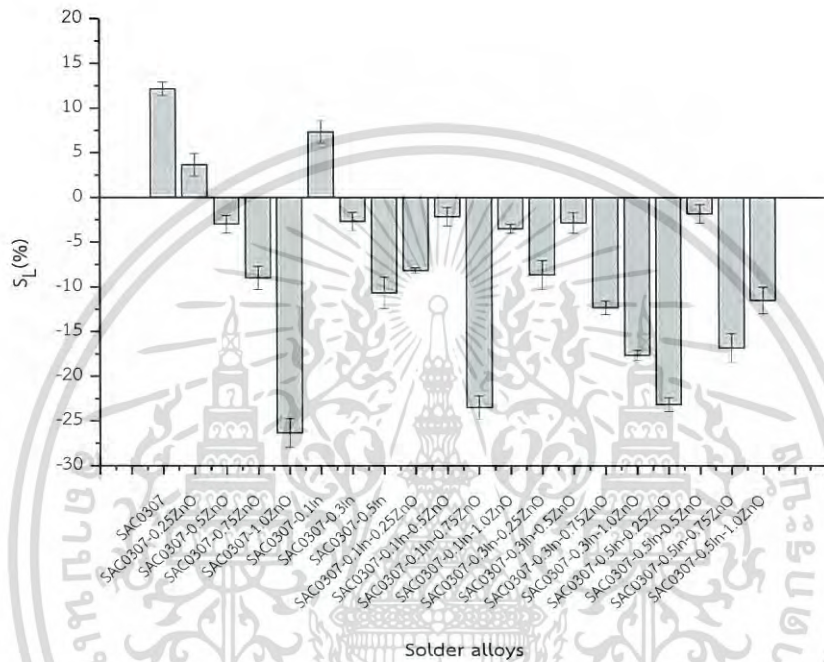


(ค) SAC0307-0.5In

รูปที่ 4.27 การหดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบแบบครีม (ก) – (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในกรณีที่มีการเติมสารทั้งสองชนิดลงในโลหะบัดกรีพร้อมกันที่อุณหภูมิ 25°C ดังรูปที่ 4.28 และในตารางที่ 4.9 ที่ปริมาณ In เท่ากันการเติมอนุภาคนาโน ZnO น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 wt% จะให้ค่าการหดตัวที่ต่ำเมื่อเทียบกับในความเข้มข้นอื่นๆ ขณะที่ในเงื่อนไขที่มีปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO เท่ากันผสมกับ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าระดับการเติม In ที่มากขึ้นตั้งแต่ 0.3 wt% ขึ้นไป ไม่ทำให้ค่าการหดตัวลดต่ำลง



รูปที่ 4.28 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 4.9 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี	ค่าการหดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
	25 (°C)	150 (°C)
1. SAC0307	12.17 ± 0.76	-99.50 ± 0.50
2. SAC0307-0.25ZnO	3.67 ± 1.26	-136.50 ± 1.00
3. SAC0307-0.5ZnO	-3.00 ± 1.00	-82.00 ± 1.73
4. SAC0307-0.75ZnO	-9.00 ± 1.32	-50.67 ± 0.29
5. SAC0307-1.0ZnO	-26.33 ± 1.61	-27.67 ± 0.76
6. SAC0307-0.1In	7.33 ± 1.26	-137.17 ± 0.76
7. SAC0307-0.3In	-2.67 ± 1.04	-151.00 ± 0.50
8. SAC0307-0.5In	-10.67 ± 1.76	-165.17 ± 1.61
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	-8.17 ± 0.29	-52.17 ± 1.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

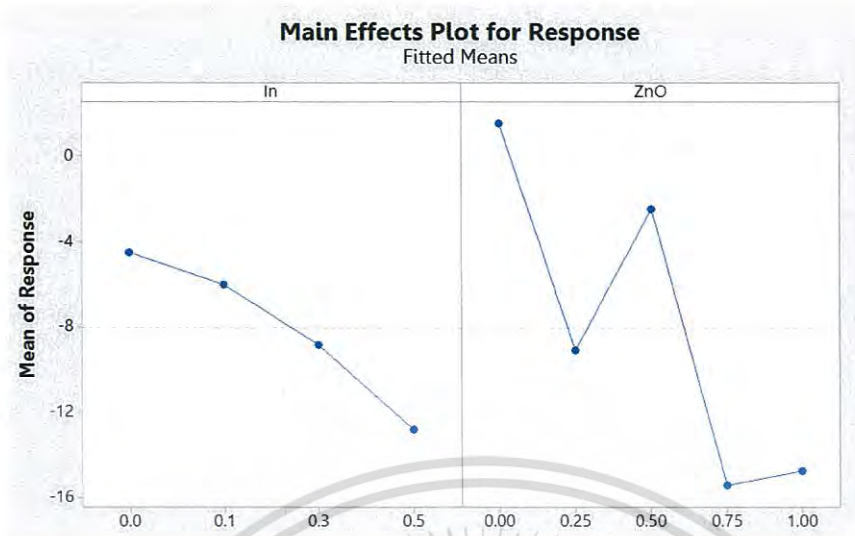
ตารางที่ 4.9 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ค่าการหดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
	25 (°C)	150 (°C)
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	-2.17 ± 1.04	-37.17 ± 0.29
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	-23.5 ± 1.32	-35.67 ± 1.04
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	-3.50 ± 0.50	-27.50 ± 0.50
13. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	-8.67 ± 1.61	-6.67 ± 2.36
14. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	-2.83 ± 1.15	-55.83 ± 1.04
15. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	-12.33 ± 0.76	-22.67 ± 0.29
16. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	-17.67 ± 0.58	-23.50 ± 1.80
17. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	-23.17 ± 0.76	-6.33 ± 0.58
18. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	-1.83 ± 1.04	-36.50 ± 0.87
19. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	-16.83 ± 1.61	-31.33 ± 1.15
20. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	-11.50 ± 1.50	-5.00 ± 1.80

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าปัจจัยหลัก In และอนุภาคนาโน ZnO มีผลต่อค่าการหดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 4.10-4.11 และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ Regression ออกมาดังสมการที่ 4.3 โดยพบว่ามีค่า R-Squared เป็น 59.44% แสดงถึงค่า Error ที่สูงของการทดสอบอาจส่งผลให้ปัจจัยหลักอย่างสารทั้งสองชนิดไม่สามารถแสดงอิทธิพลที่มีต่อค่าการหดตัวที่อุณหภูมิห้องออกมาได้อย่างเด่นชัด ส่วนถ้าพิจารณาจากค่า F-value จะพบว่าอิทธิพลของการเติมอนุภาคนาโน ZnO เพียงชนิดเดียวจะมีค่าสูงกว่า In ถึงสองเท่า ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Main Effects Plot ในรูปที่ 4.29 ทำให้เมื่อมีการเติมทั้งสารทั้งสองชนิดในเวลาเดียวกันอาจไม่สามารถแสดงอิทธิพลของ In ออกมาได้อย่างชัดเจน

$$\text{Slump (25°C)} = 10.63 - 48.35 \text{ In} - 29.94 \text{ ZnO} + 63.9 \text{ In*ZnO} \quad (4.3)$$

จากงานวิจัยนี้ พบว่าการเติมเฉพาะ In และอนุภาคนาโนในสัดส่วนที่สูงขึ้นส่งผลให้แนวโน้มของค่าการหดตัวลดลง ขณะที่การเติมสารทั้งสองชนิดพร้อมกันกลับมีแนวโน้มของการหดตัวของโลหะบัดกรีที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามแม้โมเดลของสมการนี้จะให้ค่า R-squared ที่ต่ำ แต่ก็ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแบบคณิตศาสตร์นี้ไม่มีความเหมาะสม เพราะแม้ว่าค่า R-Squared จะมีค่าต่ำ แต่ค่า P-value ยังคงมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced Model ของค่าการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25°C

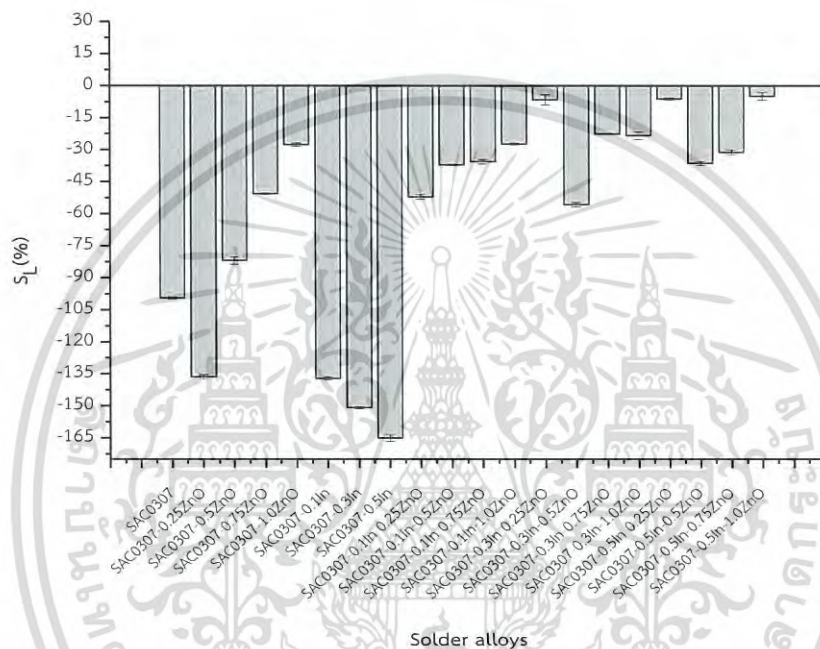
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
In	1	1724.09	1724.09	39.94	<0.001
ZnO	1	2833.51	2833.51	65.65	<0.001
In*ZnO	1	1128.80	1128.80	26.15	<0.001
Error	56	2417.16	43.16		
Total	59	5958.93			

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced Model ของค่าการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25°C

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-value
Constant	10.63	2.26	4.70	<0.001
In	-48.35	7.65	-6.32	<0.001
ZnO	-29.94	3.70	-8.10	<0.001
In*ZnO	63.90	12.50	5.11	<0.001

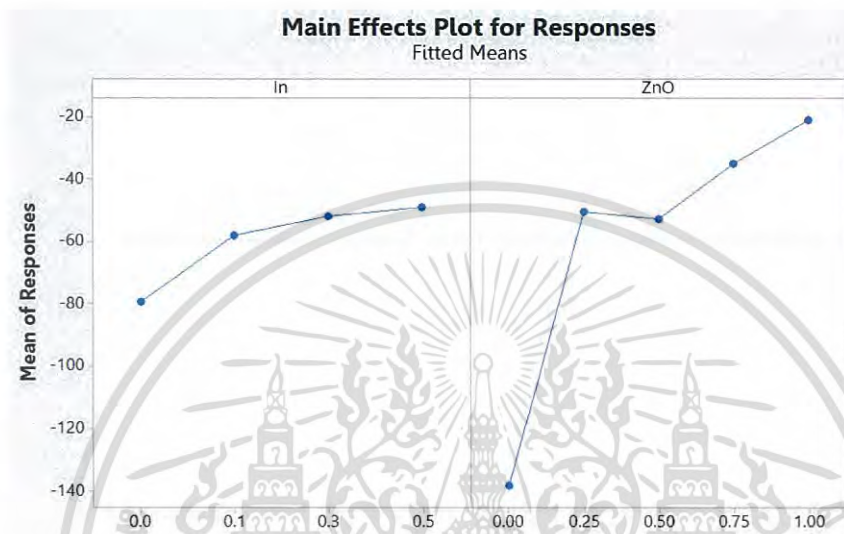
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งต่างจากที่อุณหภูมิ 150°C ที่โลหะบัดกรีแบบครีมีแนวโน้มนการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เมื่อมีการเติมสารทั้งสองชนิดลงในบัดกรีพร้อมกันที่อุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.9 โดยที่ปริมาณ In เท่ากันการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในระดับการเติมที่สูงขึ้น ตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป พบว่ามีค่าการทรุดตัวที่ลดต่ำลง ขณะที่ในเงื่อนไขที่มีปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO เท่ากันผสมกับ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นคงที่พร้อมกับ In ช่วยให้มีค่าการทรุดตัวลดต่ำลงตามระดับการเติมของ In ที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.30 ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่อุณหภูมิ 150°C

จากผล ANOVA เมื่อพิจารณาจากค่า F-value จะเห็นได้ชัดว่าอิทธิพลของการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัวสูงกว่า In ค่อนข้างมาก ดังกราฟ Main Effects Plot ในรูปที่ 4.31 ดังนั้นการเติมสารทั้งสองชนิดพร้อมกันอิทธิพลของ In อาจไม่สามารถแสดงออกมาได้อย่างเด่นชัดเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C

สำหรับในตารางที่ 4.12-4.13 เป็นการแสดงผล ANOVA ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการ Regression ได้ดังสมการที่ 4.4 ที่มีค่า R-squared เท่ากับ 77.20%

$$\text{Slump (150}^{\circ}\text{C)} = -124.6 - 51.5 \text{ In} + 328.3 \text{ ZnO} - 662 (\text{ZnO})^2 + 692 \text{ In} * \text{ZnO} + 438 (\text{ZnO})^3 - 636 \text{ In} * (\text{ZnO})^2 \quad (4.4)$$

จากงานวิจัยนี้ พบว่าการเติมเฉพาะ In ในระดับการเติมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มของค่าการทรุดตัวเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การเติมเฉพาะอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่มากขึ้นจะให้แนวโน้มของค่าการทรุดตัวเช่นเดียวกันกับการเติมสารทั้งสองชนิดพร้อมกัน คือ ให้แนวโน้มของการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่ลดลง หรือ มีการหดตัวที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่งที่ได้จากการทดสอบนี้ คือ การทำให้โลหะบัดกรีแบบคริมกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไม่ช่วยให้โลหะบัดกรีเกิดการทรุดตัวลดลงทั้งที่ทดสอบในอุณหภูมิต่ำและสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ Reduced Model ของค่าการทรุดตัวของโลหะ-  
บัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
ln	1	1324	1324.20	2.04	0.159
ZnO	1	9999	9999.50	15.43	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	1	7685	7684.70	11.86	0.001
ln*ZnO	1	10653	10653.10	16.44	0.021
(ZnO) <sup>3</sup>	1	8093	8093.40	12.49	0.001
ln*(ZnO) <sup>2</sup>	1	9798	9798.30	15.12	<0.001
Error	50	34343	648.00		
Total	59	150616			

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ Regression ของ Reduced Model ของค่าการทรุดตัวของ  
โลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 150°C

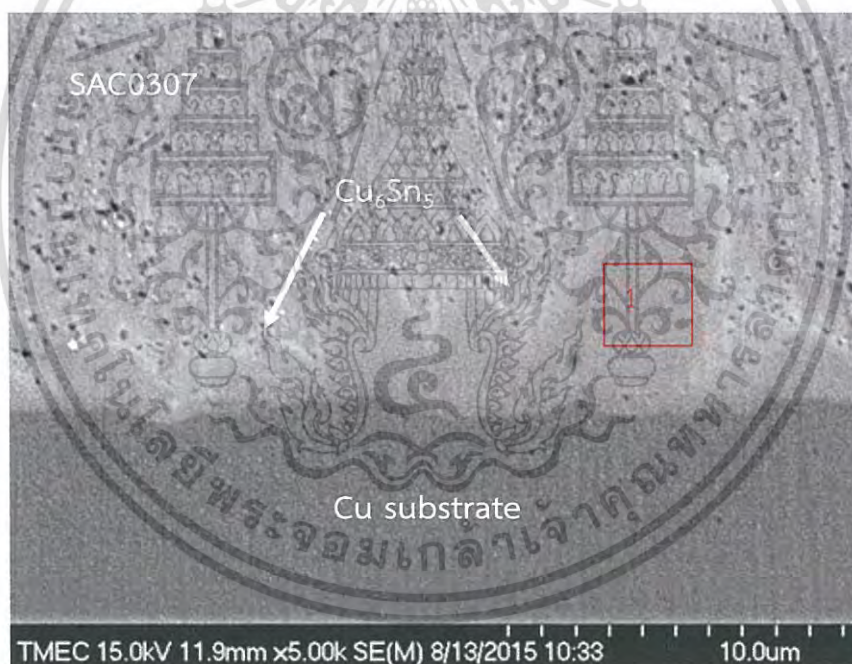
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-value
Constant	-124.60	10.90	-11.43	<0.001
ln	-51.50	36.00	-1.43	0.159
ZnO	328.30	83.60	3.93	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	-662.00	192.00	-3.44	0.001
ln*ZnO	-662.00	171.00	4.05	<0.001
(ZnO) <sup>3</sup>	438.00	124.00	3.53	0.001
ln*(ZnO) <sup>2</sup>	-636.00	164.00	-3.89	<0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds: IMC)

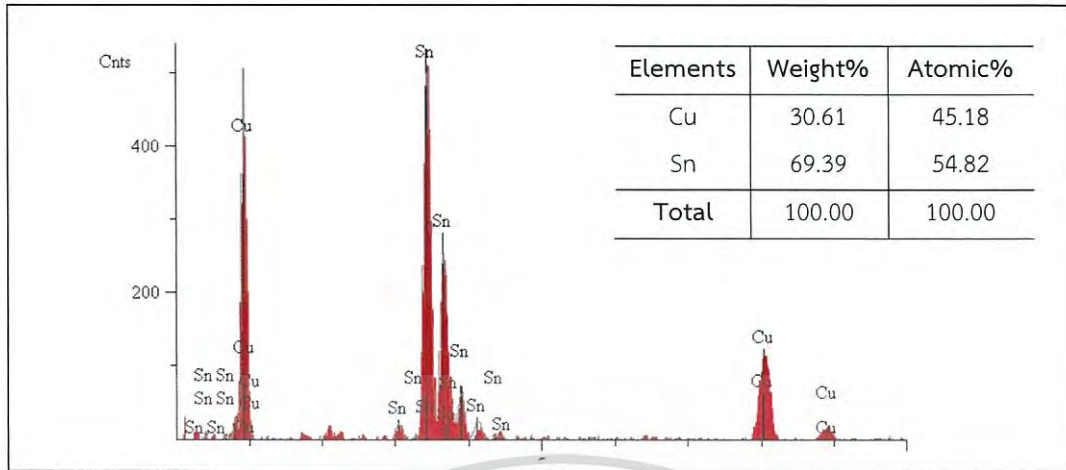
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย FE-SEM และ EDS ที่รอยบัดกรี พบว่าเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO กับแผ่นรองทองแดงชั้น โดยนำภาพหลังการทดสอบจากเครื่อง FE-SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า มาทำการศึกษาและใช้โปรแกรม Image-pro Express ในการวัดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และจากการตรวจสอบชนิดของธาตุที่พบบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDS ในงานวิจัยนี้พบเฉพาะชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  เพียงชนิดเดียวเท่านั้น

สำหรับการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDS จะแสดงผลเป็นหน่วยของเปอร์เซ็นต์อะตอม (at%) เพื่อแสดงส่วนผสมของแต่ละเฟส ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งจะพบว่ามีปริมาณของธาตุ Cu 45.18 at% และ Sn 54.82 at% ดังรูปที่ 4.33 จากส่วนผสมดังกล่าวพบว่าเป็นเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$



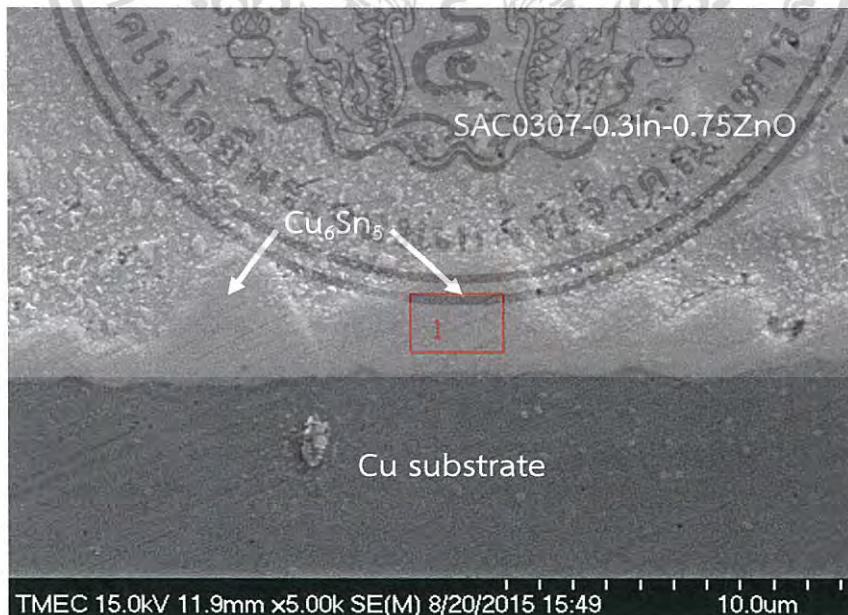
รูปที่ 4.32 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี SAC0307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



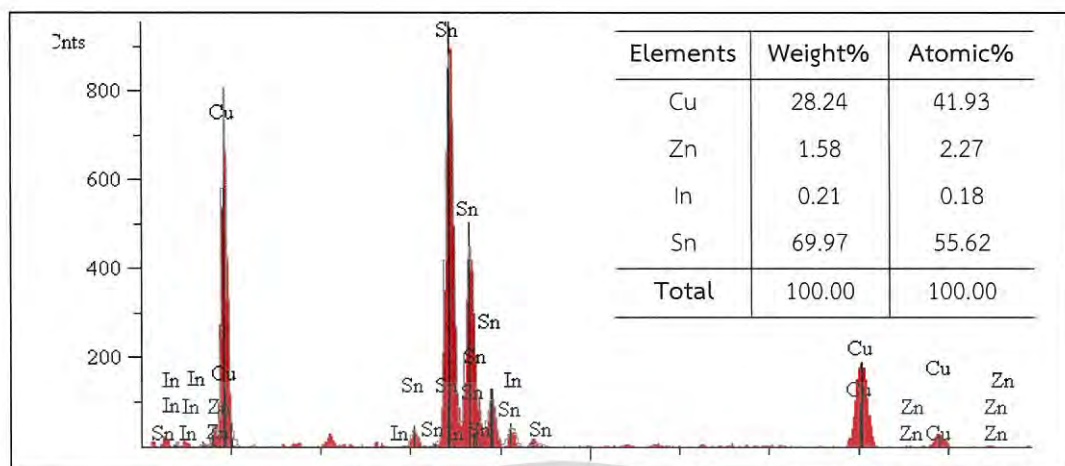
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของ SAC0307 บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

ขณะที่ในชิ้นงานในรูปที่ 4.34 ที่มีระดับการเติมของ In ที่ 0.3 wt% และอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.75 wt% พบว่ามีปริมาณของธาตุ Cu 41.93 at% , Zn 2.27 at% , In 0.18 at% และ Sn 55.62 at% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 โดยจากส่วนผสมดังกล่าวพบว่ายังคงเป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  เช่นเดียวกับในเงื่อนไขอื่น ๆ และยังเป็นเงื่อนไขที่ให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเฉลี่ยน้อยที่สุดจากการทดสอบ



รูปที่ 4.34 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี SAC0307-0.3In-0.75ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

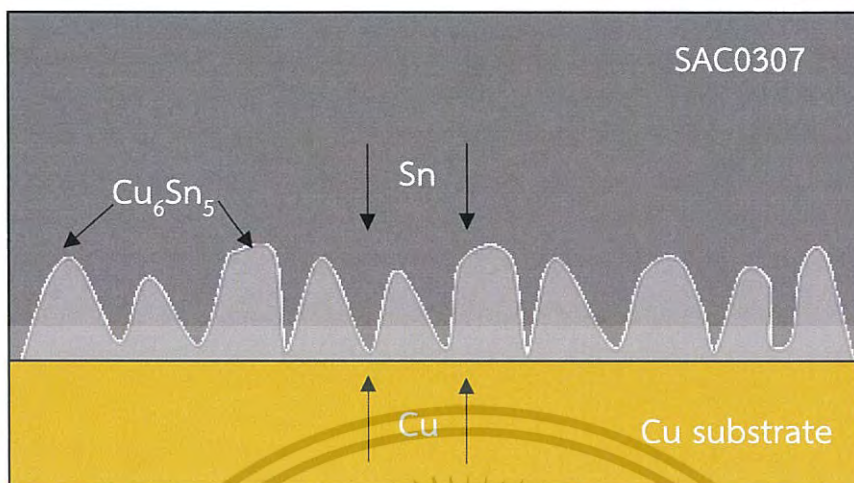


รูปที่ 4.35 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของ SAC0307-0.3In-0.75ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

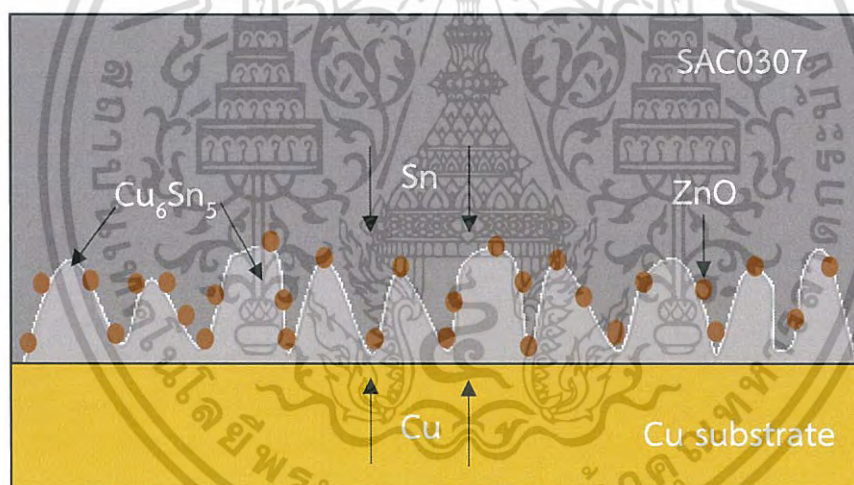
สำหรับเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมทองแดง (Cu) ของแผ่นรองทองแดง และดีบุก (Sn) ของเนื้อโลหะบัดกรี จนเกิดเป็นชั้นสารประกอบดังกล่าวขึ้น มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับเปลือกหอย (Scallop) ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งหลังจากได้มีการเติม In และอนุภาคนาโน ZnO ลงไปในโลหะบัดกรี พบว่าปริมาณของสารทั้งสองชนิดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ดังแสดงในรูปที่ 4.39-4.41 และตารางที่ 4.14

ในส่วนของเงื่อนไขที่มีการเติมเฉพาะอนุภาคนาโน ZnO ลงในโลหะบัดกรี พบว่าที่ระดับการเติมอนุภาคนาโน ( $\leq 0.25$  wt%) มีแนวโน้มของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 คือ  $3.71 \pm 0.02$  และ  $3.31 \pm 0.02$   $\mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงในโลหะบัดกรี ที่ช่วยเพิ่ม Nucleation site หรือ พื้นที่ในการเกิด  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิด  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.36-4.37 ตามลำดับ

ขณะที่ค่าความหนาจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น ( $> 0.25$  wt%) โดยการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่มากเกินไปนี้จะทำให้อนุภาคนาโนบางส่วนขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอม Cu และ Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ดังนั้นการเติมอนุภาคนาโนในสัดส่วนที่มากขึ้นมากกว่า 0.25 wt% ขึ้นไป จึงช่วยลดค่าความหนาของสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ให้มีค่าลดลงได้ [31, 93]

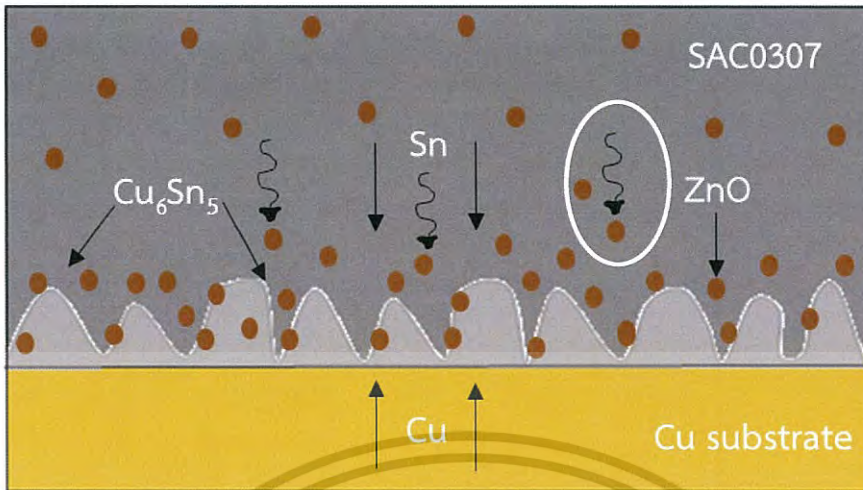


รูปที่ 4.36 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 และแผ่นรองทองแดง

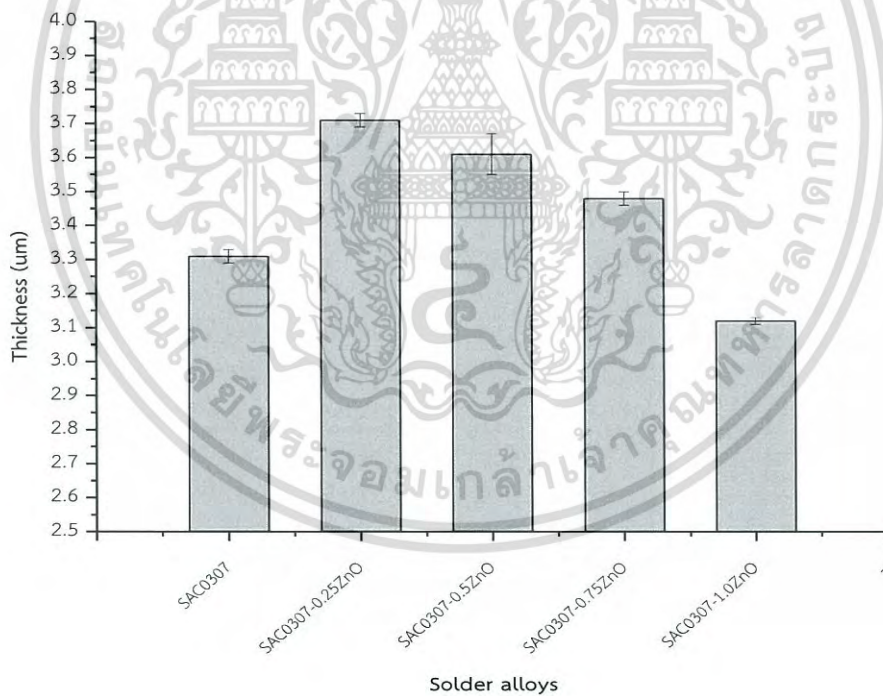


รูปที่ 4.37 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307-yZnO ( $y \leq 0.25$  wt%) และแผ่นรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

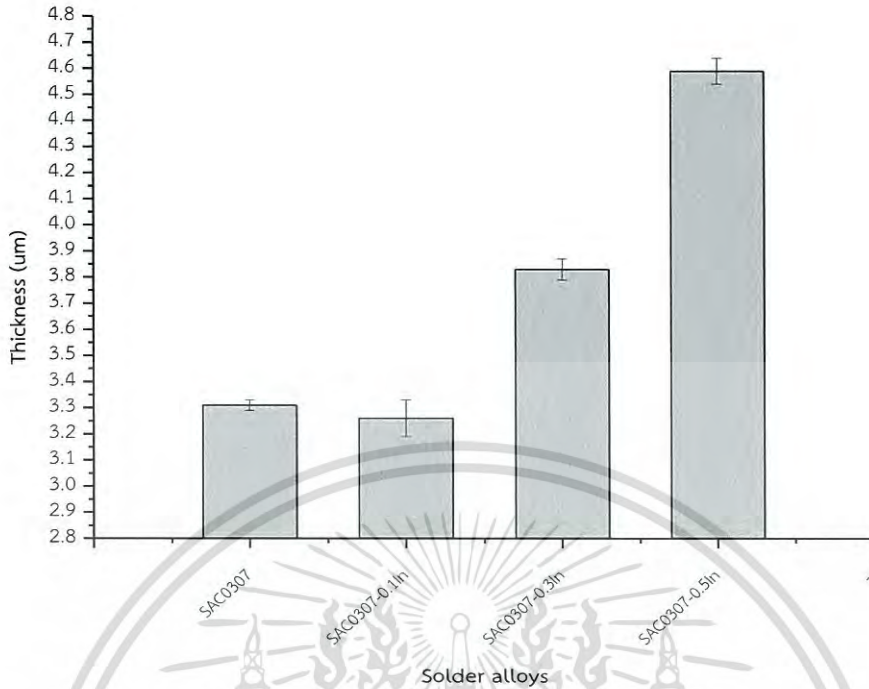


รูปที่ 4.38 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307-yZnO ( $y > 0.25$  wt%) และแผ่นรองทองแดง

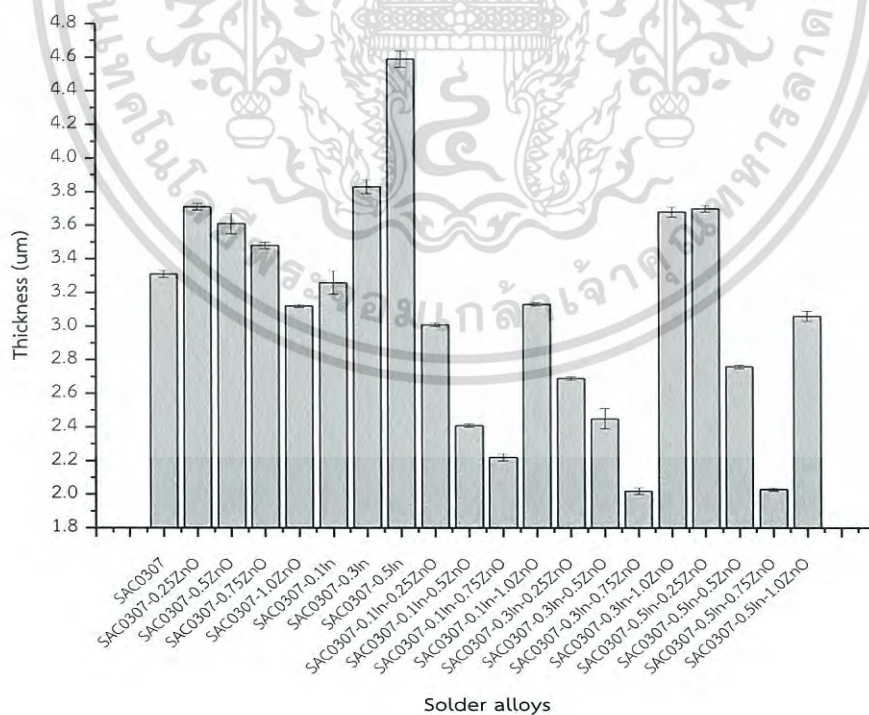


รูปที่ 4.39 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเฉื่อยของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO ( $y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1.0$  wt%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเจือของโลหะบัดกรี SAC0307-xIn (x = 0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%)



รูปที่ 4.41 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเจือหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

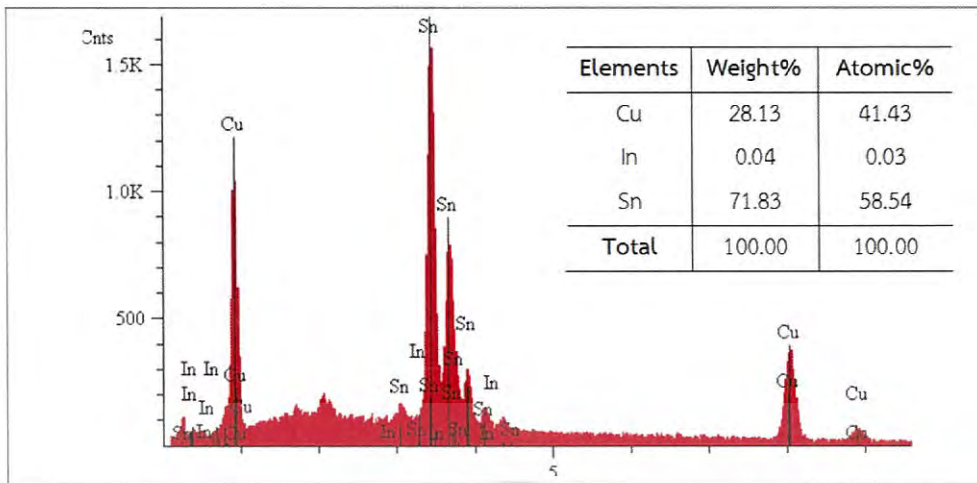
ตารางที่ 4.14 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

โลหะบัดกรี	ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )
1. SAC0307	$3.31 \pm 0.02$
2. SAC0307-0.25ZnO	$3.71 \pm 0.02$
3. SAC0307-0.5ZnO	$3.61 \pm 0.06$
4. SAC0307-0.75ZnO	$3.48 \pm 0.02$
5. SAC0307-1.0ZnO	$3.12 \pm 0.01$
6. SAC0307-0.1In	$3.26 \pm 0.07$
7. SAC0307-0.3In	$3.83 \pm 0.04$
8. SAC0307-0.5In	$4.59 \pm 0.05$
9. SAC0307-0.1In-0.25ZnO	$3.01 \pm 0.01$
10. SAC0307-0.1In-0.5ZnO	$2.41 \pm 0.01$
11. SAC0307-0.1In-0.75ZnO	$2.22 \pm 0.02$
12. SAC0307-0.1In-1.0ZnO	$3.13 \pm 0.01$
13. SAC0307-0.3In-0.25ZnO	$2.69 \pm 0.01$
14. SAC0307-0.3In-0.5ZnO	$2.45 \pm 0.06$
15. SAC0307-0.3In-0.75ZnO	$2.02 \pm 0.02$
16. SAC0307-0.3In-1.0ZnO	$3.68 \pm 0.03$
17. SAC0307-0.5In-0.25ZnO	$3.70 \pm 0.02$
18. SAC0307-0.5In-0.5ZnO	$2.76 \pm 0.01$
19. SAC0307-0.5In-0.75ZnO	$2.03 \pm 0.01$
20. SAC0307-0.5In-1.0ZnO	$3.06 \pm 0.03$

