

อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติ
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305

EFFECTS OF Mn-DOPED TiO₂, TiO₂ AND In ON PROPERTIES OF SAC305
LEAD-FREE SOLDER PASTE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-217-046

อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติ
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305

EFFECTS OF Mn-DOPED TiO₂, TiO₂ AND In ON PROPERTIES OF SAC305
LEAD-FREE SOLDER PASTE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-217-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF Mn-DOPED TiO₂, TiO₂ AND In ON PROPERTIES OF SAC305
LEAD-FREE SOLDER PASTE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-217-046
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีป SAC305
Thesis Title Effects of Mn-Doped TiO₂, TiO₂ and In on Properities of SAC305 Lead-free Solder Paste
นักศึกษา นายวันยุทธ สุวรรณเครือ
รหัสประจำตัว 57601326
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-217-046

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมฤกษ์ จันทรวงศ์	
ดร.จิตรภรณ์ วงศ์งาม	
ดร.นิรันดร์ พิสุทธิานนท์	
รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต	
รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂ , TiO ₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305
นักศึกษา	วันยุทธ สุวรรณเครือ
รหัสประจำตัว	57601326
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ อนุภาคนาโน TiO₂ และ In ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 และทำการศึกษาคross-section จุลภาคของรอยบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนกับแผ่นรองทองแดงก่อน และหลังการบ่มด้วยความร้อน จากผลการทดสอบอุณหภูมิจุดหลอมเหลวพบว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ สามารถช่วยลดอุณหภูมิโซลิดัส อุณหภูมิลิควิดัส และช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้ ส่วนการเติม In ลงในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนพบว่าทำให้อุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม In จะช่วยลดอุณหภูมิลิควิดัส และช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้อย่างชัดเจน สำหรับในการทดสอบความสามารถในการเปียกพบว่าอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีได้ เมื่อเติมในปริมาณไม่เกิน 0.5 wt% และการเติม In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ จะช่วยให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนดีขึ้น ในด้านความสามารถในการพิมพ์พบว่าโลหะบัดกรีจะมีความสามารถในการพิมพ์ลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ในปริมาณมาก โดยการเติม In จะช่วยให้ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนดีขึ้น และในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นรอยต่อเป็นเฟส Cu₆Sn₅ ทั้งนี้การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ และหลังจากบ่มชิ้นงานด้วยความร้อนพบว่าจะเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₃Sn เกิดขึ้น โดยการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ในปริมาณมากจะช่วยให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะลดลง

Thesis title	Effects of Mn-Doped TiO ₂ , TiO ₂ and In on Properties of SAC305 Lead-free Solder Paste
Student	Mr. Wanyuth Suwannakrue
Student ID.	57601326
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This thesis was aimed to study the influence of Mn-doped TiO₂ nanoparticles, TiO₂ nanoparticles and In on the melting temperatures, wettability, printability of SAC305 lead-free solder paste. Microstructure of the solder joint with copper substrate before and after thermal aging was also investigated. The findings showed that the addition of Mn-doped TiO₂ nanoparticles and TiO₂ nanoparticles decreases the solidus and liquidus temperature, and the pasty range is obviously decreased. With the addition of In, the solidus temperature is increased while the liquidus temperature and the pasty range are clearly decreased. In case of wettability, the study indicated that Mn-doped TiO₂ nanoparticles and TiO₂ nanoparticles no more than 0.5 wt% together with In and Mn-doped TiO₂ nanoparticles improve wettability of nanocomposite solder. So that, the addition of In and Mn-doped TiO₂ nanoparticles, TiO₂ nanoparticles can improve the wettability of nanocomposite solder. In terms of printability, the excessive addition of Mn-doped TiO₂ nanoparticles and TiO₂ nanoparticles reduce printability of nanocomposite solder. In case of microstructure of solder test, by reflow soldering method, the Cu₆Sn₅ intermetallic compound is found at the interface of solder. In other words, the Optimal amount of Mn-doped TiO₂ nanoparticles and TiO₂ nanoparticles reduce the thickness of intermetallic layer. Besides, after thermal aging, the Cu₃Sn is found and the excessive amount of Mn-doped TiO₂ nanoparticles and TiO₂ nanoparticles decrease the thickness of intermetallic layer.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้นั้นผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นผู้มอบโอกาสให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณพี่ๆทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนสำหรับความช่วยเหลือในงานวิจัย ทั้งการให้คำแนะนำ แสดงความคิดเห็น แลกเปลี่ยนประสบการณ์ ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัว สุวรรณเครือ ที่ให้ทั้งกำลังใจ และกำลังใจทรัพย์ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการให้แก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

วันยุทธ สุวรรณเครือ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	4
2.1.2 วิธีการบัดกรี (Soldering methods).....	5
2.1.3 การพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม.....	6
2.1.4 รีโพลอยี (Rheology).....	10
2.1.4.1 การไหลแบบธิไซโทรปี (Thixotropy flow).....	11
2.1.5 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง.....	12
2.1.6 Wetting curve.....	14
2.1.7 การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ.....	15
2.1.7.1 การแพร่ของอะตอม.....	15
2.1.7.2 กลไกการแพร่ (Diffusion mechanisms).....	15
2.1.7.3 อัตราการแพร่ (Rate of diffusion).....	17
2.1.7.4 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ	20
2.1.8 ทฤษฎีการดูดซึมของอนุภาคนาโน.....	22
2.1.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี.....	23
2.1.9.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-เงิน (Sn-Ag).....	23
2.1.9.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu).....	24
2.1.9.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ทองแดง (Ag-Cu).....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิใช่ข้อมูลที่จะเปิดเผยหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.9.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียม (Sn-Ti)	26
2.1.9.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีส (Sn-Mn).....	27
2.1.9.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-อินเดียม (Sn-In)	28
2.1.9.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียม (Ag-Ti)	29
2.1.9.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส (Ag-Mn).....	30
2.1.9.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-อินเดียม (Ag-In)	31
2.1.9.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียม (Cu-Ti).....	32
2.1.9.11 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส (Cu-Mn)	33
2.1.9.12 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-อินเดียม (Cu-In).....	34
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
2.2.1 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี	35
2.2.2 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง	36
2.2.3 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม	36
2.2.4 สารประกอบเชิงโลหะ	37
2.2.5 คุณสมบัติทางกล.....	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	39
3.1 คุณสมบัติของโลหะบัดกรี	39
3.2 คุณสมบัติของอนุภาคที่เติมลงในโลหะบัดกรี	39
3.2.1 อนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	39
3.2.2 อนุภาคนาโน TiO ₂	40
3.2.3 อนุภาค In.....	41
3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน	42
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	43
3.3.1 การทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว	43
3.3.2 การพิมพ์โลหะบัดกรีลงบนแผ่นทองแดง	44
3.3.3 การบัดกรี.....	45
3.3.4 การบ่มด้วยความร้อน	47
3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	51
4.1 อุณหภูมิหลอมเหลว.....	51
4.2 ความสามารถในการเปียก.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ความสามารถในการพิมพ์	60
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	62
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี	62
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อน	64
4.5 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	67
4.5.1 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี	67
4.5.2 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มด้วยความร้อน	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารอ้างอิง	86
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	95
ภาคผนวก ข. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี	103
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	136
ภาคผนวก ง. การกระจายตัวของโลหะบัดกรี	146
ภาคผนวก จ. ค่าทดสอบความสามารถในการกระจายตัว	156
ภาคผนวก ฉ. ค่าทดสอบความสามารถในการพิมพ์	159
ภาคผนวก ช. โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังการบัดกรี และหลังการบ่ม ด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง	161
ภาคผนวก ซ. ปริมาณธาตุผสมในโลหะบัดกรี	179
ภาคผนวก ฌ. การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง	193
ภาคผนวก ฎ. การคัดเลือกชิ้นงาน	198
ประวัติผู้เขียน	204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C	4
2.2 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C	4
2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C	4
2.3 (ต่อ) กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C	5
2.4 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงินที่อุณหภูมิ 220.3°C	23
2.5 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ทองแดงที่อุณหภูมิ 226.8°C	24
2.6 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่อุณหภูมิ 780°C	25
2.7 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 231.96°C	26
2.8 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 231.96°C	27
2.9 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-อินเดียมที่อุณหภูมิ 120°C	28
2.10 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 855°C	29
2.11 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยาโมโนเทคติกของโลหะผสมเงิน-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 1207°C	30
2.12 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมเงิน-อินเดียมอุณหภูมิ 144°C	31
2.13 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะทองแดง-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 790°C	32
2.14 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะทองแดง-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 871°C	33
2.15 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมทองแดง-อินเดียมที่อุณหภูมิ 153°C	34
3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ	43
4.1 ผล DSC ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	51
4.2 ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	54
4.2 (ต่อ) ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	55
4.3 อัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	55
4.4 มุมเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	56
4.5 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	60
4.6 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu ₆ Sn ₅ และ Cu ₃ Sn	66
4.7 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C	71
4.7 (ต่อ) ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C	72
4.8 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu ₆ Sn ₅ ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C	78
4.9 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu ₃ Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การบัดกรีแบบคลื่น.....	5
2.2 การบัดกรีแบบรีโฟลว์	6
2.3 การกัด Stencil ด้วยสารเคมี.....	7
2.4 การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์.....	7
2.5 การกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้า.....	8
2.6 ประเภทของ Squeegee แบบยาง.....	8
2.7 On-contact.....	9
2.8 Off-contact และการเปื้อนของโลหะบัดกรี.....	9
2.9 การแยก Stencil ออกจากโลหะบัดกรี.....	10
2.10 กราฟการไหล แบบ Newtonian	11
2.11 กราฟการไหล แบบ Thixotropy	12
2.12 เทคนิค Wetting balance	13
2.13 การกระจายของหยดโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของแผ่นรอง.....	13
2.14 Wetting curve	14
2.15 (a) กลไกการแพร่แบบช่องว่าง (b) กลไกการแพร่แบบแทรกที่	16
2.16 พลังงานที่ใช้กระตุ้น (Activation energy, Q).....	17
2.17 พลั๊กซ์ขณะเกิดการแพร่หาจากจำนวนของอะตอมที่ซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา	18
2.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดการแพร่ตามระยะทาง	18
2.19 การแพร่ของอะตอมสู่ผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของ Fick.....	20
2.20 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-เงิน	23
2.21 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง	24
2.22 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ทองแดง	25
2.23 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียม	26
2.24 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีส	27
2.25 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-อินเดียม.....	28
2.26 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียม	29
2.27 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส	30
2.28 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-อินเดียม	31
2.29 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียม.....	32
2.30 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส	33
2.31 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-อินเดียม.....	34
3.1 โลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305).....	39
3.2 อนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	40
3.3 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	40
3.4 อนุภาคนาโน TiO ₂	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน TiO ₂	41
3.6 อนุภาค In.....	42
3.7 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาค In	42
3.8 เครื่อง DSC สำหรับทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว.....	44
3.9 แม่พิมพ์โลหะบัดกรี	44
3.10 โลหะบัดกรีหลังการพิมพ์	45
3.11 เตา Reflow ยี่ห้อ LPKF รุ่น Protoflow E.....	45
3.12 Reflow profile	46
3.13 ชิ้นงานหลังการบัดกรี	46
3.14 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี.....	47
3.15 เตาอบแบบท่อ.....	48
3.16 เครื่องบันทึกข้อมูล	48
3.17 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom.....	49
3.18 เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1.....	49
3.19 ชิ้นงานหลังการขัดผิวหน้า	49
3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL JSM-6510 LV.....	50
3.21 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	50
4.1 อุณหภูมิโซลิตัสของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด.....	52
4.2 อุณหภูมิลิควิดัสของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	52
4.3 ช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด.....	53
4.4 ตัวประกอบการกระจายตัวโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	57
4.5 อัตราส่วนการกระจายตัวโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	57
4.6 มุมเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด.....	58
4.7 ความสัมพันธ์ของ ΔT_L กับ เวลาการเปียก	59
4.8 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	61
4.9 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1.....	62
4.10 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5.....	62
4.11 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 4.....	63
4.12 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1.....	63
4.13 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3.....	63
4.14 ปริมาณของอนุภาคนาโน TiC ในโลหะบัดกรี	64
4.15 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อน เป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด Spectrum 1.....	65
4.16 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อน เป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด Spectrum 1.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	68
4.18 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5.....	68
4.19 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 6.....	69
4.20 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1.....	69
4.21 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3.....	69
4.22 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 2.....	70
4.23 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3.....	71
4.24 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	72
4.25 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂	73
4.26 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) หลังจากการบัดกรีและ บ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂ ร่วมกับ In	75
4.27 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมหลังบ่มด้วยความร้อน 1000 ชั่วโมง ของชิ้นงาน ที่เติม Mn-doped TiO ₂ ร่วมกับ In และชิ้นงานที่เติมเฉพาะ Mn-doped TiO ₂	76
4.28 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu ₆ Sn ₅ +Cu ₃ Sn) หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂ และ In	76
4.29 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมหลังบ่มด้วยความร้อน 1000 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่เติม TiO ₂ ร่วมกับ In และชิ้นงานที่เติมเฉพาะ TiO ₂	77
4.30 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₆ Sn ₅ หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	79
4.31 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₆ Sn ₅ หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂	79
4.32 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₆ Sn ₅ หลังจากการบัดกรีและหลังบ่ม ด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂ ร่วมกับ In	80
4.33 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₆ Sn ₅ หลังจากการบัดกรีและ หลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂ ร่วมกับ In	80
4.34 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₃ Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วย ความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂	82
4.35 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₃ Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วย ความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂	82
4.36 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₃ Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วย ความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO ₂ ร่วมกับ In	83
4.37 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu ₃ Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วย ความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂ ร่วมกับ In.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดง้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยจัดเป็นการผลิตเพื่อการส่งออก และมีศักยภาพสูงในการแข่งขันในตลาดโลก ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกจัดให้เป็นสินค้าส่งออกอันดับต้นๆ ของไทย โดยการส่งออกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปี 2560 มีมูลค่าสูงถึง 35,370 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ [1] แต่เนื่องจากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักมีส่วนประกอบของสารพิษที่ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ทำให้สหภาพยุโรป (EU) ได้ออกระเบียบ RoHS หรือ Restriction of Hazardous Substances ที่ว่าด้วยเรื่องของการจำกัดการใช้สารที่เป็นอันตรายในเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันกำหนดไว้ 6 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), แคดเมียม (Cd), เฮกซะวาเลนท์ (Cr⁶⁺), โพลีโบรมิเนต ไบเฟนิล (PBB), และโพลีโบรมิเนต ไดเฟนิล อีเธอร์ (PBDE) [2] จากระเบียบของ EU ทำให้กลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการส่งออกสินค้าไปยังสหภาพยุโรปมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต โดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) เข้ามาใช้แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb eutectic) ซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่ม เช่น Sn-Ag-Cu, Sn-Cu, Sn-Bi, และ Sn-Ag เป็นต้น [3]

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) เป็นหนึ่งในโลหะบัดกรีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่ได้รับคำแนะนำจาก The Japanese Electronic Industry Association (JEIDA) แต่ SAC305 ยังคงมีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมในเรื่องความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อความเชื่อถือได้ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [4-6] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานความล้า และการคืบ โดยการทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาค (Particles) ขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรี เพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน (Grain boundary sliding) [7] ซึ่งถ้าอนุภาคที่เติมลงในเนื้อโลหะบัดกรีมีขนาดระดับนาโน โลหะบัดกรีนั้นจะถูกเรียกว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solder)

อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้อนุภาคนาโนในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบ คือ โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้ มีคุณสมบัติต่างๆในการบัดกรีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น จุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก (Wettability) ความสามารถในการพิมพ์ (Printability) และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี โดยพบว่าอนุภาคนาโนลงไปโลหะบัดกรีอาจทำให้จุดหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนาโนที่เติมลงไป [7,8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ความสามารถในการเปียกมีค่าลดลง เมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมาก [9] แต่การเติมอนุภาคนาโนสามารถช่วยยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ได้ [10]

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 โดยใช้อนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และอินเดียม (Indium: In) โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล่านี้ที่มีต่ออุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจากการบัดกรี และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีที่ได้จากการบ่มด้วยความร้อน (Thermal aging) สำหรับอนุภาคนาโน TiO₂ เป็นอนุภาคนาโนชนิดหนึ่งที่ยิยมใช้ในการเติมลงไปโลหะบัดกรี เนื่องจากมีความเสถียรไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นฐานต่างๆของโลหะบัดกรี เช่น Sn, Ag และ Cu รวมทั้งสามารถยึดเกาะกับเนื้อโลหะบัดกรีได้ดี [10-12] และอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ เป็นอนุภาคนาโนชนิดใหม่ที่อาจจะใช้เป็นเฟสกระจายในโลหะบัดกรีได้ดี โดยการเติมอนุภาคนาโน TiO₂ ด้วย Mn คาดว่า จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง (Copper substrate) ได้เนื่องจาก Mn ปริมาณน้อยๆสามารถละลายในทองแดงได้ดี [13-14] ในขณะที่ In จะเป็นธาตุที่ช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้ [15] โดยผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ และสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂, และ In ที่มีต่ออุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และความสามารถในการพิมพ์บนแผ่นรองทองแดงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂, และ In ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 กับแผ่นรองทองแดง ก่อนและหลังการบ่มด้วยความร้อน
3. เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบครีมชนิดใหม่ จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของโลหะบัดกรีเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂, และ In ลงในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305
2. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของโลหะบัดกรี กับแผ่นรองทองแดง ก่อนและหลังการบ่มความร้อน
3. ได้โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่ออุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังจาก การบัดกรี และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีที่ได้จากการบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรี ไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ อินเดียม (Indium: In) ลงในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 เช่นเดียวกับกลุ่มที่สองที่ใช้อนุภาคนาโน TiO₂ และ In ทั้งนี้อนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ที่เติมในโลหะบัดกรีจะมีความเข้มข้น ไม่เกิน 1 wt% เนื่องจากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อน พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ในความเข้มข้นมากกว่า 1 wt% จะไม่ช่วยให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยบัดกรี มีค่าลดลง [16-17] ความเข้มข้นของ Mn ที่ใช้เติมอนุภาคนาโน TiO₂ ที่ใช้ในการศึกษานี้ มีความเข้มข้น 1 wt% เนื่องจาก Mn สามารถละลายเข้ากับแผ่นรองทองแดงได้ดีที่ปริมาณไม่เกิน 1 wt% สำหรับอนุภาค In ที่เติมลงไปจะใช้ความเข้มข้น 0.5 wt% เนื่องจาก In เป็นธาตุที่มีราคาสูง สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกจะใช้วิธีการวัดค่าตัวประกอบการกระจาย (Spread factor) อัตราส่วนของการกระจาย (Spread ratio) และมุมสัมผัส (Contact angle) โดยจะใช้แผ่นรองที่ทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% วิธีการบัดกรีที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จะใช้ การบัดกรีแบบ Reflow soldering ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที และการบ่มรอยบัดกรีจะ ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 1, 10, 100 และ 1,000 ชั่วโมง ตามข้อแนะนำของ NIST สหรัฐอเมริกา [18]

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เช่น คุณสมบัติการเปียก อุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
2. ศึกษาวิธีการและขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติการเปียก อุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพื่อใช้ในการออกแบบขั้นตอนการทดลองได้อย่างเหมาะสม
3. ออกแบบการทดลอง ทำการเตรียมชิ้นงานตามที่ได้ทำการออกแบบ
4. ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้
5. วิเคราะห์ผลการทดลองคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรี
6. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว [19]

โลหะบัดกรี Sn-Pb ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มาเป็นเวลานานมากกว่า 50 ปี เนื่องจากมีคุณสมบัติการบัดกรีที่ดี อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี Sn-Pb ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง ทำให้สหภาพยุโรป (EU) ออกข้อกำหนด Restriction of Hazardous Substances (RoHS) ขึ้นในปี 2006 เพื่อจำกัดปริมาณของสารที่เป็นอันตรายในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น จึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรี Sn-Pb โดยกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้รับการยอมรับเพื่อนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรี Sn-Pb สามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้เป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.1-2.3

ตารางที่ 2.1 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 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 2.2 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
Sn-Zn	Sn-9Zn	198

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2.0Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 230 °C

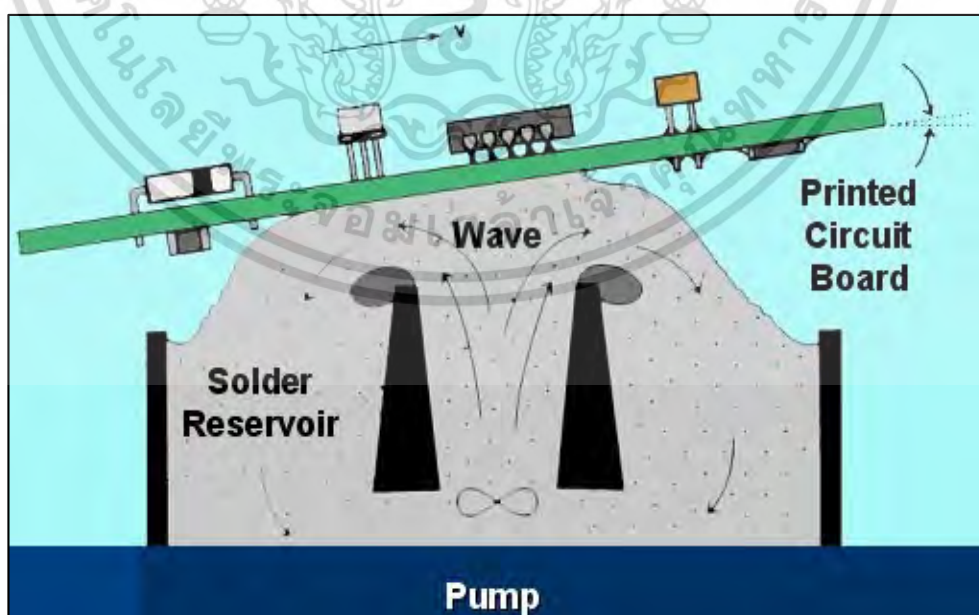
ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3Ag-0.5Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

จากตารางที่ 2.1-2.3 จะเห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้ง 3 กลุ่มมีอุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-Pb (183°C) ดังนั้นในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วให้มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำลง และมีสมบัติการบัดกรีดีเทียบเท่ากับโลหะบัดกรี Sn-Pb

2.1.2 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

โดยทั่วไปแล้วนอกเหนือจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering) เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรรวม (Printed circuit board : PCB) โดย PCB ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านไปบนอ่างของโลหะบัดกรีหลอมเหลวที่ถูกพ่นเป็นคลื่นสัมผัสกับด้านล่างของแผ่น PCB เพื่อให้โลหะบัดกรีเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การบัดกรีแบบคลื่น [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) โดยทั่วไปจะใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิวที่เรียกว่า Surface mount components กับ PCB ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบน PCB แล้วจึงวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนโลหะบัดกรี หลังจากนั้น PCB จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายและเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะบัดกรีก็จะกลายเป็นของแข็งที่สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ [21]

2.1.3 การพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม [22]

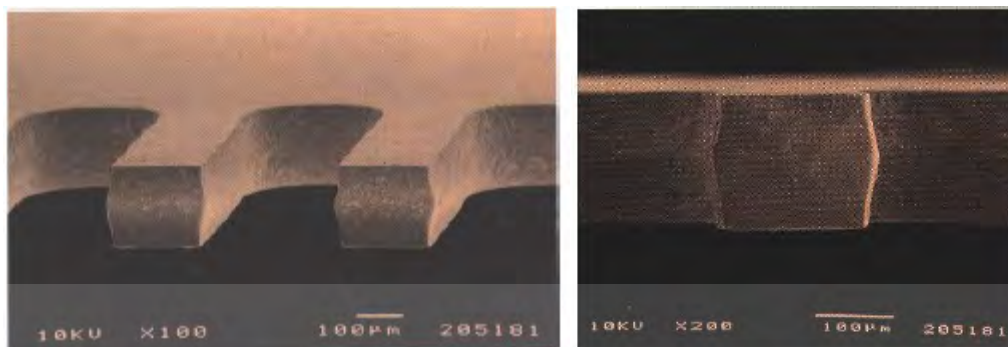
ในการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม ประเภทของอุปกรณ์ในการพิมพ์ และพารามิเตอร์ของเครื่องพิมพ์นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นเดียวกับประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีแบบครีม ดังนั้นการพิมพ์ที่ดีจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์การพิมพ์ และการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมควบคู่ไปกับการใช้โลหะบัดกรีที่มีคุณภาพดี โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถการพิมพ์มีดังต่อไปนี้

1) Stencil

Stencil มีทั้งหมด 3 ประเภทที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ดังนี้

- 1.1) การใช้สารเคมีกัด Stencil
- 1.2) การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์
- 1.3) การกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้า

การกัดด้วยสารเคมีถูกใช้ในการผลิต Stencil อย่างกว้างขวางเพราะราคาในการผลิตต่ำ และชิ้นงานมีความคงทน อย่างไรก็ตามการพิมพ์โลหะบัดกรีด้วย Stencil ที่กัดขึ้นรูปด้วยสารเคมีไม่เหมาะสมกับ Stencil ที่มีระยะ Pitch น้อยกว่า 0.5 mm (Fine pitch) เนื่องจาก Surface finish ที่ไม่สมบูรณ์ของผนังภายในรูของ Stencil ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกัด Stencil ด้วยสารเคมี

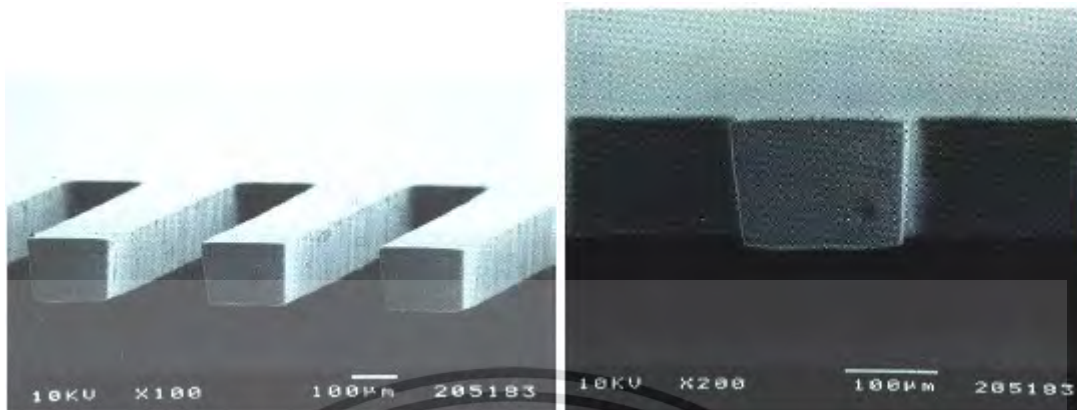
การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์จะทำให้ได้ผนังภายในรูของ Stencil ที่ดีกว่าการกัดด้วยสารเคมี แต่พื้นผิวที่ได้จะมีความขรุขระ ซึ่งอาจทำการพิมพ์ทำได้ยากเมื่อ pitch มีระยะห่างน้อยกว่า 0.4 mm (Ultra fine pitch) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การตัด Stencil ด้วยเลเซอร์

แม้ว่าการกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าจะมีราคาในการผลิตค่อนข้างสูง แต่ Stencil ที่ได้จะมีความเหมาะสมในการพิมพ์มากที่สุด เนื่องจากผนังในรูของ Stencil มีความสมบูรณ์ และง่ายต่อการดึง Stencil ออกหลังจากการพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

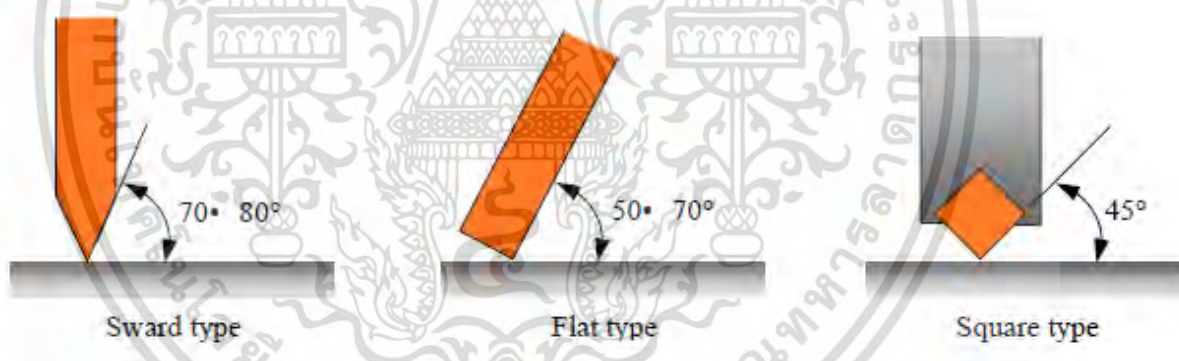
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การกัด Stencil ด้วยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้า

2) Squeegee

Squeegee ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Squeegee แบบยาง และแบบโลหะ ซึ่ง Squeegee แบบยางยังสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้อีก 3 ประเภทได้แก่ Sward, Flat และ Square ดังแสดงในรูปที่ 2.6



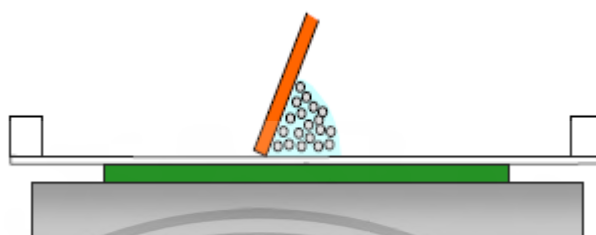
รูปที่ 2.6 ประเภทของ Squeegee แบบยาง

โดยปกติ Squeegee ประเภท Sward จะมีมุมการใช้งานประมาณ 70-80° ซึ่งจะมีแรงกดค่อนข้างน้อย โดยจะเหมาะกับโลหะบัดกรีแบบครีมที่มีความหนืดต่ำ การพิมพ์ด้วย Squeegee ประเภท Square มีมุมการใช้งานที่ 45° และการปาดประเภทนี้จะสามารถเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil ได้ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับโลหะบัดกรีที่มีความหนืดสูง และ Squeegee ประเภท Flat ซึ่งมีมุมการใช้งาน 50-70° ซึ่งการปาดประเภทนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งาน เนื่องจากสามารถปรับมุมในการใช้งานได้ตามความเหมาะสมของโลหะบัดกรี

3) พารามิเตอร์เครื่องพิมพ์

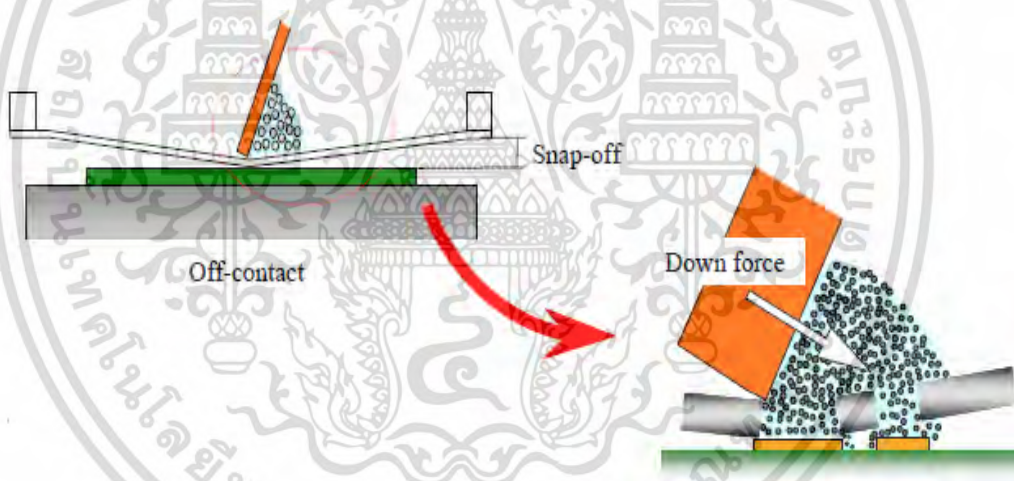
สำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีบนแผ่นรอง การควบคุมระยะ Snap-off ถูกพิจารณาให้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ โดยสามารถตั้งค่าได้ทั้ง On-contact และ Off-contact สำหรับ On-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

contact จะไม่มีระยะห่างระหว่างด้านล่างของ Stencil และพื้นผิวของแผ่นรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถป้องกันการเปื้อนของโลหะบัดกรีที่เป็นสาเหตุของการเกิด Bridging



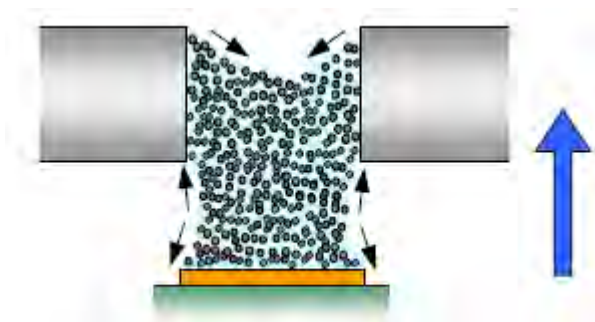
รูปที่ 2.7 On-contact

Off-contact ควรจะนำมาประยุกต์ใช้เมื่อไม่มีระบบควบคุมความเร็วการแยกออกของ Stencil ซึ่งวิธีนี้โลหะบัดกรีแบบครีมสามารถหลุดออกจากรูของ Stencil ได้อย่างสิ้นไหล แต่ระยะทางระหว่าง Stencil และแผ่นรองเป็นสาเหตุของการเกิดรอยเปื้อนของโลหะบัดกรีดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Off-contact และการเปื้อนของโลหะบัดกรี

การควบคุมความเร็วในการแยก Stencil ออกเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในการประเมินคุณภาพการพิมพ์ ซึ่งเมื่อลดความเร็วในการแยก Stencil ออกจะเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างโลหะบัดกรี และผนังของรู และยังช่วยให้แยก Stencil ออกจากโลหะบัดกรีได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแยก Stencil ออกจากโลหะบัดกรี

4) โลหะบัดกรีแบบครีม

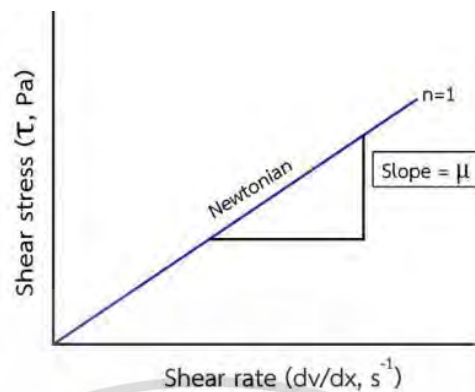
โลหะบัดกรีแบบครีมมีส่วนประกอบเป็นผงโลหะผสมกับฟลักซ์ (Flux) โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าการกระจายของขนาด และรูปร่างของผงโลหะเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิมพ์ นอกจากนี้คุณสมบัติของ Flux medium ในโลหะบัดกรีแบบครีมยังส่งผลต่อคุณสมบัติในการพิมพ์เป็นอย่างมาก ซึ่ง Flux medium เป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของฟลักซ์ ปริมาณอนุภาคแข็ง ธิโซโทรปี (Thixotropy) และความหนืด (Viscosity) เป็นต้น

2.1.4 รีโวลยี (Rheology)

คำว่าวิทยาศาสตร์ของไหล (Rheology) มีที่มาจากภาษากรีก โดยคำว่า Rheo หมายถึง การไหล Bingham และ Crawford [23] ได้เสนอแนะว่าเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลว และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของแข็ง ความหนืด (Viscosity) จึงเป็นความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ความหนืดที่สูงขึ้นก็จะมี ความต้านทานต่อการไหลมากขึ้นด้วย ของเหลวธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ ในขณะที่สารกระจายตัวที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีคุณสมบัติการไหลที่ซับซ้อน และไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้ โดยลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 แบบดังนี้

1) Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนไม่ว่าจะกวนเร็วหรือกวนช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ เป็นต้น

เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน (Shear stress) และ อัตราความเค้นเฉือน (Rate of shear) ที่หลายๆค่าจะได้กราฟไหล (Rheogram) ที่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟการไหล แบบ Newtonian [23]

2) Non newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1) Pseudoplastic ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thinning

2.2) Dilatant ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thickening

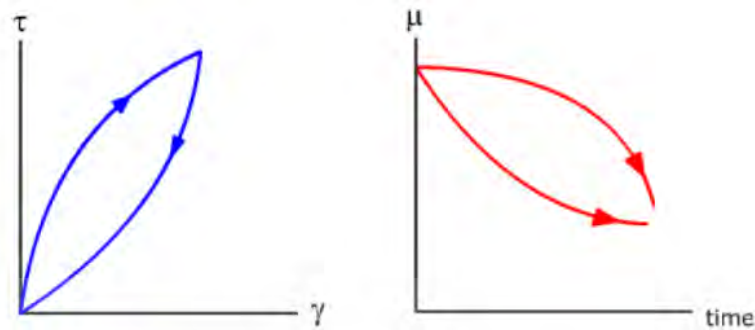
2.3) Bingham fluid ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงมากจนถึงจุดที่เรียกว่า Yield value หรือ Yield stress จึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian fluid

2.4) Plastic ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุด Yield stress ถึงจะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบ Pseudoplastic

2.1.4.1 การไหลแบบธิโซโทรปี (Thixotropy flow)

ของเหลวที่มีการไหลแบบ Plastic และ Pseudoplastic บางชนิด เมื่อลดแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะทำให้อัตราเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลงอย่างช้าๆ โดยไม่เป็นไปตามความโค้งของกราฟเส้นขาขึ้น แต่จะเป็นไปตามความโค้งของกราฟขาลง ซึ่งแตกต่างจากของเหลวที่มีการไหลแบบ Newtonian ที่มีกราฟขาขึ้น และขาลงทับกัน หากพิจารณาค่าความหนืดจะพบว่าลดลงตามระยะเวลา

ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่ถูกทำลายจากแรงที่ให้ และไม่สามารถสร้างโครงสร้างนั้นกลับคืนได้ทันทีเมื่อมีแรงกระทำน้อยลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ธิโซโทรปี (Thixotropy) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟการไหลแบบ Thixotropy [23]

2.1.5 การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง

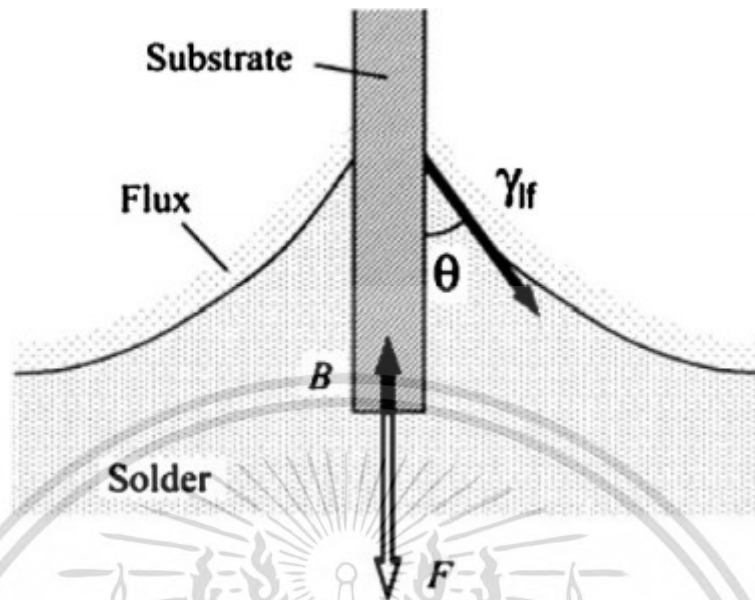
การเปียก (Wetting) เป็นคุณสมบัติของของเหลวที่แผ่กระจายบนของแข็ง หรือระหว่างหยดโลหะกับแผ่นรอง โดยทั่วไปความสามารถในการเปียกจะวัดได้จากระดับของการกระจายตัว (Degree of wetting) และอัตราของการกระจายตัว (Rate of wetting) โดยระดับของการกระจายตัวสามารถวัดได้จากมุมเปียก (Contact angle) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ซึ่งมุมเปียกจะขึ้นอยู่กับพื้นผิว และพลังงานระหว่างพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ร่วมกันระหว่างของแข็งกับของเหลว อัตราการกระจายตัวชี้ให้เห็นว่าของเหลวจะเปียก และกระจายตัวได้รวดเร็วเพียงใด โดยมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยเช่น สภาพอะอุนหภูมิของระบบ ความหนืดของของเหลว และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่พื้นสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว เป็นต้น ซึ่งวิธี Wetting balance เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณความสามารถในการเปียก ในวิธีนี้จะทำการวัดแรงบนแผ่นรองขณะที่จุ่มลงในอ่างหลอมโลหะบัดกรี (Solder bath) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการเปียกได้แก่ เวลาการกระจายตัว (Wetting time) และ แรงการกระจายตัว (Wetting force) สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ของกราฟ Force-time รูปที่ 2.13 ซึ่งแรงการกระจายตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$F = P\gamma_{ff} \cos \theta - B \quad (2.1)$$

