

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-DOPED TiO<sub>2</sub> และอินเดียม  
ต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305

AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF Mn-DOPED TiO<sub>2</sub>  
NANO-PARTICLES AND INDIUM ON SAC305 LEAD-FREE  
SOLDER PASTE

นางสาวพรพิมล จงมนตรี

MS. PORNPIMON JONGMONTRI

นางสาวอภิญญา เนตรสว่าง

MS. AKANIT NETSAWANG

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-DOPED TiO<sub>2</sub> และอินเดียม  
ต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305  
AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF Mn-DOPED TiO<sub>2</sub>  
NANO-PARTICLES AND INDIUM ON SAC305 LEAD-FREE  
SOLDER PASTE

นางสาวพรพิมล จงมนตรี  
MS. PORNPIMON JONGMONTRI  
นางสาวอภิญญา เนตรสว่าง  
MS. AKANIT NETSAWANG

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF Mn-DOPED TiO<sub>2</sub>  
NANO-PARTICLES AND INDIUM ON SAC305 LEAD-FREE  
SOLDER PASTE

MS. PORNPIMON JONGMONTRI

MS. AKANIT NETSAWANG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-DOPED TiO<sub>2</sub> และอินเดียมต่อ  
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305  
AN INVESTIGATION ON INFLUENCE OF Mn-DOPED TiO<sub>2</sub>  
NANO-PARTICLES AND INDIUM ON SAC305 LEAD-FREE  
SOLDER PASTE

นักศึกษา

นางสาวพรพิมล จงมนตรี รหัสประจำตัว 54010875  
นางสาวอกนิษฐ์ เนตรสว่าง รหัสประจำตัว 54011455

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และอินเดียมต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305

นักศึกษา

นางสาวพรพิมล จงมนตรี

นางสาวกนิษฐ์ เนตรสว่าง

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้อนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ปริมาณ 0wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.5wt% และ 1wt% ตามลำดับ และอินเดียม (Indium: In) ปริมาณ 0wt% และ 0.5wt% โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล่านี้ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจากการบัดกรี ซึ่งได้ทำขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งสรุปผลได้ว่า การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และอินเดียมในโลหะบัดกรีมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลง แต่การเติมอินเดียมมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีลดลงมากกว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพียงชนิดเดียวในโลหะบัดกรี SAC305 ในการศึกษาความสามารถในการเปียก การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรีสามารถเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ในขณะที่การเติมอินเดียมลงไปโลหะบัดกรีที่มีการผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่มีผลต่อความสามารถในการเปียก นอกจากนี้การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจากการบัดกรีปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่เกิน 0.1 wt% มีผลทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะลดลง แต่เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> มีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่ามากขึ้น โดยอินเดียมมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพียงชนิดเดียว

Thesis Title	An Investigation on Influence of Mn-doped TiO <sub>2</sub> Nano-Particles and Indium on SAC305 Lead-Free Solder Paste
Student	Ms. Pornpimon Jongmontri Ms. Akanit Netsawang
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

This research is performed to study the influence of Mn-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the properties of SAC305 lead-free solder for electronics applications. There were two influencing factors interested, the indium composition and the nanoparticles composition. The indium composition was used either 0 wt% or 0.5 wt% and the nanoparticles compositions was used from 0 wt% to 1 wt%. Effects of these factors on alloy melting point, wettability of solder on the copper plate and microstructure of the solder joint after soldering were studied. The specimens were made according to JIS Z3198-3: 2003 standard and heated at temperature 260°C for 30 seconds. Both nanoparticles and indium decreased the melting point of the solder, but the reduction of melting point was more pronounced when indium was also added. For the wettability, the addition of nanoparticles decreased the wettability. Also, indium did not have significant effect on wettability. Finally, the nanoparticles decreased the intermetallic compound layer thickness at the composition below 0.1 wt% but increased the layer thickness at the composition above 0.1 wt%. The addition of indium resulted in a thinner intermetallic compound layer.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และ In ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง สามารถสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ สำหรับทำให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านของปริญญาานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์ สำหรับคำแนะนำ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

ดร.พลชัย โขติปราชญกุล ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทดลอง จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

นายก้าธร สุขพิมาย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ และความช่วยเหลือในการทดลอง จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

ขอบคุณครอบครัว ที่ช่วยสนับสนุนด้านการเงิน คอยให้กำลังใจ จนสามารถฟันฝ่าอุปสรรคให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

นางสาวพรพิมล จงมนตรี

นางสาวกนิษฐา เนตรสว่าง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1    บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญาพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับ.....	2
<b>บทที่ 2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 โลหะบัดกรี.....	4
2.2 ธาตุเจือที่ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....	9
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว .....	11
2.4 Solder paste ในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	12
2.5 วิธีการบัดกรี.....	20
2.6 Differential Scanning Colorimeter (DSC).....	21
2.7 Hologram.....	23
2.8 ความสามารถในการเปียก (Wettability).....	25
2.9 การศึกษาอิทธิพลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี.....	26
<b>บทที่ 3    วิธีการดำเนินการ</b>	
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
3.2 การทดสอบ.....	30
3.2.1 การศึกษาเรื่องอุณหภูมิจุดหลอมเหลว.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การศึกษาความสามารถในการเปียก.....	31
3.2.3 การศึกษาเรื่องโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สาร ตะกั่วแบบครีมSAC305 กับแผ่นรองทองแดง.....	34
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
4.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว.....	39
4.2 ความสามารถในการเปียก.....	42
4.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง.....	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต.....	48
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>49</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>51</b>
ภาคผนวก ก.ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรีหลังการหลอมก่อน และหลังการปรับโพกัสภาพ.....	52
ภาคผนวก ข.กราฟอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ได้จาก DSC.....	62
ภาคผนวก ค.การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของชิ้นงาน.....	68
ภาคผนวก ง.ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน.....	77
ภาคผนวก จ.การวิเคราะห์ด้วย EDX ของชิ้นงาน.....	83

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ธาตุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรี.....	9
ตารางที่ 2.2 ธาตุเจือที่นิยมใช้กันเป็นประจำ.....	9
ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C.....	11
ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C.....	11
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C.....	11
ตารางที่ 2.6 ประเภทของผงโลหะที่แบ่งตามขนาดอนุภาคโลหะ.....	15
ตารางที่ 2.7 วิธีการผลิตผงโลหะ.....	16
ตารางที่ 2.8 ชนิดออกไซด์และพลังงานอิสระการเกิดออกไซด์.....	18
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	28
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวและแสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวหมดของโลหะบัดกรี.....	40
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง.....	42
ตารางที่ 4.3 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	44
ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	45
ตารางที่ 4.5 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ .....	46

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนที่ใช้งานในฮาร์ดดิสก์.....	12
รูปที่ 2.2 ลักษณะและบรรจุภัณฑ์ของ Solder paste.....	13
รูปที่ 2.3 การใช้ Solder Paste ในกระบวนการผลิตแบบ Surface Mount Technology.....	13
รูปที่ 2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธี Gas atomization.....	17
รูปที่ 2.5 การบัดกรีแบบคลื่น.....	20
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบรีโฟลว์.....	20
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของการทดสอบโดยวิธี Differential Scanning Calorimeter.....	21
รูปที่ 2.8 การ Reconstruction เชนตัวเลขของสนามแสงที่ระนาบภาพ.....	24
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope.....	26
รูปที่ 3.1 การเตรียมสารในแต่ละอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
รูปที่ 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมทองแดง.....	30
รูปที่ 3.3 เครื่อง Different Scanning Calorimeter (DSC).....	31
รูปที่ 3.4 ภาพการจำลอง Hologram.....	31
รูปที่ 3.5 การหา Contact angle ทางด้านขวาของรอยบัดกรี .....	32
รูปที่ 3.6 การหา Contact angle ทางด้านซ้ายของรอยบัดกรี.....	33
รูปที่ 3.7 การหาพื้นที่ของโลหะบัดกรีด้วยโปรแกรม Image-Pro Express .....	34
รูปที่ 3.8 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO <sub>2</sub> 1 wt% + In 0.5 wt%.....	35
รูปที่ 3.9 การหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยโปรแกรม Image-Pro Express ...	35
รูปที่ 3.10 การหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยโปรแกรม Image-Pro Express ...	36
รูปที่ 3.11 ภาพจากการศึกษาโดย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO <sub>2</sub> 1 wt% + In 0.5 wt% spectrum 1.....	36
รูปที่ 3.12 เครื่องตัดโลหะ.....	37
รูปที่ 3.13 เครื่องขัด.....	37
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์.....	38
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานตัวอย่าง.....	38
รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305).....	39
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวในโลหะบัดกรี.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวหมดในโลหะบัดกรี.....	41
รูปที่ 4.4 ค่ามอดูลัสของโลหะบัดกรี.....	43
รูปที่ 4.5 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	44
รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว.....	46
รูปที่ 4.7 ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี.....	47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปีมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 1 ล้านล้านบาท แต่เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ ทำให้หลายๆประเทศได้ออกข้อบังคับออกมาเพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) Hexavalent Chromium ( $Cr^{6+}$ ) Polybrominated Biphenyls และ Polybrominated Diphenyl Ether ซึ่งการออกข้อบังคับเหล่านี้ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในประเทศเหล่านั้นได้ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่เป็นโลหะผสม (Alloy) ระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Tin-Lead solders)

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน คือ โลหะบัดกรีกกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) เพราะมีคุณสมบัติต่างๆเหมาะสมกับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่บัดกรีด้วยวิธี Reflow soldering และ Wave soldering โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีและมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง แต่ SAC305 มีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb Eutectic solder) ในเรื่องความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

วิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาค (Particles) ขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรี เพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน และด้วยความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) ชนิดต่างๆมาใช้เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ในการทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) ซึ่งจะทำให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้ มีคุณสมบัติต่างๆในการบัดกรีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงไป ส่งผลเสียต่อโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ได้ คือ ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น และมี

ความสามารถในการเปียกที่ลดลง แต่มีผลดี คือ ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ในรอยบัดกรีน้อยลง

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 โดยใช้อนุภาคนาโน Mn-doped  $\text{TiO}_2$  และอินเดียม (Indium: In) โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล่านี้ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจากการบัดกรี สำหรับอนุภาคนาโน Mn-doped  $\text{TiO}_2$  เป็นอนุภาคนาโนชนิดใหม่ที่อาจจะใช้เป็นเฟสกระจายในโลหะบัดกรีได้ดี เพราะอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  เป็นอนุภาคนาโนชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเติมลงไปโลหะบัดกรี เนื่องจากมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นฐานต่างๆของโลหะบัดกรี เช่น Sn, Ag และ Cu รวมทั้งสามารถยึดเกาะกับเนื้อโลหะบัดกรีได้ดี ในขณะที่การเติม In จะเป็นธาตุที่ช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดงได้ โดยผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ และสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped  $\text{TiO}_2$  และ In ที่มีต่อจุดหลอมเหลว และความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped  $\text{TiO}_2$  และ In ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

ในการศึกษานี้ใช้ความเข้มข้นของ Mn ที่ใช้ได้ป้อนอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  ไม่เกิน 1 wt% เนื่องจาก Mn สามารถละลายเข้ากับแผ่นรองทองแดงได้ดีที่ปริมาณไม่เกิน 1 wt% เท่านั้น สำหรับอนุภาค In ที่เติมลงไป จะใช้ความเข้มข้น 0.5 wt% เนื่องจาก In เป็นธาตุที่มีราคาสูง ในการศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง จะใช้วิธีการวัดค่าตัวประกอบการกระจาย (Spread factor) อัตราส่วนของการกระจาย (Spread ratio) และมุมสัมผัส (Contact angle) โดยจะใช้แผ่นรองที่ทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% วิธีการบัดกรีที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จะใช้บัดกรีแบบ Reflow soldering

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วและโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว
2. อุตสาหกรรมการผลิตโลหะบัดกรีสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง

3. การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ขึ้นมา จะเป็นทางเลือกเพิ่มเติมให้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในการตอบสนองต่อข้อบังคับทางสิ่งแวดล้อมที่บังคับใช้ในประเทศต่างๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โลหะบัดกรี

โลหะบัดกรี หมายถึง โลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานนี้มักจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานที่เราต้องการจะเชื่อมต่อกันเสมอ และโลหะบัดกรีนี้ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้นแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกเชื่อม โลหะบัดกรีที่ใช้กันแพร่หลายคือโลหะผสมของตะกั่วและดีบุก ดังนั้นผู้ใช้และผู้ขายจึงมักเรียกโลหะบัดกรีว่า "ตะกั่วบัดกรี" ทั้ๆที่โลหะบัดกรีบางชนิดไม่มีส่วนประกอบของตะกั่วและดีบุกผสมอยู่เลย

ตะกั่วบัดกรีบางชนิดผสมพลวง บิสมัทและเงินลงไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของตะกั่วบัดกรีตามความต้องการของการใช้งาน เช่น ผสมพลวงลงไปเป็นปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 2 จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อในการบัดกรีมากขึ้น บิสมัทที่เจือลงไปช่วยให้อุณหภูมิหลอมเหลวสูงขึ้น ดังนั้นถ้าผสมบิสมัทและเงินลงในตะกั่วบัดกรีในอัตราที่เหมาะสมกับการใช้งานนั้นๆก็จะช่วยในการเคลือบผิวด้วยดีบุก และการไหลของตะกั่วดีขึ้น

การบัดกรี คือ การประสานโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกันซึ่งโลหะทั้งสองชิ้นนี้อาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยใช้โลหะบัดกรีที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำเป็นตัวประสาน อุณหภูมิหลอมละลายของตัวประสานนี้ต้องต่ำกว่าโลหะที่เป็นชิ้นงาน ซึ่งการเชื่อมประสานโดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิหลอมละลายไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส หลักการประสานโดยการบัดกรี คือ การทำให้ผิวของชิ้นงานที่จะบัดกรีสะอาดทำให้เกิดประสานกันอย่างสมบูรณ์ และฟลักซ์ช่วยขจัดผิวออกไซด์ที่จุดเชื่อมต่อทำให้ชิ้นงานสะอาดขึ้น ในขณะที่บัดกรี ซึ่งฟลักซ์ที่ใช้ควรเป็นสารเคมีบริสุทธิ์ เช่น กรดบอริก เกลือโซเดียมไซยาไนด์ อัลคาไลน์ ไบฟลูออไรด์ เป็นต้น ทำให้โลหะบัดกรีซึ่งถูกหลอมเหลวโดยความร้อนสามารถยึดเกาะผิวโลหะ การยึดเกาะระหว่างชิ้นงานกับโลหะบัดกรีเกิดการหดตัวของโมเลกุลของโลหะบัดกรีจะทำให้การยึดติดกับโมเลกุลของชิ้นงานเหนียวแน่นยิ่งขึ้น

งานบัดกรีที่ใช้โลหะผสมของตะกั่วและดีบุกเป็นหลักมีหลายชนิด เช่น งานบัดกรีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ งานท่อ งานซ่อมตัวถังรถยนต์ แผ่นเหล็กชนิดต่างๆ อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในบ้าน เช่น รางน้ำ ถังน้ำ ข้อต่อต่างๆ และสังกะสี เป็นต้น รอยต่อของชิ้นงานที่เกิดจากการบัดกรีจะมีคุณสมบัติเป็นสื่อนำความร้อนที่ดี แต่อย่างไรก็ตามรอยประสานของโลหะบัดกรีนี้จะมี ความแข็งแรงน้อยกว่าความแข็งแรง

ของชิ้นงาน และถ้าต้องการให้รอยบัดกรีมีคุณสมบัติดีขึ้น ควรบัดกรีด้วยอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

ในการทำงานเกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีนั้น ต้องระมัดระวังและคำนึงถึงความปลอดภัยให้มาก เนื่องจากไอตะกั่วจะระเหยออกมาขณะบัดกรีหรือเชื่อมประสานตลอดเวลา ดังนั้นผู้ทำงานเกี่ยวข้องทุกคนจึงควรมีอุปกรณ์ป้องกันการสูดดมและสัมผัส เพราะไอตะกั่วที่เกิดขึ้นขณะบัดกรีเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ระบบหายใจ และสามารถทำลายระบบสมอง ซึ่งควบคุมอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายได้ นอกจากนี้ไอตะกั่วแล้วยังมีธาตุบางตัวที่เป็นส่วนประกอบในโลหะบัดกรี ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณน้อย แต่ก็อันตรายเช่นเดียวกัน ถ้าสูดเข้าสู่ระบบหายใจเป็นเวลานานๆ เช่น ไอของพลวง สารหนู และแคดเมียม เป็นต้น

โลหะบัดกรีที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีปริมาณร้อยละดีบุกแตกต่างกัน โดยมีปริมาณตะกั่วเป็นองค์ประกอบเป็นหลัก นอกจากนี้จะมีธาตุอื่นๆผสมอยู่เล็กน้อยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งานให้เหมาะสม เช่น พลวง เงิน ทองแดง อินเดียม แคดเมียม อะลูมิเนียม บิสมัท สารหนู เหล็ก สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้น โลหะบัดกรีชนิดต่างๆแบ่งตามปริมาณร้อยละของดีบุกเป็นส่วนใหญ่ ดังนี้

1. ดีบุก 96 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับงานบัดกรีที่มีจุดมุ่งหมายพิเศษ รอยต่อของการบัดกรีจะแข็งแรงกว่าการบัดกรีด้วยโลหะบัดกรีที่มีปริมาณตะกั่วสูง ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษและเมื่อใช้บัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้รอยต่อของการบัดกรีเรียบและมีสีเหมือนกับชิ้นงานนั้น

2. ดีบุก 95 ดีบุก 94 และดีบุกประเภท E โลหะบัดกรีเหล่านี้ใช้บัดกรีอุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องประดับมีค่าต่างๆ เชื่อมท่อทองแดง และท่ออื่นๆ ที่ใช้สำหรับต้มน้ำ และใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และรอยต่อที่เกิดจากการบัดกรีของโลหะชนิดนี้มีความต้านทานต่อความร้อนสูงได้

3. ดีบุก 70 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้กับงานที่ต้องการปริมาณดีบุกสูงเป็นพิเศษ และใช้ในการบัดกรีสังกะสี และเคลือบผิวของโลหะ

4. ดีบุก 63 โลหะบัดกรีชนิดนี้ เป็นโลหะเจือของตะกั่วและดีบุกที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุด เรียกว่า ยูเทคติก อัลลอย (Eutectic alloy) ใช้ในการเชื่อมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อมให้ช่วงอุณหภูมิที่หลอมเหลวสั้นที่สุด

5. ดีบุก 62 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเพื่อจุดมุ่งหมายพิเศษ สำหรับบัดกรีชิ้นงานที่เคลือบด้วยเงิน

6. ดีบุก 60 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 63 และใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้า เชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และใช้ในการเคลือบผิวโลหะ

7. ดีบุก 50 โลหะบัดกรีชนิดนี้ ใช้สำหรับบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษมากนักใช้ในการบัดกรีเหล็กไร้สนิมแต่สีของโลหะบัดกรีจะไม่เหมือนกับเหล็กไร้สนิมทำให้รอยบัดกรีไม่สวย ใช้เชื่อมรอยต่อแผ่นโลหะ ท่อและชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆ

8. ดีบุก 45 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานทั่วไป เช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 50 ซึ่งใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป

9. ดีบุก 40A โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้เช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 50 แต่ไม่ใช้กับงานเชื่อมแบบสวิตติง (Sweating) หรือแบบบิต (Bit) ส่วนมากจะใช้กับงานเชื่อมแบบจุ่มร้อน (Dip soldering) หรือถูร้อน (Wip soldering) สำหรับเชื่อมรอยต่อของท่อตะกั่ว และที่หุ้มสายโทรเลข

10. ดีบุก 40B โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 40A แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับการบัดกรีเหล็กชุบสังกะสี และสังกะสี เนื่องจากรอยต่อจะไม่แข็งแรงมากนัก

11. ดีบุก 35A โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้มากในงานเชื่อมท่อประปา

12. ดีบุก 35B โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้ทั่วไปในการเชื่อมท่อประปาและการที่มีพลวงสูงนี้เองทำให้การเชื่อมแบบถูร้อน (Wip soldering) ให้ความแข็งแรงมากกว่า และรอยต่อของการเชื่อมจะเรียบมากกว่า

13. ดีบุก 30A โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับเชื่อมตัวถังรถยนต์และกำจัดขบวนการความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 370-480 องศาเซลเซียส ในขณะที่บัดกรี

14. ดีบุก 30B โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับอุดรูอุปกรณ์และตะเข็บรอยต่อของตัวถังรถยนต์

15. ดีบุก 25A และดีบุก 25B โลหะบัดกรีทั้งสองชนิดนี้ใช้งานเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก

30

16. ดีบุก 20A โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้มากในงานบัดกรีตัวถังรถยนต์

17. ดีบุก 20B โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับอุดรูและเชื่อมรอยต่อตะเข็บของตัวถังรถยนต์ และใช้งานทั่วไป สำหรับเคลือบป้องกันแผ่นเหล็กที่ไม่ต้องการปริมาณดีบุกสูงนัก

18. ดีบุก 15 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับเคลือบและเชื่อมโลหะต่างๆ

19. ดีบุก 10A โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้ในการเชื่อมและเคลือบโลหะซึ่งจุดที่เชื่อมนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า 204 องศาเซลเซียส

20. ดีบุก 10B โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเช่นเดียวกับโลหะชนิดดีบุก 10A เมื่อบัดกรีชิ้นงานที่ผิวเคลือบด้วยเงินจะทำให้ปริมาณเงินบนผิวเคลือบนั้นลดลง และใช้ในการบัดกรีสรอยต่อซึ่งต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นเล็กๆที่เชื่อมกับเครื่องจักรกลที่เคลื่อนที่ได้ (Automotive electronics)

21. ดีบุก 5 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับเคลือบและเชื่อมโลหะ ซึ่งจุดที่เชื่อมนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า 246 องศาเซลเซียส แต่ความสามารถในการไหลไม่ดีเท่ากับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก 10A

22. ดีบุก 2 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเกี่ยวกับการบัดกรีรังผึ้งหม้อน้ำรถยนต์

23. พลวง 5 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้สำหรับเชื่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแข็งแรง และใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 240 องศาเซลเซียส เช่น การบัดกรีขดความเย็นที่เป็นรอยต่อระหว่างทองแดงกับเหล็กหล่อ ท่อทองแดงในแผงพลังงานแสงอาทิตย์ งานประปา และเชื่อมชิ้นส่วนของตู้เย็น

24. เงิน 1.5 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้บัดกรีทองแดง ทองเหลือง และรอยต่อของการเชื่อมจะมีอายุการใช้งานที่นานกว่าถึงแม้จะใช้งานในที่ที่มีความชื้น ผิวที่บัดกรีจะไม่หมองคล้ำ

25. เงิน 2.5 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้งานเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดเงิน 1.5 โดยใช้วิธีให้ความร้อนแบบหัวเผาไฟ (Torch heating) และต้องใช้ฟลักซ์ที่มีสังกะสีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบซึ่งจะทำให้รอยต่อเรียบบนผิวที่ไม่มีดีบุก ถ้าใช้โรซินฟลักซ์จะทำให้รอยต่อในการเชื่อมไม่เรียบ โลหะบัดกรีชนิดนี้ทำปฏิกิริยาได้ง่ายในบรรยากาศที่ชื้น

26. เงิน 5.5 โลหะบัดกรีชนิดนี้ใช้บัดกรีทองเหลืองหรือทองแดงที่ผ่านการดึงแข็งมาแล้ว อุณหภูมิในการบัดกรีไม่ควรสูงกว่า 454 องศาเซลเซียส และสามารถประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมคอบเบิลในเครื่องยนต์ของเครื่องบินที่อุณหภูมิสูงโดยไม่มีผลต่อความแข็งแรงของบัดกรีนี้ แต่มีข้อควรระวังเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีชนิดเงิน 2.5

27. HA - A โลหะบัดกรีชนิดนี้เป็นชนิดที่ไม่มีตะกั่ว ใช้สำหรับเชื่อมท่อทองแดงที่ใช้ในงานประปา มีจุดหลอมตัวต่ำกว่าโลหะบัดกรีชนิดฟลวง 5 แต่สามารถใช้งานได้ดีในการเชื่อมอุรรอยต่อขนาดใหญ่

28. HB - A โลหะบัดกรีชนิดนี้เป็นชนิดที่ไม่มีตะกั่ว ใช้สำหรับเชื่อมท่อทองแดงที่ใช้ในงานประปาเหมือน HA - A แต่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวและไหลกว้างซึ่งมีประโยชน์ในการเชื่อมอุรรอยต่อที่มีขนาดใหญ่ และสามารถใช้งานกับโลหะบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า

นอกจากโลหะบัดกรีที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลักดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีโลหะบัดกรีที่เจือโลหะอื่นๆลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น

โลหะบัดกรีที่มีแคดเมียมร้อยละ 95 และเงินร้อยละ 5 ใช้ในรอยเชื่อมที่ต้องใช้งานกับอุณหภูมิสูงๆ โลหะบัดกรีชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวที่ 338 องศาเซลเซียสและจะหลอมละลายหมดที่อุณหภูมิ 393 องศาเซลเซียส

โลหะบัดกรีที่มีแคดเมียมร้อยละ 82.5 และสังกะสีร้อยละ 17.5 เป็นโลหะบัดกรีที่ใช้ในการบัดกรีสังกะสีเจือ โลหะบัดกรีชนิดนี้หลอมละลายหมดที่อุณหภูมิ 264 องศาเซลเซียส โลหะบัดกรีชนิดที่มีอินเดียมร้อยละ 25 ดีบุกร้อยละ 37.5 และตะกั่วร้อยละ 37.5 อุณหภูมิหลอมเหลวที่ 134 องศาเซลเซียสและหลอมละลายหมดที่อุณหภูมิ 181 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับบัดกรีงานที่ป้องกันการกัดกร่อนทางธรรมชาติได้

ชิ้นงานโลหะที่บัดกรียากที่สุด คือ อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมที่สามารถบัดกรีให้ได้ผลดี คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์หรืออะลูมิเนียมที่เจือแมกนีเซียมหรือแมงกานีส ซึ่งผสมอยู่ได้ไม่เกินร้อยละ 1 โลหะบัดกรีที่ใช้บัดกร้อะลูมิเนียมได้ คือ โลหะบัดกรีซึ่งเป็นโลหะเจือของธาตุต่างๆ ดังนี้

1. ดีบุกร้อยละ 60 สังกะสีร้อยละ 37 ทองแดงร้อยละ 3
2. ดีบุกร้อยละ 30 สังกะสีร้อยละ 70
3. แคดเมียมร้อยละ 40 สังกะสีร้อยละ 60

โลหะบัดกรีเหล่านี้หลอมเหลวและละลายหมดที่อุณหภูมิ 204 - 232 องศาเซลเซียส เพื่อให้การบัดกรีได้ผลดีควรยึดชิ้นงานที่จะบัดกรีให้แน่นจนกว่าชิ้นงานนั้นจะเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง เพลวไฟบัดกรีอะลูมิเนียมควรใช้ชนิดคาร์บูไรซิง (Carburizing) ให้ความร้อนชิ้นงานโดยให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวจากความร้อนของชิ้นงานนั้น ห้ามใช้เพลวไฟหลอมโลหะบัดกรีโดยตรง

สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการอัตราการผลิตสูงและรวดเร็วเพื่อประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจ เช่น การบัดกรีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต้องบัดกรีไดโอด อาร์ซี และความต้านทานจำนวนมากลงบนแผงวงจรนั้น เพื่อให้สะดวกและรวดเร็ว เมื่อประกอบวงจรเสร็จแล้ว นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้จุ่มลงในอ่างโลหะบัดกรีที่หลอมละลาย ซึ่งควบคุมอุณหภูมิอ่างบัดกรีให้อยู่ในช่วง 220 - 260 องศาเซลเซียส ใช้โลหะบัดกรีที่มีดีบุกเจือปริมาณร้อยละ 60 - 65 โดยให้โลหะบัดกรีนี้สัมผัสเฉพาะด้านล่างของแผงวงจรเท่านั้น

เมื่อตะกั่วบัดกรีถูกความร้อนจะเริ่มอ่อนตัวและหลอมเหลวที่อุณหภูมิหลอมเหลวของตะกั่วบัดกรีชนิดนั้นๆ และจะเริ่มไหลตัวง่ายที่อุณหภูมิไหลตัว (Liquidus) โดยปกติอุณหภูมิไหลตัวจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเล็กน้อย

จะเห็นได้ว่าโลหะบัดกรีซึ่งใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานนั้นมีหลายประเภทและมีคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละประเภท ซึ่งจะเหมาะในการใช้งานต่างกัน ดังนั้นผู้ที่นำโลหะบัดกรีไปใช้งานควรพิจารณาตามความเหมาะสมของงาน จึงจะทำให้ผลงานมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 2.2 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปที่ใช้จะมีส่วนผสมของดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียก และการแผ่กระจายตัวเวลานำไปบัดกรีได้ดี ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ บิสมัท (Bi), แคดเมียม (Cd), อินเดียม (In), สังกะสี (Zn), ทองแดง (Cu), พลวง (Sb) และ เงิน (Ag) เป็นต้น ซึ่งธาตุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรีจะสรุปดังตารางที่ 2.1 และธาตุเจือที่นิยมใช้กันเป็นประจำดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ธาตุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรี

ธาตุ	ความสามารถที่เติมได้ (%)	ช่วงที่เป็นของแข็ง (°C)	ช่วงที่เป็นของเหลว (°C)	ความเป็นพิษ	ราคา	ความเหมาะสมที่จะใช้
Bi	0-100	138	138-270	-	ยอมรับได้	ปานกลาง
Cd	0-100	188	177-320	สูง	ยอมรับได้	ปานกลาง
In	0-100	117-150	117-232	-	ปานกลาง	ต่ำ
Zn	0-90	198	198-400	-	ต่ำ	ดี
Au	0-82	218-310	218-400	-	สูง	ต่ำ
Tl	0-100	165	165-300	สูง	-	ต่ำ
Ga	0-100	18	18-232	-	สูง	ต่ำ
Hg	0-100	140	-40-+232	สูง	สูง	ต่ำ

ตารางที่ 2.2 ธาตุเจือที่นิยมใช้กันเป็นประจำ

ธาตุ	ความสามารถที่เติมได้ (%)	ช่วงที่เป็นของแข็ง (°C)	ช่วงที่เป็นของเหลว (°C)	ความเป็นพิษ	ราคา	ความเหมาะสมที่จะใช้
Ag	10	221	221-300	-	สูง	ปานกลาง
Cu	3	227	227-320	-	ต่ำ	สูง
Sb	5	232-236	236-240	-	ปานกลาง	เหมาะสม

### 2.2.1 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจายดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง

2. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่นๆ โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น อินเดียมที่เติมลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-Zn สามารถช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลวลง ระยะห่างระหว่างเส้นของแข็งและของเหลวกว้างขึ้น จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และยังสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียวให้ดีขึ้น

3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมากคือ  $139^{\circ}\text{C}$  จึงเป็นข้อดี คือ สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงๆได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่มีข้อเสียคือ บิสมัทมีราคาสูง

4. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านการคืบและการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีน้อยลง

5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่  $227^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9wt.%Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่  $199^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ที่จุดยูเทคติก ( $183^{\circ}\text{C}$ ) Sn-9wt.%Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟสคือ เนื้อพื้นดีบุกและ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่ดีบุกน้อยกว่า 1% ของโครงสร้างจุลภาคของ Sn-Zn จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn กับ Zn ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อด้อยบางประการเช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มาก เมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Pb ทำให้เกิดการกัดกร่อน

## 2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เพื่อลดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีส่วนผสมของตะกั่ว สามารถที่จะแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวดำกว่า 180°C ดังตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C ดังตารางที่ 2.4 และกลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวดำกว่า 180°C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

ตารางที่ 2.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

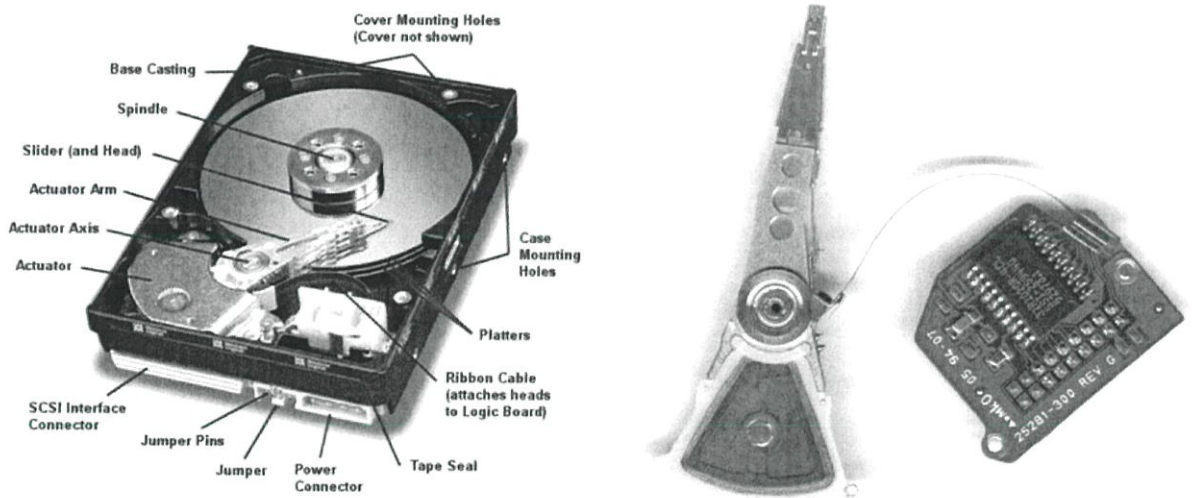
ตารางที่ 2.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆบ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น

## 2.4 Solder paste ในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปในบ้านเราส่วนใหญ่มักเป็นยี่ห้อที่มาจากต่างประเทศ อาทิเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและโน้ตบุ๊ก โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เครื่องเล่นดีวีดี สมาร์ทการ์ด แต่ท่านทราบหรือไม่ว่าก่อนที่จะประกอบอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นชิ้นงานสำเร็จนั้นได้ผ่านมือคนไทยมาแล้ว ที่กล่าวเช่นนี้เพราะส่วนประกอบบางส่วนได้ผ่านการประกอบจากโรงงานในประเทศไทย โดยเฉพาะส่วนประกอบที่เรียกว่าแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) และแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit, FPC) ดังรูปที่ 2.1 ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิด เพราะเป็นส่วนที่ติดตั้งของไอซี (IC) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ชิป (Chip) และอื่นๆ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องทำการบัดกรีให้ยึดติดกับ PCB และ FPC ด้วยวัสดุที่เรียกว่าโลหะบัดกรี



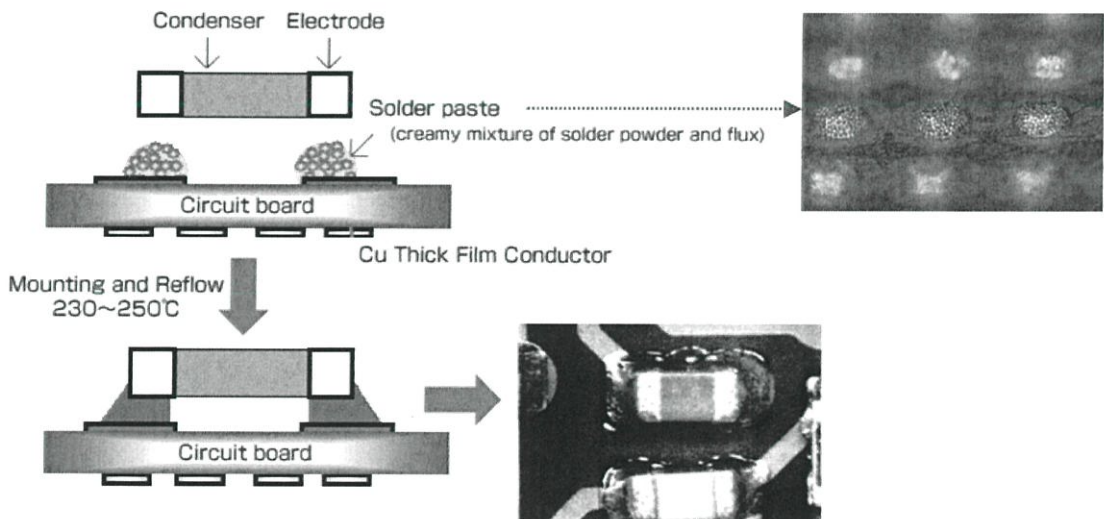
รูปที่ 2.1 แผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นที่ใช้งานในฮาร์ดดิสก์

รูปแบบของโลหะบัดกรีที่ใช้กันทั่วไปเป็นของแข็งของโลหะผสมของตะกั่วและดีบุก แต่ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องผลิตชิ้นงานจำนวนมากจะใช้โลหะบัดกรีเป็นโลหะหลอมเหลวที่นิยมใช้ในการประกอบ PCB หรือโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะและบรรจุภัณฑ์ของ Solder paste

ซึ่งนิยมใช้ในการผลิต FPC แบบ SMT (Surface Mount Technology) ดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อพิมพ์ Solder paste ลงบนตำแหน่งที่ต้องการ แล้วจึงวางไอซีหรือตัวเก็บประจุลงบน Solder paste จากนั้นจึงให้ความร้อนเพื่อให้ Solder paste หลอมตัวและประสานยึดติดไอซีหรือตัวเก็บประจุกับแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 2.3 การใช้ Solder paste ในกระบวนการผลิตแบบ SMT (Surface Mount Technology)

ถึงแม้ Solder paste เป็นส่วนประกอบเพียงเล็กน้อยแต่มีความสำคัญอย่างมากต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ โดยทั่วไป Solder paste เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยโลหะ สารอินทรีย์ และสารอินทรีย์หลายชนิดเพื่อให้ได้สมบัติขณะการปฏิบัติงานและสมบัติการยึดติดที่ต้องการ

Solder paste เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายยาสีฟัน โดยมีส่วนประกอบที่เป็นผงโลหะผสมกับฟลักซ์ (Flux) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้วัสดุผสมนี้มีลักษณะคล้ายครีม ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของ Solder paste ได้แก่ ส่วนประกอบของโลหะผสม ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของโลหะผสม สัดส่วนของผงโลหะ ชนิดของฟลักซ์ (Flux) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนประกอบของโลหะผสม (Solder alloy) โดยปัจจุบันโลหะบัดกรีแบ่งเป็นประเภทมีโลหะตะกั่วและไม่มีโลหะตะกั่ว โดยโลหะผสมที่ปราศจากตะกั่ว (Lead free) มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าของโลหะบัดกรีของโลหะผสมตะกั่วและดีบุก (Pb-Sn solder) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดประมาณ  $183^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงมีความพยายามวิจัยเพื่อปรับปรุงให้โลหะผสมที่ปราศจากตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงและมีสมบัติการบัดกรีดีเทียบเท่ากับโลหะผสมของตะกั่วและดีบุก โลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วที่ใช้ทั่วไปคือ โลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 66 โลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu-Bi มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 19 โลหะบัดกรี Sn-Ag-Bi-In มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 9 และโลหะบัดกรี Sn-Zn-Bi มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 6 โดย The Japanese Electronic Industry Association (JEIDA) แนะนำให้ใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักเป็น 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) ส่วน National Electronic Manufacturing Initiative (NEMI) แนะนำให้ใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักเป็น 95.5Sn-3.9Ag-0.6Cu และ 96.5Sn-3.5Ag สำหรับกระบวนการบัดกรีแบบ Reflow soldering โดยทางยุโรปก็มีคำแนะนำการใช้คล้ายกับข้างต้นเช่นกัน แต่ถึงอย่างไรการนำโลหะผสมเหล่านี้ไปใช้งานจริงต้องได้รับการประเมินให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้นๆ

2. ผงโลหะ (Solder powder) การผลิตผงโลหะทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดในแต่ละแบบดังตารางที่ 2.6 โดยใช้วิธีการต่างๆดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ประเภทของผงโลหะที่แบ่งตามขนาดอนุภาคโลหะ