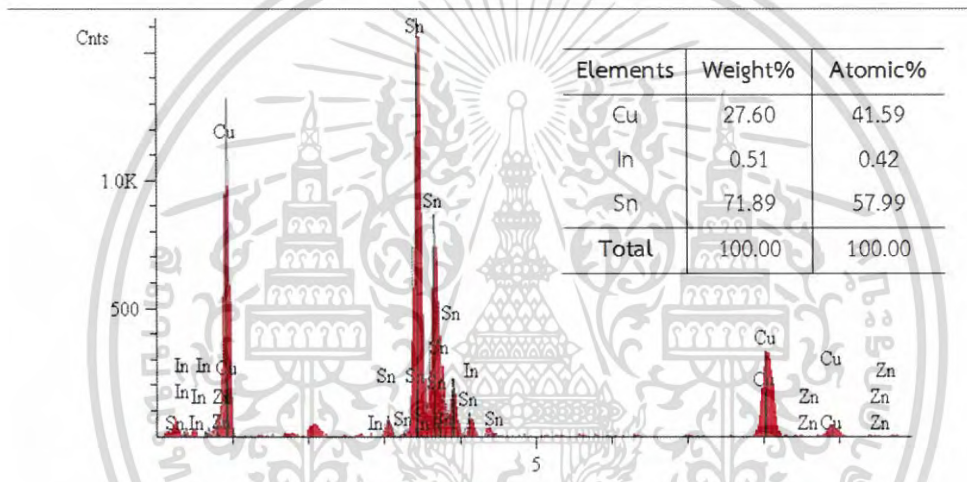
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในกรณีที่มีการเติมเฉพาะ In พบว่าผลของการเติม In ในระดับการเติมที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากผล EDS ในรูปที่ 4.42 บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรี SAC0307-xIn ( $x=0.1, 0.3$  และ  $0.5$  wt%) และแผ่นรองทองแดง พบว่ามีเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6(Sn, In)_5$  เกิดขึ้นแทนที่เฟสของ  $Cu_6Sn_5$  จากระศมีอะตอมของ Sn และ In ที่มีความใกล้เคียงกัน เท่ากับ 145 และ 155 pm ตามลำดับ รวมทั้งมีโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน คือ Tetragonal ซึ่งการมีระศมีอะตอมที่มีความใกล้เคียงกันและโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันนี้ทำให้อะตอม Sn และ In เกิดการแทนที่กันระหว่างอะตอมได้ในระหว่างที่อะตอม Sn กำลังทำปฏิกิริยากับอะตอม Cu จนเกิดเป็นเฟสของ  $Cu_6(Sn, In)_5$  ขึ้น นอกจากนี้ความคล้ายคลึงกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics affinity) ของ Cu กับ In ที่มากกว่าอะตอมของ Cu กับ Sn [40] เป็นอีกเหตุผลที่ทำให้เกิดการแทนที่ของ In ในเฟสของ  $Cu_6Sn_5$  ด้วยเช่นกัน โดยเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6(Sn, In)_5$  ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีสัดส่วนอยู่ในช่วง  $Cu_6(Sn_{0.99}, In_{0.01})_5$  และ  $Cu_6(Sn_{0.98}, In_{0.02})_5$  [43, 94]

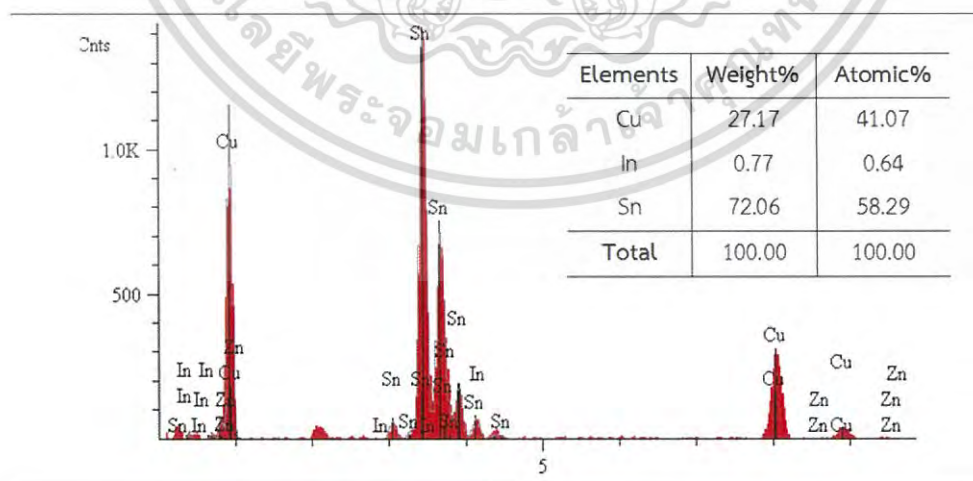
เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ In ทำให้โลหะบัดกรีมีอุณหภูมิ Liquidus ที่ลดลง ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบัดกรีและอุณหภูมิ Liquidus จึงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณ In ที่เพิ่มขึ้น (เปรียบเสมือนเป็นการการบัดกรีที่อุณหภูมิสูงขึ้น) ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่หนาขึ้น



(ก) SAC0307-0.1In



(ข) SAC0307-0.3In

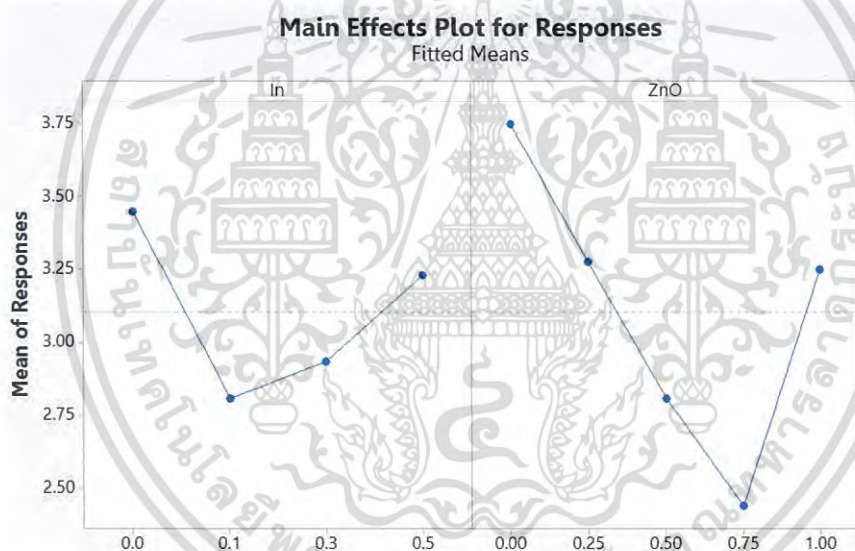


(ค) SAC0307-0.5In

รูปที่ 4.42 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  (ก) - (ค) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำสารทั้งสองชนิดผสมลงในโลหะบัดกรีในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณ In เท่ากันผสมกับอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของ ZnO > 0.75 wt% มีแนวโน้มค่าความหนาที่มากขึ้น เช่นเดียวกับในเงื่อนไขที่มีปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO เท่ากันผสมกับ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของ In ที่ 0.5 wt% ให้ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ในตารางที่ 4.15 พิจารณาจากค่า P-value ของ ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ พบว่าทุกปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ความเชื่อมั่น 95% และมีค่า R-Squared เท่ากับ 86.04% แสดงว่า In และอนุภาคนาโน ZnO ต่างมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า F-value จะพบว่า In เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนามากกว่า ZnO ค่อนข้างมาก ดังกราฟ Main Effects Plot ในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลระดับนัยสำคัญต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
ln	1	1.8697	1.86974	26.05	<0.001
ZnO	1	0.6260	0.62603	8.72	0.005
(ln) <sup>2</sup>	1	1.9278	1.92777	26.86	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	1	1.4277	1.42772	19.89	<0.001
ln*ZnO	1	0.8121	0.81205	11.32	0.001
(ln) <sup>3</sup>	1	0.9999	0.99985	13.93	<0.001
(ZnO) <sup>3</sup>	1	1.6591	1.65910	23.12	<0.001
(ln) <sup>2</sup> *ZnO	1	0.7239	0.72393	10.09	0.003
ln*(ZnO) <sup>2</sup>	1	3.3772	3.37716	47.06	<0.001
Error	50	3.5881	0.07176		
Total	59	25.6995			

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-value
Constant	3.562	0.132	26.95	<0.001
ln	-10.080	1.980	-5.10	<0.001
ZnO	2.614	0.885	2.95	0.005
(ln) <sup>2</sup>	46.660	9.000	5.18	<0.001
(ZnO) <sup>2</sup>	-9.020	2.020	-4.46	<0.001
ln*ZnO	-8.780	2.610	-3.36	0.001
(ln) <sup>3</sup>	-42.900	11.500	-3.73	<0.001
(ZnO) <sup>3</sup>	6.270	1.300	4.81	<0.001
(ln) <sup>2</sup> *ZnO	-11.960	3.770	-3.18	0.003
ln*(ZnO) <sup>2</sup>	11.810	1.720	6.86	<0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร In และ ZnO ที่มีต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังตารางที่ 4.16 และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Regression ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$\begin{aligned} \text{Thickness} = & 3.562 - 10.08 \text{ In} + 2.614 \text{ ZnO} + 46.66 (\text{In})^2 - 9.02 (\text{ZnO})^2 \\ & - 8.78 \text{ In} * \text{ZnO} - 42.9 (\text{In})^3 + 6.27 (\text{ZnO})^3 - 11.96 (\text{In})^2 * \text{ZnO} \\ & + 11.81 \text{ In} * (\text{ZnO})^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

โดยจากงานวิจัยนี้อาจจะกล่าวได้ว่าการเติมเฉพาะอนุภาคนาโน ZnO ให้แนวโน้มของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ลดลง ขณะที่การเติมเฉพาะ In กลับให้แนวโน้มของค่าความหนาที่เพิ่มสูงขึ้น แต่หากมีการเติมสารทั้งสองชนิดลงในโลหะบัดกรีพร้อมกันในปริมาณที่เหมาะสมก็สามารถช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของอินเดียม (In) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง โดยหลังการทดสอบ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO มีแนวโน้มคงที่เมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ที่เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ระดับการเติมที่เพิ่มขึ้นของ In ส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิ Solidus-Liquidus ของโลหะบัดกรีมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย

2. จากการทดสอบความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC0307 ทุกความเข้มข้นของการเติมอนุภาคนาโน ZnO (0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%) และ In (0.0, 0.1, 0.3 และ 0.5 wt%) ให้แนวโน้มของการกระจายตัวที่ดีขึ้น คือ มีค่าตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัวเพิ่มสูงขึ้น และมีค่ามุมสัมผัสลดลง ตามลำดับ แต่พบว่าหากมีระดับการเติมของ ZnO สูงกว่า 0.5 wt% จะส่งผลให้ความสามารถในการเปียกลดลงได้เช่นกัน

3. จากการทดสอบความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO ระดับการเติมของ In ที่สูงขึ้น และอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนไม่เกิน 0.5 wt% ช่วยให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการพิมพ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี  $\geq 68\%$  แต่หากมีการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีในสัดส่วนที่มากเกินไป จะส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ทำการพิมพ์ได้ยากขึ้น

4. จากการทดสอบความสามารถในการหลุดตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO พบว่าการทดสอบอุณหภูมิสูง  $150^{\circ}\text{C}$  โลหะบัดกรีมีแนวโน้มเกิดการหลุดตัวมากกว่าที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิห้อง  $25^{\circ}\text{C}$  ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยการเติมอนุภาคนาโน ZnO และ In ไม่ช่วยให้โลหะบัดกรีมีแนวโน้มเกิดการหลุดตัวลดลงในแหล่งทดสอบทั้งสองอุณหภูมิ

5. จากการตรวจสอบชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย FE-SEM และตรวจสอบปริมาณธาตุด้วย EDS ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC0307-xIn-yZnO บนแผ่นรองทองแดง พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่มากกว่า 0.25 wt% ส่งผลให้ความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  มีแนวโน้มที่ลดลง ตรงกันข้ามกับการเติมเฉพาะ In ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะให้แนวโน้มของความหนาที่เพิ่มสูงขึ้น และในทุกเงื่อนไขที่มีการเติมของ In นี้พบว่ามีเฟสใหม่เกิดขึ้น คือ  $\text{Cu}_6(\text{Sn}, \text{In})_5$  อีกด้วย

อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโน ZnO และ In ในสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้

6. สามารถพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบคริมชนิดใหม่จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307 ได้ และจากผลการทดสอบทั้งหมดได้สรุปให้เงื่อนไข “SAC0307-0.1In-0.25ZnO หรือ SAC0307-0.1In-0.5ZnO” เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบที่ดีขึ้น หรือให้ค่าการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0307

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากโลหะบัดกรีสูตร SAC0307-0.1In-0.25ZnO หรือ SAC0307-0.1In-0.5ZnO เป็นสูตรโลหะบัดกรีที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิจัยนี้ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเงื่อนไขที่มีการเติมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในช่วงตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.5 wt% เพราะอาจทำให้พบความเข้มข้นของ ZnO ที่ดีกว่าในโลหะบัดกรีทั้งสองสูตรข้างต้น ทั้งในเรื่องจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การทูลดตัว และโครงสร้างจุลภาคหลังบัดกรี ตามลำดับ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] “WEEE/RoHS Hot Issues.” [Online]. Available : <http://www.thairohs.org>. 2006.
- [2] Abtew, M. and Selvaduray, G. “Lead-free Solders in Microelectronics.” *Materials Science and Engineering R*, Vol. 27, 2000. Pp. 95-141
- [3] Kim K.S. and Sukanuma K. “Development of new Sn-Ag-Cu lead-free solders containing fourth elements.” *Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Ibaraki, JAPAN, December, 2003. Pp. 414-415
- [4] Conrad H., Guo Z., Fahmy Y. and Yang D.I., “Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate and low-cycle fatigue of solder joints.” *Journal of Electronic Materials*, Vol. 28, 1999. Pp. 1062-1070
- [5] Marshall J.L., Calderon J., Sees J., Lucey G. and Hwang J.S., “Composite solders” *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 14, 1991. Pp. 698-702
- [6] Betrabet H.S., McGee S.M. and McKinlay J.K., “Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability.” *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, 1991. Pp. 2323-2328
- [7] Mavoori H. and Jin S., “New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions.” *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, 1998. Pp. 1216–1222
- [8] Kim K.S., Huh S.H. and Sukanuma K., “Effects of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead free soldered joint.” *Journal of Alloys Compounds*, Vol. 532, 2003. Pp. 226-236
- [9] San F., Hochstenbach P., Van Driel W.D. and Zhang G.Q., “Fracture Morphology and mechanism of IMC in Low-Ag SAC Solder/UBM (Ni(P)-Au) for WLCSP.” *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, 2008. Pp. 1167-1170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., “Effect of carbon nanotubes on the shear strength and electrical resistivity of a lead-free solder.” **Journal of Electronic Materials**, Vol. 37, 2008. Pp. 515-522
- [11] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., “Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes.” **Materials Science and Engineering A**, Vol. 423, 2006. Pp. 166-169
- [12] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., “Lead-free solder reinforced with multiwalled carbon nanotubes.” **Journal of Electronic Materials**, Vol. 35, 2006. Pp. 1518-1522
- [13] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., “Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites.” **Thin Solid Films**, Vol. 504, 2006. Pp. 401-404
- [14] Kumar K.M., Kripesh V. and Tay A.A.O., “Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solders.” **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 450, 2008. Pp. 229-237
- [15] Kumar K.M., Kripesh V. and Tay A.A.O., “Study on the microstructure and mechanical properties of a novel SWCNT-reinforced solder alloy for ultra-fine pitch applications.” **Thin Solid Films**, Vol. 504, 2006. Pp. 371-378
- [16] Shen J., Liu Y.C., Han Y.J., Tian Y.M. and Gao H.X., “Strengthening effects of ZrO<sub>2</sub> nanoparticles on the microstructure and microhardness of Sn-3.5Ag lead-free solder.” **Journal of Electronic Materials**, Vol. 35, 2006. Pp. 1672-1679
- [17] Chantaramanee S., Plookphol T., Wisuthmethangoon S. and Sikong L., “Lead-free solder SWCNT nano-composite processing by ultrasonic.” 4<sup>th</sup> **International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals And Environment and 2<sup>nd</sup> Asian Symposium on Materials and Processing**, Penang, Malaysia, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] El-Daly A.A., Fawzy A., Mansour S.F. and Younis M.J., “Thermal analysis and mechanical properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder alloy after modification with SiC nano-sized particles.” **Journal of Materials Science : Materials in Electronics**, Vol. 24, 2013. Pp. 2976-2988
- [19] Lee J.S., Chu K.M., Patzelt R., Manassis D., Ostmann A. and Jeon D Y., “Effects of Co addition in eutectic Sn–3.5Ag solder on shear strength and microstructural development.” **Microelectronic Engineering**, Vol. 85, 2008. Pp. 1577–1583
- [20] Mohankumar K. and Tay A.A.O., “Nano-particle reinforced solders for fine pitch applications.” **Proceedings of 6<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference**, Singapore, 2004.
- [21] El-Daly A.A. and El-Taher A.M., “Evolution of thermal property and creep resistance of Ni and Zn-doped Sn–2.0Ag–0.5Cu lead-free solders.” **Materials and Design**, Vol. 51, 2013. Pp. 789–796
- [22] Shen Y., Qi F., Xie M. and Li J., “The Effect of Nano-Cu Particles on Mechanical Properties of Micro-joining Joint with Lead-free solder.” **Advanced Materials Research**, Vol. 291-294, 2011. Pp. 929–933
- [23] Tsao L.C., Huang C.H., Chung C.H. and Chen R.S., “Influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles addition on the microstructural and mechanical properties of Sn0.7Cu nano-composite solder.” **Materials Science & Engineering A**, Vol. 545, 2012. Pp. 194-200
- [24] Wang Y., Zhao X., Xie X., Gu Y. and Liu Y., “Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles addition on the microstructure, wettability, joint shear force and the interfacial IMC growth of Sn3.0Ag0.5Cu solder.” **Journal of Materials Science : Materials in Electronics**, Vol. 26, 2015. Pp. 9387–9395

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Mohd Salleh M.A.A., Hazizi M.H., Ahmad Z.A., Hussin K. and Ahmad R., “Wettability, Electrical and Mechanical Properties of 99.3Sn-0.7Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Novel Lead-Free Nanocomposite Solder.” **Advanced Materials Research**, Vol. 277, 2011. Pp. 106–111
- [26] Kanlayasiri K., Mongkolwongrojn M. and Ariga T. “Influence of Indium Addition on Characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Alloy.” **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 485, 2009. Pp. 225-230
- [27] Dong M.J., Gao Z.M., Liu Y.C., Wang X. and Yu L.M. “Effect of indium addition on the microstructural formation and soldered interfaces of Sn-2.5Bi-1Zn-0.3Ag lead-free solder.” **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, Vol. 19, 2012. Pp. 1029–1035
- [28] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., “Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes.” **Materials Science and Engineering A**, Vol. 423, 2006. Pp. 166–169
- [29] Xiang K.K., Haseeb A.S.M.A., Arafat M.M. and Yingxin G., “Effects of Mn Nanoparticles on Wettability and Intermetallic Compounds in between Sn-3.8Ag-0.7Cu and Cu Substrate during Multiple Reflow.” **IEEE.2012 4<sup>th</sup> Asia Symposium on Quality Electronic Design**, Penang, Malaysia, July, 2012.
- [30] Tay S.L., Haseeb A.S.M.A., Johan M.R., Munroe P.R. and Quadir M.Z., “Influence of Ni nanoparticle on the morphology and growth of interfacial intermetallic compounds between Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder and copper substrate.” **Intermetallics**, Vol. 33, 2013. Pp. 8-15
- [31] Chen G., Peng H., Silberschmidt V. V., Chan Y.C., Liu C. and Wu F. “Performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu composite solder with TiC reinforcement: Physical properties, solderability and microstructural evolution under isothermal ageing.” **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 685, 2016. Pp. 680–689

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] Jian-Chun L., Gong Z., Zheng-Hong W., Ju-Sheng M. and Katsuaki S., “Thermal property, wettability and interfacial characterization of novel Sn–Zn–Bi–In alloys as low-temperature lead-free solders.” *Materials and Design*, Vol. 84, 2015. Pp. 331–339
- [33] Li L.F., Cheng Y.W., Xu G.L., Wang E.Z., Zhang Z.H. and Wang H., “Effects of indium addition on properties and wettability of Sn–0.7Cu– 0.2Ni lead-free solders.” *Materials and Design*, Vol. 64, 2014. Pp. 15-20
- [34] Fallahi H., Nurulakmala M.S., Fallahi Arezodarb A. and Jamaluddin A., “Effect of iron and indium on IMC formation and mechanical properties of lead-free solder.” *Materials Science & Engineering A*, Vol. 553, 2012. Pp. 22-31
- [35] Guang C., Fengshun W., Changqing L., Weisheng X. and Hui L., “Effects of fullerenes reinforcement on the performance of 96.5Sn–3Ag–0.5Cu lead-free solder.” *Materials Science & Engineering A*, Vol. 636, 2015. Pp. 484-492
- [36] Yue G., Xiuchen Z., Yi L., Ying L., Yong W. and Zhenyu L., “Effect of nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on wettability and interfacial intermetallic growth of low-Ag content Sn–Ag–Cu solders on Cu substrates.” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 627, 2015. Pp. 39–47
- [37] Tang Y., Pan Y.C. and Li G.Y., “Influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on thermal property, wettability and interfacial reaction in Sn–3.0Ag–0.5Cu–xTiO<sub>2</sub> composite solder.” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 24, 2013. Pp. 1587-1594
- [38] Tsao L.C., Chang S.Y., Lee C.I., Sun W.H. and Huang C.H., “Effects of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on microstructure development and hardness of Sn3.5Ag0.5Cu solder.” *Materials and Design*, Vol. 31, 2010. Pp. 4831–4840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] Nguyen J., Aranda R., Geiger D. and Kurwa M., "Assembly Processes Feasibility of Low/No Silver Alloy Solder Paste Materials." **IPC APEX EXPO Conference Proceedings**, Las Vegas, United State of America, March, 2013.
- [40] An B., Xu Z., Chen H., Wu F. and Wu Y., "Solder Paste Printability Tester an Method." **IEEE.2006 7<sup>th</sup> International Conference on Electronics Packaging Technology**, Shanghai, China, August, 2006.
- [41] Durairaj R., Ramesh S., Mallik S., Semen A. and Ekere N., "Rheological characterization and printing performance of Sn/Ag/Cu solder pastes." **Materials and Design**, Vol. 30, 2009. Pp. 3812-3818
- [42] Nguyen J., Geiger D. and Shangguan D., "Evaluation of Lead Free Solder Paste Materials for PCBA." **IPC APEX EXPO Conference Proceedings**, Las Vegas, United State of America, April, 2011.
- [43] Kanlayasiri K and Sukpimaj K. "Effect of indium on the metallic layer between low-Ag SAC0307-xin lead-free solders and Cu substrate." **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 668, 2016. Pp. 169-175
- [44] Sobhy M. , El-Refai A.M., Mousa M.M. and Saad G., "Effect of ageing time on the tensile behavior of Sn-3.5 wt%Ag-0.5 wt% Cu (SAC355) solder alloy with and without adding ZnO nanoparticles." **Materials Science and Engineering A**, Vol. 646, 2015. Pp. 82-89
- [45] Tang Y., Li G.Y. and Pan Y.C., "Influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO<sub>2</sub> solder joints in reflow process." **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 554, 2013. Pp. 195-203
- [46] Chellvarajoo S. and Abdullah M.Z., "Microstructure and mechanical properties of Pb-free Sn-3.0Ag-0.5Cu solder pastes added with NiO nanoparticles after reflow soldering process." **Materials and Design**, Vol. 90, 2016. Pp. 499-507

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [47] Liu P., Yao P. and Liu J., "Effect of SiC Nanoparticle Additions on Microstructure and Microhardness of Sn-Ag-Cu Solder Alloy." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 37, 2008. Pp. 874-879
- [48] Mikell P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems*. 4<sup>th</sup> ED. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [49] ฉวีวรรณ ลีสมบูรณ์. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [50] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. *กระบวนการผลิต Manufacturing Processes*. กรุงเทพฯ : ซีไอเดียเคชั่น. 2559
- [51] Adel M. A. Mohamed and Teresa D. Golden. 2016. *Electrodeposition of Composite Materials*. : InTech.
- [52] R.D. Brown, Jr., "Indium in Mineral Commodity Summaries." *U.S. Geological Survey*, 1999. Pp. 84-85
- [53] Bradley E., Carol A. Handwerker, Bath J., Richard D. Parker and Ronald W.G edney. *Lead-Free Electronics: iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing*, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [54] พูลสวัสดิ์ แผงสมศรี และ วรณิภา ทองสายใหญ่. "การออกแบบเครื่องวัดความหนืดของอาหารเหลวโดยไร้ระบบท่อ." *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*. 2544
- [55] John W. Evans., Kwon D. and Jillian Y. Evans. *A Guide to Lead-free Solders : Physical Metallurgy and Reliability*. London : Springer. 2007.
- [56] Yu D.Q., Zhao J. and Wang L., "Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 376, 2004. Pp. 170-175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [57] Wu C.M.L., Yu D.Q., Law C.M.T. and Wang L., "The properties of Sn-9Zn lead-free solder alloys doped with trace rare earth elements." *Journal of Electronic Materials*. Vol. 31, 2002. Pp. 921-927
- [58] Song J.M., Lan G.F., Liu T.S. and Chen L.H., "Microstructure and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solder alloys." *Scripta Materialia*, Vol. 48, 2003. Pp. 1047-1051
- [59] Das S.K., Sharif A., Chan Y.C., Wong N.B. and Yung W.K.C., "Effect of Ag micro-particles content on the mechanical strength of the interface formed between Sn-Zn binary solder and Au/Ni/Cu bond pads." *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, 2009. Pp. 2086-2093
- [60] Mavoori H., Jin S., "New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, 1998. Pp. 1216-1222
- [61] K.N. Subramanian, *Lead-free solders: materials reliability for electronics*. Wiley, 2011.
- [62] Shen J. and Chan Y.C., "Research advances in nano-composite solders." *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, 2009. Pp.223-234
- [63] Bukat K., Sitek J. and Koscielski M., "SAC305 solder paste with carbon nanotubes-part I: investigation of the influence of the carbon nanotubes on the SAC solder paste properties." *Soldering and Surface Mount Technology*, Vol.24, 2012. Pp. 267-279
- [64] Jakubowska M., Bukat M. Koscielski, Mlozniak A., Niedzwiedz W., Sloma M. and Sitek J., "Investigation of properties of the SAC solder paste with the silver nanoparticle and carbon nanotube additives and the nano solder joints." *Electronic System Integration Technology Conference*, Berlin, Germany, 2010.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [65] Tay S.L., Haseeb A.S.M.A and Johan M.R., “Addition of cobalt nanoparticles Into Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder by paste mixing.” **Soldering and Surface Mount Technology**, Vol. 23, 2011. Pp. 10-14
- [66] Lin D.C., Liu S., Guo T.M., Wang G.X., Srivatsan T.S. and Petraoli M., “An Investigation of nanoparticles addition on solidification kinetics and Microstructure development of tin-lead solder.” **Materials Science & Engineering A**, Vol. 360, 2003. Pp. 285-292
- [67] Mohammad V., Ahmah U. and Yoon-Bong H., “ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications.” **Metal Oxide Nanostructures and Their Applications**, Vol. 5, 2010. Pp. 1-36
- [68] Rhodes M. **Introduction to Particle Technology**. 2<sup>nd</sup> ED. United Kingdom : John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [69] “Flow and Reflow.” [Online]. Available : [https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9\\_3.html](https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9_3.html). 2016.
- [70] Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian and Kacprzak. **Binary Alloy Phase Diagrams**. 2<sup>nd</sup> ED. Vol.3. United State of America : ASM International 2001.
- [71] “การวิเคราะห์พอลิเมอร์.” [Online]. Available : [http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer\\_Chemistry/image\\_files/chapter5\\_2.html](http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html). 2016.
- [72] Douglas B. Murphy. **FUNDAMENTALS OF LIGHT MICROSCOPY AND ELECTRONIC IMAGING**. United States of America : A John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [73] Hafner B. “Scanning Electron Microscopy Primer.” [Online]. Available : [http://www.charfac.umn.edu/sem\\_primer.pdf](http://www.charfac.umn.edu/sem_primer.pdf). 2007.
- [74] Radboud University Nijmegen. “Information on the FESEM (Field-emission Scanning Electron Microscope).” [Online]. Available : [http://www.vcbio.science.ru.nl/public/pdf/fesem\\_info\\_eng.pdf](http://www.vcbio.science.ru.nl/public/pdf/fesem_info_eng.pdf). 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [75] Hafner B. “Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM: A Primer.” [Online]. Available : [http://www.charfac.umn.edu/instruments/eds\\_on\\_sem\\_primer.pdf](http://www.charfac.umn.edu/instruments/eds_on_sem_primer.pdf). 2016.
- [76] Kumasawa M. “Material Safety Data Sheet.” March 2010. Pp. 1-8
- [77] “Safety Data Sheet.” [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/264032?lang=en&region=TH>. 2016.
- [78] “Materials Safety Data Sheet-Zinc Oxide Nanopowder.” March 2008. Pp. 1-7
- [79] “Zinc Oxide Nanoparticles.” [Online]. Available : <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=21>. 2016.
- [80] Japanese Industrial Standards Committee Standards Board. JIS Z 3198-3 : 2003. Japan : Japanese Standards Association. 2003.
- [81] IPC Plastic Chip Carrier Cracking Task Group (B-10a) and the JEDEC JC-14.1 Committee. IPC/JEDEC J-STD-020D.1. United State of America : JEDEC Solid State Technology Association. 2008.
- [82] Humpston G. and David M. Jacobson. **Principles of Soldering**. United States of America : ASM International. 2004.
- [83] Amalu E.H., Ekere N.N. and Mallik S., “Evaluation of rheological properties of lead-free solder pastes and their relationship with transfer efficiency during printing process.” **Materials and Design**, Vol. 32, 2011. Pp. 3189-3197
- [84] Evans J. and Beddow, J.K., “Characterization of Particle Morphology and Rheological Behavior in Solder Paste.” **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, Vol. CHM-T 10, 1987. Pp. 224-231
- [85] “Hitachi S-4700 FE-SEM.” [Online]. Available : <http://mcff.mtu.edu/acma/electron-microscopy/hitachi-s-4700-fe-sem/>. 2014.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [86] Kanlayasiri K. and Ariga T., “Physical properties of Sn58Bi-xNi lead-free solder and its interfacial reaction with copper substrate.” **Materials and Design**, Vol. 86, 2015. Pp. 371-378
- [87] Sharma A., Baek B.G. and Jung J.P., “Influence of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle additions on microstructure, wetting, and tensile characteristics of Sn-Ag-Cu alloy,” **Materials and Design**, Vol. 87, 2015. Pp. 370-379
- [88] Liu X., Huang M., Wu C.M.L. and Wang L., “Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on microstructure formation and shear properties of Sn-58Bi solder,” **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Vol. 21, 2010. Pp. 1046-1054
- [89] Howard H. Manko. **Solder and Soldering**. United States of America : McGraw-Hill, Inc.. 1979.
- [90] “General Information on Solder Paste.” [Online]. Available : [http://www.pmdtkt.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3\\_4%20priedas.%2023\\_Solder\\_paste\\_general\\_info\\_KOKI.pdf](http://www.pmdtkt.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3_4%20priedas.%2023_Solder_paste_general_info_KOKI.pdf). 2016.
- [91] Ganesan S. and Pecht M. **Lead-Free Electronics**. United States of America : A John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- [92] Jennie S. Hwang. **Solder paste in electronics packaging**. United States of America : Van Nostrand Reinhold. 1989.
- [93] Li Y., Zhao X., Liu Y. and Yuan W. “Effect of TiO<sub>2</sub> addition concentration on the wettability and intermetallic compounds growth of Sn3.0Ag0.5Cu-xTiO<sub>2</sub> nano-composite solders.” : **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Vol. 25, 2014. Pp. 3816–3827
- [94] Nishikawa H., Piao J.Y. and Takemoto K. “Interfacial reaction between Sn-0.7Cu (-Ni) solder and Cu substrate.” **Journal of Electronic Materials**, Vol. 35, 2006. Pp. 1127-1132



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


# EPTC 2015

## 17<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference

2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> December 2015  
Marina Mandarin Singapore


### PROGRAM GUIDE


Organized by

 **IEEE**


IEEE Reliability/CPMT/ED Singapore

Gold Sponsors


 **DOW CORNING**


 **PacTech**


Sponsored by


 **CPMT**  
IEEE COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY SOCIETY

Silver Sponsors

 **SPIL 矽品精密**  
Siliconware

 **Lam**  
RESEARCH

 **Accurus**

 **ASE GROUP**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Influence of Indium and Zinc Oxide Nano-particles on Properties of SAC0307-xIn-yZnO Lead-Free Solder Paste

Nadee Meesathien<sup>a</sup>, Sawada Makoto<sup>b</sup>, Tadashi Ariga<sup>c</sup> and Kannachai Kanlayasri<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>b</sup>ALMIT THAILAND CO., LTD., Bangkok, Thailand

<sup>c</sup>Department of Engineering Design and Manufacture, Faculty of Engineering,  
University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia  
kkkannac@kmitl.ac.th

### Abstract

The influence of indium (In) and zinc oxide (ZnO) nano-particles on the properties of SAC0307-xIn-yZnO lead-free solder paste was presented in this paper. Solder paste was mixed with indium and zinc oxide nano-particles at various concentrations. The influence of these particles on melting point, wettability and interfacial layer after soldering with copper substrate was investigated. The results showed that the addition of lower levels of indium and zinc oxide nano-particles could reduce the melting temperature of SAC0307. Wettability of the solders on copper substrate in terms of contact angle was obviously decreased with the increase of appropriate indium and zinc oxide nano-particle concentration. The zinc oxide nano-particles affected the thickness value of the intermetallic layer, giving it a lower and more uniform distribution between the solder and copper substrate.

### 1. Introduction

Currently, lead-free solder alloys have been used extensively in the electronics industries. According to the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive of the European Union, Pb-free solder alternatives are a source of interest to replace traditional Sn-Pb eutectic solder due to its hazardous risks to human health and the environment [1-2]. Numerous Pb-free solders have been developed, including Sn-Ag, Sn-Cu and Sn-Ag-Cu alloys. The Sn-Ag-Cu (SAC) alloys are leading the lead-free solder candidates for various applications. The advantages of SAC relate to superior properties, such as good soldering performance and excellent mechanical properties [3].

Among all SAC solders, Sn-0.3Ag-0.7Cu is one of the most widely used lower Ag content alloys, providing a smaller amount of Ag<sub>3</sub>Sn intermetallic phase. A large brittle Ag<sub>3</sub>Sn in the matrix phase could be reduced during the soldering process and the material costs are also lowered. Furthermore, small amounts of Ag content means the solder alloys have better elastic compliance and resistance to drop failure in the joint areas [3-5]. However, Sn-0.3Ag-0.7Cu requires a high melting temperature to alleviate the mechanical strength (e.g. fatigue resistance, creep resistance). Therefore, it affects the reliability of electronic devices manufactured with this solder [6-9].

In a previous study, the addition of nano-particles to solder alloys resulted in composite solders, which could significantly enhance the mechanical properties and reduce the melting temperature [10-14]. Indium has been used to improve physical properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu and it was reported that the melting temperature of the solder is decreased and the wettability is also improved [15, 16].

The purpose of this study is to investigate the influence of indium (In) and zinc oxide (ZnO) nano-particles on the wettability properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn-yZnO lead-free solder paste after a reflow soldering process. The microstructure of intermetallic layers formed in the interfacial zone are also examined and presented in this study.

### 2. Experimental Procedure

In this experiment, reflow soldering was used to initiate a reaction between Sn-0.3Ag-0.7Cu (LFM-86W TM-HP Almit Co., Ltd., Japan) lead-free solder paste with different indium (Sigma-Aldrich), zinc oxide nano-particle (ZnO) (0.1-0.3 μm, Nano Materials Technology Co., Ltd, Thailand) compositions and copper substrates (99.99% purified). The melting temperature of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder was 227 °C. All of the solder alloys and their compositions are shown in Table 1. Before the soldering process, the copper substrate was rinsed with Isopropyl Alcohol (IPA) to remove any surface contaminants and allowed to dry at room temperature before use. To study the solidus and liquidus temperatures of the SAC0307-xIn-yZnO, the solder paste were tested at temperatures from 25°C to 400°C in a nitrogen gas flow of 20 mL/min at a constant heating and cooling rate of 10°C/min by differential scanning calorimetry technique (DSC 204 F1 Phoenix<sup>®</sup>).

Table 1 Solder alloys and their compositions.

Solder	Composition (wt%)				
	Sn	Ag	Cu	In	ZnO
(a) Sn-0.3Ag-0.7Cu	99.00	0.3	0.7	0.0	0.00
(b) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO	99.15	0.3	0.7	0.1	0.25
(c) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.50ZnO	98.40	0.3	0.7	0.1	0.50
(d) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO	98.15	0.3	0.7	0.1	0.75
(e) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.00ZnO	97.90	0.3	0.7	0.1	1.00
(f) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO	98.45	0.3	0.7	0.3	0.25
(g) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.50ZnO	98.20	0.3	0.7	0.3	0.50
(h) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO	97.95	0.3	0.7	0.3	0.75
(i) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.00ZnO	97.70	0.3	0.7	0.3	1.00
(j) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO	98.25	0.3	0.7	0.5	0.25
(k) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.50ZnO	98.00	0.3	0.7	0.5	0.50
(l) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO	97.75	0.3	0.7	0.5	0.75
(m) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.00ZnO	97.50	0.3	0.7	0.5	1.00

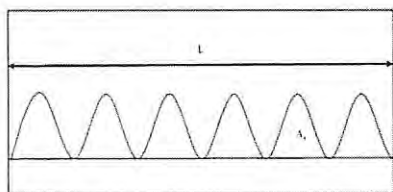


Fig. 1 Thickness of IMCs measurement method.