โดยที่	F	คือ แรงการกระจายตัว
	θ	คือ มุมเปียก
	P	คือ เส้นรอบวงของแผ่นรอง
	B	คือ แรง Buoyancy
	γ_{ff}	คือ ความตึงผิว

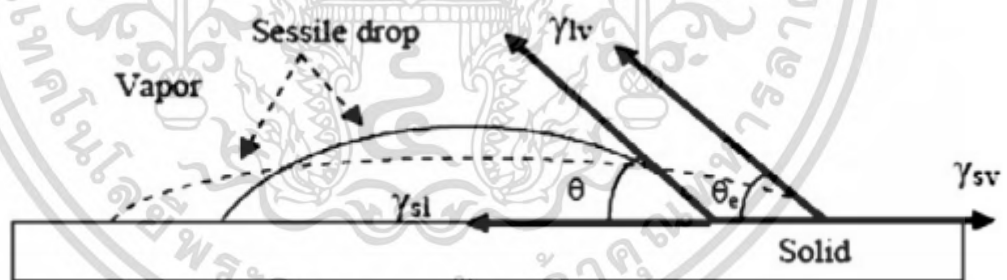
โดย P และ B เป็นค่าคงที่ ขณะที่ F และ θ สามารถวัดได้จากการทดสอบ และ γ_{ff} สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 เทคนิค Wetting balance [24]

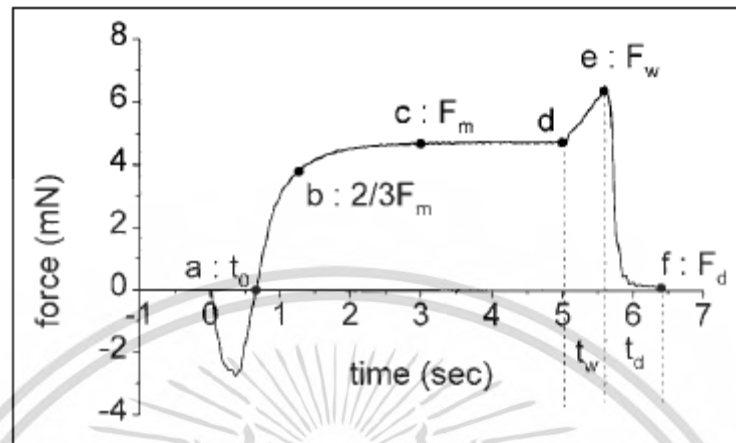
เมื่อหยดของโลหะบัดกรีอยู่บนพื้นผิวของแผ่นรอง หยดของโลหะบัดกรีจะกระจายตัวไปบนพื้นผิวของของแผ่นรอง และจะกลับมาเริ่มทำมุมกับพื้นผิวของของแผ่นรองอีกครั้งหลังจากหยุดกระจายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายของหยดโลหะบัดกรีบนพื้นผิวของแผ่นรอง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 Wetting curve



รูปที่ 2.14 Wetting curve [25]

จากรูปที่ 2.14 แสดง Wetting curve ที่ใช้เพื่อคำนวณแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี โดยมีแกน x เป็นเวลาในหน่วยวินาที (s) และแกน y เป็นแรงในหน่วยมิลลินิวตัน (mN) ซึ่งมีค่าที่ใช้เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการเปียก 3 ค่าได้แก่ t_0 , F_m และ F_w โดยที่ 1) t_0 คือ เวลาในการเปียก (Wetting time) ซึ่งเป็นเวลาที่ชิ้นงานทำมุม 90 องศา กับโลหะบัดกรีหลังจากจุ่มชิ้นงานลงในอ่างหลอมโลหะบัดกรี หรือช่วงเวลาที่แรงเปียกกลับมา มีค่าเท่ากับศูนย์ 2) F_m คือ แรงเปียกสูงสุด (The maximum wetting force) เป็นแรงที่สามารถวัดได้เมื่อชิ้นงานที่ถูกดึงออกจากอ่างหลอมโลหะบัดกรีอยู่ในสภาวะสมดุล และแรงที่วัดได้มีค่าคงที่ ซึ่งแรงเปียกสูงสุดจะสามารถนำมาคำนวณมุมเปียก (Contact angle) ถ้ารู้ค่าของแรงตึงผิว หรือสามารถหาค่าแรงตึงผิวจากการวัดมุมเปียกภายใต้สภาวะสมดุล และในสภาวะสมดุลแรงเปียก (Wetting force: F) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 ในหัวข้อที่ 2.1.5 3) F_w คือ แรงการเปียกหลังจากเวลาจำเพาะ (Wetting force achieved after a specific time) เป็นแรงที่เกิดขึ้นหลังจากชิ้นงานถูกดึงออกจากอ่างหลอมโลหะบัดกรี และชิ้นงานทำมุม 0 องศา กับโลหะบัดกรี

จากรูปที่ 2.14 สามารถอธิบายกราฟ Wetting curve ได้ ดังนี้

- 1) เมื่อเริ่มจุ่มชิ้นงานลงในอ่างหลอมโลหะบัดกรีจะทำให้แรงที่วัดได้มีค่าติดลบ และจะค่อยๆ ปรับเพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 0 mN ที่เวลา t_0 ซึ่งเป็นเวลาที่ชิ้นงานทำมุม 90 องศา กับโลหะบัดกรี (จุด a)
- 2) เมื่อเริ่มดึงชิ้นงานออกจากอ่างหลอมโลหะบัดกรีความชันของเส้นโค้งของแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่จุด b เป็นจุดที่มีแรงเปียกเท่ากับ $\frac{2}{3}$ เท่าของแรงเปียกสูงสุด
- 3) หลังจากผ่านจุด b แรงที่วัดได้จะเริ่มเข้าสู่จุดสมดุล และเมื่อถึงจุดสมดุล (จุด c) แรงที่วัดได้จะมีค่าคงที่ โดยแรงที่จุด c นั้นคือ แรงเปียกสูงสุด ($F=F_m$)
- 4) หลังจากผ่านจุดสมดุล (ระหว่างจุด d ถึง e) แรงที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าแรงเปียกสูงสุดแต่

ยังคงมีค่าน้อยกว่าแรงการเปียกหลังจากเวลาจำเพาะ ($F_m > F > F_w$) ซึ่งช่วงเวลานี้จะถูกเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Peak time (t_w) หรือช่วงเวลาก่อนแรงที่วัดได้จะมีค่าสูงที่สุด โดยในช่วง t_w ชิ้นงานที่ถูกดึงออกยังคงทำมุมกับโลหะบัดกรีมากกว่า 0 องศา

5) เมื่อดึงชิ้นงานออกจนทำมุม 0 องศา กับโลหะบัดกรี (จุด e) แรงที่วัดได้ที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด (F_w)

6) หลังจากผ่านจุด e ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงาน และโลหะบัดกรีจะเปลี่ยนจากขอบด้านข้างเป็นขอบด้านล่างของชิ้นงาน และการทดสอบจะสิ้นสุดลงเมื่อเกิดคอคอดของโลหะบัดกรีจำไปสู่การแยกออกจากกันของโลหะบัดกรีและชิ้นงาน ซึ่งช่วงเวลานี้จะถูกระบุว่า Drop time (t_d) และแรงที่วัดได้เมื่อเกิดคอคอดของโลหะบัดกรีจะถูกระบุว่า End force (f_d)

2.1.7 การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ

2.1.7.1 การแพร่ของอะตอม

การแพร่ของอะตอม (Diffusion of atom) เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การแพร่ในสภาพของเหลวและก๊าซนั้นอาจเกิดขึ้นได้ง่าย แต่การแพร่ในสภาพของแข็งนั้นจะต้องอาศัยตัวช่วยกระตุ้นให้เกิดการแพร่ อันได้แก่ ความร้อน ยิ่งมีพลังงานความร้อนมากก็จะช่วยให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอะตอมมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหรือพลังงานความร้อน ดังสมการของ Arrhenius (สมการที่ 2.2)

$$Rate = C_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าคงที่ของอัตราความเร็ว
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (1.987 cal/mol.K)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 Q คือ พลังงานกระตุ้น (cal/mol)

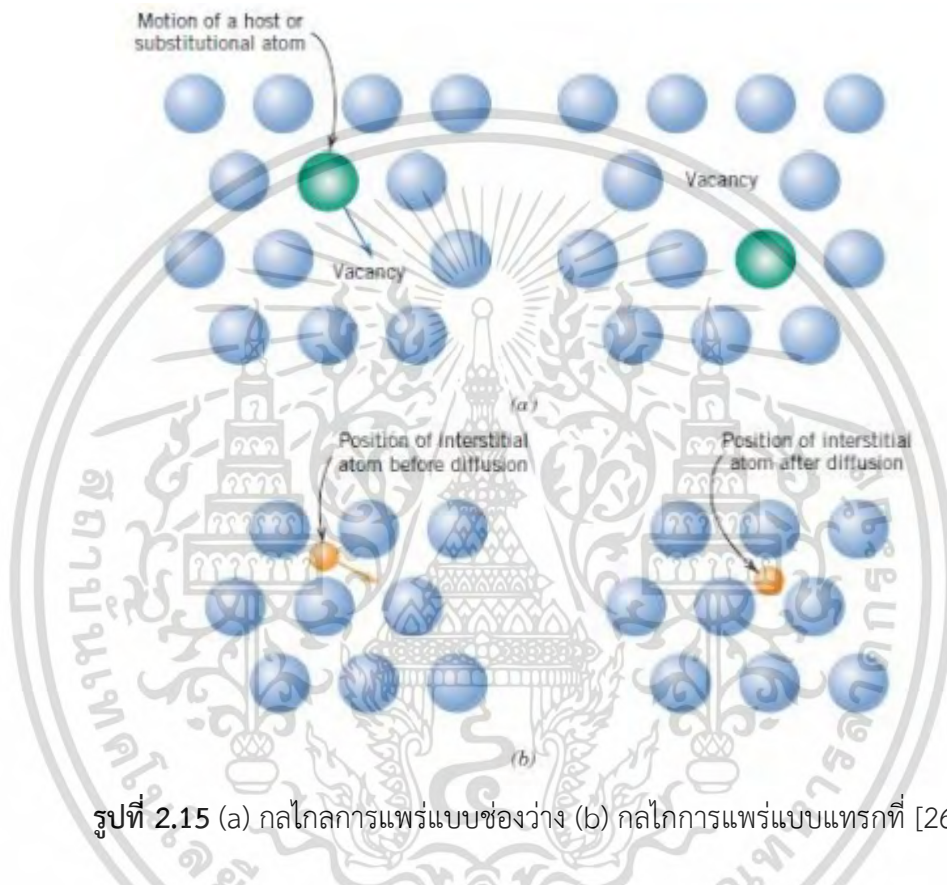
2.1.7.2 กลไกการแพร่ (Diffusion mechanisms)

การแพร่ของอะตอมของโลหะบริสุทธิ์เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมของตัวมันเองจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง กระบวนการแพร่แบบนี้เราเรียกว่า การแพร่โดยตัวเอง (Self-diffusion) ขณะที่กระบวนการแพร่โดยอะตอมที่ต่างชนิดกันหรืออะตอมของวัสดุที่ต่างกันมีการแพร่ที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ

1) การแพร่แบบช่องว่าง (Vacancy diffusion) การแพร่แบบช่องว่างนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เมื่อมีพลังงานกระตุ้นอะตอมจะเกิดการ

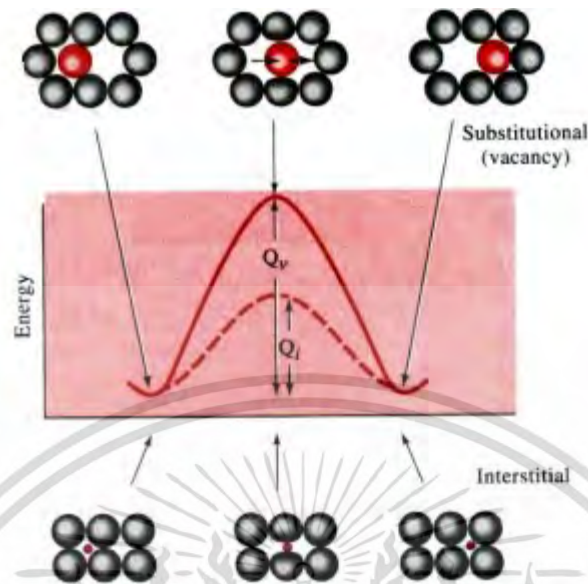
สั้นสะเทือน และเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งสู่อีกตำแหน่ง จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นจึงเรียกรวมการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบช่องว่าง ดังรูปที่ 2.15 (a)

2) การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial diffusion) เป็นการแพร่ที่เกิดกับอะตอมที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ตามซอกระหว่างอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังรูปที่ 2.15 (b)



รูปที่ 2.15 (a) กลไกการแพร่แบบช่องว่าง (b) กลไกการแพร่แบบแทรกที่ [26]

พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พลังงานที่ใช้ทำให้อะตอมเคลื่อนที่จะต้องสูงกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Energy barriers) ซึ่งเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (activation energy, Q) โดยพลังงานนี้จะได้จากการให้ความร้อนแก่อะตอม โดยปกติแล้วพลังงานที่ใช้กระตุ้นในกลไกการแพร่แบบช่องว่างจะมากกว่ากลไกการแพร่แบบแทรกที่



รูปที่ 2.16 พลังงานที่ใช้กระตุ้น (Activation energy, Q) [26]

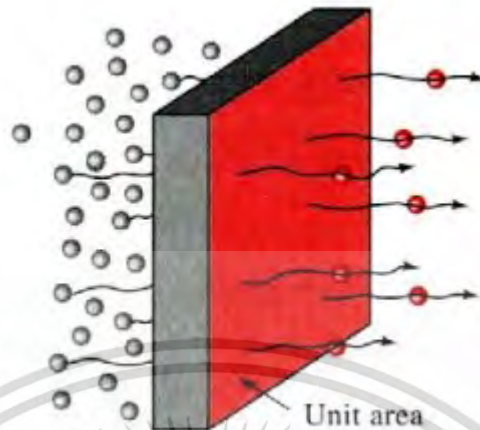
2.1.7.3 อัตราการแพร่ (Rate of diffusion)

อัตราการแพร่ของอะตอมสามารถวัดเป็นฟลักซ์ (Flux, J) ซึ่งหมายถึง อัตราการถ่ายโอนของอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ (ดังรูปที่ 2.17) โดยหาออกมาเป็นจำนวนอะตอมที่แพร่ผ่านระบบเป็นหน่วยพื้นที่ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick คือ (สมการที่ 2.3)

$$J = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ J คือ ฟลักซ์ (atoms/cm².s)
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm²/s)
 $\frac{\Delta c}{\Delta x}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง (atoms/cm³.cm)

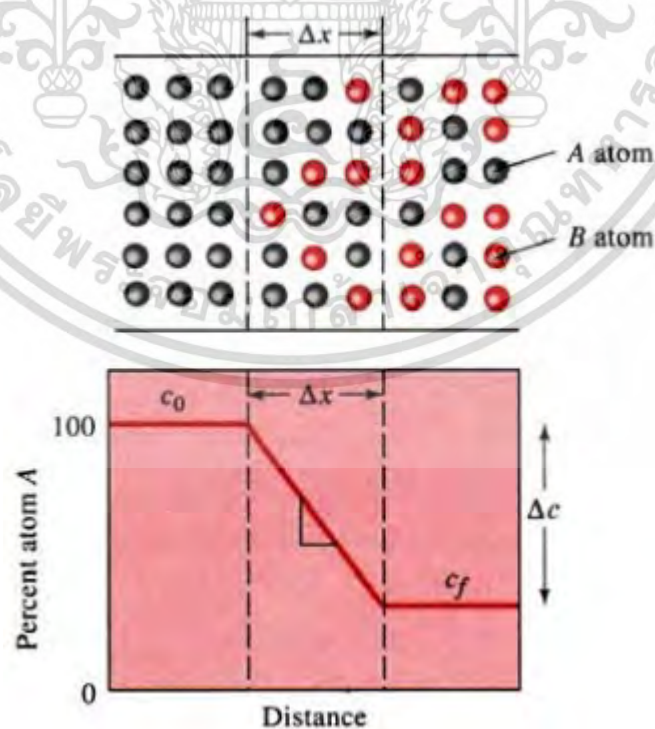
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 พลิกซ์ขณะเกิดการแพร่หาจากจำนวนของอะตอมที่ซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา [26]

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ของอะตอม ประกอบไปด้วย

1) ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง (Concentration gradient) ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทางเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอม (Δc) ที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง (Δx) ดังรูปที่ 2.18 จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ 2 ชนิดที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันมาสัมผัสกันหรือเกิดจากก๊าซหรือของเหลวที่มีความเข้มข้นมากๆ อยู่ล้อมรอบวัสดุแข็ง แล้วเกิดการแพร่หรือถ่ายเทอะตอมจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดการแพร่ตามระยะทาง [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) อุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์การแพร่
 สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ตามสมการของ Arrhenius ดัง
 แสดงในสมการที่ 2.4

$$D = -D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่ Q คือ พลังงานกระตุ้น (cal/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (1.987 cal/mol.K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

D_0 คือ ค่าคงที่ของระบบการแพร่

เมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และฟลักซ์ของอะตอมก็จะ
 เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงๆอัตราการแพร่จะเกิดสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่สูง ด้วยเหตุ
 นี้กระบวนการแพร่ที่กระทำกับโลหะหรือเซรามิกจึงกระทำที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง

3) ชนิดของโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่แตกต่างกัน เช่น
 เหล็กกล้าคาร์บอน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ BCC จะมีค่าเท่ากับ
 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้าง
 แบบ FCC ที่มีค่าเท่ากับ $(5 \times 10^{-15}) \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 500°C ที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงสร้างผลึกแบบ
 FCC จะมีค่า APF (0.74) มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ BCC (0.68)

4) ชนิดของกลไกการแพร่

กลไกการแพร่แบบแทรกที่หรือแบบช่องว่าง จะส่งผลต่อสภาพของการแพร่ โดย
 อะตอมขนาดเล็กสามารถแพร่แบบแทรกที่ในโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ได้ เช่น อะตอมของ
 คาร์บอนในโครงสร้าง BCC หรือ FCC ของเหล็กกล้า ส่วนทองแดงจะแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึกของ
 อลูมิเนียมแบบกลไกช่องว่าง เพราะอะตอมของธาตุทั้งสองมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

5) เวลาในการแพร่

กลไกการเกิดการแพร่ต้องอาศัยเวลา เพราะหน่วยของฟลักซ์เป็น $\text{atoms}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
 ดังนั้นหากมีอะตอมจำนวนมากก็ต้องใช้เวลานานขึ้น อย่างไรก็ตามแล้วแต่เวลาในการแพร่สามารถลดลง
 ไปได้หากเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

การแพร่ในสถานะไม่คงตัว (Non-steady state)

การแพร่ในสถานะไม่คงตัว จะเป็นกระบวนการแพร่ความเข้มข้นของอะตอมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น เหล็กที่มีอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปบริเวณผิวเมื่อเวลาผ่านไปนานเข้าความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวของเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการแพร่ในสถานะไม่คงตัวนี้จะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's second law) ดังสมการที่ 2.5 และความเข้มข้นของอะตอมเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงได้แสดงในรูปที่ 2.19

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.5)$$

โดยที่ C_s คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ผิวของวัสดุ
 C_0 คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุก่อนเกิดการแพร่
 C_x คือ ความเข้มข้นของอะตอมที่ระยะห่างจากผิว x ที่เวลา t
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอม
 X คือ ระยะทางจากผิว
 t คือ เวลา
 erf คือ error function ทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 2.19 การแพร่ของอะตอมสู่ผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของ Fick [26]

2.1.7.4 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหรือโลหะผสมในกระบวนการหล่อโลหะนั้น นับว่ามีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่จะถูกหลอม และหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

โดยทั่วไปการแข็งตัว (Solidification) ของโลหะหรือโลหะผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การเกิดนิวคลีเอชัน (Nucleation) ซึ่งเป็นขั้นตอนการเกิดนิวคลีไอ (Nuclei) ที่อยู่ตัวในโลหะที่หลอมเหลว

2) การเติบโตของนิวคลีไอไปเป็นผลึก และเกิดเป็นโครงสร้างของเกรน (Grain) โดยนิวคลีไอเล็กๆในโลหะที่หลอมเหลวจะค่อยๆ เติบโตขึ้นเป็นผลึกจนกระทั่งผลึกเหล่านี้จะต่อกันเป็นโครงสร้างของเกรน บริเวณเกรน บริเวณที่สัมผัสระหว่างเกรนจะถูกเรียกว่า ขอบเขตของเกรน (Grain boundaries)

รูปร่างลักษณะของแต่ละเกรนที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการแข็งตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal gradient) คือ ปัจจัยที่สำคัญ

2.1.3.5 ประเภทของกลไกการเกิดนิวคลีไอที่อยู่ในโลหะที่หลอมเหลว

กลไกของการเกิดนิวคลีไอซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆที่อยู่ในโลหะที่หลอมเหลวมี 2 กลไก ดังนี้ คือ

1) กลไกการเกิดนิวคลีไอแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดมักจะถูกนำมาพิจารณาก่อน กล่าวคือ กลไกนี้มักจะเกิดขึ้นในกระบวนการการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium freezing) ของโลหะนั้นๆ นิวคลีไอที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้าๆ มาเกิดพันธะระหว่างกันจนกระทั่งได้ขนาดที่อยู่ตัว เรียกว่า นิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งจะอยู่ตัว และเกิดเป็นผลึกต่อไป

พลังงานที่เกี่ยวข้องในกลไกของการเกิดนิวคลีไอแบบเอกพันธ์ ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ชนิด คือ

1.1) พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume หรือ Bulk free energy; ΔG_V) ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะให้ออกมาเมื่อมีการแข็งตัวของโลหะที่หลอมเหลว ซึ่งมีค่าเป็นลบ

1.2) พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (Surface free energy; ΔG_S) เป็นพลังงานที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดของแข็งใหม่ของอนุภาคของแข็งนิวคลีไอ ซึ่งมีค่าเป็นบวก

2) กระบวนการเกิดนิวคลีไอแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) เป็นกลไกที่นิวคลีไอเกิดขึ้นภายในโลหะที่หลอมเหลวบนผิวของภาชนะบรรจุสิ่งเจือปน หรือวัสดุอื่น ซึ่งพลังงานอิสระที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดนิวคลีไอเกิดขึ้นภายในโลหะที่หลอมเหลวบนผิวของภาชนะบรรจุสิ่งเจือปน หรือวัสดุอื่น ซึ่งพลังงานอิสระที่ต้องการเพื่อให้เกิดนิวคลีไอที่อยู่ตัวนั้นจะต่ำกว่าที่ต้องการในกลไกของกระบวนการเกิดนิวคลีไอแบบเอกพันธ์ ดังนั้น จึงต้องการปริมาณ Undercooling ไม่สูงมากนัก และโดยทั่วไปเรามักจะพบว่ากระบวนการหล่อโลหะในอุตสาหกรรม มักจะทำการ Undercooling ไม่สูงมาก คือระหว่าง $0.1-10^{\circ}\text{C}$ จึงอาจกล่าวได้ว่า การเกิดนิวคลีไอในอุตสาหกรรมหล่อโลหะมักจะเป็นแบบวิวิธพันธ์มากกว่าแบบเอกพันธ์

2.1.8 ทฤษฎีการดูดซึมของอนุภาคนาโน [27]

การเติมอนุภาคนาโนลงไปโลหะบัดกรีนั้นจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรนของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยการลดพลังงานพื้นผิวของเกรนของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากการแข็งตัว โดยสามารถอธิบายได้จากการดูดซึมของอนุภาคนาโน ซึ่งในสมการที่ 2.6 ได้แสดงสมการตัวอย่างการดูดซึมของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวเกรนของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังนี้

$$\sum_N \gamma_c^N S_N = \sum_N \left(\gamma_0^N - RT \int_0^c \frac{\Pi^N}{C} dc \right) S_N \quad (2.6)$$

$$\sum_N \gamma_c^N S_N = \sum_N \gamma_0^N S_N - RT \sum_N S_N \int_0^c \frac{\Pi^N}{C} dc \rightarrow \min \quad (2.7)$$

โดยที่	C	คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน
	γ_0^N	คือ แรงตึงผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N ที่ปราศจากการดูดซึมจากอนุภาคนาโน
	γ^N	คือ แรงตึงผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	γ_c^N	คือ แรงตึงผิวของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N ที่ถูกดูดซึมจากอนุภาคนาโน
	S_N	คือ พื้นที่ของอนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	Π^N	คือ ปริมาณการดูดซึมทั้งหมดของอนุภาคนาโนที่อนุภาค Cu_6Sn_5 ตัวที่ N
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)

กำหนดให้ปริมาตรของสารประกอบเชิงโลหะมีค่าคงที่ พลังงานพื้นผิวของระนาบต้องมีค่าต่ำที่สุดในสถานะสมดุล ในสมการที่ 2.7 $\sum_N \gamma_0^N S_N$ ถูกสมมติให้มีค่าคงที่เนื่องจากไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ดังนั้น $\sum_N S_N \int_0^c \frac{\Pi^N}{C} dc$ ต้องมีค่ามากที่สุด เพื่อให้พลังงานพื้นผิวของเกรนของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีค่าต่ำที่สุด

2.1.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี

2.1.9.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-เงิน (Sn-Ag)

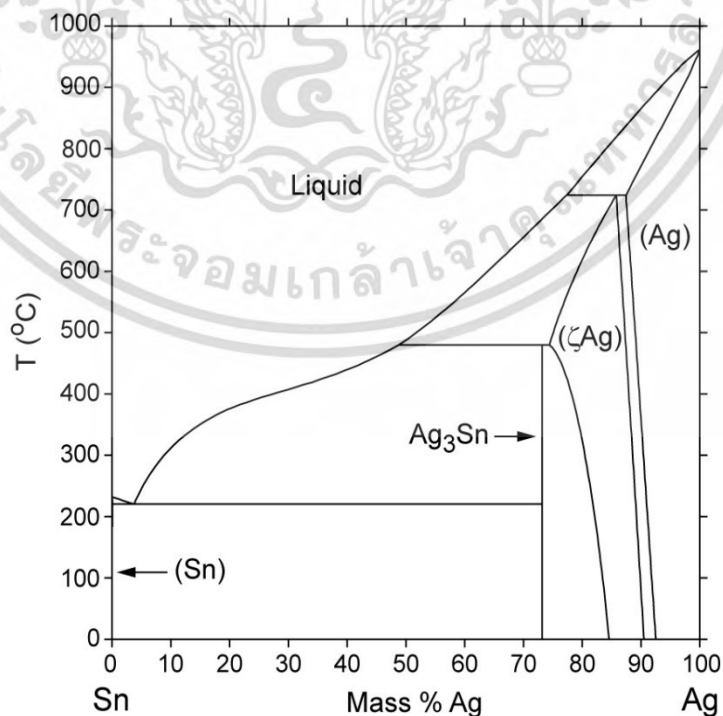
ปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงิน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220.3 °C ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยอุณหภูมิยูเทคติกเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่โลหะยังคงสถานะเป็นของเหลว ซึ่งสภาวะที่จุดยูเทคติกจะทำให้เฟสของเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส โดยปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุกและเงินจะเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn และเฟส Sn-rich ดังแสดงในสมการที่ 2.8



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงินที่อุณหภูมิ 220.3 °C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงินที่อุณหภูมิ 220.3 °C

เฟส	Mass %Ag	Mass %Sn
Liquid	3.58	96.42
Ag_3Sn	73.17	26.83
Sn	0.07	99.93



รูปที่ 2.20 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-เงิน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

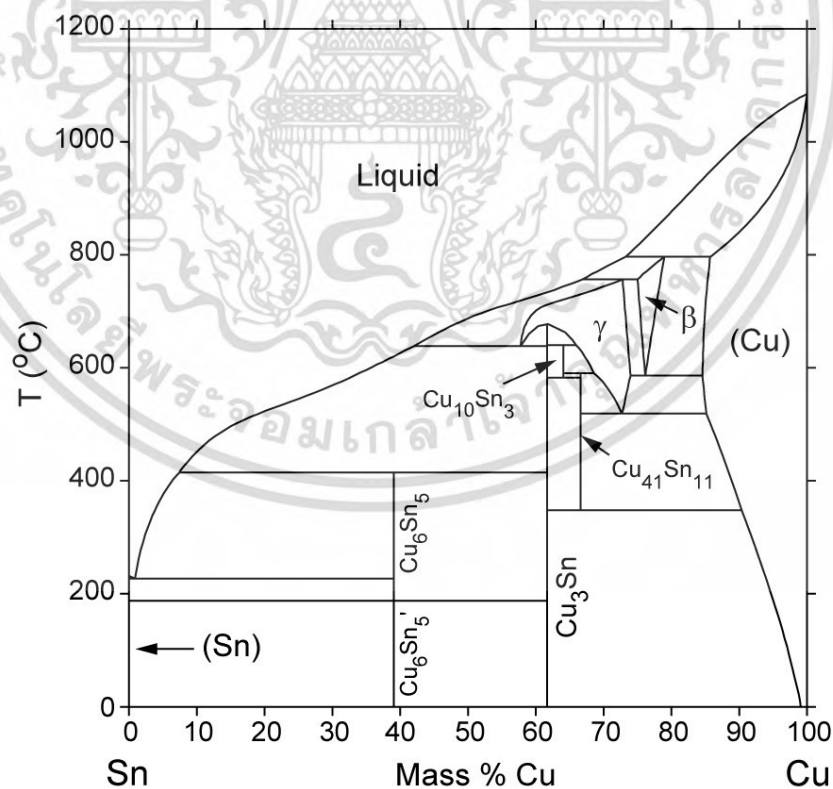
หนึ่งในปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง ก็คือปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 226.8°C ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยจุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟสคือสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเฟส Sn-rich ดังแสดงในสมการที่ 2.9



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ทองแดงที่อุณหภูมิ 226.8°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ทองแดงที่อุณหภูมิ 226.8°C

เฟส	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	0.89	99.11
Cu_6Sn_5	39.07	60.93
Sn	0.01	99.99



รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ทองแดง (Ag-Cu)

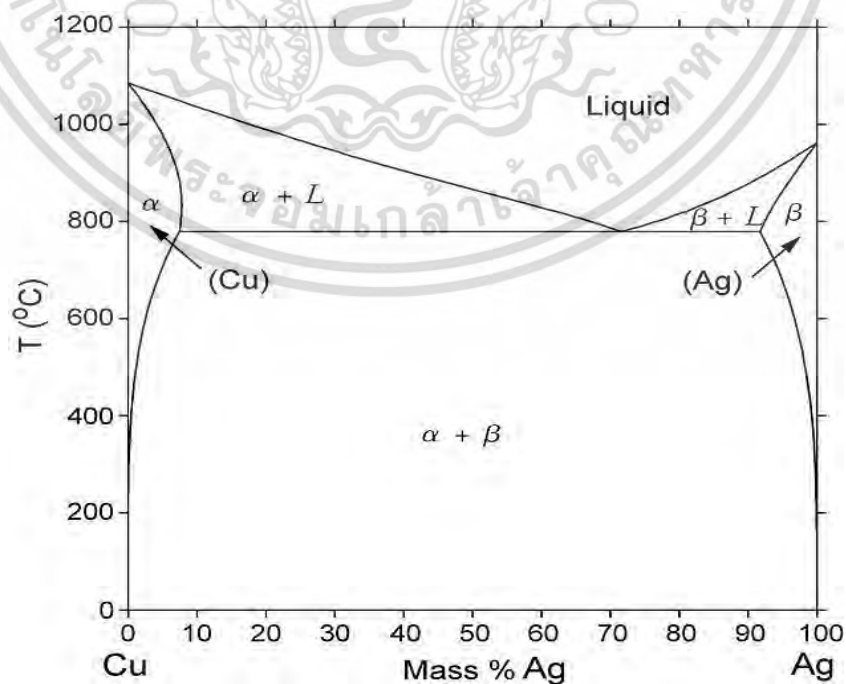
โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสภาวะของแข็งได้อย่างสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน (FCC) โดยที่โครงสร้างผลึกของโลหะทั้งสองชนิดสามารถรองรับอะตอมของโลหะอีกชนิดได้ในปริมาณที่น้อย ซึ่งความสามารถในการละลายจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีสารละลายของแข็งสองชนิดคือ สารละลายของแข็งที่มีเงินอยู่มาก (Ag - rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงอยู่มาก (Cu- rich) ซึ่งสารละลายของแข็งทั้งสองชนิดถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial solid solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และเบตา (β) จุดสำคัญของเฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับทองแดงคือ จุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 780°C ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยจุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นสารละลายของแข็ง 2 เฟสคือ α และ β ดังแสดงในสมการที่ 2.10



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่อุณหภูมิ 780°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่อุณหภูมิ 780°C

เฟส	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	74.00	26.00
α	9.00	91.00
β	93.00	7.00



รูปที่ 2.22 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ทองแดง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียม (Sn-Ti)

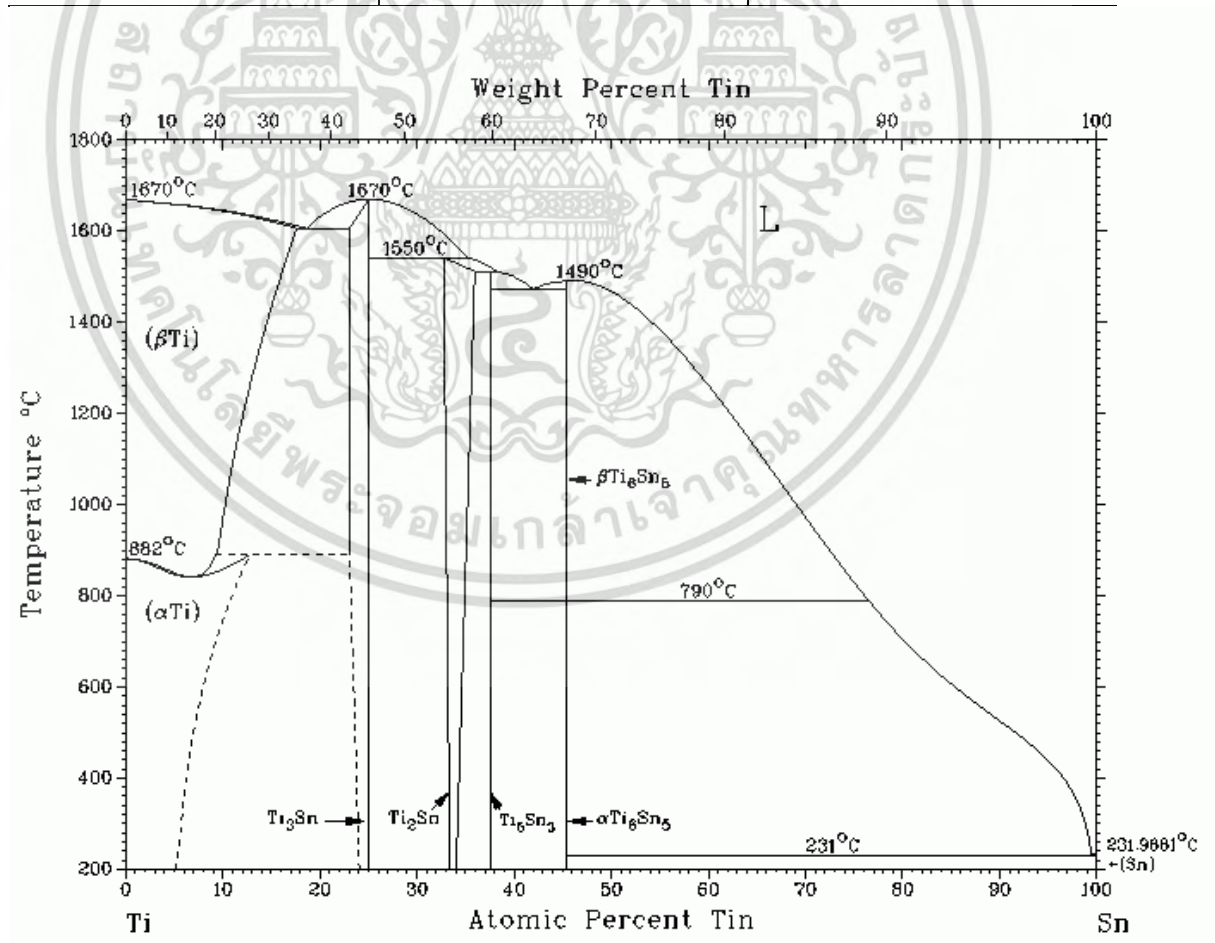
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 231.96°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ $\alpha\text{Ti}_6\text{Sn}_5$ กับเฟส Sn-rich ดังแสดงในสมการที่ 2.11



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 231.96°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 231.96°C

เฟส	Mass %Ti ₂	Mass %Sn
Liquid	1.00	99.00
$\alpha\text{Ti}_6\text{Sn}_5$	32.61	67.39
Sn	0.01	99.99



รูปที่ 2.23 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-ไทเทเนียม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีส (Sn-Mn)

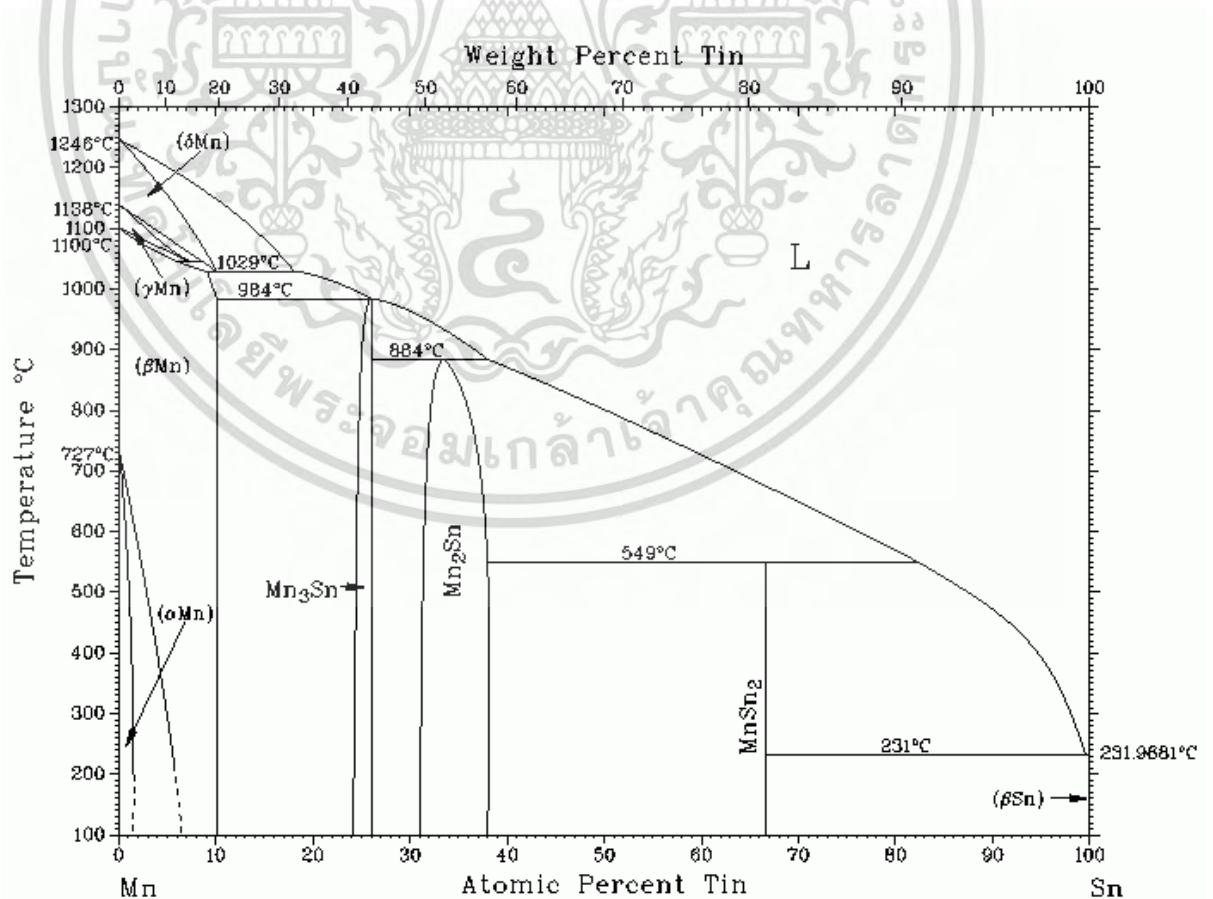
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีส คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 231.96°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ $MnSn_2$ กับเฟส βSn ดังแสดงในสมการที่ 2.12



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 231.96°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 231.96°C

เฟส	Mass %Mn	Mass %Sn
Liquid	1.00	99.00
$MnSn_2$	81.21	18.79
βSn	0.01	99.99



รูปที่ 2.24 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-แมงกานีส [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-อินเดียม (Sn-In)