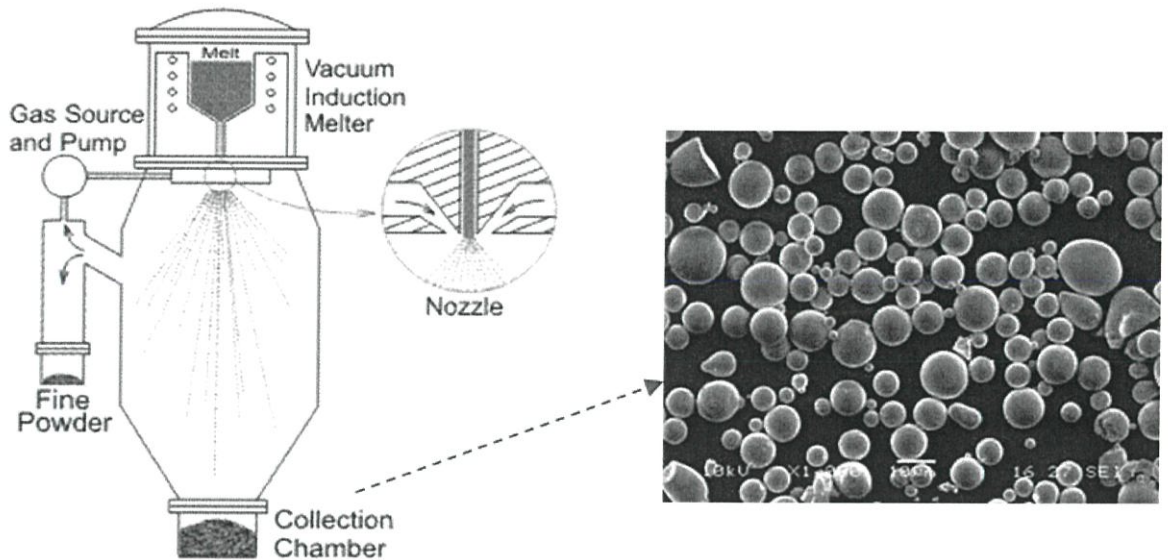
ชนิด	ขนาดใหญ่ไม่เกิน	ขนาดใหญ่กว่าไม่เกิน 1%	มีขนาด 80% อยู่ในช่วง	ขนาดเล็กไม่เกินกว่า 10%
Type 1	160 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	150-75 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Type 2	80 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$	75-45 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Type 3	50 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$	45-25 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Type 4	40 $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$	38-20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
Type 5	30 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	25-15 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$
Type 6	20 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	15-5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$

ตารางที่ 2.7 วิธีการผลิตผงโลหะ

วิธีการเชิงพาณิชย์	วิธีการที่กำลังพัฒนาเป็นเชิงพาณิชย์	วิธีการอื่นๆ
Water atomization	Ultrasonic gas atomization	Centrifugal shot casting process
Oil atomization	Rotating disk atomization	Spinning cup atomization
Gas atomization	Electron beam rotating disk process	Centrifugal impact atomization
Vacuum atomization rotating electrode atomization	Roller atomization	Laser spin atomization Durarc process  Vibrating electrode atomization Solder jetting

โดยทั่วไปวิธีการ Gas atomization ดังรูปที่ 2.4, Centrifugal atomization และ Ultrasonic gas atomization จะใช้ผลิตผงโลหะชนิด Type 3 และ Type 4 สำหรับนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบ SMT (Surface Mount Technology) ในขณะที่วิธีการ Oil atomization จะใช้ผลิตผงโลหะที่มีขนาดเล็กมาก (Ultrafine) เช่น ผงโลหะชนิด Type 5 และ Type 6 นอกจากนี้กระบวนการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงแต่มีความสามารถในการทำงานมากขึ้นเป็นแนวโน้มของอุตสาหกรรมนี้ทำให้ส่วนประกอบต่างมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ผงโลหะจึงต้องมีขนาดเล็กลง มีผู้ผลิตได้เริ่มกล่าวถึงผงโลหะ Type 7 ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-11  $\mu\text{m}$

สมบัติของผงโลหะที่สำคัญคือ ต้องเป็นทรงกลม เกิดโลหะออกไซด์น้อย มีการกระจายขนาดของอนุภาคในช่วงที่กำหนด การที่ผงโลหะต้องเป็นทรงกลมเพราะจะทำให้มีสมบัติการไหลที่ดีขณะพิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ ความเรียบของผิวผงโลหะยังบอกถึงการเกิดออกไซด์บนผิวน้อยมาก โดยทั่วไปผงโลหะที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมจะมีความเรียบของผิวอนุภาคมากกว่าผงโลหะที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมและผงโลหะที่มีโลหะดีบุกเป็นส่วนประกอบสูง



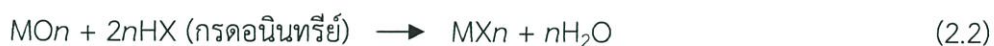
รูปที่ 2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธี Gas atomization

การเกิดออกไซด์บนผิวของผงโลหะควรเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพราะจะส่งผลต่อการบัดกรีโดยตรง ดังนั้นขณะที่ผลิตผงโลหะต้องควบคุมอย่างดีไม่ให้เกิดออกไซด์ของโลหะ จากตารางที่ 2.8 พบว่าโลหะเงิน ทองแดง และตะกั่วเป็นโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ยาก เพราะมีค่าพลังงานอิสระการเกิดออกไซด์สูง ตัวแปรที่มีผลทำให้เกิดออกไซด์ได้ง่ายคือ การใช้อุณหภูมิสูง มีความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศการผลิตสูง ขนาดอนุภาคของผงโลหะที่มีขนาดเล็กเพราะทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับออกซิเจนมากกว่าอนุภาคของผงโลหะที่มีขนาดใหญ่ และส่วนประกอบของผงโลหะ เช่น การผลิตของผงโลหะ Pb-Sn หรือ Sn-Ag-Cu ส่วนประกอบที่เป็นโลหะดีบุกจะเกิดออกไซด์ขึ้นแต่โลหะอื่นยังไม่เกิดออกไซด์ ผงโลหะหลังจากกระบวนการผลิตจะเกิดขึ้นของออกไซด์มากขึ้น ดังนั้นเพื่อลดการเกิดออกไซด์ของผงโลหะควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.8 ชนิดออกไซด์และพลังงานอิสระการเกิดออกไซด์

ชนิดออกไซด์	พลังงานอิสระการเกิดของออกไซด์ Gibb's free energy ( $\Delta G^\circ$ kJ/mol)	ชนิดออกไซด์	พลังงานอิสระการเกิดของออกไซด์ Gibb's free energy ( $\Delta G^\circ$ kJ/mol)
Ag <sub>2</sub> O	- 11.2	SnO <sub>2</sub>	- 515.8
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 493.7	PbO	- 187.9 (yellow), - 188.9 (red)
Cu <sub>2</sub> O	- 146	PbO <sub>2</sub>	-217.3
CuO	- 157.3	Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	- 796.3
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 830.7	Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	- 829.8
SnO	- 251.9	ZnO	- 320.5

3. ฟลักซ์ (Flux) เป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง โดยหน้าที่หลักคือการกำจัดออกไซด์บนผิวทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่ทำการบัดกรี และทำให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวไหลตัวได้ดีขึ้น โดยทั่วไปฟลักซ์เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ปฏิกิริยาของออกไซด์กับฟลักซ์ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2



โดย M คือโลหะ

O คือ ออกซิเจน

RCOOH คือ กรดอินทรีย์ (Carboxylic acids)

HX (กรดอนินทรีย์) และ

X คือ F, Cl หรือ Br (Halogen atom)

ตัวอย่างดังสมการที่ 2.3



ปฏิกิริยาของออกไซด์กับฟลักซ์จะเกิดได้ช้าที่อุณหภูมิห้องแต่เกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ฟลักซ์ที่เป็นกรดอินทรีย์เป็นที่นิยมมากกว่า เพราะไม่ทำให้เหลือสารจำพวกฮาโลเจนตกค้างมากเกินไปกำหนด กรดอินทรีย์ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากพอที่จะไม่ระเหยไปก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะ แต่กรดอินทรีย์ไม่ควรเหลือตกค้างในรอยบัดกรีเพราะทำให้รอยบัดกรีเกิดความบกพร่องและมีความแข็งแรงลดลงอย่างมาก

ฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วมีความแตกต่างจากฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว ดังนี้

3.1 ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยา (Flux activity) โดยทั่วไปโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วจะมีการไหลกระจายตัวขณะหลอมเหลวดีต่อยกกว่าโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว แก้ไขโดยใช้ฟลักซ์ที่มีความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น

3.2 การเข้ากันได้ของฟลักซ์และโลหะบัดกรี (Alloy compatibility) เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่ออายุใช้งานของ Solder paste และการบัดกรี ถ้าใช้ฟลักซ์ที่มีความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยามากเกินไปอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของแผงโลหะมากเกินไปและทำให้ Solder paste มีสมบัติการไหลเปลี่ยนไปในแนวโน้มที่มีความหนืดมากขึ้น

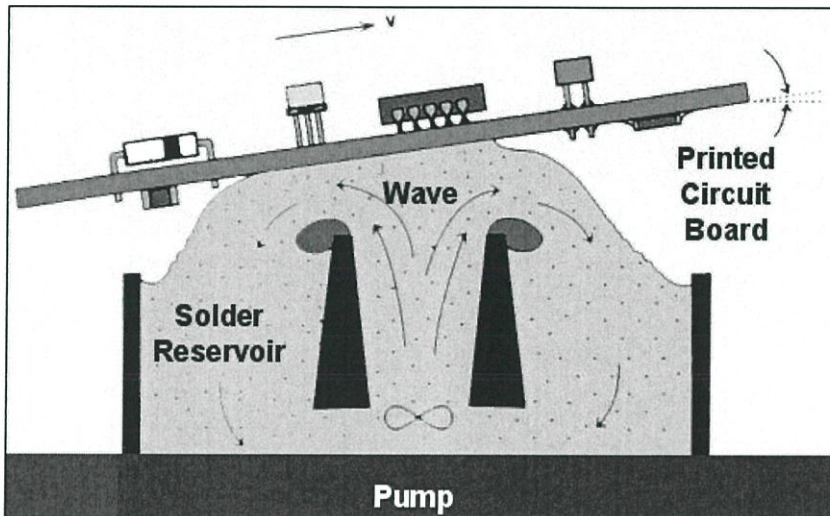
3.3 ความเสถียรภาพต่อความร้อน (Thermal stability) เนื่องจากโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูงจะมีจุดหลอมเหลวมากกว่า  $210^{\circ}\text{C}$  จึงต้องเลือกใช้ฟลักซ์ที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว

4. รีโวลอยี (Rheology) ของ Solder paste เป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตโดยตรงในขั้นตอนการพิมพ์ Solder paste ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการความรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งต้องยึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์และยึดติดส่วนประกอบที่จะวางลงบน Solder paste ได้อย่างดี

## 2.5 วิธีการบัดกรี

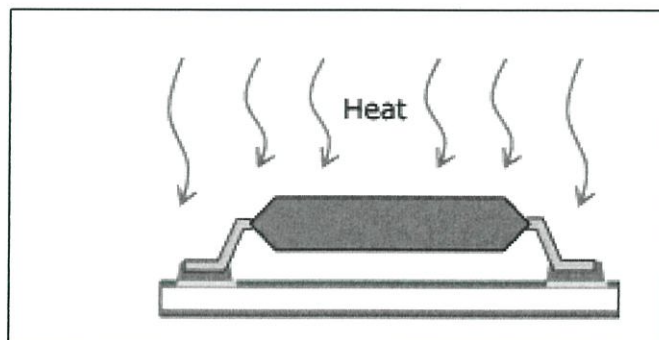
นอกเหนือจากการบัดกรีด้วยมือแล้ว ในการบัดกรีระดับอุตสาหกรรมนั้นก็มีวิธีการบัดกรีดังนี้

1. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นวิธีการบัดกรีที่นำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาเสียบบนแผ่นวงจร จากนั้นจึงนำแผ่นวงจรเคลื่อนผ่านอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ถูกทำให้เป็นคลื่นพุ่งขึ้นมาสัมผัสกับแผ่นวงจร โดยโลหะบัดกรีจะเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นวงจрдังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การบัดกรีแบบคลื่น

2. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ใน Surface Mount Technology (SMT) ซึ่งโลหะบัดกรีจะเป็นแบบครีม (Solder paste) ซึ่งจะทำให้การผสมฟลักซ์ไว้แล้ว โดยโลหะบัดกรีจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่จะทำการบัดกรีนบนแผ่นวงจร จากนั้นแผ่นวงจรจะถูกให้ความร้อนจนเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผ่นวงจรดังรูปที่ 2.6

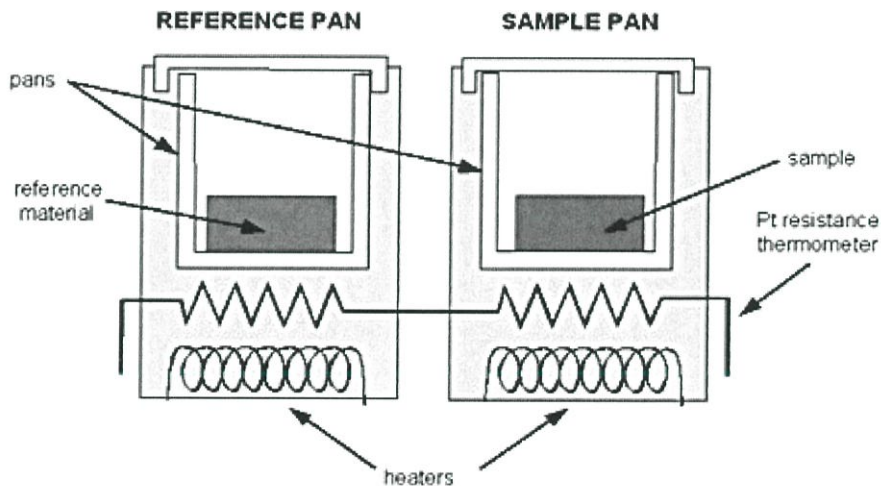


รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบรีโฟลว์

## 2.6 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การศึกษาอิทธิพลที่มีต่อจุดหลอมเหลวใช้วิธี ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) หรือที่เรียกย่อว่าเครื่อง DSC เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของสารตัวอย่าง ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำเอา 2 ถาด คือถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) และ ถาดอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่าวางอยู่ข้างกันไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ชนิดเดียวกัน ดังในรูปที่ 2.7 เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) โดยจะควบคุมให้ความร้อนถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของการทดสอบโดยวิธี Differential Scanning Calorimeter

หลังการให้ความร้อน อุณหภูมิของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจาก Sample pan มีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ Reference pan ไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ Sample pan มีสารในปริมาณที่มากกว่า Reference pan นั้นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อน Sample pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ Sample pan จะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ Reference pan คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ Furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น  $10^{\circ}\text{C}$  ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่  $25^{\circ}\text{C}$  และสิ้นสุดการทดลองที่  $300^{\circ}\text{C}$ ) หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น  $200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับ อุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere) เช่น แก๊สไนโตรเจน และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere) เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ

ความร้อนที่ให้สารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัด ในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน Sample pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ Sample pan และ Reference pan ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง Sample pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง Reference pan นั้น ขึ้นอยู่กับว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic โดยข้อมูลของเครื่อง DSC มีดังนี้

#### 1. ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

ช่วงอุณหภูมิ  $(-150^{\circ}\text{C}) - 700^{\circ}\text{C}$   
ความถูกต้องของอุณหภูมิ  $+0.2^{\circ}\text{C}$   
ความแม่นยำของอุณหภูมิ  $+0.1^{\circ}\text{C}$   
อัตราการให้ความร้อนสูงสุด 300 เคลวิน/นาที  
ความละเอียดของสัญญาณ 16 ล้านจุด

#### 2. ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

- วิเคราะห์จุดหลอมเหลว (Melting points)
- วิเคราะห์ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
- วิเคราะห์ค่าพลศาสตร์ (Kinetics)
- วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของวัสดุ (Purity of materials)
- วิเคราะห์ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability)
- วิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะ (Phase transition)
- วิเคราะห์สภาพเป็นผลึก (Crystallinity)

- วิเคราะห์สารที่มีหลายโครงสร้าง (Polymorphism)
- การดูด หรือคายพลังงาน (Desorption/Adsorption)
- การระเหย (Vaporization)

### 3. การประยุกต์ใช้งาน

- ตัวอย่างพอลิเมอร์
- ยา และเครื่องสำอาง
- ตัวอย่างทางเคมี
- สี และพิกเมนต์
- ตัวอย่างทางปิโตรเคมี และสารอินทรีย์ต่างๆ
- ส่วนประกอบในอาหาร

## 2.7 Hologram

โฮโลกราฟีเป็นเทคนิคการถ่ายภาพของภาพที่ถูกบันทึกและภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ (Reconstructed) ในสามมิติ สำหรับกระบวนการบันทึกภาพจำเป็นที่จะต้องมีการแทรกของลำแสงจากวัตถุและลำแสงอ้างอิงบนแผ่นฟิล์มถ่ายภาพสำหรับการดูภาพในสามมิติ ดังนั้นจึงใช้ลำแสงที่มองเห็นส่องบนแผ่นฟิล์มเพื่อให้เห็นเป็นภาพสามมิติ กระบวนการนี้เรียกว่า Reconstructed เนื่องจากการบันทึกภาพแบบดั้งเดิมนั้นเป็นการสลับเปลี่ยนฟิล์มถ่ายภาพ ดิจิตอลโฮโลกราฟีจึงถูกพัฒนาขึ้น ภาพถ่ายที่ถูกบันทึกด้วย CCDs และ CMOS ภาพจะประกอบไปด้วยเฟสและแอมพลิจูด ดิจิตอลโฮโลกราฟีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การตั้งค่าแบบ Off-axis และ การตั้งค่าแบบ In-line โดย The Digital In-line Holography (DIH) เป็นการตั้งค่าที่ง่ายที่สุดสำหรับการบันทึกโฮโลแกรม ซึ่ง DIH จะมีหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น Transmission, Reflection และ Total Internal Reflection (TIR) ตามปกติของโฮโลกราฟี Reflected DIH (RDIH) จำเป็นต้องมีการแทรกกันของลำแสงจากวัตถุและลำแสงอ้างอิงในกระบวนการบันทึกภาพ อย่างไรก็ตามลำแสงจะมาจากแหล่งกำเนิดเดี่ยวเท่านั้น ในการกำหนดค่าสองลำแสงสะท้อนจากวัตถุจะประกอบไปด้วยเฟสที่แตกต่างกันและภาพที่เกิดการแทรกสอดจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการที่จะตรวจสอบรัศมีความโค้งและข้อบกพร่องภายในขวดแก้วโดยใช้การตั้งค่าแบบ Digital In-line Holography (DIH) ซึ่งจะมี Interferogram เพียงตัวเดียว

โดยทั่วไปการตั้งค่าของ DH รูปแบบการแทรกสอดระหว่างคลื่นอ้างอิงและ คลื่น Image bearing จะถูกบันทึกลงบนพื้นผิวของกล้องดิจิตอลแทนแผ่นฟิล์ม รูปแบบการเลี้ยวเบนที่รับแสงจะถูกดำเนินการด้วย Numerical reconstruction โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากหลักการของ Huygens-Fresnel เมื่อแสงแพร่กระจายไปตามทิศ  $z$  ค่าสนามการกระจายแสงดังสมการที่ 2.4

$$h(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint O(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\rho)}{\rho^2} d\xi d\eta \quad (2.4)$$

ฟังก์ชันโฮโลแกรมจะหาได้จากวิธีการคอนโวลูทดังสมการที่ 2.5

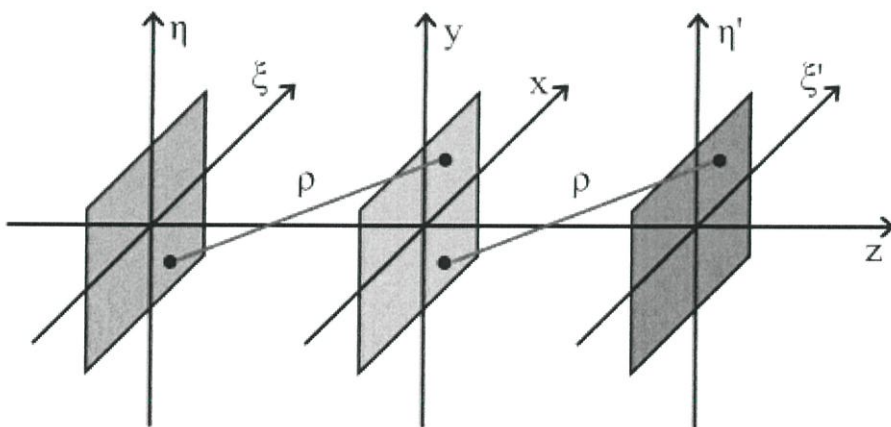
$$h(x, y) = F^{-1} \{ F[O(\xi, \eta)] \cdot F[g(\xi, \eta, x, y)] \}, \quad (2.5)$$

ผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ดังสมการที่ 2.6

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{z}{j\lambda} \frac{\exp[jk\rho]}{\rho^2}, \quad (2.6)$$

จากการใช้ Inverse Fourier Transform of Filtered Huygens – Fresnel การ Reconstruction เชิงตัวเลขของสนามแสงที่ระนาบภาพดังสมการที่ 2.7 และในรูปที่ 2.8

$$R(\xi', \eta') = F^{-1} \{ F[h(x, y)] \cdot F[g(\xi, \eta, x, y)] \}. \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.8 การ Reconstruction เชิงตัวเลขของสนามแสงที่ระนาบภาพ

## 2.8 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

Wettability เกี่ยวข้องกับแรง 2 แรงหลักๆคือ

1. แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน ในที่นี้คือ แรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเองเป็นหยด

2. แรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน ในที่นี้จะหมายถึง แรงระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็งซึ่งเป็นแรงที่ตรงข้ามกับแรงเชื่อมแน่น คือแรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกันและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง

เกณฑ์ในการแบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดี มีเกณฑ์ดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิวของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด

2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เกิดการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้างแต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง

3. มุมสัมผัสมีตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา เรียกว่า ผิวเปียกยาก คือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆที่ฐานของหยดที่ของเหลวยังคงแตะกับผิวของแข็ง

4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา เรียกว่า ผิวไม่เปียก เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลมซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ

### 2.8.1 ตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : $S_f$ )

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$S_f = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย (mm)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ เมื่อ  $D=1.24V^{1/3}$

โดย  $V$  คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ

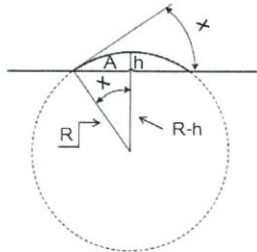
### 2.8.2 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : $S_r$ )

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (2.9)$$

### 2.8.3 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10



$$\sin x = \frac{2}{\left(\frac{A}{h} + \frac{h}{A}\right)} \quad (2.10)$$

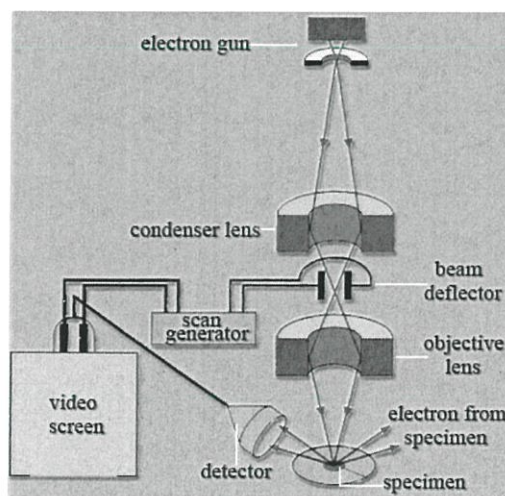
เมื่อ  $x$  คือ มุมสัมผัส (องศา)

$A$  คือ รัศมีของโลหะบัดกรี (mm)

$h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรี (mm)

### 2.9 การศึกษาอิทธิพลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี

การศึกษาอิทธิพลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายน้อยกว่าเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจดังในรูปที่ 2.9 ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

หลังจากเราศึกษาทางกายภาพแล้ว เรามาศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS/EDX กันต่อ โดยเราวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เราจะทราบว่า มีธาตุ Element อะไรบ้างแต่มีมากน้อยกี่% เราจะไม่ทราบ ซึ่งเราจะต้องวิเคราะห์เชิงปริมาณกันต่อ ซึ่งจะได้ผลแบบ Element% และแบบ Compound% การวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถทำได้โดยวิธี

1. Mapping จะใช้วิธีการยิงเป็นจุด เพื่อจะให้ทราบตำแหน่งธาตุว่าอยู่ส่วนไหนของตัวอย่างได้
2. Line scan เราสามารถกำหนดเส้นบนตำแหน่งที่เราสนใจต้องการ ทราบว่ามีอะไร ณ ตำแหน่งที่เราลากเส้นผ่านได้

เครื่อง EDS/EDX มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดีของเครื่อง EDS/EDX

1. สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ
2. สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ B โบรอน -U ยูเรเนียม
3. สามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว 3-5 นาที
4. สามารถวิเคราะห์แบบ Mapping และ Line scan ได้อย่างรวดเร็ว 3-5 นาที
5. เครื่องราคาไม่แพงมาก (2.5-5 ล้านบาท)
6. ค่าบำรุงรักษาเครื่องไม่แพง
7. End User สามารถ Calibrate ได้เอง และสามารถทำได้ง่าย

ข้อเสียของเครื่อง EDS/EDX

1. สเปกตรัมเกิดพีคซ้อน Peak overlap ง่าย
2. สเปกตรัมพีคค่อนข้างกว้าง (Resolution 115-133 ev.)
3. จะต้องติดตั้งกับเครื่อง SEM, FE-SEM, TEM, EPMA
4. สามารถวิเคราะห์ธาตุ ที่มีปริมาณธาตุตั้งแต่ 0.1 wt% ขึ้นไป

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการ

ในการจัดทำปฏิญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนและอินเดียมในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 เป็นการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และอินเดียม ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	เดือน									
	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน
1.ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2.วางแผนการทดสอบและเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ										
3.จัดท้าวสคฺ เตรียมชิ้นงานและทำการทดสอบ										
4.ตรวจสอบและวิเคราะห์จุดหลอมเหลวและความสามารถในการเปียก										
5.ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี										
6.สรุปผลการทดสอบ										
7.รวบรวมเนื้อหาและทฤษฎีสำหรับทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์										

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบมีการเตรียมสารเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบโดยการผสม SAC305 กับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และอินเดียม ลงในบีกเกอร์โดยใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดสอบ

Solder paste	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)
SAC305	0.00	0.00
	0.05	0.00
	0.10	0.00
	0.50	0.00
	1.00	0.00
	0.05	0.50
	0.10	0.50
	0.50	0.50
	1.00	0.50

จากรูปที่ 3.1 ทำการเตรียมสารโดยใช้แท่งแก้วคนเพื่อให้อนุภาคนาโนและอินเดียมได้กระจายตัวเข้ากับโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 อย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที



รูปที่ 3.1 การเตรียมสารในแต่ละอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 97% ขนาด 30 mm x 30 mm x 0.35 mm ทำโดยใช้เครื่องตัดแผ่นโลหะ ทำความสะอาดผิวโดยจุ่มลงในสารละลาย ของกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) และเมทานอล (CH<sub>3</sub>OH) ในอัตราส่วน 3:1 ล้างน้ำให้สะอาดแล้วเป่าแผ่นทองแดงให้แห้ง วัสดุและอุปกรณ์ในการเตรียมแผ่นทองแดง ดังในรูปที่ 3.2



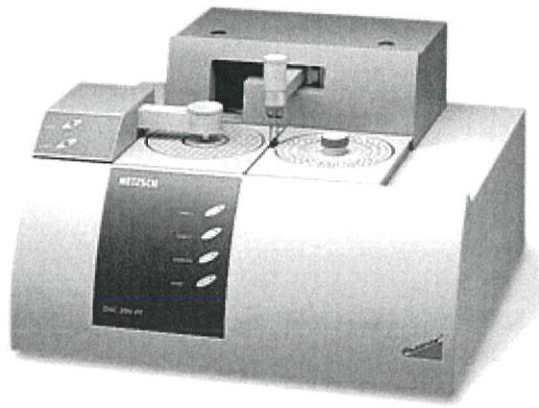
รูปที่ 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมทองแดง

### 3.2 การทดสอบ

นำโลหะบัดกรีแบบครีมที่ผสมแล้วมาอัดลงในบล็อกที่เตรียมไว้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5mm สูง 1.24 mm (ปริมาตร 0.041 cm<sup>3</sup>) ลงบนแผ่นรองทองแดง ให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที เริ่มจับภาพเมื่อโลหะบัดกรีหลอมเหลวจนกระทั่งแข็งตัวจากนั้นปล่อยให้ขึ้นทดสอบเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการถ่ายภาพโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังการหลอม ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ

#### 3.2.1 การศึกษาเรื่องอุณหภูมิจุดหลอมเหลว

ในการศึกษาเรื่องอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (ในรูปของอุณหภูมิโซลิดัส และ อุณหภูมิลิควิดัส) ทำโดยการนำสารที่เตรียมไว้ในแต่ละส่วนผสมไปทดสอบโดยใช้ Different Scanning Calorimeter (DSC) เครื่องที่ใช้ทดสอบเป็น NETZSCH DSC 204 การทดสอบจะทดสอบภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> โดยอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10°C/min ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Different Scanning Calorimeter (DSC)

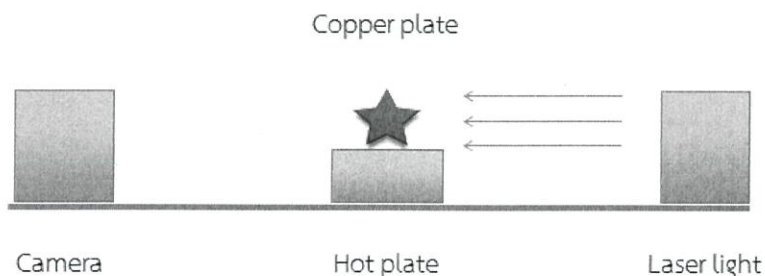
### 3.2.2 การศึกษาความสามารถในการเปียก

ในการศึกษาเรื่องความสามารถในการเปียกจะใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle), ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) และค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) ในการอธิบายถึงความสามารถในการเปียกของสารแต่ละส่วนผสม

ในการหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) จะมีการถ่ายภาพด้านข้างของโลหะบัดกรีหลังการหลอมแล้วทำการปรับโฟกัสของภาพด้วย Hologram จากนั้นนำมาหาค่ามุมสัมผัสโดยโปรแกรม Solidwork ซึ่งค่ามุมสัมผัสจะบอกถึงความสามารถในการเปียก หากมีค่ามุมสัมผัสน้อยแสดงว่าความสามารถในการเปียกดี ในทางตรงกันหากค่ามุมสัมผัสมากแสดงว่าความสามารถในการเปียกนั้นไม่ดี

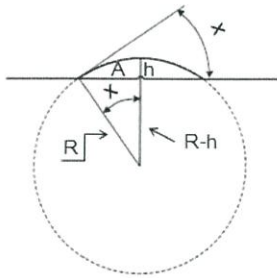
#### 3.2.2.1 การถ่ายภาพโลหะบัดกรี (Hologram)

จากรูปที่ 3.4 ทำการถ่ายรูปจากด้านข้างของโลหะบัดกรี แล้วนำมาทำการปรับโฟกัสเพื่อจะได้ความคมชัดของภาพมากที่สุด เพื่อหาค่ามุมสัมผัสดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ภาพการจำลอง Hologram

### 3.2.2.2 หาค่ามุมสัมผัส (Contact angle)



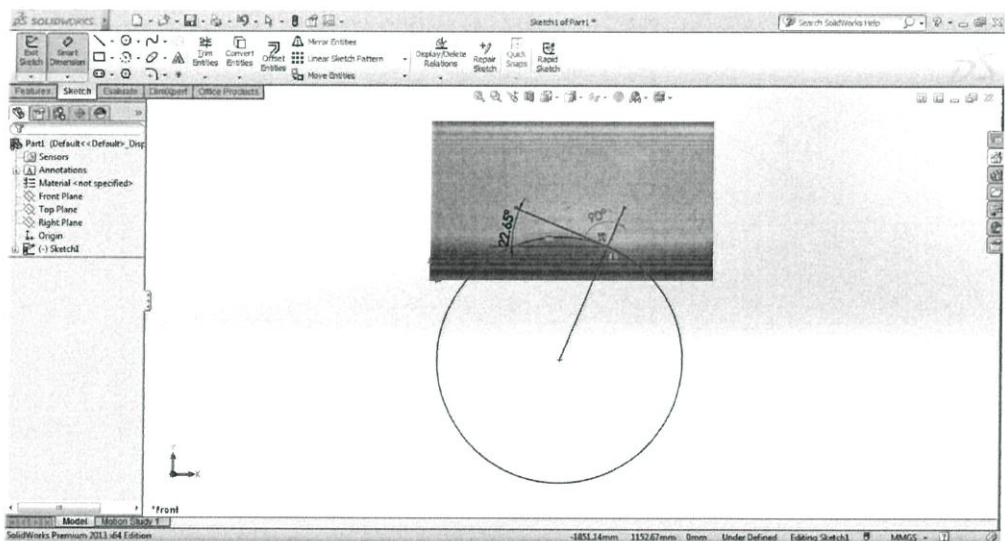
$$\sin x = \frac{2}{(A/h + h/A)} \quad (3.1)$$

เมื่อ x คือ มุมสัมผัส (องศา)

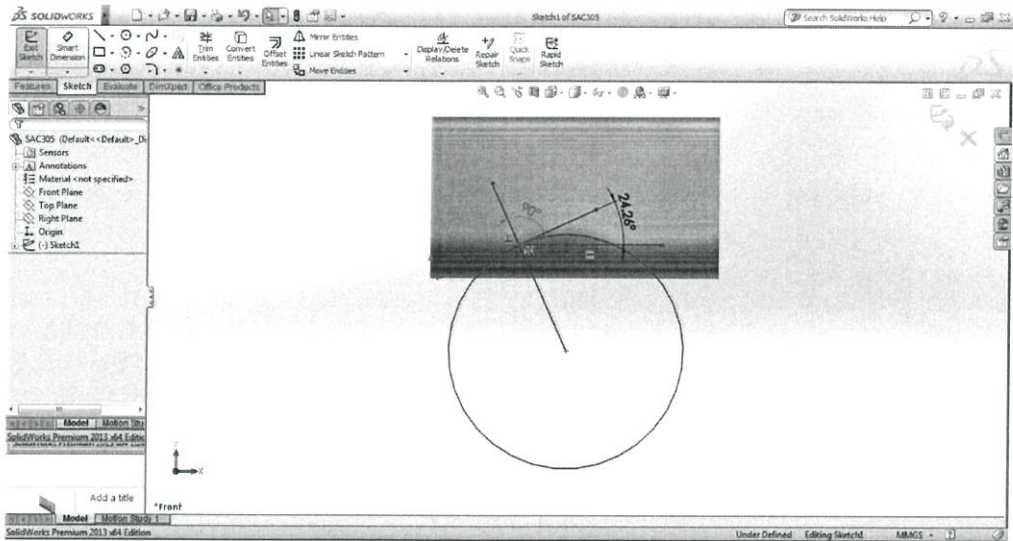
A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี (mm)

h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี (mm)

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 นำภาพที่ได้จากการปรับโฟกัสมาทำการทดสอบหาความสามารถในการเปียก คือการหาค่า Contact angle ทั้งด้านขวาและด้านซ้ายโดยนำภาพที่ได้มาเข้าโปรแกรม Solidwork 2013 เพื่อจำลองส่วนของวงกลมของรอยโลหะบัดกรีดังนี้



รูปที่ 3.5 การหา Contact angle ทางด้านขวาของรอยบัดกรี



รูปที่ 3.6 การหา Contact angle ทางด้านซ้ายของรอยบัดกรี

ในการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) ทำโดยการนำโลหะบัดกรีหลังการหลอมมาวัดค่าความสูง โดยใช้ไมโครมิเตอร์ จากนั้นแทนค่าตามสมการที่ 3.2

### 3.2.2.3 หาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : $S_f$ )

$$S_f = \frac{D-h}{D} \times 100 \quad (3.2)$$

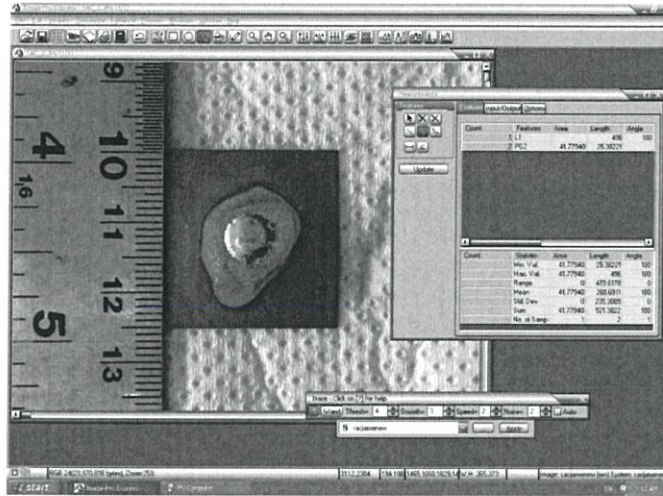
เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย (mm)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ (mm)

โดย  $V$  คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ ( $\text{mm}^3$ )

หมายเหตุ : ค่า  $h$  ได้จากการวัดความสูงของโลหะบัดกรีหลังหลอมบนแผ่นรองทองแดงด้วยไมโครมิเตอร์

ในการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) ทำโดยการหาค่าพื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอมซึ่งสามารถใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการคำนวณ แสดงการคำนวณค่าพื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอมโดยโปรแกรม Image-Pro Express ในรูปที่ 3.7 จากนั้นทำการหาพื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอม โดยค่า  $D$  ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดบล็อกที่ใช้ในการเติมโลหะบัดกรีแบบครีมก่อนทำการหลอม ซึ่งมีค่า  $D = 6.5 \text{ mm}$  จากนั้นหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัวโดยแทนในสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.7 การหาพื้นที่ของโลหะบัดกรีด้วยโปรแกรม Image-Pro Express

### 3.2.2.4 หาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : $S_r$ )

โดยแทนค่าตามสมการที่ 3.3

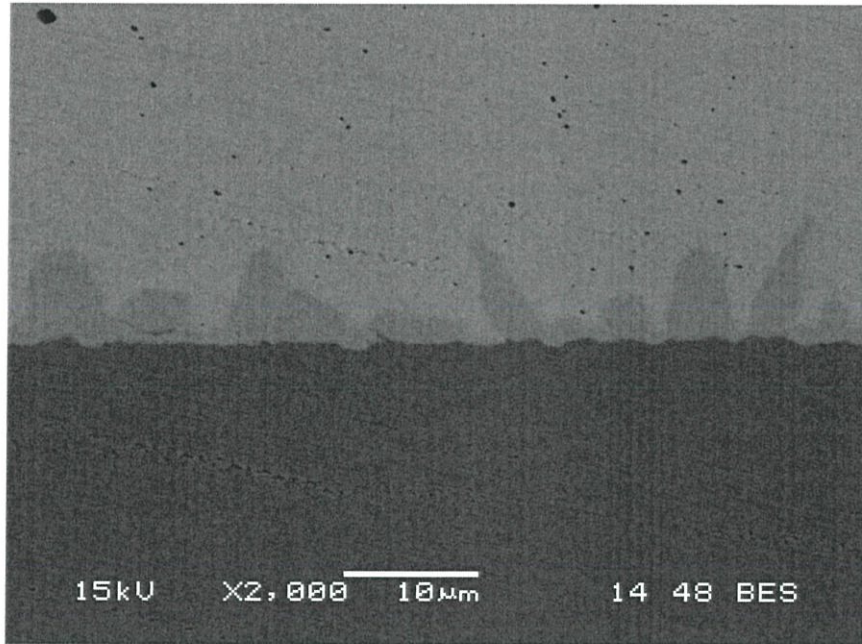
$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original pellet}} \quad (3.3)$$

เมื่อ Plan area of spread on the substrate surface คือ พื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอม สามารถหาโดยโปรแกรม Image-Pro Express

Plan area of the original pellet คือ พื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอม หาพื้นที่ก่อนการหลอม โดยหาค่า D จากเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดบล็อกที่ใช้ในการเติมโลหะบัดกรีแบบครีมก่อนทำการหลอมซึ่งมีค่า  $D = 6.5 \text{ mm}$