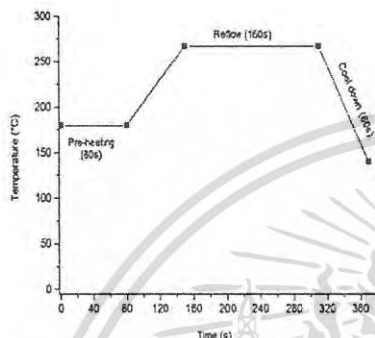


Fig. 2 Typical reflow temperature profile of composite Solder/Cu joint following J-STD-020

The temperature profile of the reflow soldering is shown in Figure 2. After soldering, the wettability was examined in terms of contact angle. Each formula was investigated three times to find the average values and ensure minimal error. The interfacial IMC and cross-sectional microstructure of the joints were observed by field emission scanning electron microscope (FESEM, HITASHI S-4700). The elemental compositions of interfacial IMC layers were determined by energy dispersive spectroscopy (EDS, IXRF SYSTEMS Sphinx-130 S-4700). The etched surfaces were sputter-coated with Pt prior to FESEM analysis to improve surface conductivity in the resistivity area. FESEM images of the same magnification (5000x) were measured for thickness of intermetallic phases using Image-Pro Express software. The thickness measurement can be expressed as the following equation:

$$h = \frac{Ai}{L} \quad (1)$$

Where A, is the sum of the area and L is defined as the length of the intermetallic layer. The schematic of this equation is shown in Figure 1

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Solidus and liquidus temperatures

To determine the thermal properties of SAC0307-xIn-yZnO solder paste, the solidus and liquidus temperatures of each solder alloy from DSC analysis are shown in Figure 3. The measured onset point (solidus temperature,  $T_s$ ) and the end point (liquidus temperatures,  $T_l$ ) in each concentration are insignificantly changed. Figure 3 shows that the addition of low levels of In and ZnO (no more than 0.5 wt%) reduces the solidus and liquidus temperatures. Solidus and liquidus temperatures of the original Sn-0.3Ag-0.7Cu solder paste are 224.3°C and 236.7°C, respectively.

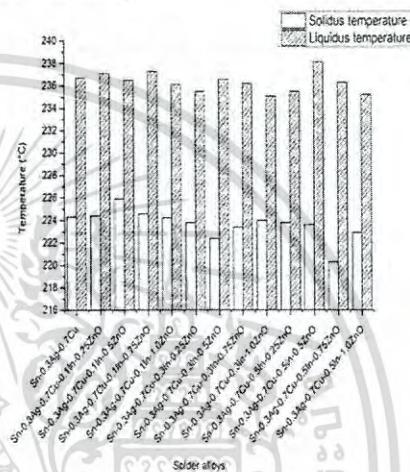


Fig. 3 Solidus and liquidus temperature from DSC analysis of solder alloys.

With the addition of 0.1 wt% In and 0.5 wt% ZnO, the solidus temperature is increased by 1.6°C and the liquidus temperature is decreased by 0.4°C. Though the solidus temperature increase more than the original solder, the melting range of the solder alloy is reduced. However, a previous study has shown that the addition of In in SAC0307 solder increased the melting temperature range [15-16]. The difference in values between solidus and liquidus temperatures in Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy is about 9.9°C, decreasing to 7.9°C after adding 0.1 wt% In and 0.5 wt% ZnO.

#### 3.2 Wettability Test

In previous research, the addition of In decreased the contact angle. However, a large amount of indium (more than 1.0 wt%) can reduce minor contact angle values by an average of 1-6° [16]. The small value for contact angle means improved

wettability. It has been well known that In can decrease the melting temperature and surface tension of solder [15-17]. The contact angle obtained from the spread test in this study, is shown in Figure 4. In this experiment, large amounts of In content are not considerable, with the addition of ZnO nanoparticle in appropriate values decreasing the contact angle. Based on the results and compared to the original Sn-0.3Ag-0.7Cu solder, the contact angle of the Sn-0.3Ag-0.7Cu composite solders can be significantly decreased when adding small amounts of indium and ZnO nano-particles. By adding 0.3 wt% In and 0.75 wt% ZnO, the contact angle of solder can be reduced to the range of 12°-16° compared with the original solder and decreased by an average of 10°-14°. The value of the contact angle in that condition is approximately  $12.88 \pm 1.78^\circ$ . It clearly expresses that mixing In and ZnO into Sn-0.3Ag-0.7Cu solder can improve the wettability properties. Therefore, the wettability of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder is affected with the addition of a small amount of In and ZnO nano-particles.

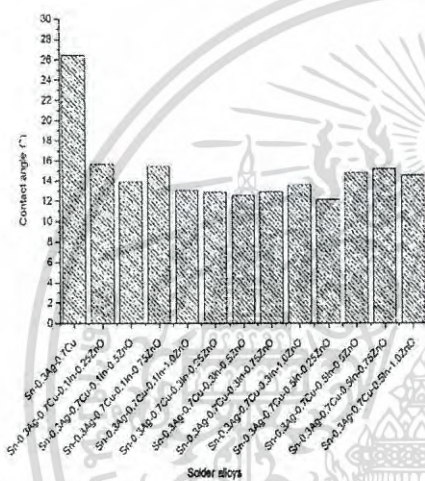


Fig. 4 The contact angle of solders.

### 3.3 Microstructures

To study the effect of In and ZnO addition concentration on the interfacial IMC growth between Sn-0.3Ag-0.7Cu nanocomposite solders and copper substrates under reflow soldering conditions, FESEM cross-section images were collected to measure the interfacial IMC thickness. Figure 7 shows the thickness of interfacial IMCs with different In and ZnO nano-particle concentrations. There was no relationship between the thickness and the adding materials.

The composition of IMC was determined by EDS analysis, as shown in Figure 8. Verification of the type of IMC is shown in

Figure 6. After a reflow soldering process, the microstructures of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn-yZnO are shown in Figures 9b-m. It can be seen that the original Sn-0.3Ag-0.7Cu solder from Figure 9a shows a scallop-shaped  $Cu_6Sn_5$  IMC layer with an average thickness of 3.31  $\mu m$ . The interfacial  $Cu_6Sn_5$  was uniformly distribution. In Figures 5 and 9, the specimens are presented as the  $Cu_6Sn_5$  type at the interfacial zone. With the addition of 0.3 wt% In and 0.75 wt% ZnO, the lowest value thickness of 2.02  $\mu m$  is found and has a scallop-shaped  $Cu_6Sn_5$  IMC layer as well. Figure 9l shows that the addition of 0.5 wt% In and 0.75 wt% ZnO is different from the other concentrations. The interfacial IMC layers formed have a thin scallop shape as  $Cu_6Sn_5$  type and the IMC thickness rapidly reduced from 3.7  $\mu m$  of SAC0307-0.5In-0.5ZnO (Fig.9k) to 2.03  $\mu m$  of SAC0307-0.5In-0.75ZnO (Fig.9l) composite solders. It can be seen in the boundary of the IMC that there might have been nano-particles in that area. It is related to the curve of average IMC thickness in Figure 7, which has a trend to reduce. With the increase of In and ZnO nano-particles in this concentration, there might be significant effect on the interfacial IMC thickness. The intermetallic phases presented at the interface depend on various soldering factors (e.g. soldering time, soldering temperature) [15, 17]. In the phase layer between Cu and Sn,  $Cu_3Sn$  layer should not present in the joint areas because it leads to a brittle fracture of the joints. The void can take place on the interface between  $Cu_3Sn$  layer and copper, called the Kirkendall voids. Therefore, the  $Cu_6Sn_5$  layer type is better than the  $Cu_3Sn$  layer

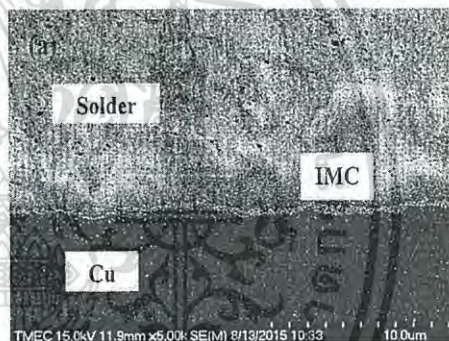


Fig. 5 SAC0307 FESEM image of the IMC layer (a).

because it is not incentive to Kirkendall voids formation. [15-19]. In this experiment, the interfacial IMC layer has a tendency to increase with the addition of ZnO nano-particles at more than 1.0 wt% to solder. The amount of indium is insignificant to the thickness of IMC layer. The addition of nano-particles into the solder can reduce the thickness of intermetallic phases and inhibit the formation of interfacial IMC between the composite solder and copper substrate because it can increase the nucleation rate during the soldering process.

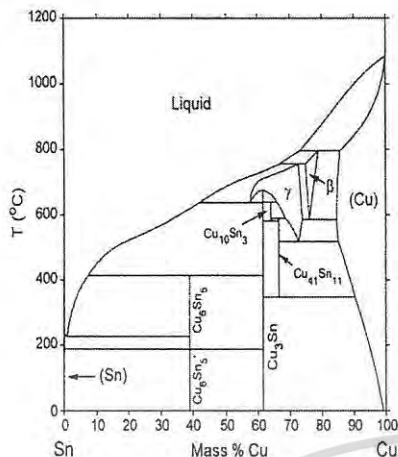


Fig. 6 Phase diagram between Cu and Sn [20].

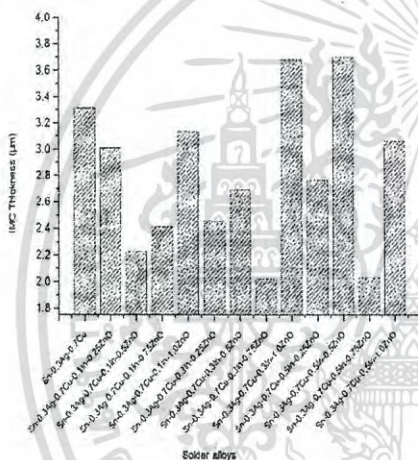


Fig. 7 The average IMC thickness as a function of In and ZnO addition.

The addition of small amounts of In and ZnO to Sn-0.3Ag-0.7Cu composite solders can improve wettability as shown by the small contact angle. The thickness of the interfacial IMC is also reduced.

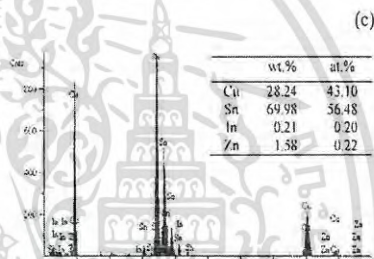
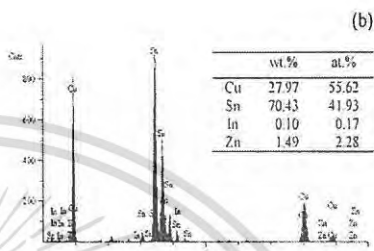
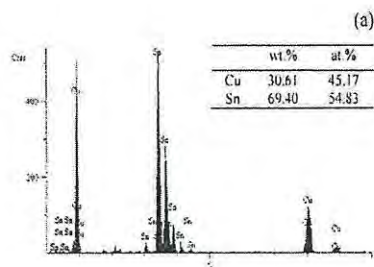


Fig. 8 EDS analysis of IMC layers in (a) Sn-0.3Ag-0.7Cu IMC Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> type, (b) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO IMC Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> type and (c) Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO IMC Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> type.

Conclusions

The influence of Indium (In) and Zinc-Oxide (ZnO) nanoparticles addition on solidus and liquidus temperatures, wettability and interfacial of intermetallic layer of Sn-0.3Ag-0.7Cu was studied in this research. The results show that the addition of In and ZnO has a strong effect on the properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu. Solidus and liquidus temperatures of solder alloys are decreased with low In and ZnO concentrations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

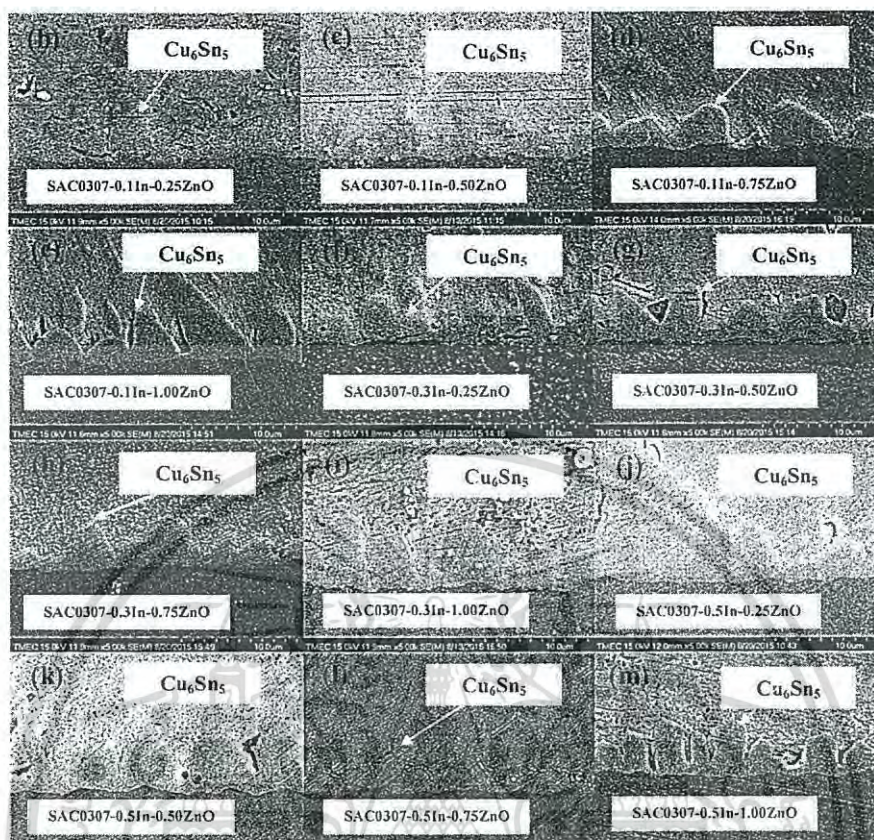


Fig. 9 FESEM images of intermetallic compounds in various conditions (b-m).

In spread tests, the contact angle for Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn-yZnO can be reduced with the addition of In and ZnO in appropriate amounts. The thickness trends of IMCs are also related to the wettability results. In summary, adding In and ZnO can obviously improve the properties of SAC0307.

**Acknowledgments**

The authors would like to thank the Office of the Higher Education Commission of Thailand for their financial support of this research.

**References**

1. K. Remoundou and P. Koundouri, "Environmental Effects on Public Health: An Economic Perspective." *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 6 (2009), pp. 2160-2178.

2. Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. OJ L 37. 13.2.2003, pp. 19-23.

3. N. Mookam and K. Kanlayasiri, "Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging." *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 28 (2012), pp. 53-59.

4. N. Hamada, T. Uesugi, Y. Takigawa, and K. Higashi, "Effect of Zn addition and aging treatment on tensile properties of Sn-Ag-Cu alloys." *J. Alloy. Compd.*, Vol. 527 (2012), pp. 262-232.

5. N. Mookam and K. Kanlayasiri, "Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate." *J. Alloy. Compd.* Vol. 509 (2011), pp. 6276-6279.

6. H. Conrad, Z. Guo, Y. Fahmy and D.J. Yang, "Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate, and low-cycle fatigue of solder joints." *J. Electr. Materials*, Vol. 28 (1999), pp. 1062-1070.

7. J.L. Marshall, J. Calderon, J. Sees, G. Lucey and J.S. Hwang, "Composite solders." *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, Vol. 14 (1991), pp. 698-702.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. H.S. Betrabet, S.M. McGee, J.K. McKinlay. "Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability," *Ser. Mater.*, Vol. 25 (1991), pp. 2323-2328.
9. H. Mavoori and S.Jin. "New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions," *J. Electr. Materials*, Vol. 27 (1998), pp. 1216-1222.
10. K. Bukat, J. Sitek and M. Koscielski, "SAC305 solder paste with carbon nanotubes- part I: investigation of the influence of the carbon nanotubes on the SAC solder paste properties," *Solder surf mt tech*, Vol. 24 (2012), pp.267-279.
11. M. Jakubowska, Bukat, M. Koscielski, A. Mlozniak, W. Niedzwiedz, M. Sloma and J. Sitek, "Investigation of properties of the SAC solder paste with the silver nanoparticle and carbon nanotube additives and the nano solder joints," *Electronic System Integration Technology Conference, Berlin., DE, 2010.*
12. S.Y. Chang, C.C Jain, T.H. Chuang, L.P. Feng and L.C. Tsao, "Effect of addition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the microstructure, microhardness and interfacial reactions of Sn<sub>3.5</sub>AgxCu solder," *Mater. Des.*, Vol. 32 (2011), pp. 4720-4727.
13. Y. Tang, G.Y. Li and Y.C. Pan, "Influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO<sub>2</sub> solder joints in reflow process," *J. Alloy. Compd*, Vol. 554 (2013), pp.195-203.
14. S.L. Tay, A.S.M.A Haseeb and M.R. Johan, "Addition of cobalt nanoparticles into Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder by paste mixing," *Solder surf mt tech*, Vol. 23 (2011), pp. 10-14.
15. K. Kannayasiri, M. Mongkolwongrojn, T. Ariga, "Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy," *J. Alloy. Compd*, Vol. 485 (2009), pp. 225-230.
16. K. Sukpimai, K. Phapon and K. Kanlayasiri. "A study on influence of Indium on Wettability and Intermetallic Compound Formation between Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn Lead Free Solder and Copper Substrate," *IE Network Conference, Bangkok., TH, 2013.*
17. Y. Gu, X. Zhao, Y. Li, Y. Liu, Y. Wang, Z. Ji, "Effect of nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on wettability and interfacial intermetallic growth of low-Ag content Sn-Ag-Cu solders on Cu substrates," *J. Alloy. Compd*, Vol. 627 (2015), pp. 39-47.
18. Y. Li, X. Zhao, Y. Liu, Y. Wang and Y. Wang, "Effect of TiO<sub>2</sub> addition concentration on the wettability and intermetallic compounds growth of Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu-xTiO<sub>2</sub> nano-composite solders," *J. Mater. Sci.*, Vol. 25 (2014), pp. 3816-3827.
19. S. Chellvarajoo, M.Z. Abdullah and C.Y. Khor, "Effect of diamond nanoparticles reinforcement into lead-free Sn-3.0Ag-0.5Cu solder pastes on microstructure and mechanical properties after reflow soldering process," *Mater. Des.*, Vol. 82 (2015), pp. 206-215.
20. J-H Shim, C-S Oh, B-J Lee and D.N Lee, *Z. Metallkde.*, Vol. 87 (1996), pp. 205-212.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Material Safety Data Sheet 製品安全データシート**Issue date: Mar.15.2010  
発行日 2010年03月15日Revision date:  
改訂日 年 月 日**1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION 製品及び会社情報**

Product name: 製品名:	SRC Solder Paste LFM-86W TM-HP
Company name: 会社名:	ALMIT(THAILAND)CO.,LTD.
Address: 住所:	155/20 Moo4 Ratchaburi Industrial Estate, Tambon Jedsamean, Amphur Phocharam Ratchaburi Province, 70120 Thailand.
Department in charge: 担当部門:	ALMIT(THAILAND) アルミットタイランド
Person responsible: 担当者:	MITSUHIRO KUMAZAWA 熊澤充弘
Telephone number: 電話番号:	+81-3-3379-2277 03-3379-2277
Emergency telephone number: 緊急連絡電話番号:	+81-42-559-5611 MICRO-SOLDERING LABORATORY マイクロ接合研究所
FAX number: FAX 番号:	+81-3-3374-2593 03-3374-2593
Mail address: メールアドレス:	tokyo@almit.co.jp
Arrangement number: 整理番号:	QPM-3458620WEJ-T
Recommended use of the product and restrictions on use: 推奨用途及び使用上の制限:	Soldering material はんだ付材料

**2. HAZARDS IDENTIFICATION 危険有害性の要約**GHS Classification  
GHS分類Physicochemical hazards:  
物理化学的危険性:

Explosives 火薬類	No classification 分類対象外
Flammable / flammable gases 可燃性/引火性ガス	No classification 分類対象外
Flammable / flammable aerosol 可燃性/引火性エアゾール	No classification 分類対象外
Combustion support / oxidizing gases 支燃性/酸化性ガス類	No classification 分類対象外
Gases 高压ガス	No classification 分類対象外
Flammable liquids 引火性液体	No classification 分類対象外
Flammable solids 可燃性固体	Not classification 分類できない
Self-reactive chemicals 自己反応性化学品	No classification 分類対象外
Spontaneous combustion liquids 自然発火性液体	No classification 分類対象外
Spontaneous combustion solids 自然発火性固体	No classification 分類対象外
Self-heating chemicals 自己発熱性化学物	Not classification 分類できない

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Toxicological health effects: 健康に対する有害性:	Chemicals which in contact with water emits flammable gases 水反応可燃性化学品	Not classification 分類できない
	Oxidizing liquids 酸化性液体	No classification 分類対象外
	Oxidizing solids 酸化性固体	No classification 分類対象外
	Organic peroxide 有機過酸化物	No classification 分類対象外
	Metal corrosive substances 金属腐食性物質	Not classification 分類できない
	Acute toxicity (oral) 急性毒性(経口)	Not classification 分類できない
	Acute toxicity (skin) 急性毒性(経皮)	Not classification 分類できない
	Acute toxicity (Inhalation: Gas) 急性毒性(吸入:ガス)	No classification 分類対象外
	Acute toxicity (Inhalation: Vapor) 急性毒性(吸入:蒸気)	No classification 分類対象外
	Acute toxicity (Inhalation: Dust, mist) 急性毒性(吸入:粉じん、ミスト)	Not classification 分類できない
	Skin corrosive / irritation 皮膚腐食性/刺激性	Class 2 区分 2
	Serious eyes damage / Eyes irritation 眼に対する重篤な損傷/眼刺激性	Class 2B 区分 2B
	Respiratory organs sensitization 呼吸器感受性	Not classification 分類できない
	Skin sensitization 皮膚感受性	Class 1 区分 1
	Original generative cell variation 生殖細胞変異原性	Not classification 分類できない
	Cancer-causing 発がん性	Not classification 分類できない
	Reproduction toxicity 生殖毒性	Not classification 分類できない
	Specification target internal organs / systemic toxicity (single exposure) 特定標的臓器/全身毒性(単回ばく露)	Not classification 分類できない
	Specification target internal organs / systemic toxicity (repeat exposure) 特定標的臓器/全身毒性(反復ばく露)	Class 1 区分 1
	Absorption respiratory organs toxicity 吸引性呼吸器有害性	Not classification 分類できない
Toxicological environment effects: 環境に対する有害性:	Aquatic environmental toxicity: acute 水生環境有害性物質・急性	Not classification 分類できない
	Aquatic environmental toxicity: chronic 水生環境有害性物質・慢性	No information 情報なし
GHS Label Elements ラベル要素		
Symbols/Pictograms: 絵表示又はシンボル:		
Signal Word: 注意喚起語:	Danger 危険	
Hazardous information: 危険有害性情報:	When fume inhales, may cause allergy, edge breath or dipnoea. ヒュームを吸入するとアレルギー、窒息または、呼吸困難を起こすおそれ。 May cause allergy skin reaction. アレルギー性皮膚反応を起こすおそれ。 May cause sensitization on eye. 目を刺激する。	

Instructions:  
注意書き:

May cause organs damage by prolonged or repeated exposure.  
長期又は反復ばく露による臓器障害を引き起こすおそれ。  
Aquatic organism toxicity.  
水生生物に毒性。

Precaution  
予防策

Avoid inhalation of fume.  
ヒュームの吸入を避ける。  
Avoid eye, skin and clothing contact.  
目、皮膚、衣服への接触を避ける。  
Before handling read and understand the safety attention.  
すべての安全注意を読み理解するまで取り扱わないこと。  
Avoid exposing by supplying an appropriate protection tool and a ventilator.  
適切な保護具や換気装置を使用し、ばく露を避けること。  
Avoid prolonged or repeated exposure.  
長時間または反復の曝露を避ける。  
Wash hand after handling.  
取扱後、手を十分に洗浄する。  
Do not take food, drink and smoking while handling.  
作業中は飲食、喫煙をしない。  
Inhalation: Remove the exposed person immediately and provide fresh air.  
Get medical attention.  
吸入した場合、新鮮な空気の場所に移動し、速やかに医師の診断を受けること。  
Skin contact: Promptly flush contaminated skin with soap or mild detergent and water. Contact physician if irritation continues.  
皮膚に付着した場合、直ちに汚染した皮膚を石鹸と水で十分に洗い流し、皮膚に炎症を生じたときには医師の診断を受けること。  
Eye contact: Promptly wash eyes with plenty of water while lifting the eyelids. Continue to rinse for at least 15 minutes and get medical attention.  
目に入った場合、直ちに多量の水で洗眼する。少なくとも15分間洗眼し、医師の診断を受けること。  
Ingestion: Rinse nose, mouth and throat with water. Drink a few glasses of water or milk. Try to induce vomiting. Get medical attention.  
飲み込んだ場合、水で鼻、口及びのどをすすぐこと。多量の水または牛乳を飲ませて吐かせ、医師の診断を受けること。  
The container is closely stopped, and kept in the refrigerator. (0-10°C)  
容器は密封し、冷蔵庫に保管する。(0-10°C)  
Dispose of cont. a container according to a rule of a country or the metropolis and districts.  
内容物、容器は国又は都道府県の規則に従って廃棄すること。

FIRST-AID  
MEASURES  
応急措置Storage  
保管  
Disposal  
廃棄

Country / area information:  
国/地域情報:

## 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS 組成及び成分情報

Single Substance or Compound: 単一化学物質・混合物の区別:	Compound 混合物		Notice through official file number 官報公示整理番号		Content 含有量(Wt%)
Common chemical name or general name: 化学名又は一般名:	Material 物質名	Chemical Formula 化学式	GAS No.		
	Solder Pasta (Lead-Free Solder, addition (Flux)) ソルダペースト (無鉛はんだ、添加物フラックス)				
Composition and content: 成分及び含有量:	Tin 錫	Sn	7440-31-5	Exempted 対象外(元素)	87.12%
	Silver 銀	Ag	7440-22-4	Exempted 対象外(元素)	0.26%
	Copper 銅	Cu	7440-50-8	Exempted 対象外(元素)	0.62%
	Flux フラックス	Trade secret 営業秘密	Trade secret 営業秘密	Trade secret 営業秘密	12.00%

## 4. FIRST-AID MEASURES 応急措置

Inhalation 吸入した場合	Remove the exposed person immediately and provide fresh air. Get medical attention. 新鮮な空気の場所に移動し、速やかに医師の診断を受ける。
----------------------	--

3/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>Skin contact 皮膚に付着した場合</p> <p>Eye contact 目に入った場合</p> <p>Ingestion 飲み込んだ場合</p> <p>Expected acute and a tardier symptom 予想される急性症状及び遅発性症状</p> <p>A brief description of the most important symptoms and effects 最も重要な徴候及び症状に関する簡潔な情報</p> <p>Protection for first-aides 応急処置をする者の保護</p> <p>Special notes for doctors 医師に対する特別注意事項</p>	<p>Promptly flush contaminated skin with soap or mild detergent and water. Contact physician if irritation continues. 直ちに汚染した皮膚を石鹸と水で十分に洗い流す。 皮膚に炎症を生じたときには医師の診断を受ける。</p> <p>Promptly wash eyes with plenty of water while lifting the eye lids. Continue to rinse for at least 15 minutes and get medical attention. 直ちに多量の水で洗眼して下さい。少なくとも 15 分間洗眼し、医師の診断を受ける。</p> <p>Rinse nose, mouth and throat with water. Drink a few glasses of water or milk. Try to induce vomiting. Get medical attention. 水で鼻、口、およびのどをすすぎ、多量の水または牛乳を飲ませて吐かせ、医師の診断を受ける。</p> <p>Inhalation 吸入した場合 Vapor and mist stimulate lung and upper honchos. 蒸気とミストは肺、気道上部を刺激する。</p> <p>Skin contact 皮膚に触れた場合 May cause sensitization on skin. 皮膚を刺激する。</p> <p>Eye contact 目に入った場合 May cause sensitization on mucous. 粘膜を刺激する。</p> <p>No information 情報なし</p> <p>No information 情報なし</p> <p>No information 情報なし</p> <p>No information 情報なし</p>
---	---

## 5. FIRE-FIGHTING MEASURES 火災時の措置

<p>Extinguishing media 消火剤</p> <p>Prohibited media 使ってはならない消火剤</p> <p>Specific hazards with regard to fire-fighting 火災時の特定危険有害性</p> <p>Specific methods of fire-fighting 特定の消火方法</p> <p>Protection for firefighters 消火を行う者の保護</p>	<p>Dry chemicals extinguisher 粉末消火薬剤</p> <p>No information 情報なし</p> <p>No information 情報なし</p> <p>Move container from fire area if it can be done without risk. Use water to keep fire-exposed containers cool and disperse vapors. 周辺火災の場合は、危険でなければ容器を安全な場所に移動する。 移動不可能な場合は、容器及び周辺に散水して冷却する。</p> <p>Fighters should wear protective clothing, respirator, rubber boots and fireproof clothing. And should work from the windward side. 消火作業の際は防護衣、空気呼吸器、ゴム長靴、防火服を着用する。 消火作業は風上から行う。</p>
---	--

## 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES 漏出時の措置

<p>Personal precautions 人体に対する注意事項</p> <p>Environmental precautions 環境に対する注意事項</p> <p>Methods for cleaning up 除去方法</p> <p>Prevention of secondary hazards 二次災害の防止策</p>	<p>Wear appropriate personal protective equipments (Refer to section 8) when clean-up working, avoid to adhere the spray etc. to the skin, and to inhale gases. 作業の際は適切な保護具の着用し、飛沫が皮膚に付着したり、ガスを吸入しないようにする。</p> <p>Dispose of soiled things and collected waste promptly according to the related regulations. 付着物、回収物などは、関係法規に基づき速やかに処分する。</p> <p>Gather up, pack in a bag and dispose. Carefully collect remnant and move to a safe place. 掃き集め、袋に入れ、廃棄こそなえて保管する。残留分を注意深く集め、安全な場所に移す。</p> <p>Carefully collect remnant and move to a safe place. 残留分を注意深く集め、安全な場所に移す。</p>
--	--

## 7. HANDLING AND STORAGE 取扱い及び保管上の注意

<p>Handling 取扱い</p> <p>Technical measures: 技術的対策:</p> <p>local exhaust ventilation: 局所排気:</p>	<p>Provide ventilation and wear protectors. 換気及び保護具の着用。</p> <p>Provide local exhaust ventilation. 局所排気を行う。</p>
---	--

**Precautions for safe handling:**  
安全取扱注意事項:

Before handling read and understand the safety attention.  
すべての安全注意を読み理解するまで取り扱わないこと。

Avoid exposing by supplying an appropriate protection tool and a ventilator.  
適切な保護具や換気装置を使用し、ばく露を避けること。

Avoid inhalation of fume.  
ヒュームの吸入を避ける。

Avoid eye, skin and clothing contact.  
目、皮膚、衣服への接触を避ける。

Avoid prolonged or repeated exposure.  
長時間または反復の曝露を避ける。

Wash hand after handling.  
取扱い後に手を十分に洗浄する。

Do not take food, drink and smoking while handling.  
作業中は飲食、喫煙をしない。

**Storage****保管****Materials to avoid:**

避けるべき材料:

**Storage conditions:**

適切な保管条件:

Keep away from strong oxidizing compound, acids and strong bases.

強酸化剤、酸類、強塩基類から隔離して保管する。

The container is closely stopped, and kept in the refrigerator. (0-10°C)

容器は密封し、冷蔵庫に保管する。(0-10°C)

**8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION ばく露防止及び保護措置****Protective equipment****設備対策****Control parameters****管理濃度・許容濃度**

Provide local exhaust ventilation.

局所排気装置を設置する。

**Material name****物質名****TLV****管理濃度****OEL (2005 年)\*****職業曝露限界****ACGIH (2006 年)****許容濃度**

Tin (錫)

—

—

2mg/m<sup>3</sup>

Silver (銀)

—

0.01mg/m<sup>3</sup>0.1mg/m<sup>3</sup>

Copper (銅)

—

—

0.2mg/m<sup>3</sup>

Flux (フラックス)

—

—

—

\*OEL: occupational exposure limits; 職業曝露限界(Japan Society for Occupational Health: 日本産業衛生学会)

**Protective equipment****保護具****Respiratory protection:**

呼吸器の保護具:

Dust respirator.

防護マスクを着用する。

**Hand protection:**

手の保護具:

Protective gloves.

保護手袋を着用する。

**Eye protection:**

眼の保護具:

Safety goggles.

安全ゴーグルを着用する。

**Skin and body protection:**

皮膚及び身体の保護具:

Protective clothing.

保護衣を着用する。

**Specific hygiene measures****適切な衛生対策**

Provide eye washing tools and safety shower.

洗眼器及び安全シャワーを備える。

**9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES 物理的及び化学的性質****Physical state:**

物理的状態:

**Form**

形状

Paste or slurry (metal powder + flux)

ペースト状 (金属粉末+フラックス)

**Color**

色

Gray

灰色

**Odor**

臭い

Mild

微香

**pH:**

No information

データなし

LFM-86W TM-HP  
QPM-3458620WEJ-T  
Ver4.1  
**almil**

Melting point: 融点(°C):	Alloy 合金	Solidus 固相線	217	Liquidus 液相線	227	Flux フラックス	>80
Boiling point: 沸点(°C):	Alloy 合金	No information データなし				Flux フラックス	>260
Flashpoint: 引火点(°C):		>160					
Vapor pressure: 蒸気圧(mmHg):		<0.01					
Vapor density(Air=1): 蒸気密度(空気=1):		6.0					
Density (g/cm³): 密度:	Alloy 合金	7.4	Flux フラックス	1.0	Solder Paste ソルダペースト	4.16	
Solubility in water: 水に対する溶解性:	Alloy 合金	Insoluble 不溶	Flux フラックス	Insoluble 不溶	Solder Paste ソルダペースト	Insoluble 不溶	
Solubility in solvent: 溶媒に対する溶解性:	Alloy 合金	Insoluble 不溶	Flux フラックス	Dissoluble 溶解	Solder Paste ソルダペースト	Dissoluble 溶解	
Auto-ignition temperature: 自然発火温度:		No data データなし					
Resolution temperature: 分解温度:		No data データなし					
Odor threshold: 臭いのしきい値:		Non-pertinence 非該当					
Evaporation rate: 蒸発速度:		No information データなし					
Flammability(solid, gas): 燃焼性(固体、ガス):		Non-pertinence 非該当					
Viscosity (Pa·s): 粘度:		150-300					

## 10. STABILITY AND REACTIVITY 安定性及び反応性

Stability 安定性	Stable in the air at the normal temperature. 常温、空気中で安定
Reactions 反応性	May react with strong oxidizing compound, acids and strong bases. 酸化剤、酸類、強塩基類と反応する。
Hazardous decomposition products 危険有害な分解生成物	Non-pertinence 非該当
Conditions to avoid 避けるべき条件	Non-pertinence 非該当
Materials to avoid 避けるべき材料	Strong oxidizing compound, acids and strong bases. 強酸化剤、酸類、強塩基類。

## 11. TOXICOLOGICAL INFORMATION 有害性情報

Acute toxicity: 急性毒性:	Material name 物質名	Oral LD <sub>50</sub> 経口	Skin LD <sub>50</sub> 経皮
	Tin 錫	No data データなし	No data データなし
	Silver 銀	>5000 mg/Kg(Rat) (ラット)	>2000mg/Kg(Rat) (ラット)
	Copper 銅	No data データなし	No data データなし
	Flux フラックス	No data データなし	No data データなし
Skin corrosive / irritation: 皮膚腐食性/刺激性:	By contact with the skin for a long time or by repetition contact it might cause the dermatitis. 反復または長期間の皮膚との接触は皮膚炎を起こすことがある。区分 2		
Serious eyes damage / Eyes irritation: 眼に対する重篤な損傷/刺激性:	Slight stimulation Class 2B 軽度の眼刺激 区分 2B		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Respiratory organs sensitization: 呼吸器感作性:	No information 情報無し
Skin sensitization: 皮膚感作性:	May cause allergy skin reaction. Class 1 アレルギー性皮膚反応を引き起こすおそれ。区分 1
Original generative cell variation: 生殖細胞変異原性:	No data データなし
Cancerous primeval: がん原性:	No information 情報無し
Reproduction toxicity: 生殖毒性:	No information 情報無し
Specification target internal organs /Whole toxicity (single revelation): 特定標的臓器/全身毒性(単回ばく露):	No information データなし
Specification target internal organs / whole toxicity (repeat revelation): 特定標的臓器/全身毒性(反復ばく露):	May cause organs (lungs/kidney) damage by prolonged or repeated exposure. Class 1 長期又は反復ばく露による臓器(肺・腎臓)障害を引き起こすおそれ。区分 1
Absorption respiratory organs toxicity: 吸引性呼吸器有害性:	No data データなし

## 12. ECOLOGICAL INFORMATION 環境影響情報

Aquatic environmental toxicity; acute 水生環境有害性物質・急性	No information 情報なし
Aquatic environmental toxicity; chronic 水生環境有害性物質・慢性	No information 情報なし

## 13. DISPOSAL CONSIDERATIONS 廃棄上の注意

Residues 残余廃棄物	Wear adequate protectors. Dispose in accordance with local regulations. Consign a qualified industrial waste treatment firm, if there is no own disposal equipment. 適切な保護具を着用する。関係法規や条例に従って処理する。 処理施設がないなどの理由で廃棄できない場合は、許可を受けた産業廃棄物処理業者に委託する。
A pollution container and packing 汚染容器及び包装	Wear adequate protectors. Dispose in accordance with local regulations. Consign a qualified industrial waste treatment firm, if there is no own disposal equipment. 適切な保護具を着用する。関係法規や条例に従って処理する。 処理施設がないなどの理由で廃棄できない場合は、許可を受けた産業廃棄物処理業者に委託する。

## 14. TRANSPORT INFORMATION 輸送上の注意

UN No.: 国連番号:	Not applicable 非該当
Proper Shipping Name: 品名:	—
Class: クラス:	—
Sub Risk: 副次危険:	—
Packing Group: 容器等級:	—
International restriction 国際規制	
RID/ADR information: 陸上規制情報:	Not applicable 非該当
IMO information: 海上規制情報:	Non-Hazards 非危険物

Marine Pollutant: 海洋汚染物質:	Not applicable 非該当
IATA information: 航空規制情報:	Non-Hazards 非危険物
Domestic restriction 国内規制	
Rail and road transportation information: 陸上規制情報:	Not applicable 非該当
Marine transportation information: 海上規制情報:	Non-Hazards 非危険物
Marine Pollutant: 海洋汚染物質:	Not applicable 非該当
Aviation transportation information: 航空規制情報:	Non-Hazards 非危険物
Specific precautionary transport measures and conditions 輸送の特定の安全対策及び条件	Prior to transport, check the containers and loading to prevent leakage or turnover, fall and damage transport in accordance with regulations. Avoid direct sunshine and the high temperature and the high humidity. Do the freezing or Refrigeration transportation in principle. 運搬に際しては容器に漏れのないことを確かめ、転倒、落下、損傷のないように積み込み、荷崩れの防止を確実にし、法令に定めるところに従う。 直射日光・高温多湿を避ける。原則的に冷凍または冷蔵輸送を行なう。

## 15. REGULATORY INFORMATION 適用法令

PRTR	1-82 Ag 0.26%
PRTR 法	第1種指定化学物質 82 項 銀及びその水溶性化合物 0.26%含有
Industrial Safety and Health Law 労働安全衛生法	Sn 通知対象物 政令番号 322 すず及びその化合物含有量 1 重量%以下を除く)
Water pollution control law 水質汚濁防止法	Cu 第3条生活環境項目 銅
Water works law 水道法	Cu 第4条 第3項 水道水が有すべき性状に関連する項目 銅及びその化合物
Sewerage law 下水道法	Cu 施行令 第9条の4 水質基準物質 28 項 銅及びその化合物

## 16. OTHER INFORMATION その他の情報

The information contained herein are based on all the information and data that we can obtain as of the date issued. However Nihon Almit Co., Ltd. does not give guarantee regarding the contents, physical or chemical properties, hazards or harm. All remarks and precautions are premised on ordinary handling and it is the user's responsibility to take enough considerations in case of particular use.