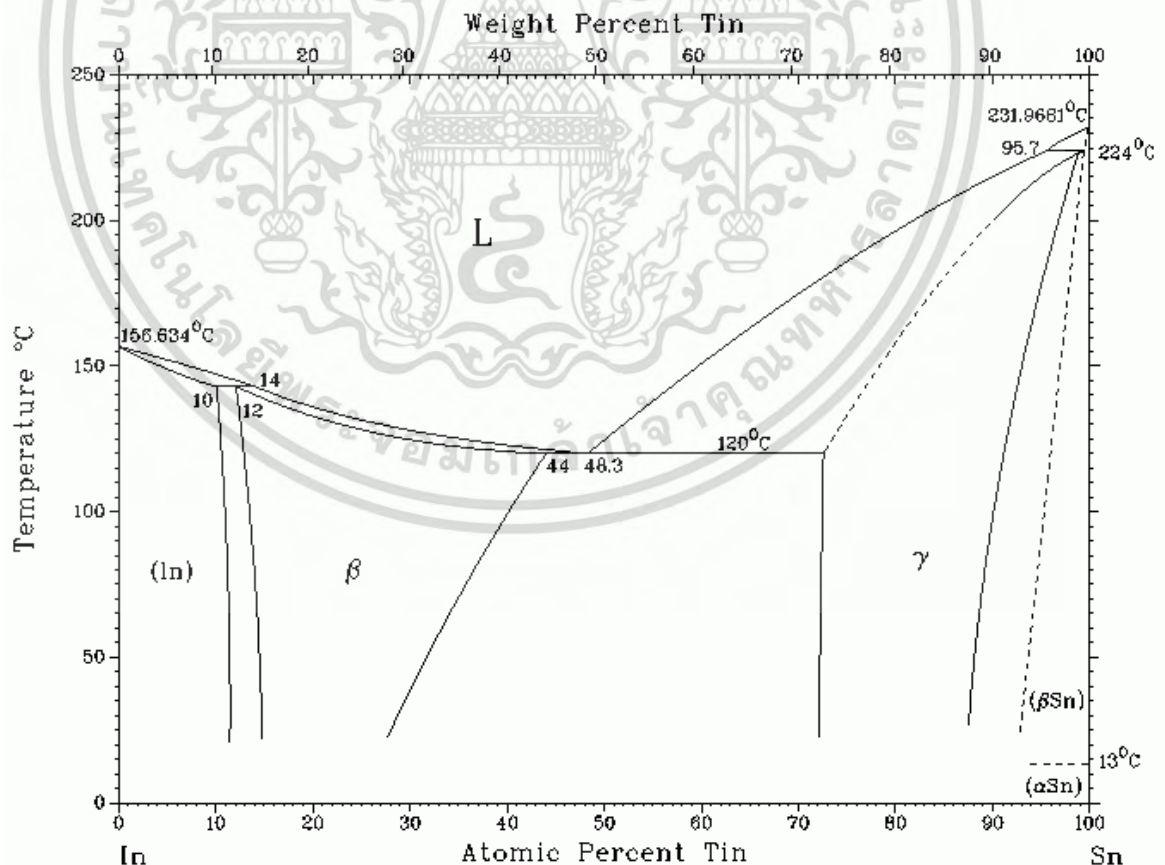
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีบุก-อินเดียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ที่จุดยูทเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ γ กับเฟส β ดังแสดงในสมการที่ 2.13



โดยในปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสมดีบุก-อินเดียมที่อุณหภูมิ 120°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสมดีบุก-อินเดียมที่อุณหภูมิ 120°C

เฟส	Mass %In	Mass %Sn
Liquid	49.00	51.00
γ	27.00	73.00
β	56.00	44.00



รูปที่ 2.25 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมดีบุก-อินเดียม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียม (Ag-Ti)

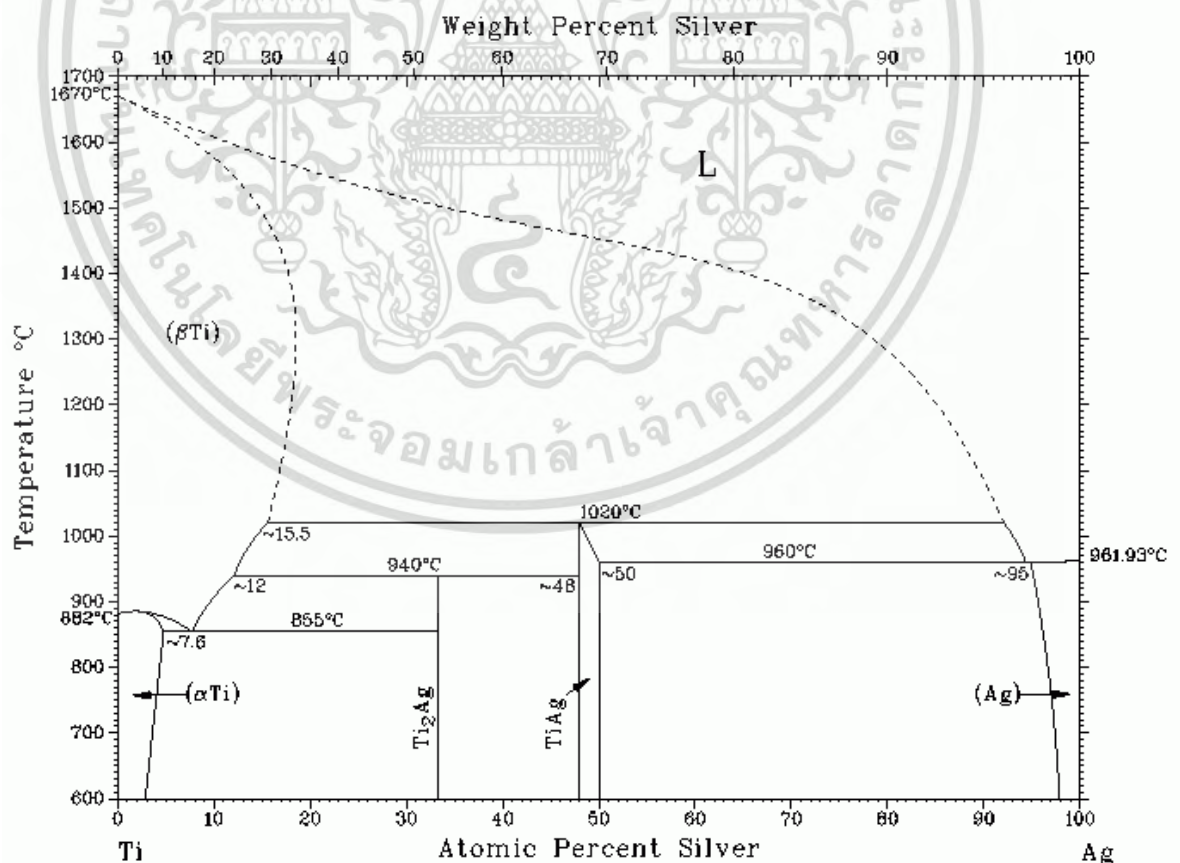
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมดีเงิน-ไทเทเนียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 855°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ที่จุดนี้ βTi จะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ เฟส αTi กับเฟส Ti_2Ag ดังแสดงในสมการที่ 2.14



โดยในปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 855°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 855°C

เฟส	Mass %Ag	Mass %Ti
βTi	15.00	85.00
αTi	12.00	88.00
Ti_2Ag	52.97	47.03



รูปที่ 2.26 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-ไทเทเนียม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส (Ag-Mn)

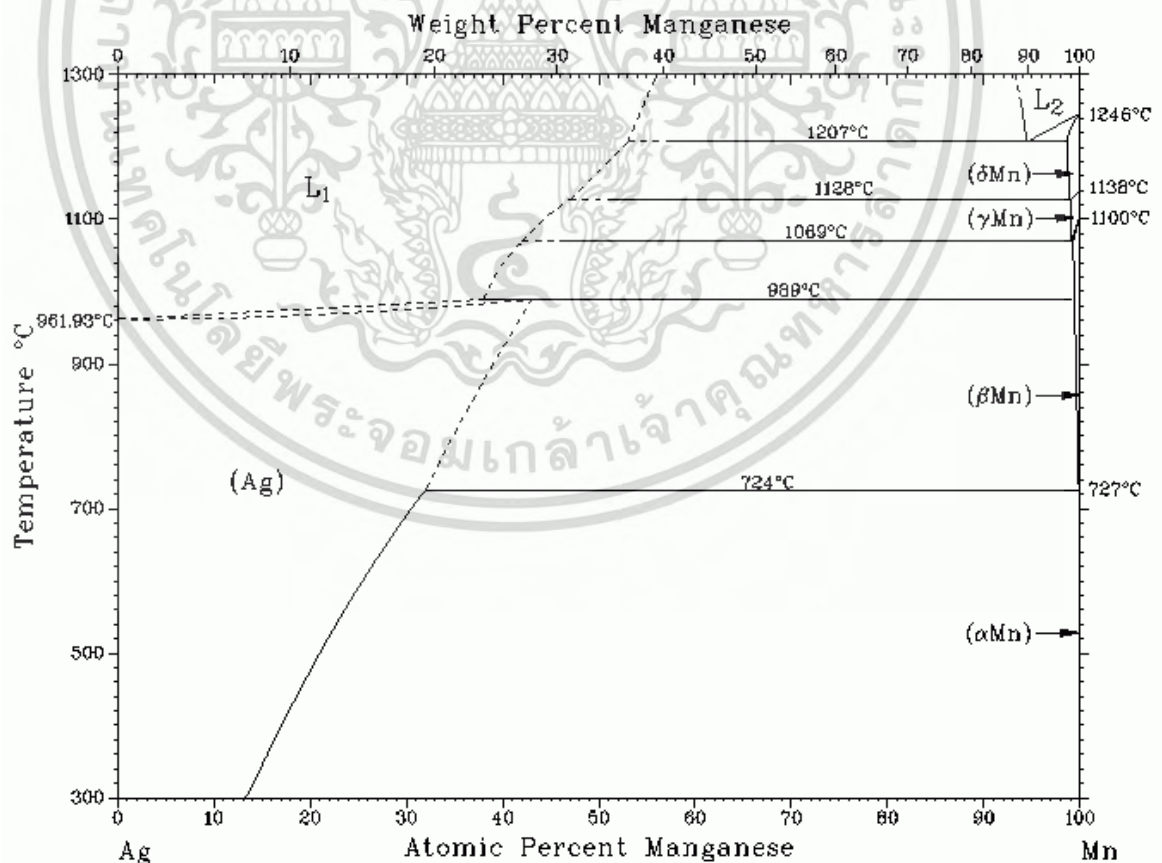
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1207°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยาโมโนเทคติกดังแสดงในรูปที่ 2.27 ที่จุดนี้ L_2 จะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 1 เฟส และของเหลว 1 เฟส ได้แก่ เฟส δMn กับเฟส L_1 ดังแสดงในสมการที่ 2.15



โดยในปฏิกิริยาโมโนเทคติกของโลหะผสมเงิน-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 1207°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยาโมโนเทคติกของโลหะผสมเงิน-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 1207°C

เฟส	Mass %Ag	Mass %Mn
L_2	10.00	90.00
δMn	2.00	98.00
L_1	64.00	36.00



รูปที่ 2.27 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.9 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-อินเดียม (Ag-In)

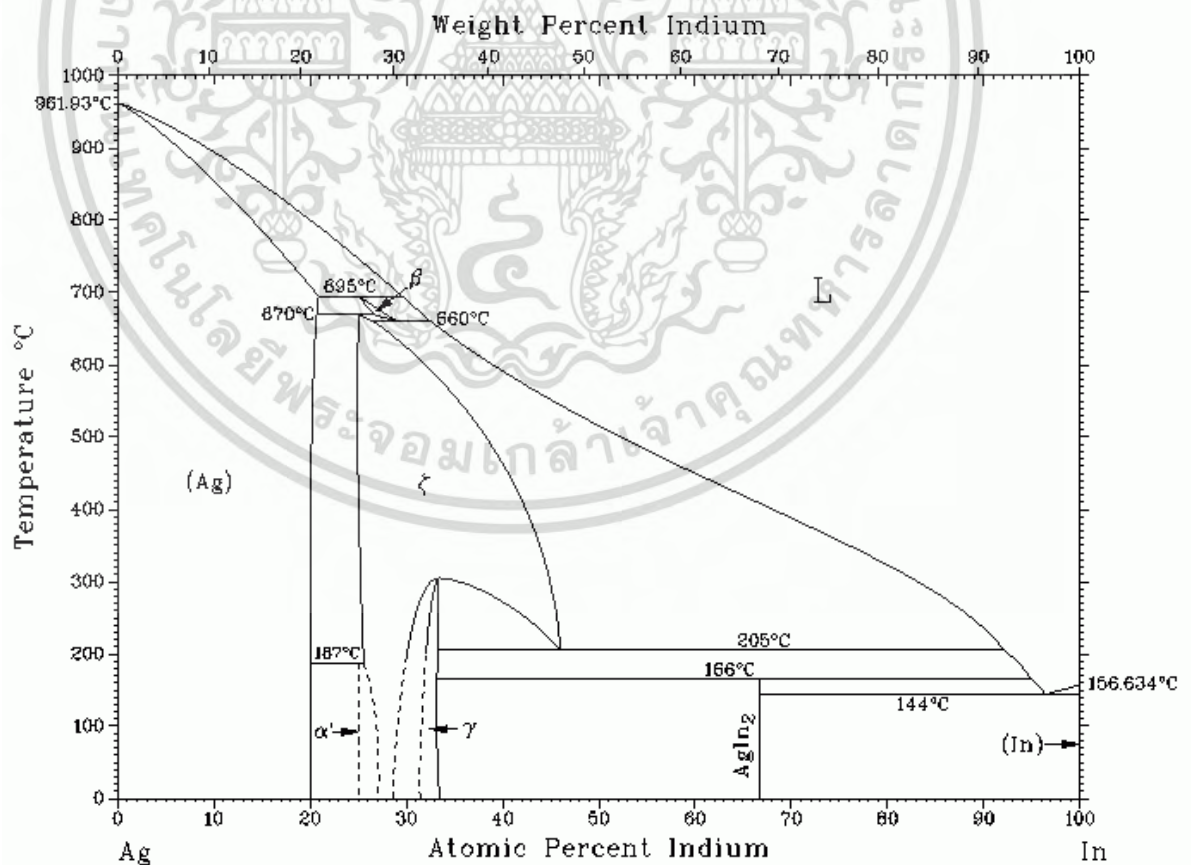
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมเงิน-อินเดียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 144°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ที่จุดยูทเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ $AgIn_2$ กับเฟส In-rich ดังแสดงในสมการที่ 2.16



โดยในปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสมเงิน-อินเดียมที่อุณหภูมิ 144°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสมเงิน-อินเดียมที่อุณหภูมิ 144°C

เฟส	Mass %Ag	Mass %In
L	5.00	95.00
$AgIn_2$	31.97	68.03
In	0.00	100.00



รูปที่ 2.28 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมเงิน-อินเดียม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.10 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียม (Cu-Ti)

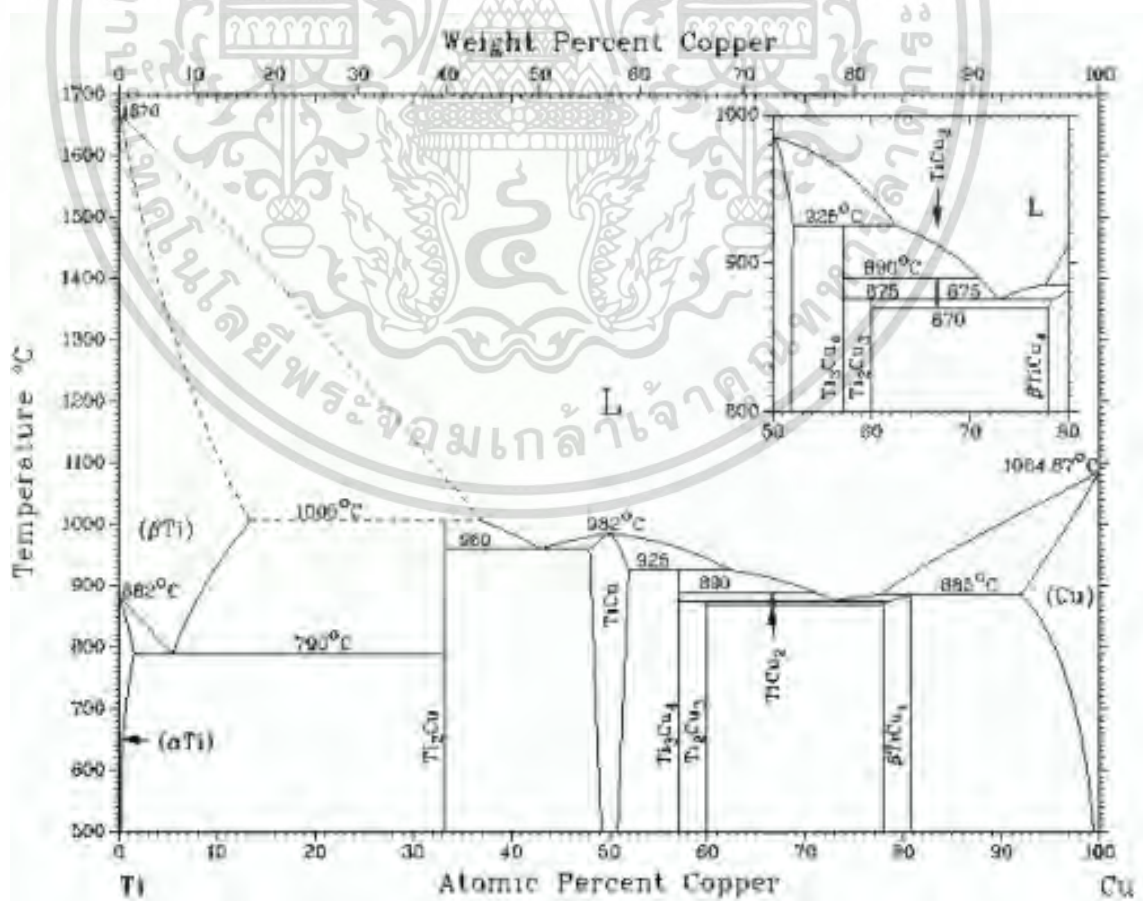
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 790°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ที่จุดนี้ βTi จะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Ti_2Cu กับเฟส αTi ดังแสดงในสมการที่ 2.17



โดยในปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 790°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคทอยด์ของโลหะทองแดง-ไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 790°C

เฟส	Mass %Cu	Mass %Ti
βTi	7.00	93.00
Ti_2Cu	39.90	60.10
αTi	3.00	97.00



รูปที่ 2.29 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-ไทเทเนียม [28]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.11 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส (Cu-Mn)

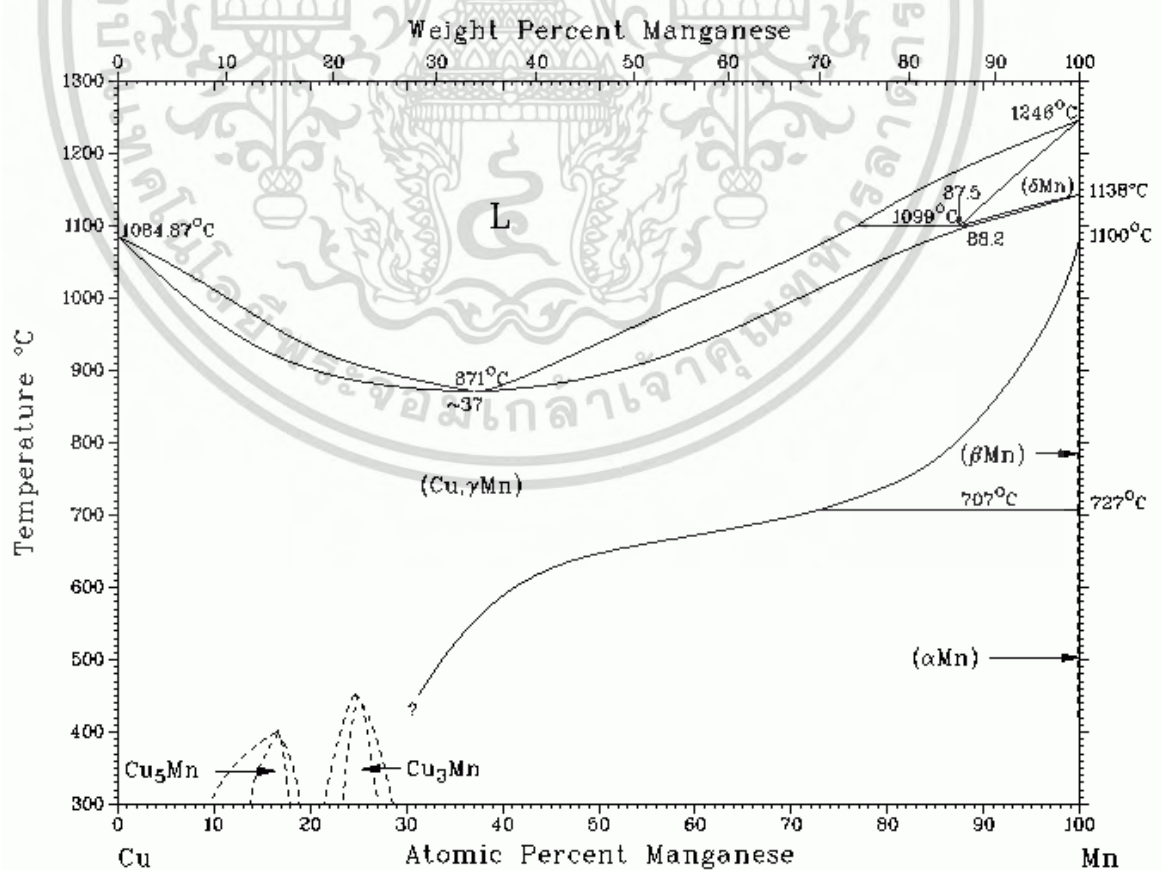
สารประกอบเชิงโลหะที่พบในเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับ Cu_5Mn และ Cu_3Mn ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 871°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ที่จุดนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นสารละลายของแข็ง Cu และ γMn ดังแสดงในสมการที่ 2.18



โดยในปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะทองแดง-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 871°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะทองแดง-แมงกานีสที่อุณหภูมิ 871°C

เฟส	Mass %Cu	Mass %Mn
L	37.00	63.00
Cu	100.00	0.00
γMn	0.01	99.99



รูปที่ 2.30 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-แมงกานีส [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเห็นเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9.12 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-อินเดียม (Cu-In)

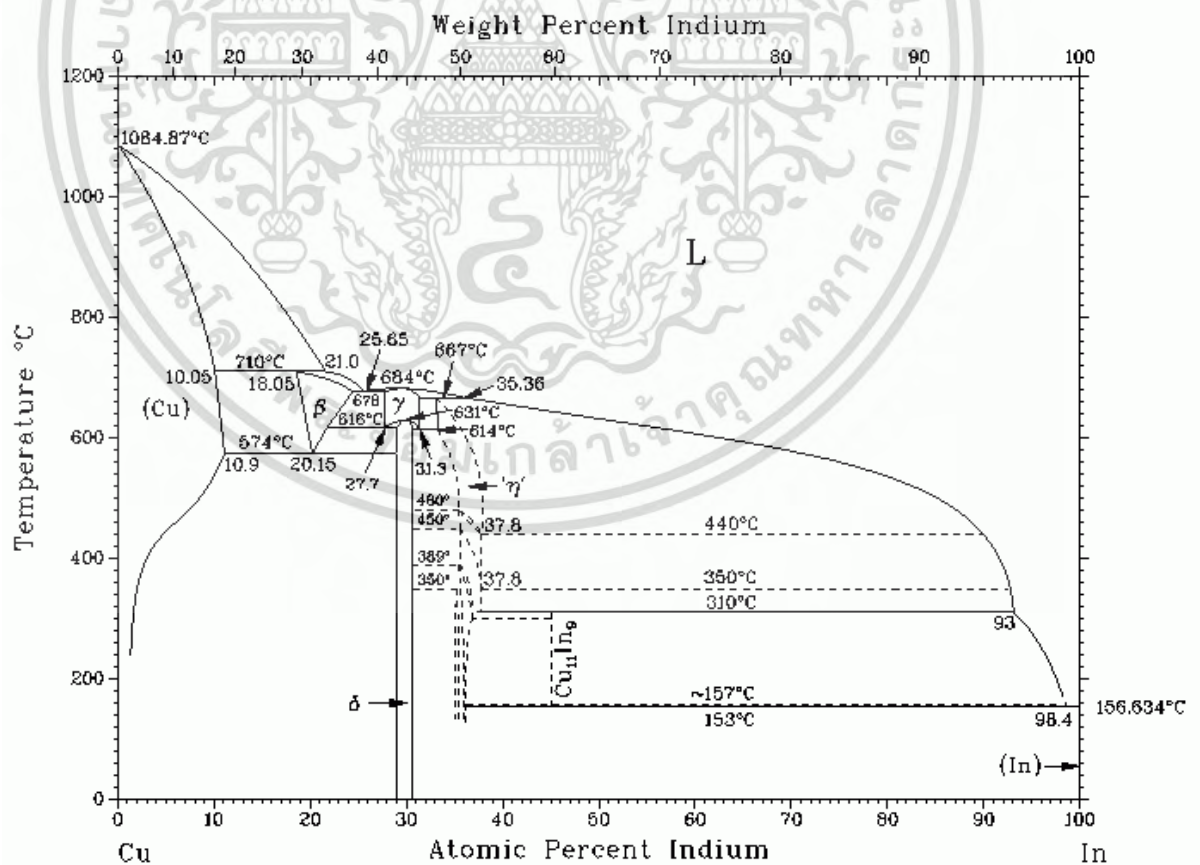
ปฏิกิริยาที่สำคัญของโลหะผสมทองแดง-อินเดียม คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 153°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ที่จุดยูเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ กับเฟส In-rich ดังแสดงในสมการที่ 2.19



โดยในปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมทองแดง-อินเดียมที่อุณหภูมิ 153°C แต่ละเฟสจะมีส่วนผสมดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมทองแดง-อินเดียมที่อุณหภูมิ 153°C

เฟส	Mass %Cu	Mass %In
L	1.60	98.40
$\text{Cu}_{11}\text{In}_9$	40.34	59.66
In	0.00	100.00



รูปที่ 2.31 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมทองแดง-อินเดียม [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

จุดหลอมเหลวถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโลหะบัดกรีเพื่อนำมาใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการผลิตถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับอุณหภูมิ 183°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดยูเทกติกของ Sn-Pb ถ้าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ถูกพัฒนามีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการผลิตทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ในการผลิตใหม่ [29] ดังนั้นในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน อนุภาคนาโนที่ใช้ไม่ควรทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น

จากการสำรวจงานวิจัยต่างๆพบว่า ในการทำโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยการเติมอนุภาคนาโนลงไปโลหะบัดกรีจะมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีในหลากหลายลักษณะ เช่น ในงานวิจัยของ Nai และคณะ [30,31] ที่ศึกษาอิทธิพลของของอนุภาคนาโน multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) ต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าการเติมอนุภาคนาโน MWCNTs ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Shen และคณะ [32] ได้ศึกษาจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-3.5Ag-ZrO₂ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าจุดหลอมเหลวโลหะบัดกรี Sn-Ag ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน ZrO₂ ขณะที่งานวิจัยของ Kumar และคณะ [33,34] พบว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่เติม Single-walled Carbon Nanotubes (SWCNT) มีอุณหภูมิที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน การเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลวสามารถอธิบายได้จากพลังงานพื้นผิวที่มีพลังงานสูง และปฏิกิริยาผิวสัมผัสที่ไม่เสถียรของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [8] ที่พบว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu มีอุณหภูมิลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน SiC โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 1 K ซึ่งคาดว่า การลดลงของจุดหลอมเหลวเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นผิวที่ไม่เสถียรของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เนื่องจากการเติมอนุภาคนาโน SiC ที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระสูง อย่างไรก็ตาม ในบางงานวิจัยพบว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีมีผลให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น เช่น El-Daly และคณะ [7] พบว่าการเติมอนุภาคนาโน SiC ลงในโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.5Cu เพื่อทำให้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Tay และคณะ [35] ในการทำโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยเติมอนุภาคนาโน Co ลงในโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu แล้วทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น และผลการวิจัยของ Tsao [36] ก็พบเช่นเดียวกันว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu เพิ่มขึ้น และช่วงหลอมเหลวกว้างขึ้น เมื่อเติมอนุภาคนาโน TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง

การเติมอนุภาคนาโนลงไปโลหะบัดกรี พบว่ามีผลกระทบต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง ทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนที่เติมเข้าไปทำให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น และอนุภาคนาโนจะเป็นตัวบ่งชี้การแผ่กระจายของหยดโลหะเหลวบนแผ่นรอง อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณเล็กน้อยสามารถปรับปรุงการเปียกของโลหะบัดกรีกับแผ่นรองได้ ซึ่งยังไม่มีการวิจัยใดที่สามารถอธิบายเหตุผลของปรากฏการณ์ได้อย่างชัดเจน งานวิจัยของ Tai และคณะ [37] พบว่า โลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu ที่เติมอนุภาคนาโน Ag ในปริมาณ 0.5 wt% มีความสามารถในการเปียกที่ดีกว่าโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมีมากขึ้น ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีเชิงประกอบบนแผ่นรองทองแดงมีค่าที่ลดลง งานวิจัยของ Yue และคณะ [38] พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ในปริมาณ 0.2-1 wt% ลงในโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.7Cu สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียกเมื่ออนุภาคนาโน Fe_2O_3 ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรีมีปริมาณไม่เกิน 0.4 wt% และเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 มีมากกว่า 0.4 wt% ส่งผลให้ความสามารถในการเปียกมีค่าลดลง

2.2.3 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม

กระบวนการพิมพ์ถือว่ามีผลสำคัญในอุตสาหกรรมประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากข้อบกพร่องส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น เช่น การทรุดตัว (Slumping) และ การเกิดบริดจ์ (Bridging) มีผลมาจากความความผิดพลาดในกระบวนการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยในการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมีความจำเป็นต้องลดขนาดรูของ Stencil ให้มีขนาดเล็กส่งผลให้เกิดการอุดตันในรูของ Stencil ได้ง่ายขึ้น และทำให้เกิดการส่งผ่านที่ไม่สมบูรณ์ของโลหะบัดกรีแบบครีมไปยังแผ่น PCB ซึ่งในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [39] ได้กล่าวไว้ว่ากระบวนการพิมพ์จะประกอบไปด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน ได้แก่ การวางก้อนโลหะบัดกรีแบบครีมไว้ด้านบนของ Squeegee ซึ่งเป็นแท่งไม้หุ้มด้วยยางไว้สำหรับปาดโลหะบัดกรี การเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil และการดึง Stencil ออกเพื่อให้โลหะบัดกรีหลุดออกจากรูของ Stencil โดยในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [40] พบว่าขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการพิมพ์คือ ขั้นตอนการเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil และขั้นตอนการดึง Stencil ออกเพื่อให้โลหะบัดกรีหลุดออกจากรูของ Stencil ซึ่งประสิทธิภาพของทั้ง 2 ขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับ Rheology ของโลหะบัดกรีแบบครีม ซึ่งในขั้นตอนการเติมโลหะบัดกรีลงในรูของ Stencil โลหะบัดกรีแบบครีมที่ถูกปาดด้วย Squeegee จะต้องมีค่าความหนืดต่ำเพียงพอที่จะไหลลงในช่องว่างของ Stencil และในขณะที่ดึง Stencil ออกความหนืดของโลหะบัดกรีต้องมีมากพอที่จะเอาชนะแรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) ของผนังด้านในของช่อง Stencil ซึ่งการพิมพ์ที่ดีถูกจำกัดความจากปริมาตรของก้อนโลหะบัดกรีที่ทำการพิมพ์ลงบนแผ่นรอง คือ ปริมาตรของก้อนโลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองควรมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Stencil อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมการผลิตปริมาณของก้อนโลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองมักมีปริมาตรที่น้อยกว่าปริมาตรรู ของ Stencil ที่มีสาเหตุมาจากแรงเชื่อมแน่นของโลหะบัดกรีกับผนังด้านในรูของ Stencil ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมขั้นตอนทั้ง 2 ให้ดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะสามารถช่วยลดข้อบกพร่อง และเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการพิมพ์ยังถูกควบคุมด้วยจำนวนตัวแปรของกระบวนการพิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ เครื่องพิมพ์ Stencil สภาพแวดล้อม และโลหะบัดกรีแบบครีม โดยตัวแปรบางตัวสามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าได้ ตัวอย่างเช่น Stencil ขณะที่คุณสมบัติของโลหะบัดกรีแบบครีม เช่น ความหนืดจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงวัฏจักรการพิมพ์

2.2.4 สารประกอบเชิงโลหะ

กระบวนการที่สำคัญสำหรับการเชื่อมติดโลหะบัดกรี คือ การทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound, IMC) บริเวณรอยต่อของผิวโลหะ โดยมีหน้าที่เชื่อมติดระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรอง อย่างไรก็ตามชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่หนาเกินไปจะส่งผลให้ Fatigue life ของรอยบัดกรีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักภายในชั้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือตามแนวบัดกรีระหว่างโลหะบัดกรี และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [3,5] ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันไม่ให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อที่มีการเติบโตที่มากเกินไป โดยในงานวิจัยของ Tang และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน TiO_2 ต่อการเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะในรอยบัดกรีของโลหะบัดกรี $\text{Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO}_2$ พบว่าเมื่อเริ่มการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ TiO_2 จะอยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในหยดโลหะบัดกรี การมีอยู่ของอนุภาคนาโน TiO_2 จะลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดนิวเคลียส Cu_6Sn_5 ทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation rate) เพิ่มมากขึ้น และทำให้เกรนของ Cu_6Sn_5 มีขนาดเล็กลง (Refined grain) ซึ่งเป็นการป้องกันการบ่มเกรน (Grain ripening) ของเฟสสารประกอบเชิงโลหะ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างรัศมีเกรนของสารประกอบเชิงโลหะในรอยต่อของโลหะบัดกรีที่เติม TiO_2 จะมีขนาดที่เล็กกว่าในรอยต่อของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติม TiO_2 นอกเหนือจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดนิวเคลียส และการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง การเติมอนุภาคนาโนยังส่งผลต่อการยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของโลหะบัดกรี $\text{Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO}_2$ โดยสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการดูดซึมของอนุภาคนาโน TiO_2 นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีจะมีผลต่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยบัดกรี ซึ่งในงานวิจัยของ Zhao และคณะ [41] ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.5Cu โดยจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังจากการบัดกรี และหลังจากการบ่มเพาะความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 100, 200 และ 300 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาครวมถึงรอยบัดกรีหลังการบัดกรีพบว่าขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่เล็กลงเมื่ออนุภาคนาโนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมลงในโลหะบัดกรีมีขนาดเฉลี่ย 20 และ 50 nm แต่มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนที่มีขนาด 200 nm ลงในโลหะบัดกรี โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาด 20 nm นอกจากนี้ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาด 20 nm ยังมีขนาดเล็กกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐานในทุกช่วงเวลาการบ่มด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาด 200 nm ลงในโลหะบัดกรีพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าโลหะบัดกรีพื้นฐานในทุกช่วงเวลาการบ่มด้วยความร้อน จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาค Fe_2O_3 สามารถยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ แต่ประสิทธิภาพการยับยั้งการเติบโตชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติมอนุภาค Fe_2O_3 ขนาดเล็กกว่าจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งหลังการบัดกรี และหลังการบ่มด้วยความร้อน

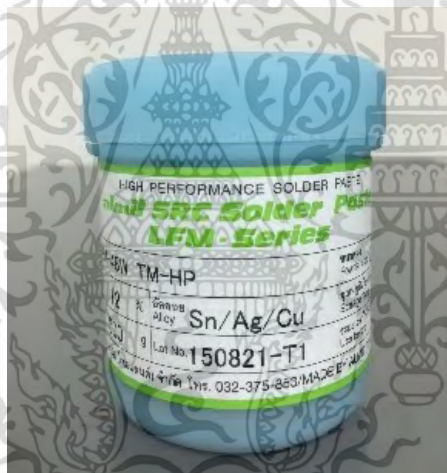
2.2.5 คุณสมบัติทางกล

สาเหตุสำคัญในการทำโลหะบัดกรีให้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยการเติมอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรีคือ เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความสามารถในการต้านทานความล้าและการคืบของโลหะบัดกรี ซึ่งในงานวิจัยของ Wattanakornphaiboon และคณะ [42] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาค SnO_2 (0.1, 0.5 และ 1 wt%) ที่มีต่อคุณสมบัติการต้านทานความคืบของโลหะบัดกรี SAC305 พบว่าความสามารถในการต้านทานความคืบของโลหะบัดกรีจะมากขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมาก โดยในงานวิจัยฉบับนี้ โลหะบัดกรีจะมีความสามารถในการต้านทานความคืบมากที่สุดเมื่อเติมอนุภาคนาโน SnO_2 ในปริมาณ 1 wt% ซึ่ง Wattanakornphaiboon ได้อธิบายสาเหตุที่ความสามารถในการต้านทานของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้นว่า เกิดจากอนุภาคนาโนที่เติมลงไปโลหะบัดกรีจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) และการเคลื่อนที่ของขอบเกรน (Grain boundary sliding) ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการคืบของโลหะบัดกรีมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัย Shen และคณะ [43] ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Cu (0.5, 1 และ 1.5 wt%) ที่มีต่อความสามารถในการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag พบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน Cu ลงในโลหะบัดกรีปริมาณ 0.5 wt% ความสามารถในการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโน Cu ในโลหะบัดกรีมีมากขึ้น (1 และ 1.5 wt%) จะทำให้ความสามารถในการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง ซึ่ง Shen และคณะได้อธิบายสาเหตุที่ความสามารถในการต้านทานความล้าลดลงว่าเกิดจาก ปริมาณโพรง (Cavity) ในเนื้อโลหะบัดกรีที่เพิ่มขึ้นจากการเติมอนุภาคนาโน ซึ่งโพรงดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้น (Stress) มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง ดังนั้นการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีจะสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการต้านทานความล้าและการคืบของโลหะบัดกรีได้หากเติมในปริมาณที่เหมาะสม

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 คุณสมบัติของโลหะบัดกรี

โลหะบัดกรีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีมสูตร Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) รุ่น LFM-48W TM-HP จาก บริษัท อัลมิต ไทยแลนด์ จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งภายในโลหะบัดกรี SAC305 ประกอบไปด้วยผงโลหะที่มีขนาดอนุภาค 20-38 μm ผสานอยู่กับฟลักซ์ 12 % โดยโลหะบัดกรี SAC305 มีอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature) และ อุณหภูมิลิควิดัส (Liquids temperature) เท่ากับ 217 และ 220°C ตามลำดับ ขณะที่ฟลักซ์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 80°C ความหนาแน่นของโลหะบัดกรีแบบครีมมีค่าเท่ากับ 4.17 g/cm^3 และมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 150-300 Pa·s [44]



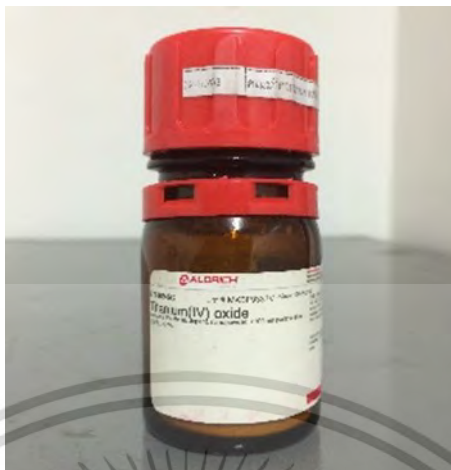
รูปที่ 3.1 โลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)

3.2 คุณสมบัติของอนุภาคที่เติมลงในโลหะบัดกรี

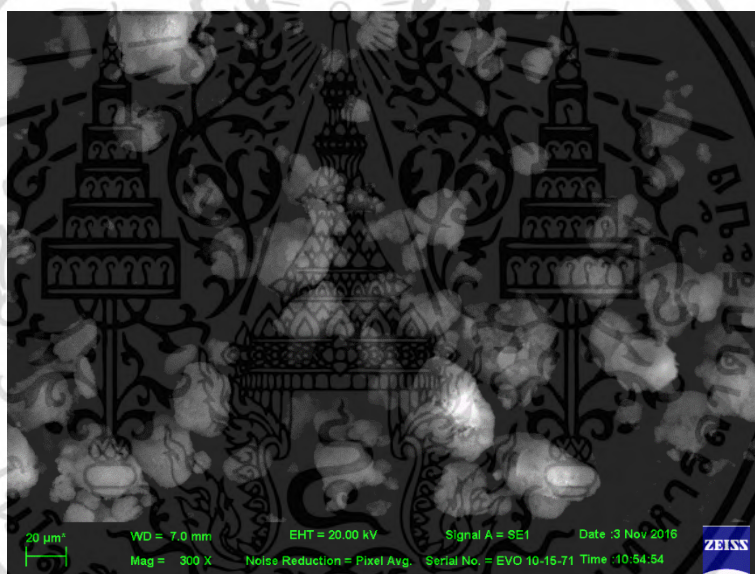
3.2.1 อนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2

อนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เป็นอนุภาคนาโนชนิดใหม่ที่เจือด้วยธาตุ Mn ในปริมาณ 1 wt% จาก บริษัท Sigma Aldrich ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งอนุภาคนาโนชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ 97 % ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 nm มีพื้นที่ผิวมากกว่า 14 m^2/g และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.26 g/cm^3 ที่ 25 °C [45] โดยลักษณะของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2