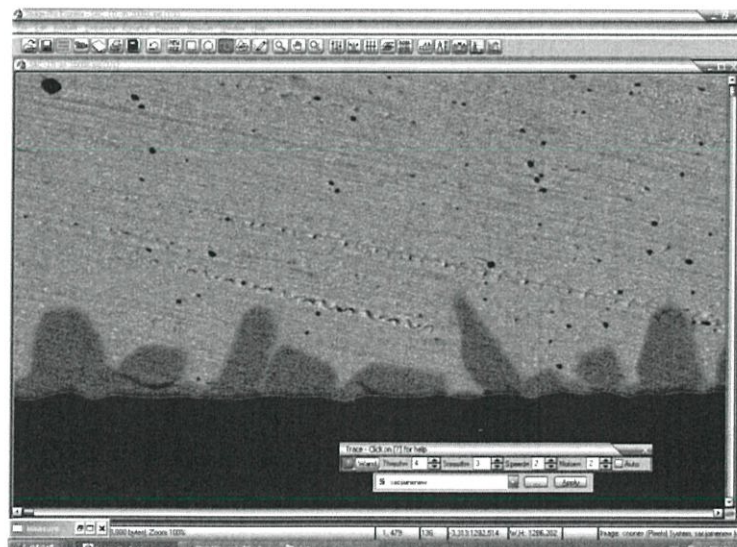
### 3.2.3 การศึกษาเรื่องโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดงจะศึกษาเกี่ยวกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราส่วนของโลหะบัดกรี โดยใช้ภาพถ่ายจาก SEM และ EDX ในการศึกษา จากรูปที่ 3.8 ตัวอย่างภาพถ่ายจาก SEM ของ SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  1 wt% + In 0.5 wt%

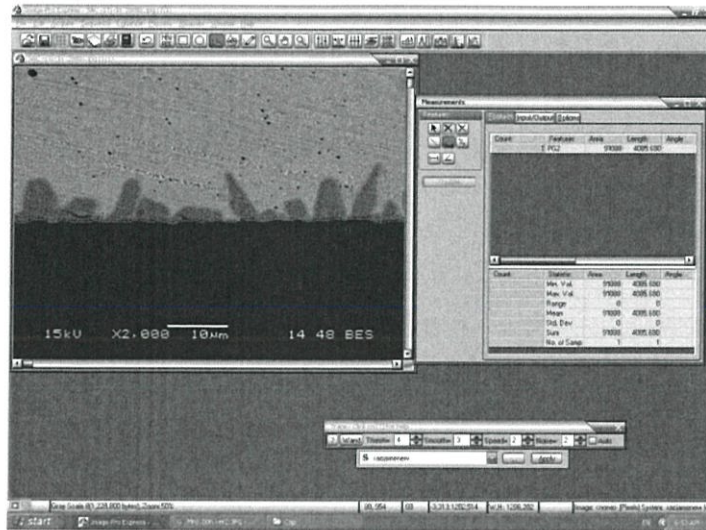


รูปที่ 3.8 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  1 wt% + In 0.5 wt%

ภาพถ่ายที่ได้จาก SEM เราจะนำมาศึกษาชั้นความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราส่วนของโลหะบัดกรี โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จากรูปที่ 3.9 และ 3.10 แสดงการหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยโปรแกรม Image-Pro Express

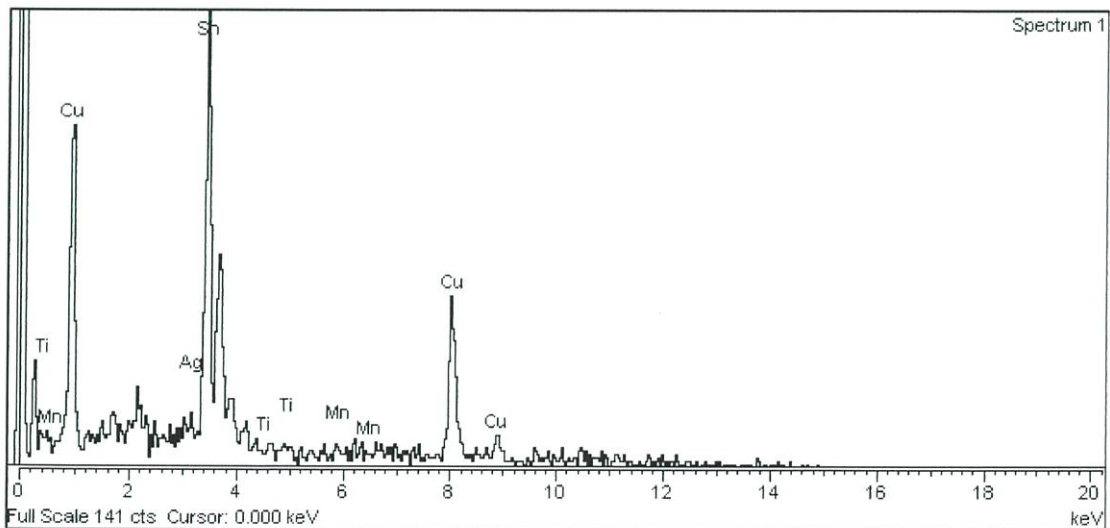


รูปที่ 3.9 การหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยโปรแกรม Image-Pro Express



รูปที่ 3.10 การหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยโปรแกรม Image-Pro Express

การศึกษาโดย EDX ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ สามารถบอกถึงธาตุที่เกิดขึ้นในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของธาตุในโลหะบัดกรีหลังการหลอมเพื่อศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 3.11 อธิบายได้ว่าการยิงสเปกตรัมครั้งที่ 1 บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ มีธาตุ Cu เท่ากับ 38.43 ร้อยละโดยมวล และมีธาตุ Sn เท่ากับ 59.56 ร้อยละโดยมวล



รูปที่ 3.11 ภาพจากการศึกษาโดย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1 wt% + In 0.5 wt% spectrum 1

ก่อนการนำชิ้นตัวอย่างไปทำการทดสอบโดยกล้อง SEM จากรูปที่ 3.12 ต้องมีการเตรียมชิ้นงาน โดยการผ่าครึ่งของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงหลังการหลอมด้วยเครื่องตัดโลหะ จากนั้นทำการหล่อ เรซินโลหะบัดกรีที่ผ่าครึ่งแล้ว ปล่อยให้แห้งให้เรซินแห้งสนิท และขัดชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้เครื่องขัด ดังในรูปที่ 3.13

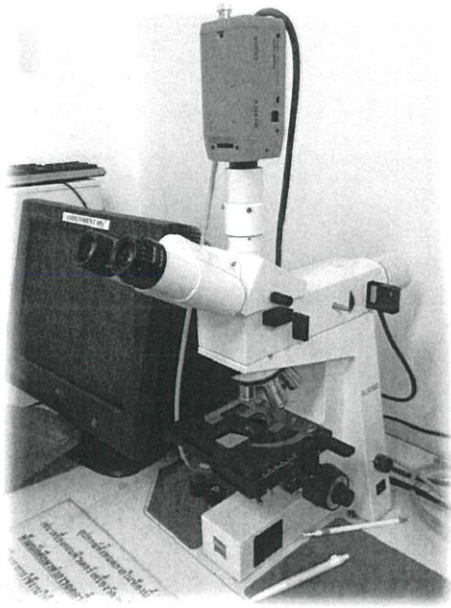


รูปที่ 3.12 เครื่องตัดโลหะใช้ในการผ่าครึ่งโลหะบัดกรี บนแผ่นรองทองแดงหลังการหลอม

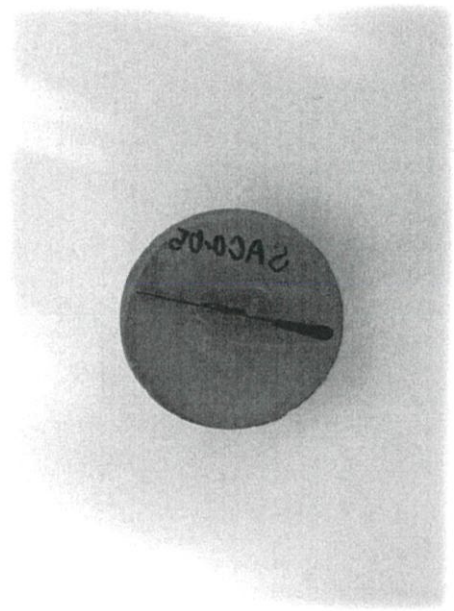


รูปที่ 3.13 เครื่องขัดใช้ในการหน้าตัดของ ชิ้นงานที่หล่อในเรซิน

จากนั้นนำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ดังในรูปที่ 3.14 เพื่อตรวจสอบรอยพื้นๆที่หน้าตัดของ ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขัดเนื่องจากการขัดอาจทำให้เกิดรอยบนพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีการนำไปส่องกล้อง SEM ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากรอยในการขัด จากรูปที่ 3.15 จะได้ชิ้นงานที่พร้อมนำไปทดสอบ ด้วยกล้อง SEM



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์ใช้ในการส่องดูรอยการขีด  
ก่อนนำไปทดสอบ SEM



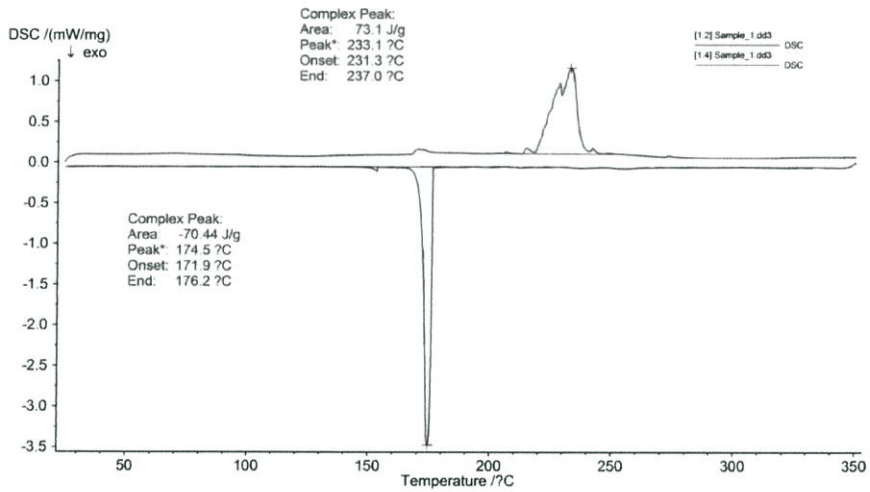
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานตัวอย่าง

# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

### 4.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว

จากการนำชิ้นงานในแต่ละส่วนผสมไปทดสอบโดยใช้ Different Scanning Calorimeter (DSC) ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (ในรูปของอุณหภูมิโซลิดัสและอุณหภูมิลิควิดัส) ดังรูปที่ 4.1 โดยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวในรูปของอุณหภูมิโซลิดัสและอุณหภูมิลิควิดัสทั้งหมดดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวและแสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวหมดของโลหะบัดกรี

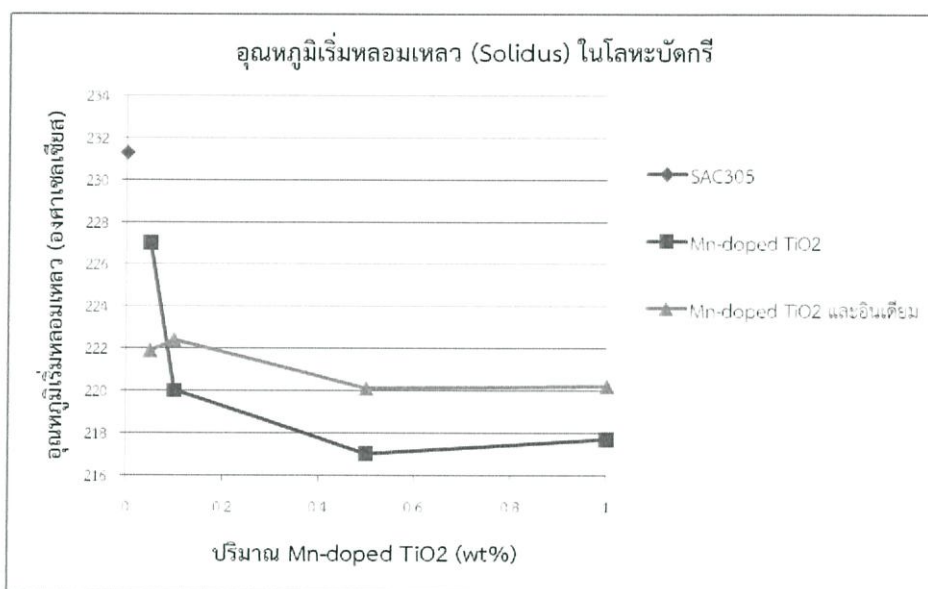
Solder paste	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)	Solidus (°C)	Liquidus (°C)
SAC305	0.00	0.00	231.3	233.1
	0.05	0.00	227.0	231.2
	0.10	0.00	220.0	227.0
	0.50	0.00	217.0	232.0
	1.00	0.00	217.7	230.2
	0.05	0.50	221.9	227.2
	0.10	0.50	222.4	226.9
	0.50	0.50	220.1	229.4
	1.00	0.50	220.2	230.6

จากผลการหาอุณหภูมิจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC และโลหะบัดกรีผสมจากรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิโซลิดัส SAC305 มีค่า 231.3°C เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ปริมาณเท่ากับ 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt%, และ 1.0 wt% ตามลำดับ ส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีเป็น 227.0°C, 220.0°C, 217.0°C และ 217.7°C ตามลำดับ พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะพื้นฐานเมื่อเติมธาตุอินเดียมในปริมาณ 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของโลหะบัดกรีส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสมีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมอินเดียม

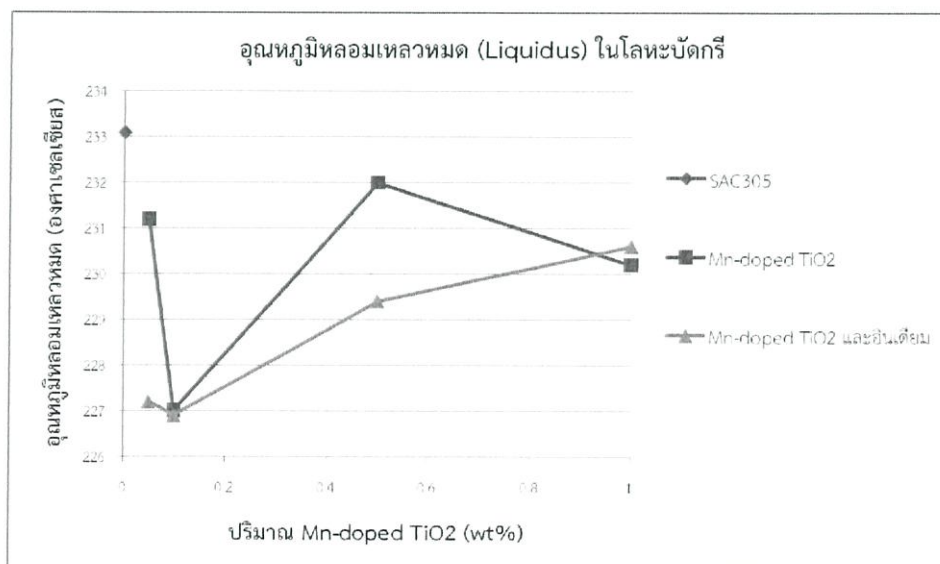
จากรูปที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิลiquidus SAC305 มีค่า 231.3°C เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ตามส่วนผสม พบว่าอุณหภูมิลiquidusมีค่าเป็น 231.2°C, 227°C, 232°C และ 230.2°C ตามลำดับ สรุปได้ว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> มีผลทำให้อุณหภูมิลiquidusลดลง เมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐาน แต่ปริมาณของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหมด ซึ่งผลการวิจัยคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Tay [5] ที่ทำการทดสอบอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่ผสมอนุภาคนาโน Ni โดยผลจาก DSC พบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมธาตุอินเดียมในปริมาณ 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของโลหะบัดกรี จากการเปรียบเทียบระหว่างโลหะบัดกรีผสมที่เติมธาตุอินเดียมและโลหะบัดกรีผสมที่ไม่ได้เติมอินเดียม พบว่าโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> ปริมาณเท่ากับ 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1.0 wt% เมื่อเติมอินเดียมจะทำให้อุณหภูมิลiquidusเปลี่ยนแปลงจาก 231.2°C เป็น 227.2°C ,จาก 227°C เป็น 226.9°C ,จาก 232°C เป็น 229.4°C และจาก 230.2°C เป็น

230.6°C ซึ่งสรุปได้ว่า เมื่อทำการเติมอินเดียมลงในแต่ละส่วนผสมแนวโน้มของอุณหภูมิวิกฤตจะมีความต่ำกว่าโลหะบัดกรีผสมที่ไม่ผสมธาตุอินเดียม

จากผลอุณหภูมิโซลิดัสและลิกวิดัส พบว่าโลหะบัดกรีผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> มีอุณหภูมิโซลิดัสที่ต่ำกว่า แต่อุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า โลหะบัดกรีผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> ที่เติมอินเดียม สรุปได้ว่าโลหะบัดกรีผสมที่เติมอินเดียมมีช่วงการอุณหภูมิการหลอมเหลวแคบกว่าโลหะบัดกรีผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> อย่างเดียว



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวในโลหะบัดกรี



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวหมดในโลหะบัดกรี

## 4.2 ความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีจะถูกพิจารณาในรูปของค่ามุมสัมผัส ( $\theta$ ) ค่าตัวประกอบการกระจาย และอัตราส่วนของการกระจาย การที่จะอธิบายเรื่องความสามารถในการเปียกนั้น เราได้ทำการหาค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมหลังทำการหลอม โดยเราทำการทดสอบ ส่วนผสมละ 3 ครั้ง และมีการหาค่ามุมสัมผัสของทั้งด้านซ้ายและขวาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด โดยค่ามุมสัมผัสจากการทดสอบเฉลี่ยครั้งที่ 1, 2 และ 3 ดังตารางที่ 4.2

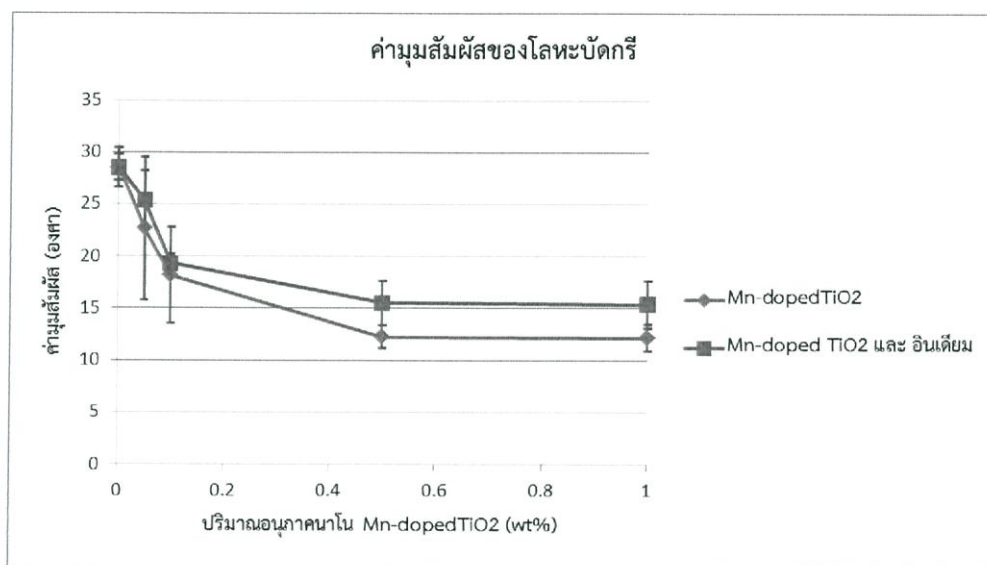
### 4.2.1 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง

Solder paste	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)	ค่ามุมสัมผัส (องศา)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ยรวม
SAC305	0.00	0.00	28.785	30.27	26.545	28.533
	0.05	0.00	25.83	27.345	14.775	22.65
	0.10	0.00	18.095	22.775	13.555	18.142
	0.50	0.00	13.505	11.74	11.55	12.265
	1.00	0.00	13.635	11.465	11.385	12.162
	0.05	0.50	25.575	22.42	28.085	25.36
	0.10	0.50	20.72	17.82	19.365	19.302
	0.50	0.50	13.065	14.74	18.755	15.52
	1.00	0.50	18.47	11.73	15.875	15.358

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่ามุมสัมผัส ( $\theta$ ) จะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีจะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วถึงปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0.5 wt% จากงานวิจัยหลายงานวิจัยพบว่ามุมสัมผัสจะลดลง เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.C. Tsao และคณะ [2] โดยโลหะบัดกรีพื้นฐานที่ใช้เป็น Sn<sub>3.5</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 250 °C พบว่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีพื้นฐานมีค่า 28.533 องศา และมุมสัมผัสจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรีพื้นฐานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมฮาตุอินเดียมจะพบว่ามุมสัมผัส เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพียงชนิดเดียวจะมีค่ามากกว่าโลหะบัดกรีที่ยังไม่ได้เติมอินเดียม แต่ยังคงมีค่ามุมสัมผัสต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน (SAC305)

จากผล DSC อาจสรุปได้ว่าโลหะบัดกรีผสมที่เติมอินเดียมมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่าโลหะบัดกรีผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียวแต่ตัวโลหะบัดกรีมีความสามารถในการเปียกน้อยกว่าโลหะบัดกรีผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> อย่างเดียว อาจเนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่หลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่เติมอินเดียมมีค่าแคบกว่าโลหะบัดกรีผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> อย่างเดียว



รูปที่ 4.4 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

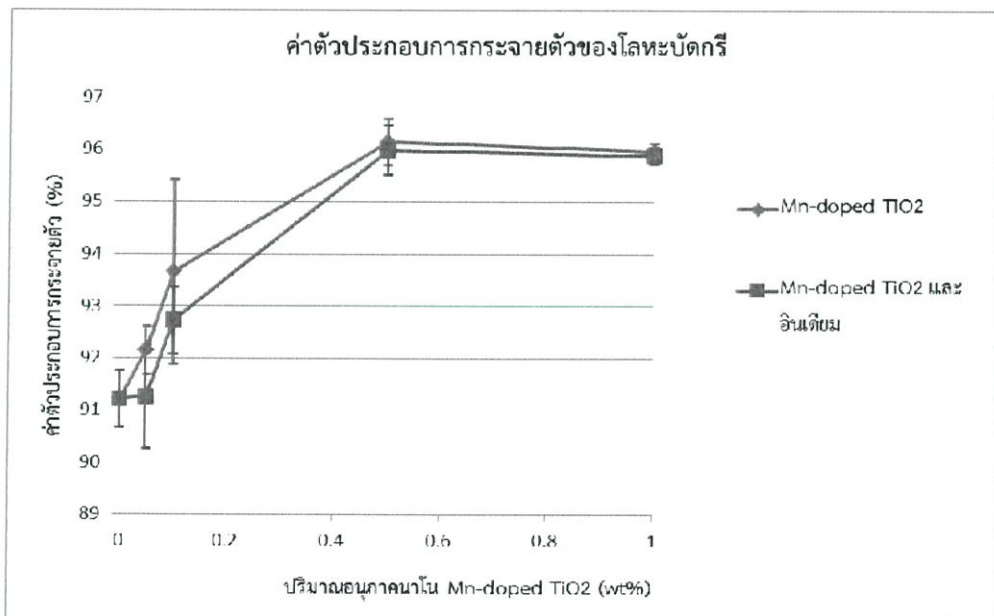
#### 4.2.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor : S<sub>f</sub>)

ในการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว ได้ทำการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมหลังทำการหลอม โดยทำการทดสอบขึ้นงานละ 3 ครั้ง ค่าตัวประกอบการกระจายตัวดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

Solder paste	Nano-particles will be added		Spread factor (%)			
	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
SAC305	0	0	90.73609677	91.79455622	91.09192902	91.22126948
	0.05	0	91.92917842	92.65745876	91.80501004	92.14939983
	0.1	0	91.74951273	93.41987488	95.29439421	93.65462701
	0.5	0	96.17069292	95.66017566	96.54902312	96.16078732
	1	0	96.08895191	95.7874295	96.01105926	95.96908614
	0.05	0.5	91.87441902	91.76750669	90.10217248	91.25916303
	0.1	0.5	92.0168815	93.28320569	92.82137771	92.71665702
	0.5	0.5	95.42633444	96.32649719	96.11581906	95.98971651
	1	0.5	95.8478344	96.05599507	95.76008426	95.89081437

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมธาตุอินเดียมจะพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายตัว เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพียงชนิดเดียวจะมีค่าน้อยกว่าโลหะบัดกรีที่ยังไม่ได้เติมอินเดียม แต่ยังคงมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน (SAC305)



รูปที่ 4.5 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

### 4.2.3 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio : $S_r$ )

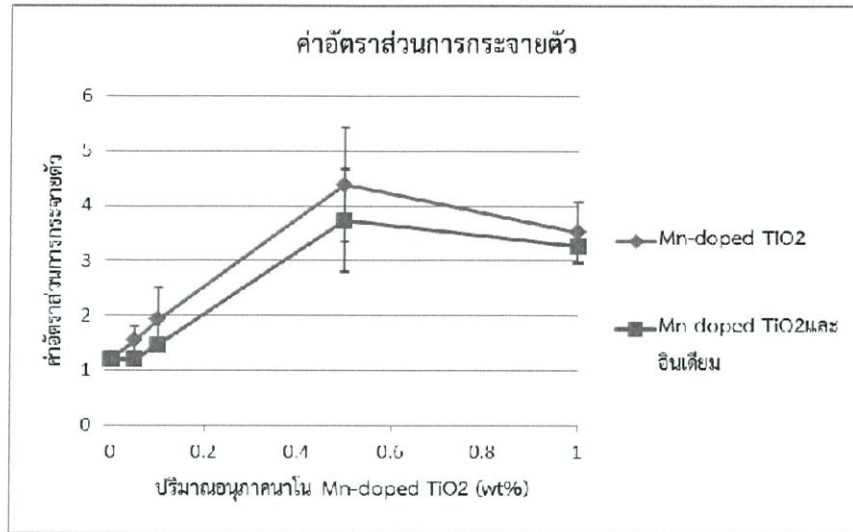
ในการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว ได้ทำการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีในส่วนผสมต่างๆหลังการหลอม โดยทำการทดสอบชิ้นงานละ 3 ครั้ง ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

Solder paste	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)	Spread ratio			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
SAC305	0.00	0.00	1.157159068	1.260036998	1.190202983	1.20246635
	0.05	0.00	1.238683497	1.727743315	1.665539939	1.543988917
	0.10	0.00	1.310583096	1.995998666	2.468940787	1.925174183
	0.50	0.00	4.964645295	3.175705942	5.018226357	4.386192531
	1.00	0.00	3.682383919	2.905871505	3.974014676	3.5207567
	0.05	0.05	1.254344217	1.189429104	1.162181897	1.201985073
	0.10	0.05	1.399207385	1.463628468	1.522990575	1.461942143
	0.50	0.05	2.749290511	3.823655134	4.607230356	3.726725334
	1.00	0.05	2.982372803	3.580776608	3.235055697	3.266068369

จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าอัตราส่วนการกระจายตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่เกิน 0.5 wt% เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เกิน 0.5 wt% พบว่าทำให้ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการเติมอินเดียมในโลหะบัดกรีส่งผลให้ค่าอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่ไม่มีการเติมอินเดียม

จากงานวิจัยของ Nai [3,4] ก็ได้มีการปรับปรุงความสามารถในการเปียก โดยการเติมอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปในโลหะพื้นฐาน Sn3.5Ag0.5Cu ซึ่งจากผลการวิจัยสามารถบอกได้ว่าอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> สามารถปรับปรุงความสามารถในการเปียก ในขณะที่อินเดียมไม่สามารถช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub>



รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว

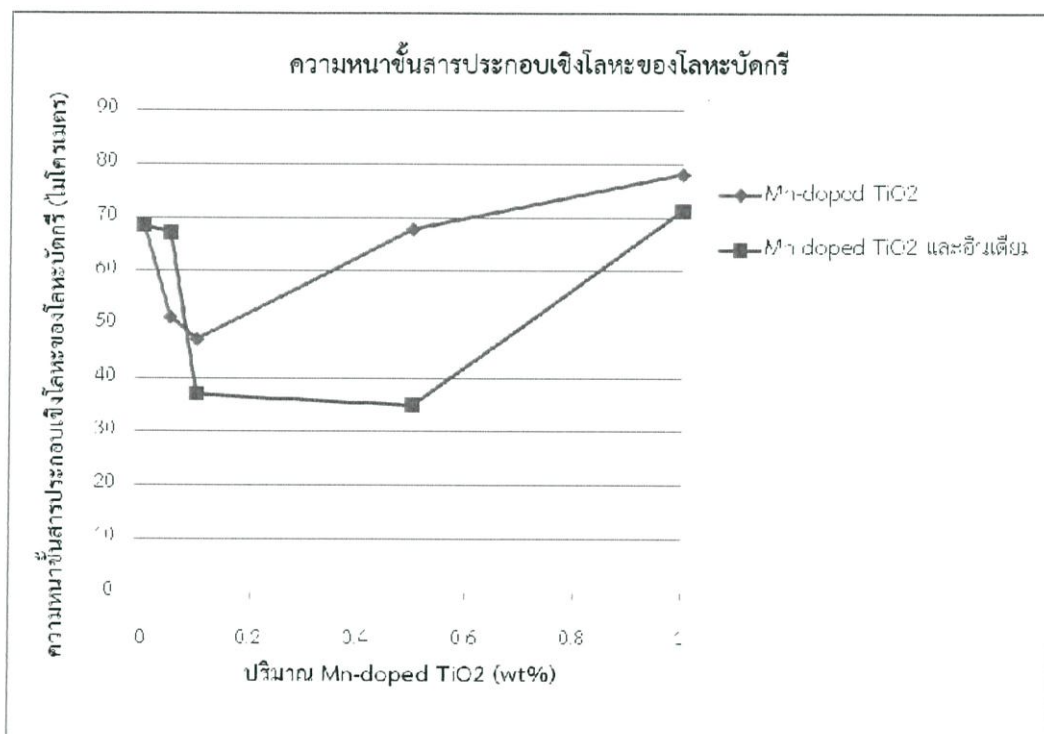
#### 4.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง

จากการศึกษาด้วย EDX พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นรองทองแดงและโลหะบัดกรีนั้นเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Cu และ Sn โดยภาพถ่ายที่ได้จาก SEM เราจะนำมาศึกษาชั้นความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการหาความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Solder paste	Mn-doped TiO <sub>2</sub> (wt%)	In (wt%)	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm)
SAC305	0.00	0.00	68.50625978
	0.05	0.00	51.37480438
	0.10	0.00	47.24491393
	0.50	0.00	67.84428795
	1.00	0.00	78.11111111
	0.05	0.50	67.13536776
	0.10	0.50	36.9827856
	0.50	0.50	34.94366197
	1.00	0.50	71.27386541

จากรูปที่ 4.7 อธิบายได้ว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะลดลง เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่เกิน 0.1 wt% และมีแนวโน้มความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เกิน 0.1 wt% โดยอนุภาคนาโนจะมีอิทธิพลกับปฏิกิริยาจูดร่วมสัมผัสและระงับการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [6] อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากลงในโลหะบัดกรีก็จะทำให้ความสามารถในการระงับการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะลดลงทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเติมอินเดียมในโลหะบัดกรีส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าน้อยกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมอินเดียม



รูปที่ 4.7 ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และอินเดียม ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC 305 กับแผ่นรองทองแดงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรีมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐาน (SAC305) แต่ปริมาณของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปพบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลว และการเติมอินเดียมมีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีผสม โดยอุณหภูมิหลอมเหลวจะมีแนวโน้มต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และโลหะบัดกรีพื้นฐาน (SAC305)

2. การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรีสามารถเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ในขณะที่การเติมอินเดียมลงไปโลหะบัดกรีที่มีการผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่มีผลต่อความสามารถในการเปียก

3. ปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ไม่เกิน 0.1 wt% มีผลทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะลดลง แต่เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่ามากขึ้น โดยอินเดียมมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งจะทำความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> และโลหะบัดกรีพื้นฐาน (SAC305)

#### 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบด้านอื่นๆของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO<sub>2</sub> ที่มีต่อโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 เช่น การใช้งานที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติหลังจากการบ่มด้วยความร้อน การต้านทานความล้า เป็นต้น การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเมื่อราคาต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่ใช้อนุภาคนาโนชนิดอื่น

## บรรณานุกรม

- [1] กรกนก เทียมกัน, กานต์ชนก แซ่หลิน. “การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu.” ปรินญาณิพนธ์ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2556
- [2] L.C. Tsao, B. C. Wang, C. W. Chang, Effect of Nano-TiO<sub>2</sub> addition on Wettability and Interfacial Reactions of Sn0.7Cu Composite Solder/Cu Solder Joints, 2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging
- [3] Nai S.M.L, Wei J., Gupta M., Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes, Materials Science & Engineering A, 2006, 423, pp:166-169
- [4] Nai S.M.L, Wei J., Gupta M., Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites, Thin Solid Films, 2006, 504, pp:401-404
- [5] S.L. Tay , A.S.M.A. Haseeb, Mohd Rafie Johan, P.R. Munroe, M.Z. Quadir, Influence of Ni nanoparticle on the morphology and growth of interfacial intermetallic compounds between Sn3.8Ag0.7Cu lead-free solder and copper substrate, Intermetallics 33 (2013) 8e15
- [6] Yi L., XiuChen Z., Yong W., Ying L., 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, 2014, Online
- [7] <http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/MAN032.pdf>
- [8] <http://www.dosem24hr.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539546386&Ntype=8>
- [9] [http://www.eng.mut.ac.th/article\\_detail.php?id=31](http://www.eng.mut.ac.th/article_detail.php?id=31)
- [10] <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [11] [http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\\_j/2544\\_49\\_155\\_p21-23.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2544_49_155_p21-23.pdf)
- [12] [http://www.mut.ac.th/uploaded/picture/knowledge/egg\\_pdf6.pdf](http://www.mut.ac.th/uploaded/picture/knowledge/egg_pdf6.pdf)
- [13] <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletronmicroscopysem.html>
- [14] [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=559](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=559)

## บรรณานุกรม (ต่อ)

[15] <http://www.oknation.net/blog/DoSEM/2012/12/21/entry-1>

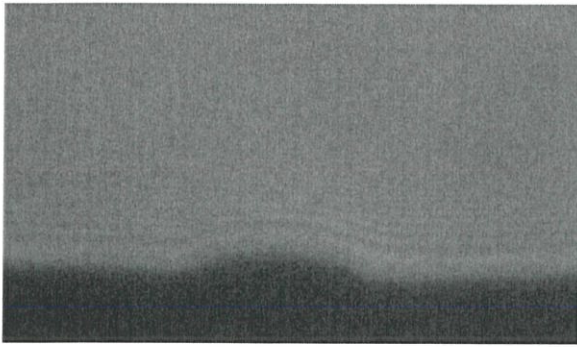
[16] <http://www.pe.kmutnb.ac.th/book/data/1-2555%20B1.pdf>

[17] [www.thaigov.go.th](http://www.thaigov.go.th)

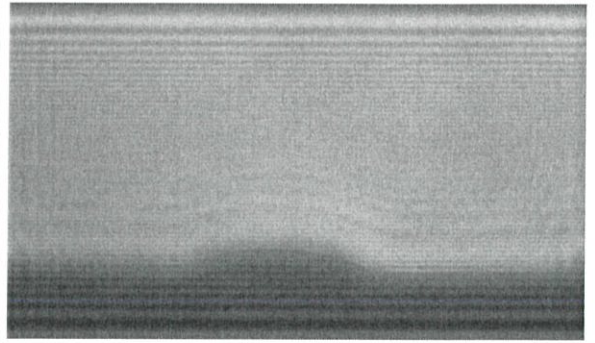
[18] [www.thairohs.org](http://www.thairohs.org)

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.  
ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรีหลังการหลอม  
ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ

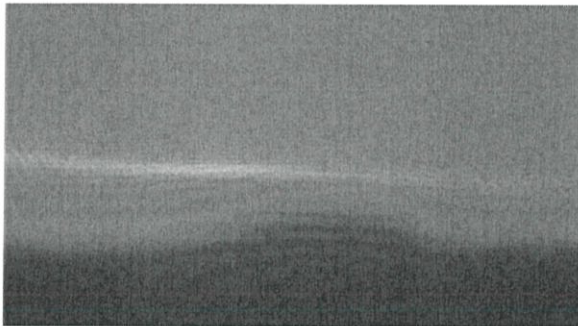


(ก่อน)

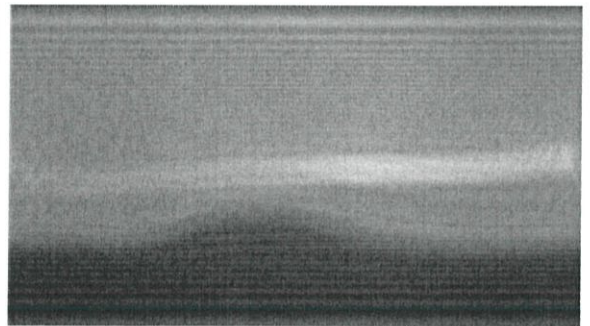


(หลัง)

รูปที่ ก.1 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC305 หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ  
ชิ้นงานที่ 1

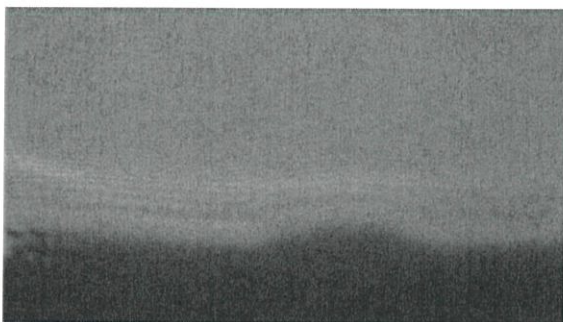


(ก่อน)

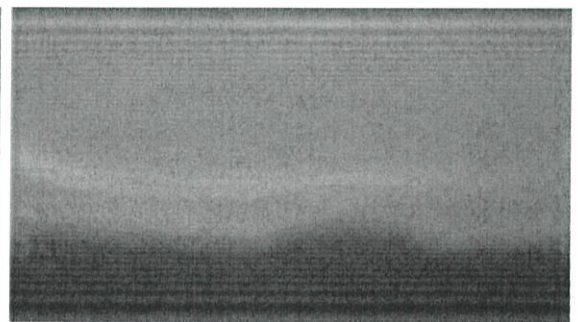


(หลัง)

รูปที่ ก.2 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC305 หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ  
ชิ้นงานที่ 2

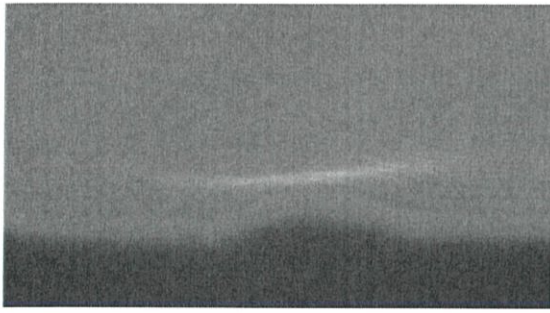


(ก่อน)

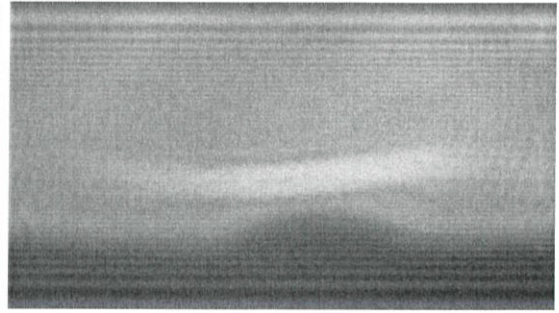


(หลัง)

รูปที่ ก.3 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC305 หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ  
ชิ้นงานที่ 3

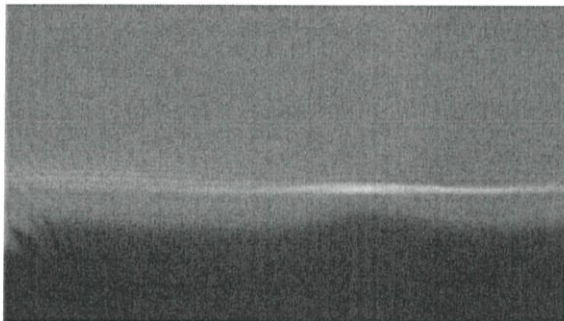


(ก่อน)