この製品安全データシートは、現時点で入手できる資料、情報、データに基づいて作成しておりますが、含有量、物理的・化学的性質、危険、有害性等に関しては、いかなる保証をなすものではありません。

また、注意事項は通常の取扱いを対象としたものなので、特殊な取扱いの場合には、用途・用法に適した安全対策を実施の上、ご利用下さい。

**SIGMA-ALDRICH**

sigma-aldrich.com

**SAFETY DATA SHEET**

according to Regulation (EC) No. 1907/2006  
Version 6.0 Revision Date 30.03.2016  
Print Date 28.02.2017

GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking****1.1 Product Identifiers**

Product name : Indium

Product Number : 264032  
Brand : Aldrich  
REACH No. : A registration number is not available for this substance as the substance or its uses are exempted from registration, the annual tonnage does not require a registration or the registration is envisaged for a later registration deadline.

CAS-No. : 7440-74-6

**1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against**

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

**1.3 Details of the supplier of the safety data sheet**

Company : Sigma-Aldrich Pte Ltd  
(Co. Registration No. 199403788W)  
1 Science Park Road  
#02-14 The Capricorn, S'pore Sci. PkII  
SINGAPORE 117528  
SINGAPORE

Telephone : +65 6779-1200  
Fax : +65 6779-1822

**1.4 Emergency telephone number**

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

**SECTION 2: Hazards identification****2.1 Classification of the substance or mixture**

**Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008**  
Flammable solids (Category 1), H228  
Acute toxicity, Inhalation (Category 4), H332  
Skin irritation (Category 2), H315  
Eye irritation (Category 2), H319  
Specific target organ toxicity - single exposure (Category 3), Respiratory system, H335

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

**2.2 Label elements**

**Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008**

Pictogram



Signal word

Danger

Hazard statement(s)  
H228

Flammable solid.

Aldrich - 264032

Page 1 of 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H315	Causes skin irritation.
H319	Causes serious eye irritation.
H332	Harmful if inhaled.
H335	May cause respiratory irritation.
Precautionary statement(s)	
P210	Keep away from heat, hot surfaces, sparks, open flames and other ignition sources. No smoking.
P261	Avoid breathing dust.
P305 + P351 + P338	IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
Supplemental Hazard Statements	none

### 2.3 Other hazards

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.

## SECTION 3: Composition/information on ingredients

### 3.1 Substances

Formula	: In
Molecular weight	: 114.82 g/mol
CAS-No.	: 7440-74-6
EC-No.	: 231-180-0

#### Hazardous ingredients according to Regulation (EC) No 1272/2008

Component	Classification	Concentration
<b>Indium</b>		
CAS-No.	7440-74-6	≤ 100 %
EC-No.	231-180-0	
	Flam. Sol. 1; Acute Tox. 4; Skin Irrit. 2; Eye Irrit. 2; STOT SE 3; H228, H332, H315, H319, H335	

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

## SECTION 4: First aid measures

### 4.1 Description of first aid measures

#### General advice

Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance.

#### If inhaled

If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Consult a physician.

#### In case of skin contact

Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.

#### In case of eye contact

Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.

#### If swallowed

Do NOT induce vomiting. Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.

### 4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11

### 4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

---

**SECTION 5: Firefighting measures**
**5.1 Extinguishing media****Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

**5.2 Special hazards arising from the substance or mixture**

Indium/indium oxides

**5.3 Advice for firefighters**

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

**5.4 Further information**

Use water spray to cool unopened containers.

---

**SECTION 6: Accidental release measures**
**6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Use personal protective equipment. Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Remove all sources of ignition. Evacuate personnel to safe areas. Avoid breathing dust.

For personal protection see section 8.

**6.2 Environmental precautions**

Prevent further leakage or spillage if safe to do so. Do not let product enter drains.

**6.3 Methods and materials for containment and cleaning up**

Sweep up and shovel. Contain spillage, and then collect with an electrically protected vacuum cleaner or by wet-brushing and place in container for disposal according to local regulations (see section 13). Keep in suitable, closed containers for disposal. Contain spillage, pick up with an electrically protected vacuum cleaner or by wet-brushing and transfer to a container for disposal according to local regulations (see section 13).

**6.4 Reference to other sections**

For disposal see section 13.

---

**SECTION 7: Handling and storage**
**7.1 Precautions for safe handling**

Avoid contact with skin and eyes. Avoid formation of dust and aerosols.

Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. Keep away from sources of ignition - No smoking. Take measures to prevent the build up of electrostatic charge.

For precautions see section 2.2.

**7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities**

Store in cool place. Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place.

Storage class (TRGS 510): Flammable solid hazardous materials

**7.3 Specific end use(s)**

Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

---

**SECTION 8: Exposure controls/personal protection**
**8.1 Control parameters****8.2 Exposure controls****Appropriate engineering controls**

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday.

### Personal protective equipment

#### Eye/face protection

Safety glasses with side-shields conforming to EN166 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).

#### Skin protection

Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.

The selected protective gloves have to satisfy the specifications of EU Directive 89/686/EEC and the standard EN 374 derived from it.

#### Full contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Dermatrik® (KCL 740 / Aldrich Z677272, Size M)

#### Splash contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Dermatrik® (KCL 740 / Aldrich Z677272, Size M)

data source: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, phone +49 (0)5659 87300, e-mail sales@kcl.de, test method: EN374

If used in solution, or mixed with other substances, and under conditions which differ from EN 374, contact the supplier of the CE approved gloves. This recommendation is advisory only and must be evaluated by an industria situation of anticipated use by our customers. It should not be construed as offering an approval for any specific use scenario.

#### Body Protection

Complete suit protecting against chemicals, Flame retardant antistatic protective clothing., The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.

#### Respiratory protection

Where risk assessment shows air-purifying respirators are appropriate use (EN 143) respirator cartridges as a backup to engineering controls. If th full-face supplied air respirator. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

#### Control of environmental exposure

Prevent further leakage or spillage if safe to do so. Do not let product enter drains.

## SECTION 9: Physical and chemical properties

### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| a) Appearance                              | Form: powder                  |
| b) Odour                                   | No data available             |
| c) Odour Threshold                         | No data available             |
| d) pH                                      | No data available             |
| e) Melting point/freezing point            | Melting point/range: 156.6 °C |
| f) Initial boiling point and boiling range | No data available             |
| g) Flash point                             | Not applicable                |
| h) Evaporation rate                        | No data available             |

Aldrich - 264032

Page 4 of 7

- |   |  |
|---|--|
| i) Flammability (solid, gas)                    | The substance or mixture is a flammable solid with the category 1. |
| j) Upper/lower flammability or explosive limits | No data available  |
| k) Vapour pressure                              | No data available  |
| l) Vapour density                               | No data available  |
| m) Relative density                             | 7.3 g/cm <sup>3</sup> at 25 °C                                     |
| n) Water solubility                             | No data available  |
| o) Partition coefficient: n-octanol/water       | No data available  |
| p) Auto-ignition temperature                    | No data available  |
| q) Decomposition temperature                    | No data available  |
| r) Viscosity                                    | No data available  |
| s) Explosive properties                         | No data available  |
| t) Oxidizing properties                         | No data available  |

**9.2 Other safety information**  
No data available

---

**SECTION 10: Stability and reactivity**

- 10.1 Reactivity**  
No data available
- 10.2 Chemical stability**  
Stable under recommended storage conditions.
- 10.3 Possibility of hazardous reactions**  
No data available
- 10.4 Conditions to avoid**  
Heat, flames and sparks.
- 10.5 Incompatible materials**  
Strong oxidizing agents
- 10.6 Hazardous decomposition products**  
Hazardous decomposition products formed under fire conditions. - Indium/indium oxides  
Other decomposition products - No data available  
In the event of fire: see section 5

---

**SECTION 11: Toxicological information**

- 11.1 Information on toxicological effects**
- Acute toxicity**  
No data available (Indium)
- Skin corrosion/irritation**  
No data available (Indium)
- Serious eye damage/eye irritation**  
No data available (Indium)
- Respiratory or skin sensitisation**  
No data available (Indium)

**Germ cell mutagenicity**

No data available(Indium)

**Carcinogenicity**

IARC: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as probable, possible or confirmed human carcinogen by IARC.

**Reproductive toxicity**

No data available(Indium)

**Specific target organ toxicity - single exposure**

Inhalation - May cause respiratory irritation.(Indium)

**Specific target organ toxicity - repeated exposure**

No data available

**Aspiration hazard**

No data available(Indium)

**Additional Information**

RTECS: NL1050000

Cough, Shortness of breath, Headache, Nausea, Vomiting, To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.(Indium)

**SECTION 12: Ecological information****12.1 Toxicity**

No data available

**12.2 Persistence and degradability**

No data available

**12.3 Bioaccumulative potential**

No data available

**12.4 Mobility in soil**

No data available(Indium)

**12.5 Results of PBT and vPvB assessment**

This substance/mixture contains no components considered to be either persistent, bioaccumulative and toxic (PBT), or very persistent and very bioaccumulative (vPvB) at levels of 0.1% or higher.

**12.6 Other adverse effects**

No data available

**SECTION 13: Disposal considerations****13.1 Waste treatment methods****Product**

Burn in a chemical incinerator equipped with an afterburner and scrubber b highly flammable. Offer surplus and non-recyclable solutions to a licensed disposal company.

**Contaminated packaging**

Dispose of as unused product.

**SECTION 14: Transport information****14.1 UN number**

ADR/RID: 3089

IMDG: 3089

IATA: 3089

<b>14.2 UN proper shipping name</b>		
ADR/RID: METAL POWDER, FLAMMABLE, N.O.S.		
IMDG: METAL POWDER, FLAMMABLE, N.O.S.		
IATA: Metal powder, flammable, n.o.s.		
<b>14.3 Transport hazard class(es)</b>		
ADR/RID: 4.1	IMDG: 4.1	IATA: 4.1
<b>14.4 Packaging group</b>		
ADR/RID: II	IMDG: II	IATA: II
<b>14.5 Environmental hazards</b>		
ADR/RID: no	IMDG Marine pollutant: no	IATA: no
<b>14.6 Special precautions for user</b>		
No data available		

---

**SECTION 15: Regulatory information**

- 15.1 Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture**  
This safety datasheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006.
- 15.2 Chemical safety assessment**  
For this product a chemical safety assessment was not carried out

---


**SECTION 16: Other information**
**Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.**

H228	Flammable solid.
H315	Causes skin irritation.
H319	Causes serious eye irritation.
H332	Harmful if inhaled.
H335	May cause respiratory irritation.

**Further information**

Copyright 2016 Sigma-Aldrich Co. LLC. License granted to make unlimited paper copies for internal use only.

The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product. Sigma-Aldrich Corporation and its Affiliates shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above product. See [www.sigma-aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com) and/or the reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

 <b>NANO MATERIALS TECHNOLOGY</b>				
DATE : March 2008	MATERIALS SAFETY DATA SHEET - ZINC OXIDE NANOPOWDER			
<b>1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION</b>				
1.1 Product Name	: Zinc Oxide Nanopowder			
1.2 Chemical Symbol	: ZnO			
1.3	This powder is an experimental sample, comprised of loosely aggregated ultrafine nanometer particles. No data yet exists on the effects of such fine particles on body. Special care should be taken to avoid ingestion, inhalation, skin contact or eye contact.			
1.4 Supplier	: Nano Materials Technology Limited 310/1 Moo 1 Yutthasart 331 Road Nongpaikaew , Banbung Chonburi , Thailand 20220			
Telephone	: +66 (0)38 292 - 363 -4			
Fax	: +66 (0)38 292 - 368			
Website	: www.nanomaterials.co.th			
<b>2. COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS</b>				
Supplied in the following purities				
2.1 Zinc Oxide	99.73% CAS No: 1314-13-2			
<b>3. HAZARDS IDENTIFICATION</b>				
This powder is an experimental sample, comprised of loosely aggregated ultrafine nanometer particles. No data yet exists on the effects of such fine particles on body. Special care should be taken to avoid ingestion, inhalation, skin contact or eye contact.				
3.1 Matrial	Form	OSHA - PEL TWA (8h) mg/m <sup>3</sup>	ACGIH - TLV TWA mg/m <sup>3</sup>	STEL(15 min) mg/m <sup>3</sup>
Zinc Oxide	Total Dust	15	10	-
	Respirable (Fumed)	5	2	10
3.2 Acute effects	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Ingestion : large oral does may cause an obstruction of the abdominal tract and nausea, fever and stomach cramps.</li> <li>* Skin contact : May cause irritation.</li> <li>* Eye contact : Dust or powder may cause irritation .</li> <li>* Inhalation : Dust or fumes may cause irritation of the respiratory tract.</li> <li>* Madical conditions : if any, could be aggravated : pre -existing skin disorders.</li> <li>* Other health hazards : non known.</li> <li>* Most likely routes of entry : ingestion</li> </ul>			
3.3 Environmental	Very toxic aquatic organisms, may cause long - term adverse effects in the aquatic environment			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. FIRST AID MEASURES	
4.1 Ingestion	Drink plenty of water and seek medical advice immediately.
4.2 Skin contact	May diffuse through outer skin layer (epidermis), due to fine form, wash immediately with soap and water. The epidermis cannot be considered an effective barrier.
4.3 eyes	Irritation may be caused as with any other dust. Wash out immediately with water for at least 15 mins. Particle deposited in the eye may produce neurosis of the cornea. Seek medical advice.
4.4 Inhalation	Terminate exposure immediately and move to fresh air See Occupational Exposure Limits Section 8. for MEL's / OES's consult EH40 or equivalent national standard.
5. FIRE FIGHTING MEASURES	
5.1 Fire and explosion hazard data	
Flash point :	N/A
Flammable limit :	LEL: N/A UEL: N/A
NFPA Fire Rating	Health : 0 Flammability : 0 Reactivity : 0
5.2 Extinguishing media :	any extinguishing media can be used. No special fire producers needed.
5.3 Protection of Fire Fighters :	Use normal procedures which include wearing approved self contained breathing apparatus, flame and chemicals resistant clothing, hats, boots and gloves.
5.4 Other information :	Prevent fire fighting water from entering surface water or ground water.
6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURE	
6.1 Accidental spillage During Transport to End User	
6.1.1 Personal Precautions	Avoid inhalation, use approved respiratory protection.
6.1.2 Environmental Precautions	* Prevent spillage into surface water channels, sewers, drains etc. * Carefully sweep up using natural bristle broom * Avoid creation of dust clouds
6.1.3 Disposal Considerations	* Collect spilled zinc oxide * If dry the collected dust may be stored in sealed drums in dry conditions * Use an approved waste disposal contractor
6.2 Spillage at end user	* Good housekeeping is essential where dust is handled * Spillage should be cleaned up as soon as possible after it occurs * If suction equipment is not available careful sweeping and storage as above under 6.1.3 * Use high efficiency particle respirator, eye protection and rubber protective gloves.
7. HANDLING AND STORAGE	
7.1 Handling	* Avoid generation of dust clouds * Keep work area clean (section 6) * Wash hands thoroughly after use * Wear protective clothing * Use protective face mask if necessary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>7.2 Storage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Store in the supplied containers until used</li> <li>* Keep in closed dry and cool room or store (&lt; 50 C ) to prevent deterioration of the product by carbonisation.</li> <li>* Keep area clean and avoid spillage</li> <li>* Store protected from solvents</li> </ul>	
<b>8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION</b>	
<b>8.1 Respiratory protection</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Sufficient ventilation should be provided to ensure dust contation is maintained below the Occupational Exposure Limit.</li> <li>* A dust mask rated to the finer agglomerate size is recommended if regular exposure is unavoidable</li> </ul> Masks are recommended in environments exceeding the nuisance dust levels.	
<b>8.2 Eye Protection</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Wear eye protection : Irritation may occur as with any dust entering the eye-wash out immediately if it occurs.</li> </ul>	
<b>8.3 Skin contact</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Barrier protection is recommended, i.e. disposable rubber gloves, rated to the finer agglomerate size</li> <li>* Wash hands thoroughly before eating , drinking or smoking.</li> </ul>	
<b>8.4 Industrial hygiene</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Change contaminated clothing. Wash hands after working with substance.</li> </ul>	
<b>9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES</b>	
9.1 Physical state:	Powder
9.2 Particle size:	20 - 40 nm.
9.3 Colour:	White powder
9.4 Odour:	None
9.5 pH:	8 - 9
9.6 Boiling Point:	Sublimes
9.7 Melting Point:	1970 C
Vapour pressure:	Low
9.8 Flash Point:	N/A
9.9 Auto ignition temperature:	N/A
9.10 Relative Density:	0.14 g/cm <sup>3</sup>
9.11 Specific surface area:	26.22 m <sup>2</sup> /g.
9.12 Solubility:	Insoluble in water, Soluble in acids and bases.
<b>10. STABILITY AND REACTIVITY</b>	
<b>10.1 Stability</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Product is stable.</li> </ul>	
<b>10.2 Hazardous decomposition products :</b> None	
<b>10.3 Substances to be avoided:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Hydrogenperoxide ,magnesium</li> </ul>	
<b>11. TOXICOLOGICAL INFORMATION</b>	
<b>11.1 Ingestion :</b> Large oral dose may produce intestinal obstruction and nausea fever and stomach cramps.	
11.2 Animal toxicity (mouse) LD <sub>50</sub>	7950 mg/kg
	LC <sub>50</sub> 2500mg/m <sup>3</sup>
<b>11.3 Other notes:</b> In general zinc compounds are only slightly absorbable via the gastrointestinal tract. Adstringent effect on mucous membranes. Metal fume fever after inhalation of large quantities.	
Page 3 of 4	

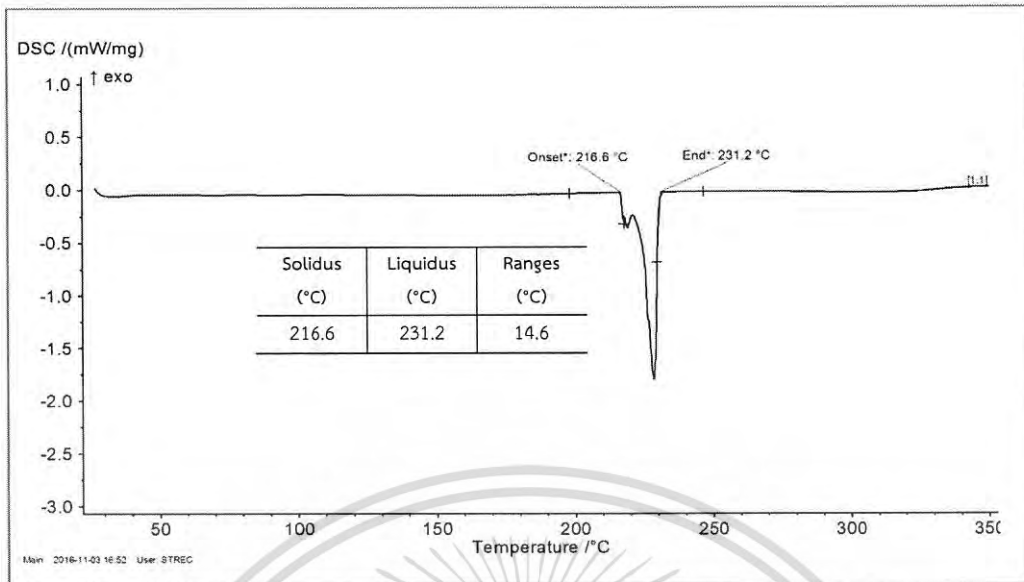
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>12. ECOLOGICAL INFORMATION</b>	
12.1 Ecotoxicity: Not known	
12.2 Aquatic organisms :	ZnO being almost insoluble in water the determination of ecotoxicity to aquatic organisms is very difficult.
Do not allow to enter waters, waste water, or soil.	
<b>13. DISPOSAL CONSIDERATIONS</b>	
13.1 Dispose of in line with regional or national regulations relevant to the location of the consumer.	
<b>14. TRANSPORT INFORMATION</b>	
14.1 Zinc oxide is designated as an Environmentally hazardous substance, Solid, NOS and classified as 9/UN 3077/PGIII	
<b>15. REGULATORY INFORMATION</b>	
15.1 Labelling according to EC Directives	
* Symbol:	N Dangerous for the environment
* R phrases:	50/53 Very toxic to aquatic organisms, may cause long - term adverse effects in the aquatic environment
* S phrases:	60 - 61 This material and its container must be disposed of as hazardous waste. Avoid release to the environment.
<b>16. OTHER INFORMATION</b>	
16.1 This safety information is provided in good faith and is based on the present state of our knowledge. Our company's only obligation shall be to replace such quantities of material defective. Before using, the user shall determine the suitability of the product for its intended use and the user assumes all risk and liability whatsoever in connection therewith. Our company will not be liable for loss or damage, direct, incidental or consequential arising out of the use, or inability to use, the product.	
16.2 Attention is drawn to the hazards which may result from the misuse of these materials.	
16.3 All information contained in this documentation is based upon current knowledge.	

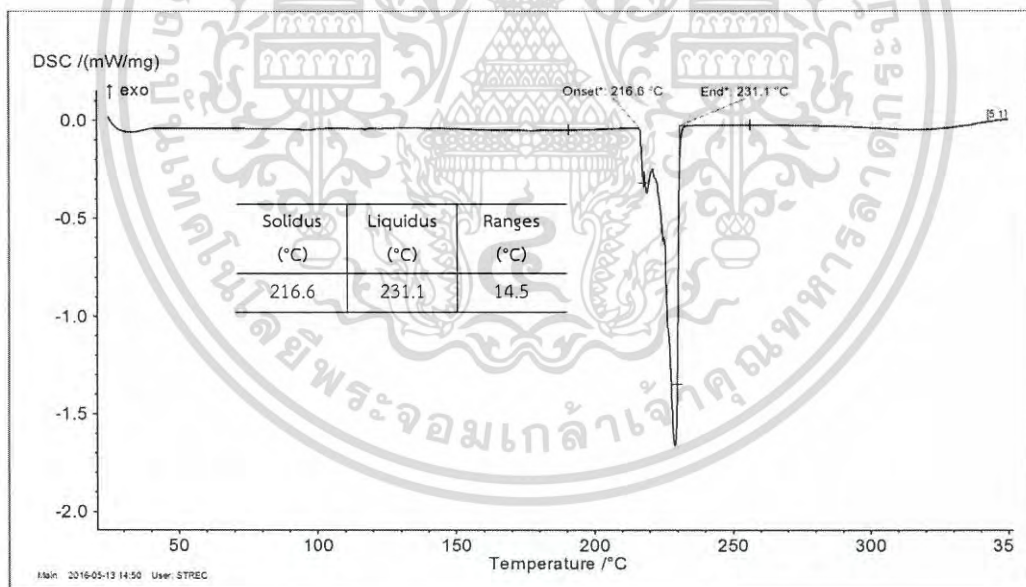
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

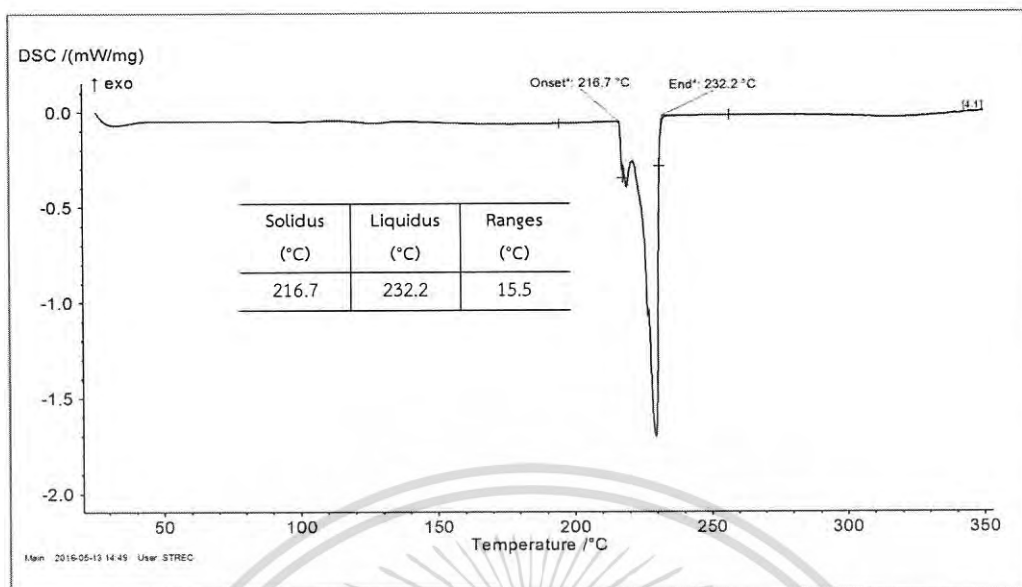


รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu

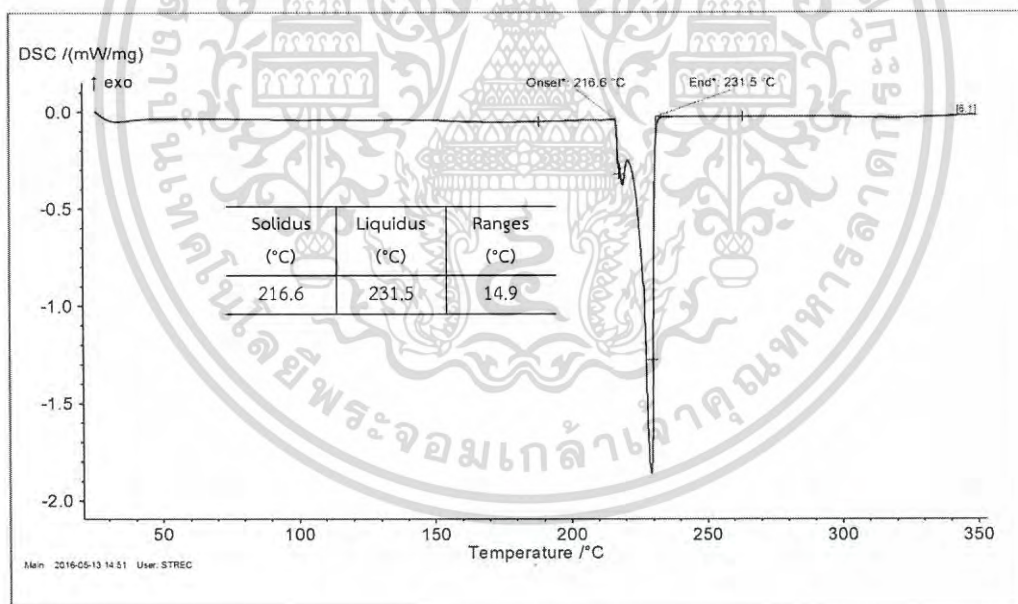


รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.25ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

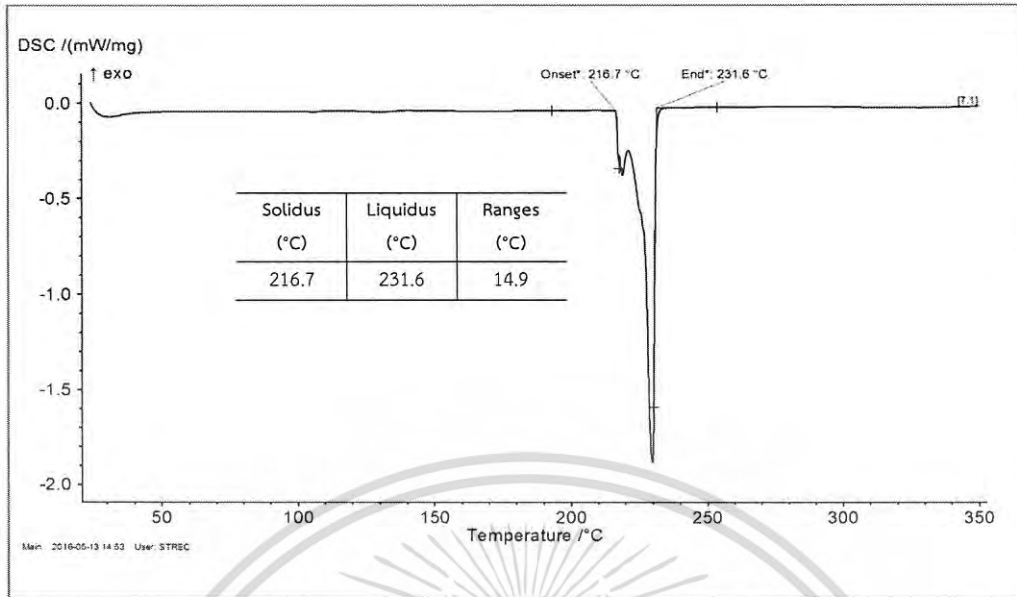


รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5ZnO

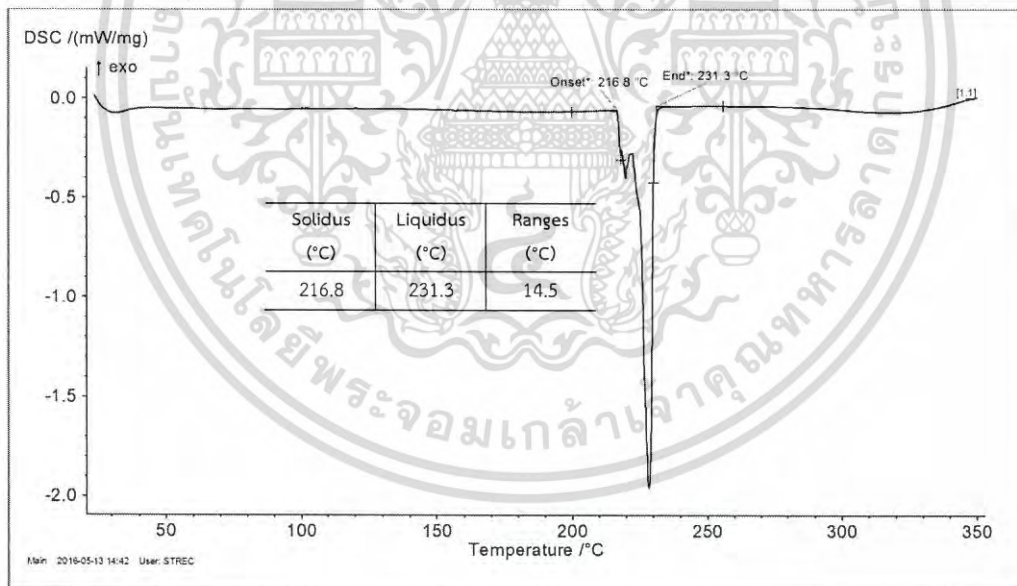


รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.75ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

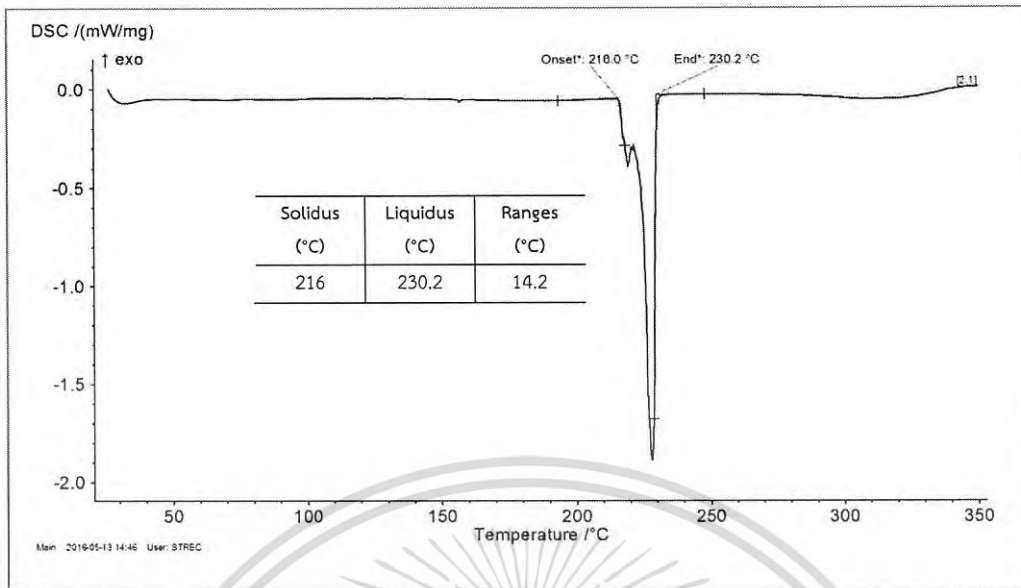


รูปที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0ZnO

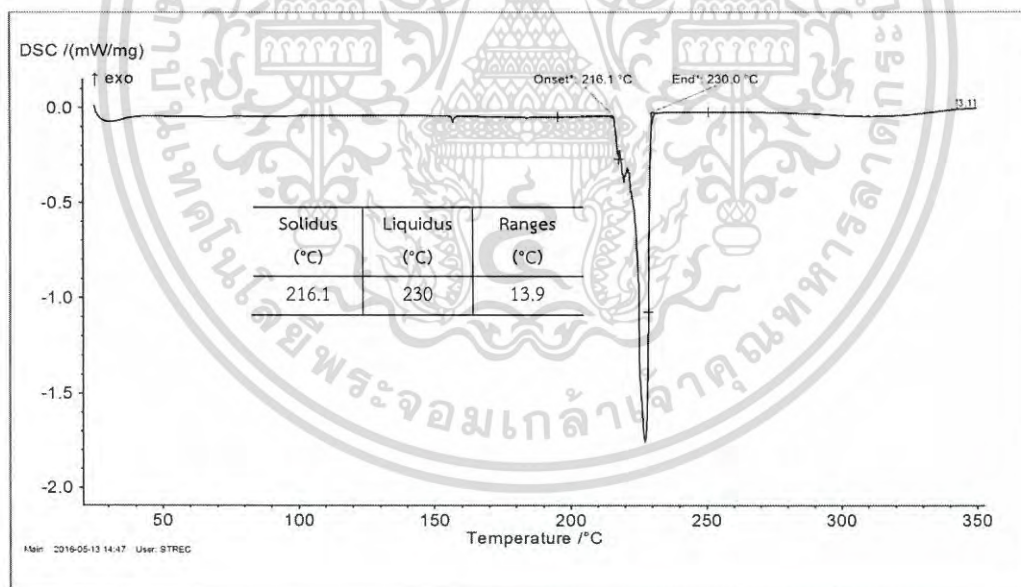


รูปที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

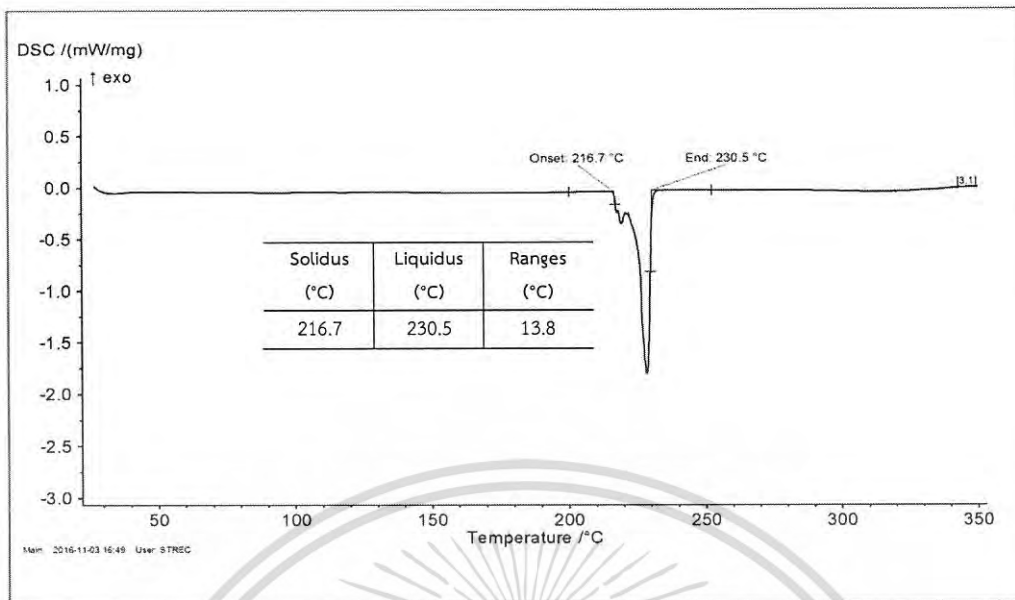


รูปที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In

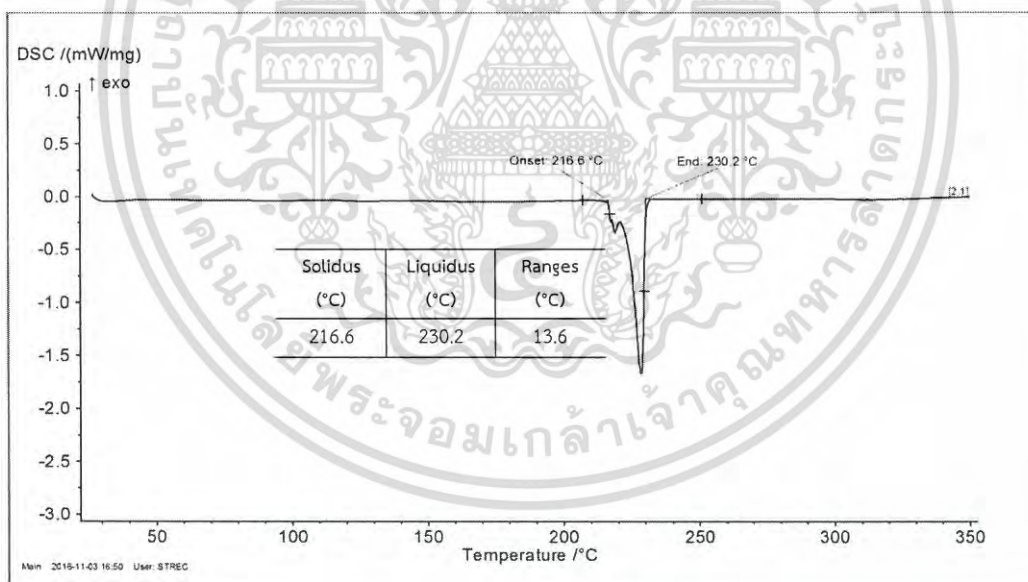


รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

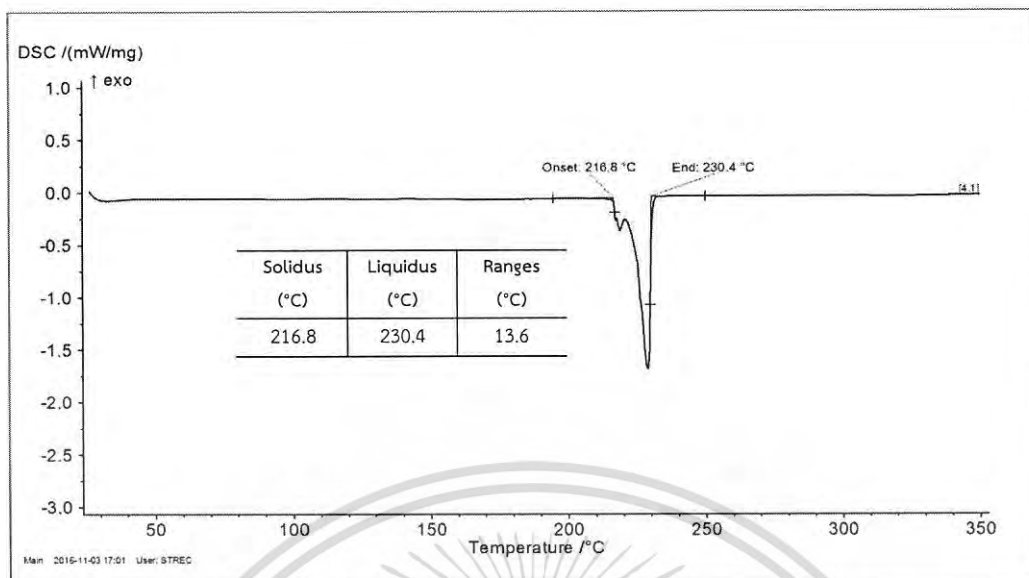


รูปที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO

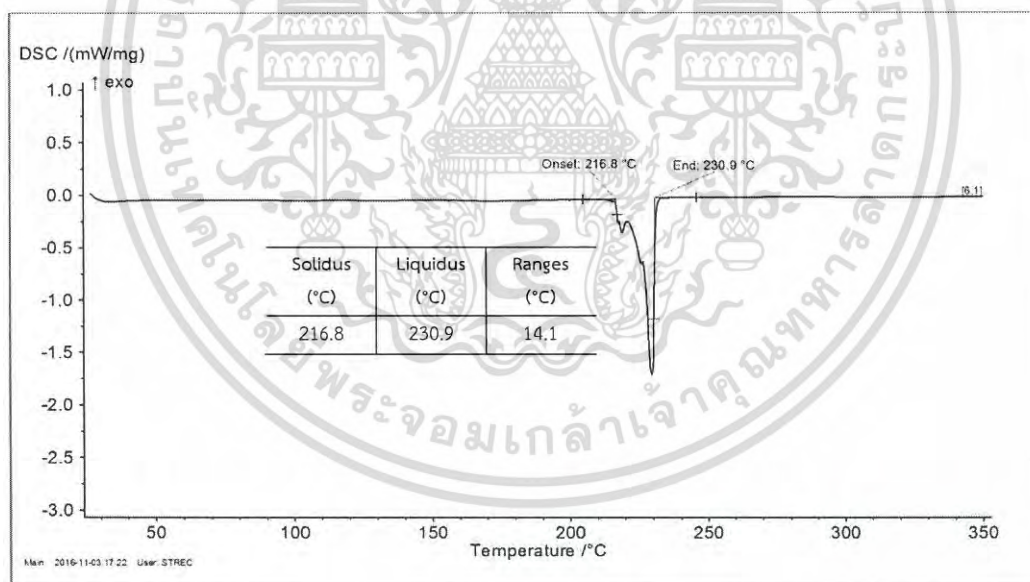


รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.5ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