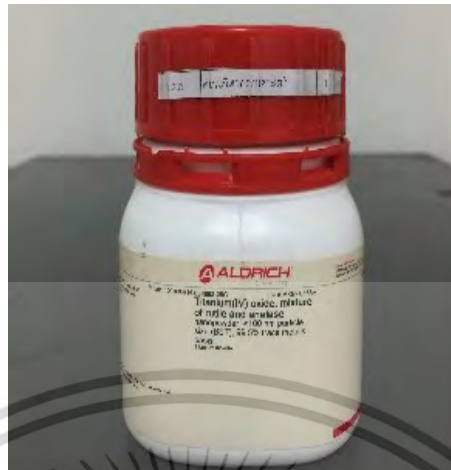


รูปที่ 3.3 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2

3.2.2 อนุภาคนาโน TiO_2

อนุภาคนาโน TiO_2 ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แสดงดังในรูปที่ 3.4 เป็นผลิตภัณฑ์จาก บริษัท Sigma Aldrich ซึ่งอนุภาคนาโนชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ 99.5 % มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 nm และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.17 g/cm^3 นอกจากนี้อนุภาคนาโน TiO_2 ชนิดนี้ยังมีโครงสร้างผลึกแบบ Rutile และ Anatase [46] โดยลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน TiO_2 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 อนุภาคนาโน TiO_2 รูปที่ 3.5 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน TiO_2

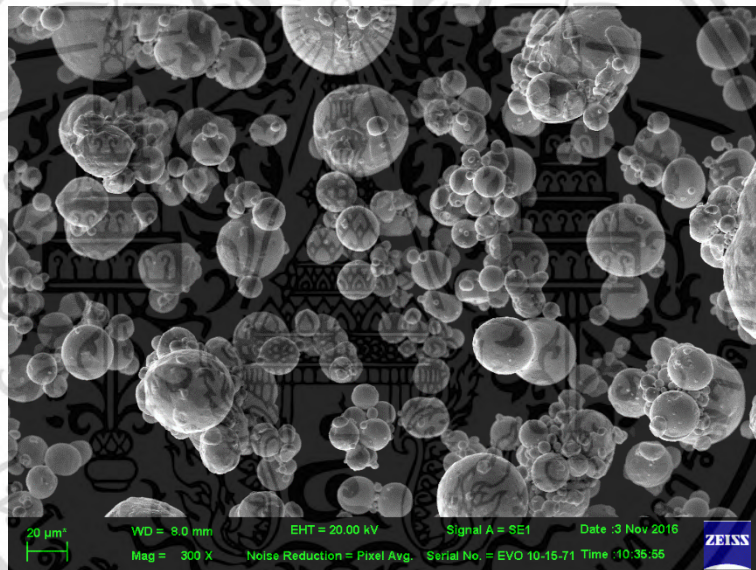
3.2.3 อนุภาค In

อนุภาค In ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แสดงดังในรูปที่ 3.6 เป็นผลิตภัณฑ์จาก บริษัท Sigma Aldrich ซึ่งอนุภาคชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ 99.99 % มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $149 \mu\text{m}$ ค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $8.37 \mu\Omega\text{-cm}$ และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 7.3 g/cm^3 ที่ 25°C [47] โดยลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาค In ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 อนุภาค In



รูปที่ 3.7 ลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันของอนุภาค In

3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแต่ละชนิดได้จากการผสมโลหะบัดกรีพื้นฐานร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 , TiO_2 , และ In ด้วยวิธีการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรี โดยการทดลองนี้จะใช้โลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐาน และผสมอนุภาคนาโนอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ TiO_2 ปริมาณ 0, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1% โดยน้ำหนัก ส่วน In จะถูกผสมด้วยปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก โดยส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ

โลหะบัดกรี	ส่วนประกอบ (wt%)			
	SAC305	Mn-doped TiO ₂	TiO ₂	In
SAC305	100	0	0	0
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	99.95	0.05	0	0
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	99.90	0.10	0	0
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	99.50	0.50	0	0
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	99.00	1.00	0	0
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	99.45	0.05	0	0.5
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	99.40	0.10	0	0.5
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	99.00	0.50	0	0.5
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	98.50	1.00	0	0.5
SAC305-0.05TiO ₂	99.95	0	0.05	0
SAC305-0.10TiO ₂	99.90	0	0.10	0
SAC305-0.50TiO ₂	99.50	0	0.50	0
SAC305-1.00TiO ₂	99.00	0	1.00	0
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	99.45	0	0.05	0.5
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	99.40	0	0.10	0.5
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	99.00	0	0.50	0.5
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	98.50	0	1.00	0.5

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว

นำโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมไปทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 204 ดังรูปที่ 3.8 การทดสอบจะทดสอบภายใต้บรรยากาศ N₂ ขึ้นงานในการทดสอบแต่ละขั้นมีน้ำหนักประมาณ 8 mg ซึ่งอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 °C/min โดยเริ่มจากอุณหภูมิตั้งต้นที่ 25 °C จนถึง 350 °C



รูปที่ 3.8 เครื่อง DSC สำหรับทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว [48]

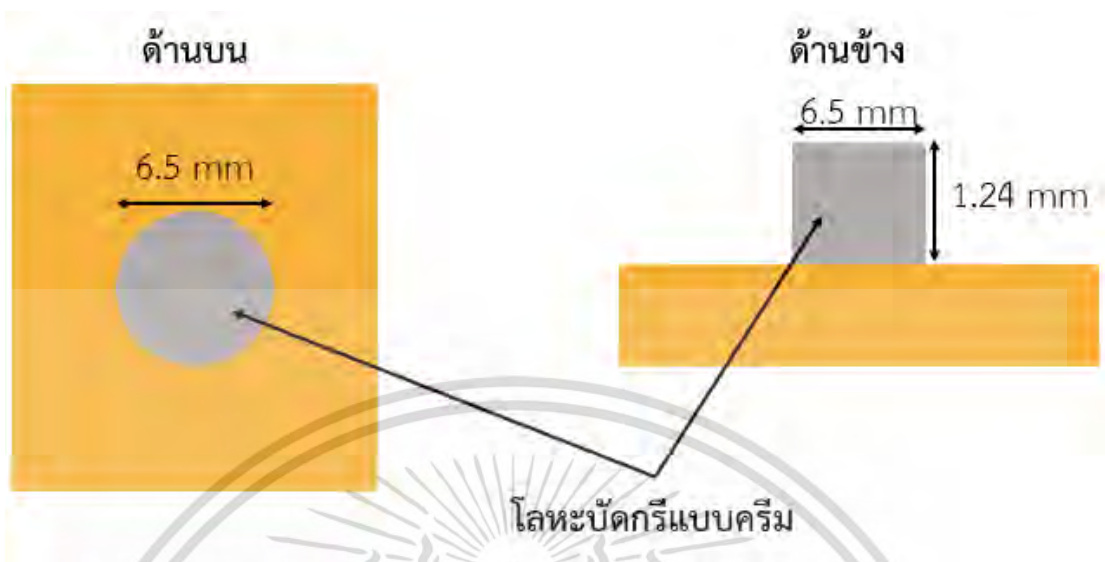
3.3.2 การพิมพ์โลหะบัดกรีลงบนแผ่นทองแดง

เริ่มจากการนำแผ่นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% ชนิด OFHC (Oxygen-free high conductivity) ที่มีขนาด 30x30x0.35 mm มาทำความสะอาดด้วยสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ตามมาตรฐาน JIS Z 3284 จากนั้นนำโลหะบัดกรีแต่ละชนิดมาพิมพ์ลงบนแผ่นทองแดงด้วยแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ดังรูปที่ 3.9 โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm และสูง 1.24 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์โลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 โลหะบัดกรีหลังการพิมพ์

การวัดความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีนั้น จะทำการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นทองแดง จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาความสามารถในการพิมพ์ ดังสมการที่ 3.1 โดย $P\%$ คือความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี V คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงหลังการพิมพ์ และ V_0 คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ถูกบรรจุเต็มปริมาตรของแม่พิมพ์

$$P\% = \frac{V}{V_0} \times 100 \quad (3.1)$$

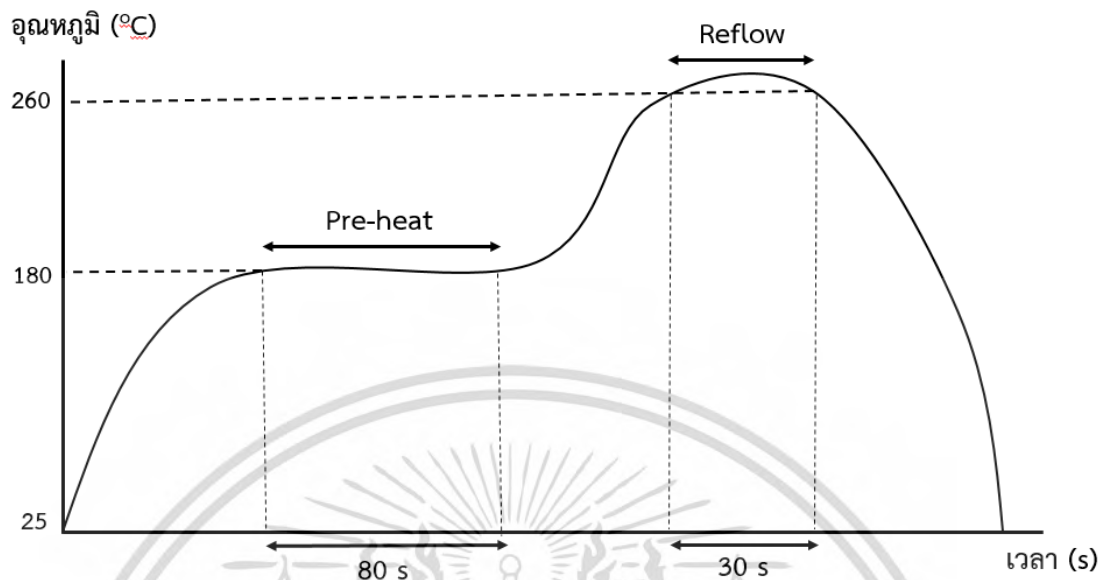
3.3.3 การบัดกรี

นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปบัดกรี โดยวิธีการ Reflow soldering ด้วยเตา Reflow ยี่ห้อ LPKF รุ่น Protoflow E ดังแสดงในรูปที่ 3.11 การบัดกรีจะบัดกรีที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที ดังแสดง Reflow profile ตามมาตรฐานของ IPC/JEDEC: J-STD-020D-01 [49] ในรูปที่ 3.12 จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศและล้างคราบฟลักซ์ออกด้วยเอทานอล โดยชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.13

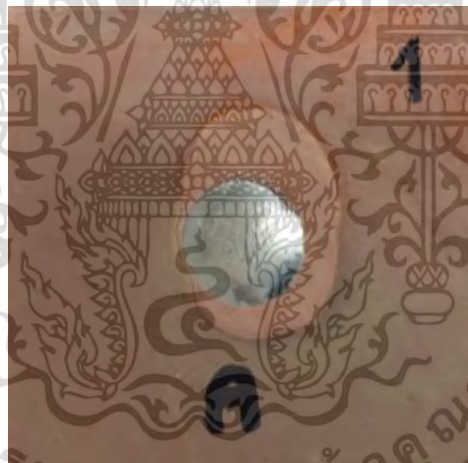


รูปที่ 3.11 เตา Reflow ยี่ห้อ LPKF รุ่น Protoflow E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 Reflow profile [47]

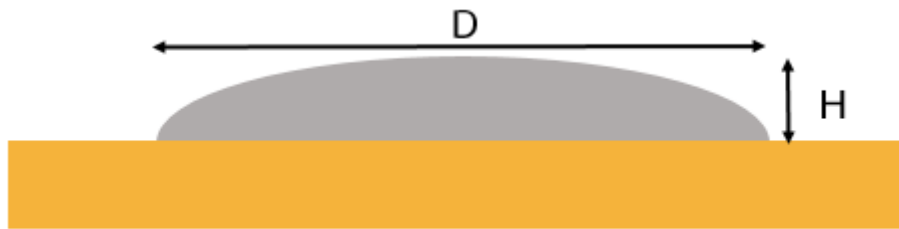


รูปที่ 3.13 ชิ้นงานหลังการบัดกรี

ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีจะถูกศึกษาในรูปแบบของ ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และมุมสัมผัส ซึ่งการวัดค่าความสามารถในการเปียกนั้น จะใช้ไมโครมิเตอร์วัดความสูงของโลหะบัดกรีที่จุดสูงสุด และใช้โปรแกรม Image pro express วัดพื้นที่และเส้นรอบวงของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง จากนั้นนำค่าที่วัดได้จากชิ้นงานมาคำนวณหาตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และมุมเปียก

ตัวประกอบการกระจายตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 โดยที่ S_f คือ ตัวประกอบการกระจายตัว H คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

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

อัตราส่วนการกระจายตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 3.3 โดย S_r คือ อัตราส่วนการกระจายตัว A คือ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง และ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะบัดกรีก่อนการบัดกรี

$$S_r = \frac{A}{A_0} \quad (3.3)$$

มุมเปียกสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4 โดย θ คือ มุมเปียกของโลหะบัดกรีหลังการบัดกรี

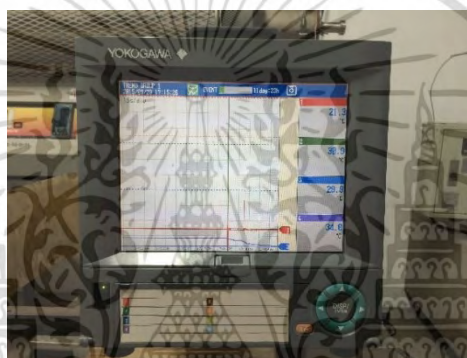
$$\theta = \arctan\left(\frac{2H}{D}\right) \quad (3.4)$$

3.3.4 การบ่มด้วยความร้อน

หลังจากการบัดกรีนำชิ้นงานแต่ละส่วนผสม บ่มด้วยความร้อนในน้ำมันแร่ (Mineral oil) ด้วยเตาอบแบบท่อ (Tube furnace) ยี่ห้อ CARBOLITE รุ่น STF 15/450 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ที่อุณหภูมิ 170 °C โดยใช้เวลาในการบ่มที่ 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง หลังจากการบ่มปล่อยให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการตรวจสอบความแปรปรวนของอุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มจะใช้เครื่องเก็บข้อมูลยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DQA STATION DX 100 ในการบันทึกข้อมูลตลอดเวลาการบ่มดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 เตอบแบบท่อ



รูปที่ 3.16 เครื่องบันทึกข้อมูล

3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เพื่อที่จะศึกษารอยบัดกรี ชิ้นงานจะถูกนำมาตัดขวางด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังรูปที่ 3.17 และหล่อด้วย Epoxy จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 1000 และ 4000 ตามลำดับ จากนั้นขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.3 μm ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวหน้าแล้ว จะมีลักษณะดังรูป 3.19 จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 LV ดังรูปที่ 3.20 เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณธาตุที่พบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อม Struers รุ่น Minitom [50]



รูป 3.18 เครื่องขัดยี่ห้อม Struers LaboPol-1 [51]



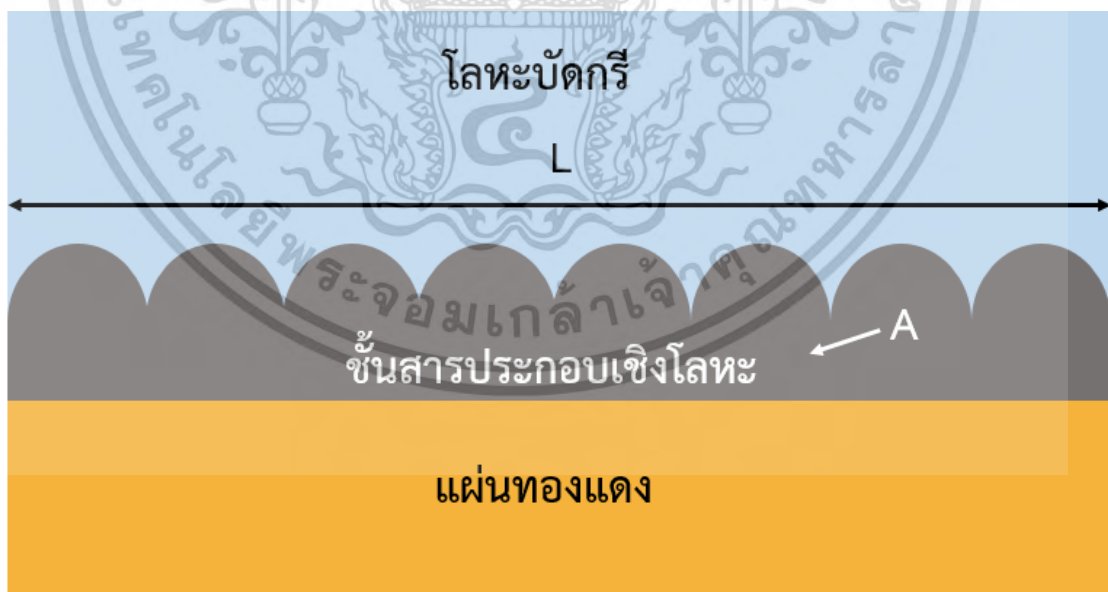
รูป 3.19 ชิ้นงานหลังการขัดผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL JSM-6510 LV [52]

หลังจากตรวจสอบรอยบัดกรีของชิ้นงานแต่ละส่วนผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานจะถูกนำไปวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ซึ่งความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (h) จะถูกคำนวณจากสมการที่ 3.5 โดย A คือ พื้นที่เฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และ L คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในกรณีที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีมากกว่า 1 ชั้น จะทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแยกกัน ซึ่งตัวแปรต่างๆแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

$$h = \frac{A}{L} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 อุณหภูมิหลอมเหลว

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ TiO₂ และ อนุภาค In ที่มีต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC305 ในรูปแบบของ อุณหภูมิโซลิดัส อุณหภูมิลิกวิดัส และช่วงหลอมเหลว ซึ่งอุณหภูมิโซลิดัสเป็นอุณหภูมิที่โลหะบัดกรีเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว อุณหภูมิลิกวิดัสเป็นอุณหภูมิที่โลหะบัดกรีเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมด และช่วงหลอมเหลวเป็นช่วงอุณหภูมิตั้งแต่โลหะบัดกรีเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จนกระทั่งโลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นของเหลวทั้งหมด โดยอนุภาคนาโน หรืออนุภาคที่เติมลงในโลหะบัดกรีไม่ควรทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้น [19] ดังนั้นโลหะบัดกรีที่มีคุณสมบัติการบัดกรีที่ดีควรมีอุณหภูมิโซลิดัสและอุณหภูมิลิกวิดัสต่ำ เช่นเดียวกับช่วงหลอมเหลวที่ควรมีช่วงแคบ

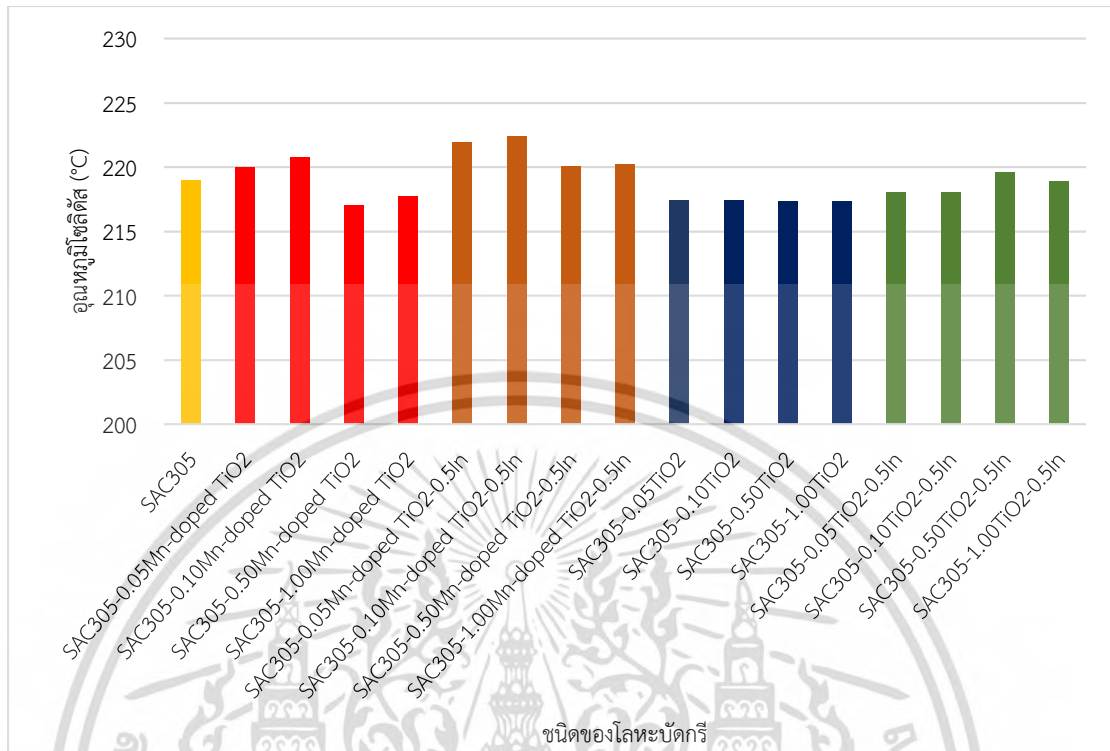
จากผล DSC ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดสามารถแสดงค่าอุณหภูมิโซลิดัส อุณหภูมิลิกวิดัส และช่วงหลอมเหลว ได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผล DSC ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

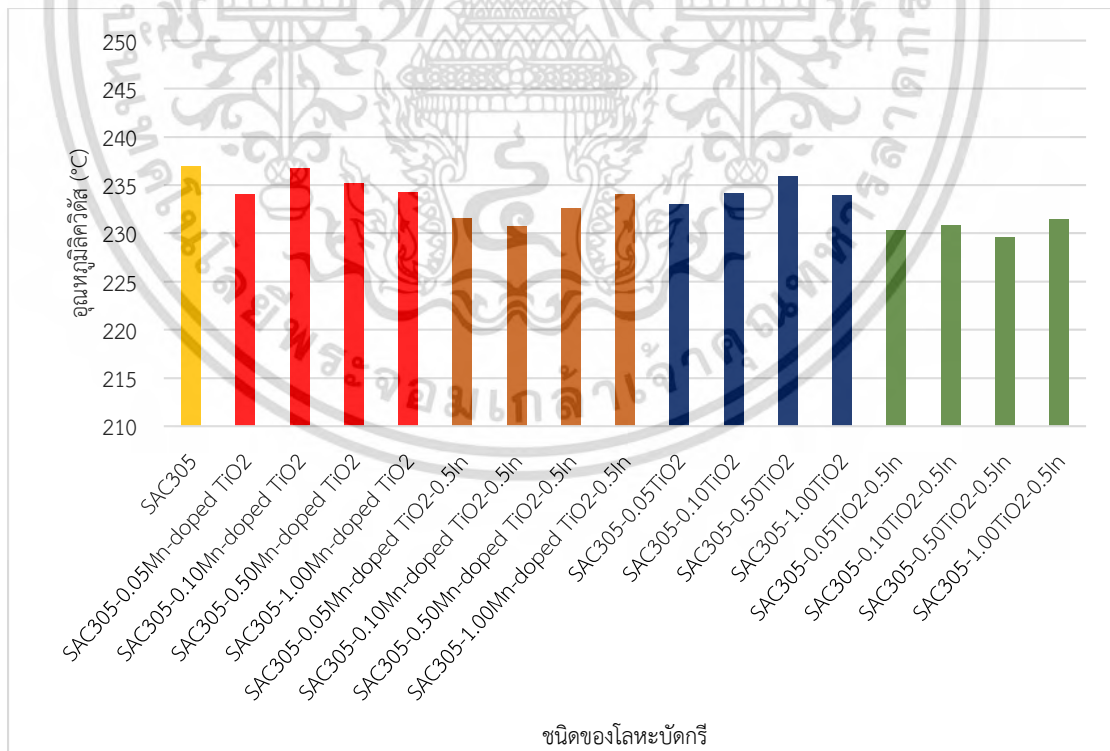
โลหะบัดกรี	อุณหภูมิโซลิดัส (°C)	อุณหภูมิลิกวิดัส (°C)	ช่วงหลอมเหลว (°C)
SAC305	219.0	237.0	18.0
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	220.0	234.0	14.0
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	220.8	236.7	15.9
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	217.0	235.2	18.2
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	217.7	234.3	16.6
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	221.9	231.5	9.60
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	222.4	230.7	8.30
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	220.1	232.6	12.5
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	220.2	234.0	13.8
SAC305-0.05TiO ₂	217.4	233.0	15.6
SAC305-0.10TiO ₂	217.4	234.1	16.7
SAC305-0.50TiO ₂	217.3	235.9	18.6
SAC305-1.00TiO ₂	217.3	233.9	16.6
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	218.0	230.3	12.3
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	218.0	230.8	12.8
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	219.6	229.6	10.0
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	218.9	231.4	12.5

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

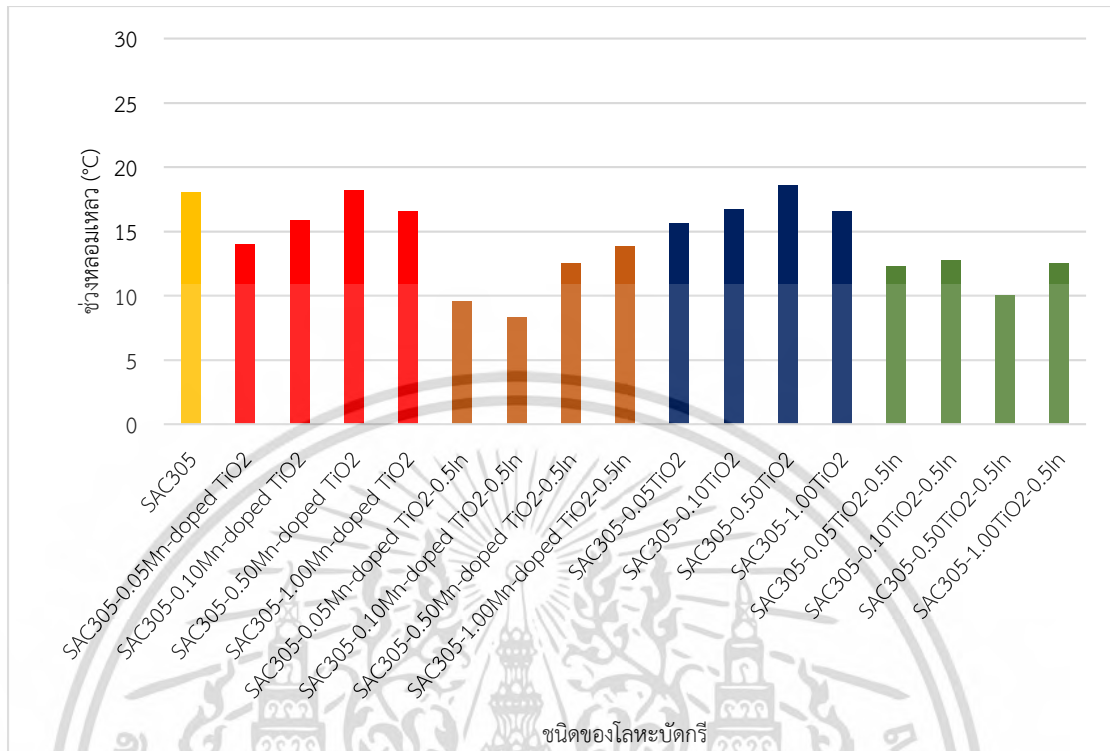


รูปที่ 4.1 อุณหภูมิไซลิต์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิซิลิไซด์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีแต่ละสูตรมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ในปริมาณที่มากกว่า 0.1 wt% จะทำอุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีพื้นฐาน (219 °C) มีค่าลดลง และพบว่าการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ในอัตราส่วน 0.05-1 wt% สามารถช่วยลดอุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีได้ ซึ่งอุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีที่เติม TiO_2 ในแต่ละอัตราส่วนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วง 217.3-217.4 °C นอกจากนี้ในรูปที่ 4.2 ยังพบว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 หรือ TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีทำให้อุณหภูมิลิควิดัสของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง โดยผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsao และคณะ [53] ที่พบว่าการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในโลหะบัดกรี Sn-Cu สามารถลดอุณหภูมิโซลิดัส และลิควิดัสได้ ซึ่ง Tsao ได้อธิบายการลดลงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวว่ามีสาเหตุมาจากอนุภาคนาโนที่มีพลังงานพื้นผิวอิสระค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีจะทำให้พื้นผิวของโลหะบัดกรีเกิดความไม่เสถียร และส่งผลให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวได้ง่ายขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมอนุภาค In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 หรือ TiO_2 จะทำให้อุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีที่เติมเฉพาะอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 หรือ TiO_2 อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมอนุภาค In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 หรือ TiO_2 สามารถช่วยลดอุณหภูมิลิควิดัสได้ดีกว่ากรณีที่เติมเฉพาะอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 หรือ TiO_2 โดยในงานวิจัยของ El-Daly และคณะ [54-55] ที่ศึกษาอิทธิพลของ Zn ต่อคุณสมบัติการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-1.0Ag-0.3Cu ได้พบว่าการเติม Zn ส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิวิกฤตมีค่าลดลง ซึ่ง El-Daly และคณะได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโซลิตัส และอุณหภูมิวิกฤตว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของโลหะบัดกรี และการเปลี่ยนแปลงความเสถียรของพื้นที่ผิว ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการเติม In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของโลหะบัดกรีเปลี่ยนแปลงไป และเพิ่มความไม่เสถียรให้กับพื้นที่ผิวของอนุภาคโลหะบัดกรี ทำให้อุณหภูมิโซลิตัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติม In มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิวิกฤตมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.3 พบว่าช่วงหลอมเหลวจะแคบลงอย่างชัดเจนเมื่อเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ และจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า In สามารถช่วยลดช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบได้เป็นอย่างดี โดยงานวิจัยของณดี มีเสถียร [56] ที่ศึกษาอิทธิพลของ In และอนุภาคนาโน ZnO ต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริสตัล SAC0307-xIn-yZnO พบว่าการเติม In ร่วมกับอนุภาคนาโน ZnO ทำให้ช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC0307-yZnO แคบลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้

4.2 ความสามารถในการเปียก

โลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการเปียกที่ดีควรมีค่าการกระจายตัวบนแผ่นทองแดงสูง โดยค่าตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัวจะต้องมีค่ามาก ขณะที่มุมเปียกระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดงจะต้องมีค่าน้อย

จากผลการทดลองนำมาคำนวณเพื่อหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัวและ มุมเปียก ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.2-4.4 และรูปที่ 4.4-4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	ตัวประกอบการกระจายตัว (%)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	86.37	86.75	87.68	86.94	0.67
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	88.80	90.24	88.99	89.34	0.77
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	91.96	91.82	91.45	91.75	0.26
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	88.23	88.89	88.58	88.57	0.33
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	89.24	88.59	89.52	89.12	0.47
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	90.80	89.77	90.31	90.30	0.51
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	91.42	90.94	90.68	91.01	0.37
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	91.74	90.98	91.77	91.50	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	ตัวประกอบการกระจายตัว (%)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	90.90	91.40	91.26	91.19	0.25
SAC305-0.05TiO ₂	90.85	90.60	90.23	90.56	0.31
SAC305-0.10TiO ₂	91.72	91.87	91.88	91.82	0.09
SAC305-0.50TiO ₂	92.08	91.66	91.75	91.83	0.21
SAC305-1.00TiO ₂	90.02	88.76	89.17	89.32	0.64
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	91.05	90.89	90.58	90.84	0.23
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	92.92	92.37	92.81	92.70	0.29
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	91.48	91.31	91.72	91.50	0.20
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	90.25	88.13	91.73	90.03	1.80

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	อัตราส่วนการกระจายตัว			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	1.01	0.97	0.97	0.98	0.02
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	1.03	1.08	1.07	1.06	0.02
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	1.36	1.31	1.28	1.32	0.03
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	0.98	1.02	1.02	1.01	0.02
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	1.09	0.99	1.05	1.04	0.04
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	1.14	1.07	1.03	1.08	0.05
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	1.23	1.21	1.18	1.21	0.02
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	1.29	1.19	1.30	1.26	0.06
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	1.13	1.11	1.15	1.13	0.01
SAC305-0.05TiO ₂	1.23	1.13	1.21	1.19	0.05
SAC305-0.10TiO ₂	1.28	1.33	1.21	1.27	0.06
SAC305-0.50TiO ₂	1.26	1.26	1.25	1.26	0.08
SAC305-1.00TiO ₂	1.09	0.99	1.10	1.06	0.06
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	1.28	1.16	1.16	1.20	0.07
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	1.43	1.41	1.38	1.41	0.02
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	1.25	1.28	1.28	1.27	0.01
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	1.25	1.15	1.16	1.19	0.05

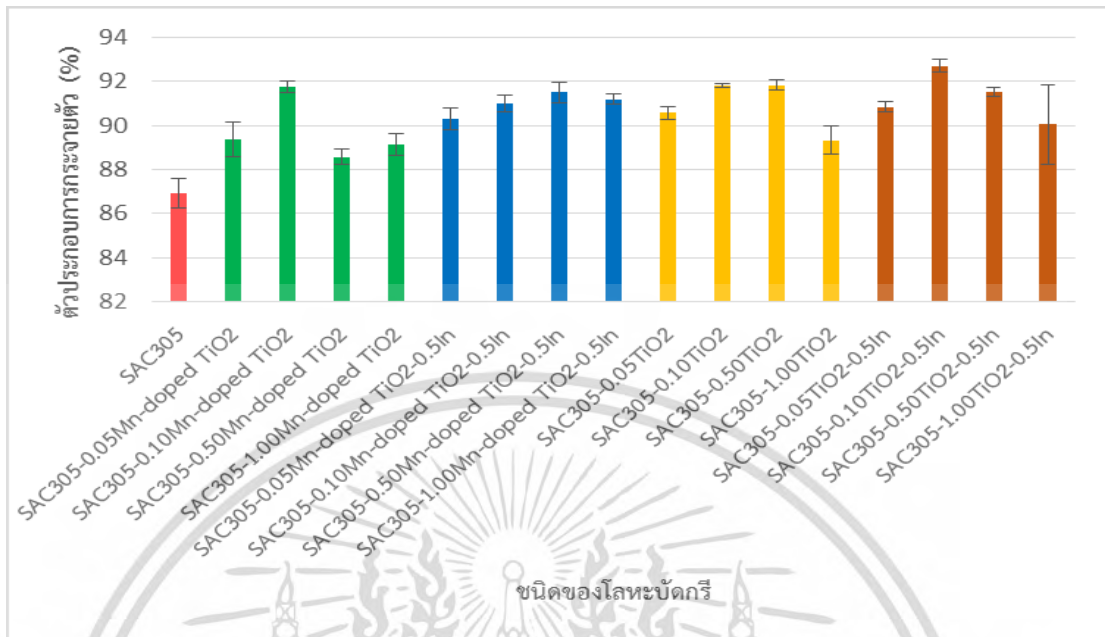
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

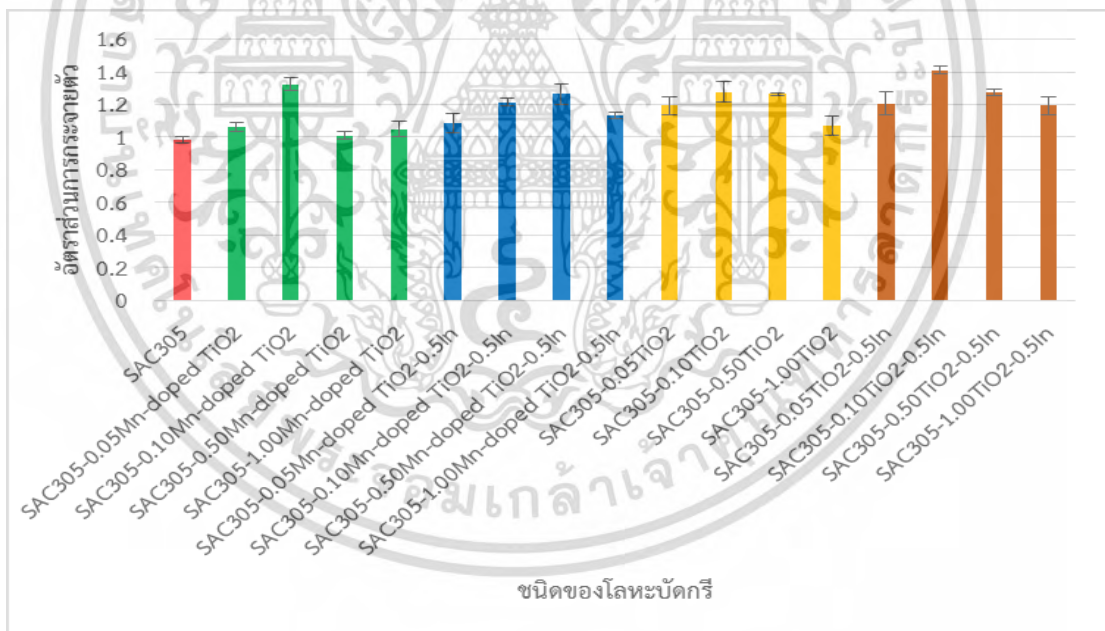
ตารางที่ 4.4 มุมเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	มุมเปียก (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	15.23	14.83	13.83	14.63	0.72
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	12.62	11.04	12.41	12.02	0.85
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	9.12	9.28	9.69	9.36	0.29
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	12.13	12.84	11.82	12.27	0.52
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	13.24	12.51	12.85	12.87	0.36
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	10.42	11.55	10.95	10.97	0.56
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	9.73	10.26	10.55	10.18	0.41
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	9.37	10.22	9.33	9.64	0.50
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	10.30	9.75	9.91	9.99	0.28
SAC305-0.05TiO ₂	10.36	10.64	11.04	10.68	0.34
SAC305-0.10TiO ₂	9.40	9.23	9.21	9.28	0.10
SAC305-0.50TiO ₂	9.00	9.46	9.35	9.27	0.24
SAC305-1.00TiO ₂	11.28	12.66	12.21	12.05	0.70
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	10.14	10.31	10.66	10.37	0.26
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	8.05	8.67	8.17	8.30	0.32
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	9.66	9.85	9.40	9.64	0.22
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	11.02	13.35	9.39	11.25	1.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

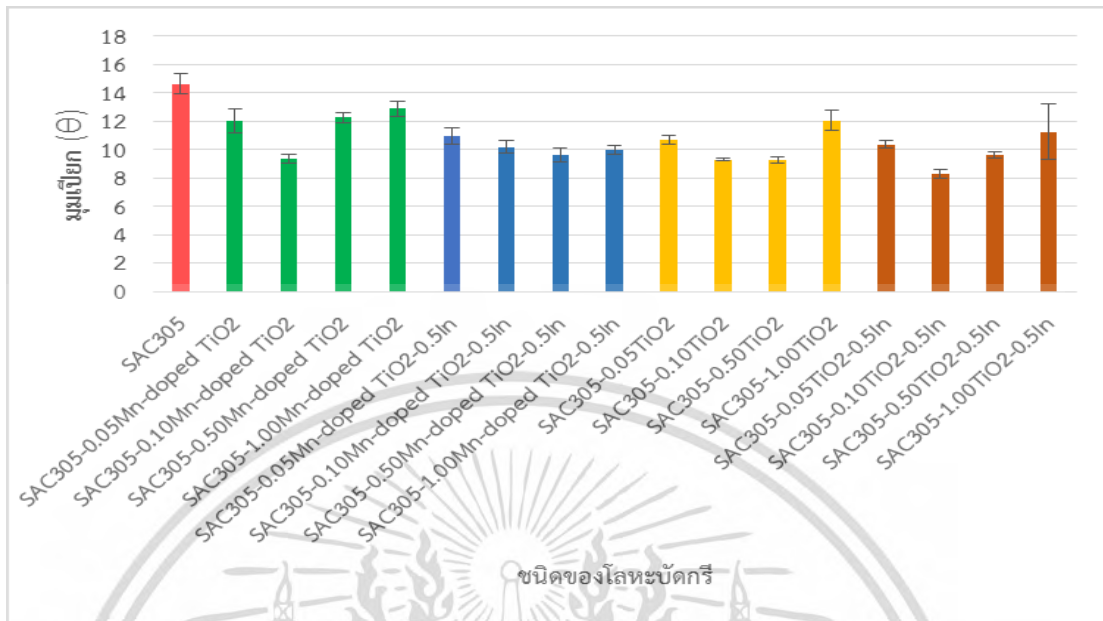


รูปที่ 4.4 ตัวประกอบกิจกรรมการกระจายตัวโลหะบัดกรีแต่ละชนิด



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนการกระจายตัวโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