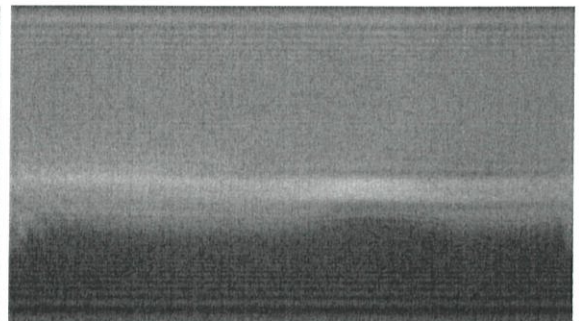


(หลัง)

รูปที่ ก.4 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 1

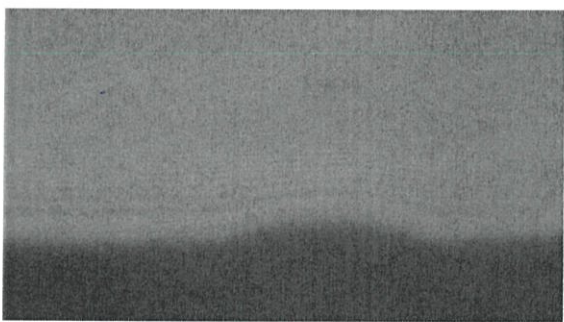


(ก่อน)

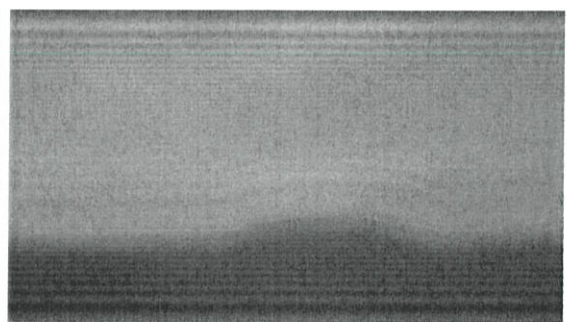


(หลัง)

รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 2

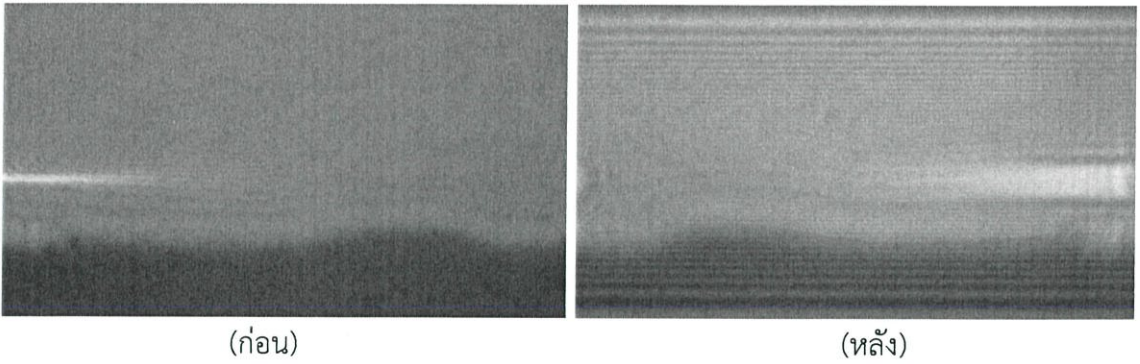


(ก่อน)

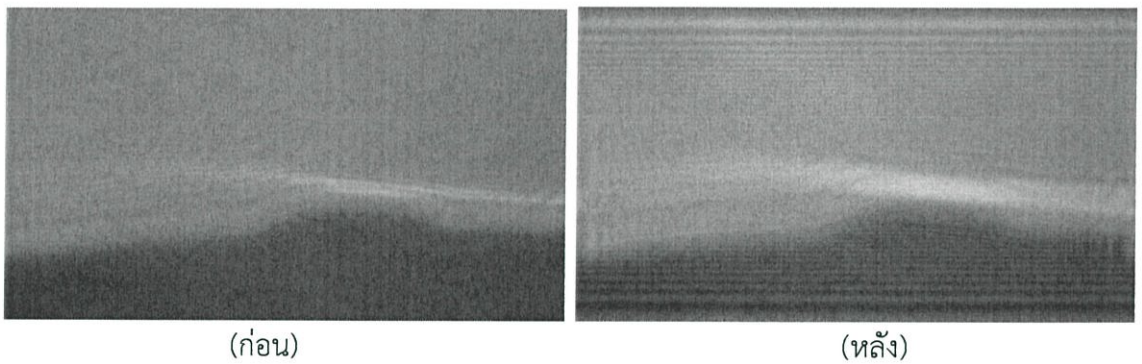


(หลัง)

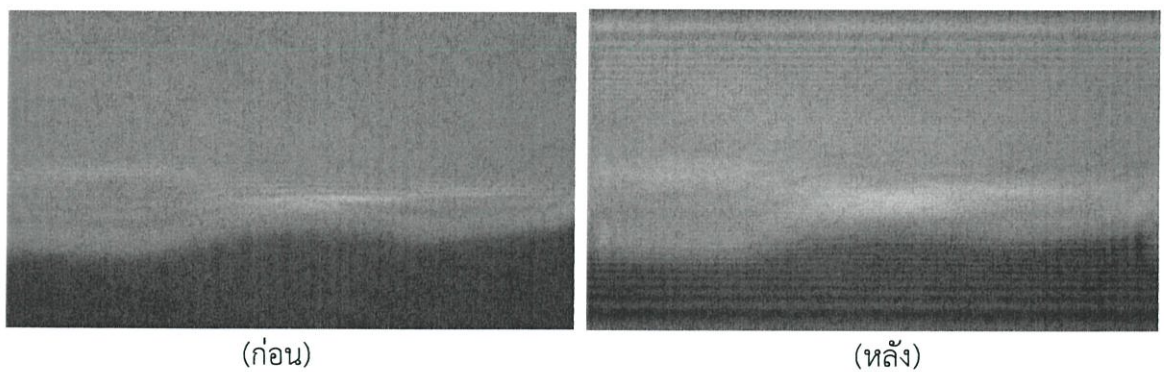
รูปที่ ก.6 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 3



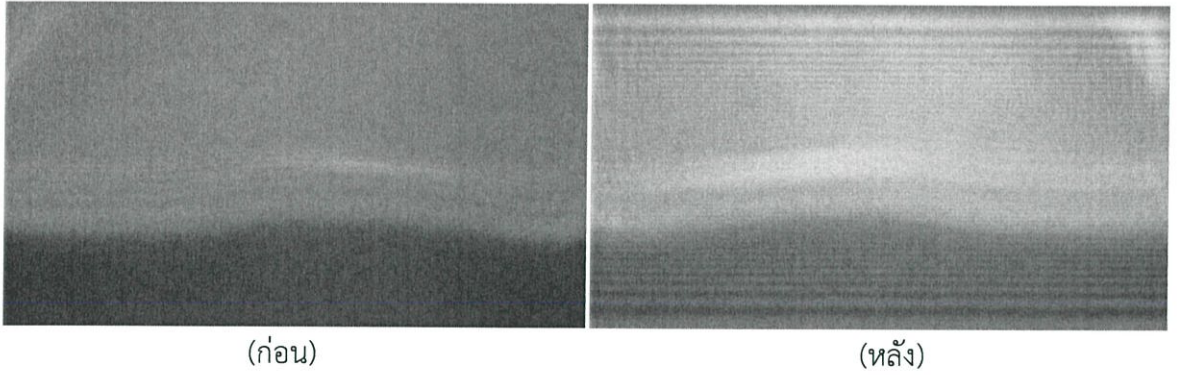
รูปที่ ก.7 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 1



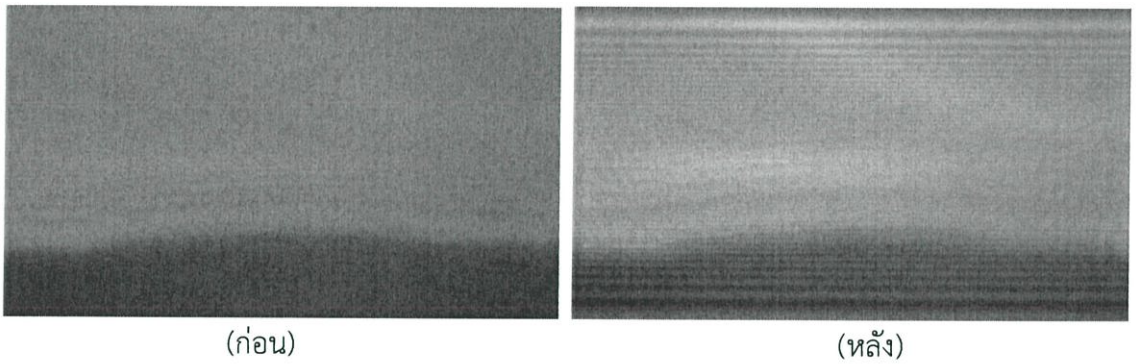
รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 2



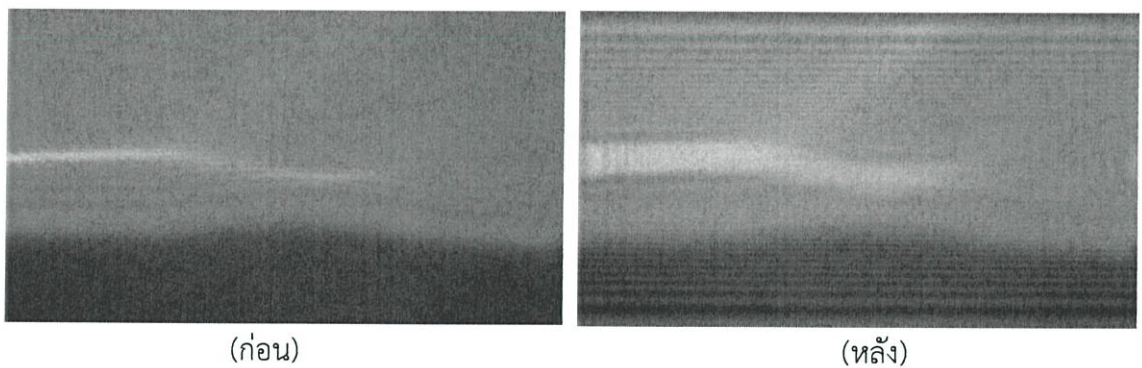
รูปที่ ก.9 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 3



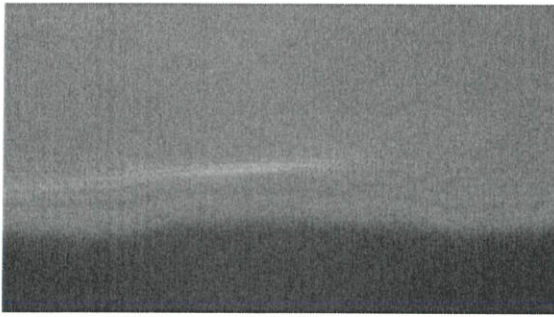
รูปที่ ก.10 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 1



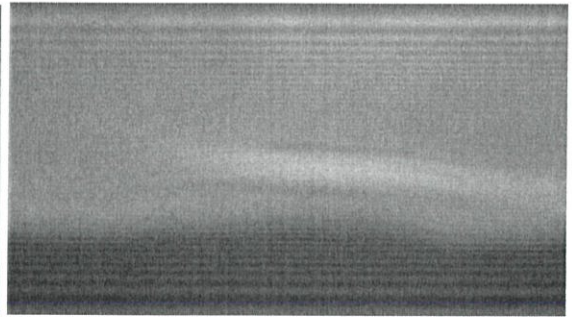
รูปที่ ก.11 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 2



รูปที่ ก.12 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 3

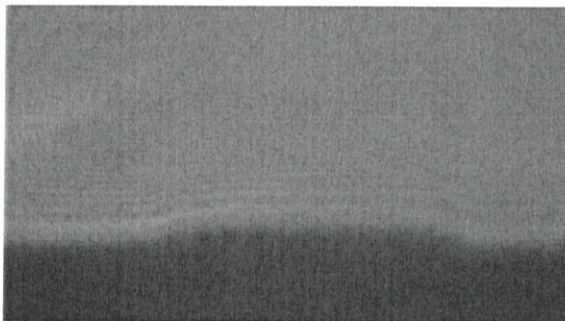


(ก่อน)

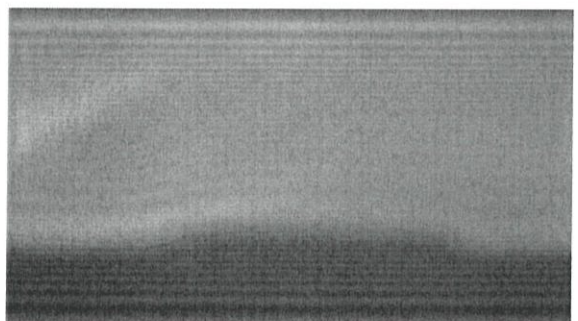


(หลัง)

รูปที่ ก.13 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 1



(ก่อน)

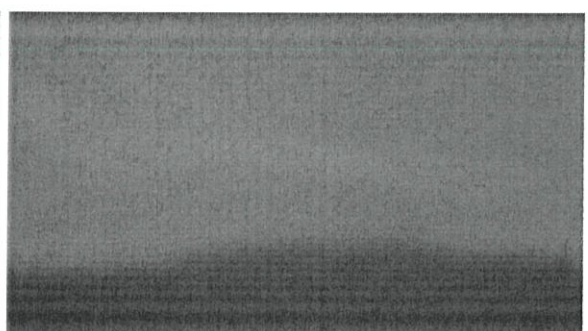


(หลัง)

รูปที่ ก.14 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 2

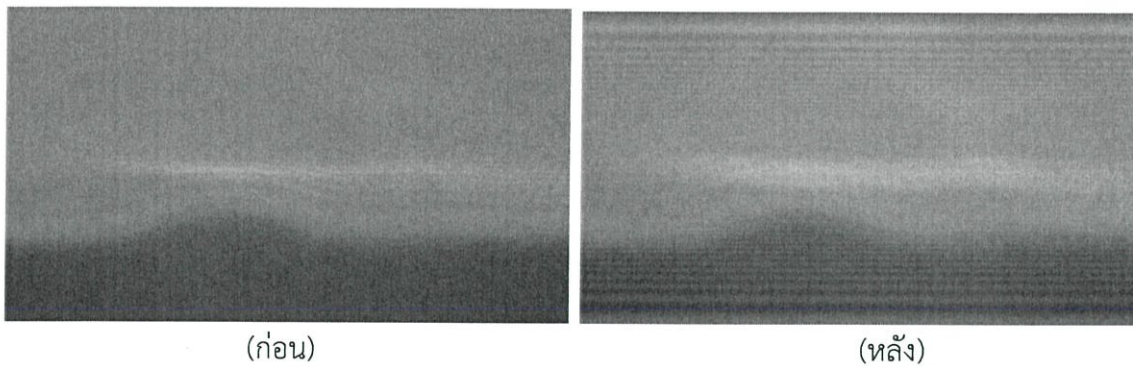


(ก่อน)

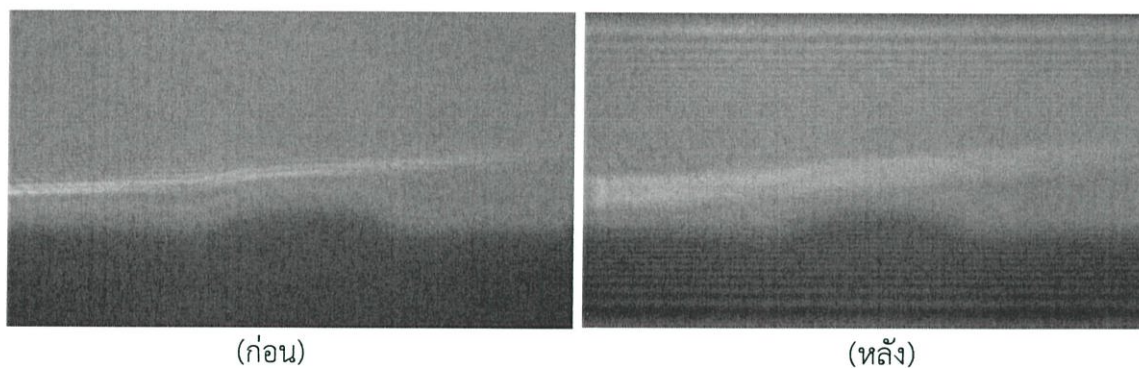


(หลัง)

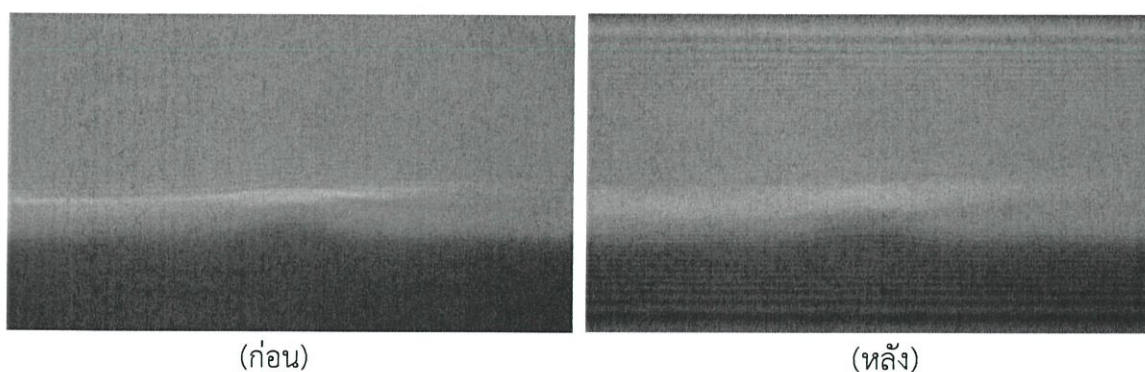
รูปที่ ก.15 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 3



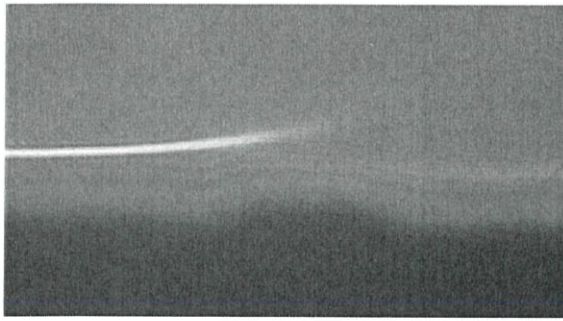
รูปที่ ก.16 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 1



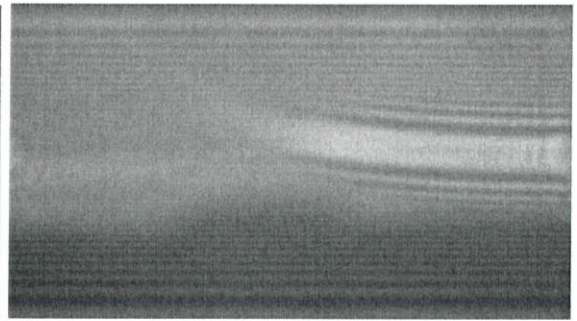
รูปที่ ก.17 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 2



รูปที่ ก.18 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชิ้นงานที่ 3

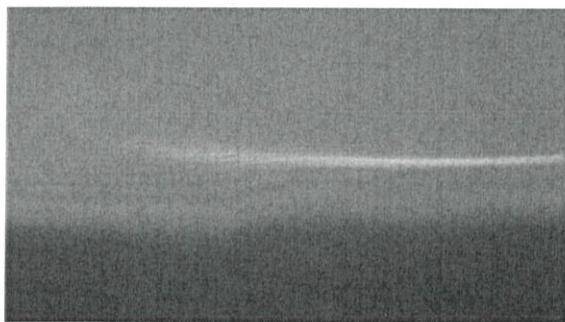


(ก่อน)

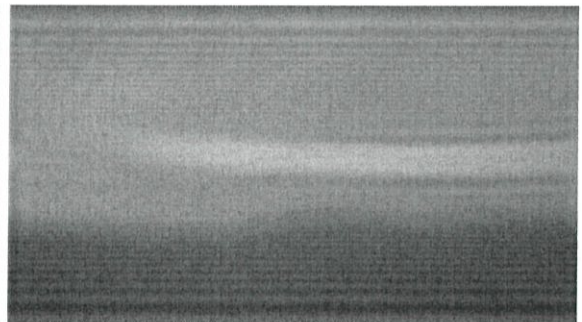


(หลัง)

รูปที่ ก.19 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 1



(ก่อน)

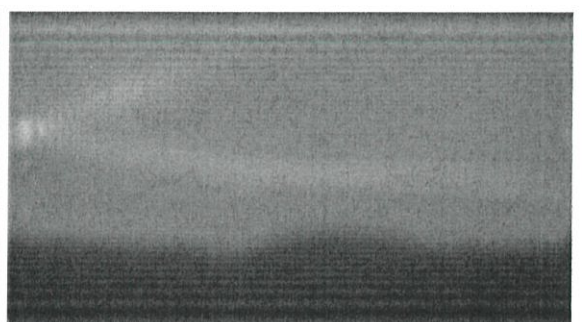


(หลัง)

รูปที่ ก.20 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 2

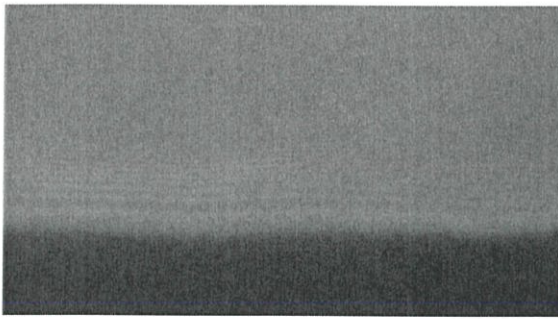


(ก่อน)

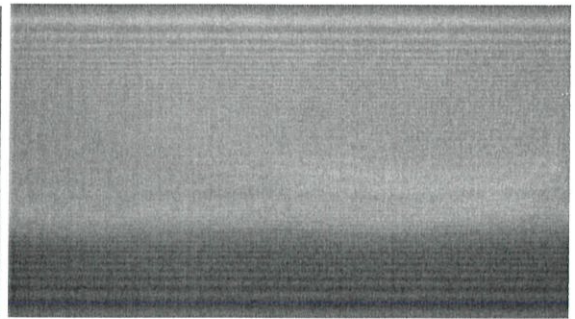


(หลัง)

รูปที่ ก.21 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 3



(ก่อน)

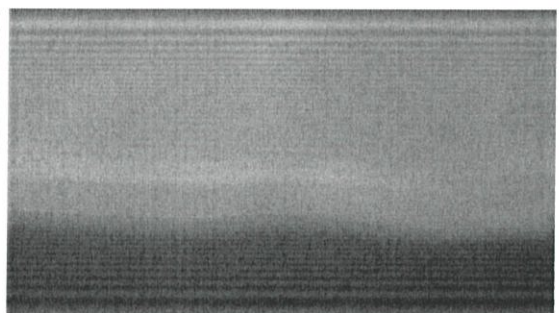


(หลัง)

รูปที่ ก.22 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  0.50 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโพกัสภาพ ชิ้นงานที่ 1



(ก่อน)

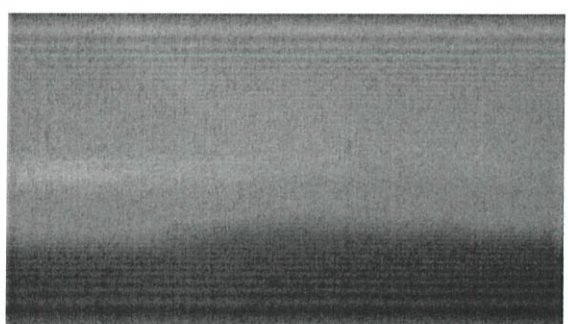


(หลัง)

รูปที่ ก.23 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  0.50 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโพกัสภาพ ชิ้นงานที่ 2

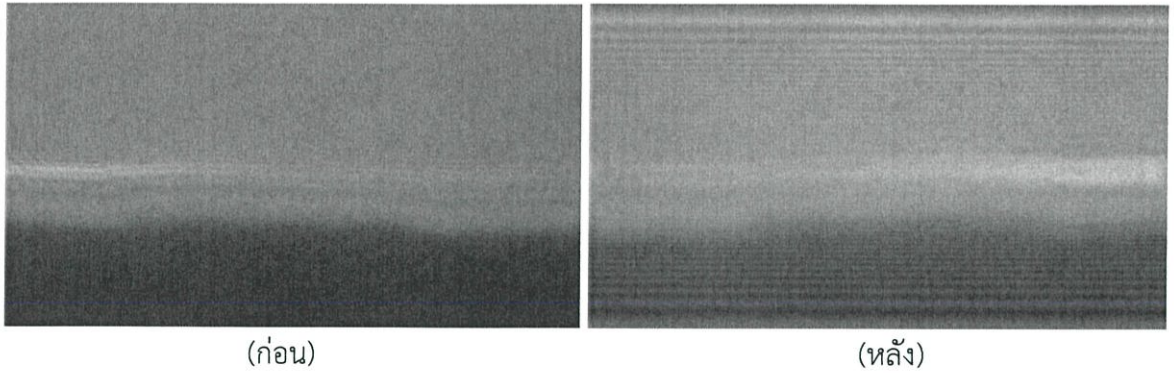


(ก่อน)

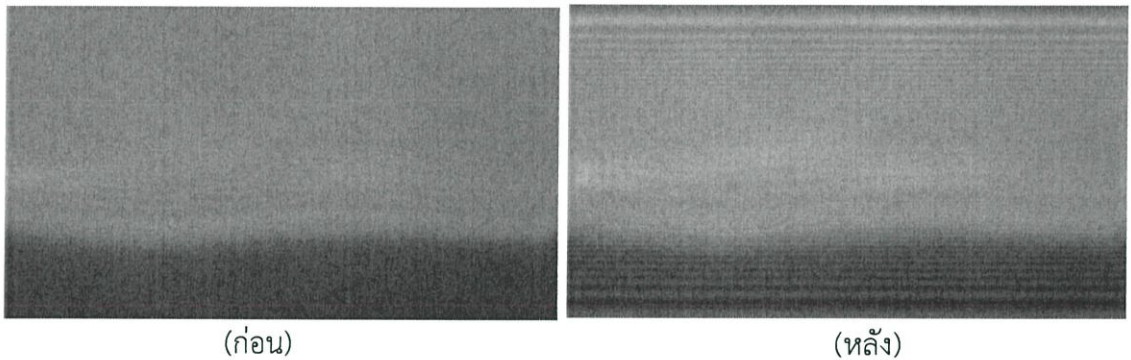


(หลัง)

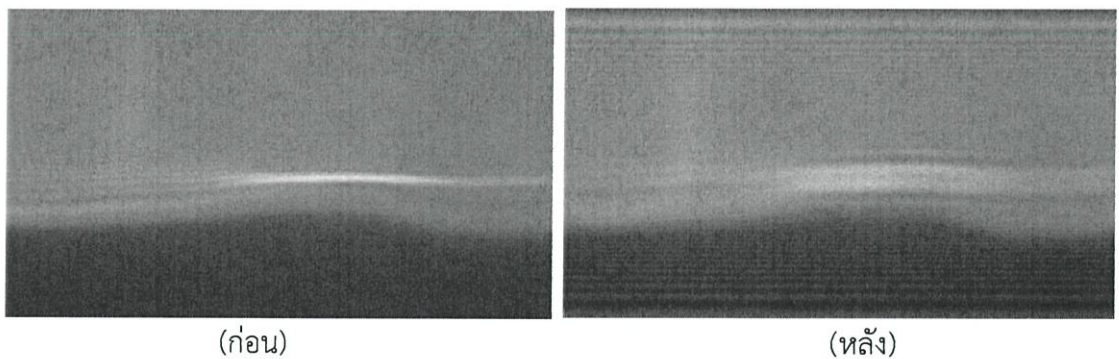
รูปที่ ก.24 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  0.50 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโพกัสภาพ ชิ้นงานที่ 3



รูปที่ ก.25 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 1

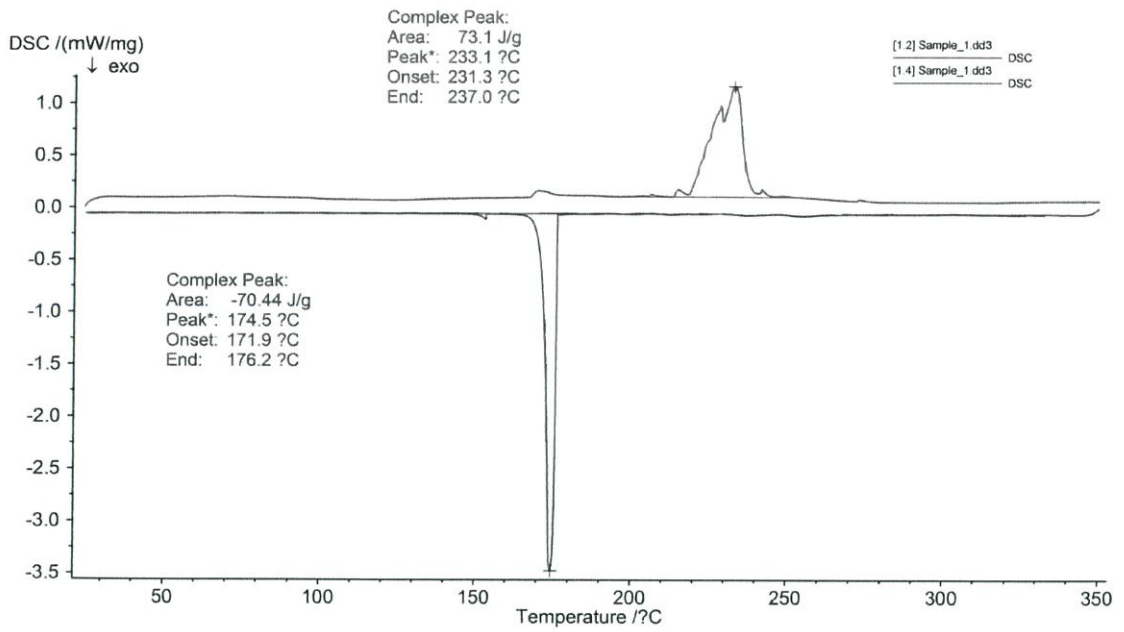


รูปที่ ก.26 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 2

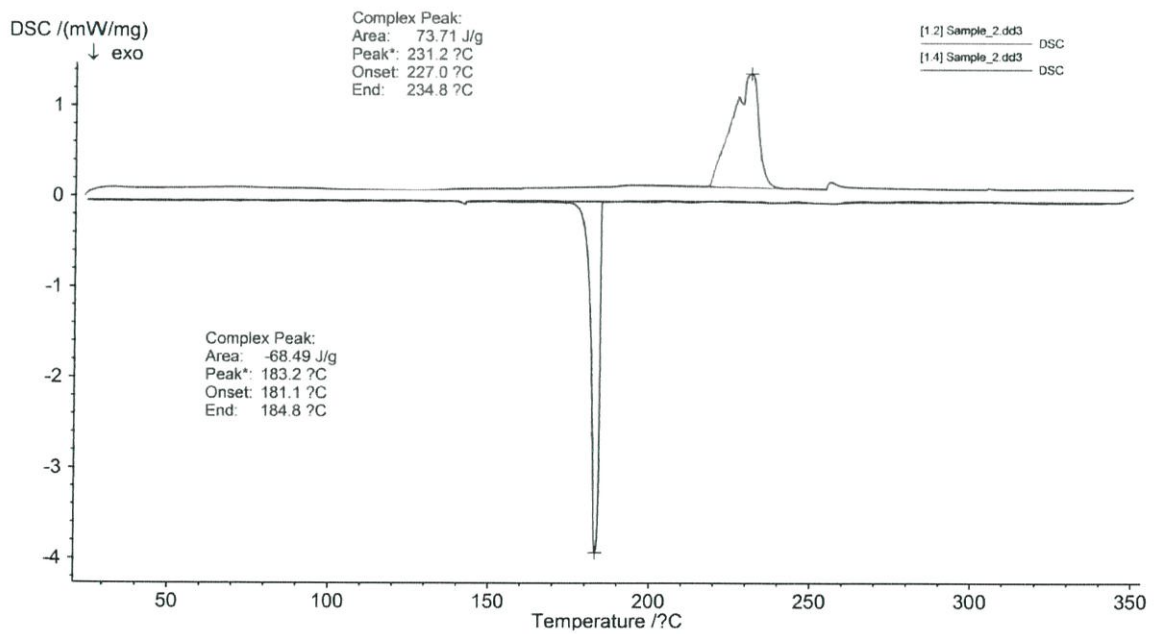


รูปที่ ก.27 ภาพถ่ายด้านข้างของโลหะบัดกรี SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% หลังการหลอม ก่อนและหลังการปรับโฟกัสภาพ ชั้นงานที่ 3

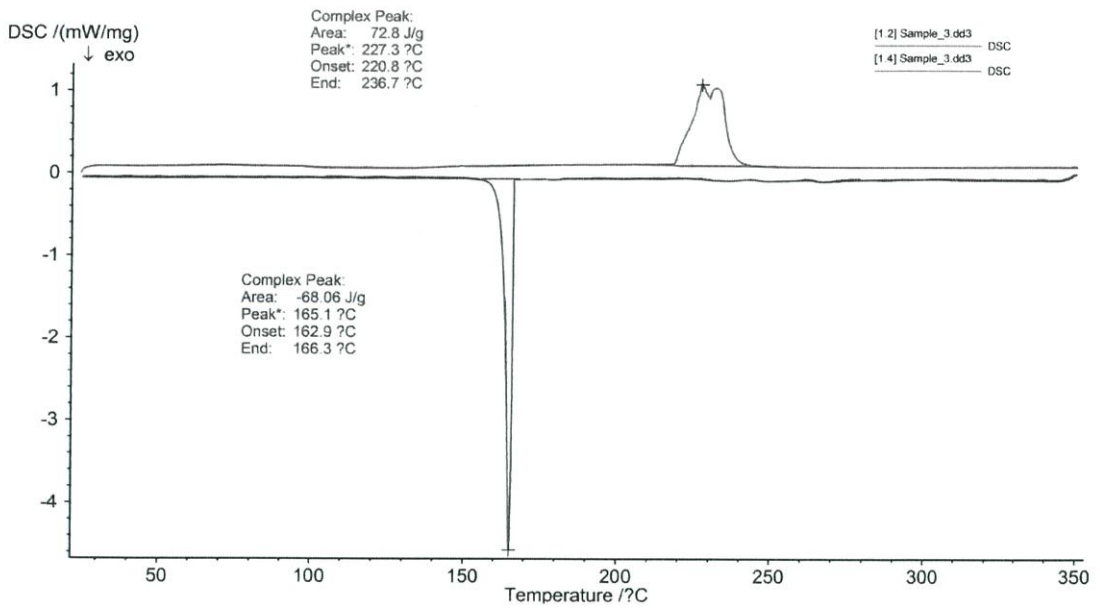
ภาคผนวก ข.  
กราฟอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ได้จาก DSC



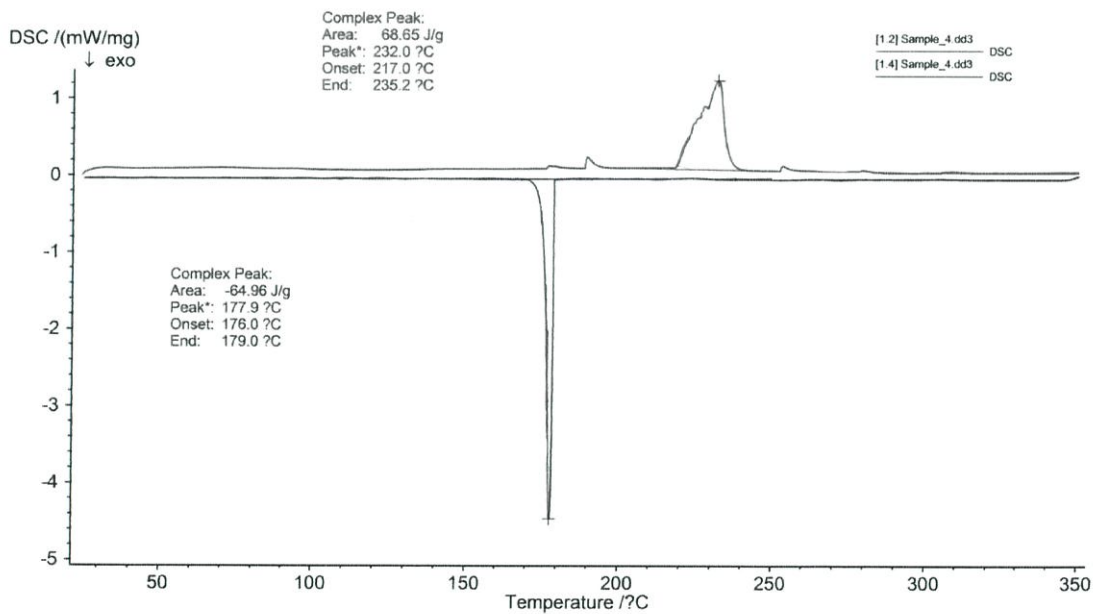
รูปที่ ข.1 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)



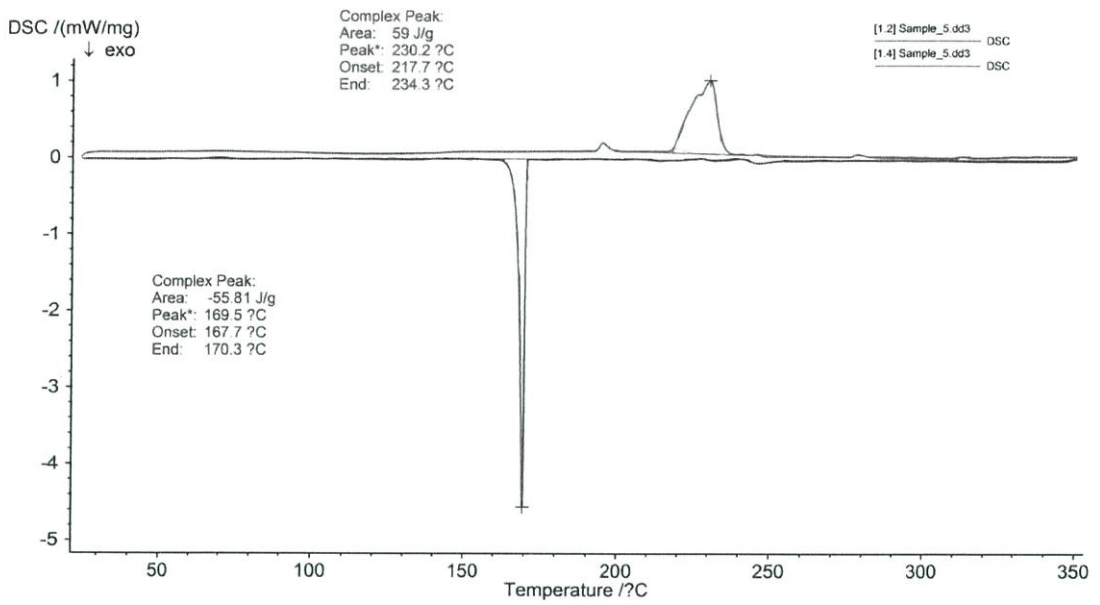
รูปที่ ข.2 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