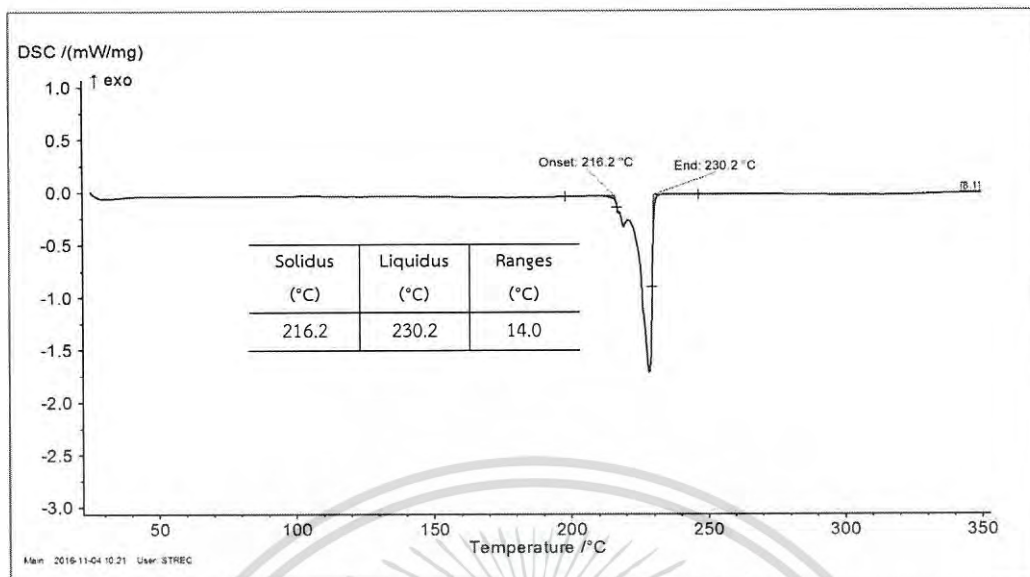


รูปที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO

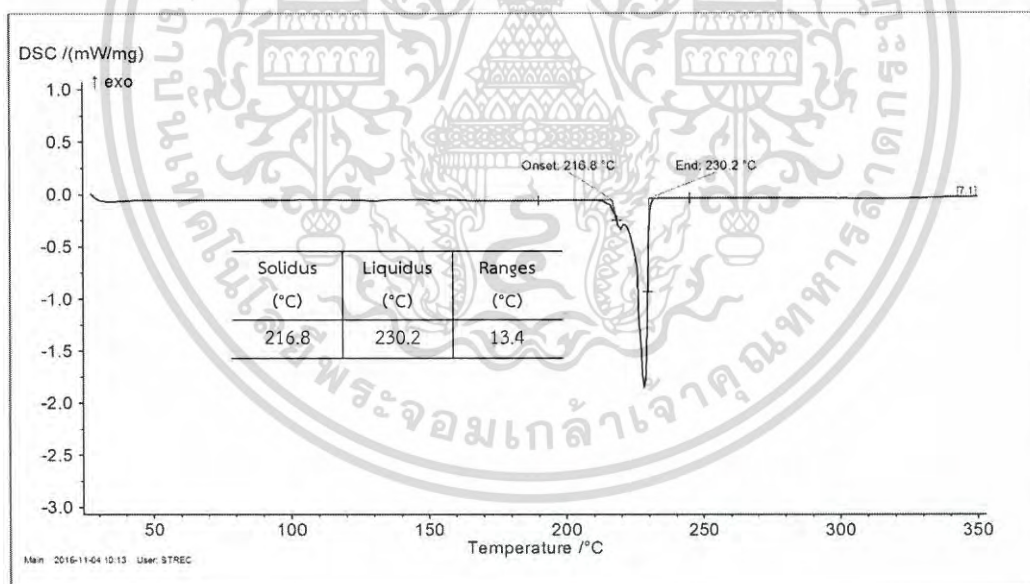


รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.0ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

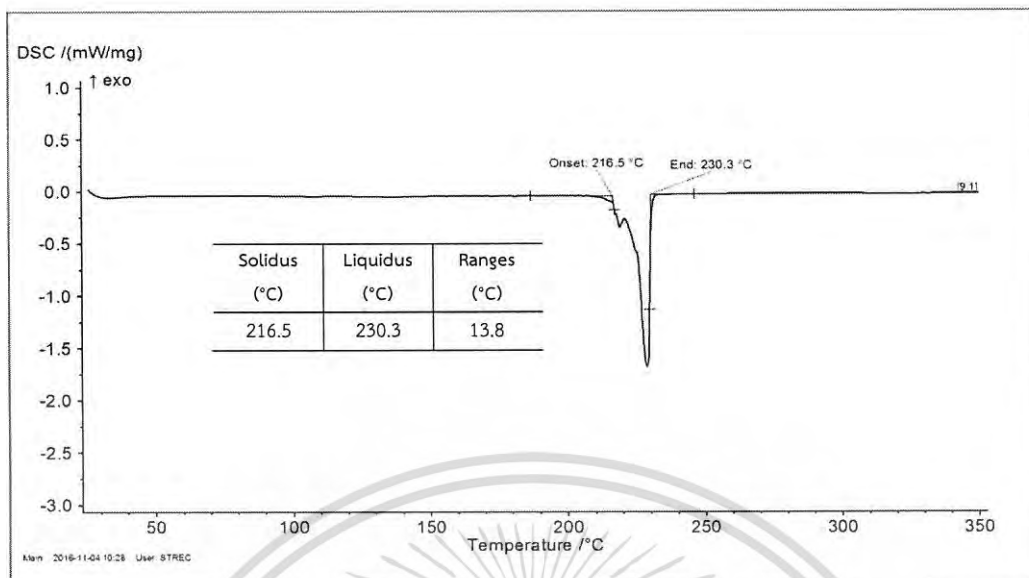


รูปที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO

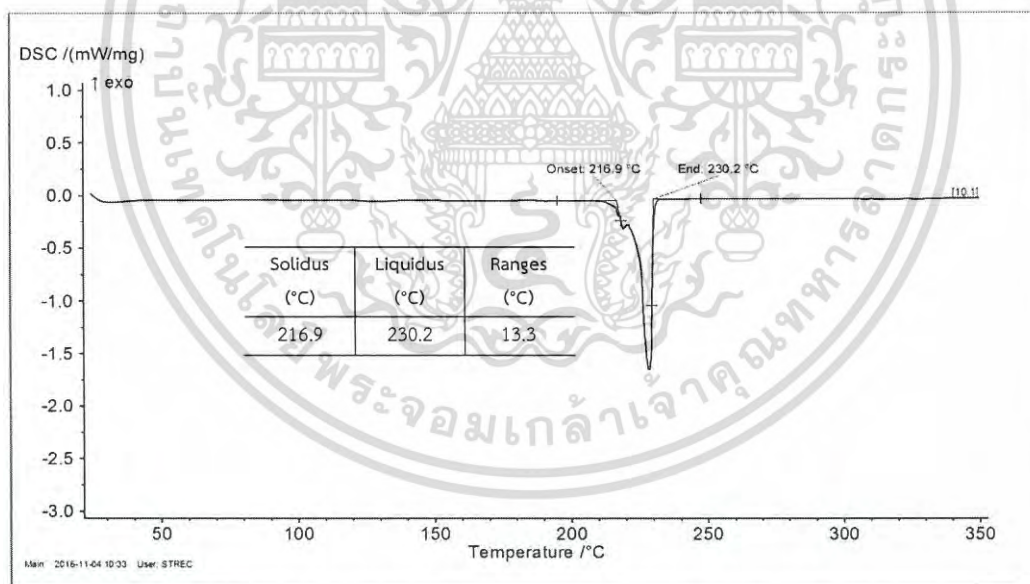


รูปที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.5ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

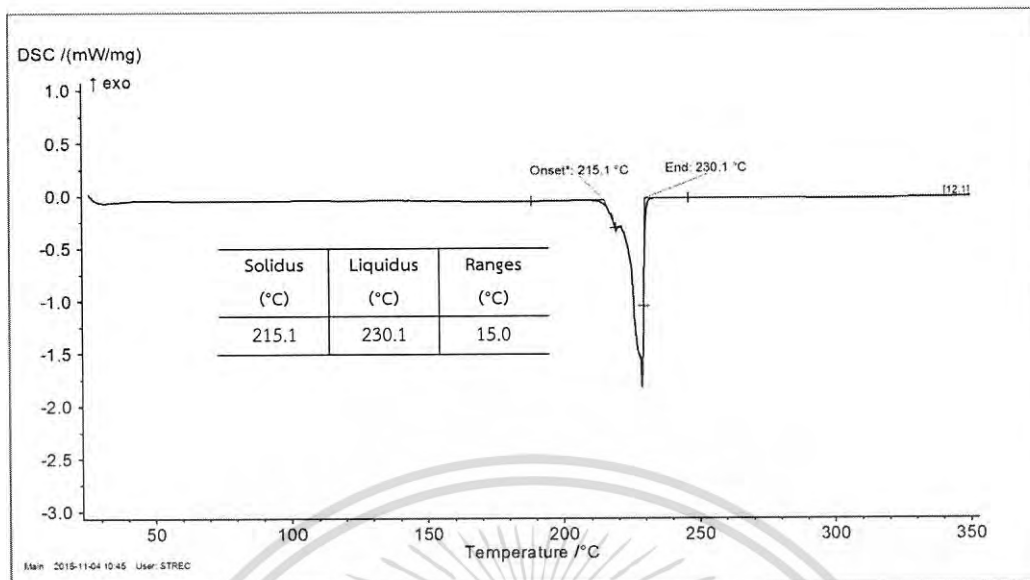


รูปที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO

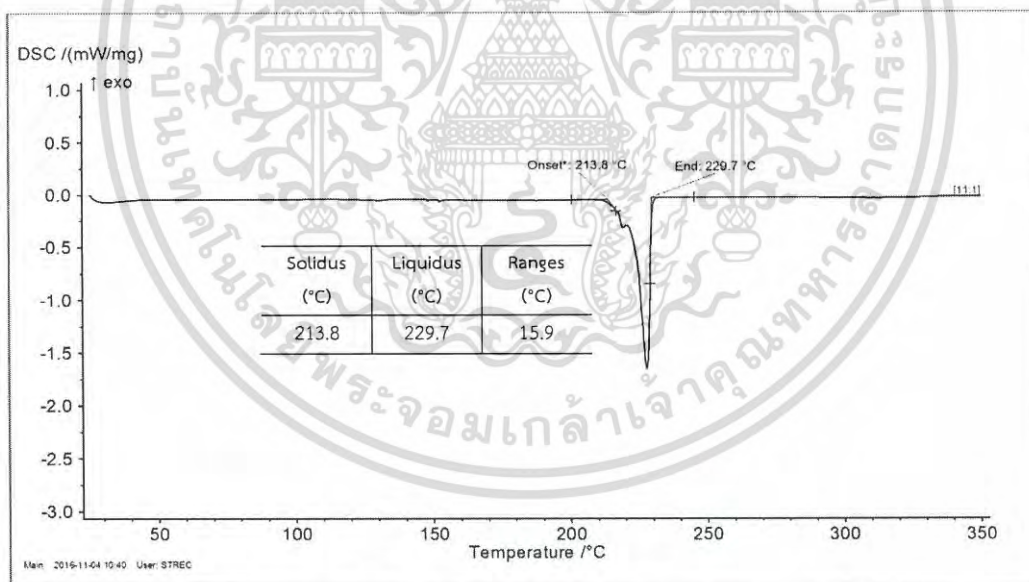


รูปที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.0ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

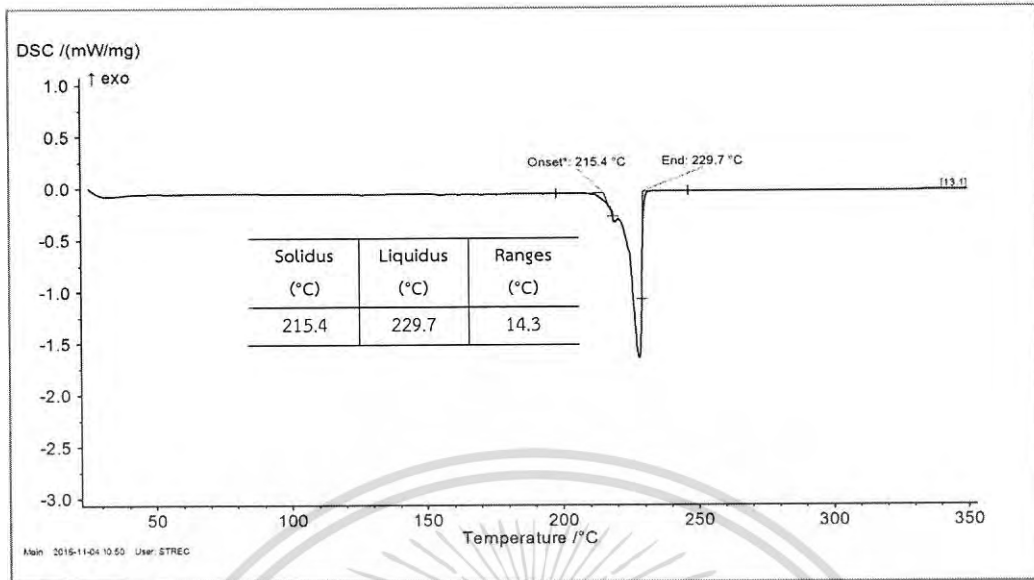


รูปที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO

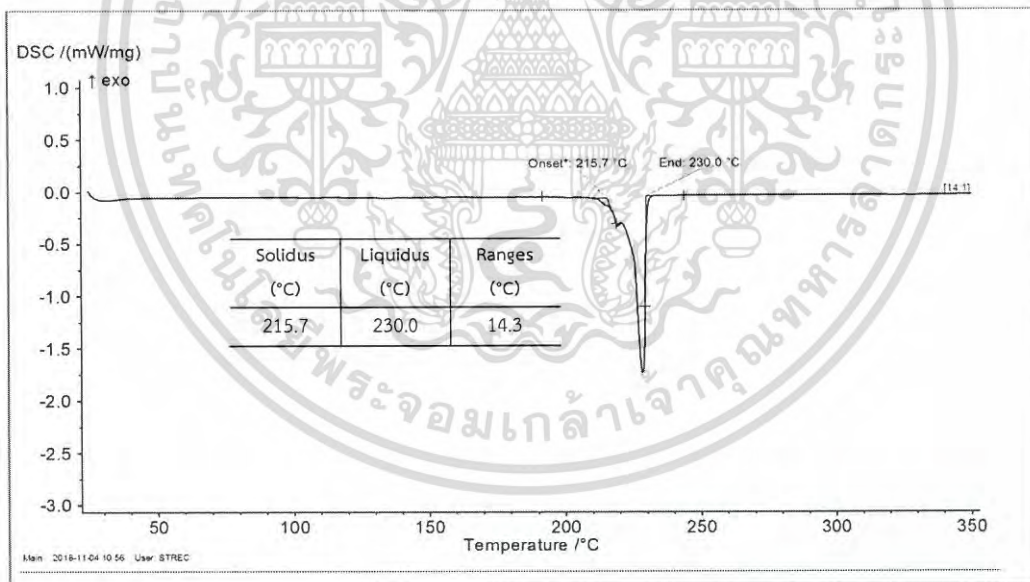


รูปที่ ค.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.5ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO



รูปที่ ค.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิทดสอบของ โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.0ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง

ค่าทดสอบความสามารถในการกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการวัดพื้นที่และเส้นรอบวงจากโปรแกรม Image-Pro Express@

โลหะบัดกรี	ชั้นงาน	พื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร)			
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Sn-0.3Ag-0.7Cu	1	45.05	44.84	44.93	44.94
	2	42.28	41.99	42.6	42.29
	3	43.43	41.85	43.49	42.92
	ค่าเฉลี่ย	43.38			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.25ZnO	1	72.77	72.35	73.96	73.03
	2	72.27	73.25	73.02	72.85
	3	70.81	71.72	70.53	71.02
	ค่าเฉลี่ย	72.30			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5ZnO	1	70.01	69.92	69.84	69.92
	2	69.31	69.28	69.35	69.31
	3	69.96	69.71	69.53	69.73
	ค่าเฉลี่ย	69.65			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.75ZnO	1	58.67	58.15	58.69	58.50
	2	57.98	58.28	58.34	58.2
	3	58.43	58.27	58.48	58.39
	ค่าเฉลี่ย	58.36			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 1.0ZnO	1	50.03	49.98	50.06	50.02
	2	51.36	51.19	51.45	51.33
	3	50.55	51.28	50.73	50.85
	ค่าเฉลี่ย	50.73			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In	1	48.91	48.97	49.49	49.12
	2	49.18	49.26	48.99	49.14
	3	48.75	49.29	48.94	48.99
	ค่าเฉลี่ย	49.08			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In	1	55.28	55.48	55.29	55.35
	2	55.12	55.44	55.48	55.35
	3	55.38	55.17	55.85	55.47
	ค่าเฉลี่ย	55.39			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In	1	81.02	81.03	81.41	81.15
	2	80.23	80.19	80.28	80.23
	3	80.57	80.58	79.97	80.37
	ค่าเฉลี่ย	80.58			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการวัดพื้นที่และเส้นรอบวงจากโปรแกรม Image-Pro Express@ (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	พื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร)			
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.25ZnO	1	78.24	78.81	78.53	78.53
	2	78.93	78.92	78.31	78.72
	3	78.29	78.48	78.93	78.57
	ค่าเฉลี่ย	78.61			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.5ZnO	1	67.06	66.33	66.86	66.75
	2	66.85	67.02	66.46	66.78
	3	66.12	66.81	66.44	66.46
	ค่าเฉลี่ย	66.66			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.75ZnO	1	64.96	65.07	65.11	65.05
	2	65.09	65.03	64.86	64.99
	3	64.97	65.02	65.01	65.00
	ค่าเฉลี่ย	65.01			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-1.0ZnO	1	52.31	52.16	52.04	52.17
	2	52.02	51.94	51.98	51.98
	3	52.05	52.14	51.96	52.05
	ค่าเฉลี่ย	52.07			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.25ZnO	1	73.87	73.89	74.31	74.02
	2	73.92	74.74	74.36	74.34
	3	74.31	74.59	74.65	74.52
	ค่าเฉลี่ย	74.29			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.5ZnO	1	67.20	67.41	67.81	67.47
	2	66.98	67.49	67.34	67.27
	3	67.26	67.23	67.29	67.26
	ค่าเฉลี่ย	67.33			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.75ZnO	1	57.68	57.15	57.61	57.48
	2	57.13	57.22	57.37	57.24
	3	57.47	57.27	57.49	57.41
	ค่าเฉลี่ย	57.38			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-1.0ZnO	1	53.21	53.29	53.46	53.32
	2	52.94	53.43	53.72	53.36
	3	53.36	53.57	53.66	53.53
	ค่าเฉลี่ย	53.40			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการวัดพื้นที่และเส้นรอบวงจากโปรแกรม Image-Pro Express@ (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชั้นงาน	พื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร)			
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.25ZnO	1	70.07	70.31	70.32	70.23
	2	70.27	70.25	70.02	70.18
	3	70.61	70.52	70.38	70.50
	ค่าเฉลี่ย	70.30			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.5ZnO	1	68.06	68.33	68.86	68.42
	2	69.08	69.15	68.46	68.90
	3	68.32	68.81	68.74	68.62
	ค่าเฉลี่ย	68.65			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.75ZnO	1	60.41	60.54	61.07	60.67
	2	60.52	60.42	60.88	60.61
	3	60.53	60.91	60.89	60.78
	ค่าเฉลี่ย	60.69			
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-1.0ZnO	1	45.23	45.28	45.19	45.23
	2	45.02	45.21	46.01	45.41
	3	45.30	45.84	45.92	45.69
	ค่าเฉลี่ย	45.44			

ตารางที่ ง.2 ผลการวัดค่ามุมสัมผัสที่ได้จากการคำนวณ

โลหะบัดกรี	ชั้นงาน	มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี (องศา)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	1	21.86
	2	21.92
	3	22.95
	ค่าเฉลี่ย	22.24 ± 0.61
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.25ZnO	1	10.12
	2	9.19
	3	9.78
	ค่าเฉลี่ย	9.69 ± 0.47
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5ZnO	1	11.41
	2	11.94
	3	11.66
	ค่าเฉลี่ย	11.67 ± 0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการวัดค่ามอดูลสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณ (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	มอดูลสัมพัทธ์ของโลหะบัดกรี (องศา)
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.75ZnO	1	15.14
	2	14.13
	3	14.63
	ค่าเฉลี่ย	$14.63 \pm 0.50$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 1.0ZnO	1	16.81
	2	17.15
	3	16.95
	ค่าเฉลี่ย	$16.97 \pm 0.17$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In	1	18.10
	2	19.23
	3	18.69
	ค่าเฉลี่ย	$18.67 \pm 0.56$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In	1	16.69
	2	16.37
	3	16.51
	ค่าเฉลี่ย	$16.53 \pm 0.16$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In	1	8.56
	2	9.06
	3	8.82
	ค่าเฉลี่ย	$8.81 \pm 0.25$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.25ZnO	1	8.70
	2	8.69
	3	9.38
	ค่าเฉลี่ย	$8.92 \pm 0.40$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.5ZnO	1	12.76
	2	12.44
	3	12.74
	ค่าเฉลี่ย	$12.65 \pm 0.18$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.75ZnO	1	13.10
	2	13.06
	3	12.93
	ค่าเฉลี่ย	$13.03 \pm 0.09$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการวัดค่ามอดุลิตี้ที่ได้จากการคำนวณ (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	มอดุลิตี้ของโลหะบัดกรี (องศา)
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-1.0ZnO	1	17.12
	2	16.60
	3	16.86
	ค่าเฉลี่ย	$16.86 \pm 0.26$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.25ZnO	1	9.96
	2	9.05
	3	8.85
	ค่าเฉลี่ย	$9.28 \pm 0.59$
0Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.5ZnO	1	12.70
	2	12.22
	3	12.47
	ค่าเฉลี่ย	$12.46 \pm 0.24$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.75ZnO	1	15.18
	2	14.85
	3	14.61
	ค่าเฉลี่ย	$14.88 \pm 0.29$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-1.0ZnO	1	17.01
	2	16.46
	3	15.89
	ค่าเฉลี่ย	$16.46 \pm 0.56$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.25ZnO	1	10.89
	2	11.52
	3	11.25
	ค่าเฉลี่ย	$11.22 \pm 0.32$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.5ZnO	1	11.61
	2	11.95
	3	11.93
	ค่าเฉลี่ย	$11.83 \pm 0.19$
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.75ZnO	1	14.37
	2	14.56
	3	14.56
	ค่าเฉลี่ย	$14.50 \pm 0.11$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการวัดค่ามัมสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณ (ต่อ)

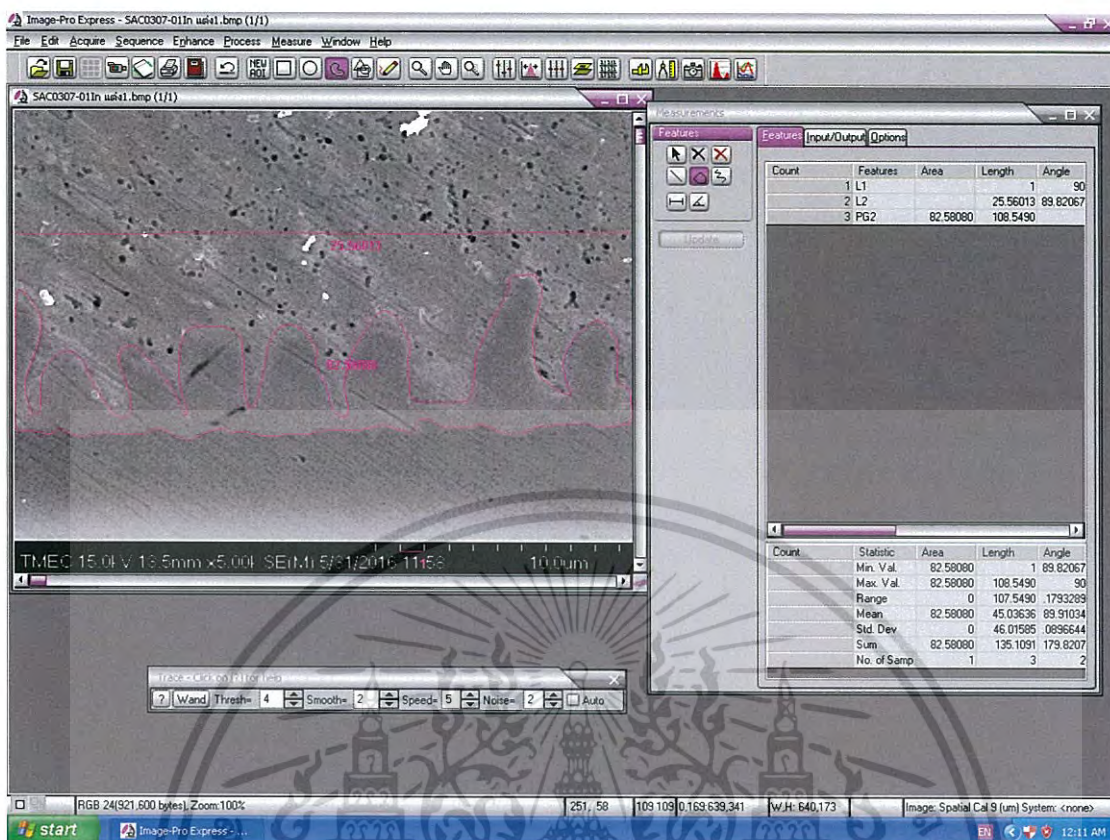
โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	มัมสัมพัทธ์ของโลหะบัดกรี (องศา)
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-1.0ZnO	1	19.72
	2	19.27
	3	20.03
	ค่าเฉลี่ย	$19.67 \pm 0.38$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.1 การวัดขนาดพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_3\text{Sn}_5$  ด้วยโปรแกรม Image-pro Express

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.๒ ผลการวัดค่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	ความสามารถในการพิมพ์ (%)
Sn-0.3Ag-0.7Cu	1	92.28
	2	93.39
	3	92.93
	ค่าเฉลี่ย	92.87 ± 0.56
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.25ZnO	1	81.20
	2	79.51
	3	80.85
	ค่าเฉลี่ย	80.52 ± 0.89
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5ZnO	1	73.87
	2	75.57
	3	74.92
	ค่าเฉลี่ย	74.79 ± 0.86
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.75ZnO	1	56.56
	2	57.73
	3	58.07
	ค่าเฉลี่ย	57.45 ± 0.79
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 1.0ZnO	1	50.07
	2	51.17
	3	52.22
	ค่าเฉลี่ย	51.15 ± 1.08
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In	1	78.22
	2	80.90
	3	79.03
	ค่าเฉลี่ย	79.38 ± 1.37
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In	1	83.63
	2	84.29
	3	85.86
	ค่าเฉลี่ย	84.59 ± 1.15
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In	1	87.22
	2	86.73
	3	87.39
	ค่าเฉลี่ย	87.11 ± 0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ผลการวัดค่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	ความสามารถในการพิมพ์ (%)
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.25ZnO	1	80.09
	2	78.15
	3	79.21
	ค่าเฉลี่ย	79.15 ± 0.97
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.5ZnO	1	74.58
	2	77.38
	3	74.63
	ค่าเฉลี่ย	75.53 ± 1.60
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.75ZnO	1	67.73
	2	68.73
	3	66.03
	ค่าเฉลี่ย	67.50 ± 1.37
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-1.0ZnO	1	65.28
	2	65.10
	3	65.80
	ค่าเฉลี่ย	65.39 ± 0.36
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.25ZnO	1	72.64
	2	72.94
	3	72.06
	ค่าเฉลี่ย	72.55 ± 0.45
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.5ZnO	1	71.41
	2	70.24
	3	72.59
	ค่าเฉลี่ย	71.41 ± 1.18
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.75ZnO	1	58.55
	2	60.19
	3	60.65
	ค่าเฉลี่ย	59.80 ± 1.10
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-1.0ZnO	1	56.54
	2	57.65
	3	58.47
	ค่าเฉลี่ย	57.55 ± 0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ผลการวัดค่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชั้นงาน	ความสามารถในการพิมพ์ (%)
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.25ZnO	1	81.07
	2	80.25
	3	79.60
	ค่าเฉลี่ย	80.31 ± 0.74
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.5ZnO	1	67.61
	2	71.77
	3	70.25
	ค่าเฉลี่ย	69.88 ± 2.10
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.75ZnO	1	55.08
	2	57.94
	3	56.48
	ค่าเฉลี่ย	56.50 ± 1.43
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-1.0ZnO	1	47.03
	2	47.79
	3	48.20
	ค่าเฉลี่ย	47.67 ± 0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	ค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
		25°C	150°C
Sn-0.3Ag-0.7Cu	1	13.00	-99.50
	2	11.50	-99.00
	3	12.00	-100.00
	ค่าเฉลี่ย	12.17 ± 0.76	-99.50 ± 0.50
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.25ZnO	1	2.50	-135.50
	2	3.50	-137.50
	3	5.00	-136.50
	ค่าเฉลี่ย	3.67 ± 1.26	-136.50 ± 1.00
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5ZnO	1	-2.00	-81.00
	2	-3.00	-84.00
	3	-4.00	-81.00
	ค่าเฉลี่ย	-3.0 ± 1.00	-82.00 ± 1.73
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.75ZnO	1	-10.50	-51.00
	2	-8.50	-50.50
	3	-8.00	-50.50
	ค่าเฉลี่ย	-9.0 ± 1.32	-50.67 ± 0.29
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 1.0ZnO	1	-27.00	-27.50
	2	-27.50	-28.50
	3	-24.50	-27.00
	ค่าเฉลี่ย	-26.33 ± 1.61	-27.67 ± 0.76
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In	1	7.50	-137.00
	2	6.00	-136.50
	3	8.50	-138.00
	ค่าเฉลี่ย	7.33 ± 1.26	-136.17 ± 0.76
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In	1	-3.00	-151.50
	2	-3.50	-150.50
	3	-1.50	-151.00
	ค่าเฉลี่ย	-2.67 ± 1.04	-151.0 ± 0.50
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In	1	-10.50	-164.00
	2	-9.00	-164.50
	3	-12.50	-167.00
	ค่าเฉลี่ย	-10.67 ± 1.76	-165.17 ± 1.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C (ต่อ)

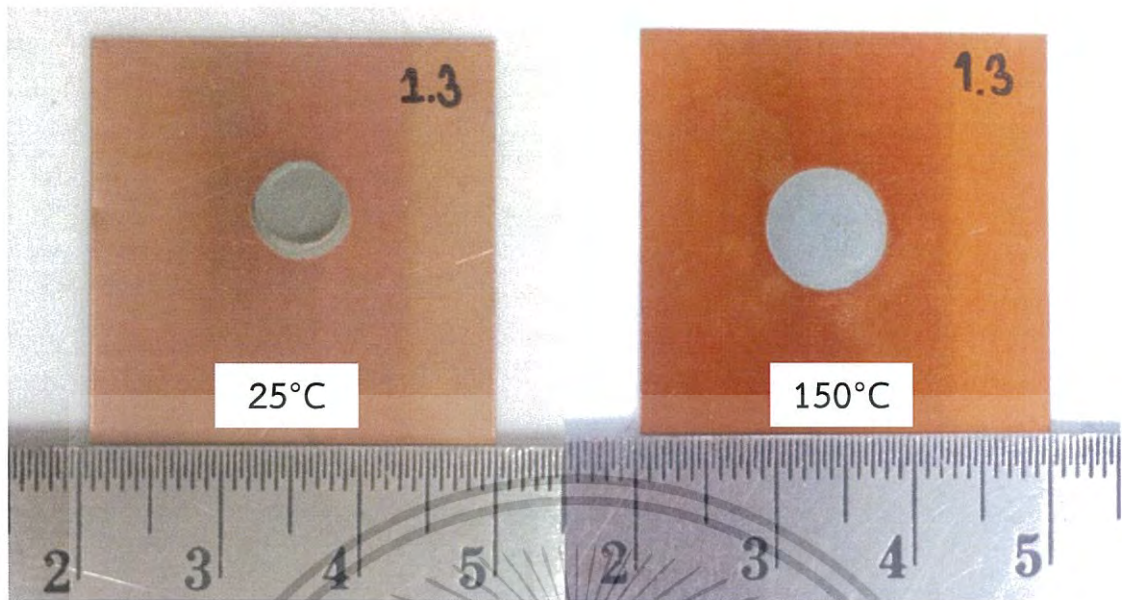
โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	ค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
		25°C	150°C
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.25ZnO	1	-8.00	-51.00
	2	-8.00	-52.50
	3	-8.50	-53.00
	ค่าเฉลี่ย	-8.17 ± 0.29	-52.17 ± 1.04
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.5ZnO	1	-2.50	-37.00
	2	-1.00	-37.50
	3	-3.00	-37.00
	ค่าเฉลี่ย	-2.17 ± 1.04	-37.17 ± 0.29
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-0.75ZnO	1	-22.50	-36.50
	2	-25.00	-36.00
	3	-23.00	-34.50
	ค่าเฉลี่ย	-23.50 ± 1.32	-35.67 ± 1.04
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.1In-1.0ZnO	1	-3.50	-27.50
	2	-3.00	-28.00
	3	-4.00	-27.00
	ค่าเฉลี่ย	-3.50 ± 0.50	-27.50 ± 0.50
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.25ZnO	1	-8.00	-7.50
	2	-7.50	-8.50
	3	-10.50	-4.00
	ค่าเฉลี่ย	-8.67 ± 1.61	-6.67 ± 2.36
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.5ZnO	1	-3.50	-57.00
	2	-3.50	-55.50
	3	-1.50	-55.00
	ค่าเฉลี่ย	-2.83 ± 1.15	-55.83 ± 1.04
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-0.75ZnO	1	-13.00	-22.50
	2	-11.50	-22.50
	3	-12.50	-23.00
	ค่าเฉลี่ย	-12.33 ± 0.76	-22.67 ± 0.29
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.3In-1.0ZnO	1	-17.00	-25.50
	2	-18.00	-23.00
	3	-18.00	-22.00
	ค่าเฉลี่ย	-17.67 ± 0.58	-23.50 ± 1.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