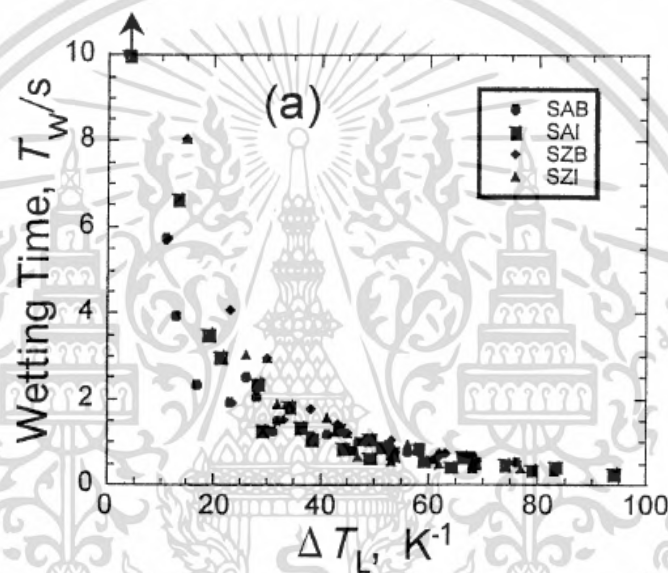
รูปที่ 4.6 มุมเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4-4.6 แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และมุมเปียกมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงใช้ผลการคำนวณมุมเปียกดังรูปที่ 4.6 เป็นตัวแทนในการอธิบายผลการทดลอง จากการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ลงในโลหะบัดกรี SAC305 พบว่าทำให้มุมเปียกมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ในอัตราส่วน 0.1 wt% โดยมุมเปียกลดลง 5 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน และจากการเติม TiO₂ ลงในโลหะบัดกรีพบว่ามุมเปียกจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกับกรณีที่เติม Mn-doped TiO₂ ซึ่งมุมเปียกจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเติม TiO₂ ในอัตราส่วน 0.1 wt% โดยมุมเปียกลดลง 4 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน จะเห็นได้ว่าความสามารถในการเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าลดลง โดยในงานวิจัยของ Chen และคณะ [57] ได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าเกิดจากอนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีจะมีแนวโน้มการสะสมตัวอยู่ที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างฟลักซ์และโลหะบัดกรีที่หลอมเหลวขณะการบัดกรี ทำให้พลังงานพื้นผิวสัมผัส (Interfacial surface energy) มีค่าลดลง และนำไปสู่การลดลงของแรงตึงผิวระหว่างฟลักซ์ อนุภาคนาโน และโลหะบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีที่ก่อตัวมีมุมเปียกที่เล็กลง อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะพบว่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีค่าลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของโลหะบัดกรีขณะหลอมเหลว จึงส่งผลให้ความสามารถในการเปียกมีค่าลดลง

จากการเติม In ลงในโลหะบัดกรีร่วมกับการเติม Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ พบว่าการเติม In สามารถช่วยลดมุมเปียกของโลหะบัดกรีเชิงประกอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยในงานวิจัยของ Takemoto และ Miyazaki [58] ที่ศึกษาผลกระทบของค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีกับอุณหภูมิควิตัส (ΔT_L) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วต่อเวลาการเปียก (Wetting time) จากผลการทดลองของ Takemoto และ Miyazaki ในรูปที่ 4.7 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อ ΔT_L มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ เวลาการเปียกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเวลาการเปียกนั้นแปรผกผันกับแรงการเปียก (Wetting force) ดังนั้นถ้า ΔT_L มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเปียกดีขึ้น และเมื่อพิจารณา อุณหภูมิควิตัสของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะพบว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติม In มีอุณหภูมิควิตัสที่ต่ำกว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ไม่เติม In ดังนั้นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เติม In จึงมีค่า ΔT_L สูงกว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ไม่ได้เติม In ซึ่งทำให้โลหะบัดกรีที่เติม In มีความสามารถในการเปียกที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของ ΔT_L กับ เวลาการเปียก [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

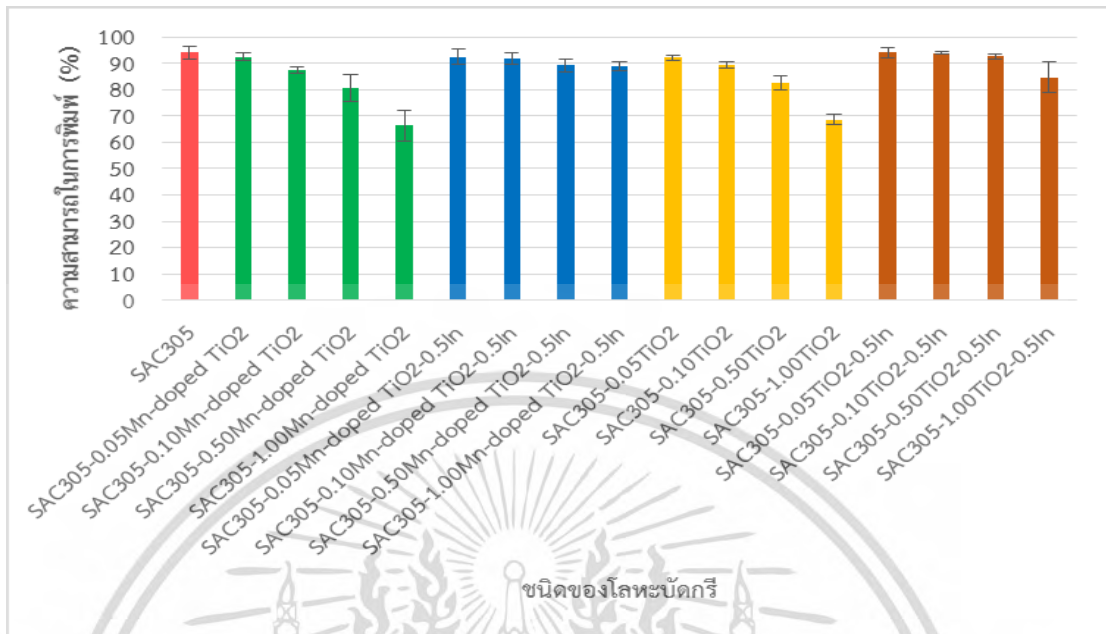
4.3 ความสามารถในการพิมพ์

จากการคำนวณความสามารถในการพิมพ์ ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.5 และแสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	ความสามารถในการพิมพ์ (%)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	91.73	93.95	96.5	94.06	2.39
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	91.27	92.26	94.01	92.51	1.38
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	86.07	88.64	87.65	87.45	1.29
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	80.83	85.72	75.23	80.59	5.25
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	69.16	59.60	70.21	66.32	5.84
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	89.63	95.70	92.31	92.55	3.03
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	92.55	89.46	93.77	91.93	2.22
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	91.15	86.60	90.33	89.36	2.42
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	89.98	86.83	89.40	88.74	1.67
SAC305-0.05TiO ₂	91.27	93.07	92.37	92.24	0.91
SAC305-0.10TiO ₂	88.23	90.68	89.28	89.40	1.22
SAC305-0.50TiO ₂	79.95	83.16	84.97	82.69	2.54
SAC305-1.00TiO ₂	70.79	66.77	68.23	68.60	2.03
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	92.55	96.11	93.48	94.05	1.84
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	94.12	93.36	94.41	93.97	0.54
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	92.66	93.77	91.50	92.65	1.13
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	87.42	88.76	78.14	84.77	5.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากการศึกษาวิจัยของ Amalu และคณะ [59] ที่ศึกษาคุณสมบัติรีโอโลยี (Rheology) ของโลหะบัดกรีแบบครีม และความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติรีโอโลยีของโลหะบัดกรีแบบครีมกับความสามารถในการพิมพ์พบว่า ความหนืดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรีแบบครีมที่มีผลต่อกระบวนการพิมพ์ ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ในโลหะบัดกรีมีมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง โดยในงานวิจัยของ Liu และคณะ [60] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน SAC ในโลหะบัดกรี Sn-Bi พบว่าเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีมากขึ้น และทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ในปริมาณมากจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง

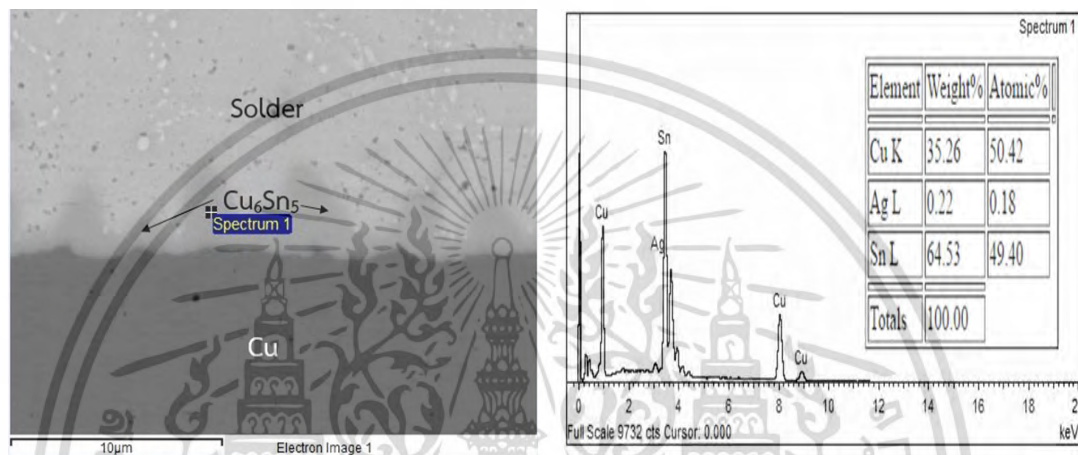
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเติมอนุภาค In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเฉพาะ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ลงในโลหะบัดกรี จะเห็นได้ว่าอนุภาค In สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนได้เป็นอย่างดี ซึ่งในงานวิจัยของ Wardzinski และคณะ [61] ที่ได้ศึกษาศักยภาพของ In ในการนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) แทนที่ Pb โดยพบว่า In เป็นธาตุที่มีความสามารถในการหล่อลื่นที่ดีและมีคุณสมบัติต่างๆ ในการเคลือบตลับลูกปืนที่ขัดเทียบกับการเคลือบด้วย Pb ดังนั้นเมื่อเติม In ลงไปในโลหะบัดกรีจึงทำให้สามารถพิมพ์เนื้อของโลหะบัดกรีลงบนแผ่นรองทองแดงได้ง่ายโดยอาศัยแรงอัดในการพิมพ์เพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

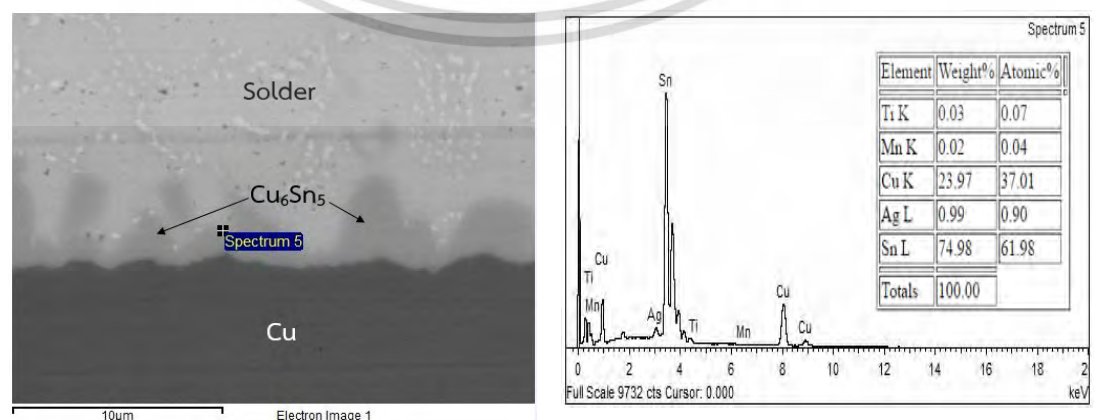
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังจากบัดกรีพบว่า มีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดงเพียงชั้นเดียว ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย EDX พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในรูปที่ 4.9



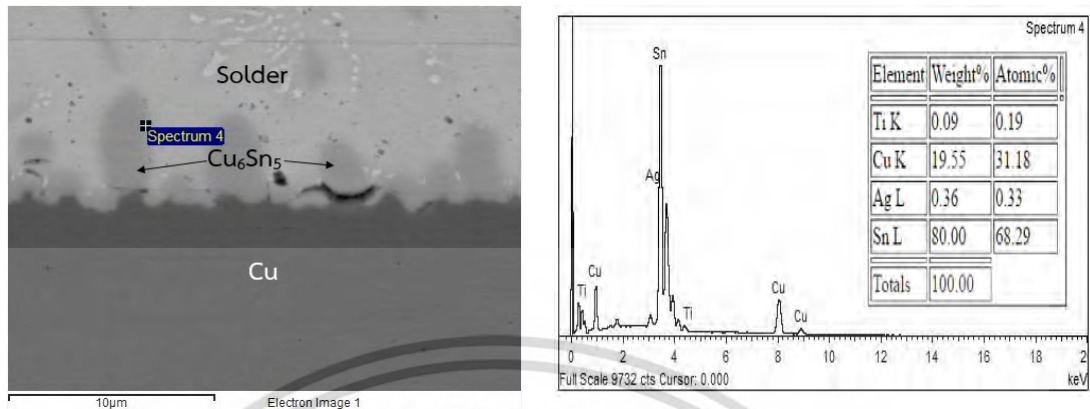
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1

จากรูปชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังการบัดกรีพบว่า มีรูปร่างลักษณะคล้ายเปลือกหอยกาบ และจากการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรีทุกชนิดพบว่า โลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 จะสามารถตรวจพบธาตุ Mn และ Ti ได้ในบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เช่นเดียวกับโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ที่จะสามารถตรวจพบธาตุ Ti ได้ในบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในรูปที่ 4.11



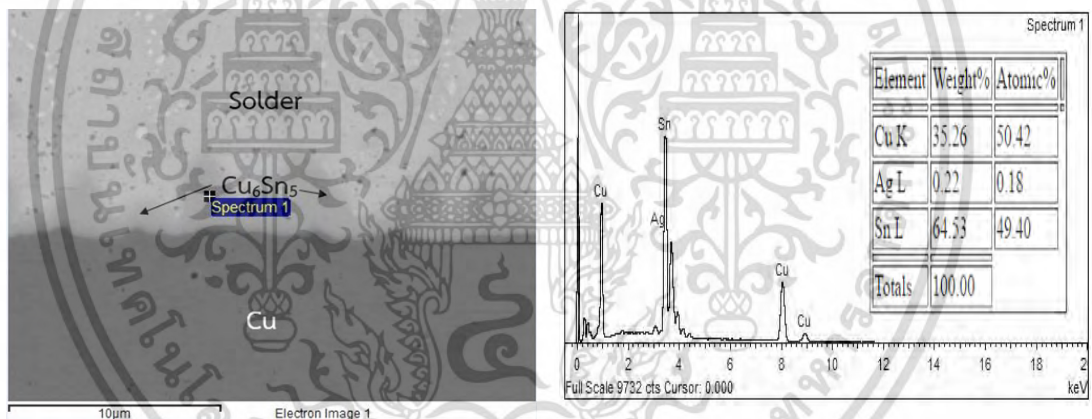
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

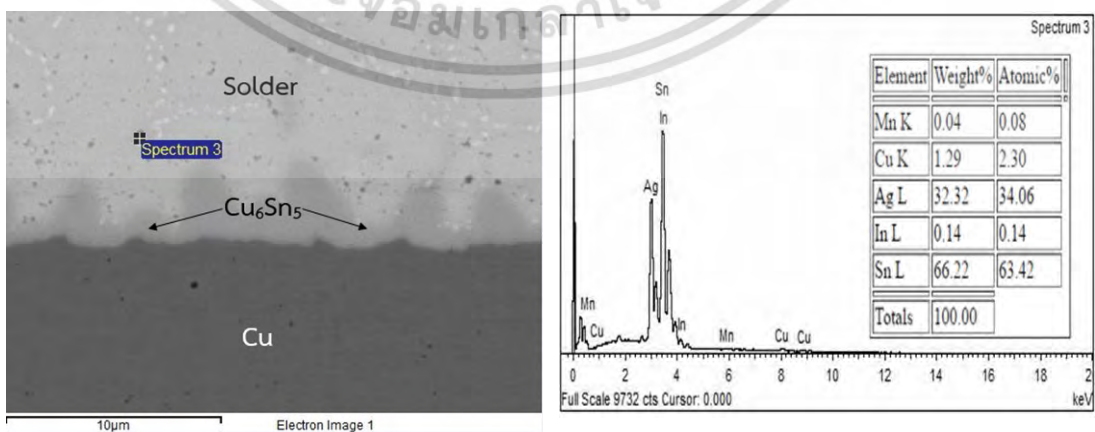


รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 4

อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ผสม In จะไม่สามารถตรวจพบธาตุ In ได้ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แต่จะสามารถตรวจพบธาตุ In ได้ในพื้นที่ยูเทกติก (Eutectic area) ดังแสดงในรูปที่ 4.13



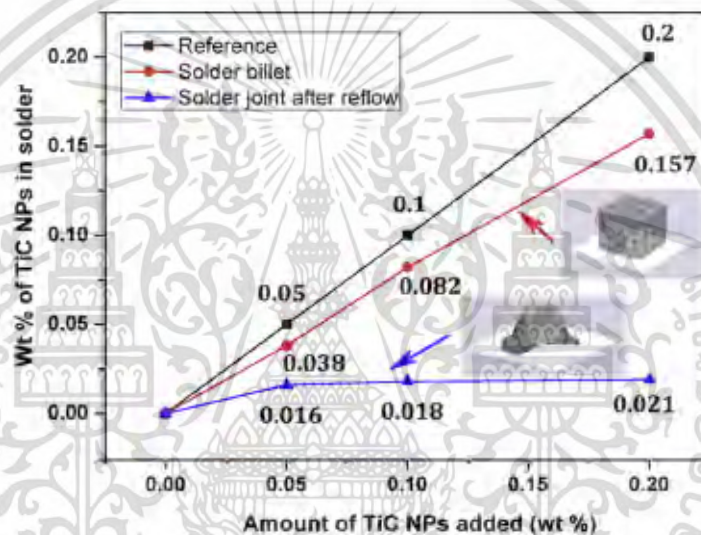
รูปที่ 4.12 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1



รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าอัตราส่วนของอนุภาคนาโนที่ตรวจพบในโลหะบัดกรีมีปริมาณที่น้อยกว่าอัตราส่วนจริงของอนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรี โดยในงานวิจัยของ Chen และคณะ [62] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน TiC ต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu พบว่าเมื่อเติม TiC ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.2 wt% ลงในโลหะบัดกรีจะเหลือปริมาณของ TiC ในโลหะบัดกรีหลังการบัดกรีเพียง 0.016, 0.018 และ 0.019 wt% ตามลำดับ จากการทดลองของ Chen และคณะ แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีจะถูกขับออกจากโลหะบัดกรีมาพร้อมกับฟลักซ์ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรี และจะเหลืออนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีเพียงประมาณ 10-30 wt% ของปริมาณที่เติมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.14



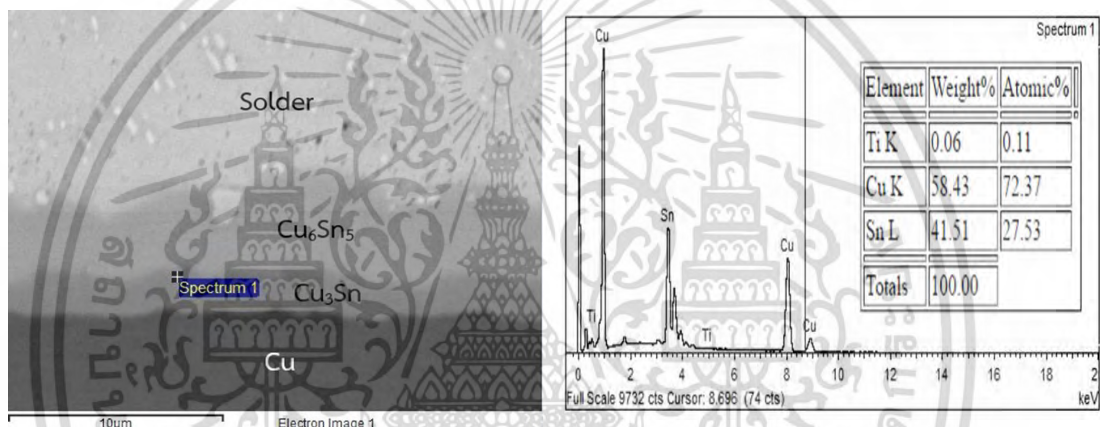
รูปที่ 4.14 ปริมาณของอนุภาคนาโน TiC ในโลหะบัดกรี [62]

ซึ่งในงานวิจัยของ Chen และคณะ [63] ได้อธิบายสาเหตุของการแยกตัวของอนุภาคนาโนว่า อนุภาคนาโนจะเกิดการเปียกบนโลหะบัดกรี (Sn-based) ในขณะหลอมเหลวได้ยาก เนื่องจากพลังงานพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคนาโนและโลหะบัดกรีในขณะหลอมเหลวมีค่าสูง จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีถูกแยกตัวออกจากโลหะบัดกรีในขณะหลอมเหลว ทั้งนี้ การแยกตัวของอนุภาคนาโนเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการบัดกรีเนื่องจากทำให้ไม่สามารถทราบปริมาณที่แท้จริงของอนุภาคนาโนที่เหลืออยู่ในโลหะบัดกรีและรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในรอยบัดกรี ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้มีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจผลกระทบของปริมาณอนุภาคนาโนที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี

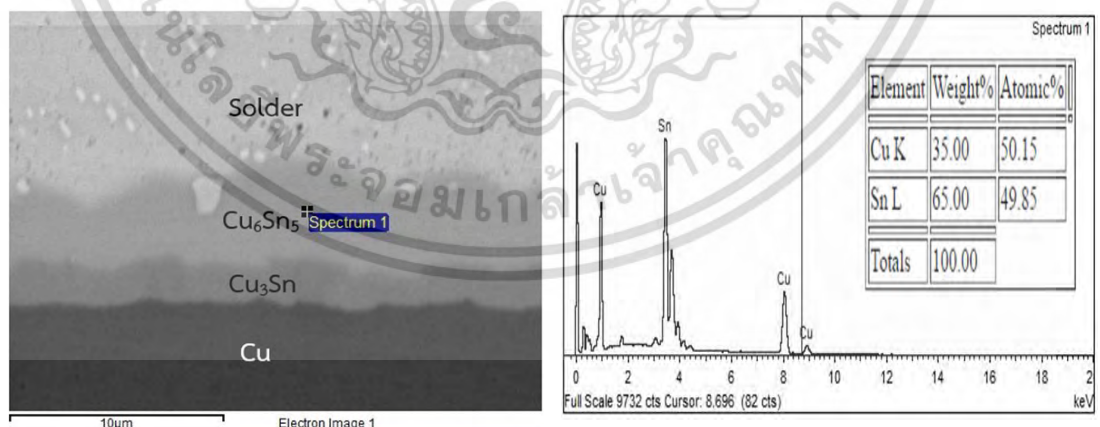
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อน

เพื่อศึกษารอยบัดกรีในระยะยาว การบ่มด้วยความร้อนจึงถูกใช้เพื่อจำลองสถานการณ์เสมือนว่าชิ้นงานได้ถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ ซึ่งตามข้อแนะนำของ NIST สหรัฐอเมริกา [18] ได้ระบุอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับโลหะบัดกรี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่ม SAC เพื่อใช้ในการบ่มด้วยความร้อน ได้แก่ 135, 170 และ 205 °C แต่อุณหภูมิที่ใช้จะต้องไม่เกินอุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีที่จะนำมาทดสอบ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ชิ้นงานในแต่ละสูตรจะถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นระยะเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง หลังจากการตรวจสอบพบว่าชิ้นที่ถูบบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง จะมีเฟสเกิดขึ้นระหว่างแผ่นทองแดง และเนื้อโลหะบัดกรี 2 เฟส ได้แก่ เฟสสี่เหลี่ยม และเฟสสี่เหลี่ยม ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า เฟสสี่เหลี่ยมที่อยู่ติดกับแผ่นทองแดงคือ เฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และเฟสสี่เหลี่ยมที่อยู่ติดกับเนื้อโลหะบัดกรีคือ เฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด Spectrum 1



รูปที่ 4.16 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด Spectrum 1

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งหลังการบัดกรีและหลังการบ่มด้วยความร้อนจะพบว่าเฟสแรกที่เกิดขึ้นหลังจากการบัดกรีคือเฟสของ Cu_6Sn_5 และหลังจากการบ่มชิ้นงานด้วยความร้อนจะเกิดเฟสที่สองขึ้นคือเฟสของ Cu_3Sn ซึ่งในงานวิจัยของ Singh เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคณะ [64] ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้จากสมการการเปลี่ยนแปลง Gibb's free energy ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4.1)$$

โดย ΔG คือ การเปลี่ยนแปลง Gibb's free energy, ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี, ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี และ T คือ อุณหภูมิของระบบ ซึ่งชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cu และ Sn ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3



โดยปฏิกิริยาที่มีค่า ΔG น้อยจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาที่มีค่า ΔG มาก ซึ่งค่า ΔG ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (-9.87 KJ/mol) มีค่าน้อยกว่า ΔG ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (-18.21 KJ/mol) จึงส่งผลให้อะตอมของ Cu และ Sn ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ขึ้นมาก่อน

นอกจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันแล้ว ยังมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติทางกลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ทั้ง 2 ชนิด แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn [65]

คุณสมบัติทางกล	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn
Fracture toughness ($\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$)	2.80	5.27
Young's modulus (GPa)	85.56	108.3
Poisson's ratio	0.309	0.299
Vickers hardness (kg/mm^2)	378	343
Thermal conductivity ($\text{watt}/\text{cm}^\text{K}$)	0.341	0.704
Electrical conductivity ($1/\Omega\text{cm}$)	0.57×10^5	1.12×10^5
Thermal expansion coefficient ($1/^\circ\text{C}$)	16.3×10^{-6}	19.0×10^{-6}
Density (g/cc)	8.28	8.90

จากตารางที่ 4.6 พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn มีความสามารถในการต้านทานความเสียหาย (Fracture toughness) มากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 อย่างไรก็ตามความเสียหายที่เกิดขึ้นมักเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณระหว่างพื้นผิวชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 และโลหะบัดกรี เนื่องจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น มีลักษณะรูปร่างไม่ราบเรียบจึงเกิดความเค้นตกค้างที่พื้นผิวสัมผัสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ อีกทั้งความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient) ระหว่างแผ่นทองแดงและโลหะบัดกรีจะส่งผลให้เกิดความเค้น

เนื่องจากความร้อนในช่วงการเย็นตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีอีกด้วย การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงการเย็นตัวทำให้เกิดความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวสัมผัสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรี ซึ่งความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นนี้ อาจทำให้เกิดการแตกร้าวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีได้ ทั้งนี้การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ อาจเกิดจากการแตกร้าวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีเอง หรือเกิดจากการแตกร้าวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีที่เกิดจากการแตกร้าวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีเอง

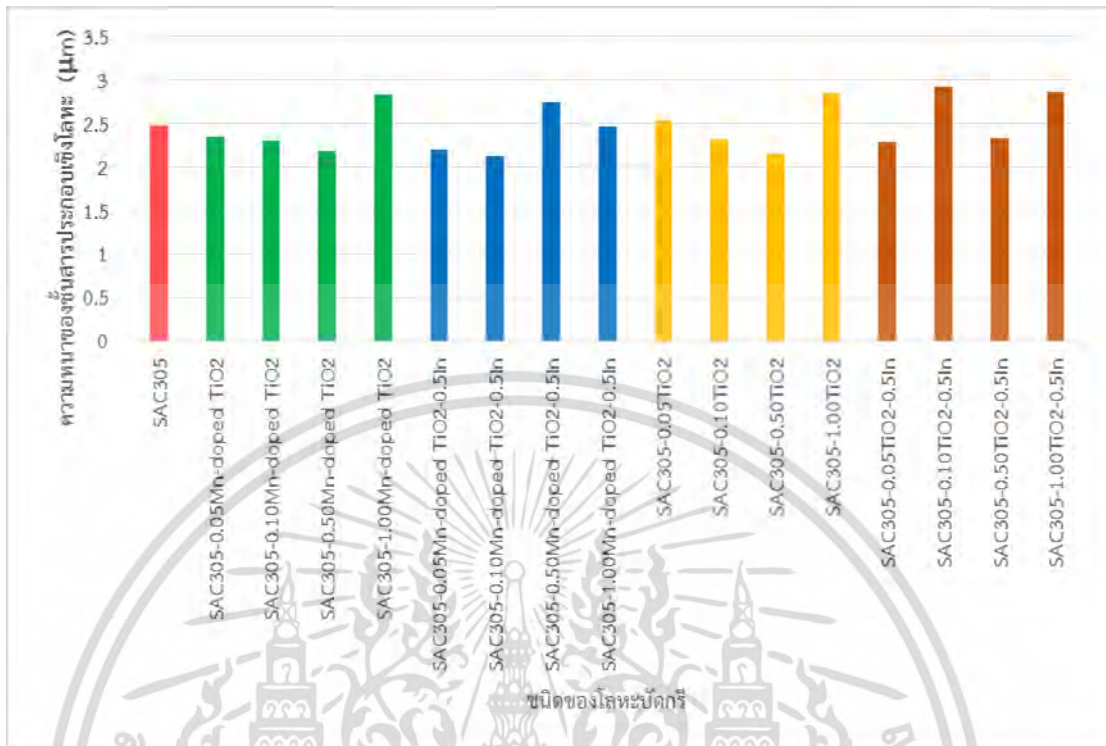
โลหะบัดกรี ด้วยเหตุนี้พื้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะและโลหะบัดกรีจึงเป็นพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายก่อนเมื่อมีแรงมากระทำ [66]

นอกจากนี้ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อความทนแรงดึง (Tensile strength) ของรอยบัดกรี โดยหากความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความทนแรงดึงของรอยบัดกรีมีค่าลดลง [67] ดังนั้นโลหะบัดกรีที่มีคุณสมบัติในการบัดกรีที่ดีควรมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีขนาดเล็กเพื่อลดโอกาสในการเกิดความเสียหายในชิ้นงานเมื่อมีแรงมากระทำ

4.5 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

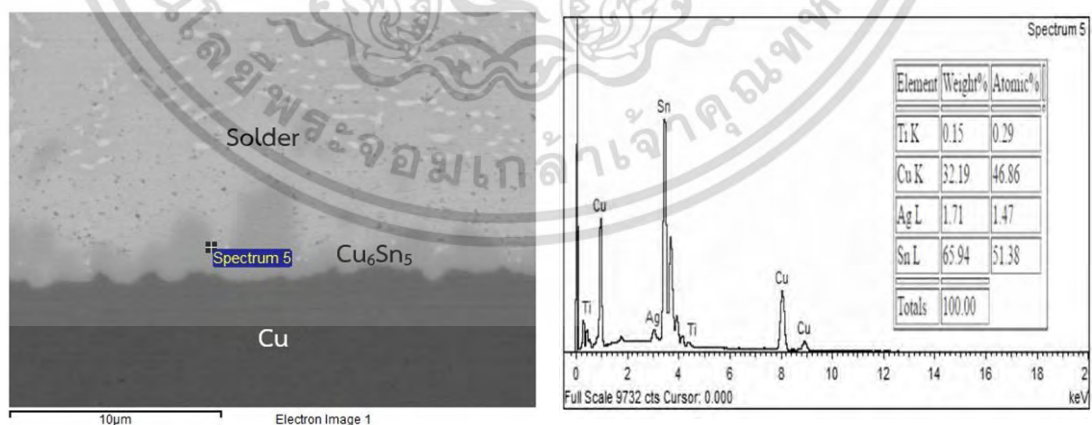
4.5.1 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี

จากการวัดขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในปริมาณไม่เกิน 0.5 wt% ให้ความหนาของชั้นสารประกอบมีขนาดลดลง ซึ่งขนาดของชั้นสารประกอบจะลดลงสูงสุดเมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.5 wt% โดยขนาดของชั้นสารประกอบจะลดลง 11% เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในปริมาณไม่เกิน 0.5 wt% สามารถช่วยยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ในปริมาณที่มากขึ้นพบว่า ความหนาของชั้นสารประกอบจะมีขนาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมอนุภาคนาโน TiO₂ มีผลต่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในลักษณะเช่นเดียวกันกับการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ลงในโลหะบัดกรี ซึ่งในงานวิจัยของ Li และคณะ [68] ที่ศึกษาผลกระทบของ TiO₂ ต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีได้อธิบายไว้ว่า การเติมอนุภาคนาโนในปริมาณเล็กน้อยสามารถช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้เนื่องจากอนุภาคนาโนที่อยู่บริเวณระหว่างแผ่นทองแดงกับเนื้อโลหะบัดกรีในระหว่างบัดกรีจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอม Cu และ Sn ให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ มีขนาดที่ลดลง อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากจะส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากจะทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคนาโน [69] ในบริเวณเนื้อโลหะบัดกรีทำให้เหลืออนุภาคนาโนในบริเวณระหว่างแผ่นทองแดงกับเนื้อโลหะบัดกรีน้อยลงส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ มีขนาดที่เพิ่มขึ้น



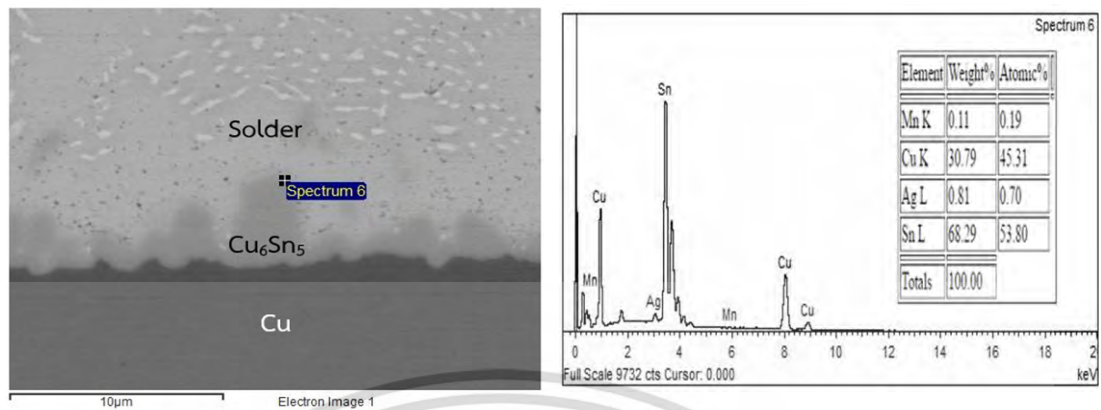
รูปที่ 4.17 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากการตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.5 wt% ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า มีธาตุ Ti และ Mn กระจายตัวอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเนื้อโลหะบัดกรี



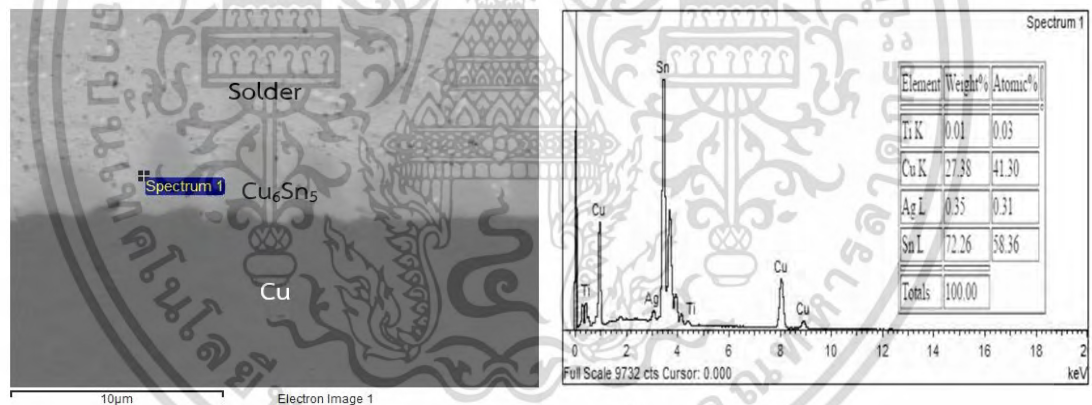
รูปที่ 4.18 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

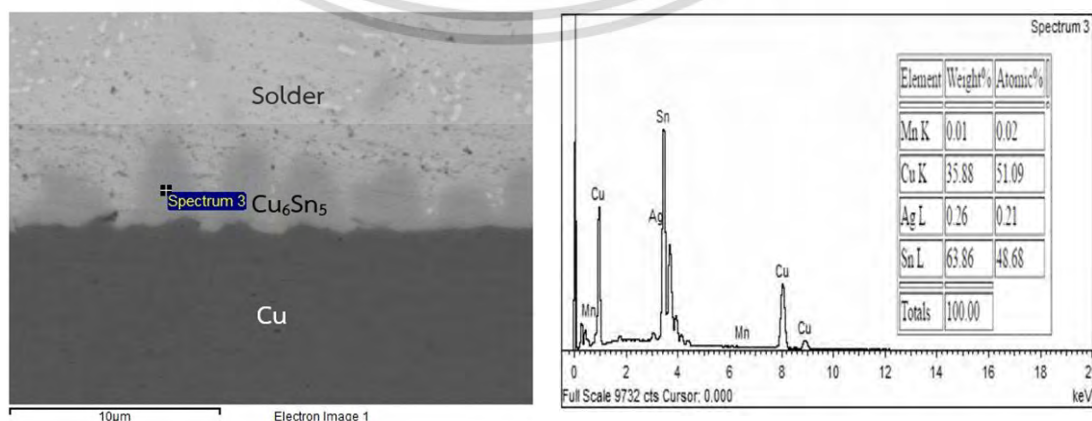


รูปที่ 4.19 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 6

แต่เมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 1.0 wt% ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่า ปริมาณธาตุ Ti และ Mn มีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.5 wt% โดยพบว่า ปริมาณธาตุ Ti หรือ Mn ในโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ในปริมาณมาก (≥ 0.5 wt%) จะสามารถตรวจพบได้ง่ายกว่าในเนื้อโลหะบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 4.22

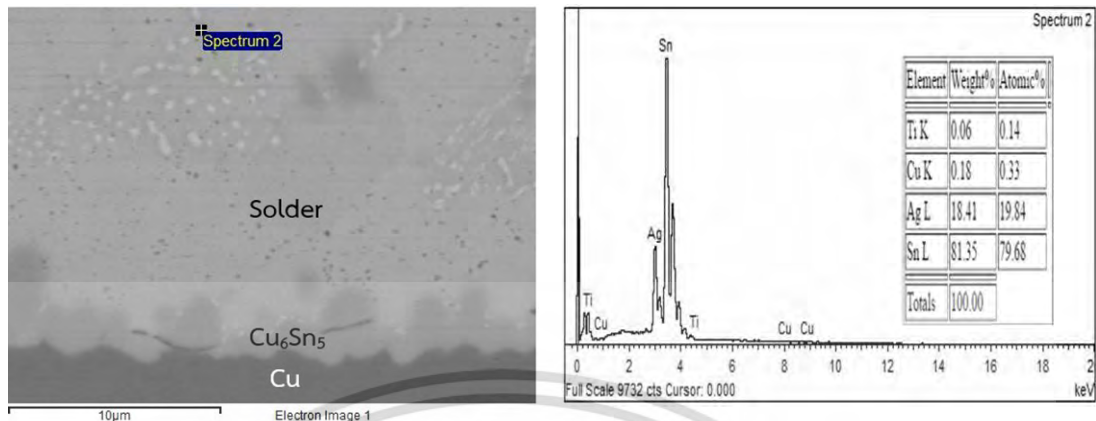


รูปที่ 4.20 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1



รูปที่ 4.21 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3

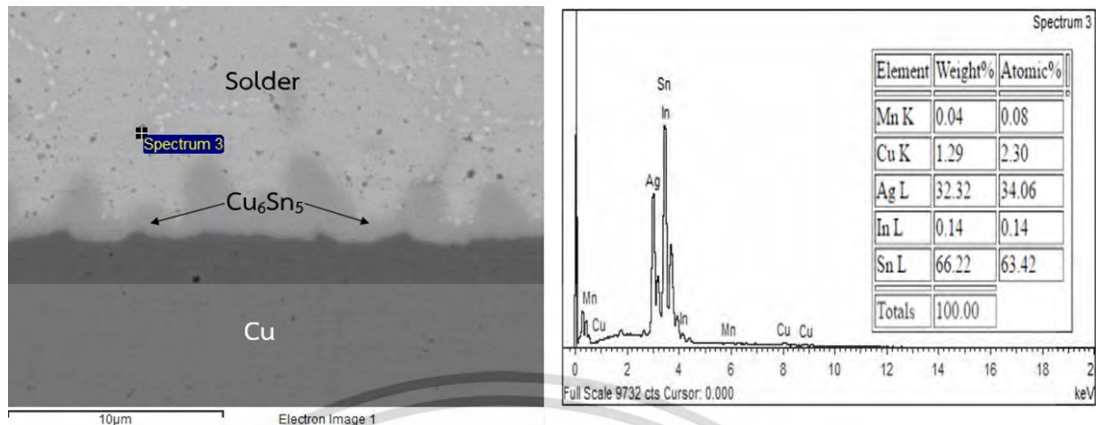
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นข้อบกพร่องในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 2

จากผลการทดลองขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ การตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรี และงานวิจัยของ Li และคณะ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า อนุภาคนาโนที่เติมลงในโลหะบัดกรีสามารถช่วยยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ แต่หากเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ปริมาณธาตุ Ti และ Mn ในบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีปริมาณที่น้อยลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคนาโนในบริเวณเนื้อโลหะบัดกรีทำให้เหลืออนุภาคนาโนในบริเวณระหว่างแผ่นทองแดงกับเนื้อโลหะบัดกรีน้อยลงส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีมีขนาดเพิ่มขึ้น