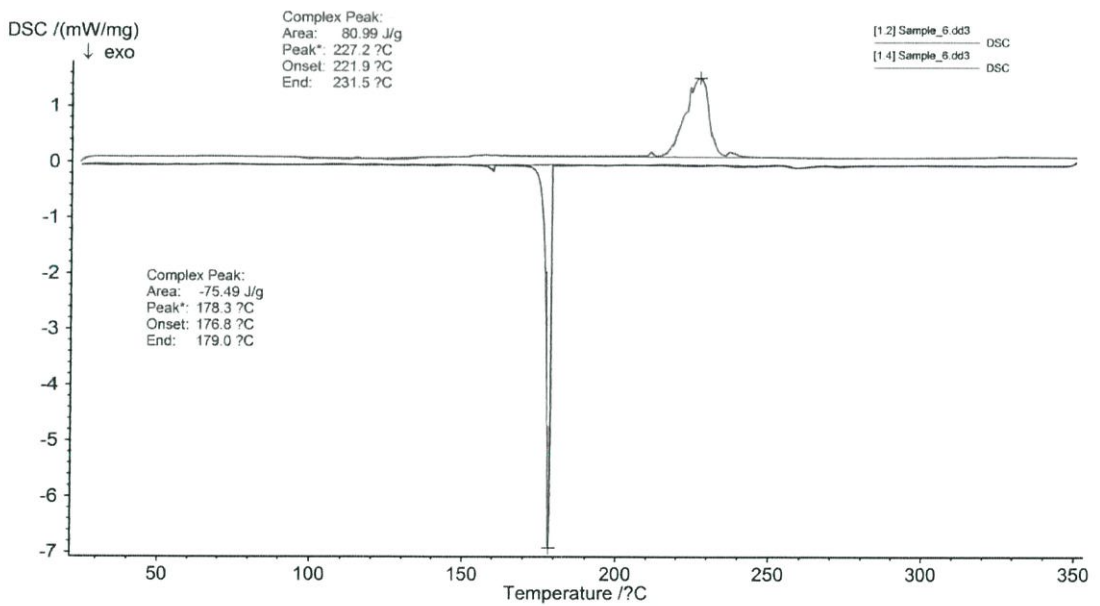
รูปที่ ข.3 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt%



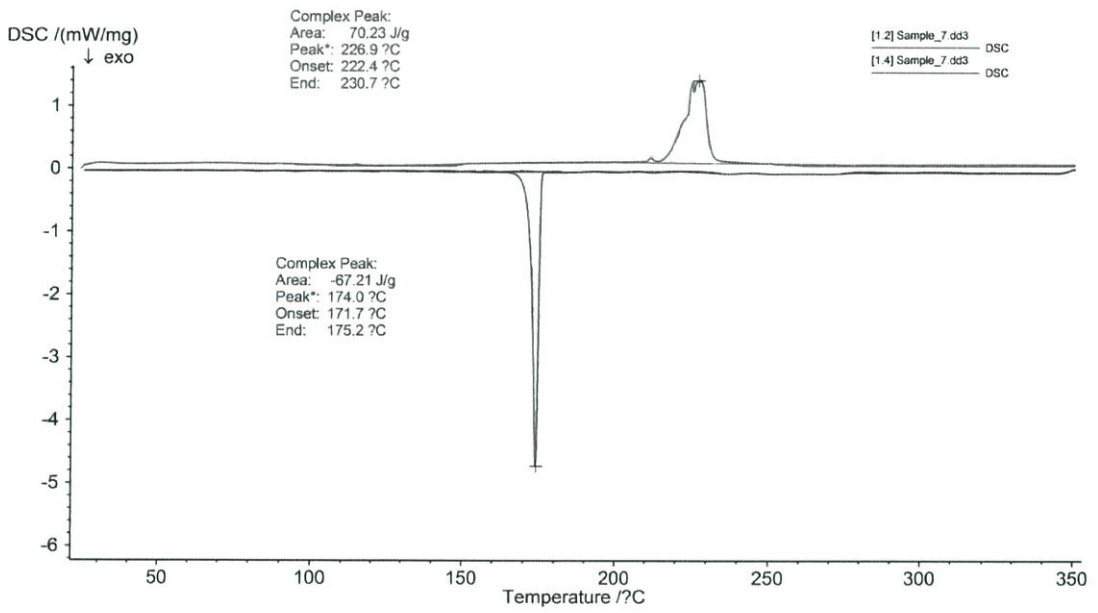
รูปที่ ข.4 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt%



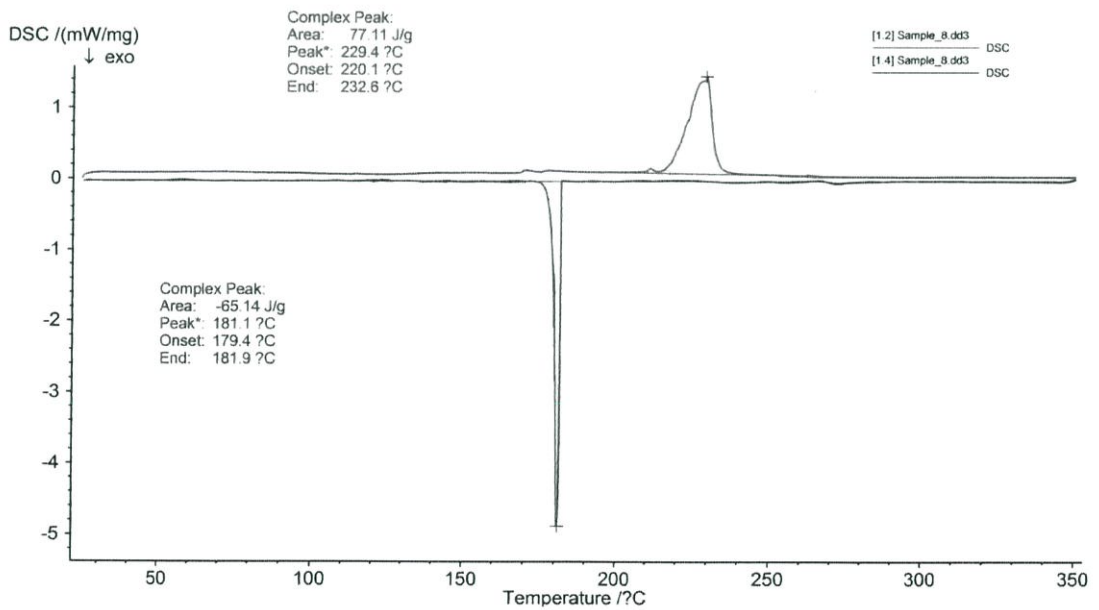
รูปที่ ข.5 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



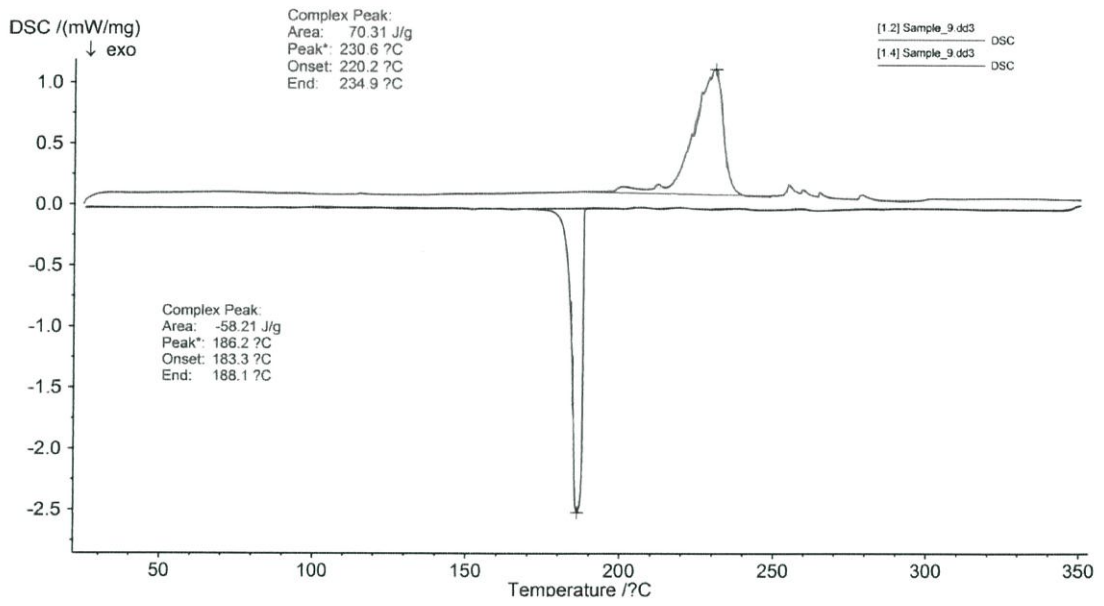
รูปที่ ข.6 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% และ In 0.5 wt%



รูปที่ ข.7 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% และ In 0.5 wt%



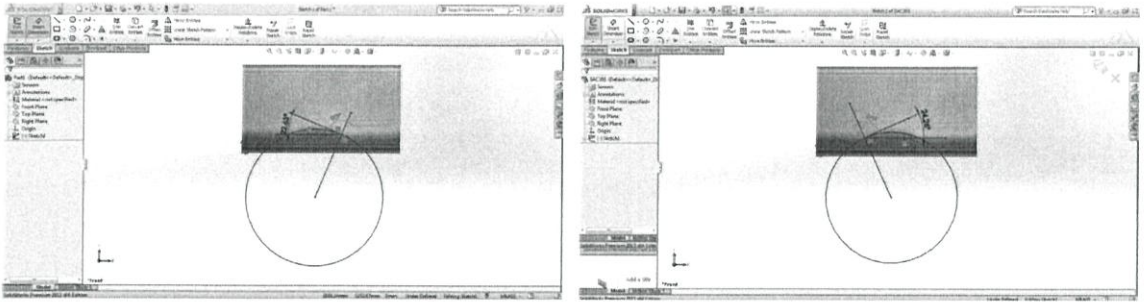
รูปที่ ข.8 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% และ In 0.5 wt%



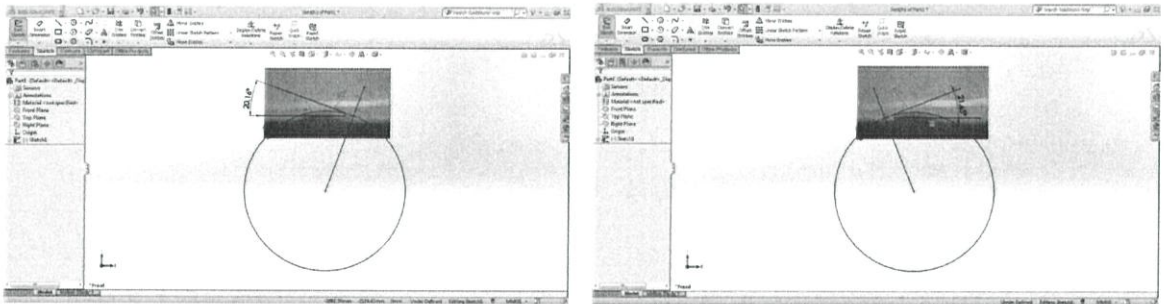
รูปที่ ข.9 กราฟDSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu ผสม Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% และ In 0.5 wt%

ภาคผนวก ค.

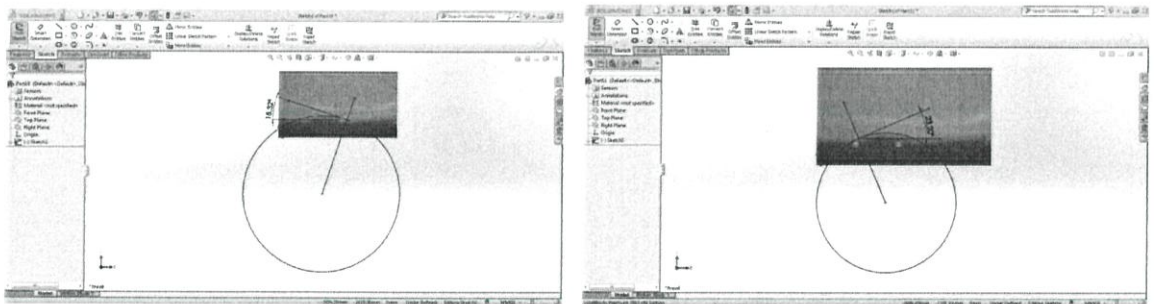
การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของชิ้นงาน



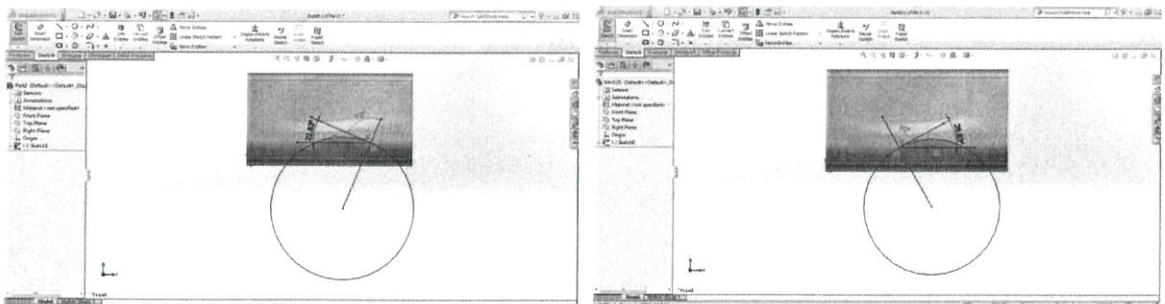
รูปที่ ค.1 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC305 ชิ้นงานที่ 1



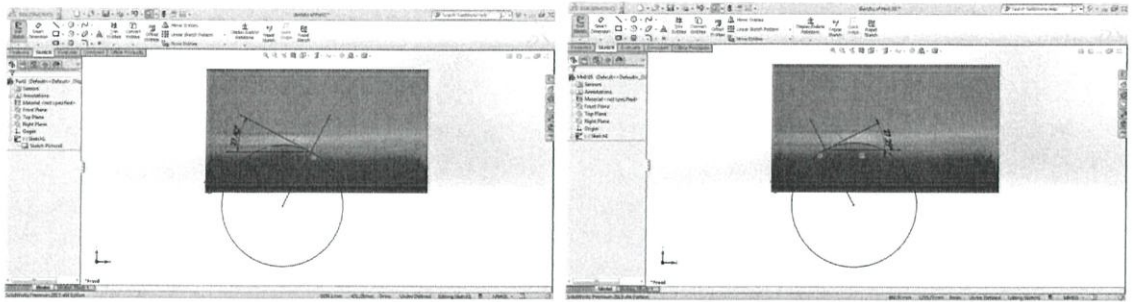
รูปที่ ค.2 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC305 ชิ้นงานที่ 2



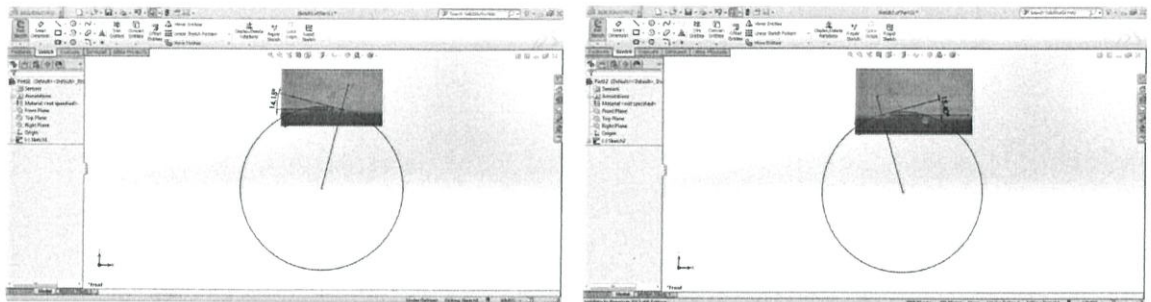
รูปที่ ค.3 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC305 ชิ้นงานที่ 3



รูปที่ ค.4 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% ชิ้นงานที่ 1



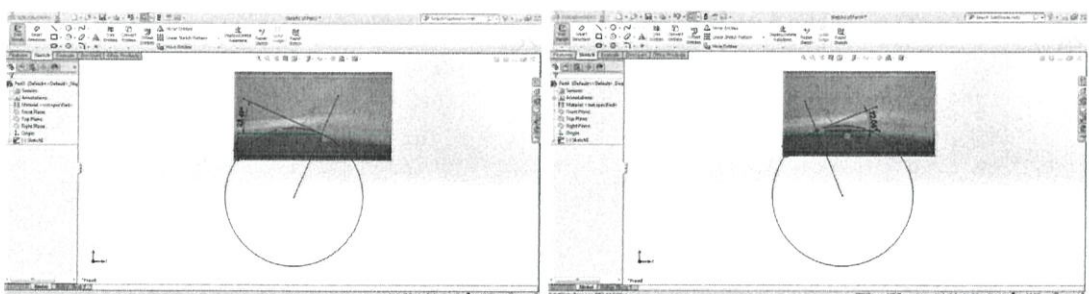
รูปที่ ค.5 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% ชั้นงานที่ 2



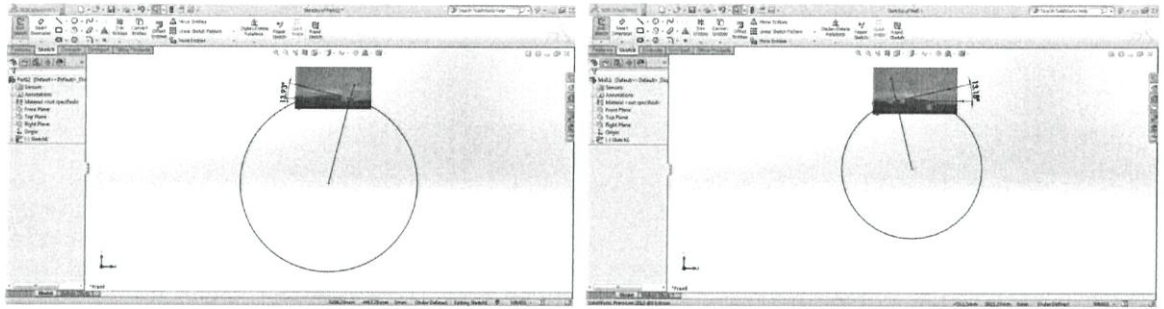
รูปที่ ค.6 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% ชั้นงานที่ 3



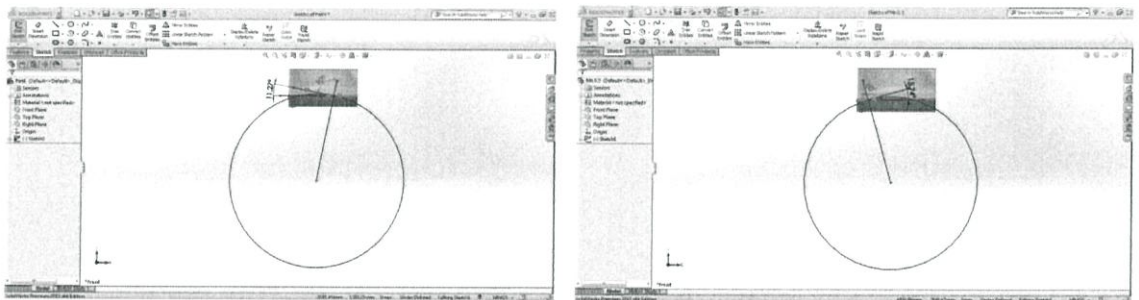
รูปที่ ค.7 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% ชั้นงานที่ 1



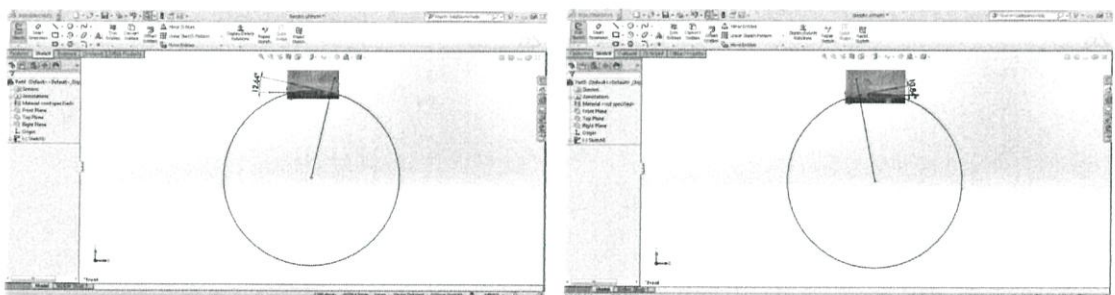
รูปที่ ค.8 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% ชั้นงานที่ 2



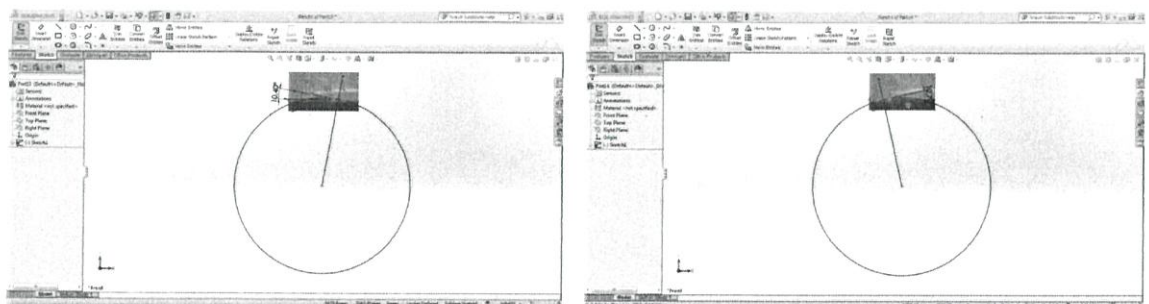
รูปที่ ค.9 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% ชั้นงานที่ 3



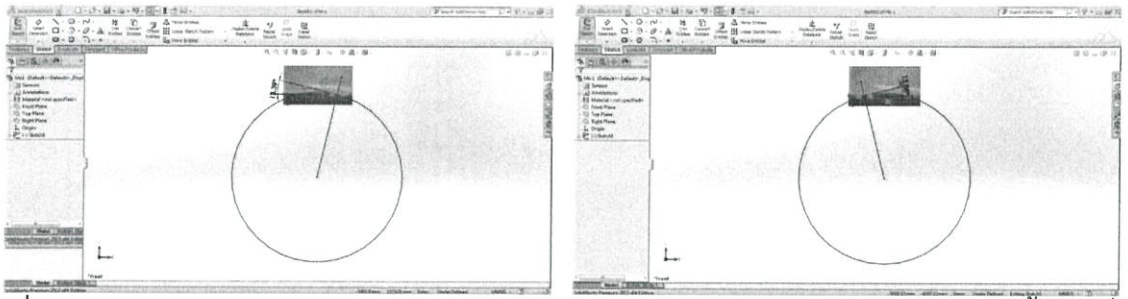
รูปที่ ค.10 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% ชั้นงานที่ 1



รูปที่ ค.11 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% ชั้นงานที่ 2



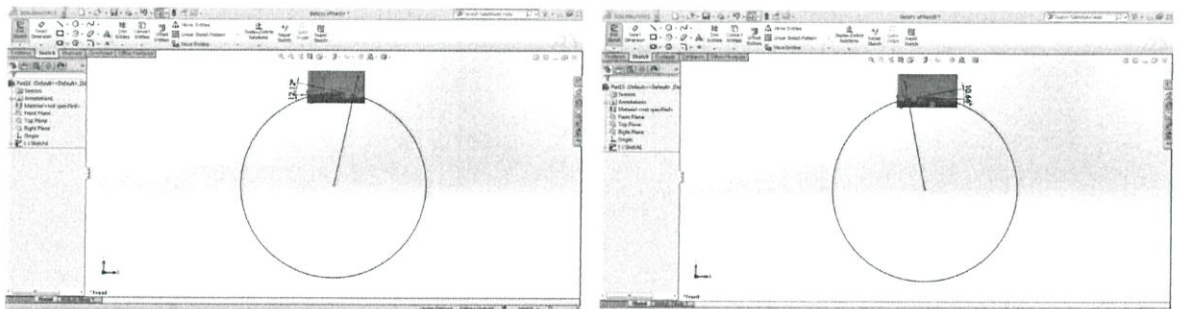
รูปที่ ค.12 การหาค่ามอดูลสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% ชั้นงานที่ 3



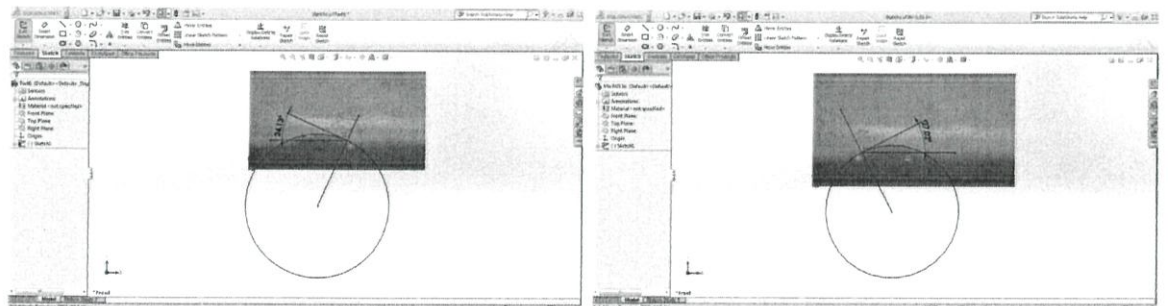
รูปที่ ค.13 การหาค่ามุมสัมผัสด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% ชั้นงานที่ 1



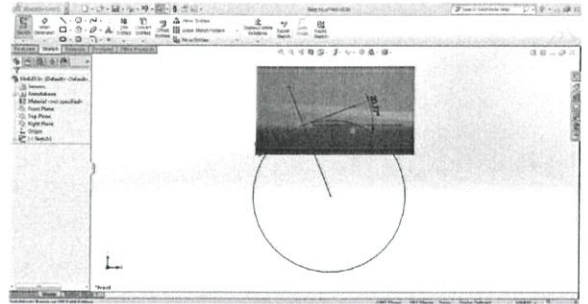
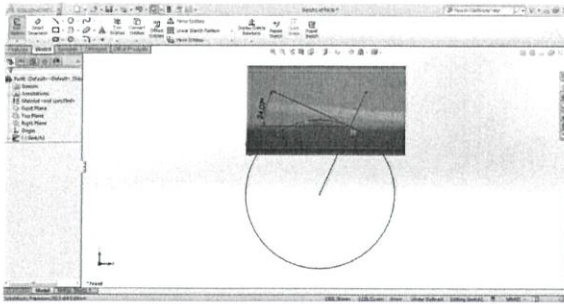
รูปที่ ค.14 การหาค่ามุมสัมผัสด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% ชั้นงานที่ 2



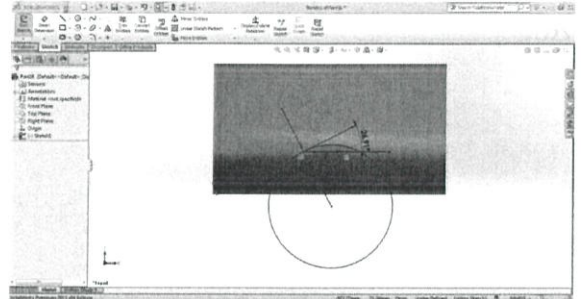
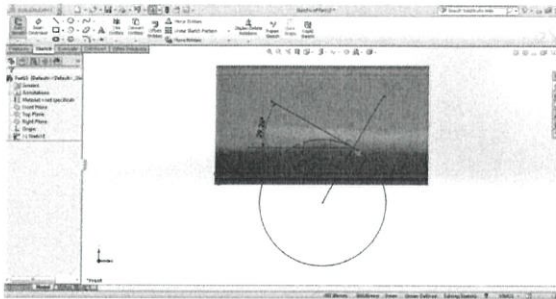
รูปที่ ค.15 การหาค่ามุมสัมผัสด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% ชั้นงานที่ 3



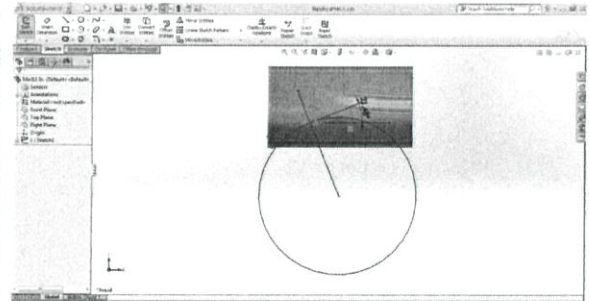
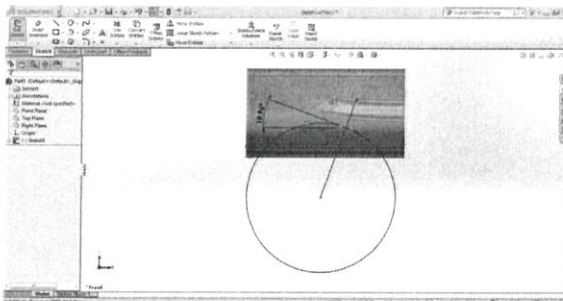
รูปที่ ค.16 การหาค่ามุมสัมผัสด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 1



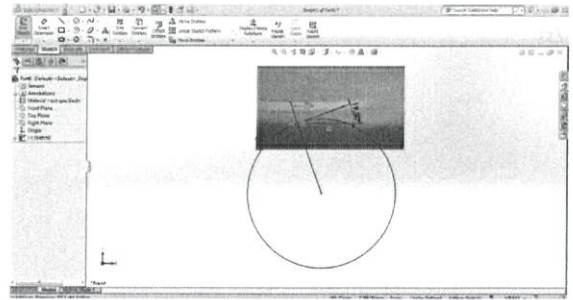
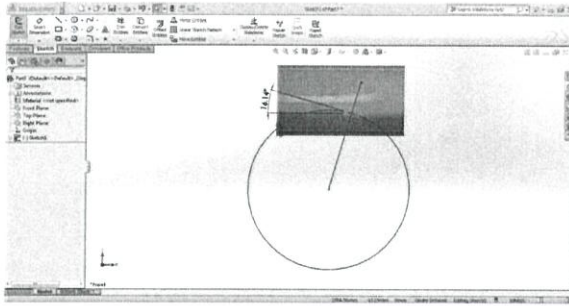
รูปที่ ค.17 การหาค่ามุมสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 2



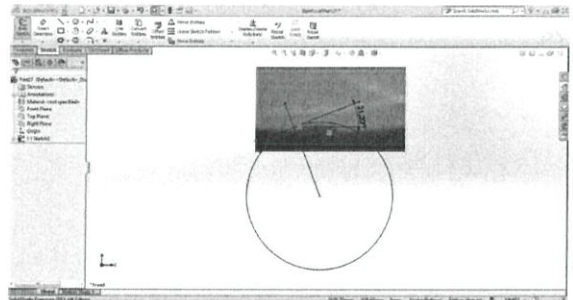
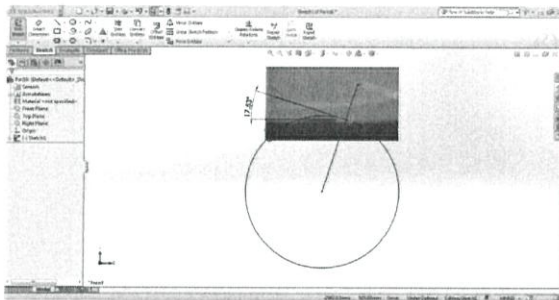
รูปที่ ค.18 การหาค่ามุมสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 3



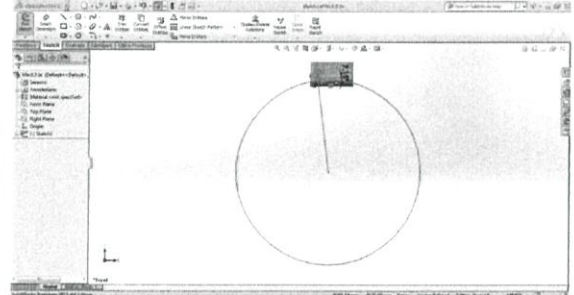
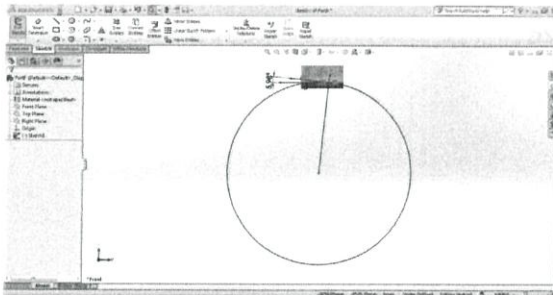
รูปที่ ค.19 การหาค่ามุมสัมพัทธ์ทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 1



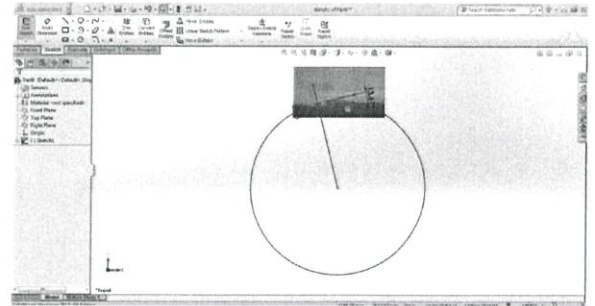
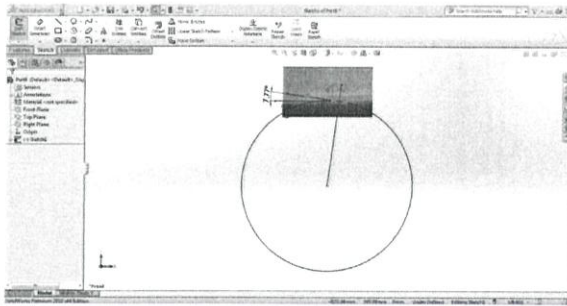
รูปที่ ค.20 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 2



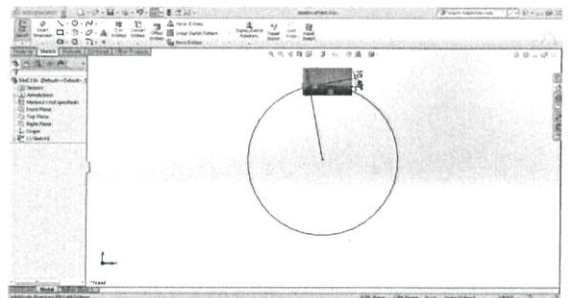
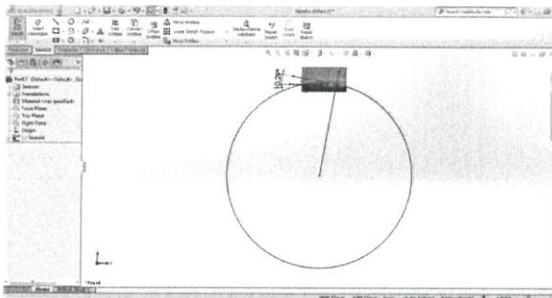
รูปที่ ค.21 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 3



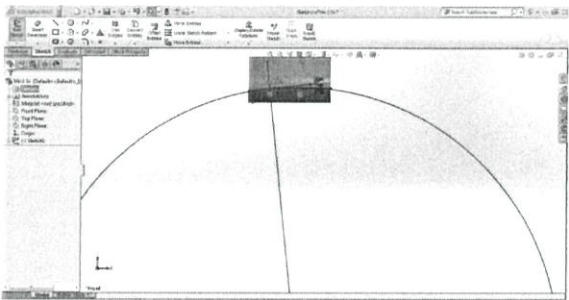
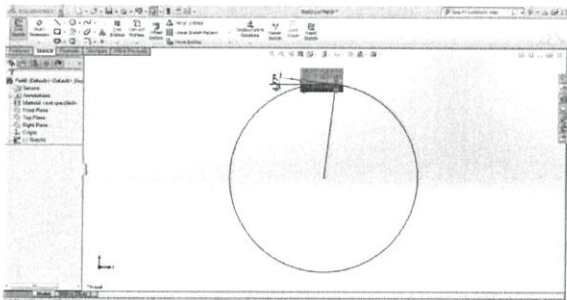
รูปที่ ค.22 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 1



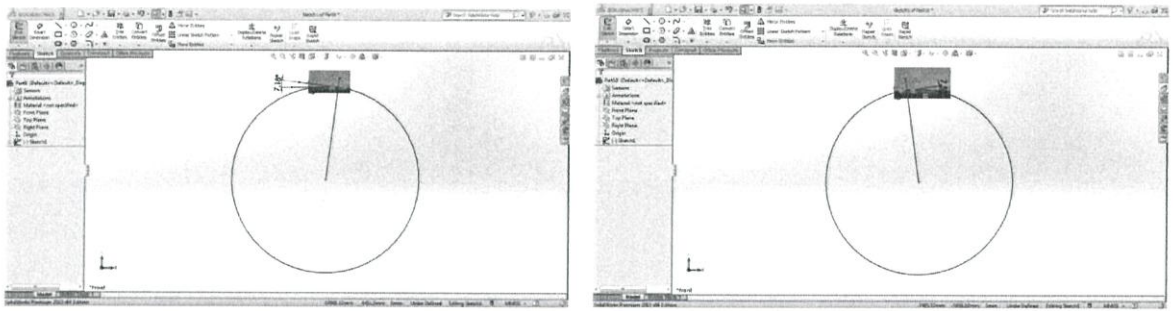
รูปที่ ค.23 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 2



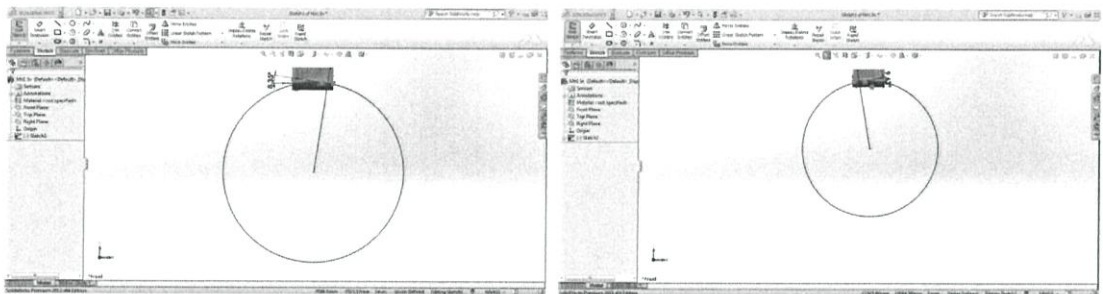
รูปที่ ค.24 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 3



รูปที่ ค.25 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% ชั้นงานที่ 1

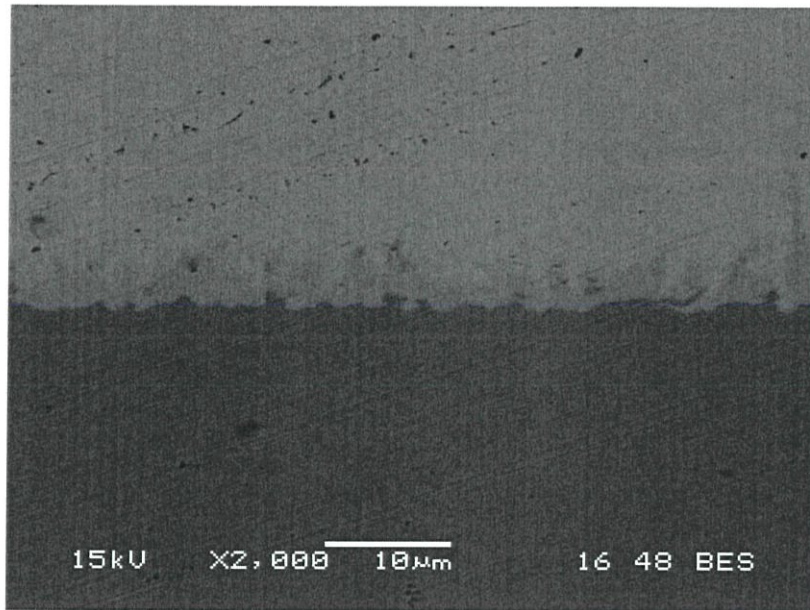


รูปที่ ค.26 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% ชิ้นงานที่ 2

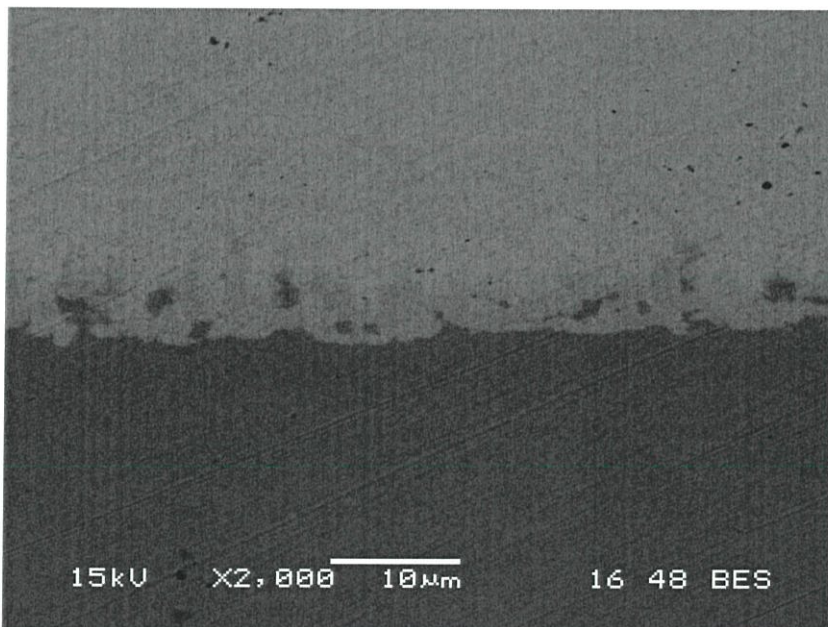


รูปที่ ค.27 การหาค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาและซ้ายของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.5 wt% ชิ้นงานที่ 3