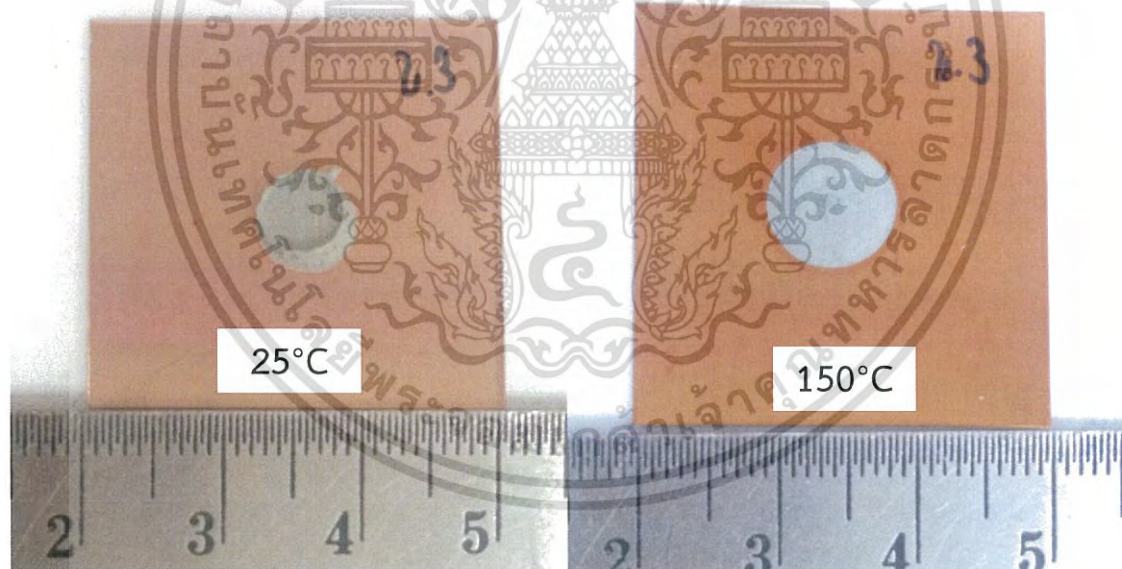
ตารางที่ ข.1 ผลการวัดค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C (ต่อ)

โลหะบัดกรี	ชิ้นงาน	ค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
		25°C	150°C
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.25ZnO	1	-23.00	-6.00
	2	-22.50	-7.00
	3	-24.00	-6.00
	ค่าเฉลี่ย	-23.17 ± 0.76	-6.33 ± 0.58
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.5ZnO	1	-1.00	-37.00
	2	-1.50	-37.00
	3	-3.00	-35.50
	ค่าเฉลี่ย	-1.83 ± 1.04	-36.5 ± 0.87
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-0.75ZnO	1	-17.50	-32.00
	2	-18.00	-32.00
	3	-15.00	-30.00
	ค่าเฉลี่ย	-16.83 ± 1.61	-31.33 ± 1.15
Sn-0.3Ag-0.7Cu- 0.5In-1.0ZnO	1	-10.00	-3.00
	2	-13.00	-5.50
	3	-11.50	-6.50
	ค่าเฉลี่ย	-11.50 ± 1.50	-5.0 ± 1.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

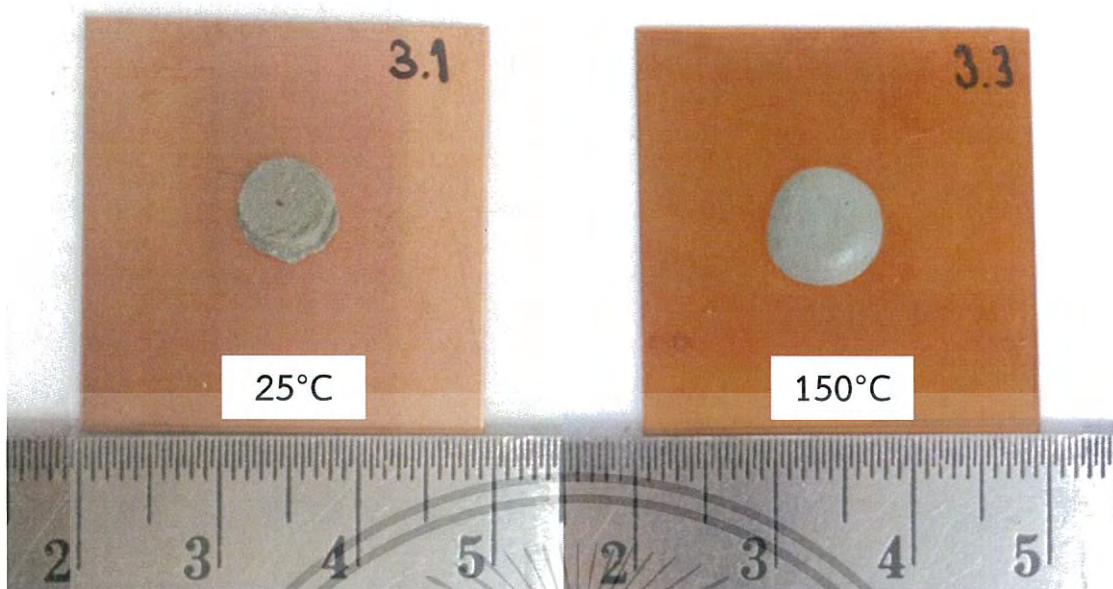


รูปที่ ข.1 การทดสอบของโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-0.3Ag-0.7Cu ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

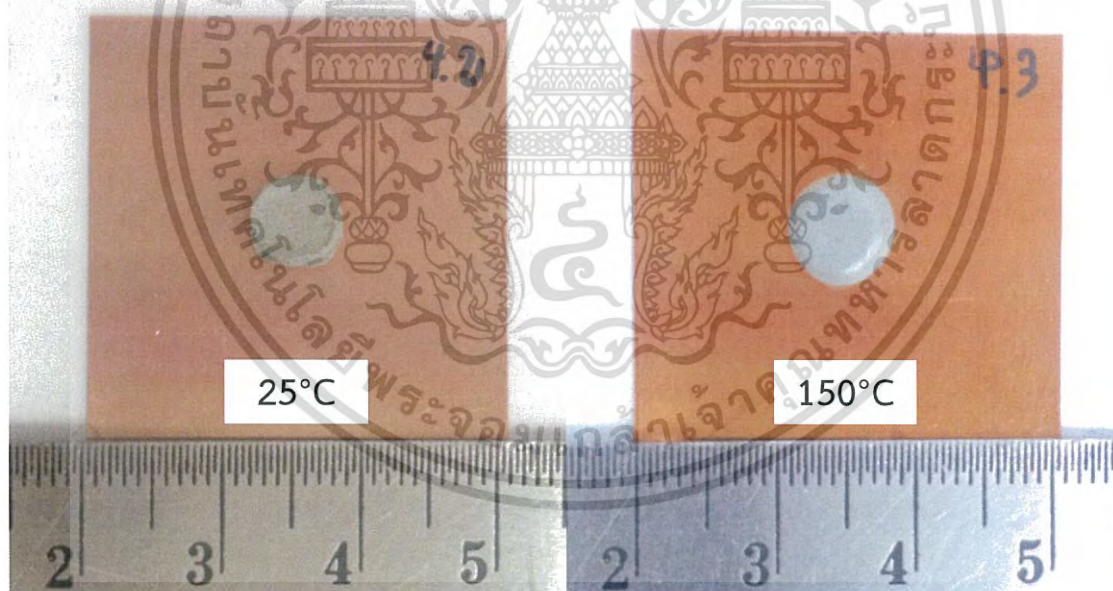


รูปที่ ข.2 การทดสอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.25ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

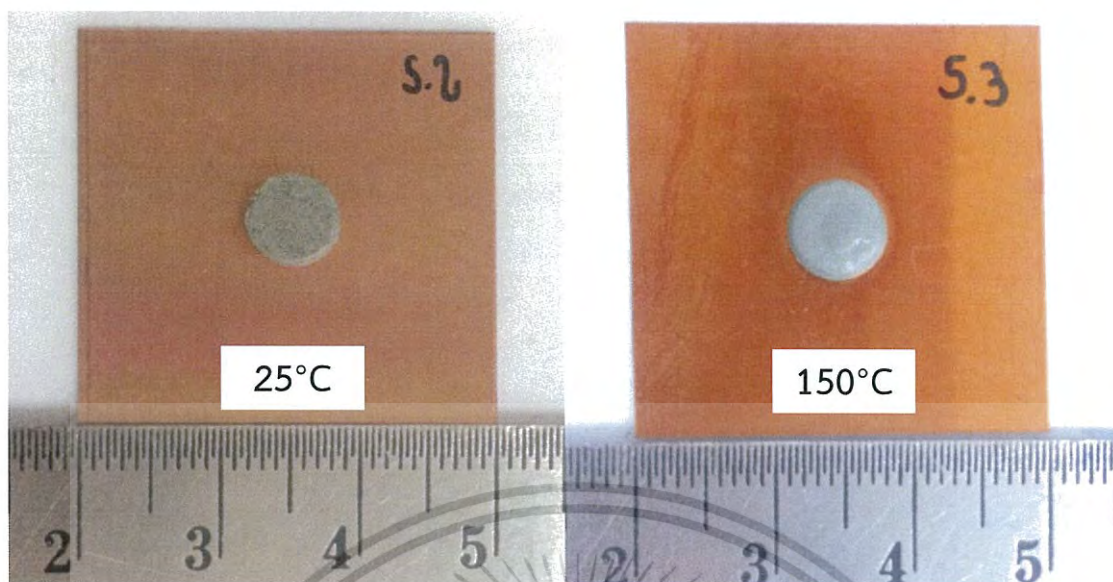


รูปที่ ข.3 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

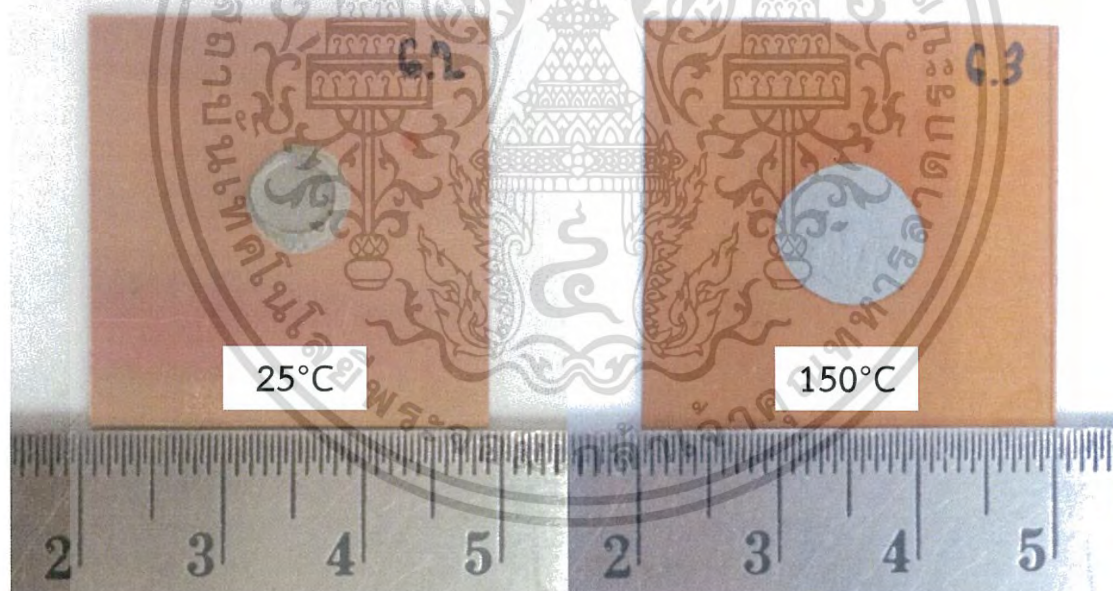


รูปที่ ข.4 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.75ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

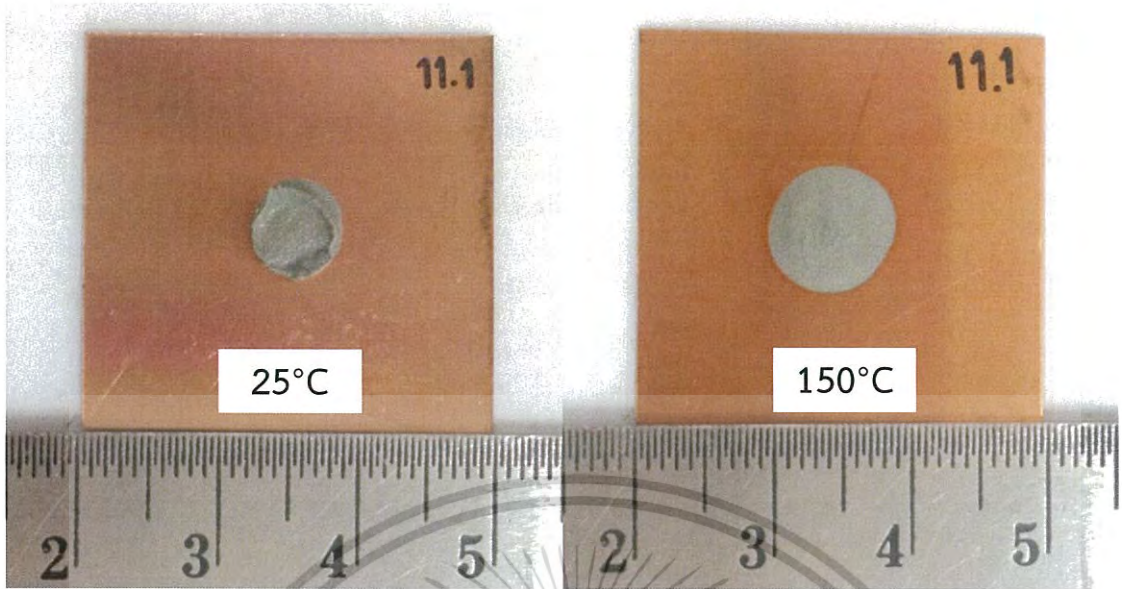


รูปที่ ข.5 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

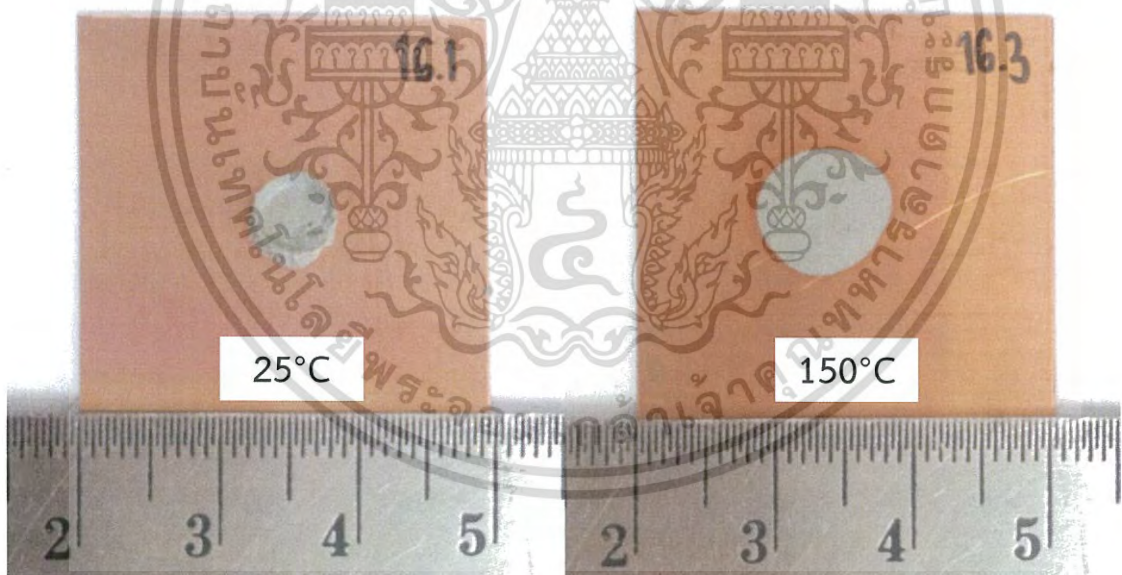


รูปที่ ข.6 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

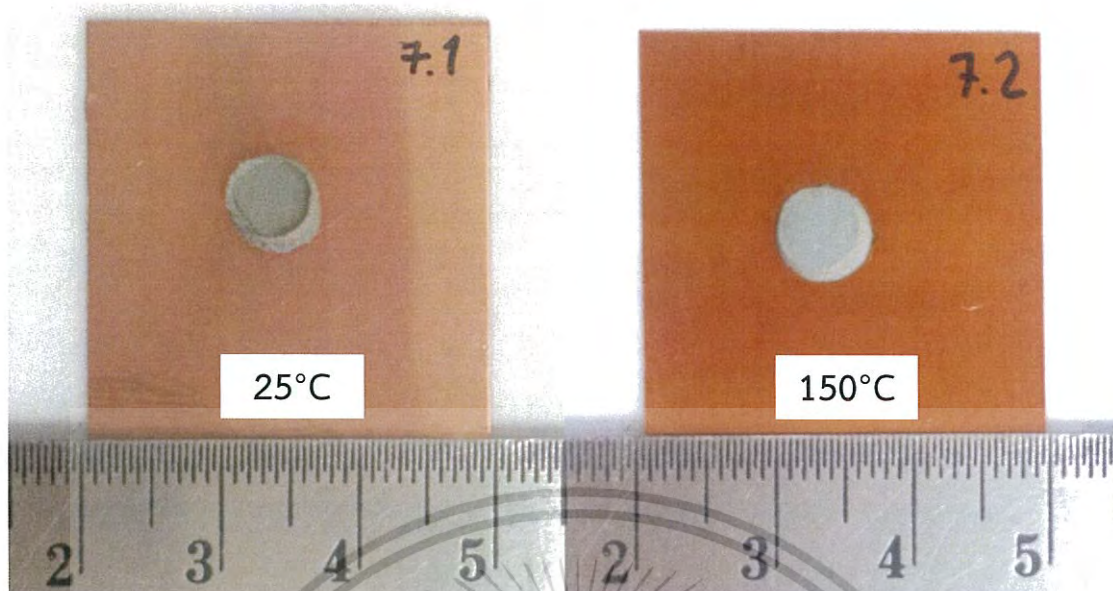


รูปที่ ข.7 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

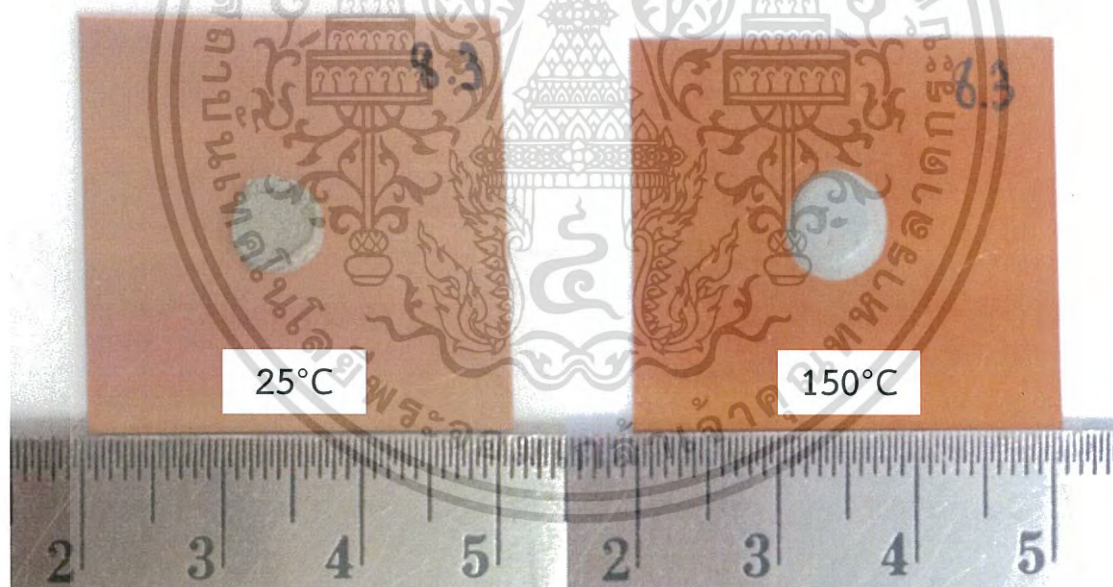


รูปที่ ข.8 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

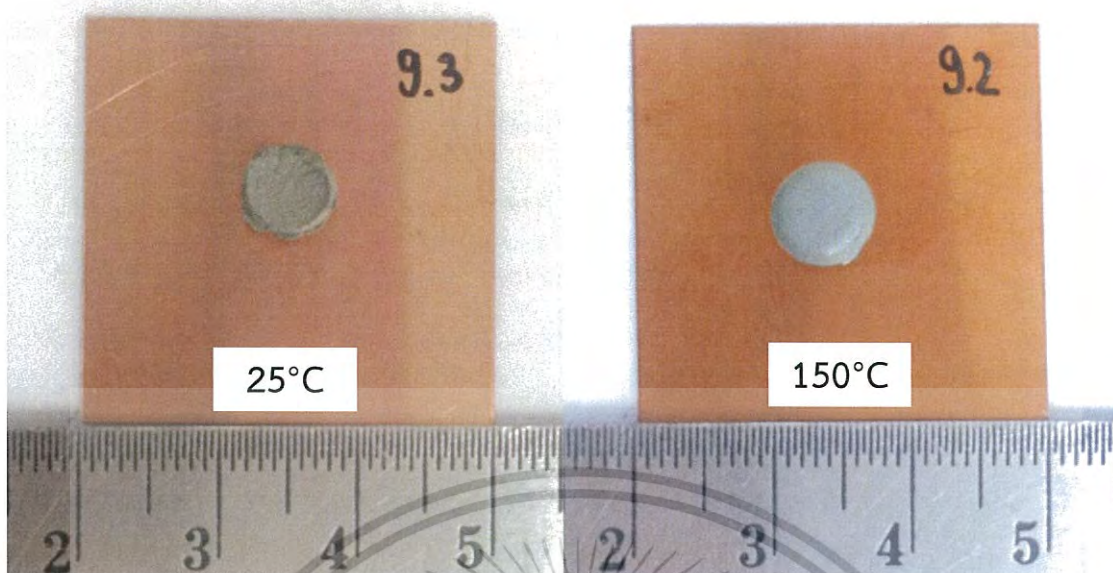


รูปที่ ข.9 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

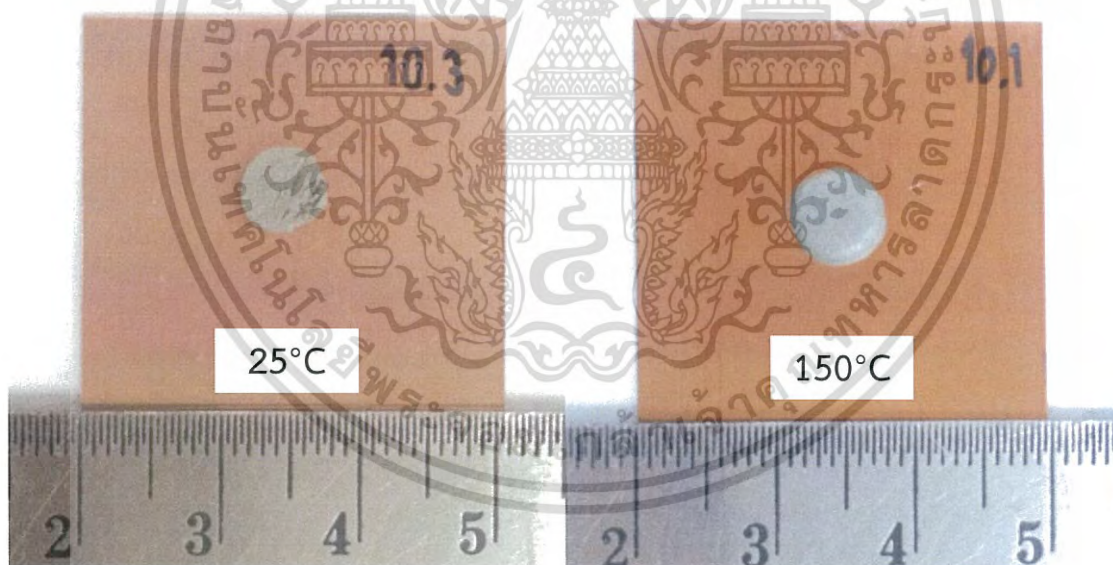


รูปที่ ข.10 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.5ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

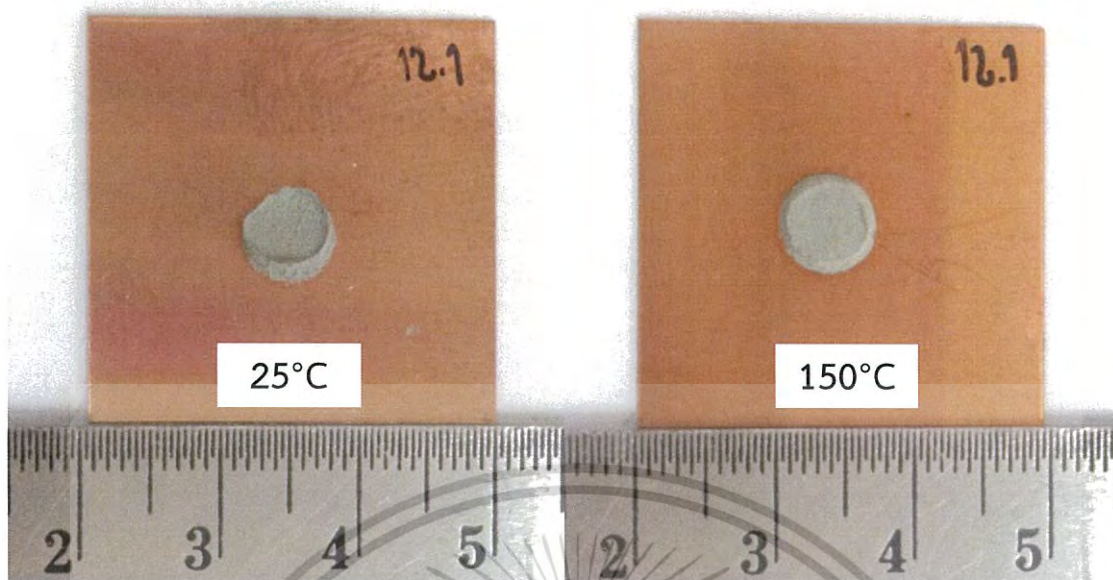


รูปที่ ข.11 การทดสอบตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

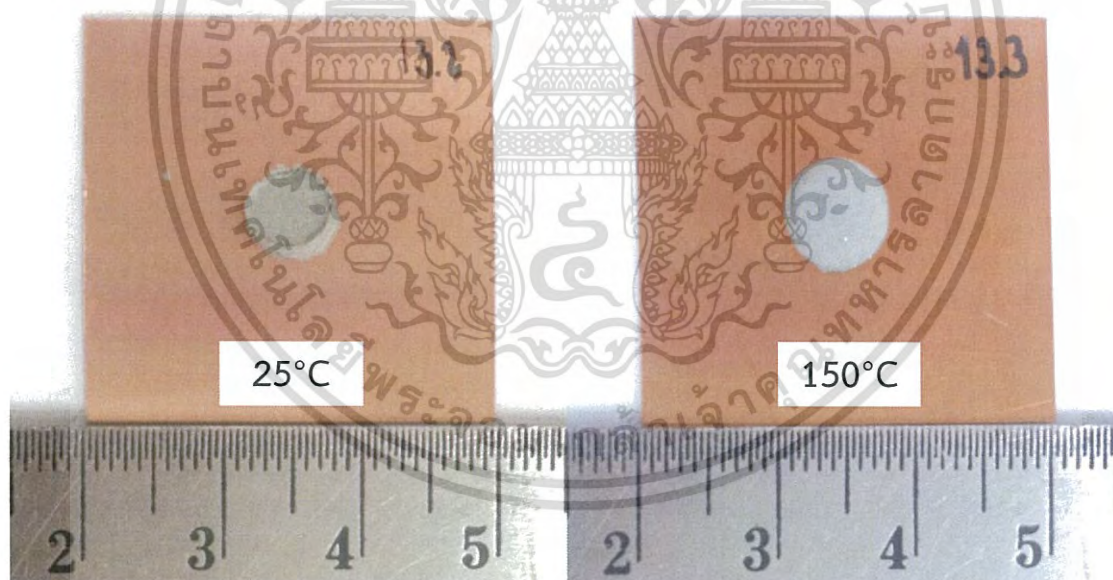


รูปที่ ข.12 การทดสอบตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.0ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

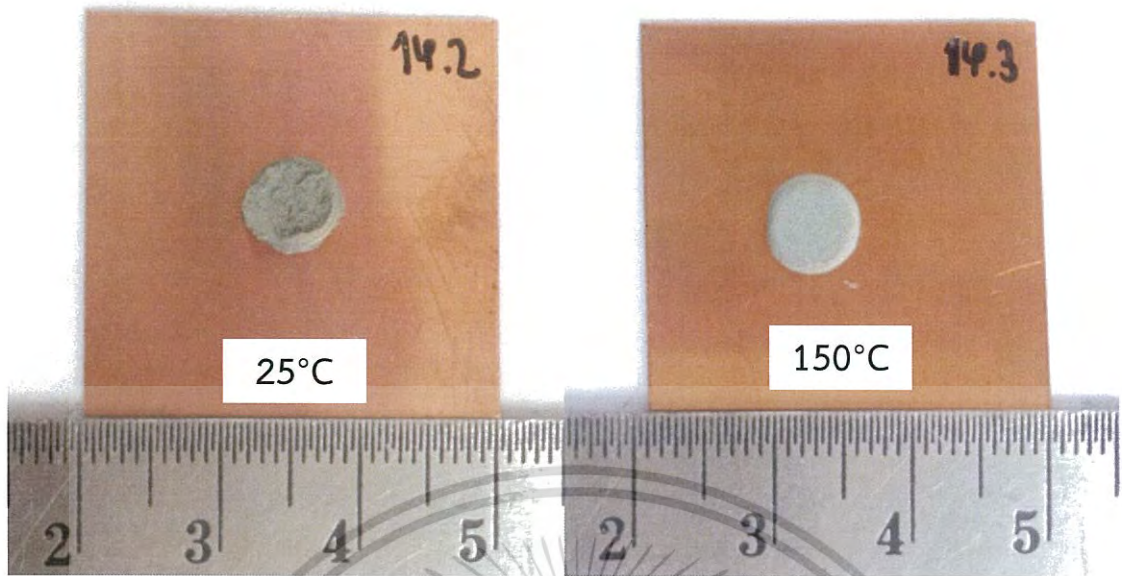


รูปที่ ข.13 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

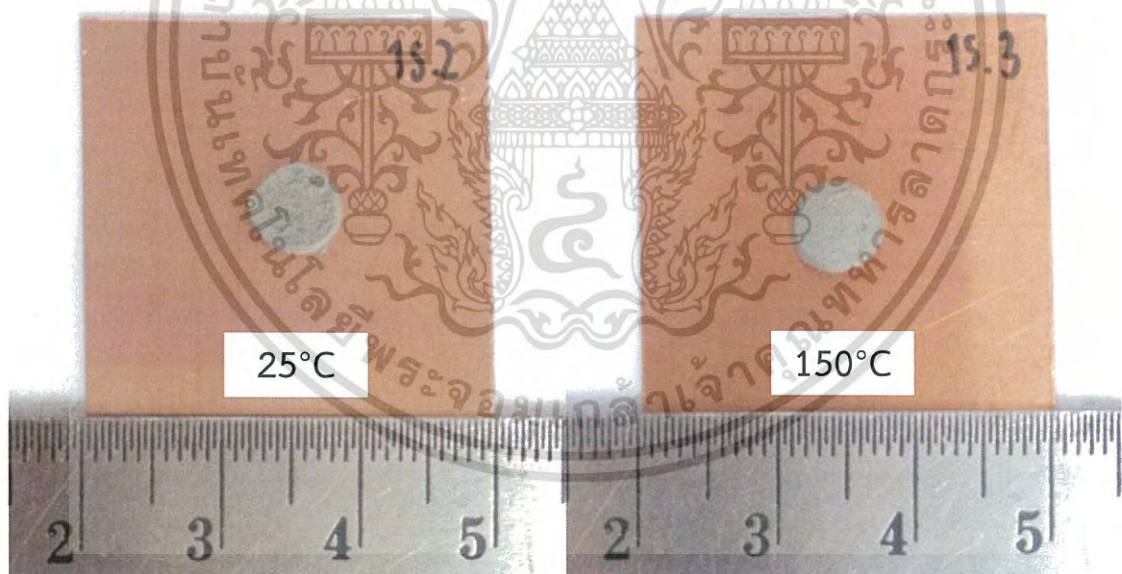


รูปที่ ข.14 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.5ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

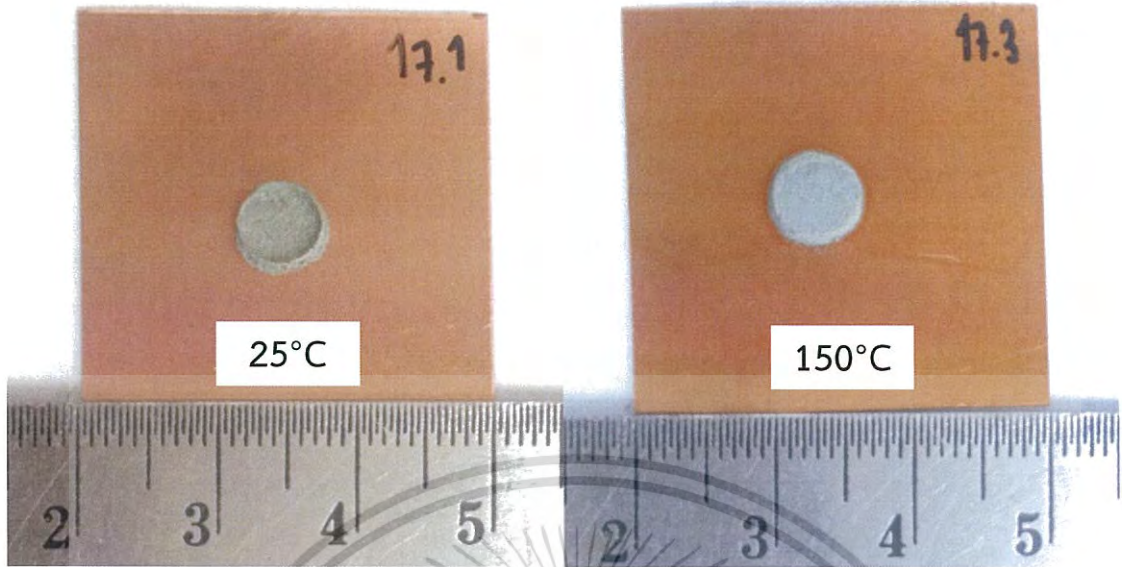


รูปที่ ข.15 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ



รูปที่ ข.16 การทรุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.0ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

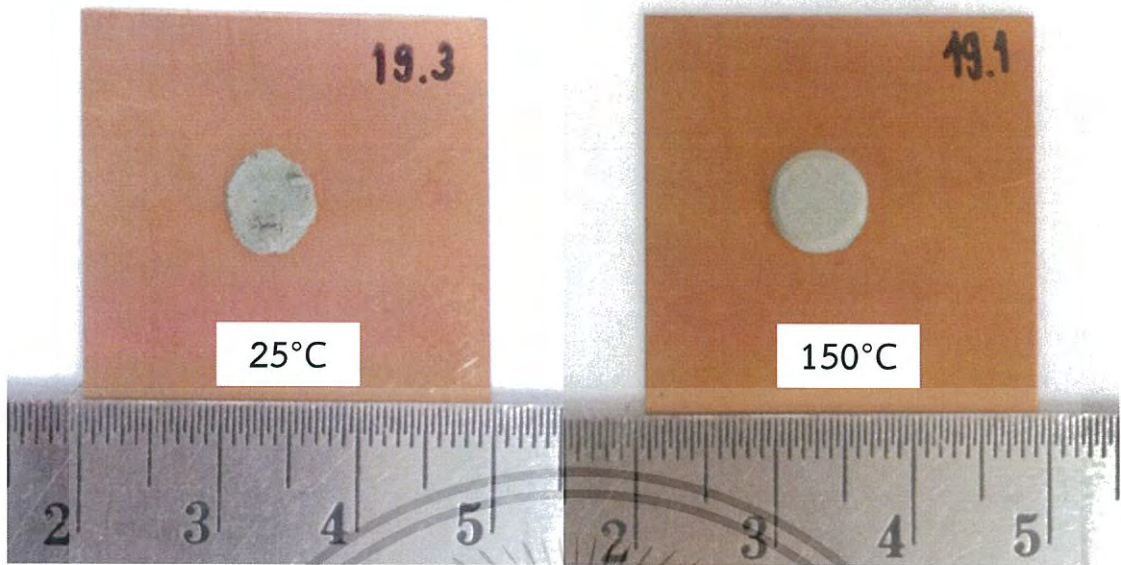


รูปที่ ข.17 การทรมัดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ



รูปที่ ข.18 การทรมัดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.5ZnO ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 การหดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO ที่ อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ



รูปที่ ข.20 การหดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.0ZnO ที่ อุณหภูมิ 25 และ 150°C ตามลำดับ

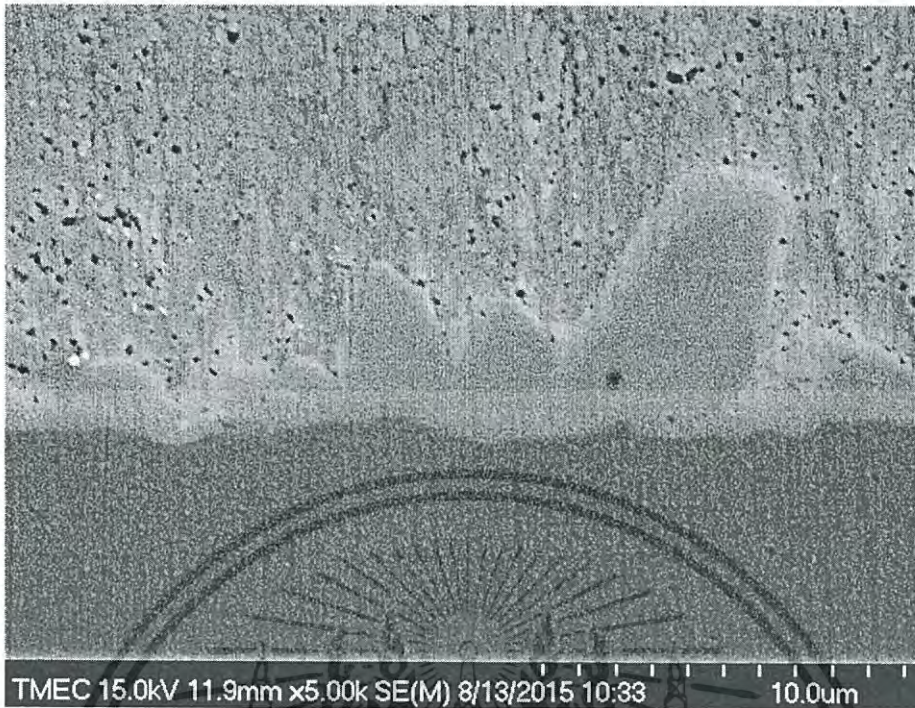
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ข

### การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย FE-SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

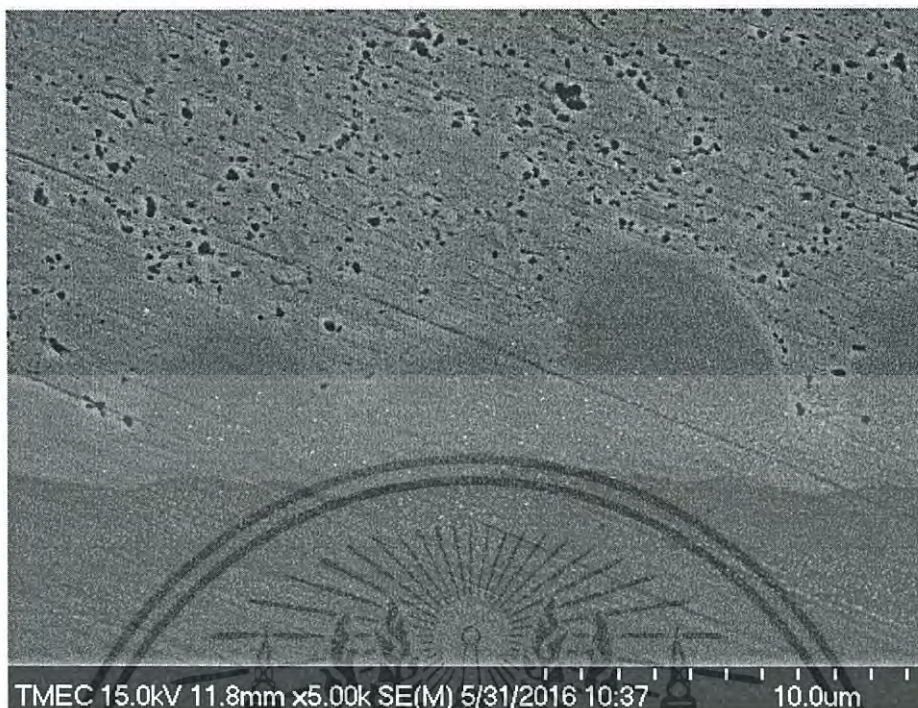


รูปที่ ซ.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี



รูปที่ ซ.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.25ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

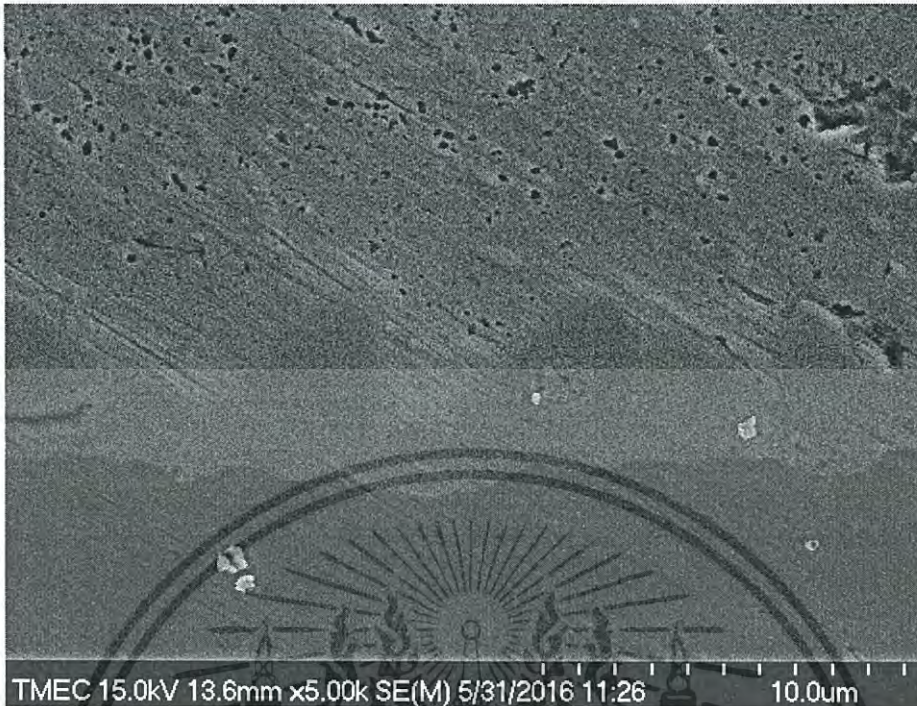


รูปที่ ข.3 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี



รูปที่ ข.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.75ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

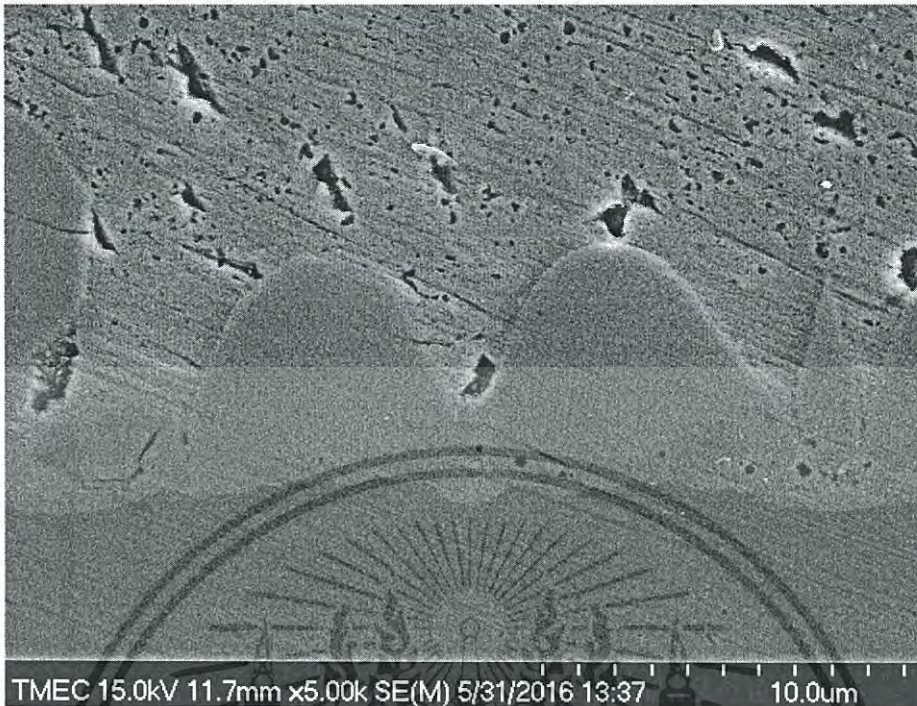


รูปที่ ซ.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

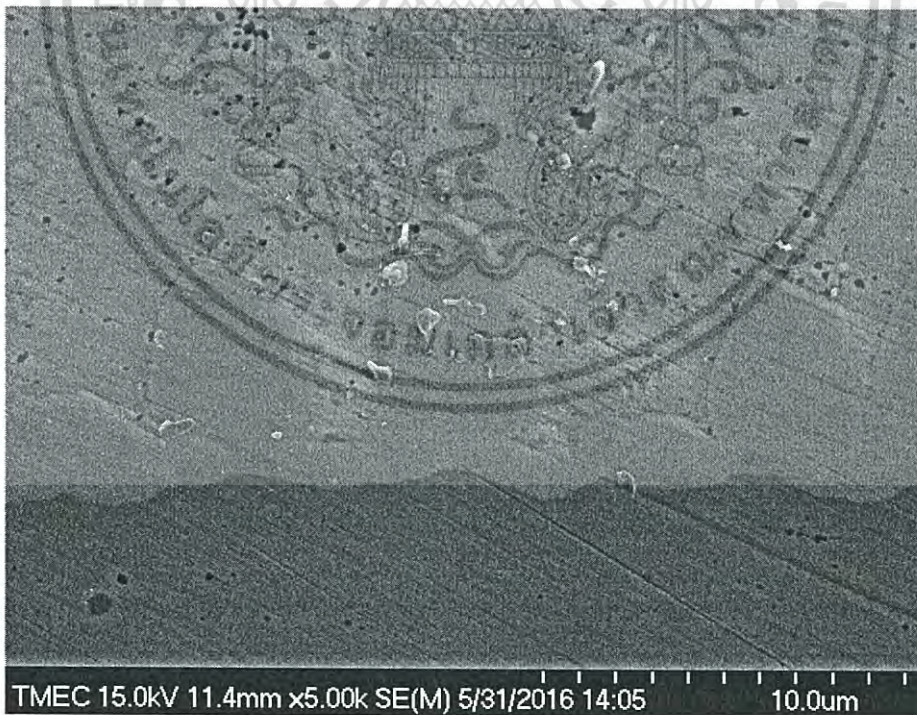


รูปที่ ซ.6 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ซ.7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In กับแผ่นรองทองแดง หลังการบัดกรี

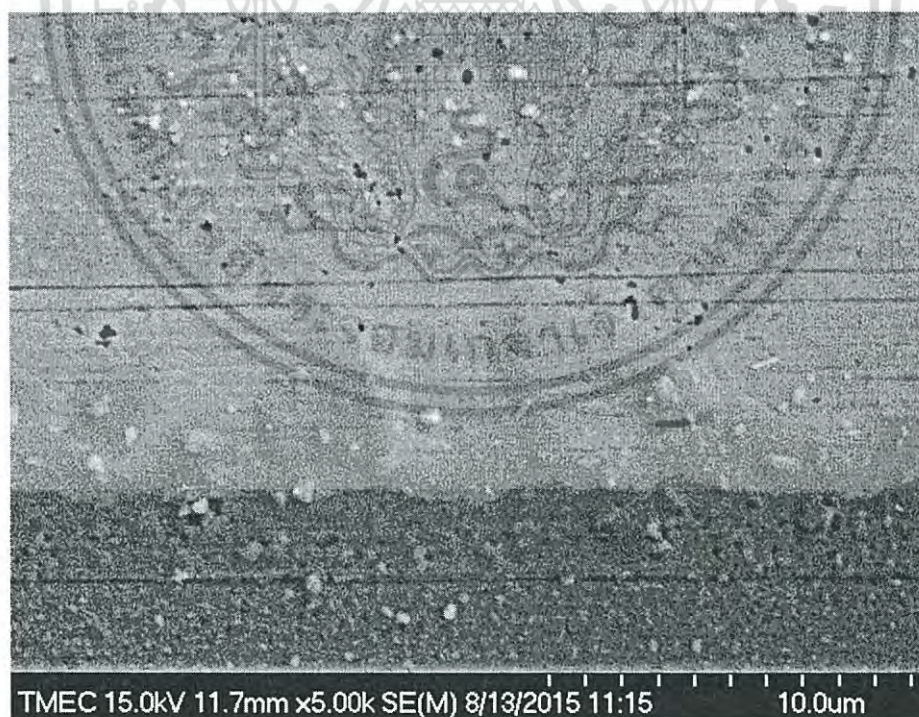


รูปที่ ซ.8 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In กับแผ่นรองทองแดง หลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

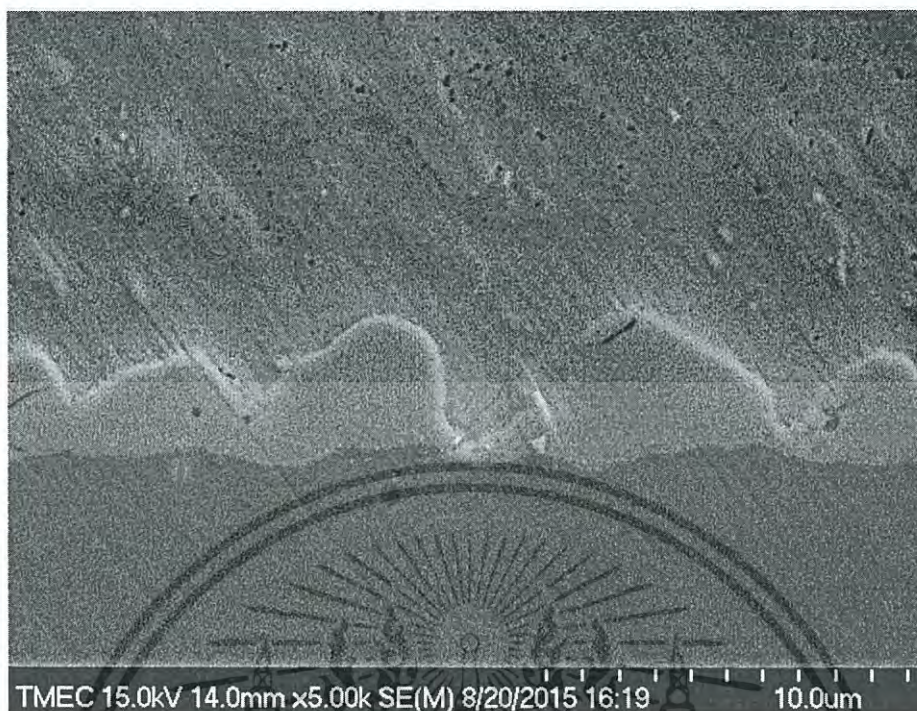


รูปที่ ซ.9 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

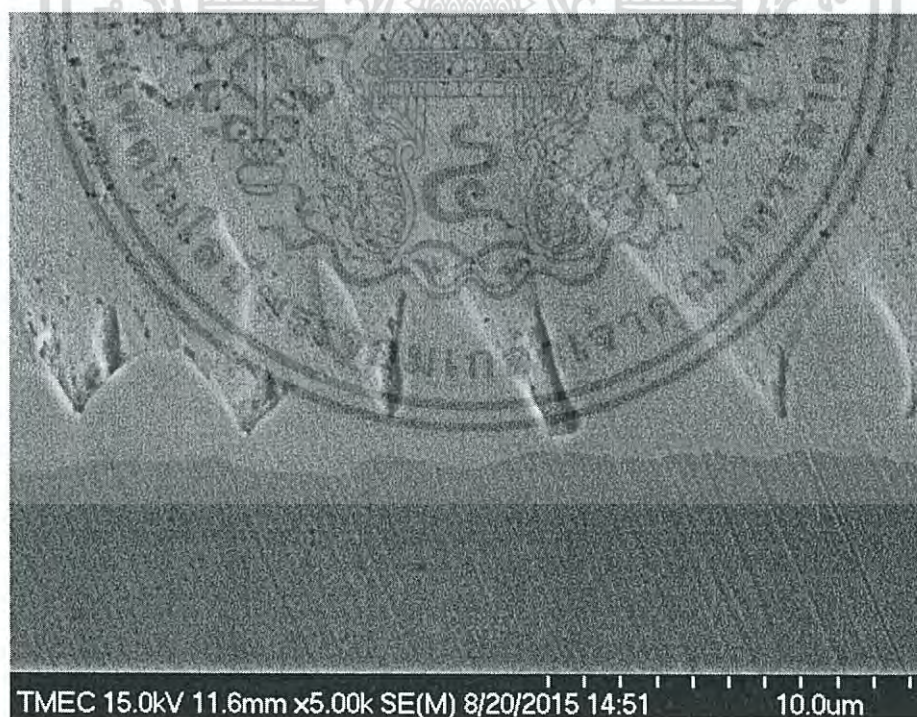


รูปที่ ซ.10 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.5ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี



รูปที่ ข.12 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.0ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

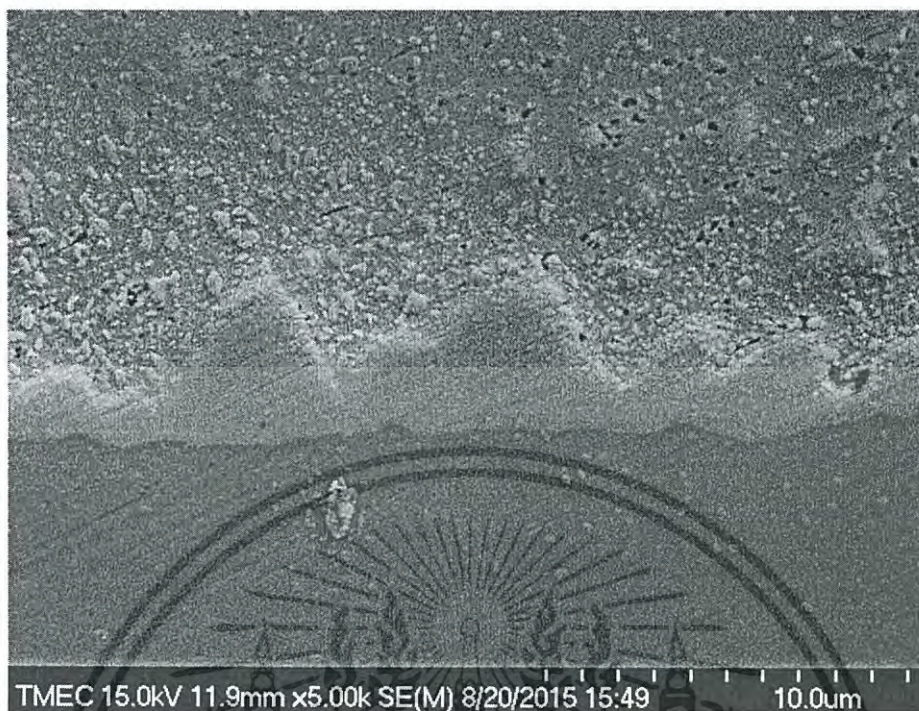


รูปที่ ซ.13 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

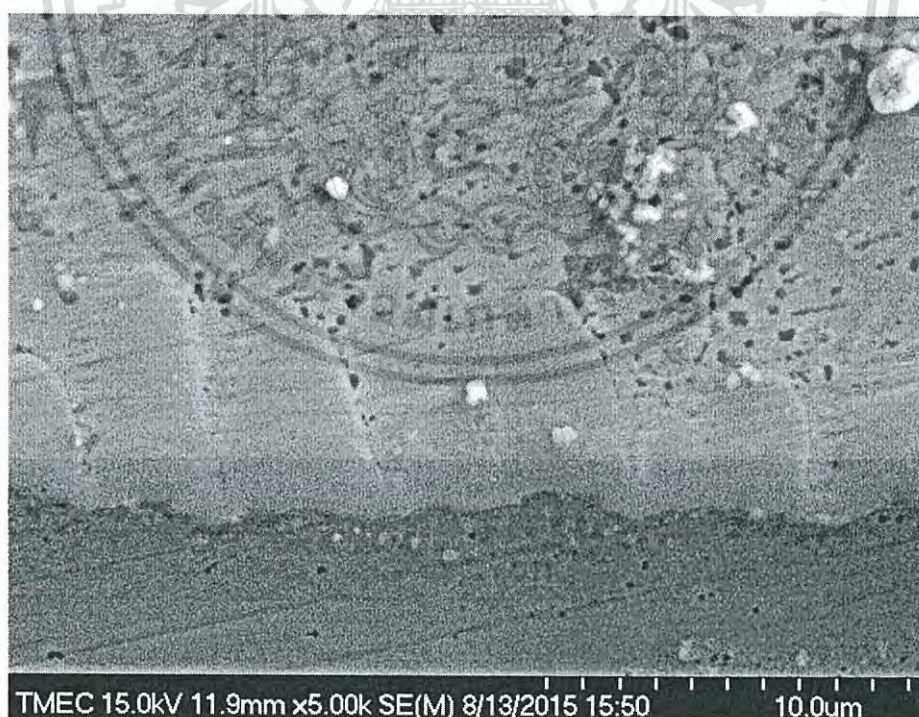


รูปที่ ซ.14 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.5ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

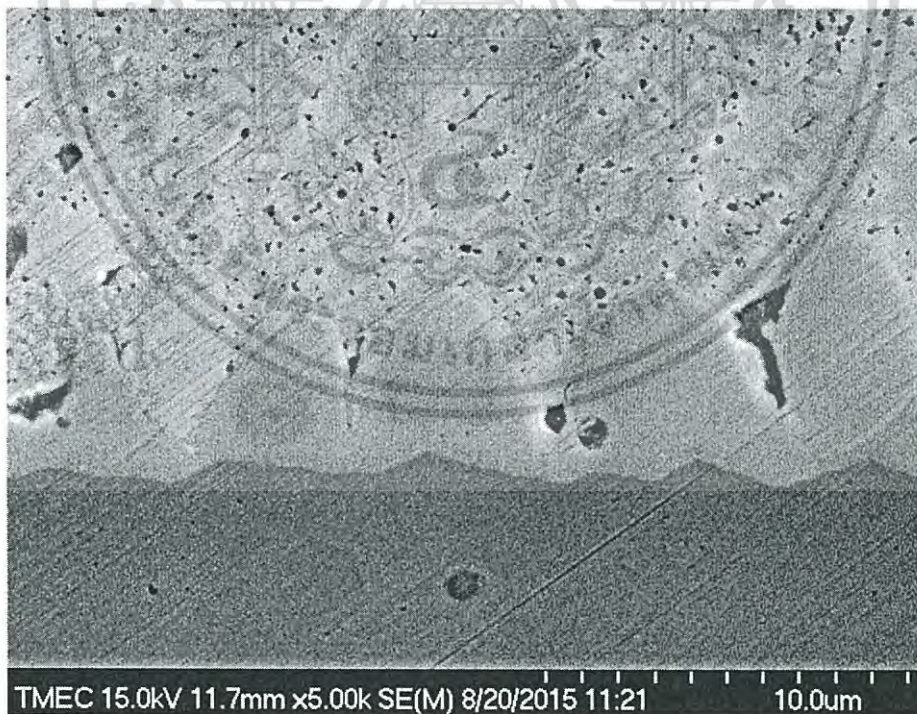


รูปที่ ข.16 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.0ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ซ.17 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี



รูปที่ ซ.18 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.5ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙.19 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี



รูปที่ ๙.20 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.0ZnO กับแผ่นรองทองแดงหลังการบัดกรี

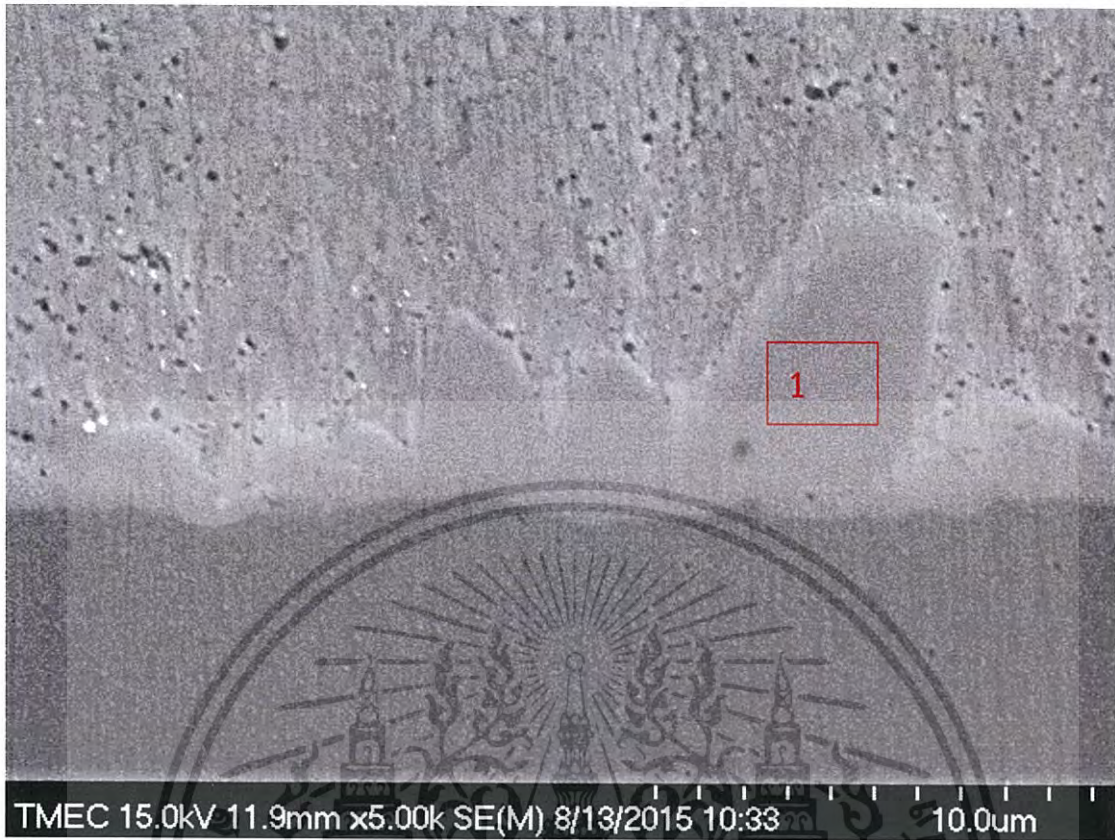
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



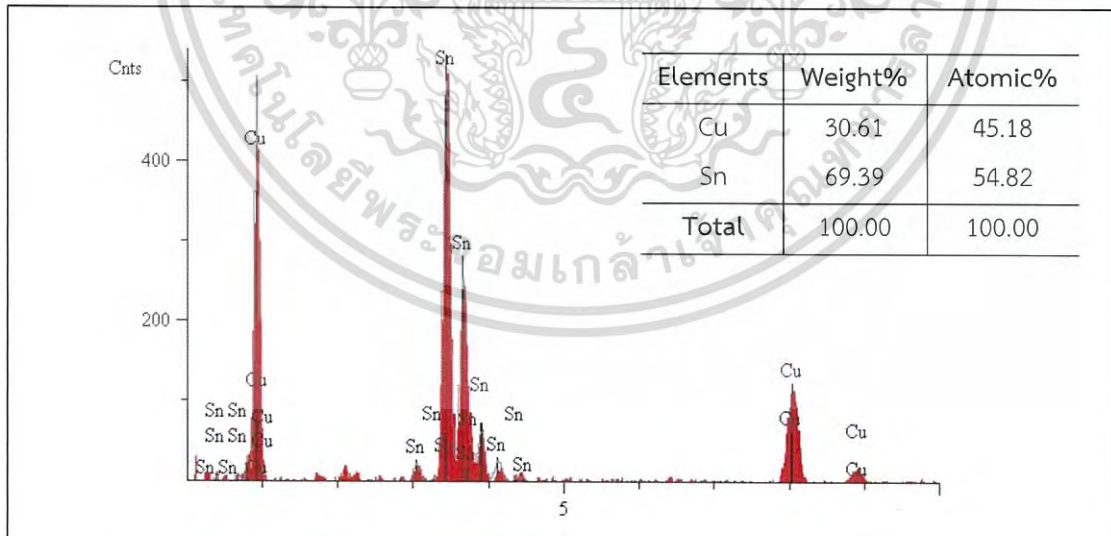
ภาควิชา ฅ

ปริมาณธาตุผสมในโลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.1 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu

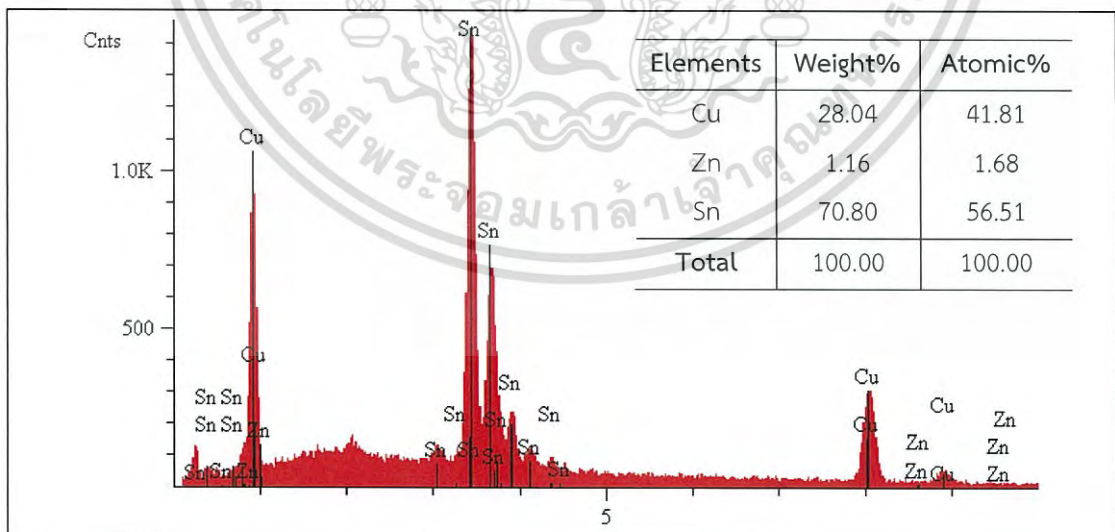


รูปที่ ฌ.2 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฅ.3 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.25ZnO

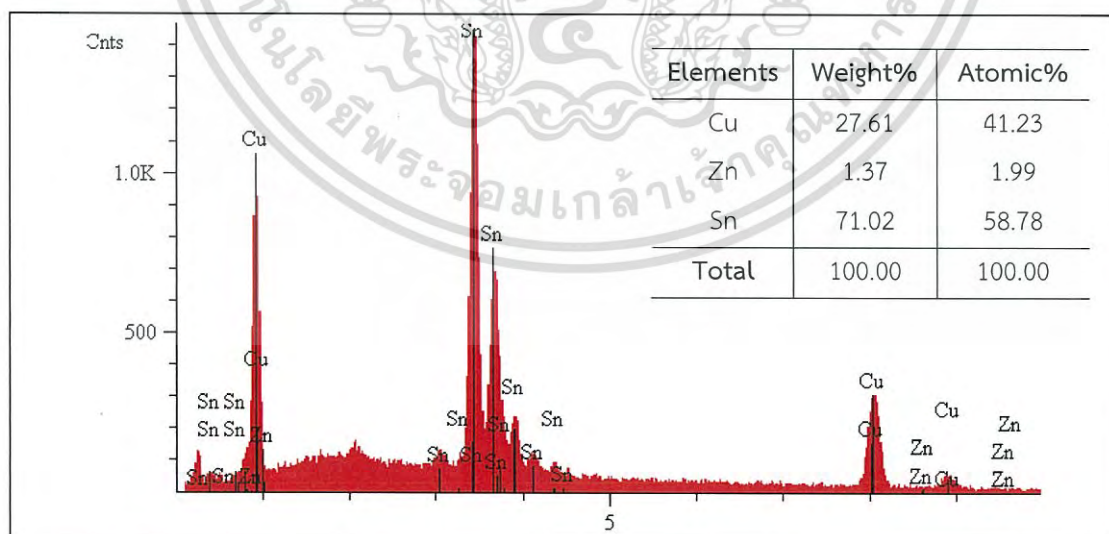


รูปที่ ฅ.4 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.25ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฅ.5 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5ZnO

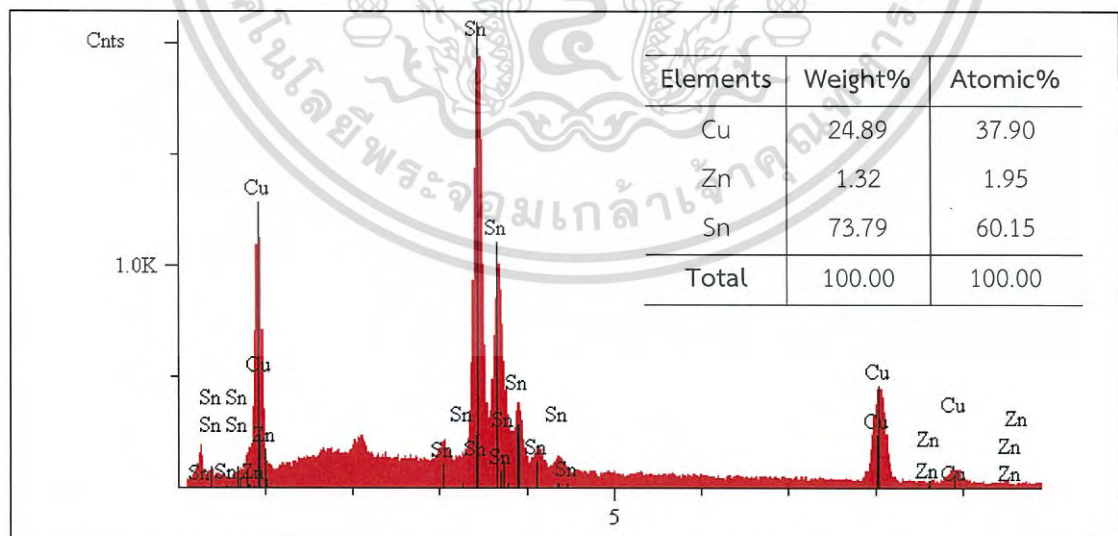


รูปที่ ฅ.6 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฅ.7 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.75ZnO

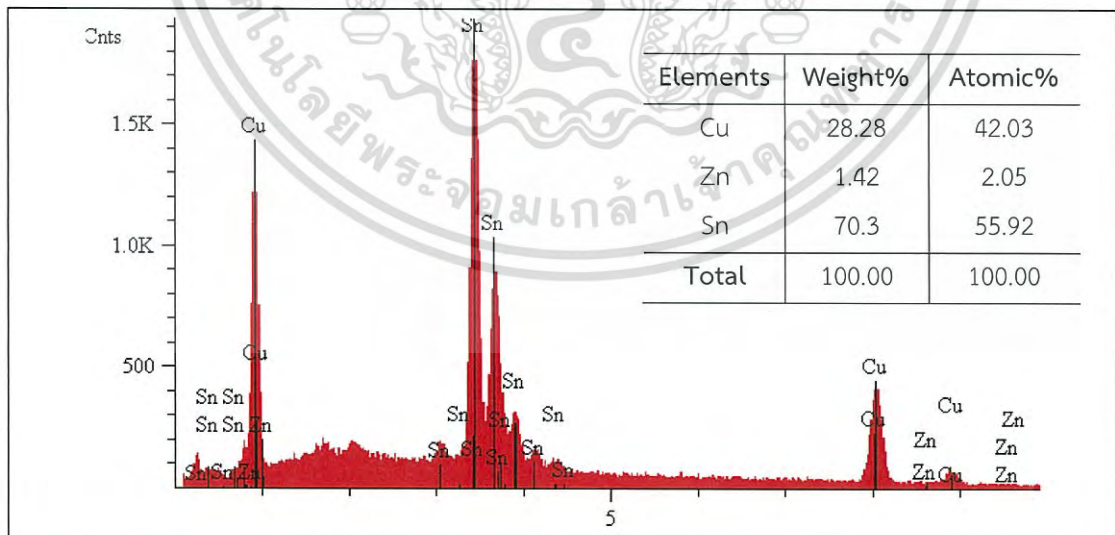


รูปที่ ฅ.8 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.75ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๘.9 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0ZnO

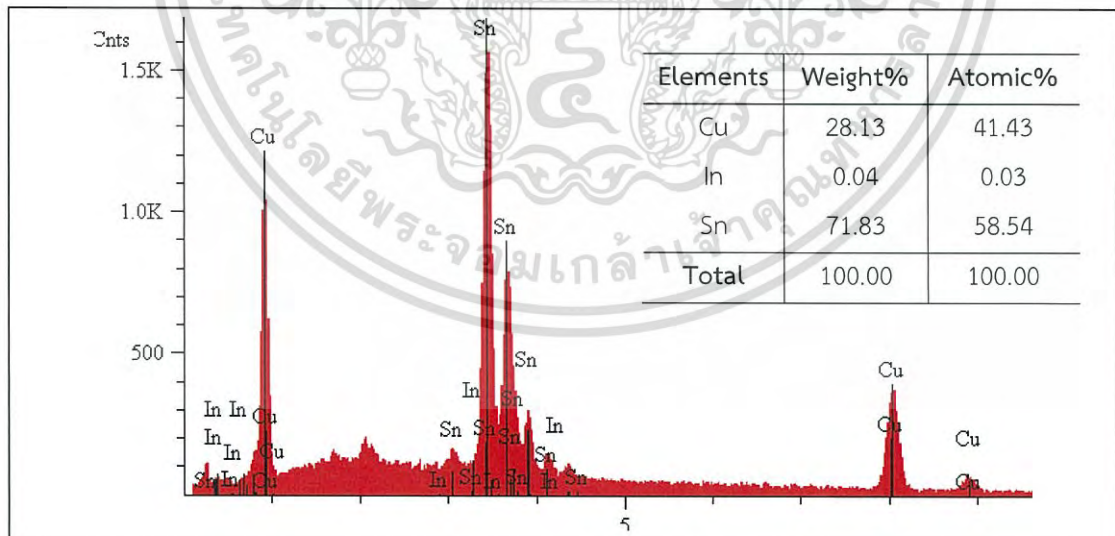


รูปที่ ๘.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-1.0ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฅ.11 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In