กรณีการเติม In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ พบว่าการเติม In ไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ ที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรี โดยเมื่อทำการตรวจสอบปริมาณธาตุของโลหะบัดกรีที่ผสม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ไม่พบว่ามีธาตุ In อยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ แต่จะสามารถพบธาตุ In ได้บริเวณพื้นที่ยูเทกติก ดังแสดงในรูปที่ 4.23 จากการตรวจสอบข้อมูลของธาตุ In และ Sn [70-71] พบว่า In มีขนาดอะตอมและค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีคือ 156 pm และ 1.78 Pauling scale ตามลำดับ ซึ่งแม้จะใกล้เคียงกับ Sn ที่มีขนาดอะตอมและค่าอิเล็กโตรเนกาทิวิตีคือ 145 pm และ 1.96 Pauling scale ตามลำดับ แต่จากการทดสอบไม่พบการแทนที่ของอะตอมในวิธานิพนธ์นี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Sharif และ Chan [72] พบการแทนที่ของอะตอม In ในชั้นสารประกอบ Cu₆Sn₅ เมื่อเติม In ในปริมาณมาก (9 wt.%) จึงเป็นไปได้ว่าปริมาณ In (0.5 wt.%) ที่ใช้ในวิธานิพนธ์นี้มีปริมาณที่น้อยเกินไปที่จะสามารถเกิดการแทนที่ในชั้นสารประกอบ Cu₆Sn₅ ดังนั้นการเติม In จึงไม่ส่งผลต่อการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี



รูปที่ 4.23 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3

4.5.2 ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบ่มด้วยความร้อน

เพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 , TiO_2 และ In ต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในระยะยาว ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นระยะเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง จะถูกวัดและแสดงผล ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C

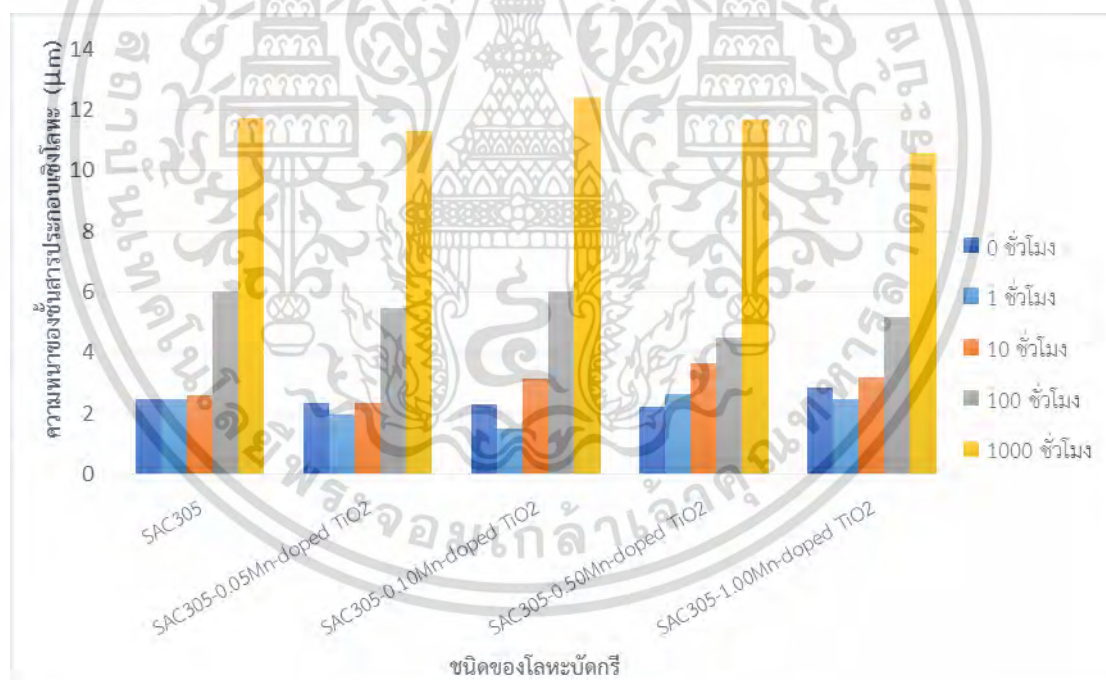
โลหะบัดกรี	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) (μm)				
	เวลา (hr)				
	0	1	10	100	1000
SAC305	2.48	2.45	2.60	6.01	11.74
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2	2.34	1.95	2.35	5.45	11.30
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2	2.30	1.50	3.14	6.03	12.4
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2	2.19	2.65	3.66	4.48	11.67
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2	2.83	2.45	3.20	5.18	10.56
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.20	2.54	3.67	4.69	10.18
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.12	2.8	3.12	3.97	12.81
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.75	1.98	2.52	4.17	12.65
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.47	1.86	2.35	5.29	11.47
SAC305-0.05 TiO_2	2.54	2.14	2.88	4.41	11.69
SAC305-0.10 TiO_2	2.31	2.29	3.17	4.58	12.58
SAC305-0.50 TiO_2	2.15	1.8	2.62	4.39	10.95
SAC305-1.00 TiO_2	2.84	2.61	3.25	5.07	11.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7(ต่อ) ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C

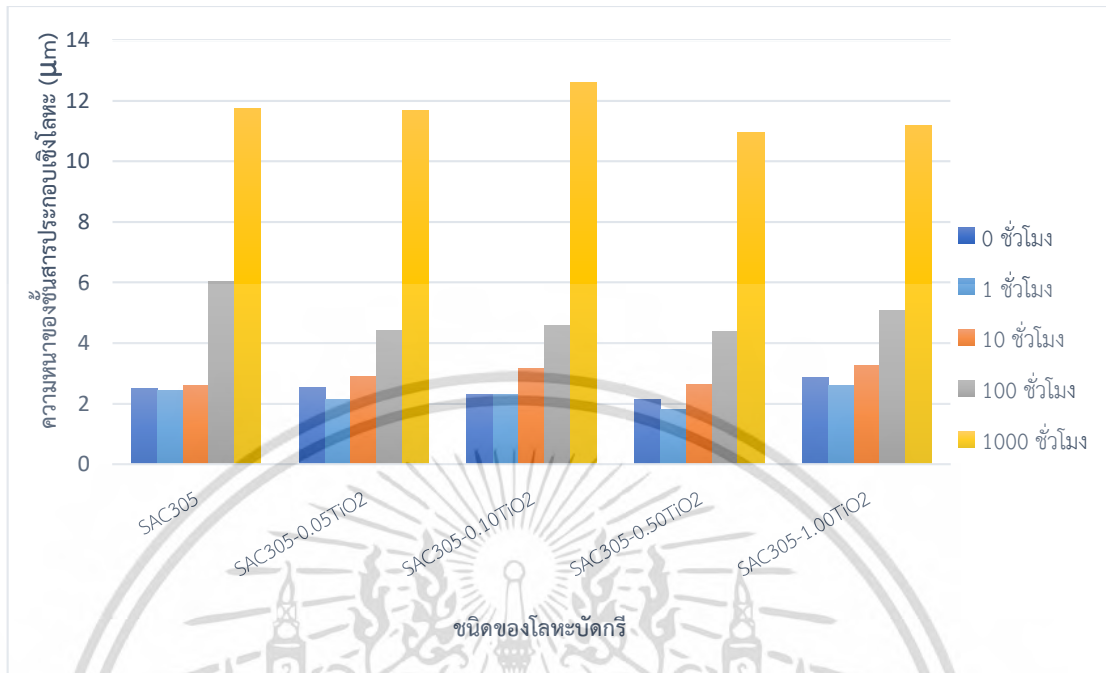
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) (μm)					
โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
	0	1	10	100	1000
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	2.28	2.94	3.59	5.9	10.81
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	2.92	2.8	2.32	5.27	11.72
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	2.33	2.26	3.42	5.77	8.86
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	2.85	1.98	3.12	4.56	11.79

จากตารางที่ 4.7 พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมแบ่งตามชนิดของโลหะบัดกรีสามารถนำมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟแท่งดังรูปที่ 4.24-4.29



รูปที่ 4.24 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ TiO_2 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน และสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเมื่อขึ้นงานผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมจะมีขนาดลดลงมากที่สุดเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณ 1 wt%

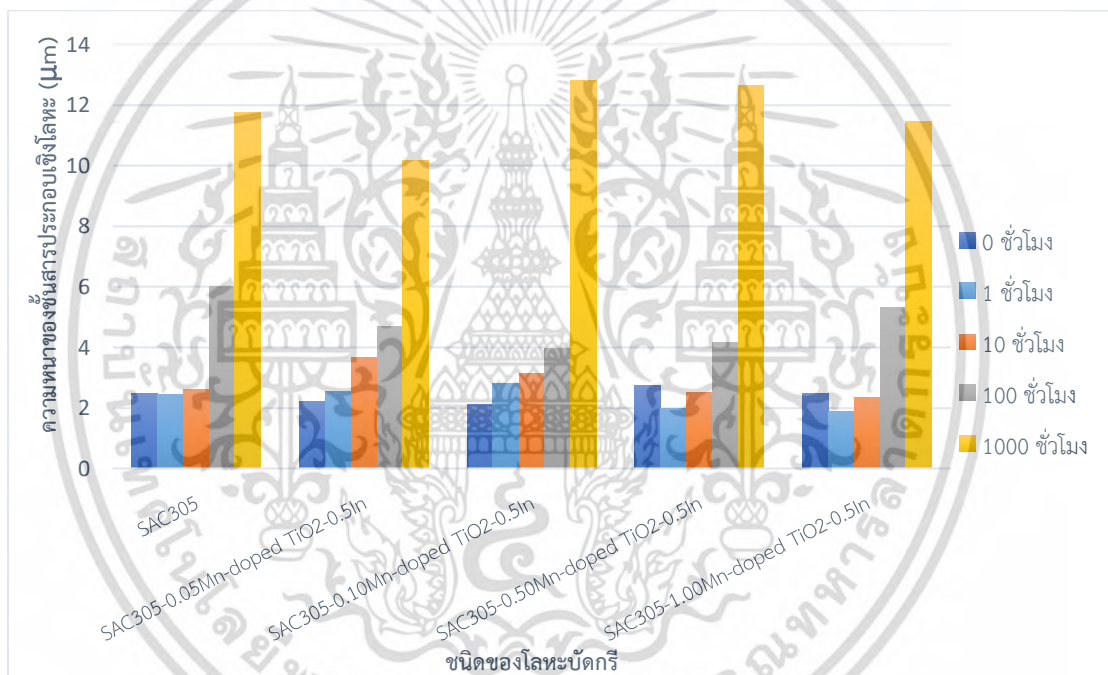
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.5.1 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ TiO_2 ในปริมาณมาก แต่เมื่อขึ้นงานถูกบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง กลับพบว่าโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากจะมีขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่เล็กกว่าโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย ซึ่งเป็นไปได้ว่าระหว่างการบ่มด้วยความร้อนอนุภาคนาโนที่อยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จะช่วยเพิ่ม Nucleation site ในการเกิด Cu_6Sn_5 ให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่เพิ่มขึ้น [73] โดยจากการตรวจสอบปริมาณธาตุในข้างต้นจะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุของอนุภาคนาโนในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 จะมีปริมาณมากเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย และจะมีปริมาณน้อยเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมาก โลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากจึงมีขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่น้อยกว่าโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย

ผลกระทบของปริมาณอนุภาคนาโนที่ปรากฏบนชั้นสารประกอบเชิงโลหะในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ หลังการบัดกรี และหลังการบ่มด้วยความร้อน โดยหลังการบัดกรีพบว่า ชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนปรากฏในปริมาณมากจะมีขนาดที่เล็กกว่าชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนปรากฏในปริมาณน้อย เนื่องจากอนุภาคนาโนที่กระจายตัวอยู่บริเวณแผ่นทองแดงขณะบัดกรีจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอม Cu และ Sn ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีขนาดที่ลดลง [68] ดังนั้นในกรณีนี้ ชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอยู่ในปริมาณมากจึงดีกว่าชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอยู่ในปริมาณน้อย ขณะที่กรณีการบ่มด้วยความร้อนพบว่า ชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนปรากฏในปริมาณน้อยจะมีขนาดที่เล็กกว่าชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนปรากฏในปริมาณมาก เนื่องจากในระหว่างการบ่มด้วยความร้อนอนุภาคนาโนที่อยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จะช่วยเพิ่ม Nucleation site ในการเกิด Cu_6Sn_5 ให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่เพิ่มขึ้น [73] ดังนั้นในกรณีนี้ ชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอยู่ในปริมาณน้อยจึงดีกว่าชั้นสารประกอบที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอยู่ในปริมาณมาก

นอกจากปริมาณของอนุภาคนาโนที่ปรากฏอยู่บนชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบแล้ว ยังส่งผลถึงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยบัดกรีด้วย ซึ่งในงานวิจัยของ Tu และคณะ [74] ได้กล่าวไว้ว่า ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการบัดกรีจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานความล้าของรอยบัดกรี โดยพบว่าเมื่อขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหาย (Cycle to failure) ลดลง ดังนั้นในกรณีหลังการบัดกรี รอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณมากจะมีความสามารถในการต้านทานความล้าที่ดีกว่ารอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณน้อย ขณะที่กรณีหลังการบ่มด้วยความร้อน รอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณมากจะมีความสามารถในการต้านทานความล้าที่ต่ำกว่ารอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณน้อย ทั้งนี้ ในกรณีนี้ที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของแต่ละชิ้นงานมีขนาดเท่ากัน แต่ปริมาณอนุภาคนาโนที่ปรากฏบนชั้นสารประกอบมีไม่เท่ากัน รอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนปรากฏอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณมากจะมีความสามารถในการต้านทานความล้าที่ต่ำกว่ารอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนปรากฏอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณน้อย เนื่องจากเมื่ออนุภาคนาโนอยู่รวมกันเป็นปริมาณมาก อนุภาคนาโนจะเกิดการรวมตัวกันเพื่อลดพลังงานพื้นผิวสัมผัส ทำให้อนุภาคนาโนปรากฏบนชั้นสารประกอบในลักษณะเป็นกลุ่ม ซึ่งการรวมตัวของอนุภาคนาโนอาจเป็นผลทำให้จุดเริ่มต้นของรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ที่เกิดจากคุณสมบัติความแข็งและเปราะของอนุภาคนาโน ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับความเสียหายรอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนปรากฏอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณมากจะสามารถทนทานต่อความเสียหายได้น้อยกว่ารอยบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนปรากฏอยู่ในชั้นสารประกอบในปริมาณน้อย [75]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

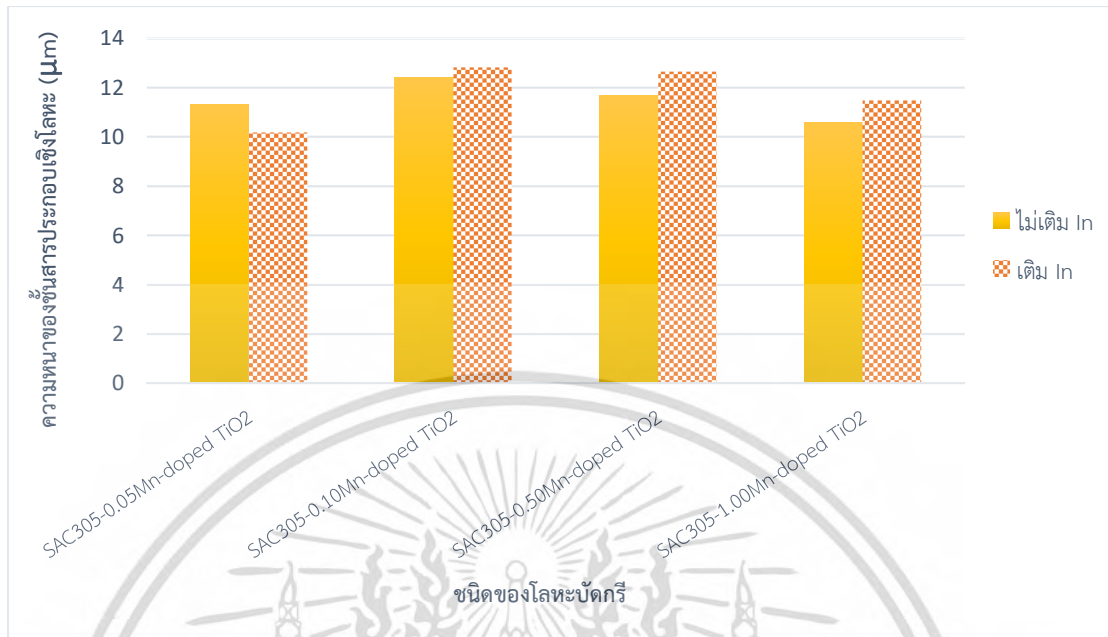
นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคนาโนในเนื้อโลหะบัดกรียังส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลด้วย โดยในงานวิจัยของ El-Daly และคณะ [76] ที่ศึกษาอิทธิพลของของอนุภาคนาโนต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีพบว่า ความสามารถในการต้านทานความเค้นของโลหะบัดกรีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย เนื่องจากอนุภาคนาโนที่กระจายตัวอยู่ภายใน β -Sn จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้ความสามารถในการต้านทานความเค้นของโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากพบว่าความสามารถในการต้านทานความเค้นของโลหะบัดกรีมีค่าต่ำกว่าการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อย ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากปริมาณโพรง (Cavity) ในเนื้อโลหะบัดกรีที่เพิ่มขึ้นจากการเติมอนุภาคนาโน ซึ่งโพรงดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้น (Stress) มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความเค้นของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง [43]



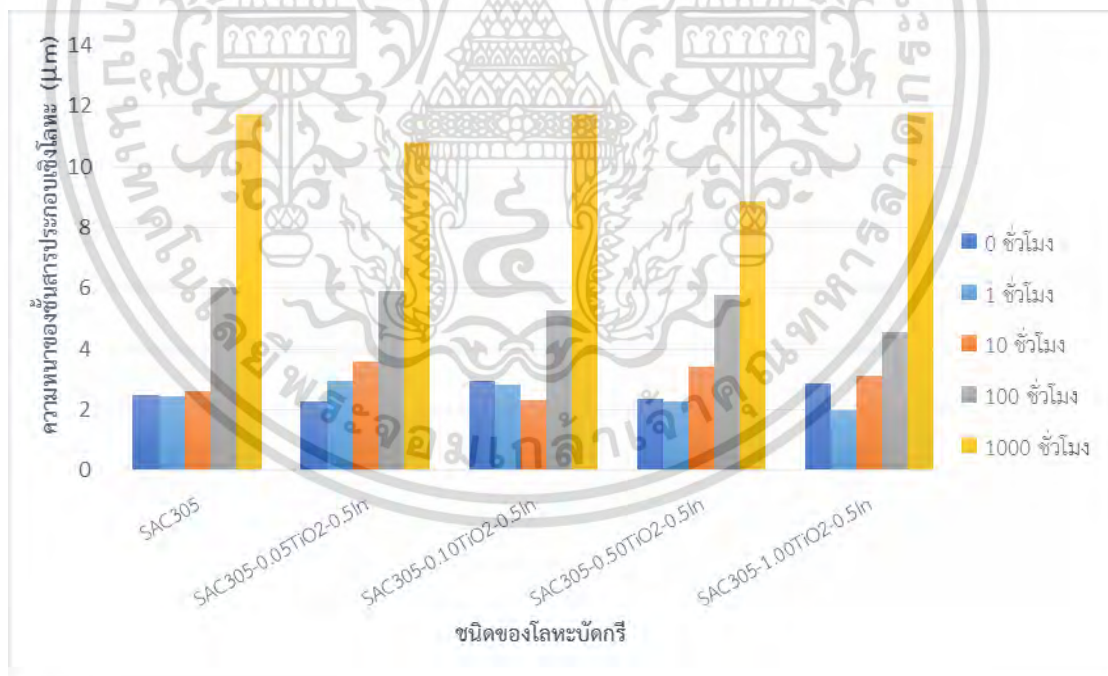
รูปที่ 4.26 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In

จากรูปที่ 4.26 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเมื่อขึ้นงานผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In กับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่เติมเฉพาะอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ดังรูปที่ 4.27 พบว่า ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมของทั้ง 2 กรณี มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณธาตุในหัวข้อที่ 4.5.1 พบว่าไม่มี In อยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังนั้นการเติม In จึงไม่ส่งผลต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมหลังบ่มด้วยความร้อน 1000 ชั่วโมงของชิ้นงานที่เติม Mn-doped TiO₂ ร่วมกับ In และชิ้นงานที่เติมเฉพาะ Mn-doped TiO₂



รูปที่ 4.28 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu₆Sn₅+Cu₃Sn) หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂ และ In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ร่วมกับ In จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเมื่อขึ้นงานผ่านการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ In กับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมที่เติมเฉพาะอนุภาคนาโน TiO_2 ดังรูปที่ 4.29 พบว่าความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมของทั้ง 2 กรณี มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น In ที่เติมลงในโลหะบัดกรีจึงไม่มีผลต่อชั้นสารประกอบ เช่นเดียวกรณีการเติม In ลงในโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2



รูปที่ 4.29 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมหลังบ่มด้วยความร้อน 1000 ชั่วโมงของขึ้นงานที่เติม TiO_2 ร่วมกับ In และขึ้นงานที่เติมเฉพาะ TiO_2

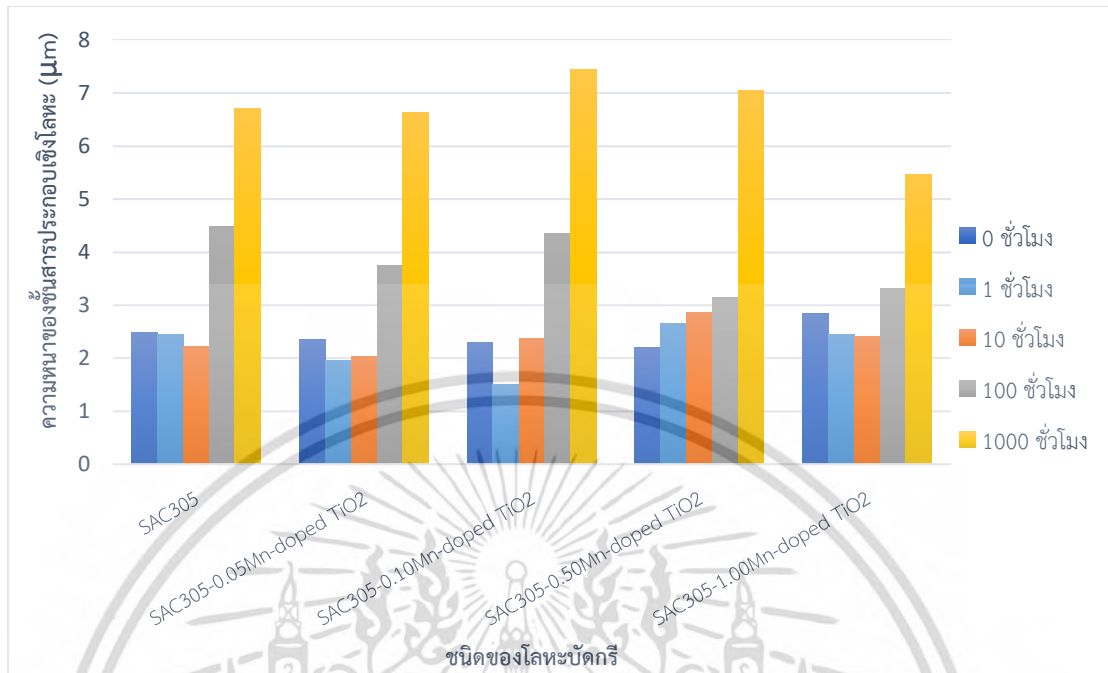
ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นระยะเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง จะถูกวัดและแสดงผลดังตารางที่ 4.8 และความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 หลังการบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 4.30-4.33 โดยจะพบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการบ่มด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกับแนวโน้มของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ดังนั้น อนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In จึงมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 เช่นเดียวกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม

เอกสารนี้ เช่นเดียวกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

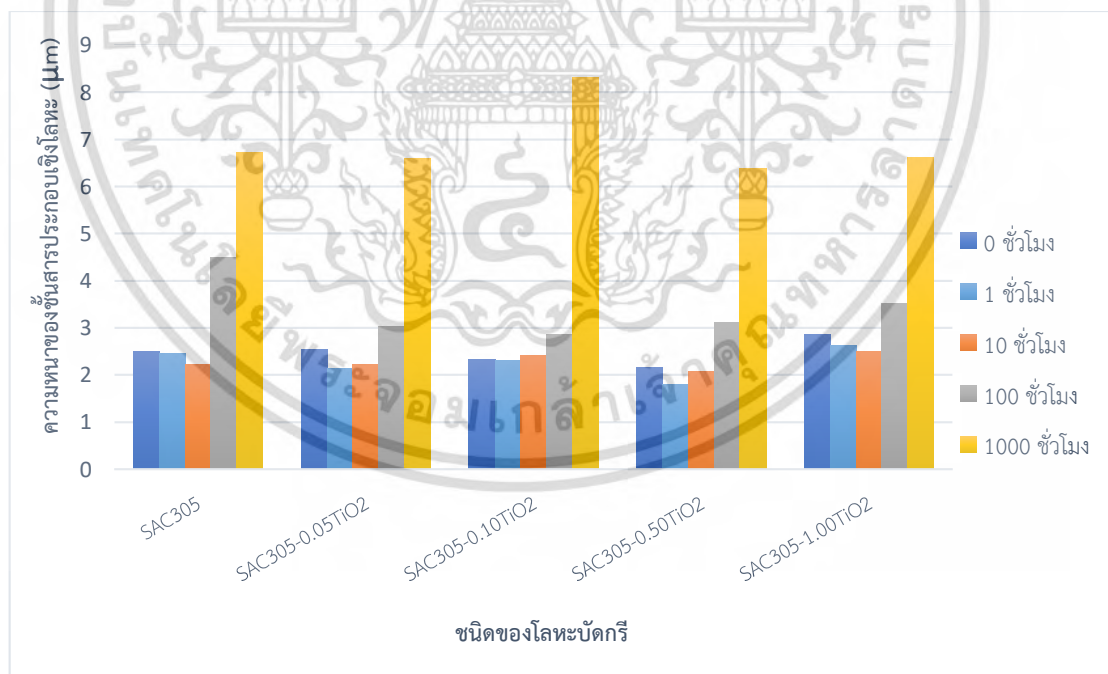
ตารางที่ 4.8 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่อุณหภูมิ 170°C

ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 (μm)					
โลหะบัดกรี	เวลา (hr)				
	0	1	10	100	1000
SAC305	2.48	2.45	2.21	4.49	6.71
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2	2.34	1.95	2.03	3.75	6.62
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2	2.30	1.50	2.37	4.34	7.44
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2	2.19	2.65	2.87	3.15	7.05
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2	2.83	2.45	2.40	3.32	5.47
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.20	2.54	2.89	3.38	6.54
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.12	2.8	2.38	2.66	7.17
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.75	1.98	2.08	3.08	8.01
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2 -0.5In	2.47	1.86	1.84	3.78	7.49
SAC305-0.05 TiO_2	2.54	2.14	2.22	3.01	6.59
SAC305-0.10 TiO_2	2.31	2.29	2.41	2.85	8.31
SAC305-0.50 TiO_2	2.15	1.8	2.07	3.11	6.37
SAC305-1.00 TiO_2	2.84	2.61	2.49	3.52	6.60
SAC305-0.05 TiO_2 -0.5In	2.28	2.94	2.80	4.32	6.50
SAC305-0.10 TiO_2 -0.5In	2.92	2.8	2.00	3.64	7.61
SAC305-0.50 TiO_2 -0.5In	2.33	2.26	2.65	3.84	5.49
SAC305-1.00 TiO_2 -0.5In	2.85	1.98	2.36	3.06	7.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

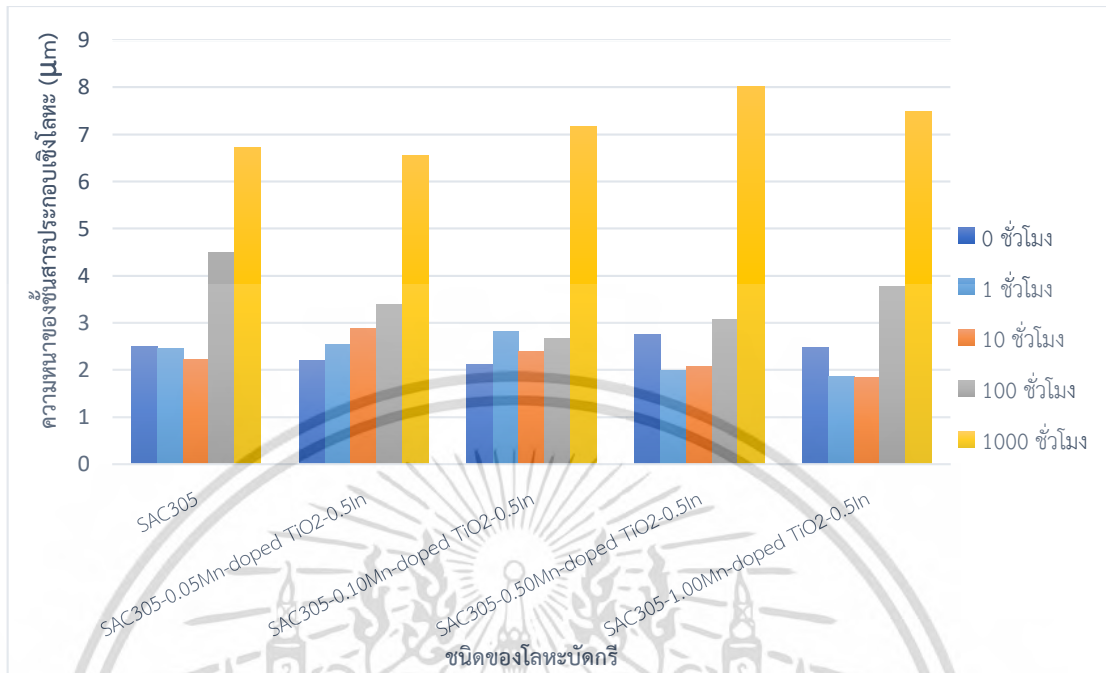


รูปที่ 4.30 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและหลังป้อนด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2

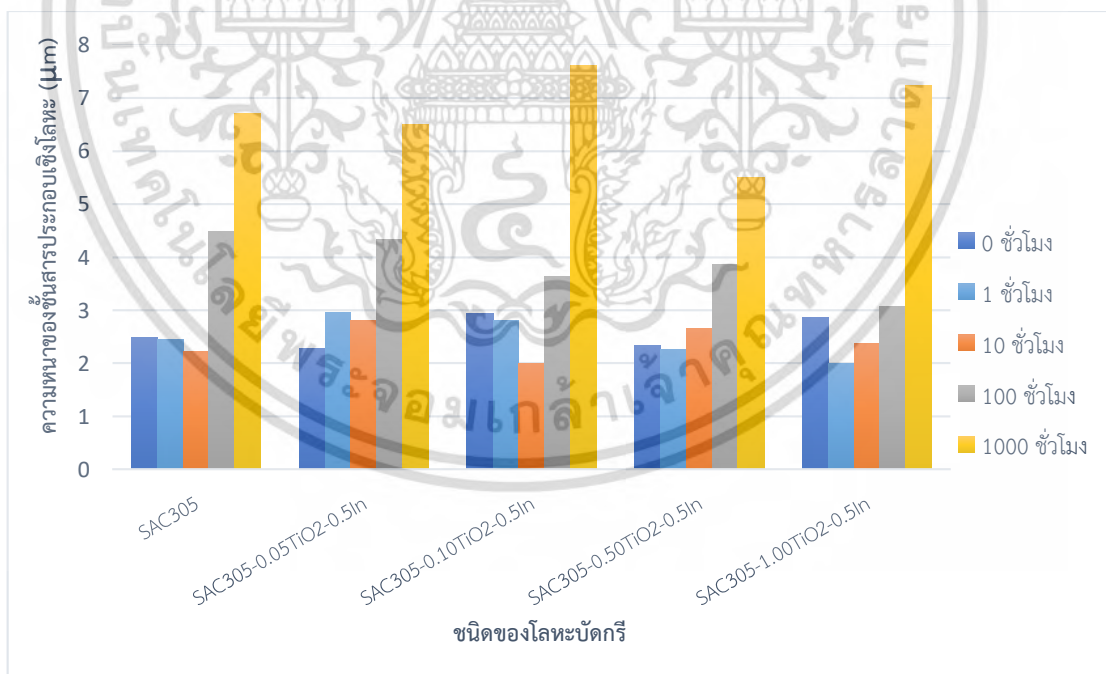


รูปที่ 4.31 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและหลังป้อนด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและหลังป้อนด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In



รูปที่ 4.33 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_6Sn_5 หลังจากการบัดกรีและหลังป้อนด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ร่วมกับ In

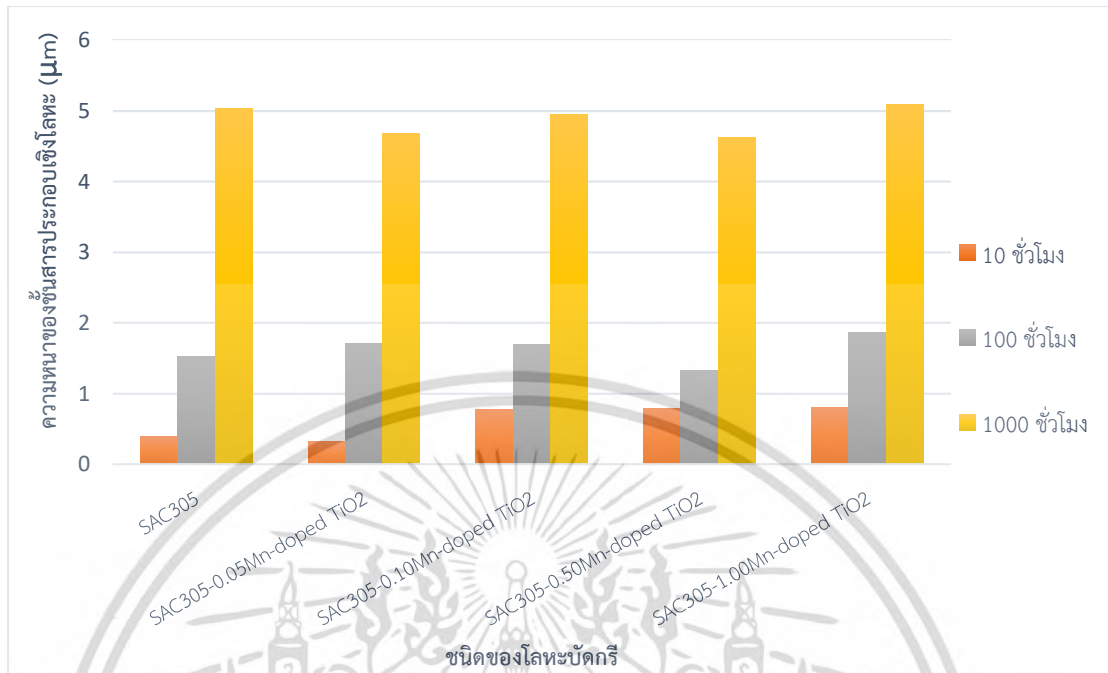
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากบ่มความร้อนเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมงและหนาขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn แสดงในตารางที่ 4.9 และความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn หลังการบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่รูปที่ 4.34-4.37 จากผลการทดลองพบว่าความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn จะมีน้อยกว่า Cu_6Sn_5 ซึ่งความหนาของชั้น Cu_3Sn จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อขึ้นงานผ่านการบ่มความร้อนเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง โดยพบว่าความหนาของชั้นสารประกอบ Cu_3Sn จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี ดังนั้นอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 TiO_2 และ In ที่เติมลงในโลหะบัดกรีจึงมีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn เช่นเดียวกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี

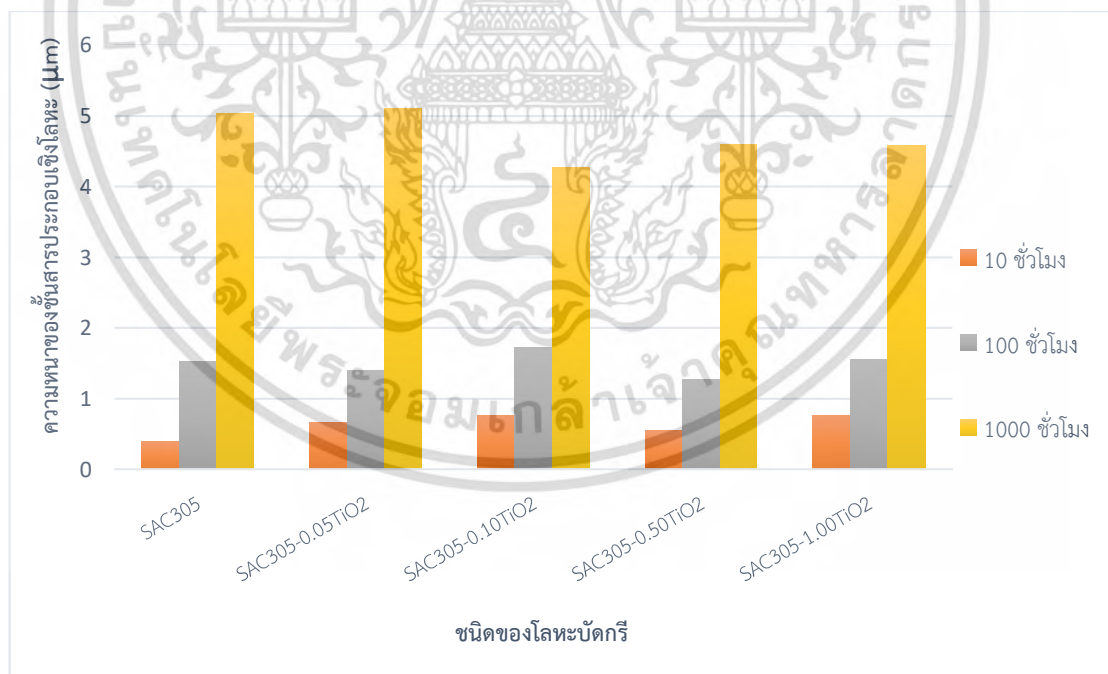
ตารางที่ 4.9 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn ที่อุณหภูมิบ่ม 170°C

โลหะบัดกรี	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Sn (μm)				
	0	1	10	100	1000
SAC305	-	-	0.39	1.52	5.02
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2	-	-	0.31	1.70	4.68
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2	-	-	0.76	1.68	4.95
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2	-	-	0.78	1.33	4.62
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2	-	-	0.79	1.85	5.09
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In	-	-	0.78	1.30	3.64
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2 -0.5In	-	-	0.74	1.30	5.64
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2 -0.5In	-	-	0.44	1.08	4.64
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2 -0.5In	-	-	0.51	1.51	3.97
SAC305-0.05 TiO_2	-	-	0.66	1.39	5.09
SAC305-0.10 TiO_2	-	-	0.76	1.72	4.26
SAC305-0.50 TiO_2	-	-	0.54	1.27	4.58
SAC305-1.00 TiO_2	-	-	0.76	1.55	4.57
SAC305-0.05 TiO_2 -0.5In	-	-	0.79	1.57	4.30
SAC305-0.10 TiO_2 -0.5In	-	-	0.31	1.63	4.10
SAC305-0.50 TiO_2 -0.5In	-	-	0.76	1.92	3.36
SAC305-1.00 TiO_2 -0.5In	-	-	0.75	1.49	4.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

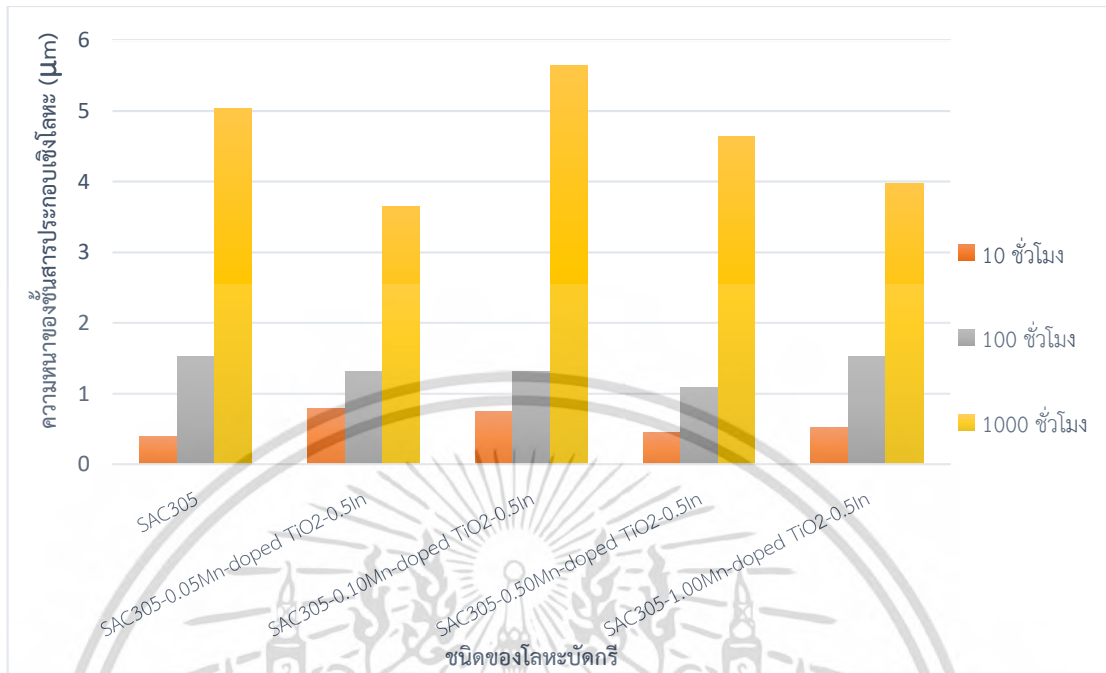


รูปที่ 4.34 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_3Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2