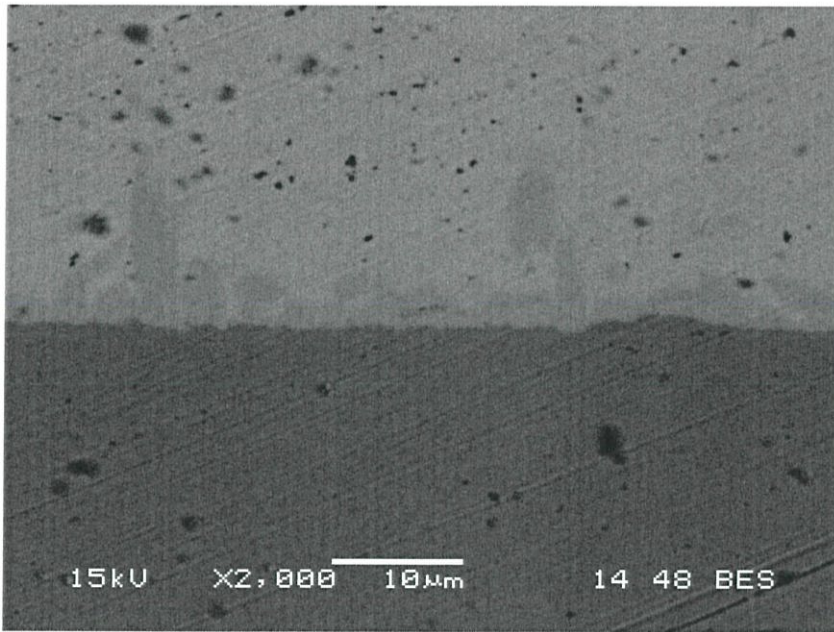
ภาคผนวก ง.  
ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน



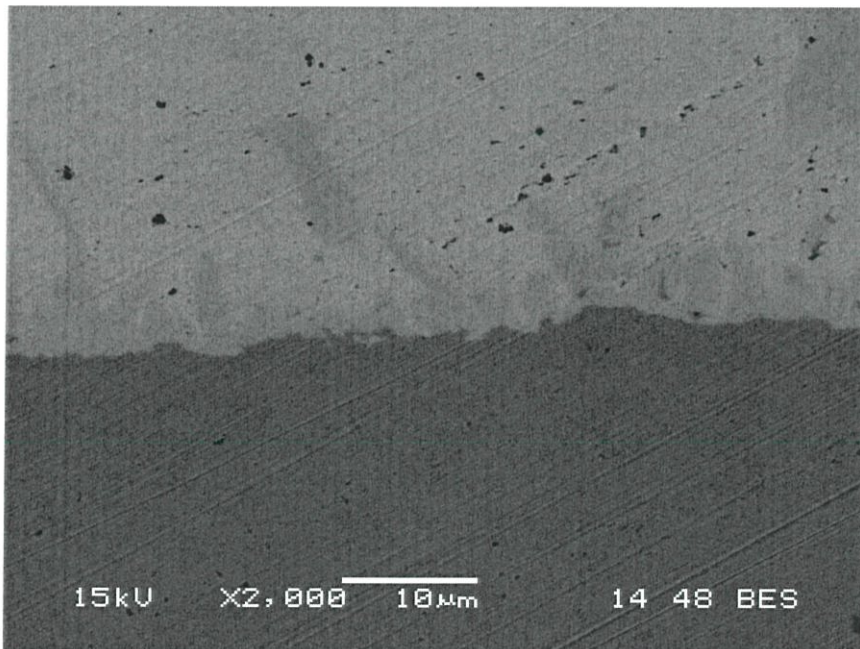
รูปที่ ง.1 ภาพถ่าย SEM ของ SAC305



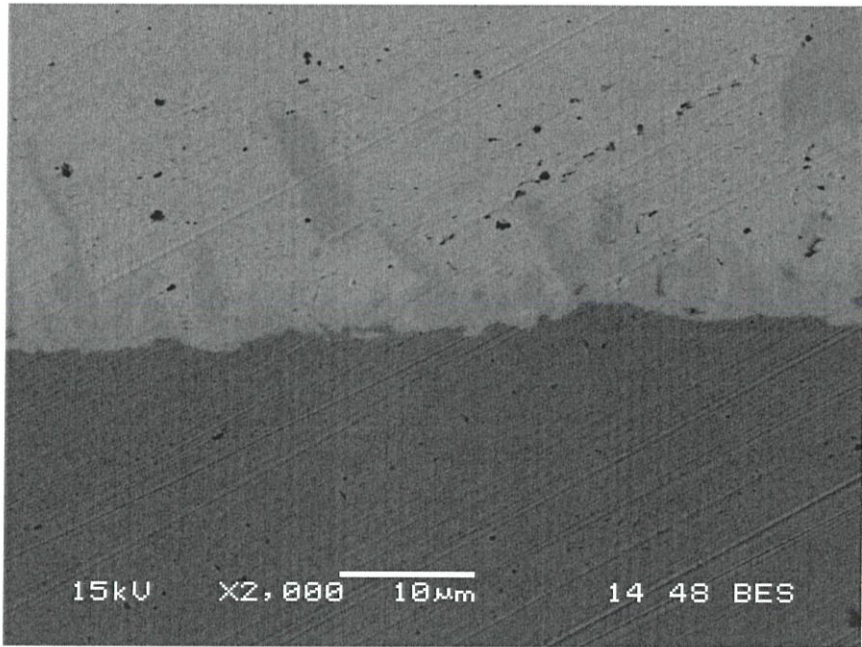
รูปที่ ง.2 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



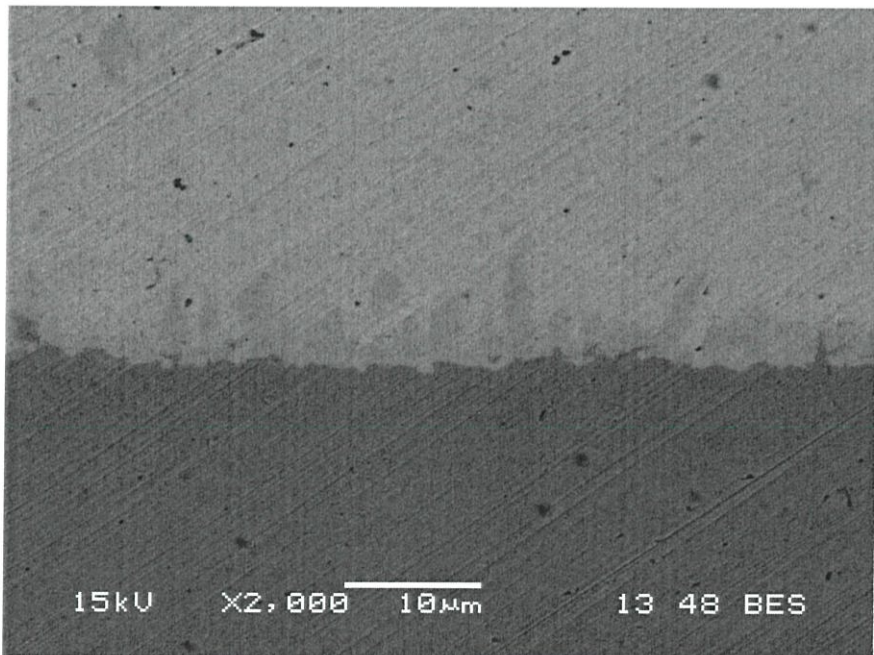
รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt%



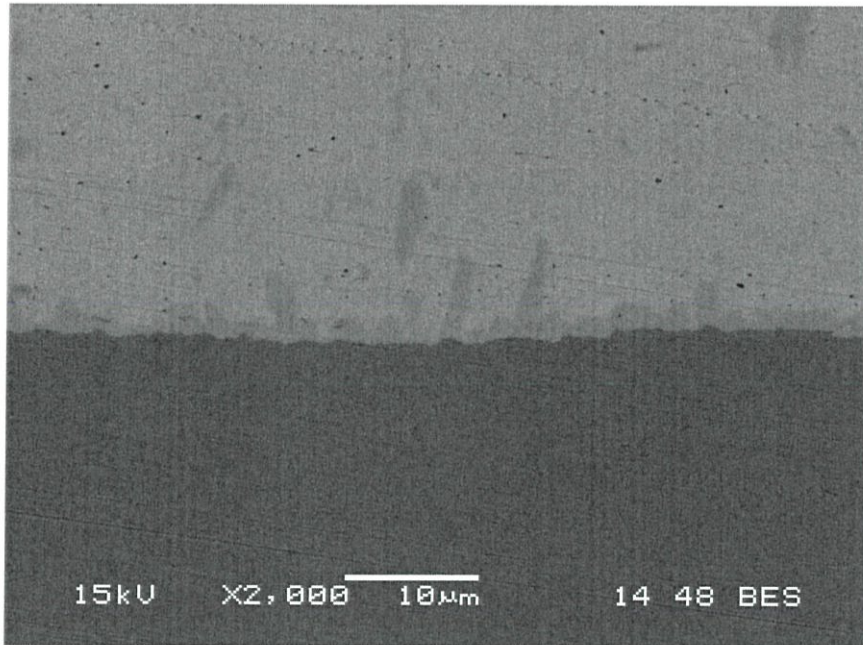
รูปที่ 3.4 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt%



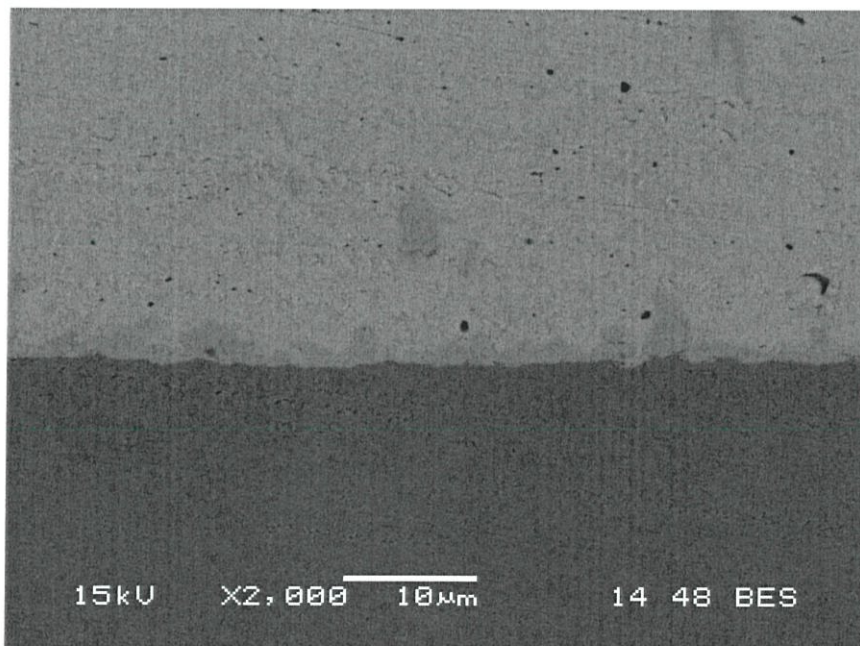
รูปที่ ง.5 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



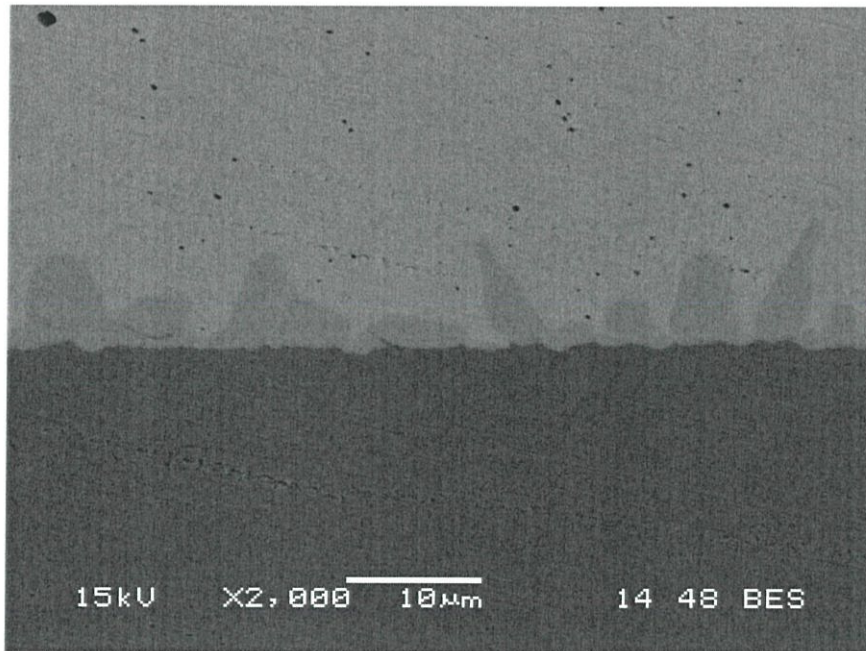
รูปที่ ง.6 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.5 wt%



รูปที่ ง.7 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  0.10 wt% + In 0.5 wt%



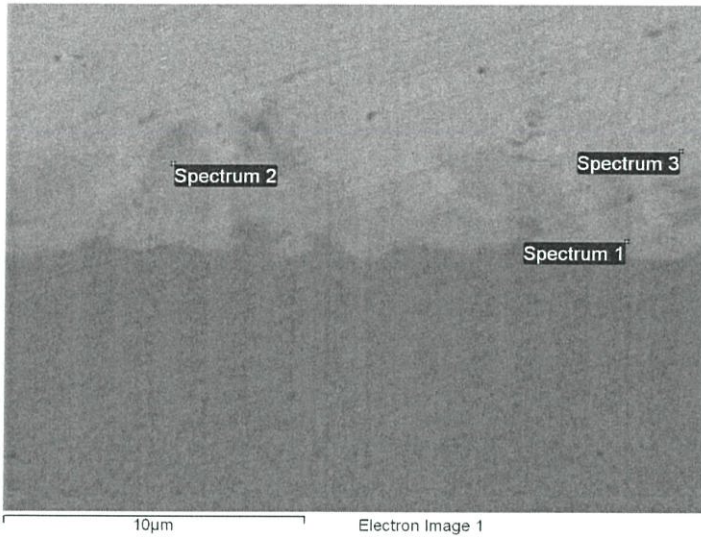
รูปที่ ง.8 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  0.50 wt% + In 0.5 wt%



รูปที่ 9.9 ภาพถ่าย SEM ของ SAC + Mn-doped  $\text{TiO}_2$  1.00 wt% + In 0.5 wt%

ภาคผนวก จ.  
การวิเคราะห์ด้วย EDX ของชิ้นงาน

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

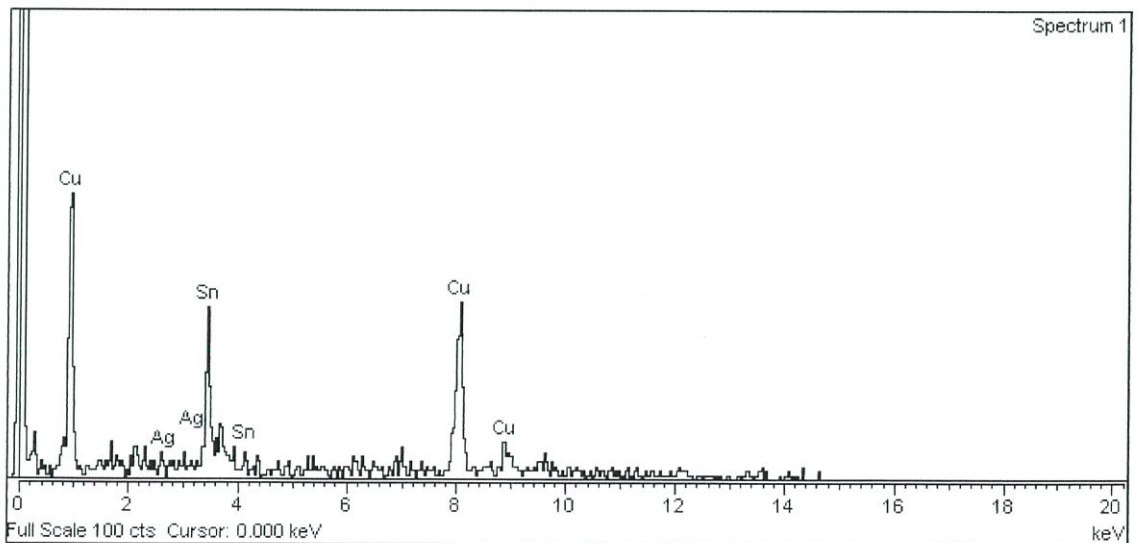
Standard :  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu L	58.79	72.59
Ag L	2.56	1.86
Sn L	38.65	25.55
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 12:45 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 82.54  
Detector : Silicon  
Window : SATW

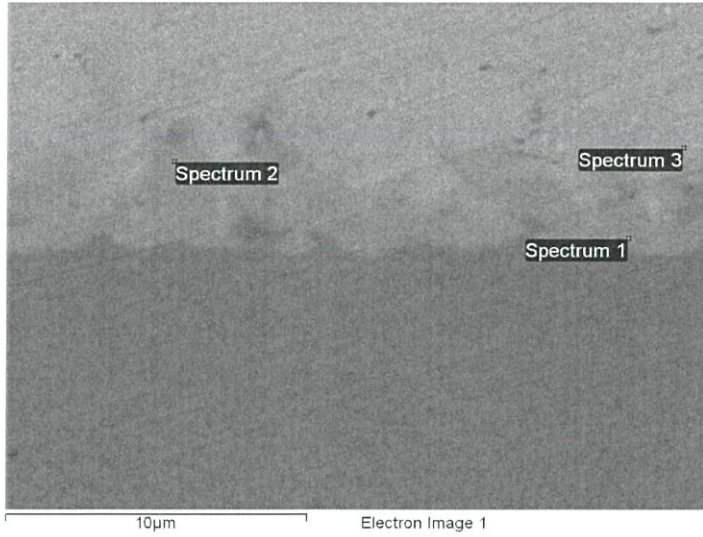
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.1 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

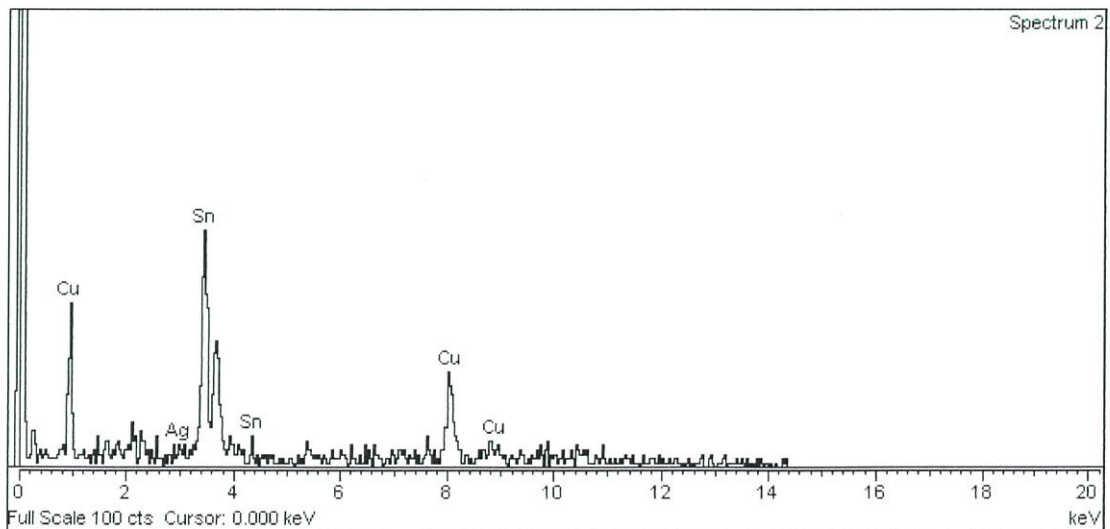
Standard :  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu L	34.99	50.13
Ag L	0.00	0.00
Sn L	65.01	49.87
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 12:49 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 83.18  
Detector : Silicon  
Window : SATW

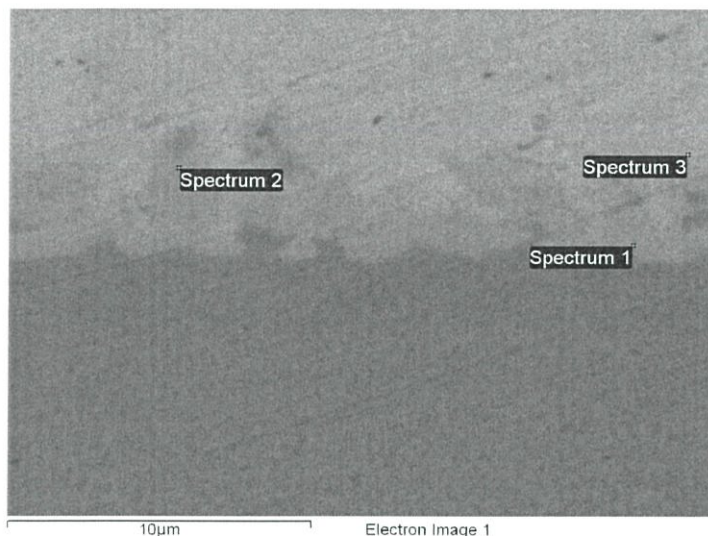
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.2 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC spectrum 2

## การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

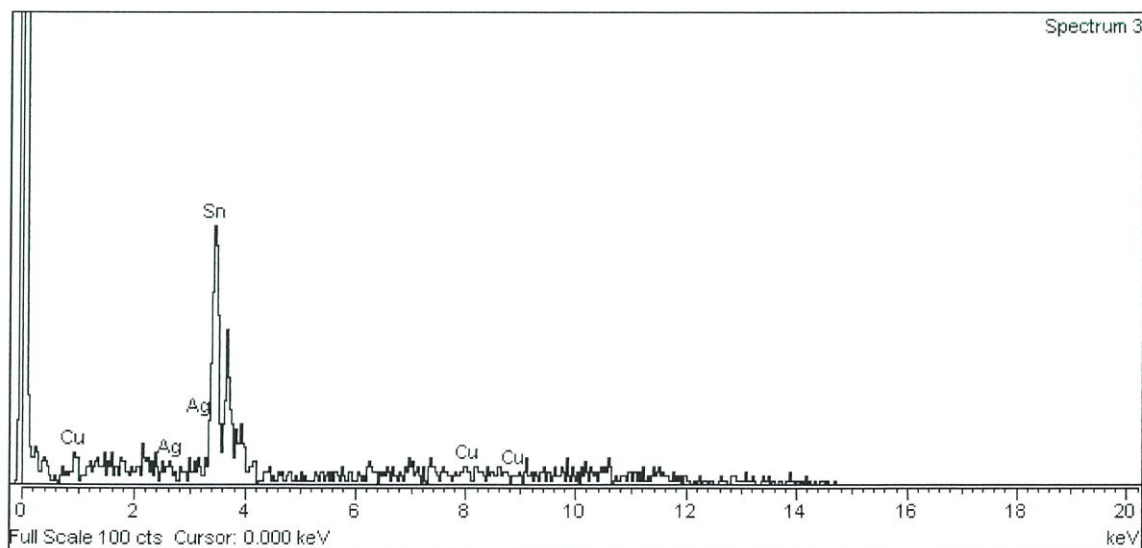
Standard :  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Cu L	9.57	16.51
Ag L	0.00	0.00
Sn L	90.43	83.49
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 12:51 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 83.18  
Detector : Silicon  
Window : SATW

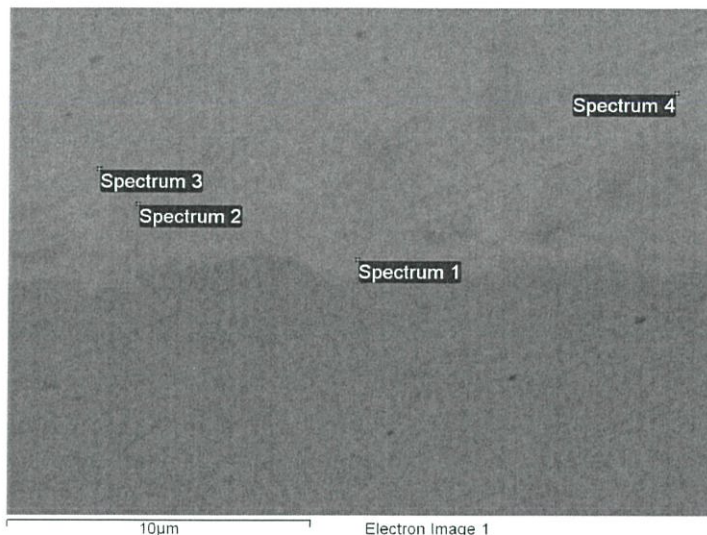
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.3 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

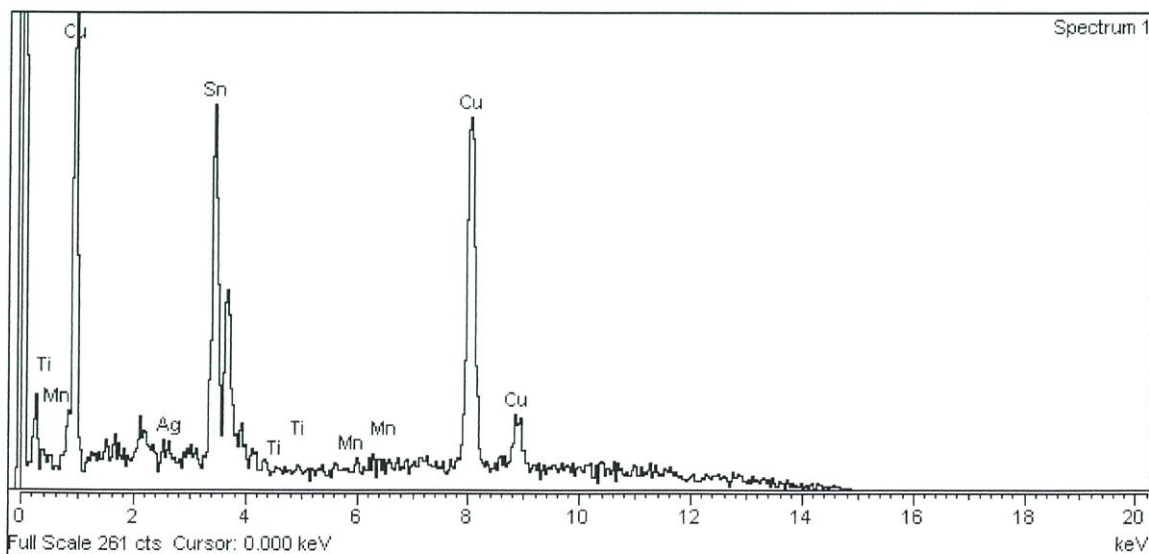
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	48.91	64.14
Ag L	0.00	0.00
Sn L	51.09	35.86
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 01:05 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 85.54  
Detector : Silicon  
Window : SATW

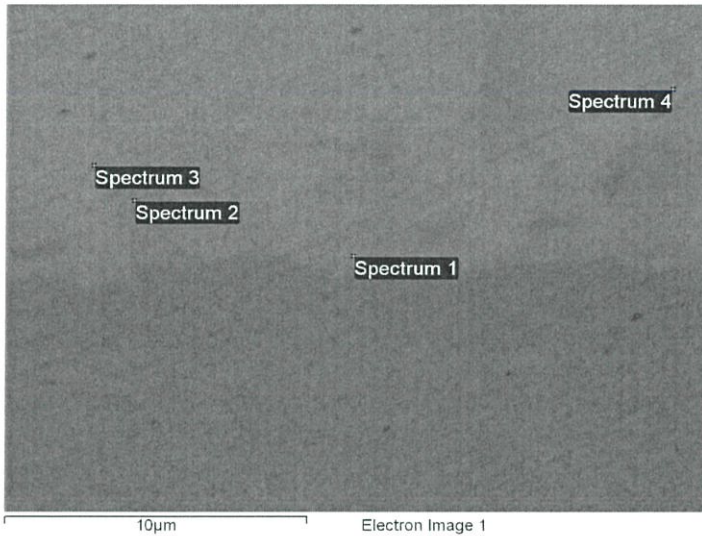
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.4 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

Standard :

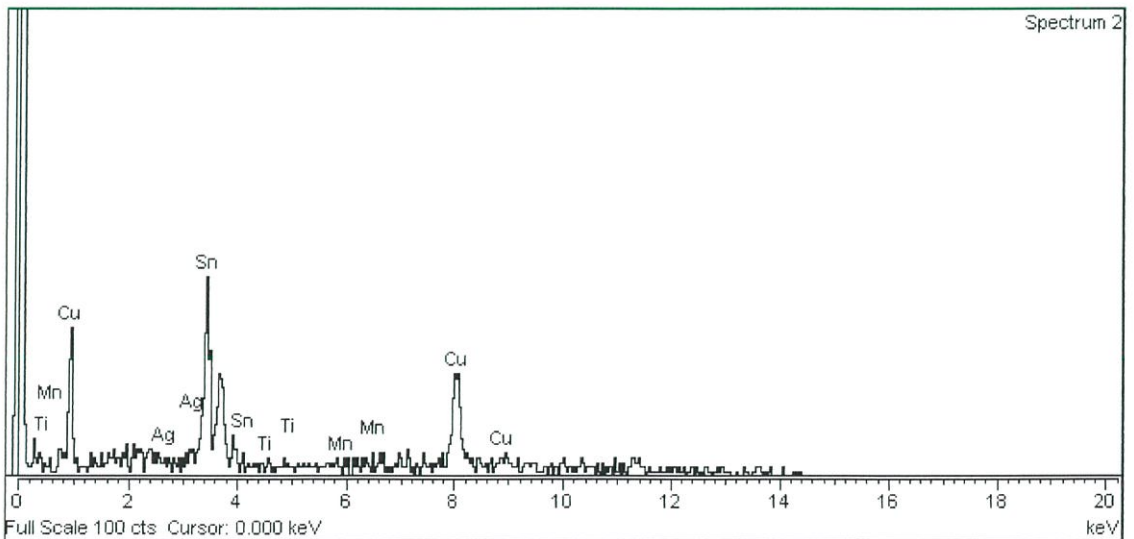
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	39.57	55.02
Ag L	0.00	0.00
Sn L	60.43	44.98
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 01:07 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 82.65  
Detector : Silicon  
Window : SATW

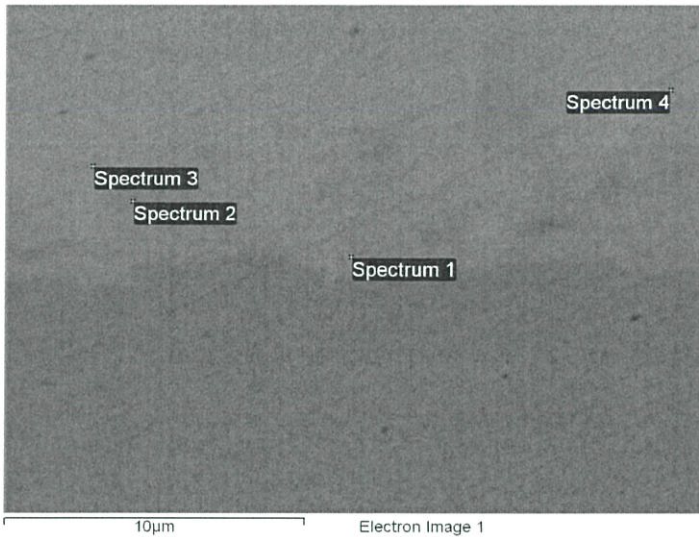
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.5 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

Standard :

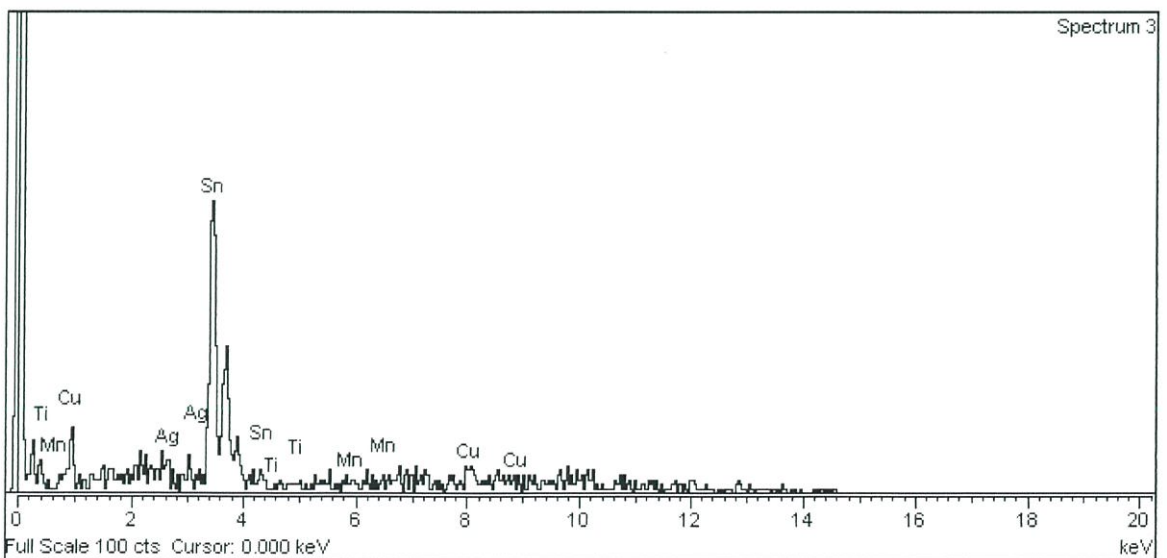
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	16.14	26.45
Ag L	0.00	0.00
Sn L	83.86	73.55
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 01:09 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 83.45  
Detector : Silicon  
Window : SATW

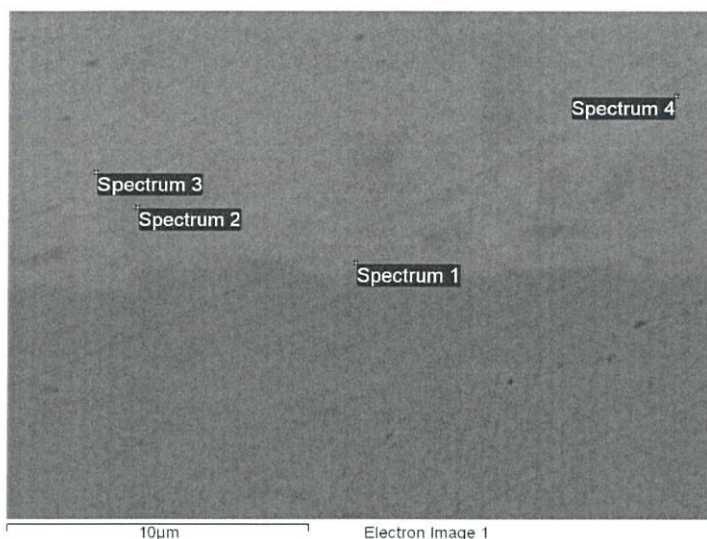
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.6 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 1

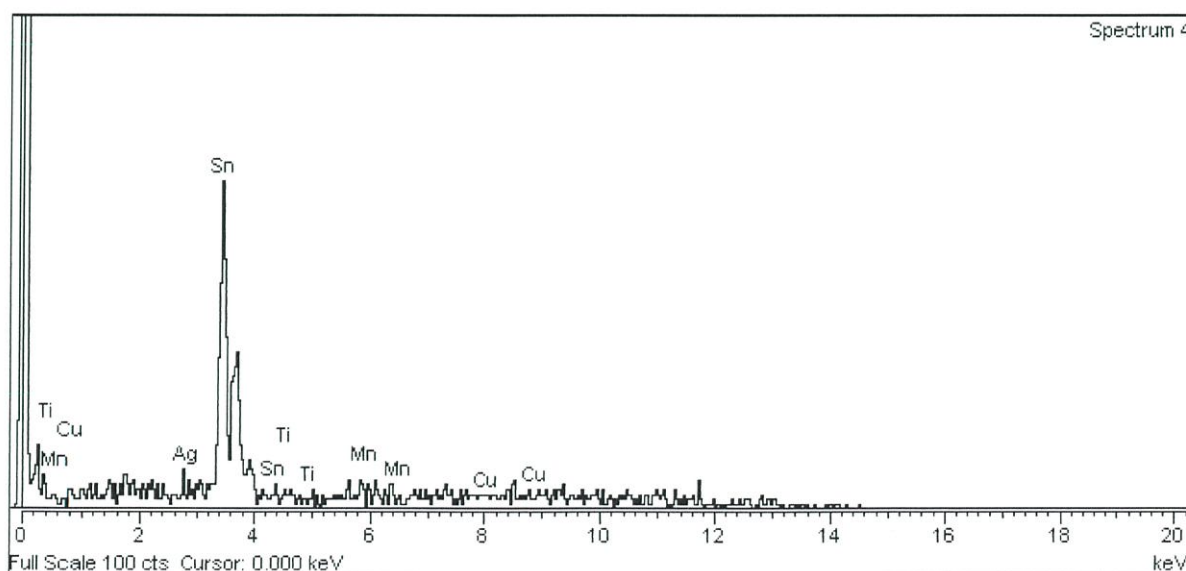
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Ag L	0.00	0.00
Sn L	100.00	100.00
Totals	100.00	

Label : Spectrum 4  
Collected : 25-Mar-2015 01:10 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 82.96  
Detector : Silicon  
Window : SATW

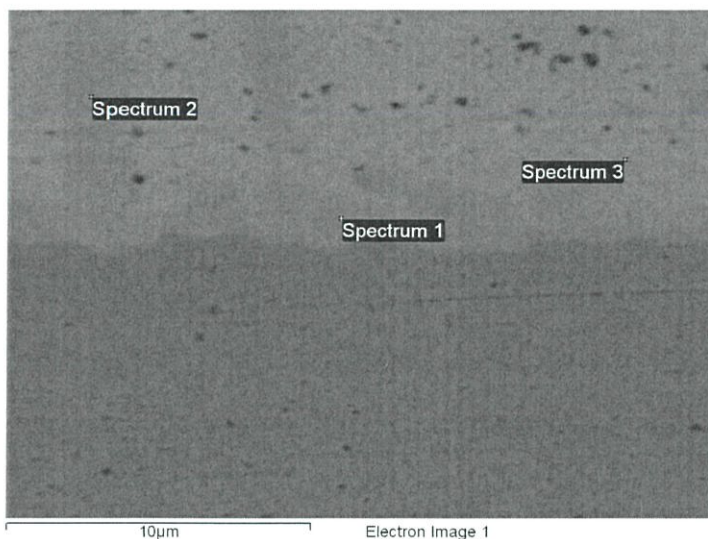
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.7 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% spectrum 4

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

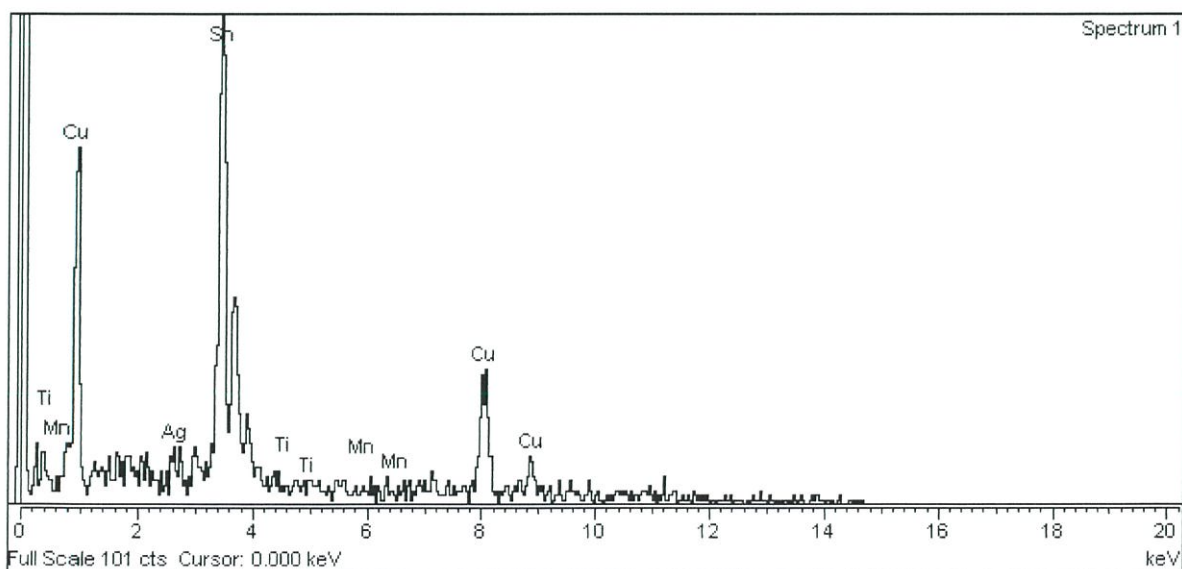
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	37.21	52.39
Ag L	3.63	3.01
Sn L	59.17	44.60
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 03:01 PM  
Livetime (s) : 37.26  
Real time (s) : 51.99  
Detector : Silicon  
Window : SATW