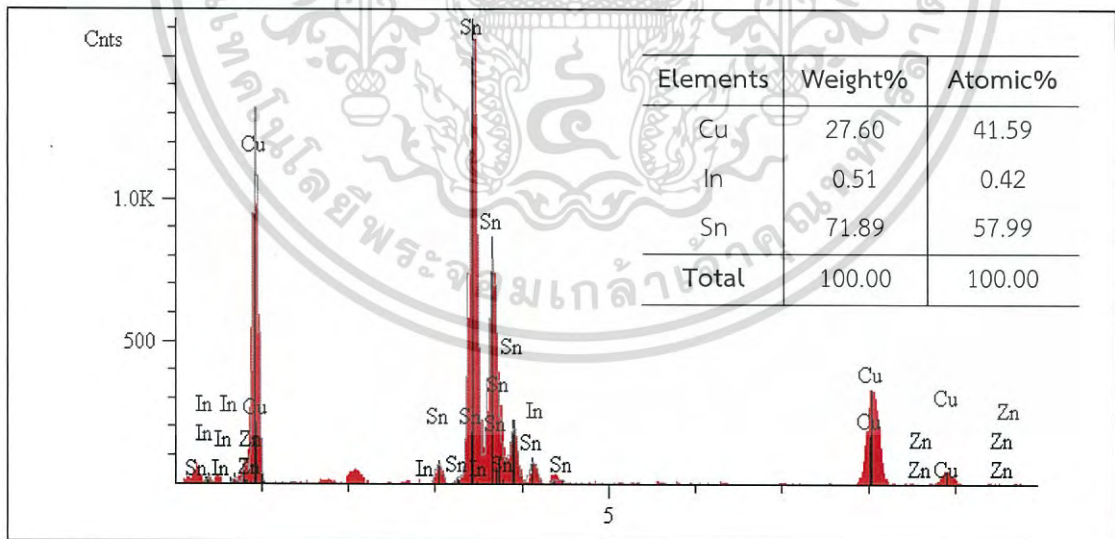


รูปที่ ฅ.12 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.13 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In

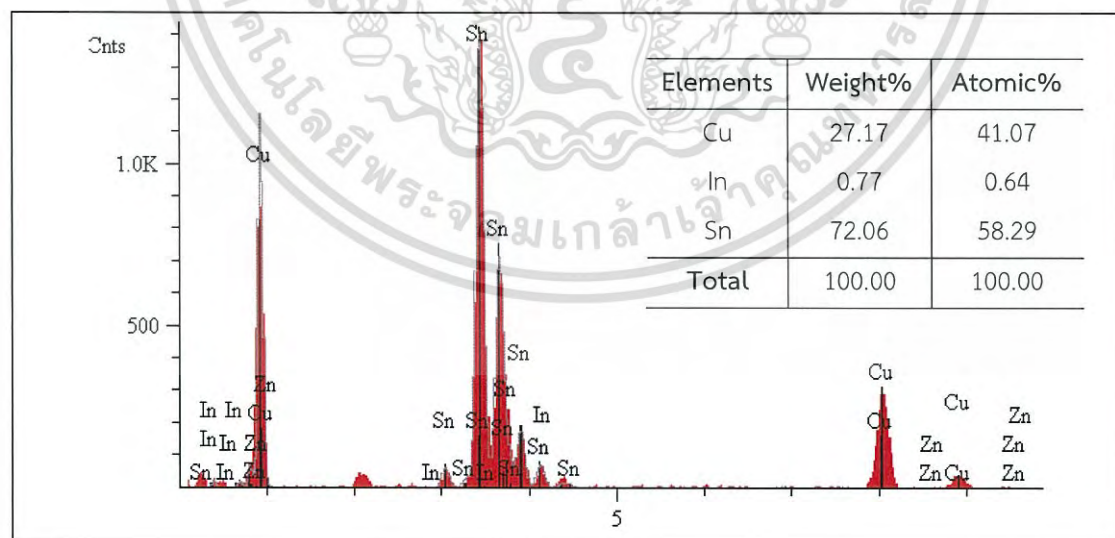


รูปที่ ฌ.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.15 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In

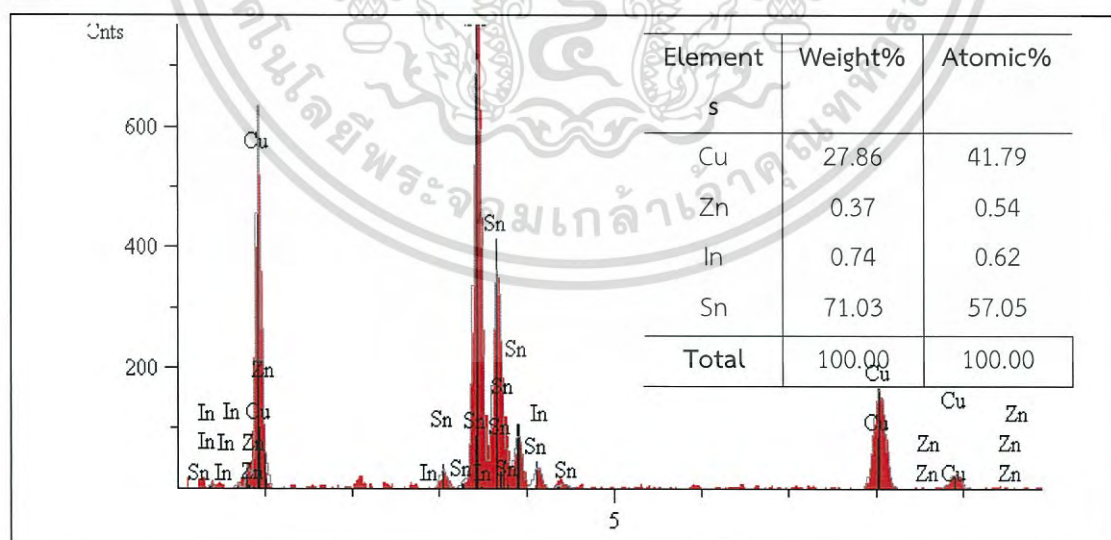


รูปที่ ฌ.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๗.17 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO

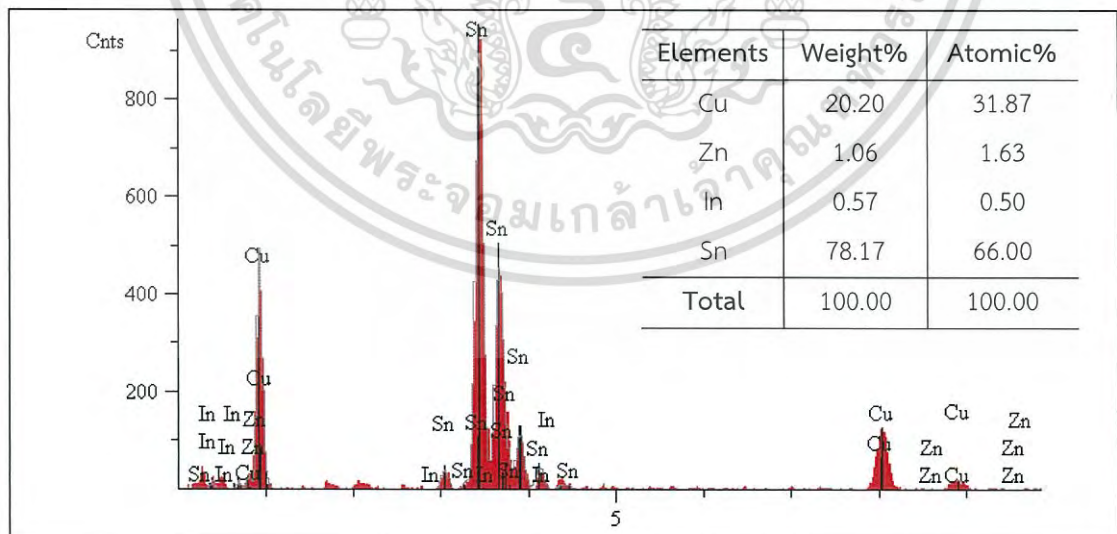


รูปที่ ๑๗.18 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.25ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.19 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In 0.5ZnO

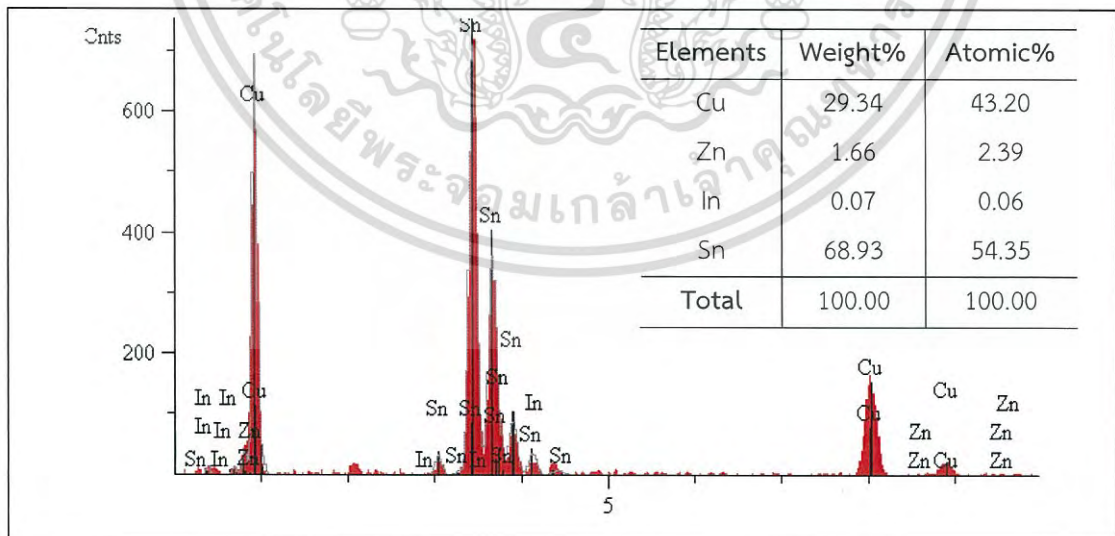


รูปที่ ฌ.20 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.5ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

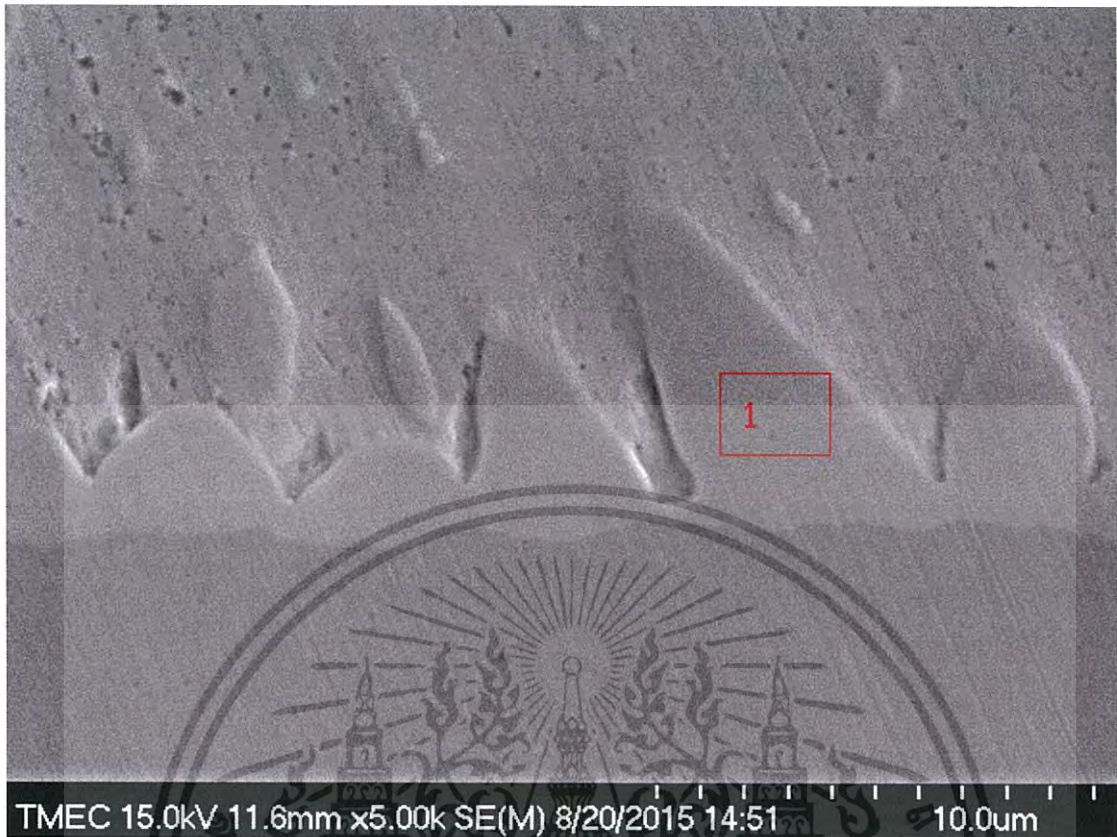


รูปที่ ฌ.21 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO

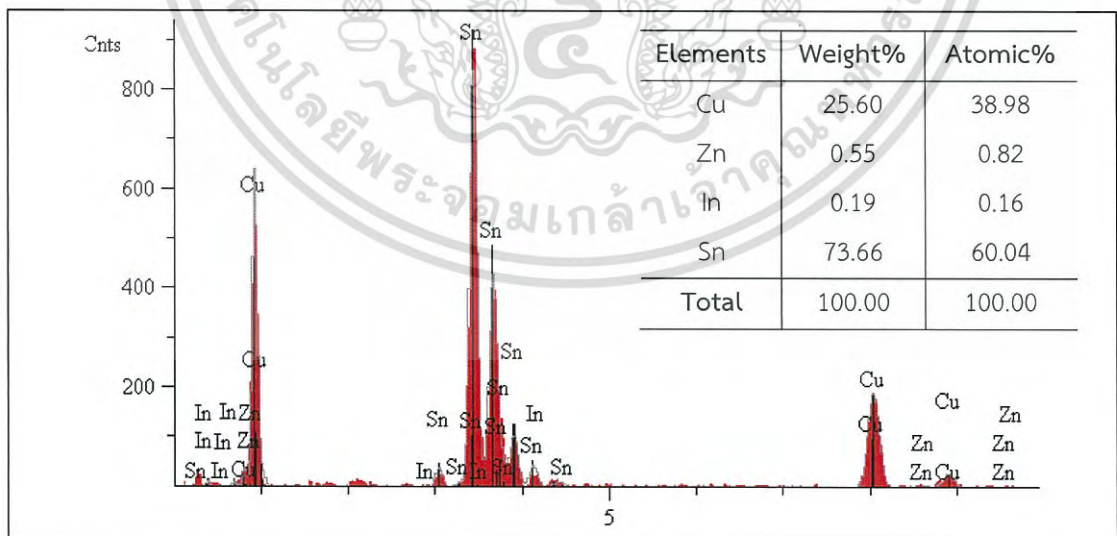


รูปที่ ฌ.22 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-0.75ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ.23 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.0ZnO

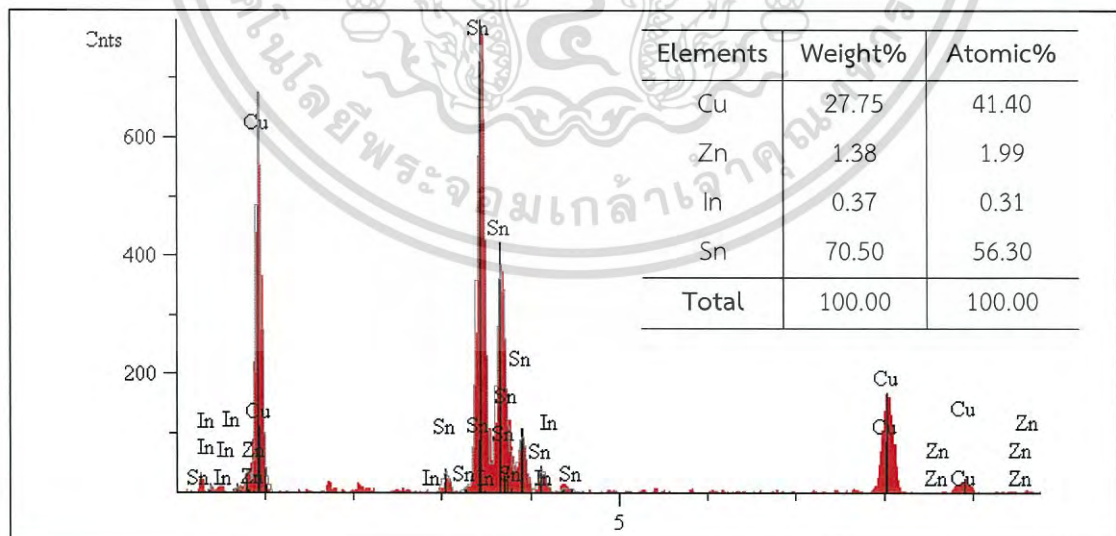


รูปที่ ฌ.24 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.1In-1.0ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.25 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO

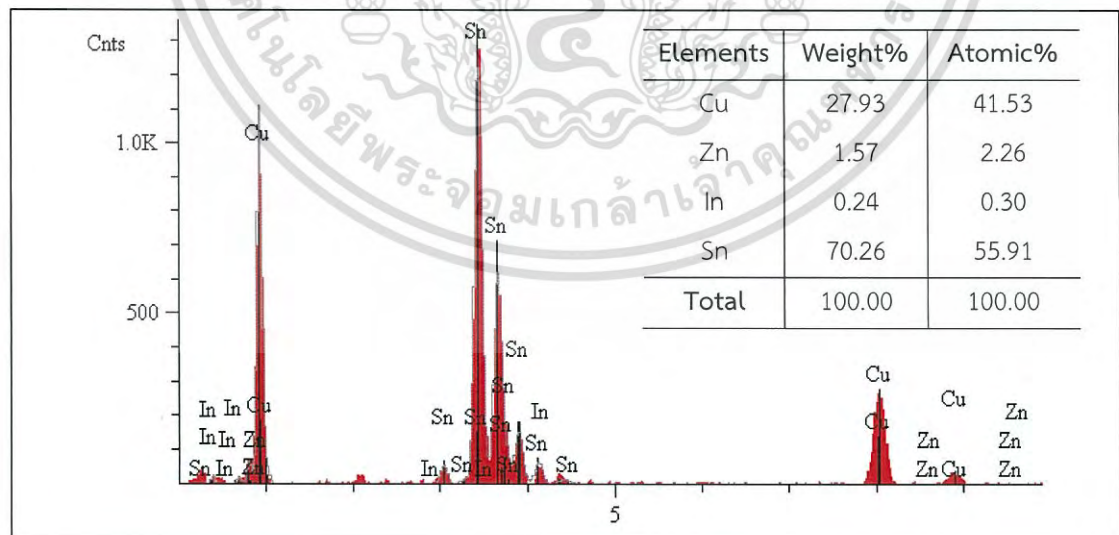


รูปที่ ๓.26 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.25ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

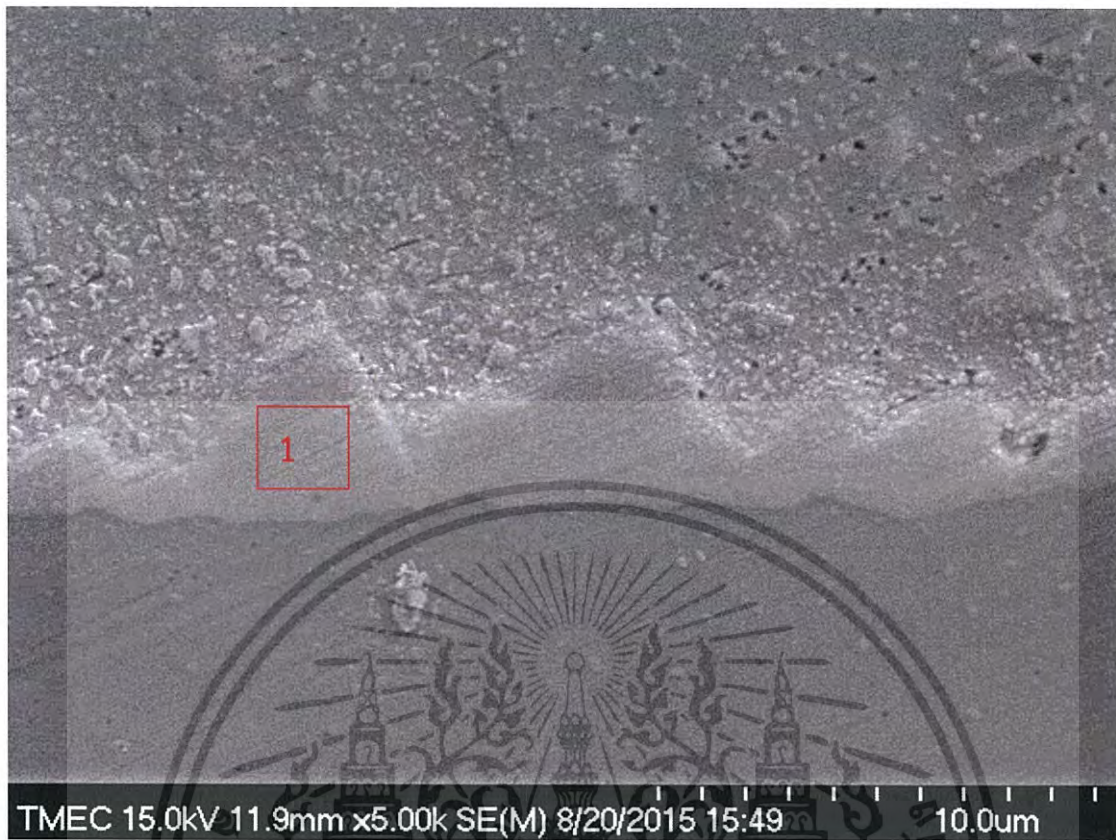


รูปที่ ๓.๒๗ พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.5ZnO

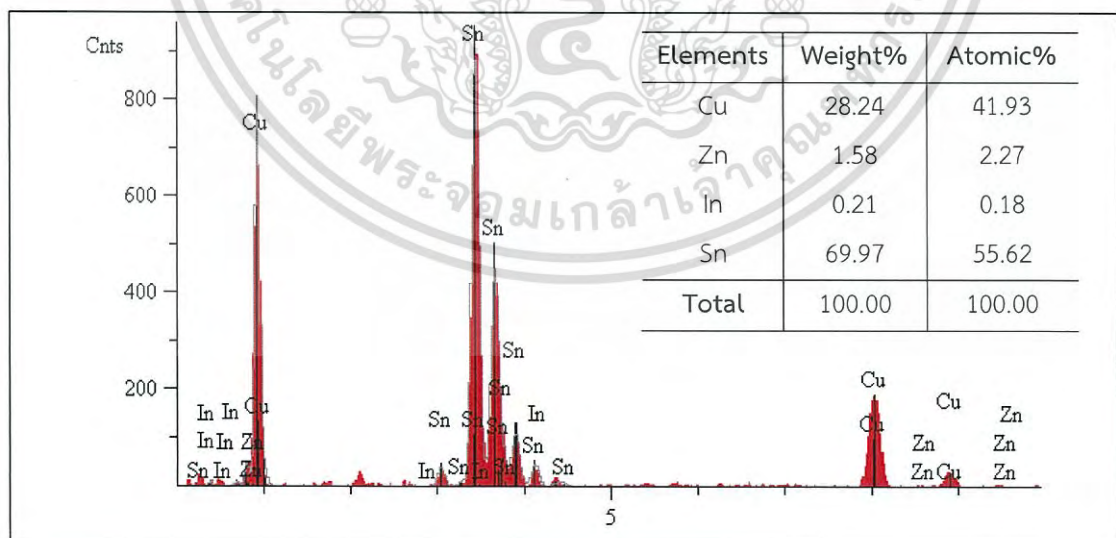


รูปที่ ๓.๒๘ สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.5ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.29 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO

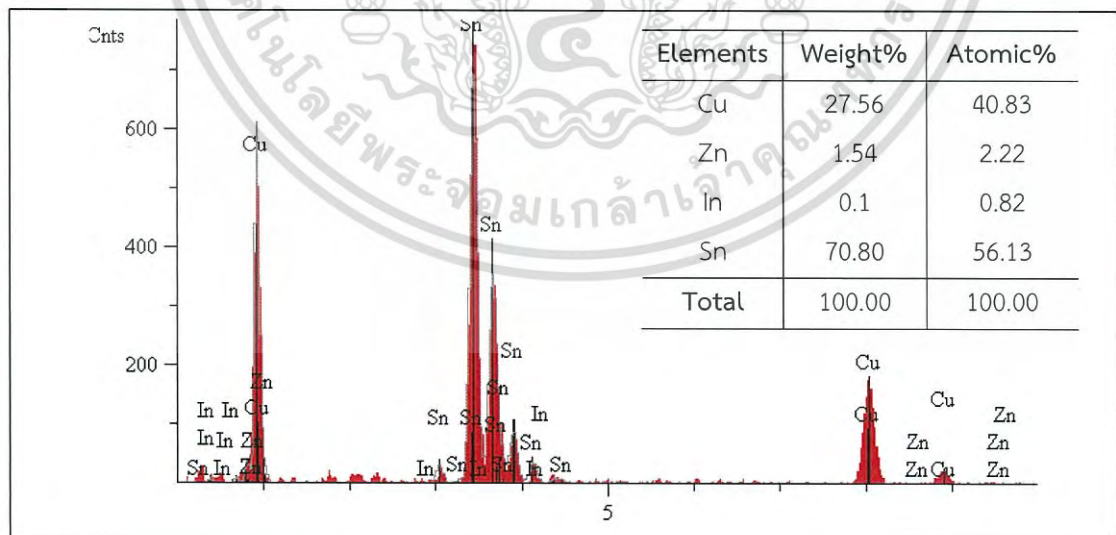


รูปที่ ๓.30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-0.75ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.31 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.0ZnO

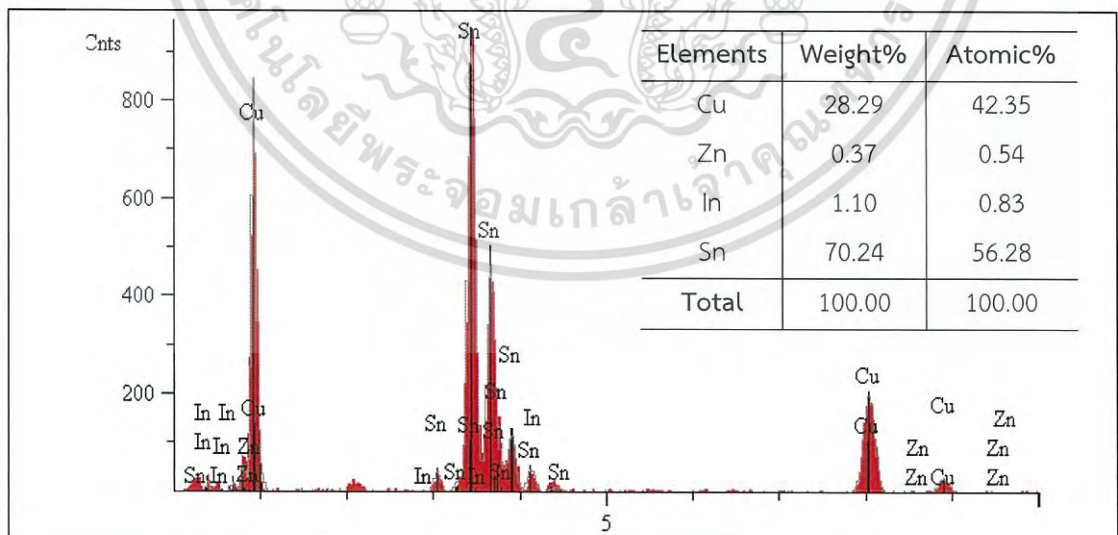


รูปที่ ๓.32 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.3In-1.0ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.33 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO

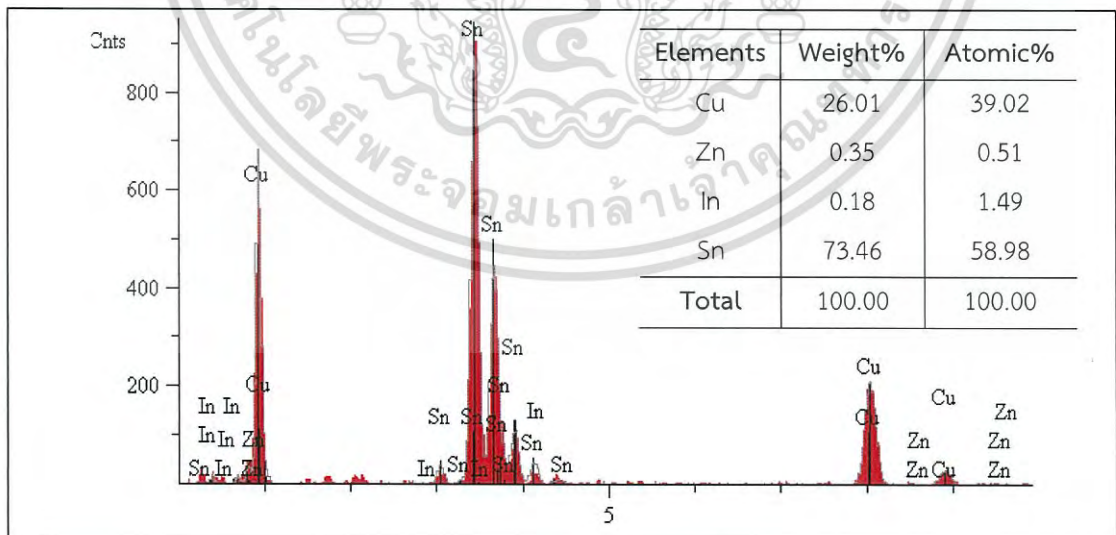


รูปที่ ๓.34 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.25ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.35 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.5ZnO

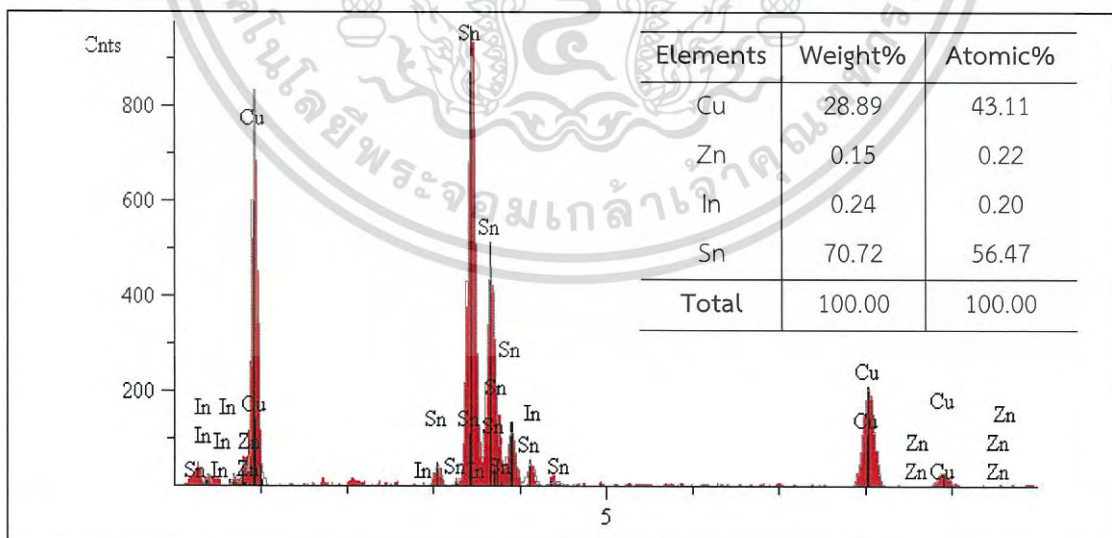


รูปที่ ๓.36 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.5ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

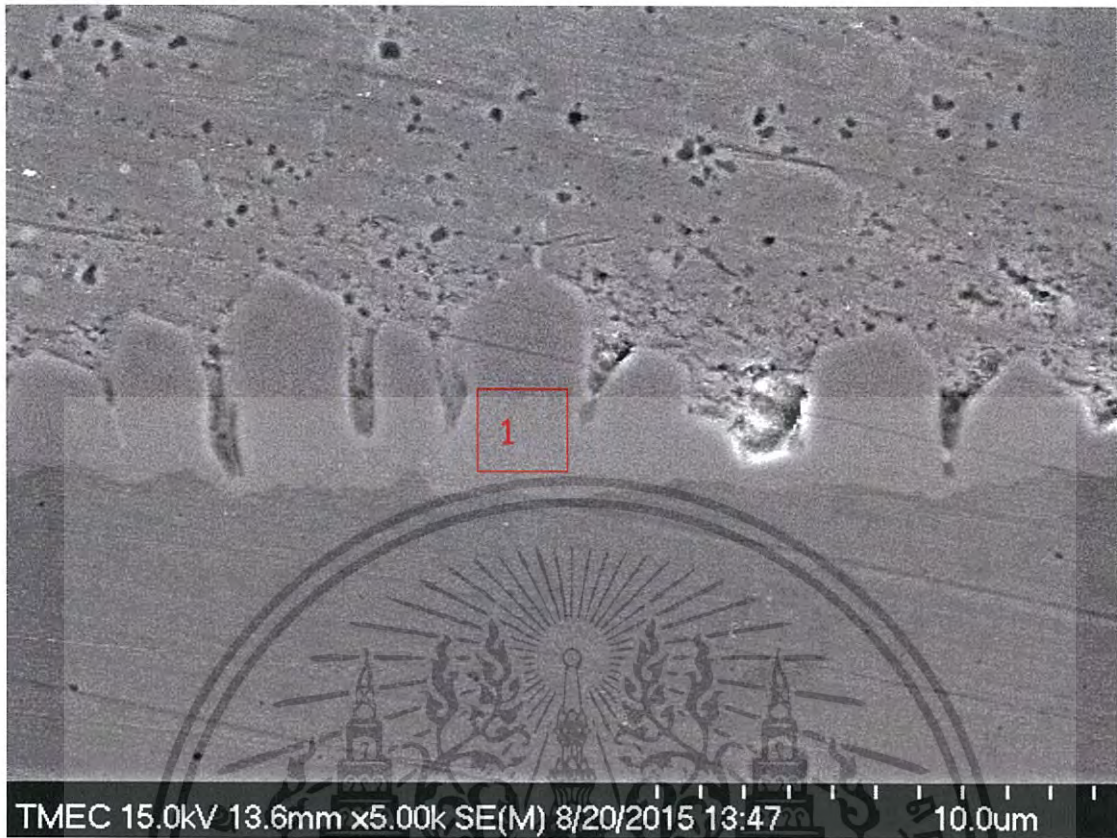


รูปที่ ๓.๓๗ พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO

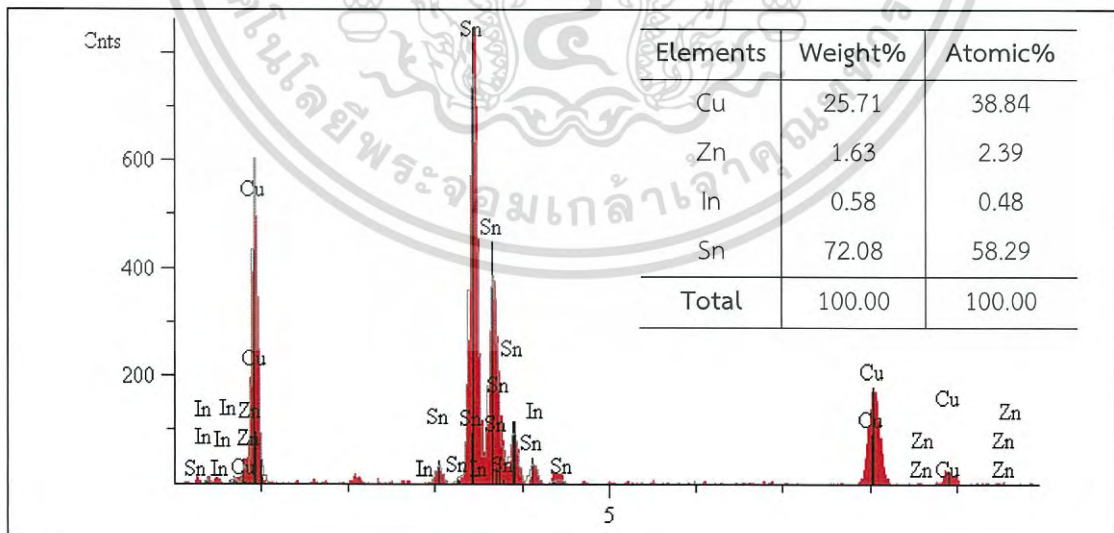


รูปที่ ๓.๓๘ สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-0.75ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.39 พื้นที่สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.0ZnO



รูปที่ ๓.40 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของโลหะบัดกรี Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5In-1.0ZnO บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวณดี มีเสถียร
วัน เดือน ปีเกิด	18 เมษายน 2536
ที่อยู่	160 ซอยเศรษฐกิจ 31-8 ถนนในหมู่บ้านเศรษฐกิจ แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา แผนการเรียน : วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ สถานศึกษา : โรงเรียนสตรีวิทยา ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2553 ระดับปริญญาตรี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ภาควิชาสำนักวิจัยนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สาขาวิศวกรรม วัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2557
ผลงานทางวิชาการ	Meesathien, N., Makoto, S., Ariga, T. and Kanlayasiri, K. 2015, “Influence of Indium and Zinc Oxide Nano-particles on Properties of SAC0307-xIn-yZnO Lead-Free Solder Paste”, 17th Electronics Packaging and Technology Conference. Singapore.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้