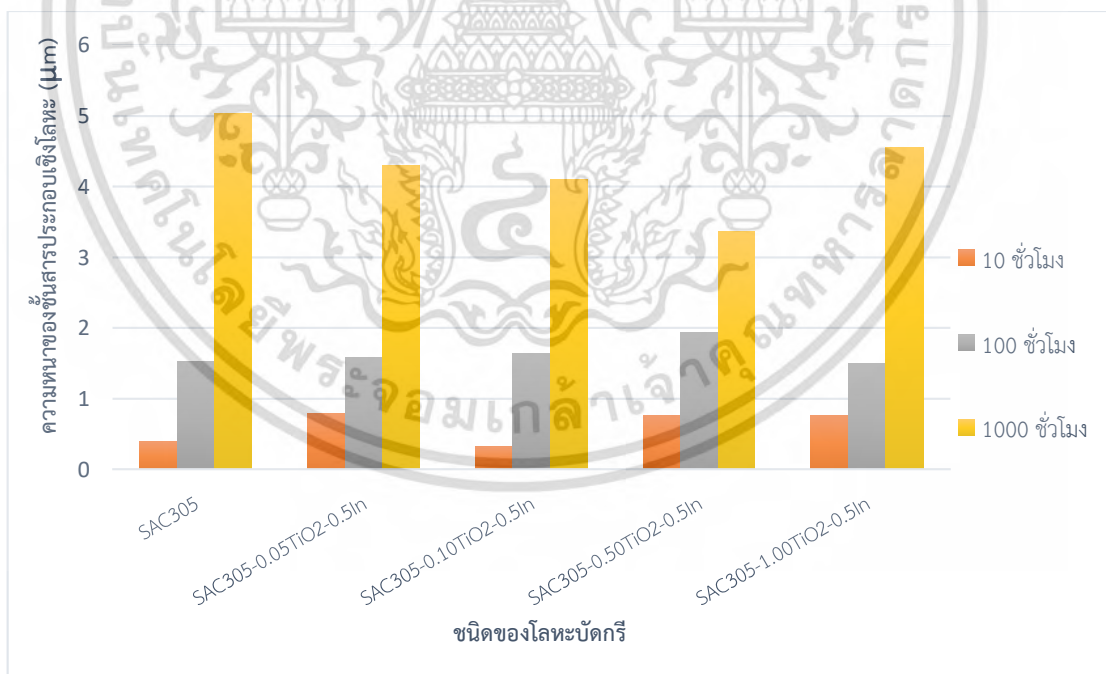


รูปที่ 4.35 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_3Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_3Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In



รูปที่ 4.37 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu_3Sn หลังจากการบัดกรีและหลังบ่มด้วยความร้อนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ร่วมกับ In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂, TiO₂ และ In ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. อุณหภูมิโซลิตัส อุณหภูมิลิวิดัส และช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีจะมีค่าลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂

2. การเติม In ร่วมกับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ทำให้อุณหภูมิโซลิตัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้อุณหภูมิลิวิดัส และช่วงหลอมเหลวของโลหะบัดกรีจะมีค่าลดลง

4. การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีได้ เมื่อเติมในปริมาณไม่เกิน 0.5 wt% ซึ่งถ้าปริมาณของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีมากกว่า 0.5 wt% จะทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ลดลง ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการเปียกให้ดีขึ้น

5. ความสามารถในการพิมพ์จะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ TiO₂ ในปริมาณมาก แต่เมื่อเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ พบว่าความสามารถในการพิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมเฉพาะ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂

6. จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดหลังการบัดกรีพบว่าโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ในปริมาณน้อยจะสามารถลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu₆Sn₅ ที่เกิดขึ้นได้ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ พบว่าการเติม In ไม่มีผลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นหลังการบัดกรี

7. หลังจากการบ่มความร้อนเป็นระยะเวลา 1, 10, 100 และ 1000 ชั่วโมง ชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะชั้นที่ 2 เกิดขึ้น คือ Cu₃Sn จากการวัดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม Cu₆Sn₅ + Cu₃Sn ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดพบว่า การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ ในปริมาณมากจะสามารถช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวมได้ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ หรือ TiO₂ พบว่าไม่มีผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบรวม ความหนาของชั้นสารประกอบ Cu₆Sn₅ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม และชั้นสารประกอบ Cu₃Sn ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สามารถพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบครีมชนิดใหม่จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0305 ได้ และจากผลการทดสอบทั้งหมดได้สรุปให้เงื่อนไข “SAC0305-0.5In-0.5TiO₂” เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบที่ดีขึ้น หรือให้ค่าการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC0305 ทั้งนี้เกณฑ์การให้คะแนนแสดงในภาคผนวก ญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากโลหะบัดกรีสูตร SAC0305-0.5In-0.5TiO₂ เป็นสูตรโลหะบัดกรีที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิจัยนี้ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเงื่อนไขที่มีการเติม In ในปริมาณที่ต่างกันไปเพราะอาจทำให้พบความเข้มข้นของ In เหมาะสมกว่าในโลหะบัดกรีสูตร SAC0305-0.5In-0.5TiO₂ ทั้งในเรื่องจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และโครงสร้างจุลภาคหลังบัดกรี ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] “ส่งออกอิเล็กทรอนิกส์ปี’60 โตร้อยละ 8.3 พลิกเป็นบวกในรอบ 2 ปี” [online]. เข้าถึงได้จาก : http://portal.settrade.com/brokerpage/IPO/Research/upload/2000000323132/2858_p.pdf
- [2] “สารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS”. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.thairohs.org>
- [3] Lee C., “Getting ready for Lead-Free Solder.” [online] Available : http://www.indui.com/pbfree/documents/techpapers/Getting_Ready.pdf. 2010
- [4] Carol H., West L., Ursula K., Gaithersburg, and kil W.M., “Fundamental Properties of Pb-Free Solder Alloys.” **Lead-Free Soldering**, 2007. pp. 21-74.
- [5] Betrabet H.S., McGee S.M., and McKinlay J.K., “Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solder to achieve microstructural refinement and stability.” **Scripta Metallurgica et Materialia**, vol. 25, 1991. pp. 2323-2328.
- [6] Mavoori H., and Jin S., “New, creep-resistant, low melting point solder with ultrafine oxide dispersions.” **Journal of Electronic Materials**, vol. 27, 1998. pp. 1216-1222.
- [7] El-Daly A.A., Fawzy A., Mansour S.F., and Younis M.J., “Thermal analysis and mechanical properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder alloy after modification.” **Journal of Materials Science : Materials in Electronics**, 2013, DOI 10.1007/s10854-013-1200-8.
- [8] Liu P., Yao P., and Liu J., “Effect of SiC nanoparticle addition on microstructure and microhardness of Sn-Ag-Cu solder alloy.” **Journal of Electronic Materials**, 2008; 37(6): 874-879.
- [9] Jakubowska M., Bukat K., Koscielski M., Mlozniak A., Niedzwiedz W., Sloma M., and Sitek J., “Investigation of properties of the SAC solder paste with the silver nanoparticle and carbon nanotube additives and the nano solder joints.” **Electronic System Integration Technology Conference**, 2010.
- [10] Tsao L.C., “Suppressing effect of 0.5 wt% nano-TiO₂ addition into Sn-3.5Ag-0.5Cu solder alloy on the intermetallic growth with Cu substrate during isothermal aging.” **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 509, 2011, pp. 8441-8448.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Tsao L.C., Huang C.H., Chung C.H., and Chen R.S., “Influence of TiO₂ nanoparticles addition on the microstructural and mechanical properties of Sn0.7Cu nano-composite solder.” **Materials Science and Engineering A**, vol. 545, 2012, pp. 194-200.
- [12] Tsao L.C., “An investigation of microstructure and mechanical properties of novel Sn3.5Ag0.5Cu-xTiO₂ composite solders as functions of alloy composition and cooling rate.” **Materials Science and Engineering A**, vol. 529, 2011, pp. 41-48.
- [13] Massalski T.B., **Binary Alloy Phase Diagram**, 2nd Edition, 2001, ASM International
- [14] Boesenberg A.J., Anderson I.E., and Harringa J.L., “Development of Sn-Ag-Cu-X solder for electronic assembly by micro-alloying with Al.” **the Journal of Electronic Materials**, vol. 41, 2012, pp. 1868-1881.
- [15] Kanlayasiri K., Mongkolwongrojn M., and Ariga T., “Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy.” **The Journal of Alloys and Compounds**. 2009; 485: 255-230.
- [16] Chang S.Y., Jain C.C., Chuang T.H., Feng L.P., and Tsao L.C., “Effect of addition of TiO₂ nanoparticles on the microstructure, microhardness and interfacial reactions of Sn3.5AgxCu solder.” **Materials and Design**, vol. 32, 2011, pp. 4720-4727.
- [17] Tang Y., Li G.Y., and Pan Y.C., “Influence of TiO₂ nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO₂ solder joints in reflow process.” **the Journal of alloys and Compounds**, vol. 554, 2013, pp. 195-203.
- [18] Siewet T.A., and Handwerker C.A. **Test Procedures for Developing Solder Data**. National Institute of Standards and Technology, USA. 2002.
- [19] ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร และ ธวัชชัย ปลุกผล. การผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, 2552
- [20] A Random Lab Assistant, “PCB Assembly 101” [online] Available : <https://hax.co/2012/10/17/pcb-assembly-101/>. 2012
- [21] Douglas Krantz, “General Electronics” [online] Available : <http://www.douglaskrantz.com/ElecMixedAssembly.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] KOKI COMPANY LIMITED, “General Information on Solder Paste” [online] Available : <http://www.pmdtk.upc.smm.lt>
- [23] นิชธิมา แพ่งนคร, “วิทยาศาสตร์การไหล (Rheology).” เอกสารประกอบการสอน เคมีฟิลิกส์ สำหรับเภสัชศาสตร์, 2552.
- [24] Satyanarayan, and Prabhu K.N., “Reactive wetting, evolution of interfacial and bulk IMCs and their effect on mechanical properties of eutectic Sn–Cu solder alloy.” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 166, 2011, pp. 87-118.
- [25] JAE YONG PARK, CHOON SIK KANG, and JAE PIL JUNG, “The Analysis of the Withdrawal Force Curve of the Wetting Curve Using 63Sn-37Pb and 96.5Sn-3.5Ag Eutectic Solders.” *Journal of Electronic Materials*, vol 28, 1999, pp. 1256-1262.
- [26] สุนทร มุลทา, “โครงสร้างผลึก การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ.” Metallurgy engineering. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.
- [27] Zhai Q.J., Guan S.K., and Shang Q.Y., “Alloy thermo-mechanism: Theory and application,” *Metallurgy Industry Press*, 1999, pp. 156-60.
- [28] “Himikatusru.” [online]. Available : <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/diagrams.php>
- [29] Abteew M., and Selvaduray G., “Lead-free solder in microelectronics.” *Materials Science and Engineering*, vol. 27, 2000, pp. 95-141.
- [30] Nai S.M.L., Wei J., and Gupta M., “Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes.” *Materials Science and Engineering*, vol. 423, 2006, pp. 166-169.
- [31] Nai S.M.L., Wei J., and Gupta M., “Lead-free solder reinforces with multiwalled carbon nanotubes.” *The Journal of Electronic Materials*, vol 35, 2006, pp. 1518-1522.
- [32] Shen J., Liu Y.C., Han Y.J., Tian Y.M., and Gao H.X., “Strengthening effects of ZrO₂ nanoparticles on the microstructure and microhardness of Sn-3.5Ag lead-free solder.” *Journal of Electronic Materials*, vol 35, 2006, pp. 1672-1679.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [33] Kumar K.M., Kripesh V., and Tay A.O., “Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solder.” **The Journal of Alloys and Compounds**, vol 450, 2008, pp. 229-237.
- [34] Kumar K.M., Kripesh V., Shen L., and Tay A.O. “Study on the microstructure and mechanical properties of a novel SWCNT-reinforced solder alloy for ultra-fine pitch applications.” **Thin Solid Film**, vol 504, 2006, pp. 317-318.
- [35] Tay S.L., Haseeb A.S.M.A., and Johan M.R., “Addition of cobalt nanoparticle into Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder by paste mixing.” **Soldering & Surface Mount Technology**, vol 23, 2011, pp.10-14.
- [36] Tsao L.C., “An investigation of microstructure and mechanical properties of novel Sn_{3.5}Ag_{0.5}Cu-XTiO₂ composite solder solders as functions of alloy composition and cooling rate.” **Materials Science and Engineering A**, vol 529, 2011, pp.41-48.
- [37] Tai F., Guo F., Xia Z.D., Lei Y.P., Yan Y.F., and Liu J.P., “Processing and creep properties of Sn-Cu Composite solder with small amounts of nanosized Ag reinforcement additions.” **Journal of Electronic Materials**, vol 34, 2005, pp. 1357-1362.
- [38] Yue G., Xiuchen Z., Yi B., Ying L., Yong W., and Zhenyu L., “Effect of nano-Fe₂O₃ additions on wettability and interfacial intermetallic growth of low-Ag content Sn-Ag-Cu solders on Cu substrates.” **The Journal of Alloys and Compounds**, vol 627, 2015, pp.39-47.
- [39] Durairaj D., Lam Wai Man, Ekere N.N., and Mallik S. “The effect of wall-slip formation on the rheological behavior of lead-free solder pastes.” **Materials and Design**, vol. 31, 2010, pp. 1056-1062.
- [40] Duraira D., Jackson G.J., Ekere N.N., Glinsk G., and Bailey C., “Correlation of solder paste rheology with computational simulations of the stencil printing process.” **The Journal of Surface Mount Technology**, vol 14, 2002, pp. 11-17.
- [41] Zhao X., Wen Y., Li Y., Liu Y., and Wang Y., “Effect of γ -Fe₂O₃ nanoparticles size on the properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu nano-composite solders and joints.” **The Journal of Alloys and Compounds**, vol 662, 2016, pp. 272-282.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าเป็นประโยชน์ในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [42] Wattanakornphaiboon A., Canyook R., and Fakpan K., “Effect of SnO₂ reinforcement on creep property of Sn-Ag-Cu solders.” **The 10th Thailand International Metallurgy Conference**, 2018, pp. 9213-9219.
- [43] Yingming Shen, Fangjuan Qi, Min Xie, and Jian Li, “The effect of nano-cu particles on mechanical properties of micro-joining joint with lead-free solder.” *Advanced Materials Research*, vol.291-294, 2011, pp. 929-933.
- [44] Almit, “**ALMIT SRC Solder Paste LFM-48 W TM-HP**” [online]. Available : http://www.almit.com/downloads/Specs/leadfree/spec_lfm48w%20tmhp.pdf
- [45] SIGMA-ALDRICH, “**Titanium(IV) oxide contains 1% Mn as dopant**” [online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/677469?lang=en®ion=SG>
- [46] SIGMA-ALDRICH, “**Titanium(IV) oxide**” [online]. Available : http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/637262?lang=en®ion=SG&cm_sp=Insite-_-prodRecCold_xviews-_-prodRecCold10-2
- [47] SIGMA-ALDRICH, “**Safety Data Sheet**” [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/264032?lang=en®ion=TH.2016>.
- [48] NETZSCH, “**Differential Scanning Calorimetry**” [online]. Available : http://www.paralab.pt/sites/default/files/pdf/DSC204F1_PHEONIX.pdf
- [49] NXP, “**Recommended Reflow Soldering Profile**” [online]. Available : www.nxp.com/.../reflow_soldering/Reflow_Soldering_Profile.pdf
- [50] Struers, “**Minitom precision cut-off machine**” [online]. Available : http://www.struers.com/default.asp?doc_id=262. 2016.
- [51] Intecinstruments, “**LaboPol-5**” [online]. Available : http://www.intecinstruments.com/display/dsp_struers_19.htm. 2016.
- [52] “**JSM-6510 Series Scanning Electron Microscope.**” [online]. Available : <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-6510series.html>
- [53] Tsao L.C., Huang C.H., Chung C.H., and Chen R.S., “Influence of TiO₂ nanoparticles addition on the microstructural and mechanical and mechanical properties of Sn_{0.7}Cu nanocomposite solder.” **Materials Science and Engineering A**, vol.545, 2012, pp. 194-200.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [54] El-Daly A.A., Hammad A.E., Al-Ganainy G.S., and Ragab M., “Influence of Zn addition on the microstructure, melt properties and creep behavior of low Ag-content Sn-Ag-Cu lead-free solders.” **Materials Science and Engineering A**, vol. 608, 2014, pp. 130-138.
- [55] El-Daly A.A., Fawzy A., Mansour S.F., and Younis M.J., “Novel SiC nanoparticles-containing Sn-1.0Ag-0.5Cu solder with good drop impact performance.” **Materials Science and Engineering A**, vol. 578, 2013, pp. 62-71.
- [56] ณดี มีเสถียร. “การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC0307-xIn-yZnO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [57] Guang Chen, Hao peng, Vadim V. Silberschmidt, Chan Y.C., and Changqing Liu., “Performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu composite solder with TiC reinforcement: Physical properties, solderability and microstructural evolution under isothermal ageing.” **The Journal of Alloys and Compounds**, vol 685, 2016, pp. 680-689.
- [58] Tadashi Takemoto, and Makoto Miyazaki., “Effect of excess temperature above liquidus of lead-free solders on wetting time in a wetting balance test.” **Materials Transactions**, vol.42, 2001, pp.745-750.
- [59] Amalu E.H., Ekere N.N., and Mallik S., “Evaluation of rheological properties of lead-free solder pastes and their relationship with efficiency during stencil printing process.” **Materials and Design**, vol 32, 2011, pp.3189-3197.
- [60] Liu J., Gao Y.L., and Zhai Q.J., “Recent development of nano-solder paste for electronics interconnect applications.” **Electronics Packaging Technology Conference**, pp. 84-93, 2008.
- [61] Wardzinski B., Buttery M., and Roberts E., “The potential of indium as a soft metal lubricant replacement for lead.” **15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium – ESMATS 2013’ Noordwijk**, The Netherlands, 25-27 September 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [62] Guang Chen, Hao Peng, Vadim V. Silberschmidt, Chan Y.C., Changqing Liu, and Fengshun Wu, "Performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu composite solder with TiC reinforcement : Physical properties, solder ability and microstructural evolution under isothermal ageing." **The Journal of Alloys and compounds**, vol.685, 2016, pp.680-689.
- [63] Guang Chen, Li Liu, Vadim V. Silberschmidt, Chan Y.C., Changqing Liu, and Fengshun Wu, "Retain ratio of reinforcement in SAC305 composite solder joints: effect of reinforcement type, processing and reflow cycle." **Soldering & Surface Mount Technology**, Vol.28, 2016, pp. 159-166.
- [64] Singh Y., and Pradhan S., "Kinetics of Nb₃Sn, Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn layer growth" **Journal of Materials Science & Surface Engineering**, vol.1(2), 2014, pp. 52-57.
- [65] Chin C., Pin J. Wang, and Jong S. Kim, "Are intermetallic in solder joint really brittle?" **Proceeding 57th Electronic components and technology conference**, 2007, pp. 648-652
- [66] Hwa-Teng Lee and Ming-Hung Chen, "Influence of intermetallic compounds on the adhesive strength of solder joints." **Materials Science and Engineering**, 2002, pp. 24-34.
- [67] Tong An and Fei Qin, "Effect of the intermetallic compound microstructure on the tensile behavior of Sn3.0Ag0.5Cu/Cu solder joint under various strain rates." **Microelectronics Reliability**, vol.54, 2014, pp. 932-938.
- [68] Yi Li, XiuChen Zhao, Ying Liu, Yuan Wang, and Yong Wang, "Effect of TiO₂ addition contraction on wettability and intermetallic compounds growth of Sn3.0Ag0.5Cu-xTiO₂ nano-composite solder." **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, vol.25, 2014, pp. 3816-3827.
- [69] Rhodes M. **Introduction to Particle Technology**. 2nd ED. United Kingdom : John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [70] "Atomic Radius of the elements" [online]. เข้าถึงได้จาก : [periodictable/Properties /A/AtomicRadius.html](http://periodictable/Properties/A/AtomicRadius.html)
- [71] "Electronegativity of element" [online]. เข้าถึงได้จาก : [periodictable/Properties /A/Electronegativity.html](http://periodictable/Properties/A/Electronegativity.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [72] Sharif A., Chan Y.C., “Effect of indium addition in Sn-rich solder on the dissolution of Cu metallization” **Journal of Alloys and Compounds.**, vol.390, 2005, pp. 67-73.
- [73] Ai Ting Tan, Ai Wen Tan, and Farazila Yosof, “Influence of nanoparticle addition on the formation and growth of intermetallic compounds (IMC) in Cu/Sn-Ag-Cu/Cu solder joint during different thermal conditions.” **Science and Technology of advanced Materials**, Vol.16, 2015, 033505(18pp)
- [74] Tu P.L., Yan C. Chan, Senior Member, IEEE, and Lai J. K. L., “Effect of Intermetallic Compounds on The Thermal Fatigue of Surface Mount Solder Joint.” **IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology – Part B**, Vol.20, 1997, pp. 87-93.
- [75] Jie Wu, Songbai Xue, Jingwen Wang, Mingfang Wu, and Jianho Wang, “Effect of α -Al₂O₃ nanoparticles-doped on microstructure and properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu low-Ag solder.” **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Vol.29, 2018, pp. 7372-7387.
- [76] El-Daly A. A., Al-Ganainy G. S., Fawzy A., and Younis M. J., “Structural characterization and creep resistance of nano-silicon carbide reinforced Sn-1.0Ag-0.5Cu lead-free solder alloy” **Materials and Design**, Vol.55, 2014, pp. 837-845.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ปีที่ 32 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2559

บทความวิชาการ

1. เทคนิคการตรวจจ่ายเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแอคทีฟในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตอนที่ 1
มานพ ยิ่งรัมย์ 1

บทความวิจัย

2. การออกแบบค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าแบบใหม่ของวงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับโหลดค่าความเหนี่ยวนำค่า
สุรศักดิ์ น้อยหอม พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท ศักดา มณีโรจน์ 8
3. Short-Term Electricity Load Forecasting for Building Energy Management System
Phanumat Saatwong Surapong Suwankwin 16
4. เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจาก Four Wave Mixing
ทัชฌ์ รัตติง วิศวิทย์ ราชณรงค์ สุทธิชัย นพนาถพิงษ์ 22
5. การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน
จำรัส กิ่งสวัสดิ์ ชินรักษ์ เอียรพงษ์ 28
6. ผลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่อง
วาทิต วัฑฒ์ กิตติพล รัตน์พงษ์ 36
7. แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารและการเปลี่ยนแปลงทางกลของเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด
ปริดา ปรากฏมาภ 42
8. การประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนฮีทไปป์ในระบบหล่อเย็นของเครื่องจักรในอุตสาหกรรม
กิตติ สภาพรประเสริฐ อภินันท์ พงศ์มณี 49
9. การปรับปรุงการสังเคราะห์และการจัดเก็บวัสดุการแพทย์ กรณีศึกษา ค้างฟ้าของโรงพยาบาล
นฤทัย ไตธรรมคุณ สิทธิพร พิมพ์สกุล เขาวลิต วัฒนตรี 56
10. อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุดหลอมเหลวความสามารถในการพิมพ์และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีโรสสารตะกั่วแบบครีม SAC305
วันยุทธ สุวรรณเครือ ประธาน บุรณศิริ ภาวรรณชัย กัลยาศิริ 64
11. การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับการประเมินทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล
วรพจน์ พันธุ์คง อรรณี มณีศรี ชลิต มณีศรี 70
12. การทำนายความหนาแน่นในงานกัดอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 โดยใช้วิธีทางสถิติ
สมเสียง จันทาสี ศรัทธัย ปิ่นสมรสกุล 77
13. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ
ชวีศา เชื้อแค้น พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ 84
14. ระบบปลูกพืชแบบไร้ดินที่ใช้มีพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับหมื่นเวียนสารละลายธาตุอาหาร
ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ ธิติพร จำรัสเลิศลักษณ์ 92
15. กำลังเบกทานแบบไม่ระบายน้ำของฐานรากต่อเนื่องบนดินเหนียวแบบไม่สมนัยโดยใช้แบบจำลอง NGI-ADP
สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อภิญญาชน 98
16. การแก้ปัญหาการขนส่งระหว่างประเทศของไทยภายใต้การเกิดขึ้นของสองท่าเรือน้ำลึกใหม่ : ท่าเรือหวายและท่าเรือปากบารา
ศักรธร บุญทวีวัฒน์ 104
17. กำลังอัดแก๊สและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังเกือบคกชั้นคุณภาพปรับปรุงด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลและซีเมนต์
จิระยุทธ สิบสุข เบญจพล ขุนวิเศษ อนิรุทธิ์ สุขแสน เขตศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ คมกร ไชยเดชาธร 111
18. การออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมด้วยวิธีผู้เอนภาคตามมาตรฐาน ACI318-08
อัศนัย ทาณา เรืองรุชดี ชีระโรจน์ 117

<http://www.kmitl.ac.th/fej>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุด
หลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการ
เปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305
Effects of Mn-Doped TiO₂ and In Nanoparticles on Melting
Point, Printability, and Wettability of SAC305
lead-free solder paste**

วันยุทธ สุวรรณเครือ¹ ประณต บุรณศิริ² กรรณชัย กัลยาศิริ¹
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีซึ่งประกอบขึ้นโดยจะดูแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกจะผสม Mn-doped TiO₂ ในอัตราส่วน 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% และในกลุ่มที่สองจะผสม In ที่มีอัตราส่วน 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มแรก โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีถูกทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) และความสามารถในการพิมพ์ศึกษาจากการวัดอัตราส่วนของน้ำหนักโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออก โดยโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งหลังการบัดกรีความสามารถในการเปียกของแต่ละรับจะถูกศึกษาในรูปแบบของ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle จากผลการศึกษพบว่า Solidus temperature และ Liquidus temperature ของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะบัดกรี SAC305 อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงอุณหภูมิการหลอมของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีค่าที่สูงกว่าโลหะบัดกรี SAC305 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมีอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ผสมอยู่ในปริมาณน้อยๆแต่เมื่อปริมาณ Mn-doped TiO₂ เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ลดลง และพบว่าเมื่อทำการผสม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ผสมเฉพาะ Mn-doped TiO₂ โดยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลงเมื่อทำการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว อนุภาคนาโน ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

Effects of Mn-doped TiO_2 and In nanoparticles on melting point, printability, and wettability of SAC305 lead-free solder pastes on Cu substrate were investigated in this paper. The composite solders were divided into two groups. The first one was prepared by adding 0.05, 0.1, 0.5, and 1.0 wt% of Mn-doped TiO_2 and the second one was included additional indium of 0.5 wt% to the first group. The melting characteristic of solder was characterized by differential scanning calorimeter (DSC). The printability was measured by the weight ratio of solder, before and after printing the solder on Cu substrate. The solder was reflowed in a reflow oven at 260°C for 30 seconds. The wettability was investigated in the terms of spread ratio, spread factor, and contact angle. It was found that liquidus temperature and solidus temperature of nano-composite solder were lower than those of SAC305. However, the melting range of nano-composite solder was greater than that of SAC305. The wettability of solder was improved by the addition of small amount of Mn-doped TiO_2 , and the wettability was then decreased as the amount of Mn-doped TiO_2 increased. The addition of indium decreased the wettability of composite solder. The printability of solder was decreased due to the addition of Mn-doped TiO_2 , and indium.

Keywords: Lead-free solder, Nanoparticle, Wettability, Printability

1. บทนำ

คณะกรรมการยุโรป หรือ อีซี (EC-European commission) ได้กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS หรือ Restriction of Hazardous Substance [1] จากกฎข้อบังคับดังกล่าวจึงส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว ซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อใช้แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมซึ่งกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) [2, 3] เพราะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง [4, 5] อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี SAC305 ยังมีข้อด้อยในด้านของจุดหลอมเหลว ($216\text{--}221^\circ\text{C}$) ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม คือ Sn-Pb eutectic ที่มีจุดหลอมเหลว 183°C [6] และคุณสมบัติทางกลที่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม

[7, 8] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ทัดเทียมกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเติม In ลงในโลหะบัดกรีทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวนี้น้อยลง [9] นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีมีค่าที่ดีขึ้น และช่วยในการลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเมื่อทำการบัดกรี [10, 11]

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง ซึ่งอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เป็นอนุภาคนาโนใหม่ที่คาดว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงได้เนื่องจาก Mn ในปริมาณน้อยๆ สามารถละลายในทองแดงได้ดี [12, 13] และคาดว่า การเติม In จะสามารถช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการคำนวณงานวิจัย

สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นโลหะบัดกรี Sn96.5Ag3.0Cu0.5 (SAC305) ผสม Mn-doped TiO₂ ความบริสุทธิ์ 99% ในปริมาณ 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% ขณะที่กลุ่มที่สองผสม In ความบริสุทธิ์ 99.99% ชื่อ ALDRICH ในปริมาณ 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มที่หนึ่ง โดยผสมด้วยวิธีทางกลเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โลหะบัดกรี ในการบัดกรี ใช้แผ่นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30 mm x 30 mm x 0.35 mm โลหะบัดกรีที่ผสมกันอย่างสมบูรณ์แล้วจะถูกนำมาพิมพ์บนแผ่นทองแดงด้วยแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ชิ้นงานในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดลองส่วนผสมละ 3 ชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยตัวแปรการคำนวณ

2.1 การทดสอบจุดหลอมเหลว

จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมถูกทดสอบด้วยเครื่อง DSC รุ่น NETZSCH DSC 204 การทดสอบจะทดสอบภายใต้บรรยากาศ N₂ ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละชิ้นมีน้ำหนักประมาณ 8 mg ซึ่งอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 °C/min โดยเริ่มจากอุณหภูมิตั้งต้นที่ 25 °C จนถึง 350 °C

2.2 การวัดความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียกจะถูกศึกษาในรูปแบบ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle การหาค่า Spread ratio (S_r) สามารถทำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_r = \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

เมื่อ A₁ คือ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง และ A₀ คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะบัดกรี

ก่อนการบัดกรี และค่า Spread factor (S_r) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$S_f = \frac{D-H}{D} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ H คือความสูงของโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว เช่นเดียวกับการหาค่า Contact angle (θ) สามารถทำได้จากสมการที่ 3

$$\theta = \arcsin \left(\frac{2}{\frac{D}{2H} + \frac{2H}{D}} \right) \quad (3)$$

โดยคำนวณค่าต่างๆสามารถหาได้จากภาพถ่ายของโลหะบัดกรีหลังการเย็นตัวผ่านโปรแกรม Image pro express และความสูงของโลหะบัดกรีสามารถวัดได้โดยไมโครมิเตอร์

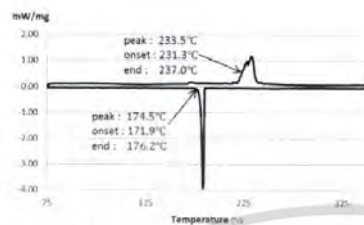
2.3 การวัดความสามารถในการพิมพ์

การวัดความสามารถในการพิมพ์สามารถวัดได้จากน้ำหนักของโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออกซึ่งการวัดความสามารถในการพิมพ์จะทำการทดลองก่อนการบัดกรี

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบจุดหลอมเหลว

ผลการทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC305 โดย DSC แสดงดังรูปที่ 1 พบว่ามีค่าพลังงานแบบดูดความร้อนสูงสุด (Endothermic peak) ที่อุณหภูมิ 233.5 °C และมีค่าพลังงานแบบคายความร้อนสูงสุด (Exothermic peak) ที่อุณหภูมิ 174.5 °C จากรูปทำให้ทราบถึง Solidus temperature (T_s), Liquidus temperature (T_L) และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (ΔT) ของโลหะบัดกรี SAC305 โดยอุณหภูมิที่จุด Onset ของโลหะบัดกรีขณะดูดความร้อนคือ T_s อุณหภูมิที่จุด End ของโลหะบัดกรีขณะดูดความร้อนคือ T_L และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวคือ T_L - T_s



รูปที่ 1. ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305

จากผล DSC ของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมสามารถนำมาแสดงค่า T_g , T_c , และ ΔT ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า T_g ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 4.3, 11.3, 14.3 และ 13.6°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 9.4, 8.9, 11.2 และ 11.1°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 สามารถช่วยลด T_c ของโลหะบัดกรีพื้นฐานได้มากกว่ากรณีที่ผสมเฉพาะ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05 เท่านั้น ขณะที่ T_c ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 2.2, 0.3, 1.8 และ 2.7°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 5.5, 6.3, 4.4 และ 2.1°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการเติม In สามารถช่วยลด T_c ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.5 wt% ได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีส่งผลให้ ΔT นี้ค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่า ΔT มีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 2.1, 10.2, 12.5 และ 10.9°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่า ΔT มีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 3.9, 2.6, 6.8 และ 9°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อ Mn-doped TiO_2 มีปริมาณมากกว่า 0.05 % การผสม Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In สามารถช่วยลด ΔT ได้มากกว่าการเติม Mn-doped TiO_2 เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 คุณสมบัติการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

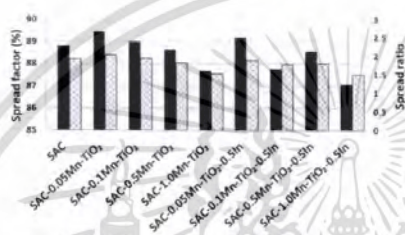
ชิ้นงาน	T_g (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)
SAC305	231.3	237.0	5.7
SAC305-0.05Mn-TiO ₂	227.0	234.8	7.8
SAC305-0.1Mn-TiO ₂	220.8	236.7	15.9
SAC305-0.5Mn-TiO ₂	217.0	235.2	18.2
SAC305-1.0Mn-TiO ₂	217.7	234.3	16.6
SAC305-0.05Mn-TiO ₂ -0.5In	221.9	231.5	9.6
SAC305-0.1Mn-TiO ₂ -0.5In	222.4	230.7	8.3
SAC305-0.5Mn-TiO ₂ -0.5In	220.1	232.6	12.5
SAC305-1.0Mn-TiO ₂ -0.5In	220.2	234.9	14.7

3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการเปียก

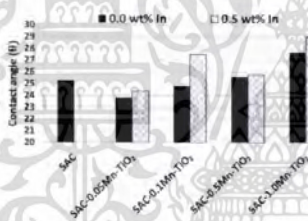
สำหรับโลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการเปียกที่ดีควรมีค่าการกระจายตัวสูง โดย Spread factor (S) และ Spread ratio (S_r) จะต้องมีค่ามาก ในขณะที่มุมสัมผัส Contact angle (θ) จะต้องมีค่าน้อย ซึ่งจากการทดลองจากรูปที่ 2 และ 3 พบว่าเมื่ออนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่เติมลงในโลหะบัดกรีมีปริมาณ 0.05 และ 0.1wt% ทำให้ S_r มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 0.66 และ 0.2% ตามลำดับ เช่นเดียวกับ S_r ที่มีค่าเพิ่มขึ้น 0.11 และ 0.02 ตามลำดับ ขณะที่มุมสัมผัสมีขนาดลดลง 1.43 และ 0.45 องศา ตามลำดับ และเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นเป็น 0.5-1 wt% ทำให้ S_r และ S_r มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 0.17-1.12% และ 0.1-0.4 ตามลำดับ ขณะที่มุมสัมผัสมีขนาดเพิ่มขึ้น 0.36-2.44 องศา ซึ่งเห็นได้ว่าการกระจายตัวมีค่าสูงสุดเมื่อผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05 wt% ขณะที่ Mn-doped TiO_2 ในโลหะบัดกรีมีมากกว่า 0.05 wt% พบว่าการกระจายตัวมีค่าลดลง และจากการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีพบว่าการกระจายตัวมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้ผสม In โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3 ซึ่งมุมสัมผัสของกรณีที่เติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 มีค่ามากกว่ากรณีที่เติมเฉพาะ Mn-doped TiO_2

การกระจายตัวที่ลดลงของโลหะบัดกรีเมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรีมีมากขึ้น หรือการกระจายตัวที่ลดลงจากการเติมอนุภาคนาโน In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีมีความ

เป็นไปได้จากการเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องจากการมีอยู่ของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรี [10,14] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคนาโนจะไปยังการไหลของโลหะบัดกรีซึ่งประกอบนาโนขณะหลอมบนแผ่นทองแดง โดยการยับยั้งการไหลของโลหะบัดกรีขณะหลอมทำให้มุมสัมผัสมีค่าที่มากขึ้น หรือมีการกระจายตัวที่ลดลง



รูปที่ 2. การกระจายตัวของโลหะบัดกรี

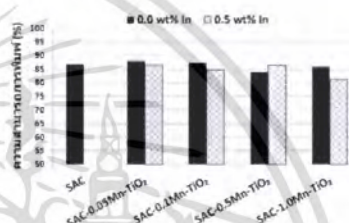


รูปที่ 3. มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการพิมพ์

โลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการพิมพ์ที่ดีควรพิมพ์ติดกับแผ่นรองได้ตามปริมาตรของแม่พิมพ์ และไม่ควรได้รับผลกระทบจาก Wall-slip effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดึงแม่พิมพ์ออกจากแท่นพิมพ์ ซึ่งขณะดึงแม่พิมพ์ออกจะมีโลหะบัดกรีบางส่วนติดไปกับแม่พิมพ์ ส่งผลให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง [15] จากผลการทดลองในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% ทำให้ความสามารถการพิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 1.28 และ 0.63 % ตามลำดับ และเมื่อปริมาณของ Mn-doped TiO₂ มีมากกว่า 0.1 wt% หรือเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ

0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่าความสามารถการพิมพ์มีค่าต่ำกว่า 86.79 % ซึ่งเป็นค่าความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยในงานวิจัยของ Liu et al. [16] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน SAC ในโลหะบัดกรี Sn-Bi พบว่าเมื่ออนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีมากขึ้นทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง



รูปที่ 4. ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

4. สรุปผล

จากผลการวิจัยพบว่า การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ สามารถช่วยลด T_s และ T_L ของโลหะบัดกรี SAC305 อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงโลหะบัดกรีส่งผลให้ ΔT ของโลหะบัดกรีมีค่าที่สูงขึ้น โดยความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 wt% ขณะที่ความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐานถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมี Mn-doped TiO₂ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% โดยจากผลการทดสอบการเติม Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 wt% มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีค่าสามารถเปียก และความสามารถในการพิมพ์ที่สูงที่สุด ขณะที่ T_s และ T_L มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน และมี ΔT ต่ำที่สุดเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Bradley, C. A. Handwerker, J. Bath, R. D. Parker, and R. W. Geaney, "Lead-free electronics iNEMI Projects lead to successful manufacturing," Wiley-IEEE Press, United State of America, 2007
- [2] M. Abteu, and G. Selvaduray, "Lead-free solderin microelectronic," Materials Science & Engineering R: Reports, vol. 27, pp. 95-141, 2000.
- [3] R. Mahmudi, and S. Mahin-Shirazi, "Effect of Sb addition on tensile deformation behavior of lead-free Sn-3.5Ag solder alloy," Materials and Design, vol. 32, pp. 5027-5032, 2011.
- [4] H. Conrad, Z. Guo, Y. Fahmy, and D. I. Yang, "Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate, and low-cycle fatigue of solder joint," Journal of Electronic Materials, vol. 28, pp. 1062-1070, 1999.
- [5] J. L. Marshall, J. Calderon, J. Sees, G. Lucey, and J. S. Hwang, "Composite solder," IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 14, pp. 698-702, 1991.
- [6] Z. Moser, P. Sebo, W. Gasior, P. Svec, and J. Pstrus, "Effect of indium on wettability of Sn-Ag-Cu solders," Experiment vs Modeling Part I, CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, vol. 33, pp. 63-68, 2009.
- [7] H. S. Betabet, S. M. McGee, and J. K. McKinlay, "Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solder to achieve microstructural refinement and stability," Scripta Metallurgica et Materialia, vol. 25, pp. 2323-2328, 1991.
- [8] H. Mavoori, and S. Jin, "New, creep-resistant, low melting point solder with ultrafine oxide dispersions," Journal of Electronic Materials, vol. 27, pp. 1216-1222, 1998.
- [9] K. Kanlayasiri, T. Ariga, and M. Ongkolwongrojn, "Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy," Journal of Alloys and Compounds, vol. 485, pp. 225-239, 2009.
- [10] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites," Tin Soild Films, vol. 504, pp. 401-404, 2006.
- [11] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes," Materials. Science and Engineering: A, vol. 423, pp.166-169, 2006.
- [12] T. B. Massalski, Binary alloy phase diagram, 2nd Edition, ASM International, Materials Park, 1990.
- [13] A. J. Boesenberg, I. E. Anderson, and J. L. Harringa, "Development of Sn-Ag-Cu-X solder for electronic assembly by micro-alloying with Al," Journal of Electronic Materials, vol. 41, pp. 1868-1881, 2012.
- [14] R. Ashayer, S. H. Mannan, S. Sajjadi, M.P. Clode, and M. M. Miodownik, "Nanoparticle enhanced solders for high temperature environments," 9th Electronics packaging technology conference, Singapore, pp. 109-113, 2007.
- [15] S. Mallik, N. N. Ekere, R. Durairaj, A. E. Marks, and A. Seman, "Wall-slip effects in SnAgCu solder pastes used in electronics assembly applications," Materials and Design, vol. 30, pp. 4502-4506, 2009.
- [16] J. Liu, Y.L. Gao, and Q. J. Zhai, "Recent development of nano-solder paste for electroincs interconnect applications," Electronics Packaging Technology Conference, pp. 84-93, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-0464820WEJ-T
Ver-1