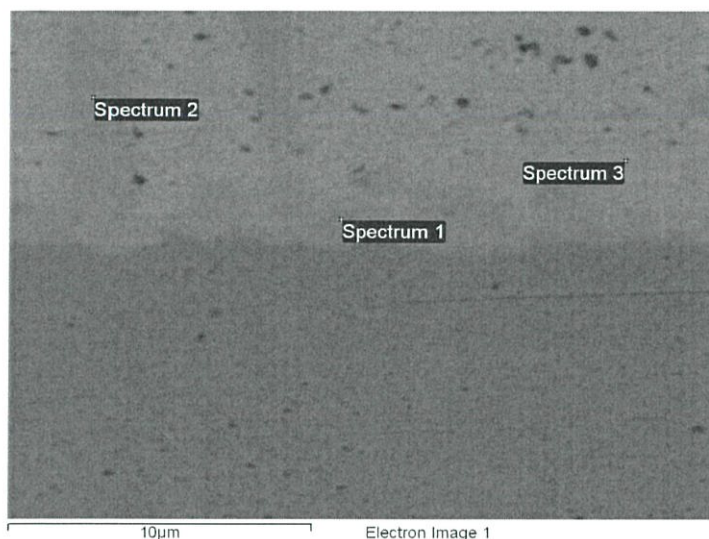
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ ๖.๘ การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 2

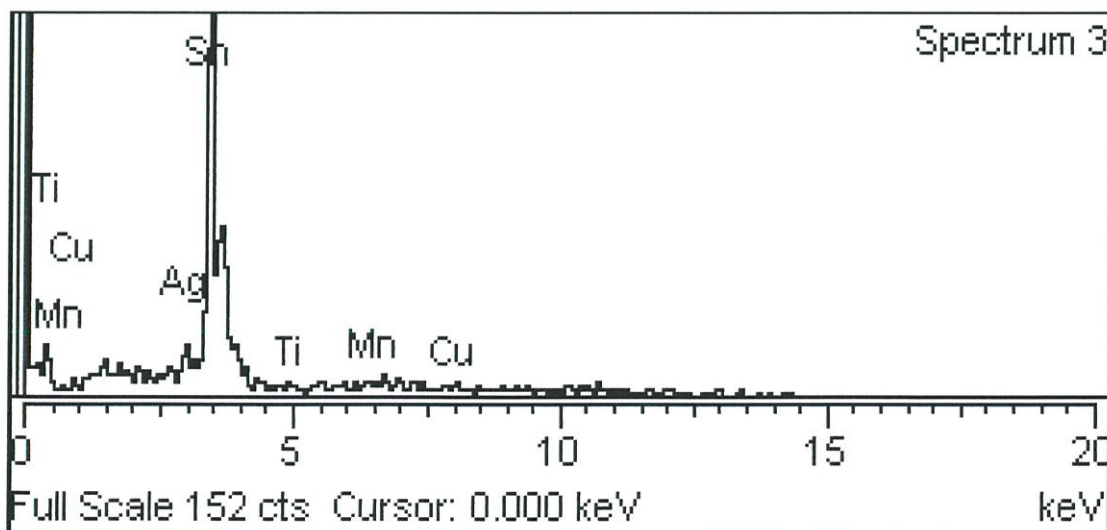
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	31.53	46.07
Ag L	4.84	4.16
In L	0.00	0.00
Sn L	63.63	49.76
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 03:02 PM  
Livetime (s) : 36.41  
Real time (s) : 50.39  
Detector : Silicon  
Window : SATW

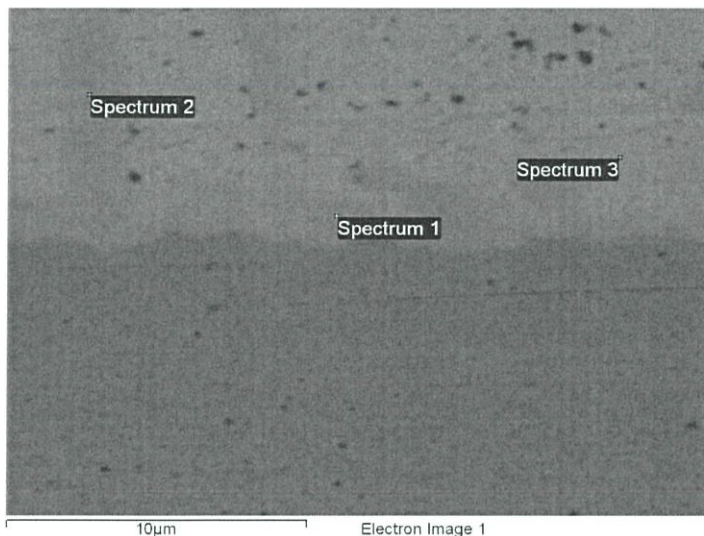
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ ๑.๙ การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

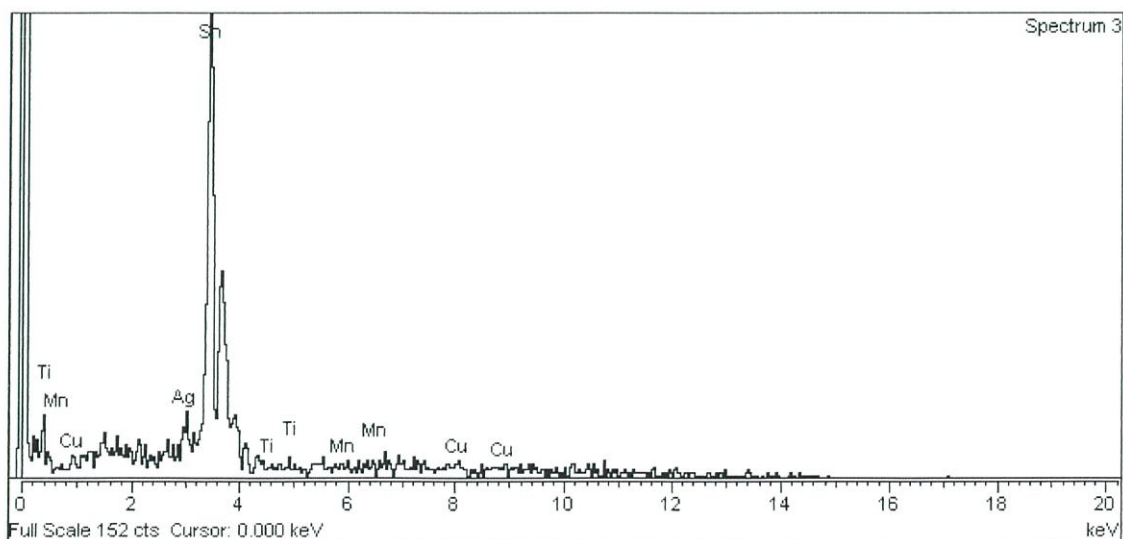
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	3.74	6.75
Ag L	2.93	3.12
Sn L	93.32	90.13
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 03:03 PM  
Livetime (s) : 38.57  
Real time (s) : 53.69  
Detector : Silicon  
Window : SATW

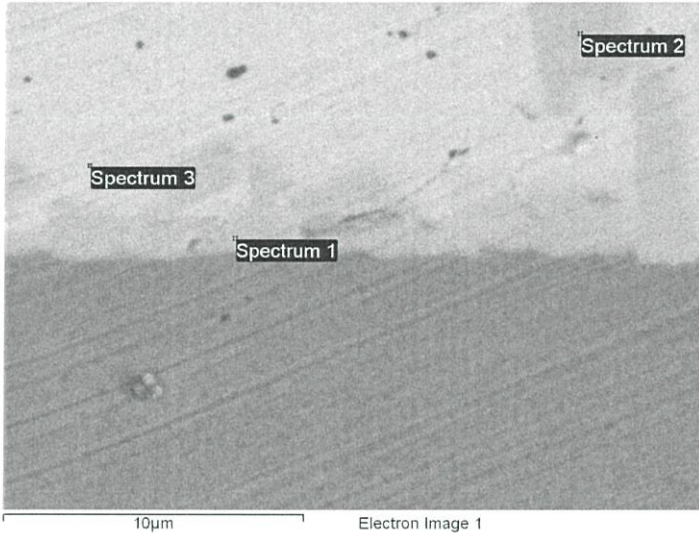
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.10 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

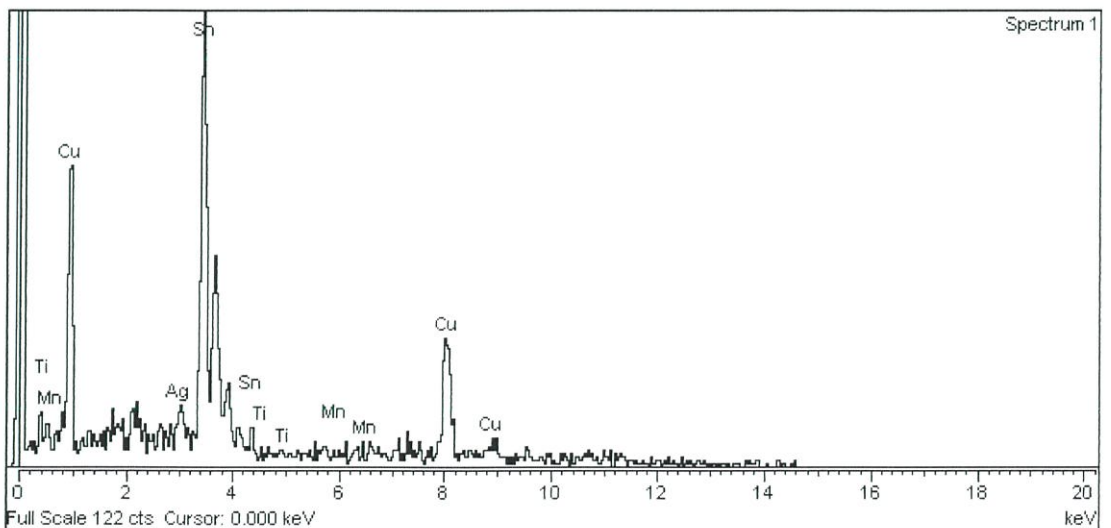
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	36.33	51.49
Ag L	2.59	2.16
Sn L	61.08	46.35
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 01:31 PM  
Livetime (s) : 37.13  
Real time (s) : 52.07  
Detector : Silicon  
Window : SATW

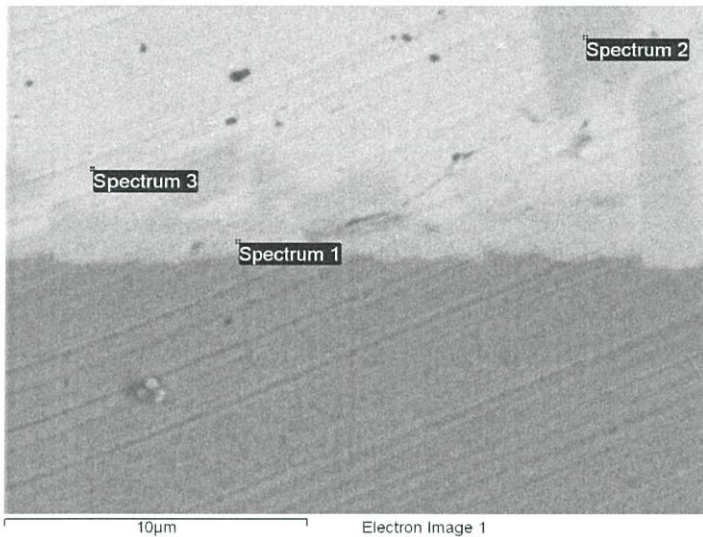
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.11 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

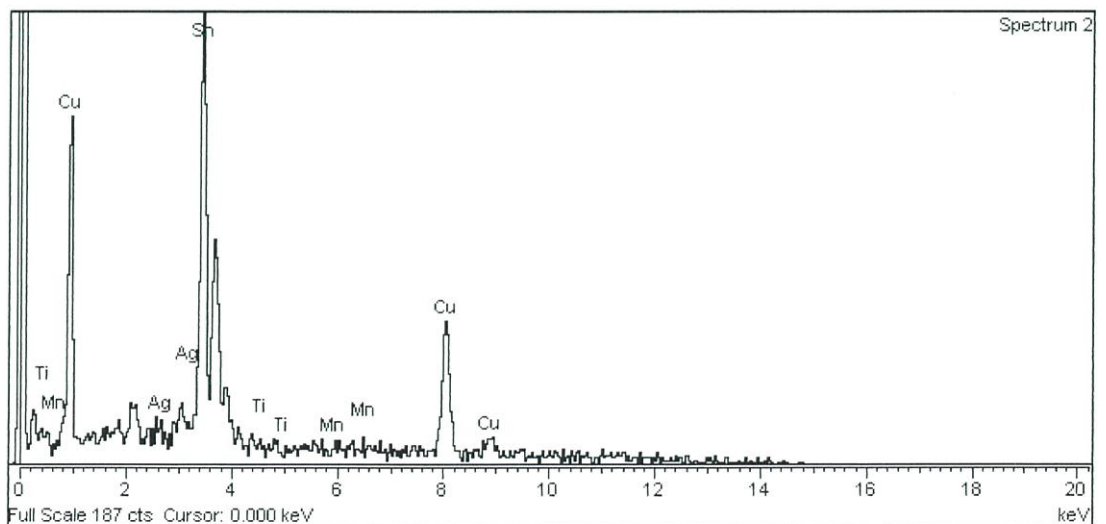
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	38.74	54.16
Ag L	0.00	0.00
Sn L	61.26	45.84
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 01:32 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 84.59  
Detector : Silicon  
Window : SATW

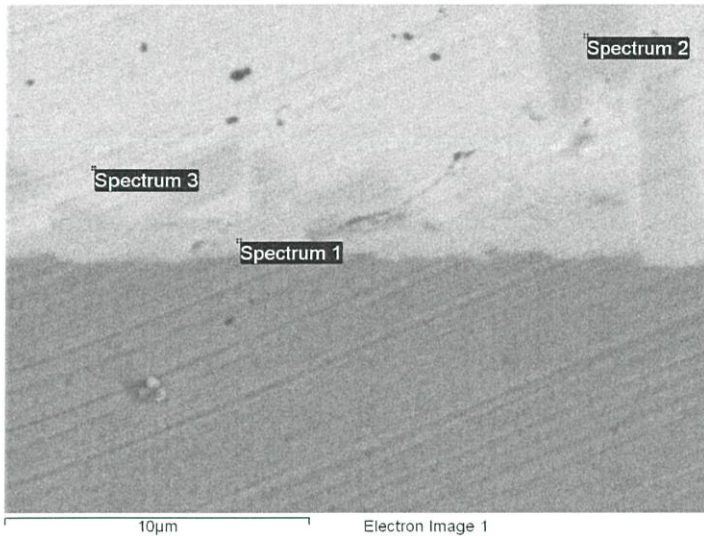
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.12 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt%



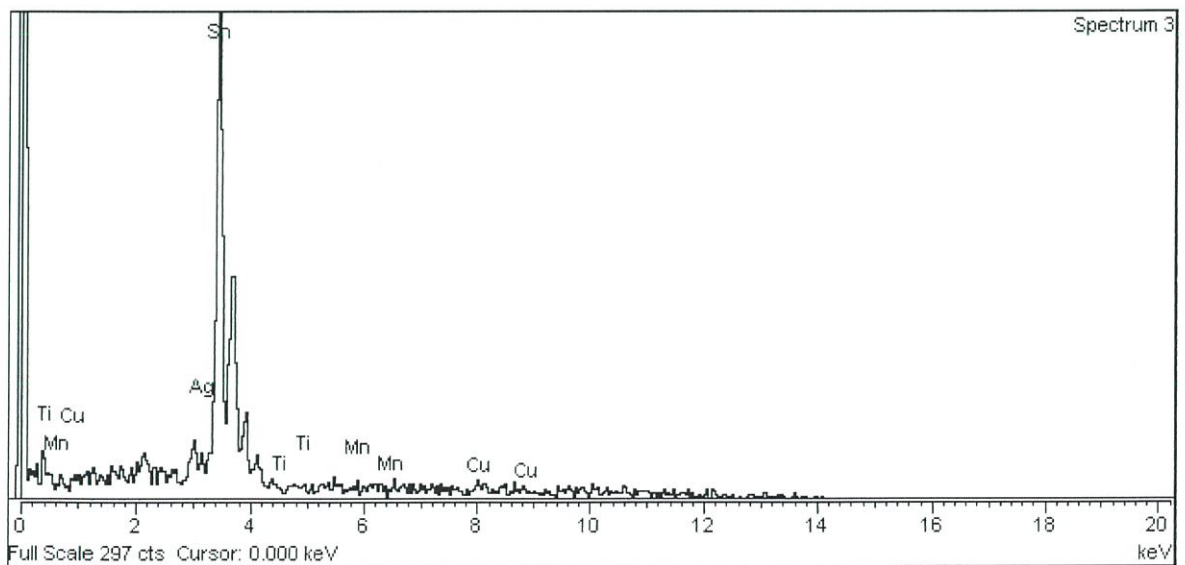
Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

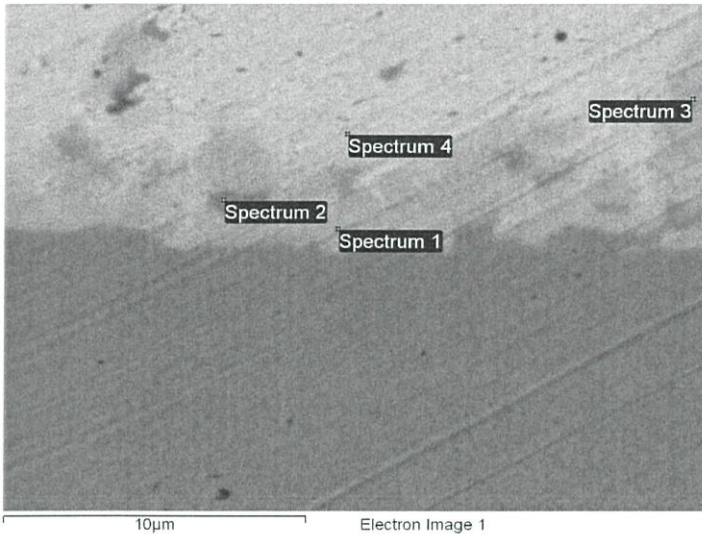
Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	2.54	4.62
Ag L	4.27	4.58
Sn L	93.19	90.80
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
 Collected : 25-Mar-2015 01:45 PM  
 Livetime (s) : 60.00  
 Real time (s) : 83.68  
 Detector : Silicon  
 Window : SATW  
  
 Tilt (deg) : 0.0  
 Elevation (deg) : 35.0  
 Azimuth (deg) : 0.0  
  
 Magnification : 5000 X  
 Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
 Process time : 6



รูปที่ จ.13 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



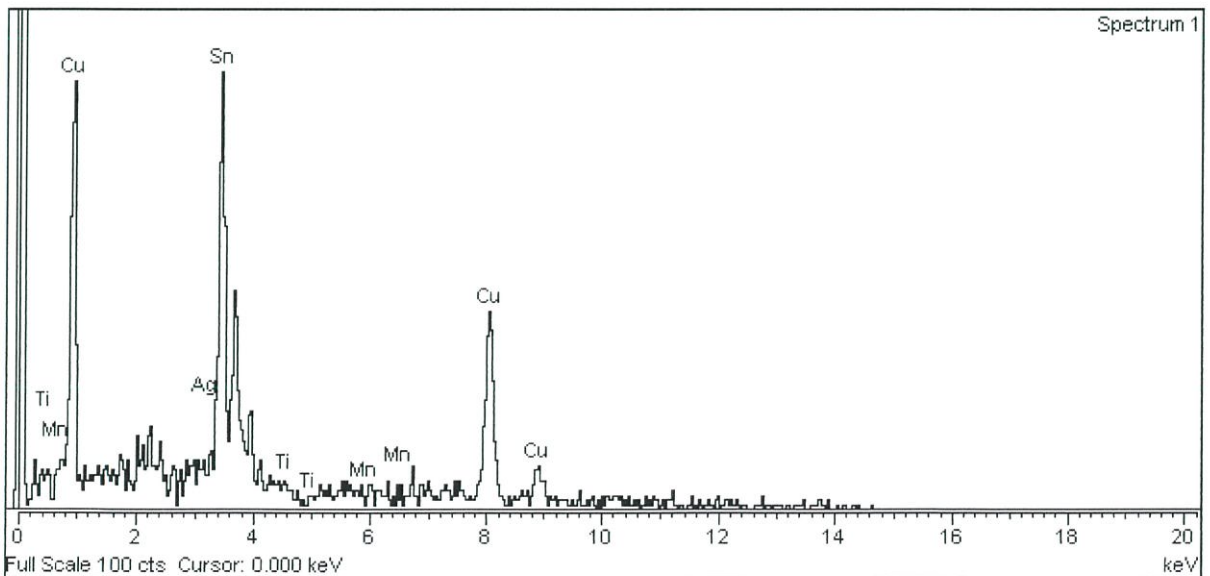
Label : Spectrum 1  
 Collected : 25-Mar-2015 01:50 PM  
 Livetime (s) : 27.30  
 Real time (s) : 38.53  
 Detector : Silicon  
 Window : SATW  
  
 Tilt (deg) : 0.0  
 Elevation (deg) : 35.0  
 Azimuth (deg) : 0.0  
  
 Magnification : 5000 X  
 Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
 Process time : 6

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
 (Normalised)  
 Number of iterations = 3

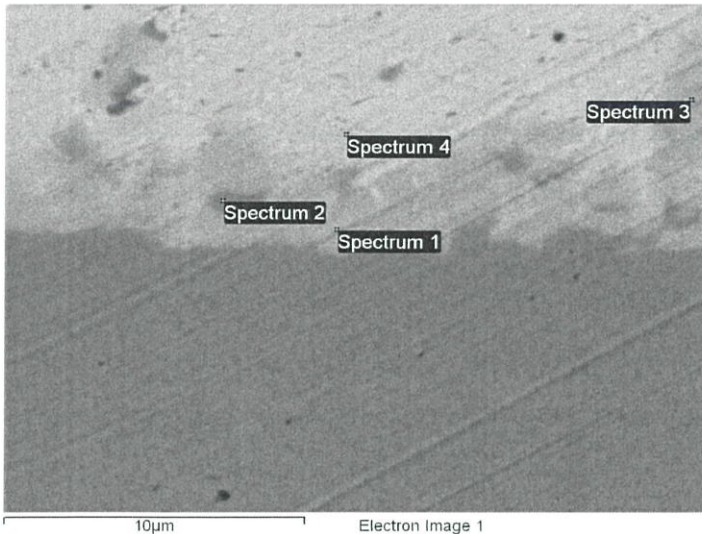
Standard :  
 Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	46.10	61.51
Ag L	0.00	0.00
Sn L	53.90	38.49
Totals	100.00	



รูปที่ จ.14 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	44.97	60.36
Ag L	1.52	1.20
Sn L	53.51	38.44
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 01:51 PM  
Livetime (s) : 39.81  
Real time (s) : 55.59  
Detector : Silicon  
Window : SATW

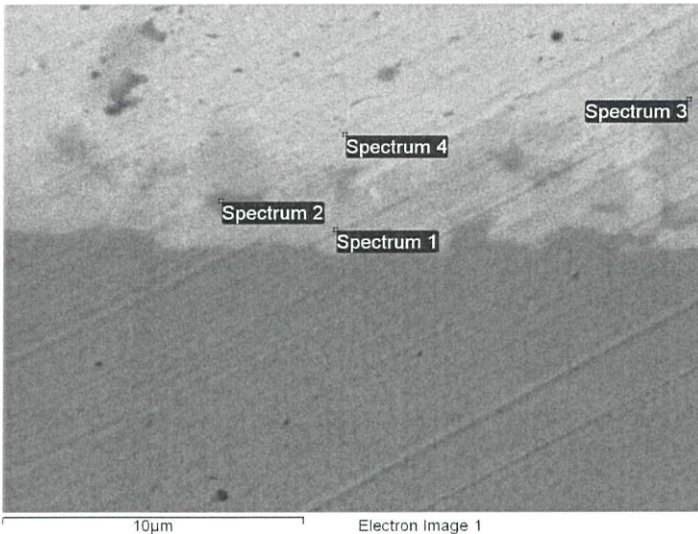
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.15 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

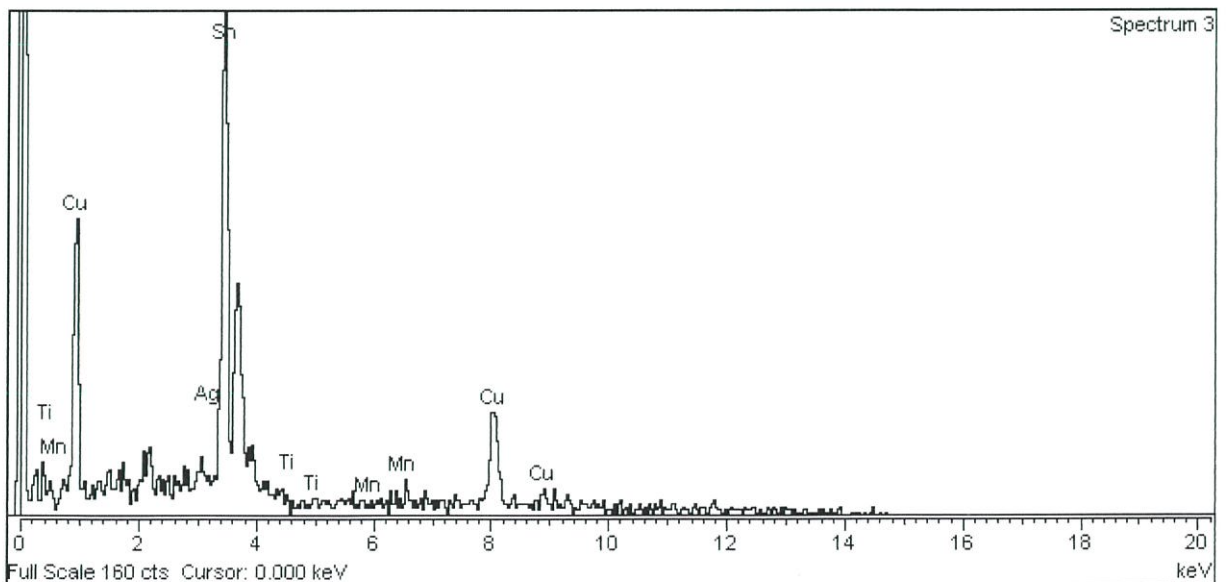
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	33.76	48.77
Ag L	0.00	0.00
Sn L	66.24	51.23
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 01:53 PM  
Livetime (s) : 37.78  
Real time (s) : 52.90  
Detector : Silicon  
Window : SATW

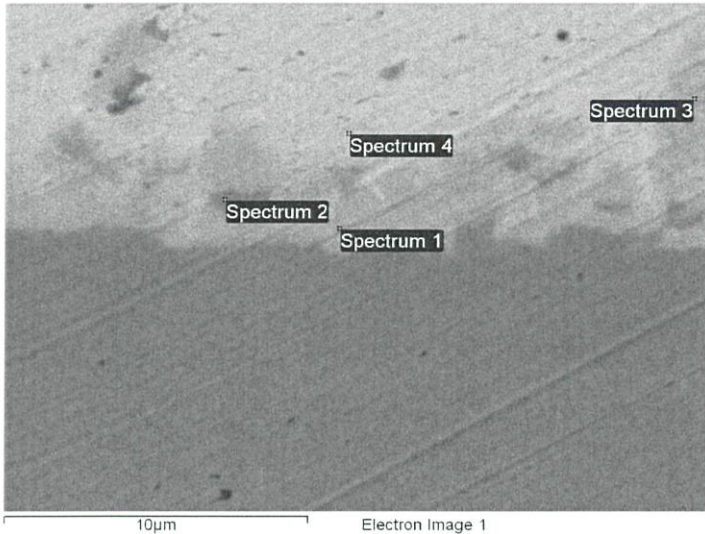
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.16 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 2

Standard :

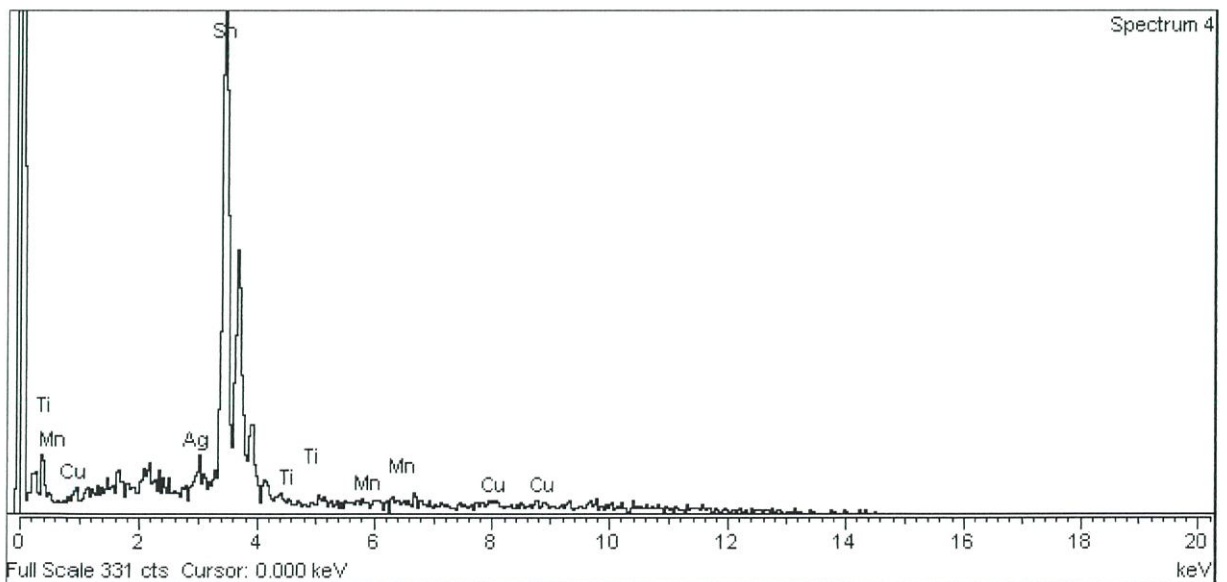
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	3.71	6.70
Ag L	1.72	1.83
Sn L	94.57	91.47
<b>Totals</b>	<b>100.00</b>	

Label : Spectrum 4  
Collected : 25-Mar-2015 01:54 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 84.02  
Detector : Silicon  
Window : SATW

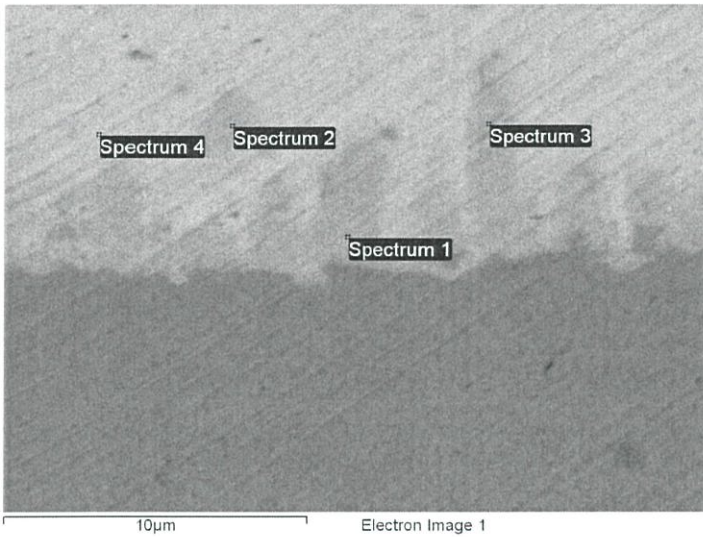
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.17 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% spectrum 4

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

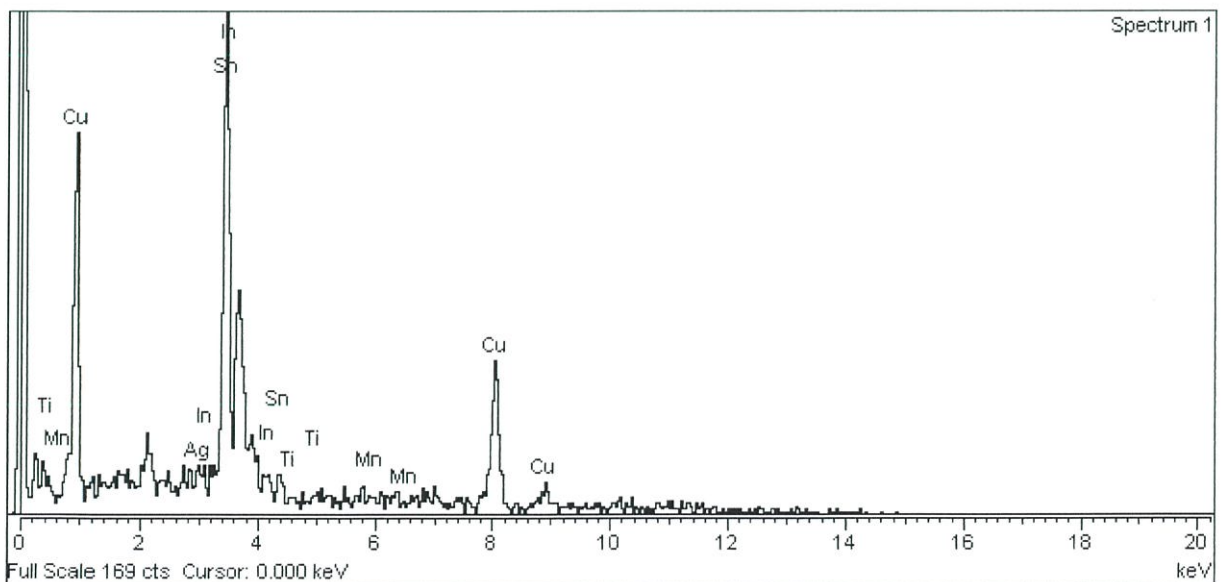
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	39.07	54.50
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	60.93	45.50
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 02:00 PM  
Livetime (s) : 36.87  
Real time (s) : 51.89  
Detector : Silicon  
Window : SATW

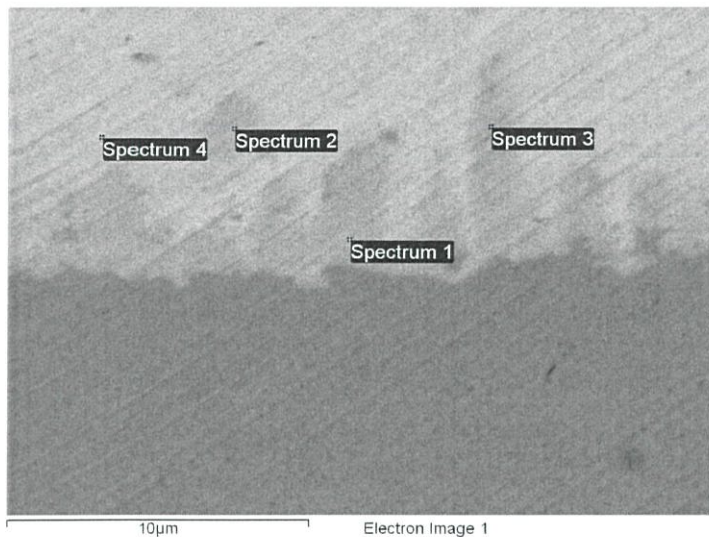
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.18 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

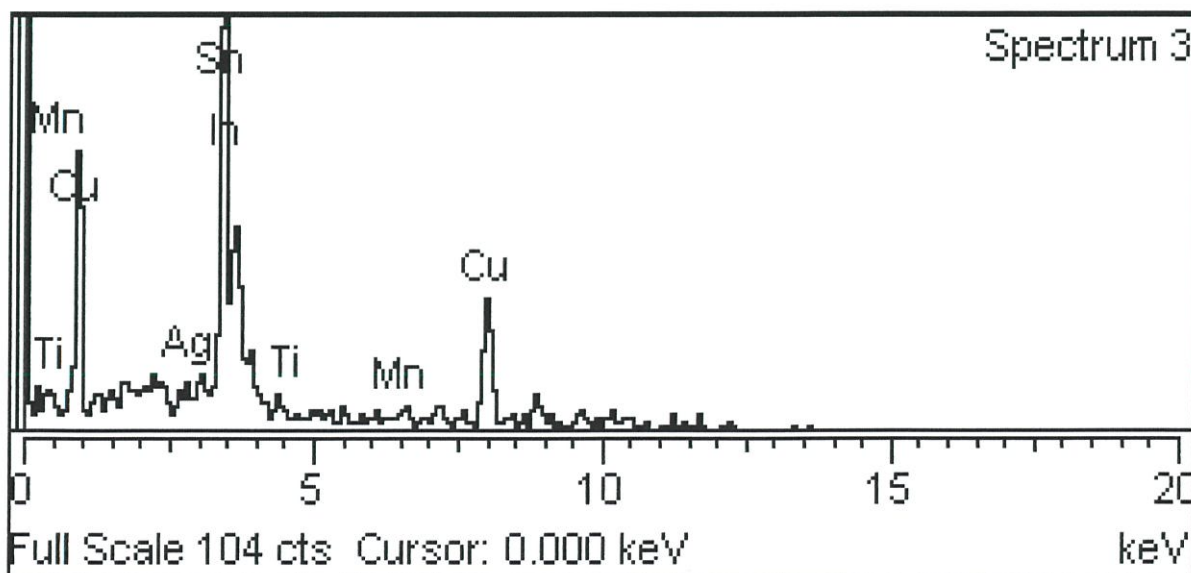
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	31.85	46.61
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	68.15	53.39
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 02:04 PM  
Livetime (s) : 30.90  
Real time (s) : 43.23  
Detector : Silicon  
Window : SATW

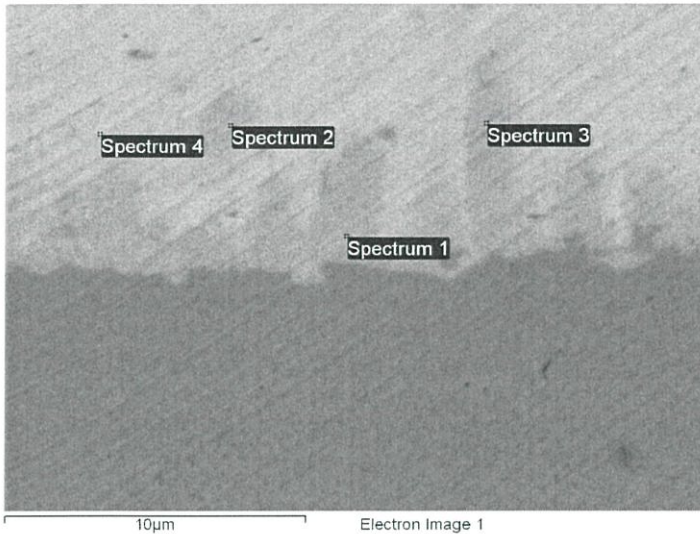
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.19 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt% spectrum 2

การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

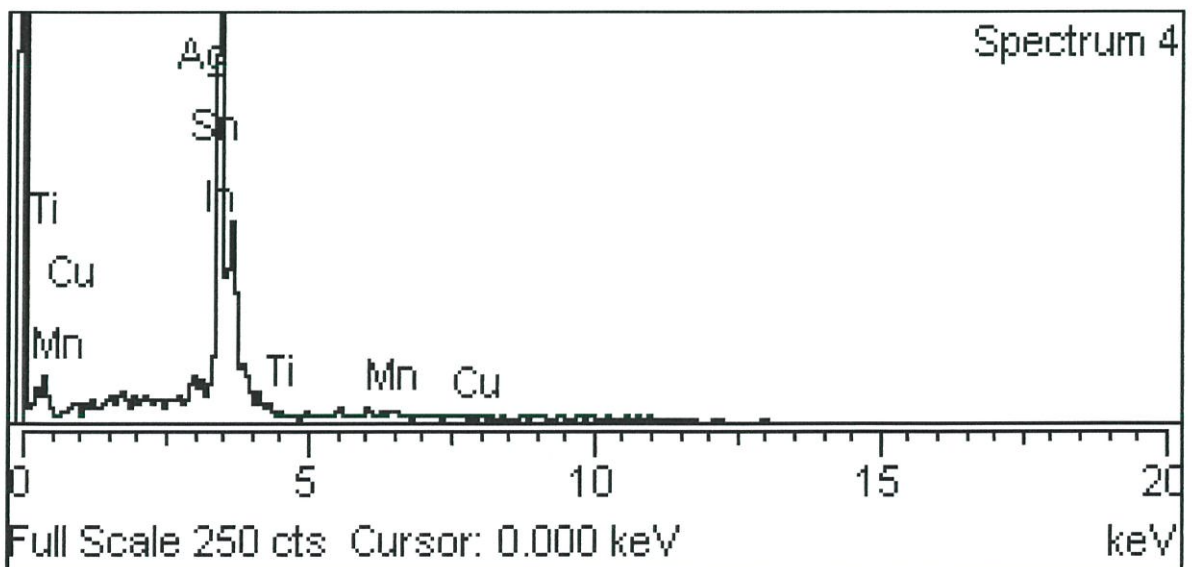
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	37.07	52.39
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	62.93	47.61
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 02:08 PM  
Livetime (s) : 25.33  
Real time (s) : 35.23  
Detector : Silicon  
Window : SATW

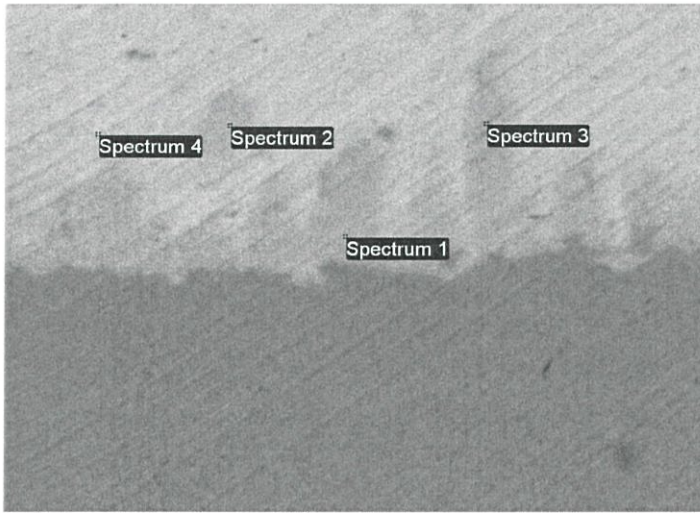
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.20 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 2

Standard :

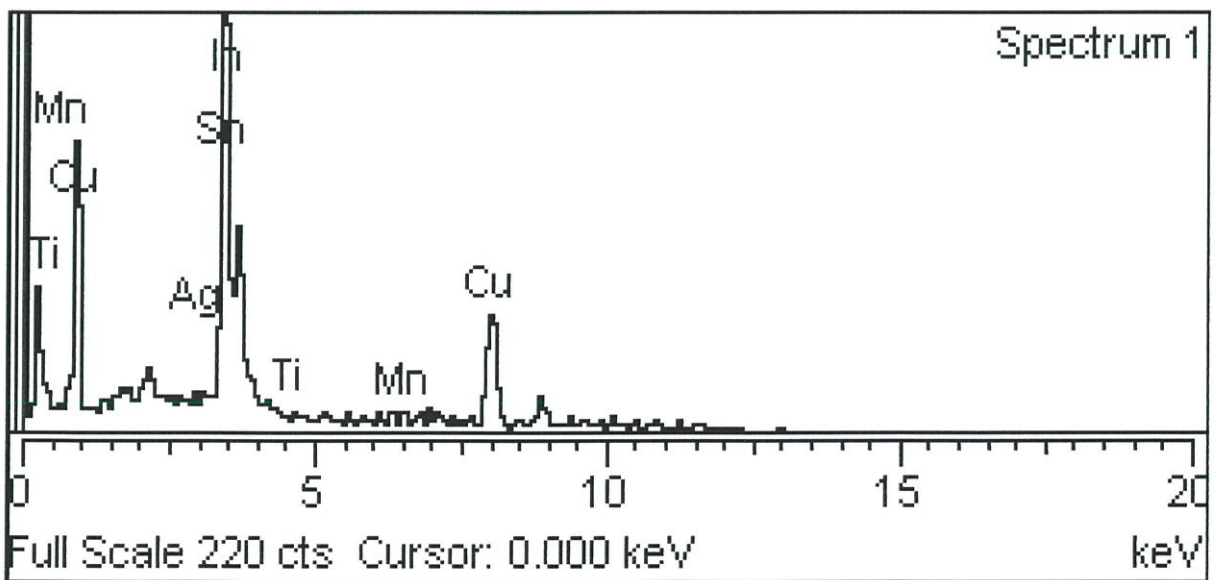
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Ag L	4.52	4.95
In L	0.00	0.00
Sn L	95.48	95.05
Totals	100.00	

Label : Spectrum 4  
Collected : 25-Mar-2015 02:11 PM  
Livetime (s) : 36.47  
Real time (s) : 51.21  
Detector : Silicon  
Window : SATW

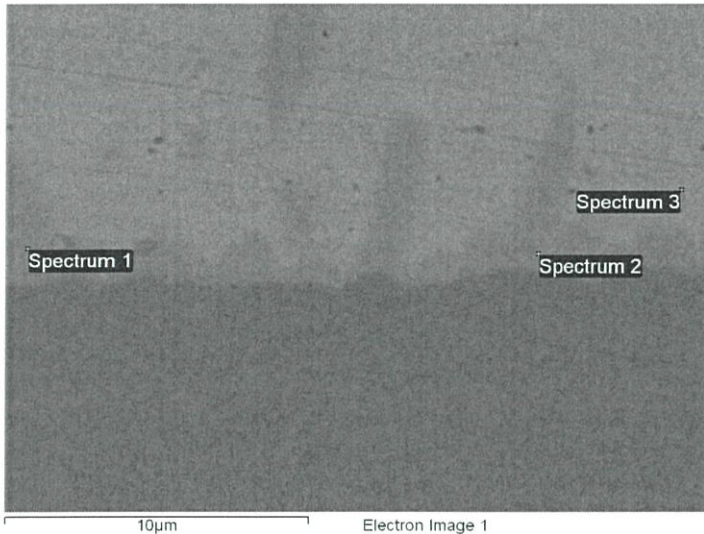
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.21 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.05 wt% + In 0.50 wt% spectrum 4

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

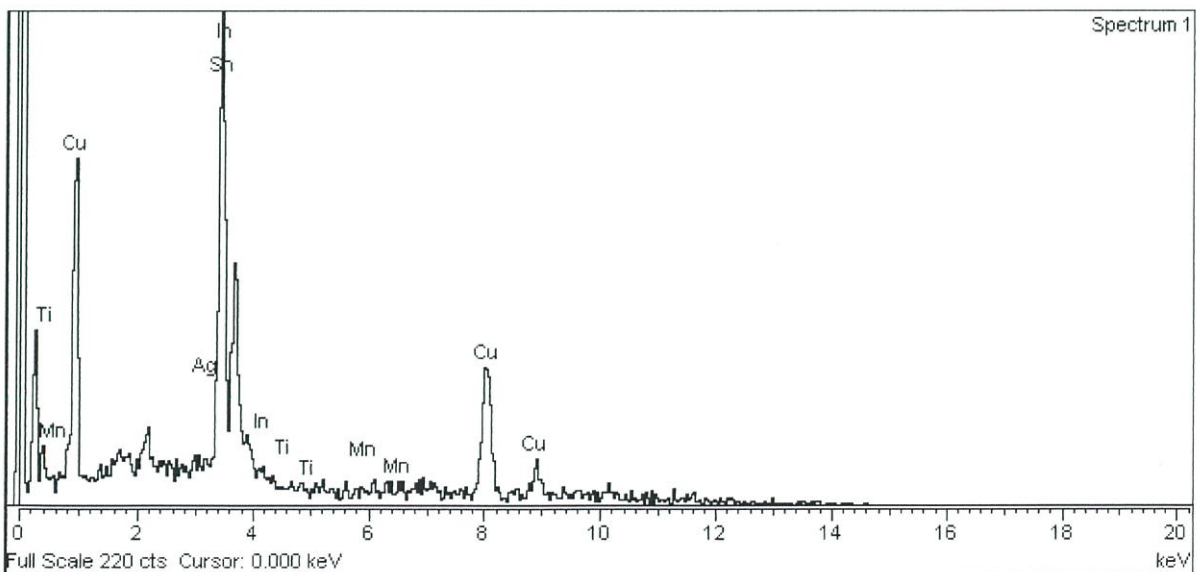
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	38.58	53.92
Ag L	1.62	1.34
In L	0.00	0.00
Sn L	59.80	44.75
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 02:19 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 84.02  
Detector : Silicon  
Window : SATW

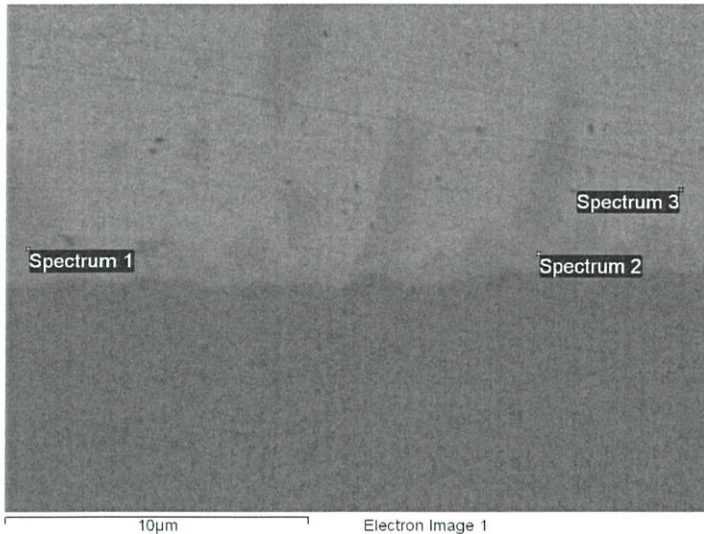
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.22 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt% spectrum 1

การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

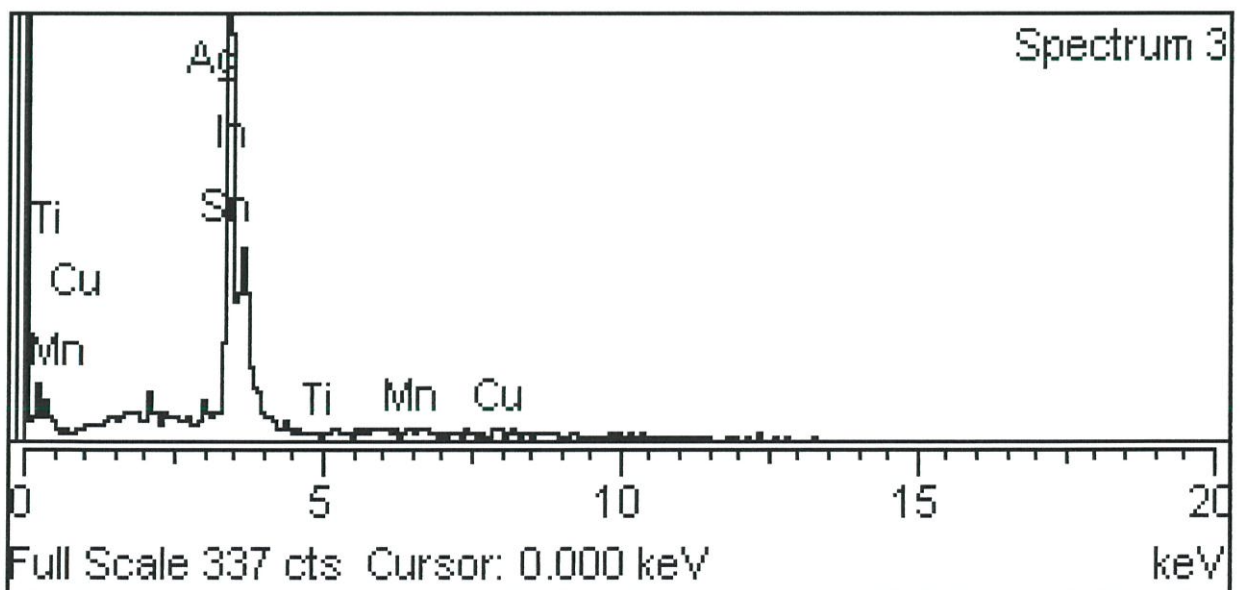
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	1.54	2.80
Mn K	0.00	0.00
Cu L	39.10	53.57
Ag L	1.38	1.12
In L	0.00	0.00
Sn L	57.97	42.52
Totals	100.00	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 02:29 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 84.18  
Detector : Silicon  
Window : SATW

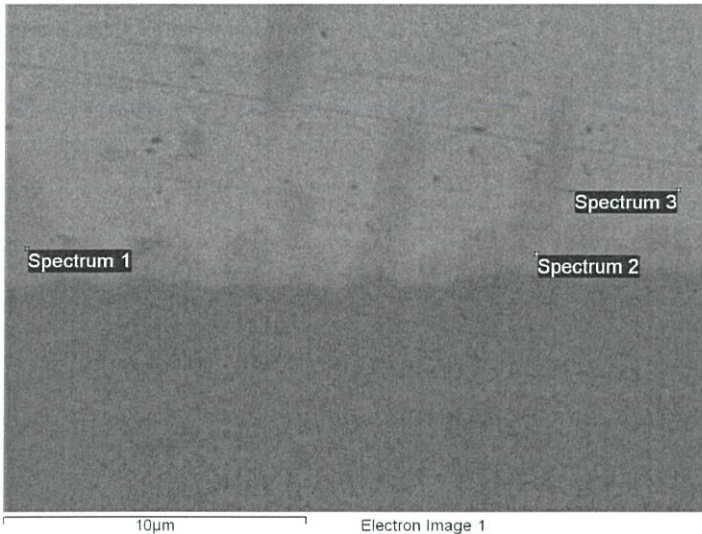
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.23 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
Peak possibly omitted : 2.109 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 1

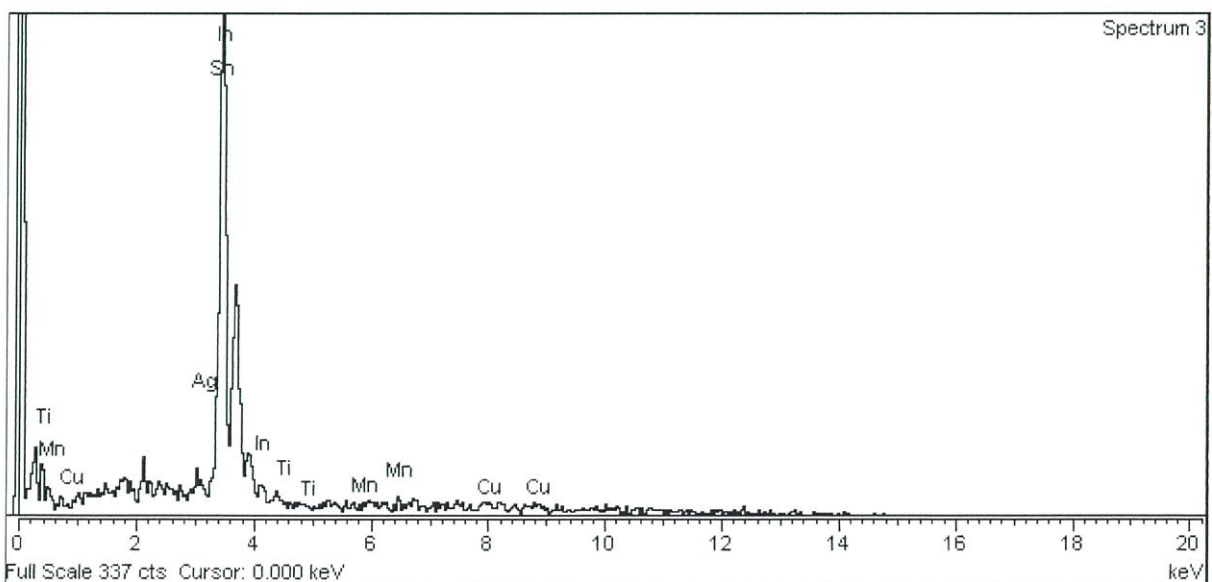
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	100.00	100.00
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 02:31 PM  
Livetime (s) : 53.64  
Real time (s) : 75.46  
Detector : Silicon  
Window : SATW

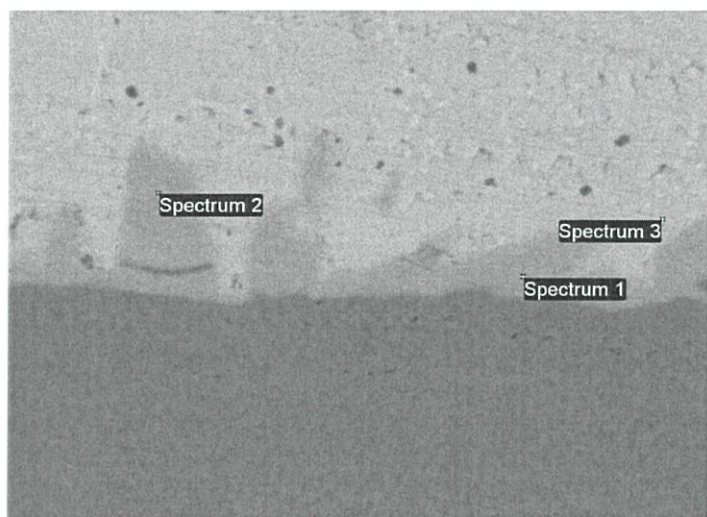
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.24 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.10 wt% + In 0.50 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt%



Label : Spectrum 1  
 Collected : 25-Mar-2015 02:36 PM  
 Livetime (s) : 43.81  
 Real time (s) : 61.42  
 Detector : Silicon  
 Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0  
 Elevation (deg) : 35.0  
 Azimuth (deg) : 0.0

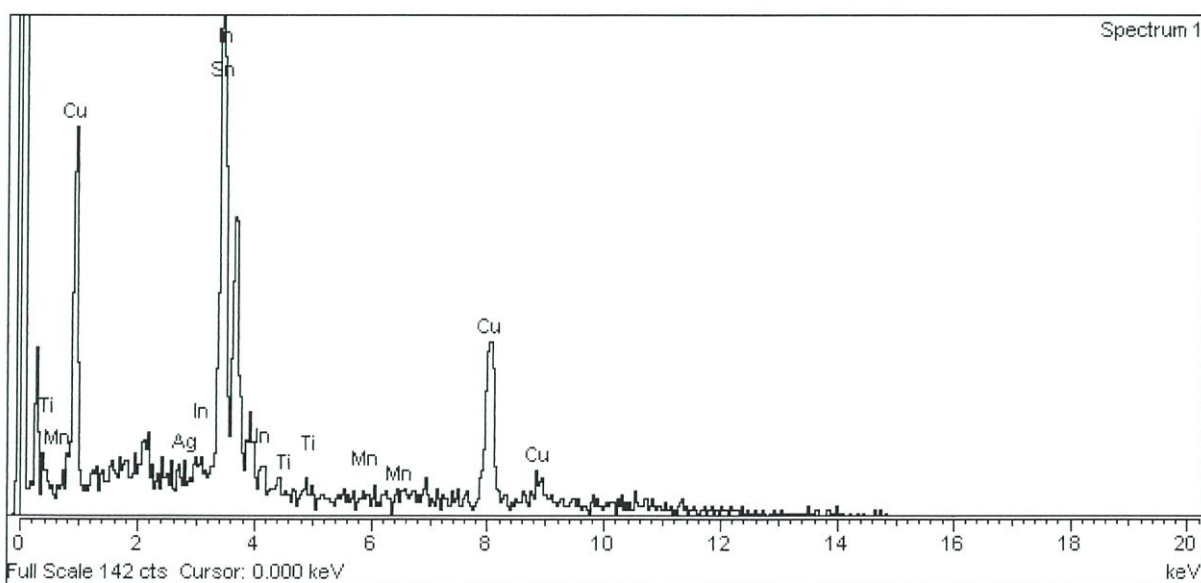
Magnification : 5000 X  
 Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
 Process time : 6

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

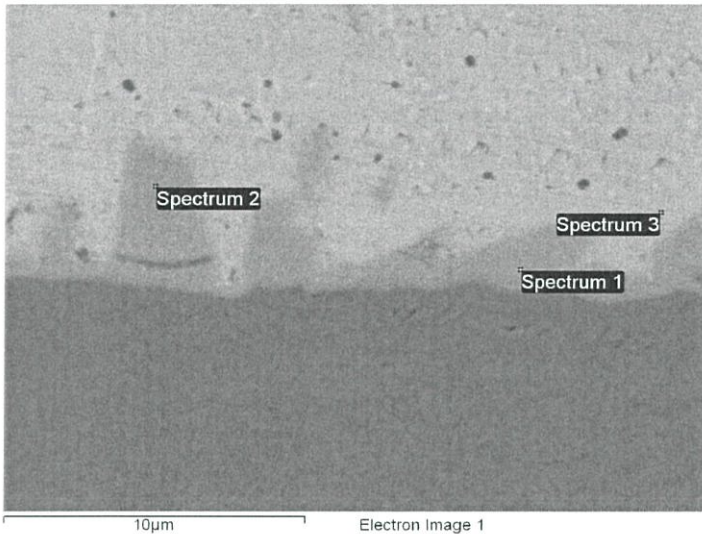
Standard :  
 Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
 In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	36.62	51.91
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	63.38	48.09
Totals	100.00	



รูปที่ จ.25 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt% spectrum 1

การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt%



Label : Spectrum 2  
 Collected : 25-Mar-2015 02:37 PM  
 Livetime (s) : 52.53  
 Real time (s) : 73.05  
 Detector : Silicon  
 Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0  
 Elevation (deg) : 35.0  
 Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
 Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
 Process time : 6

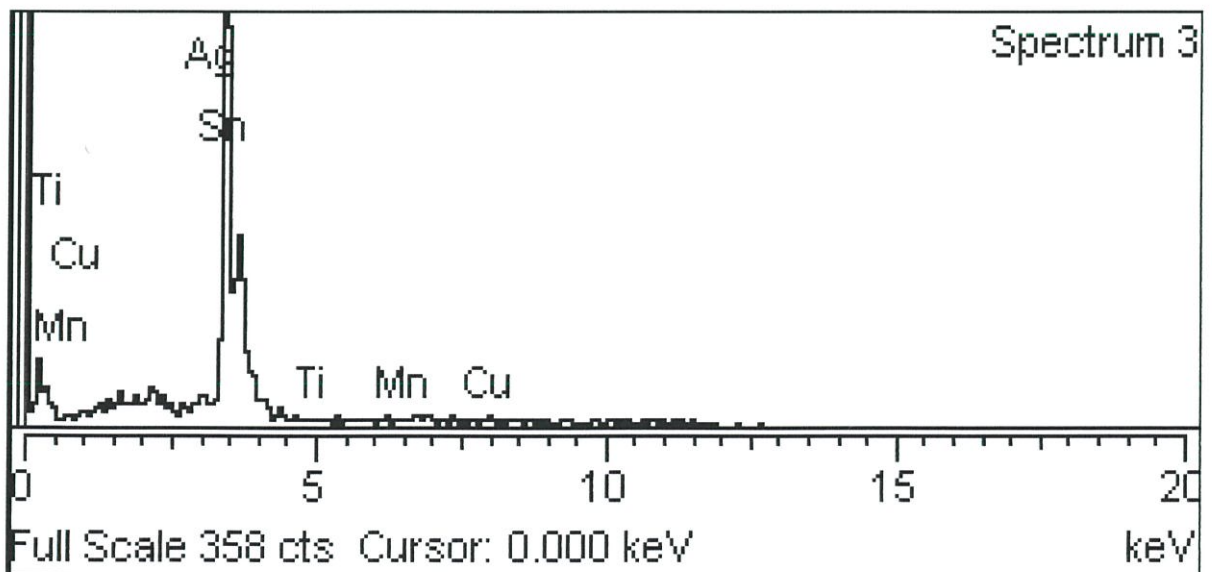
Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :

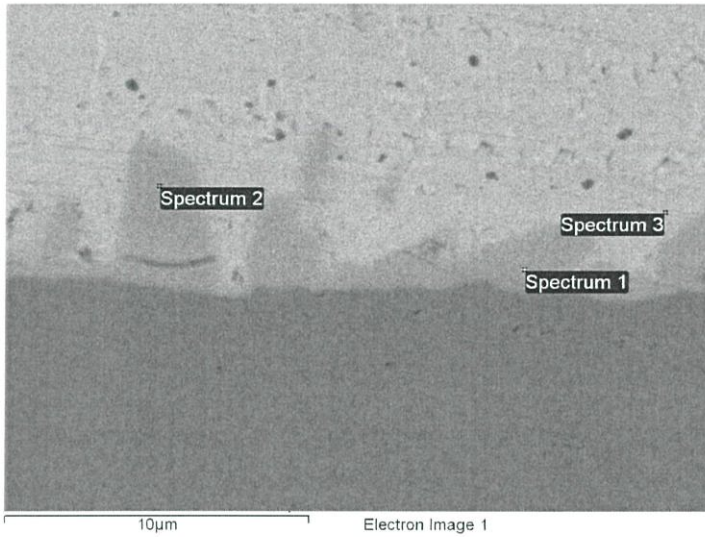
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
 In InAs 1-Jun-1999 12:00 AM  
 Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	39.41	54.85
Ag L	0.00	0.00
In L	0.00	0.00
Sn L	60.59	45.15
Totals	100.00	



รูปที่ จ.26 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt% spectrum 2

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt%



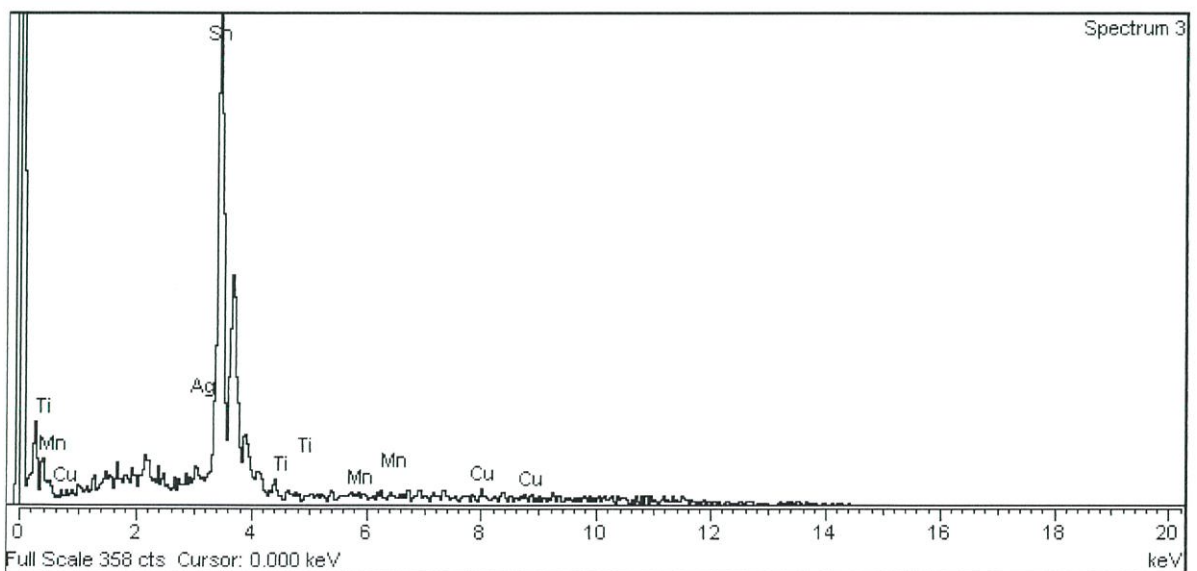
Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 1

Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

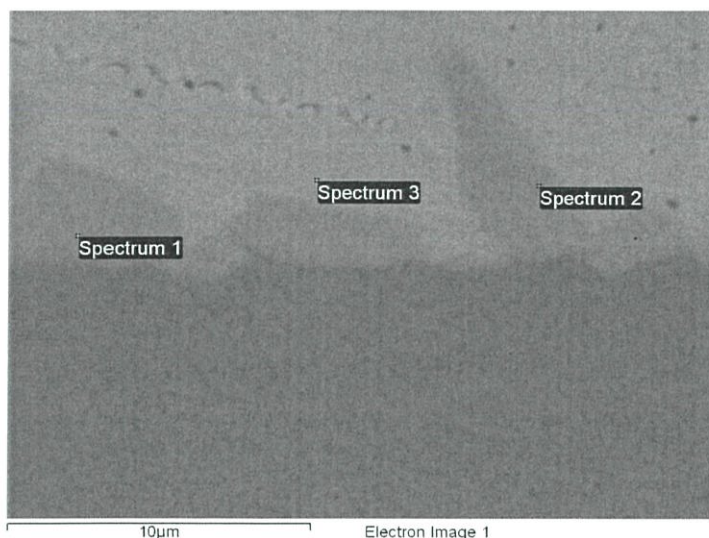
Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Ag L	0.00	0.00
Sn L	100.00	100.00
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
 Collected : 25-Mar-2015 02:38 PM  
 Livetime (s) : 60.00  
 Real time (s) : 83.97  
 Detector : Silicon  
 Window : SATW  
  
 Tilt (deg) : 0.0  
 Elevation (deg) : 35.0  
 Azimuth (deg) : 0.0  
  
 Magnification : 5000 X  
 Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
 Process time : 6



รูปที่ จ.27 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 0.50 wt% + In 0.50 wt% spectrum 3

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

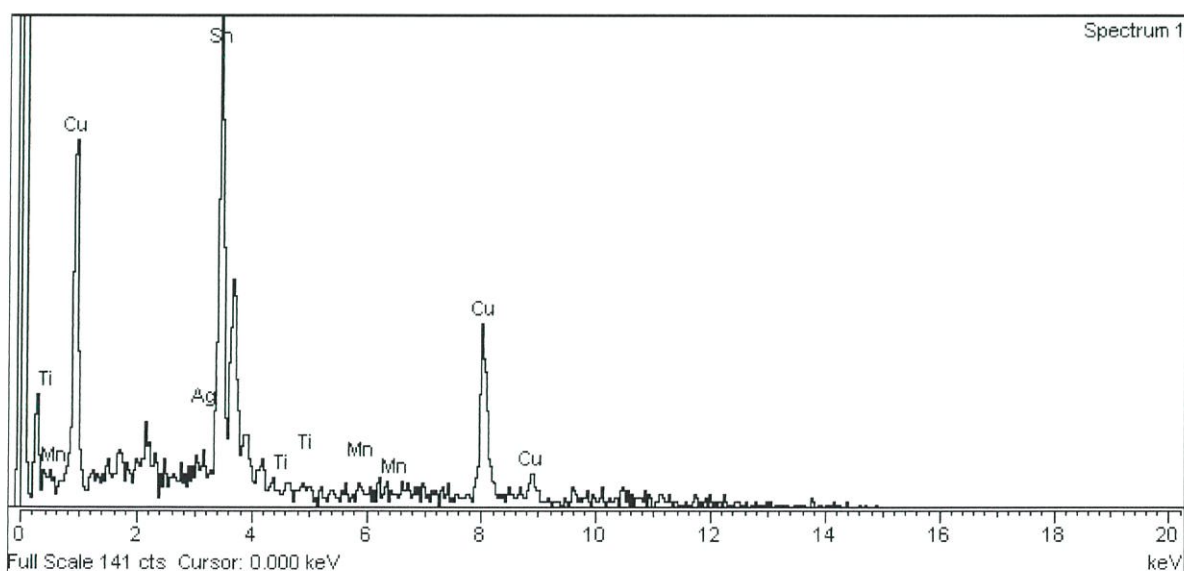
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	2.01	3.21
Cu L	38.43	52.90
Ag L	0.00	0.00
Sn L	59.56	43.89
Totals	100.00	

Label : Spectrum 1  
Collected : 25-Mar-2015 02:44 PM  
Livetime (s) : 39.29  
Real time (s) : 54.95  
Detector : Silicon  
Window : SATW

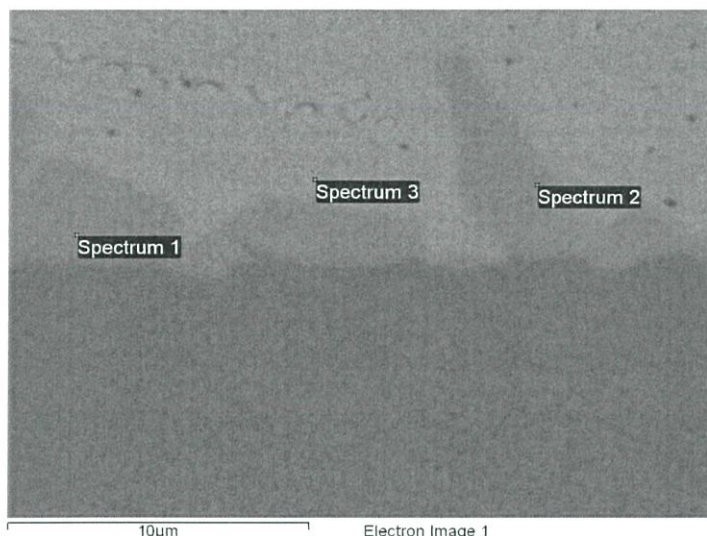
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.28 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt% spectrum 1

# การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 3

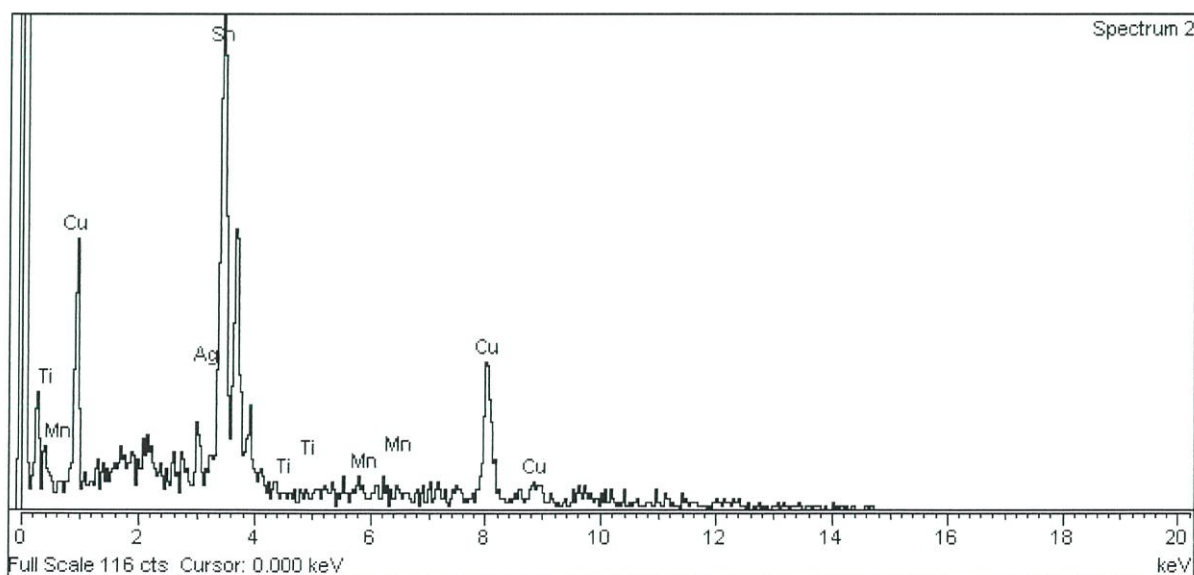
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	30.71	45.13
Ag L	4.38	3.79
Sn L	64.91	51.08
<b>Totals</b>	<b>100.00</b>	

Label : Spectrum 2  
Collected : 25-Mar-2015 02:45 PM  
Livetime (s) : 33.72  
Real time (s) : 47.68  
Detector : Silicon  
Window : SATW

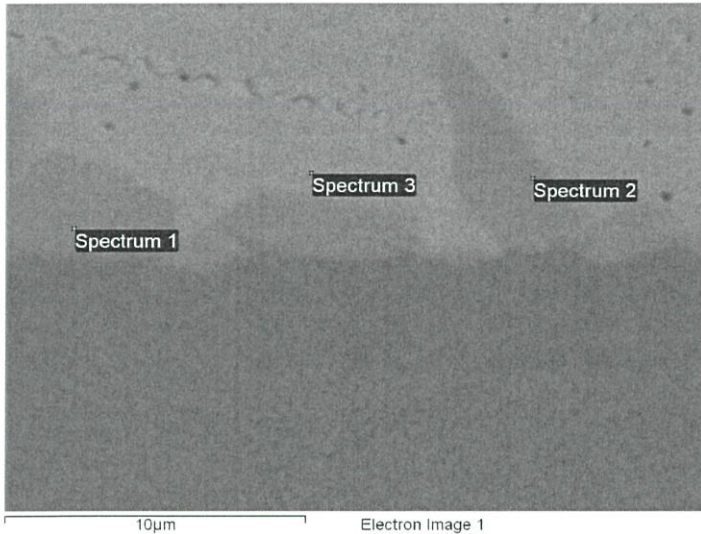
Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage (kV) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.29 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt% spectrum 2

การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt%



Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed  
(Normalised)  
Number of iterations = 1

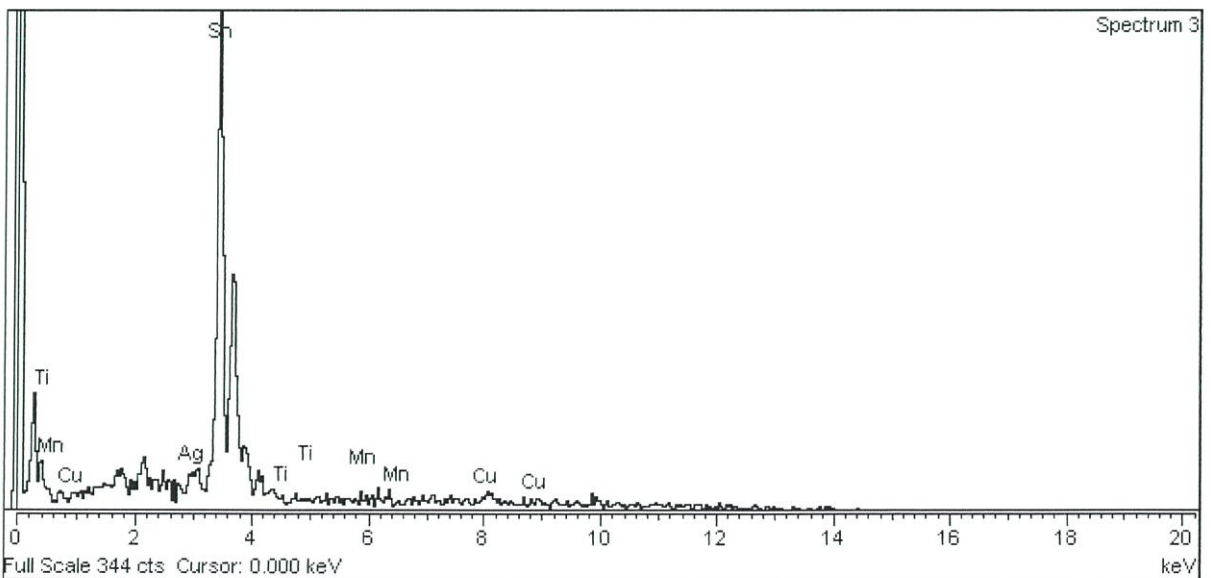
Standard :  
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM  
Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM  
Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM  
Sn Sn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.00	0.00
Mn K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Ag L	0.00	0.00
Sn L	100.00	100.00
Totals	100.00	

Label : Spectrum 3  
Collected : 25-Mar-2015 02:46 PM  
Livetime (s) : 60.00  
Real time (s) : 84.02  
Detector : Silicon  
Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0  
Elevation (deg) : 35.0  
Azimuth (deg) : 0.0

Magnification : 5000 X  
Accelerating voltage ( kV ) : 15.00  
Process time : 6



รูปที่ จ.30 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของ SAC + Mn-doped TiO<sub>2</sub> 1.00 wt% + In 0.50 wt% spectrum 3