Material Safety Data Sheet 製品安全データシート

Issue date: Jul01 2008
発行日 2008年07月01日
Revision date: Jan01 2010
改訂日 2010年01月01日

1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION 製品及び会社情報

Product name: 製品名:	SRC Solder Paste LFM-48W TM-HP
Company name: 会社名:	ALMIT(THAILAND) CO.,LTD.
Address: 住所:	155/20 Moo4 Ratchaburi Industrial Estate, Tambon Jediaman, Amphur Phetchamun, Ratchaburi Province, 70120 Thailand.
Department in charge: 担当部門:	ALMIT(THAILAND) アルミットタイランド
Person responsible: 担当者:	MITSUHIRO KUMAZAWA 駒澤祐弘
Telephone number: 電話番号:	0-3237-5803 +66-3237-5803
Emergency telephone number: 緊急連絡電話番号:	+61-42-309-5611 MICRO-SOLDERING LABORATORY マイクロ接合研究所
FAX number: FAX 番号:	0-3237-5806 +66-3237-5803
Mail address: メールアドレス:	almit@almit.co.th
Arrangement number: 登録番号:	QPM-0464820WEJ-T
Recommended use of the product and restrictions on use: 推奨用途及び使用上の制限	Soldering material はんだ材料

2. HAZARDS IDENTIFICATION 危険有害性の要約

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

1/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-3464820WEJ-T
Ver4-1


Chemicals which in contact with water emits flammable gases 水反応可燃性化学品	Not classification 分類できない
Oxidizing liquids 酸化性液体	No classification 分類対象外
Oxidizing solids 酸化性固体	No classification 分類対象外
Organic peroxide 有機過酸化物	No classification 分類対象外
Metal corrosive substances 金属腐食性物質	Not classification 分類できない
Acute toxicity (oral) 急性毒性(経口)	Not classification 分類できない
Acute toxicity (skin) 急性毒性(経皮)	Not classification 分類できない
Acute toxicity (inhalation; Gas) 急性毒性(吸入; ガス)	No classification 分類対象外
Acute toxicity (inhalation; Vapor) 急性毒性(吸入; 蒸気)	No classification 分類対象外
Acute toxicity (inhalation; Dust, mist) 急性毒性(吸入; 粉じん, ミスト)	Not classification 分類できない
Skin corrosive / irritation 皮膚腐食性 / 刺激性	Class 2 区分 2
Serious eyes damage (Eyes irritation) 眼に対する重篤な損傷 / 刺激性	Class 2B 区分 2B
Respiratory organs sensitization 呼吸器感受性	Not classification 分類できない
Skin sensitization 皮膚感受性	Class 1 区分 1
Original generative cell variation 生殖細胞変異原性	Not classification 分類できない
Carcinogenic 発がん性	Not classification 分類できない
Reproduction toxicity 生殖毒性	Not classification 分類できない
Specification target internal organs / systemic toxicity (single exposure) 特定標的臓器 / 全身毒性(単回ばく露)	Not classification 分類できない
Specification target internal organs / systemic toxicity (repeat exposure) 特定標的臓器 / 全身毒性(反復ばく露)	Class 1 区分 1
Absorption respiratory organs toxicity 吸収性呼吸器有害性	Not classification 分類できない
Aquatic environmental toxicity acute 水生環境有害性物質-急性	Not classification 分類できない
Aquatic environmental toxicity chronic 水生環境有害性物質-慢性	No information 情報なし

<p>Toxicological health effects: 健康に対する有害性:</p> <p>Toxicological environment effects: 環境に対する有害性:</p> <p>GHS Label Elements ラベル要素</p> <p>Symbols/Pictograms: 絵表示又はシンボル:</p> <p>Signal Word: 注意喚起語</p> <p>Hazardous information: 危険有害性情報:</p>	<p>Danger 危険</p> <p>When fume inhales, may cause allergy, edema, breath or dizziness. ヒュームを吸入するとアレルギー、浮腫、呼吸困難を起すおそれ。 May cause allergy, skin reaction. アレルギー性皮膚反応を起すおそれ。 May cause sensitization on eye. 目を刺激する。</p>
---	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LPM-48W TM-HP
QPM-0454820WEJ-T
Ver-4-1
almit

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

Instructions:
注意事項

Precaution
予防策

Avoid inhalation of fume.
ヒュームの吸入を避ける。
Avoid eye, skin and clothing contact.
目、皮膚、衣服への接触を避ける。
Before handling read and understand the safety attention.
すべての安全注意を読み理解するまで取り扱わないこと。
Avoid exposing by supplying an appropriate protection tool and a ventilator.
適切な保護具や換気装置を使用し、ばく露を避けること。
Avoid prolonged or repeated exposure.
長時間または反復の暴露を避ける。
Wash hand after handling.
取扱い後に手を十分に洗浄する。
Do not take food, drink and smoking while handling.
作業中は飲食、喫煙をしない。

FIRST-AID MEASURES
応急措置

Inhalation: Remove the exposed person immediately and provide fresh air.
Get medical attention.
吸入した場合、新鮮な空気の場所に移し、速やかに医師の診察を受けること。
Skin contact: Promptly flush contaminated skin with soap or mild detergent and water. Contact physician if irritation continues.
皮膚に付着した場合、速ちに汚染した皮膚を石鹸と水で十分に洗い流し、皮膚に炎症を生じたときには医師の診察を受けること。
Eye contact: Promptly wash eyes with plenty of water while holding the eyelids. Continue to rinse for at least 15 minutes and get medical attention.
目に入った場合、速ちに多量の水で洗眼する。少なくとも15分間洗眼し、医師の診察を受けること。
Ingestion: Rinse nose, mouth and throat with water. Drink a few glasses of water or milk. Try to induce vomiting. Get medical attention.
飲み込んだ場合、水で鼻、口及びのどをすすぐこと。多量の水または牛乳を飲ませて吐かせ、医師の診察を受けること。
Storage
保管
The container is closely stopped, and kept in the refrigerator. (0-10°C)
容器は密閉し、冷蔵庫に保管する。(0-10°C)
Disposal
廃棄
Disposal of unit, a container according to a rule of a country or the metropolitan and districts.
内容物、容器は国又は都道府県の規則に従って廃棄すること。

Country / area information
国/地域情報

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

Single Substance or Compound: 単一化学物質・混合物の区別	Compound 混合物				Content 含有量(Wt%)
Common chemical name or general name: 化学名又は一般名	Solder Paste (Lead-Free Solder, addition Flux) ソルダペースト (無鉛はんだ、添加剤フラックス)				
Composition and content: 成分及び含有量	Material 物質名	Chemical 化学式	CAS No.	Ris number 管轄公示整理番号	
	Tin 錫	Sn	7440-31-5	Exempted 対象外(元素)	94.92%
	Silver 銀	Ag	7440-22-4	Exempted 対象外(元素)	2.64%
	Copper 銅	Cu	7440-50-8	Exempted 対象外(元素)	0.44%
	Flux フラックス	Trade secret 営業秘密	Trade secret 営業秘密	Trade secret 営業秘密	12.00%

4. FIRST-AID MEASURES 応急措置

Inhalation
吸入した場合

Remove the exposed person immediately and provide fresh air. Get medical attention.
新鮮な空気の場所に移し、速やかに医師の診察を受ける。

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LPM-48W TM-HP
QPM-3454820WEJ-T
Ver4-1



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

5. FIRE-FIGHTING MEASURES 火災時の措置

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

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES 漏出時の措置

Personal precautions 人体に対する注意事項	Wear appropriate personal protective equipments (Refer to section 8) when clean-up working, avoid to adhere the spray etc. to the shirt and to inhale gases. 作業の際は適切な保護服や呼吸器を着用し、液滴が付着したり、ガスを吸入しないようにする。
Environmental precautions 環境に対する注意事項	Dispose of soiled things and collected waste promptly according to the related regulations. 汚染物、回収物などは、関係法規に基づき速やかに処分する。
Methods for cleaning up 除去方法	Gather up, pack in a bag and dispose. Carefully collect remnant and move to a safe place. 袋を集め、袋に入れ、廃棄することを注意深く集め、安全な場所に移す。
Prevention of secondary hazards 二次災害の防止策	Carefully collect remnant and move to a safe place. 残屑分を注意深く集め、安全な場所に移す。

7. HANDLING AND STORAGE 取扱い及び保管上の注意

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

4/5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-5454820WEJ-T
Ver4-1
almit

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

Before handling read and understand the safety attention.
すべての安全注意を読み理解するまで取り扱わないこと。
Avoid exposing by supplying an appropriate protection tool and a ventilator.
適切な保護具や換気装置を使用し、ばく露を避けること。
Avoid inhalation of fume.
ヒュームの吸入を避ける。
Avoid eye, skin and clothing contact.
目、皮膚、衣服への接触を避ける。
Avoid prolonged or repeated exposure.
長時間または反復の曝露を避ける。
Wash hand after handling.
取扱し終わりに手を十分に洗浄する。
Do not take food, drink and smoking while handling.
作業中は飲食、喫煙をしない。

Storage
保管

Materials to avoid:
避けるべき材料:
Storage conditions:
適切な保管条件:

Keeps away from strong oxidizing compound, acids and strong bases.
強酸化剤、酸類、強塩基類から隔離して保管する。
The container is closely stoppered, and kept in the refrigerator. (0-10°C)
容器は密栓し、冷蔵庫に保管する。(0-10°C)

8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION ばく露防止及び保護措置

Protective equipment: 設備対策	Provide local exhaust ventilation. 局所排気設備を設置する。		
Control parameter: 管理濃度・許容濃度	Minimal name 物質名	TLV 管理濃度	OEL (2006年)* 職業暴露限界 ACGIH (2006年) 許容濃度
	Tin (錫)	—	2mg/m ³
	Silver (銀)	—	0.01mg/m ³
	Copper (銅)	—	0.2mg/m ³
	Fume (TSP)* *OEL: occupational exposure limits (職業暴露限界/ Japan Society for Occupational Health, 日本産業衛生学会)	—	—
Protective equipment: 保護具	Dust respirator. 防塵マスクを着用する。		
Respiratory protection: 呼吸器の保護具	Protective gloves. 保護手袋を着用する。		
Hand protection: 手の保護具	Safety goggles. 安全ゴーグルを着用する。		
Eye protection: 目の保護具	Protective clothing. 保護衣を着用する。		
Skin and body protection: 皮膚及び身体保護具	Provide eye washing tools and safety shower. 洗眼器及び安全シャワーを備える。		
Specific hygiene measures: 適切な衛生対策			

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES 物理的及び化学的性質

Physical state: 物理的状态	Form 形状	Powder or slurry (metal powder + flux) ペースト状 (金属粉末+フラックス)
	Color 色	Gray 灰色
	Odor 臭い	None 無臭
pH:	No information 不明	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-5454820WEJ-T
Ver.4-1
almit

Melting point: 融点(°C):	Alloy 合金		Solids 固形物	217	Liquids 液体	220	Flux フラックス	>80
Boiling point: 沸点(°C):	Alloy 合金		No information データなし				Flux フラックス	>200
Flashpoint: 引火点(°C):	>160							
Vapor pressure: 蒸気圧(mmHg):	<0.01							
Vapor density(Air=1): 蒸気密度(空気=1):	60							
Density (g/cm ³): 密度:	Alloy 合金	7.4	Flux フラックス	1.0	Solder Paste はんだペースト	4.17		
Solubility in water: 水に対する溶解性:	Alloy 合金	Insoluble 不溶	Flux フラックス	Insoluble 不溶	Solder Paste はんだペースト	Insoluble 不溶		
Solubility in solvent: 溶剤に対する溶解性:	Alloy 合金	Insoluble 不溶	Flux フラックス	Disoluble 溶解	Solder Paste はんだペースト	Disoluble 溶解		
Auto-ignition temperature: 自然発火温度:	No data データなし							
Resolusion temperature: 分解温度:	No data データなし							
Odor threshold: 臭いのしきい値:	Non-performance 不該当							
Evaporation rate: 蒸発速度:	No information データなし							
Flammability(solid, gas): 燃焼性(固形, ガス):	Non-performance 不該当							
Viscosity (Paste): 粘度:	100-300							


10. STABILITY AND REACTIVITY 安定性及び反応性

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

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION 有害性情報

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-5484820WEJ-T
Ver-4-1


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

12. ECOLOGICAL INFORMATION 環境影響情報

Aquatic environmental toxicity/acute 水生環境有害性物質・急性	No information 情報無し.
Aquatic environmental toxicity/chronic 水生環境有害性物質・慢性	No information 情報無し.

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS 廃棄上の注意

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

14. TRANSPORT INFORMATION 輸送上の注意

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LFM-48W TM-HP
QPM-0464820WEJ-T
Ver-1



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

15. REGULATORY INFORMATION 適用法令

PRTR	E-82, Ag 254%
PRTR 法	第7種指定化学物質 82 項 銅及びその水溶性化合物 264%含有
Industrial Safety and Health Law 労働安全衛生法	Sn, 通知対象物 政令番号 322、すず及びその化合物含有量 1 重量%以下を除く Au, 通知対象物 政令番号 137、銅及びその水溶性化合物含有量 1 重量%以下を除く
Water pollution control law 水質汚濁防止法	Cu 第3条生活環境項目、銅
Water works law 水道法	Cu 第4条 第3項 水道水が有すべき性状に關連する項目、銅及びその化合物
Sewerage law 下水道法	Cu 施行令 第6条の4 水質基準物質 28 項、銅及びその化合物

16. OTHER INFORMATION その他の情報

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

SAFETY DATA SHEET

according to Regulation (EC) No. 1907/2006

Version 6.0 Revision Date 30.03.2016

Print Date 28.02.2017

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

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

Product name : Indium

Product Number : 264032

Brand : Aldrich

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

CAS-No. : 7440-74-6

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

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

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

Telephone : +65 6779-1200

Fax : +65 6779-1822

1.4 Emergency telephone number

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

SECTION 2: Hazards identification**2.1 Classification of the substance or mixture****Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008**

Flammable solids (Category 1), H228

Acute toxicity, Inhalation (Category 4), H332

Skin irritation (Category 2), H315

Eye irritation (Category 2), H319

Specific target organ toxicity - single exposure (Category 3), Respiratory system, H335

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

2.2 Label elements**Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008**

Pictogram



Signal word

Danger

Hazard statement(s)

H228

Flammable solid.

Aldrich - 264032

Page 1 of 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.3 Other hazards

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

SECTION 3: Composition/information on ingredients

3.1 Substances

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

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

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

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

SECTION 4: First aid measures

4.1 Description of first aid measures

General advice

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

If inhaled

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

In case of skin contact

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

In case of eye contact

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

If swallowed

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

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

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

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

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

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

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Indium/indium oxides

5.3 Advice for firefighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

5.4 Further information

Use water spray to cool unopened containers.

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

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

For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

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

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

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

6.4 Reference to other sections

For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage
7.1 Precautions for safe handling

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

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

For precautions see section 2.2.

7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

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

Storage class (TRGS 510): Flammable solid hazardous materials

7.3 Specific end use(s)

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

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

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

Personal protective equipment

Eye/face protection

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

Skin protection

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

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

Full contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

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

Splash contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

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

data source: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, phone +49 (0)6659 87300, e-mail sales@kcl.de, test method: EN374

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

Body Protection

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

Respiratory protection

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

Control of environmental exposure

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

SECTION 9: Physical and chemical properties

9.1 Information on basic physical and chemical properties

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

Aldrich - 264032

Page 4 of 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

9.2 Other safety information
No data available

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1 Reactivity

No data available

10.2 Chemical stability

Stable under recommended storage conditions.

10.3 Possibility of hazardous reactions

No data available

10.4 Conditions to avoid

Heat, flames and sparks.

10.5 Incompatible materials

Strong oxidizing agents

10.6 Hazardous decomposition products

Hazardous decomposition products formed under fire conditions. - Indium/indium oxides
Other decomposition products - No data available
In the event of fire: see section 5

SECTION 11: Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects

Acute toxicity

No data available (Indium)

Skin corrosion/irritation

No data available (Indium)

Serious eye damage/eye irritation

No data available (Indium)

Respiratory or skin sensitisation

No data available (Indium)

Germ cell mutagenicity

No data available(Indium)

Carcinogenicity

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

Reproductive toxicity

No data available(Indium)

Specific target organ toxicity - single exposure

Inhalation - May cause respiratory irritation.(Indium)

Specific target organ toxicity - repeated exposure

No data available

Aspiration hazard

No data available(Indium)

Additional Information

RTECS: NL1050000

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

SECTION 12: Ecological information**12.1 Toxicity**

No data available

12.2 Persistence and degradability

No data available

12.3 Bioaccumulative potential

No data available

12.4 Mobility in soil

No data available(Indium)

12.5 Results of PBT and vPvB assessment

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

12.6 Other adverse effects

No data available

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

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

Contaminated packaging

Dispose of as unused product.

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

ADR/RID: 3089

IMDG: 3089

IATA: 3089

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

SECTION 15: Regulatory information

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

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

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

Further information

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

SAFETY DATA SHEET

according to Regulation (EC) No. 1907/2006

Version 6.0 Revision Date 30.03.2016

Print Date 14.11.2017

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

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

Product name : Titanium(IV) oxide, anatase

Product Number : 248576

Brand : Aldrich

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

CAS-No. : 1317-70-0

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

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

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

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

1.4 Emergency telephone number

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

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

Not a hazardous substance or mixture according to Regulation (EC) No. 1272/2008.

2.2 Label elements

Not a hazardous substance or mixture.

2.3 Other hazards

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

SECTION 3: Composition/information on ingredients**3.1 Substances**

Synonyms : Titanium dioxide

Formula : O_2Ti

Molecular weight : 79.87 g/mol

CAS-No. : 1317-70-0

Aldrich - 248576

Page 1 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Other hazards

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

SECTION 3: Composition/information on ingredients**3.2 Mixtures**

Synonyms : Titanium dioxide
Titania

Formula : O_2Ti
Molecular weight : 79.87 g/mol

No components need to be disclosed according to the applicable regulations.

SECTION 4: First aid measures**4.1 Description of first aid measures****General advice**

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

If inhaled

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

In case of skin contact

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

In case of eye contact

Flush eyes with water as a precaution.

If swallowed

Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

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

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

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

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

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Titanium/titanium oxides, Manganese/manganese oxides

5.3 Advice for firefighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

5.4 Further information

No data available

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

Use personal protective equipment. Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Avoid breathing dust. For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

Do not let product enter drains.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EC-No. : 215-280-1

No components need to be disclosed according to the applicable regulations.

SECTION 4: First aid measures

4.1 Description of first aid measures

If inhaled

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

In case of skin contact

Wash off with soap and plenty of water.

In case of eye contact

Flush eyes with water as a precaution.

If swallowed

Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water.

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

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

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

SECTION 5: Firefighting measures

5.1 Extinguishing media

Suitable extinguishing media

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

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Titanium/titanium oxides

5.3 Advice for firefighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

5.4 Further information

No data available

SECTION 6: Accidental release measures

6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas.

For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

No special environmental precautions required.

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.

6.4 Reference to other sections

For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage

7.1 Precautions for safe handling

Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed.

For precautions see section 2.2.

7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

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

Storage class (TRGS 510): Non Combustible Solids

Aldrich - 246576

Page 2 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 **Methods and materials for containment and cleaning up**
Pick up and arrange disposal without creating dust. Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.
- 6.4 **Reference to other sections**
For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage

- 7.1 **Precautions for safe handling**
Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed.
For precautions see section 2.2.
- 7.2 **Conditions for safe storage, including any incompatibilities**
Store in cool place. Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place.
Storage class (TRGS 510): Combustible Solids
- 7.3 **Specific end use(s)**
Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

- 8.1 **Control parameters**
- 8.2 **Exposure controls**
- Appropriate engineering controls**
Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday.
- Personal protective equipment**
- Eye/face protection**
Safety glasses with side-shields conforming to EN188 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 188(EU).
- Skin protection**
Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.
The selected protective gloves have to satisfy the specifications of EU Directive 89/686/EEC and the standard EN 374 derived from it.
- Body Protection**
Choose body protection in relation to its type, to the concentration and amount of dangerous substances, and to the specific work-place. The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.
- Respiratory protection**
Respiratory protection is not required. Where protection from nuisance (e (EN 143) dust masks. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).
- Control of environmental exposure**
Do not let product enter drains.

SECTION 9: Physical and chemical properties

- 9.1 **Information on basic physical and chemical properties**
- | | |
|--------------------|-------------------|
| a) Appearance | Form: powder |
| b) Odour | No data available |
| c) Odour Threshold | No data available |
| d) pH | No data available |

Aldrich - 577469

Page 3 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 Specific end use(s)

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

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

General industrial hygiene practice.

Personal protective equipment**Eye/face protection**

Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).

Skin protection

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

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

Full contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Dermatrill® (KCL 740 / Aldrich 2677272, Size M)

Splash contact

Material: Nitrile rubber

Minimum layer thickness: 0.11 mm

Break through time: 480 min

Material tested: Dermatrill® (KCL 740 / Aldrich 2677272, Size M)

data source: KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, phone +49 (0)6689 87300, e-mail sales@kcl.de, test method: EN374

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

Body Protection

Choose body protection in relation to its type, to the concentration and amount of dangerous substances, and to the specific work-place. The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.

Respiratory protection

Respiratory protection is not required. Where protection from nuisance (e.g. EN 143) dust masks. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

Control of environmental exposure

No special environmental precautions required.

SECTION 9: Physical and chemical properties**9.1 Information on basic physical and chemical properties**

- | | |
|--------------------|-------------------|
| a) Appearance | Form: powder |
| b) Odour | No data available |
| c) Odour Threshold | No data available |

Aldrich - 246576

Page 3 of 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d) pH	No data available
e) Melting point/freezing point	Melting point/range: 1,825 °C - lit.
f) Initial boiling point and boiling range	No data available
g) Flash point	Not applicable
h) Evaporation rate	No data available
i) Flammability (solid, gas)	No data available
j) Upper/lower flammability or explosive limits	No data available
k) Vapour pressure	Not applicable
l) Vapour density	No data available
m) Relative density	3.9 g/mL at 25 °C
n) Water solubility	No data available
o) Partition coefficient: n-octanol/water	Not applicable
p) Auto-ignition temperature	not auto-flammable
q) Decomposition temperature	No data available
r) Viscosity	No data available
s) Explosive properties	No data available
t) Oxidizing properties	The substance or mixture is not classified as oxidizing.

9.2 Other safety information
No data available

SECTION 10: Stability and reactivity

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION 11: Toxicological information**11.1 Information on toxicological effects****Acute toxicity**

LD50 Oral - Rat - female - > 5,000 mg/kg(Anatase (TiO2))

LC50 Inhalation - Rat - male - 4 h - > 6.82 mg/l(Anatase (TiO2))

Skin corrosion/irritation

Skin - Rabbit(Anatase (TiO2))

Result: No skin irritation

(OECD Test Guideline 404)

Serious eye damage/eye irritation

Eyes - Rabbit(Anatase (TiO2))

Result: No eye irritation

(OECD Test Guideline 405)

Respiratory or skin sensitisation

No data available(Anatase (TiO2))

Germ cell mutagenicity

No data available(Anatase (TiO2))

CarcinogenicityThis product is or contains a component that is not classifiable as to its classification. (Anatase (TiO2))
(Anatase (TiO2))

IARC: 2B - Group 2B: Possibly carcinogenic to humans (Anatase (TiO2))

Reproductive toxicity

No data available(Anatase (TiO2))

Specific target organ toxicity - single exposure

No data available(Anatase (TiO2))

Specific target organ toxicity - repeated exposure

No data available

Aspiration hazard

No data available(Anatase (TiO2))

Additional Information

RTECS: BV6550000

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated. (Anatase (TiO2))

SECTION 12: Ecological information**12.1 Toxicity**

No data available

12.2 Persistence and degradability

No data available

12.3 Bioaccumulative potential

No data available

12.4 Mobility in soil

No data available(Anatase (TiO2))

12.5 Results of PBT and vPvB assessment

March - 246576

Page 5 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

12.6 Other adverse effects

No data available

SECTION 13: Disposal considerations

13.1 Waste treatment methods

Product

Offer surplus and non-recyclable solutions to a licensed disposal company.

Contaminated packaging

Dispose of as unused product.

SECTION 14: Transport information

14.1 UN number

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.2 UN proper shipping name

ADR/RID: Not dangerous goods

IMDG: Not dangerous goods

IATA: Not dangerous goods

14.3 Transport hazard class(es)

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.4 Packaging group

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.5 Environmental hazards

ADR/RID: no

IMDG Marine pollutant: no

IATA: no

14.6 Special precautions for user

No data available

SECTION 15: Regulatory information

15.1 Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

This safety datasheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006.

15.2 Chemical safety assessment

For this product a chemical safety assessment was not carried out

SECTION 16: Other information

Further information

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ECOLOGICAL INFORMATION	
12.1 Ecotoxicity:	Not known
12.2 Aquatic organisms :	ZnO being almost insoluble in water the determination of ecotoxicity to aquatic organisms is very difficult.
Do not allow to enter waters, waste water, or soil.	
13. DISPOSAL CONSIDERATIONS	
13.1 Dispose of in line with regional or national regulations relevant to the location of the consumer.	
14. TRANSPORT INFORMATION	
14.1 Zinc oxide is designated as an Environmentally hazardous substance, Solid, NOS and classified as 9/UN 3077/PGIII	
15. REGULATORY INFORMATION	
15.1 Labelling according to EC Directives	
* Symbol:	N Dangerous for the environment
* R phrases:	50/53 Very toxic to aquatic organisms, may cause long - term adverse effects in the aquatic environment
* S phrases:	60 - 61 This material and its container must be disposed of as hazardous waste. Avoid release to the environment.
16. OTHER INFORMATION	
16.1	This safety information is provided in good faith and is based on the present state of our knowledge. Our company only obligation shall be to replace such quantities of material defective. Before using, the user, shall determine the suitability of the product for its intended use and the user assumes all risk and liability whatsoever in connection therewith. Our company will not be liable for loss or damage, direct, incidental or consequential arising out of the use, or inability to use, the product.
16.2	Attention is drawn to the hazards which may result from the misuse of these materials.
16.3	All information contained in this documentation is based upon current knowledge.
Page 4 of 4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

SAFETY DATA SHEET

according to Regulation (EC) No. 1907/2006

Version 6.0 Revision Date 31.03.2016

Print Date 14.11.2017

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

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

Product name : Titanium(IV) oxide

Product Number : 677489

Brand : Aldrich

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

CAS-No. : 13463-67-7

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

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company : Sigma-Aldrich Pte Ltd
(Co. Registration No. 199403788W)
1 Science Park Road
#02-14 The Capricorn, S'pore Sci. Park
SINGAPORE 117628
SINGAPORE

Telephone : +65 6779-1200

Fax : +65 6779-1822

1.4 Emergency telephone number

Emergency Phone # : 1-800-262-8200

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

Not a hazardous substance or mixture according to Regulation (EC) No. 1272/2008.

2.2 Label elements

Labelling according Regulation (EC) No 1272/2008

Pictogram : none

Signal word : none

Hazard statement(s) : none

Precautionary statement(s) : none

Supplemental Hazard Statements : none

Safety data sheet available on request.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

SECTION 3: Composition/information on ingredients

- 3.2 Mixtures**
- | | |
|------------------|-------------------------------|
| Synonyms | : Titanium dioxide
Titania |
| Formula | : O_2Ti |
| Molecular weight | : 79.87 g/mol |
- No components need to be disclosed according to the applicable regulations.

SECTION 4: First aid measures

- 4.1 Description of first aid measures**
- General advice**
Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance.
- If inhaled**
If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Consult a physician.
- In case of skin contact**
Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.
- In case of eye contact**
Flush eyes with water as a precaution.
- If swallowed**
Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.
- 4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed**
The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11
- 4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed**
No data available

SECTION 5: Firefighting measures

- 5.1 Extinguishing media**
- Suitable extinguishing media**
Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.
- 5.2 Special hazards arising from the substance or mixture**
Titanium/titanium oxides, Manganese/manganese oxides
- 5.3 Advice for firefighters**
Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.
- 5.4 Further information**
No data available

SECTION 6: Accidental release measures

- 6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**
Use personal protective equipment. Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Avoid breathing dust.
For personal protection see section 8.
- 6.2 Environmental precautions**
Do not let product enter drains.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 **Methods and materials for containment and cleaning up**
Pick up and arrange disposal without creating dust. Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.
- 6.4 **Reference to other sections**
For disposal see section 13.

SECTION 7: Handling and storage

- 7.1 **Precautions for safe handling**
Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed.
For precautions see section 2.2.
- 7.2 **Conditions for safe storage, including any incompatibilities**
Store in cool place. Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place.
Storage class (TRGS 510): Combustible Solids
- 7.3 **Specific end use(s)**
Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

- 8.1 **Control parameters**
- 8.2 **Exposure controls**
- Appropriate engineering controls**
Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday.
- Personal protective equipment**
- Eyeface protection**
Safety glasses with side-shields conforming to EN166 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).
- Skin protection**
Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.
The selected protective gloves have to satisfy the specifications of EU Directive 89/686/EEC and the standard EN 374 derived from it.
- Body Protection**
Choose body protection in relation to its type, to the concentration and amount of dangerous substances, and to the specific work-place. The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.
- Respiratory protection**
Respiratory protection is not required. Where protection from nuisance (e (EN 143) dust masks. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).
- Control of environmental exposure**
Do not let product enter drains.

SECTION 9: Physical and chemical properties

- 9.1 **Information on basic physical and chemical properties**
- | | |
|--------------------|-------------------|
| a) Appearance | Form: powder |
| b) Odour | No data available |
| c) Odour Threshold | No data available |
| d) pH | No data available |

Aldrich - 677469

Page 3 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e) Melting point/freezing point	Melting point/range: > 350 °C - lit.
f) Initial boiling point and boiling range	No data available
g) Flash point	No data available
h) Evaporation rate	No data available
i) Flammability (solid, gas)	No data available
j) Upper/lower flammability or explosive limits	No data available
k) Vapour pressure	No data available
l) Vapour density	No data available
m) Relative density	4.26 g/mL at 25 °C
n) Water solubility	No data available
o) Partition coefficient: n-octanol/water	No data available
p) Auto-ignition temperature	No data available
q) Decomposition temperature	No data available
r) Viscosity	No data available
s) Explosive properties	No data available
t) Oxidizing properties	No data available

9.2 Other safety information
No data available

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1 Reactivity
No data available

10.2 Chemical stability
Stable under recommended storage conditions.

10.3 Possibility of hazardous reactions
No data available

10.4 Conditions to avoid
No data available

10.5 Incompatible materials
Strong oxidizing agents, Strong acids

10.6 Hazardous decomposition products
Hazardous decomposition products formed under fire conditions. - Titanium/titanium oxides, Manganese/manganese oxides.
Other decomposition products - No data available
In the event of fire: see section 5

SECTION 11: Toxicological information

11.1 Information on toxicological effects

Acute toxicity
No data available

Aldrich - 677469

Page 4 of 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Skin corrosion/irritation

No data available

Serious eye damage/eye irritation

No data available

Respiratory or skin sensitisation

No data available

Germ cell mutagenicity

No data available

Carcinogenicity

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

Reproductive toxicity

No data available

Specific target organ toxicity - single exposure

No data available

Specific target organ toxicity - repeated exposure

No data available

Aspiration hazard

No data available

Additional Information

RTECS: Not available

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.

SECTION 12: Ecological information**12.1 Toxicity**

No data available

12.2 Persistence and degradability

No data available

12.3 Bioaccumulative potential

No data available

12.4 Mobility in soil

No data available

12.5 Results of PBT and vPvB assessment

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

12.6 Other adverse effects

No data available

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

Offer surplus and non-recyclable solutions to a licensed disposal company. Dissolve or mix the material with a combustible solvent and burn in a chem scrubber.

Contaminated packaging

Dispose of as unused product.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION 14: Transport information

14.1 UN number			
ADR/RID: -	IMDG: -	IATA: -	
14.2 UN proper shipping name			
ADR/RID: Not dangerous goods			
IMDG: Not dangerous goods			
IATA: Not dangerous goods			
14.3 Transport hazard class(es)			
ADR/RID: -	IMDG: -	IATA: -	
14.4 Packaging group			
ADR/RID: -	IMDG: -	IATA: -	
14.5 Environmental hazards			
ADR/RID: no	IMDG Marine pollutant: no	IATA: no	
14.6 Special precautions for user			
No data available			

SECTION 15: Regulatory information

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

SECTION 16: Other information**Further information**

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

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

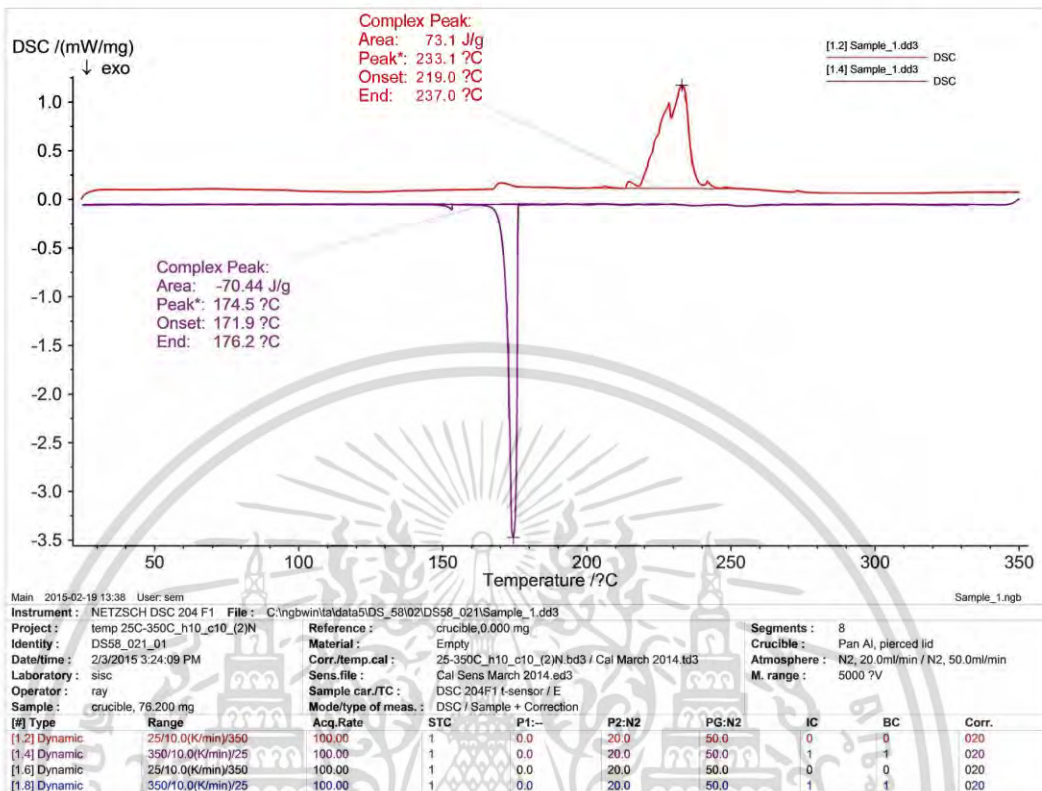
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



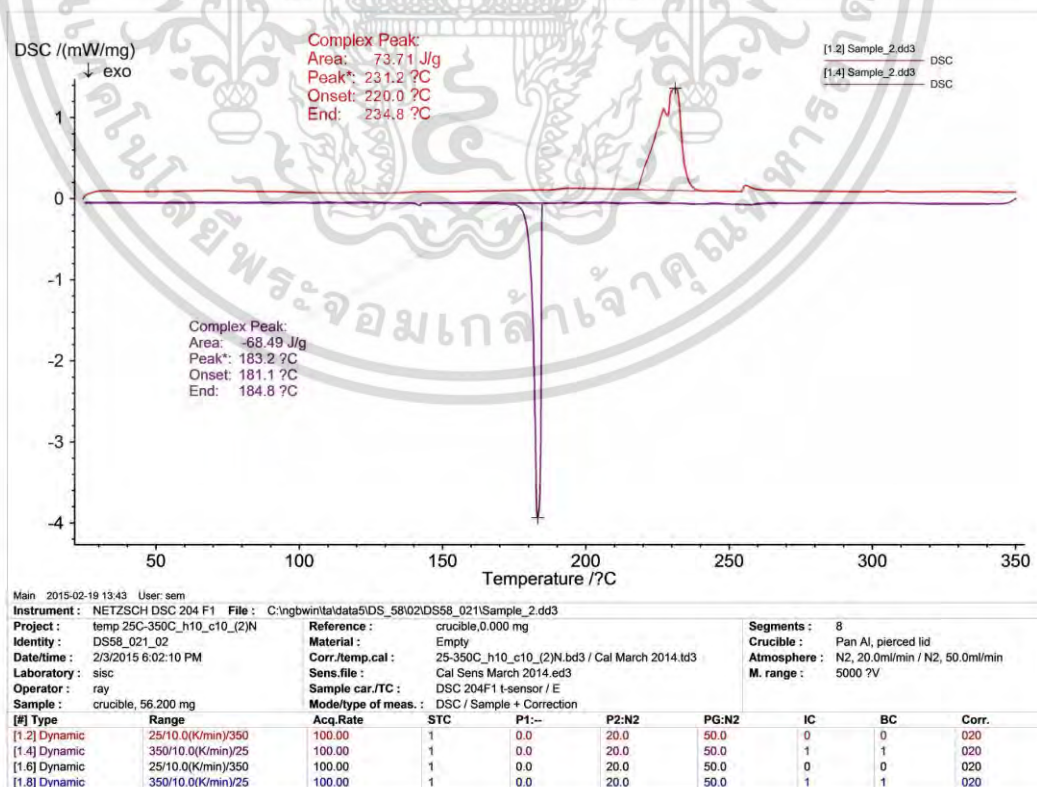
ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

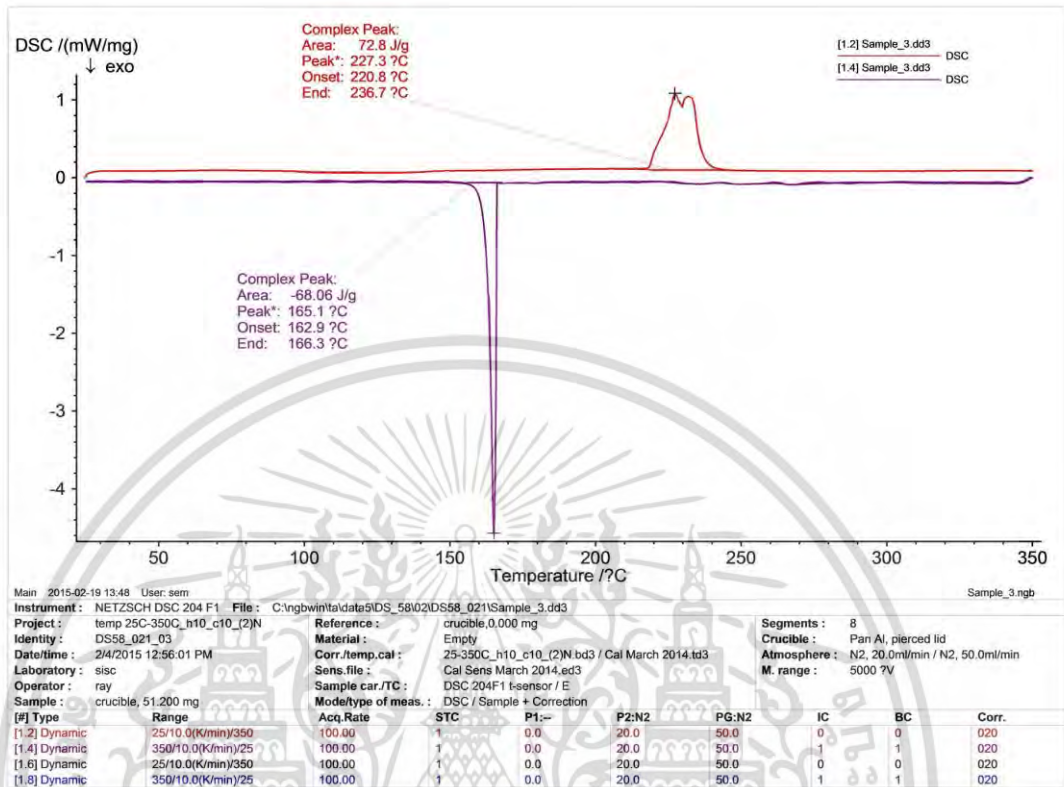


รูปที่ ค.1 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305

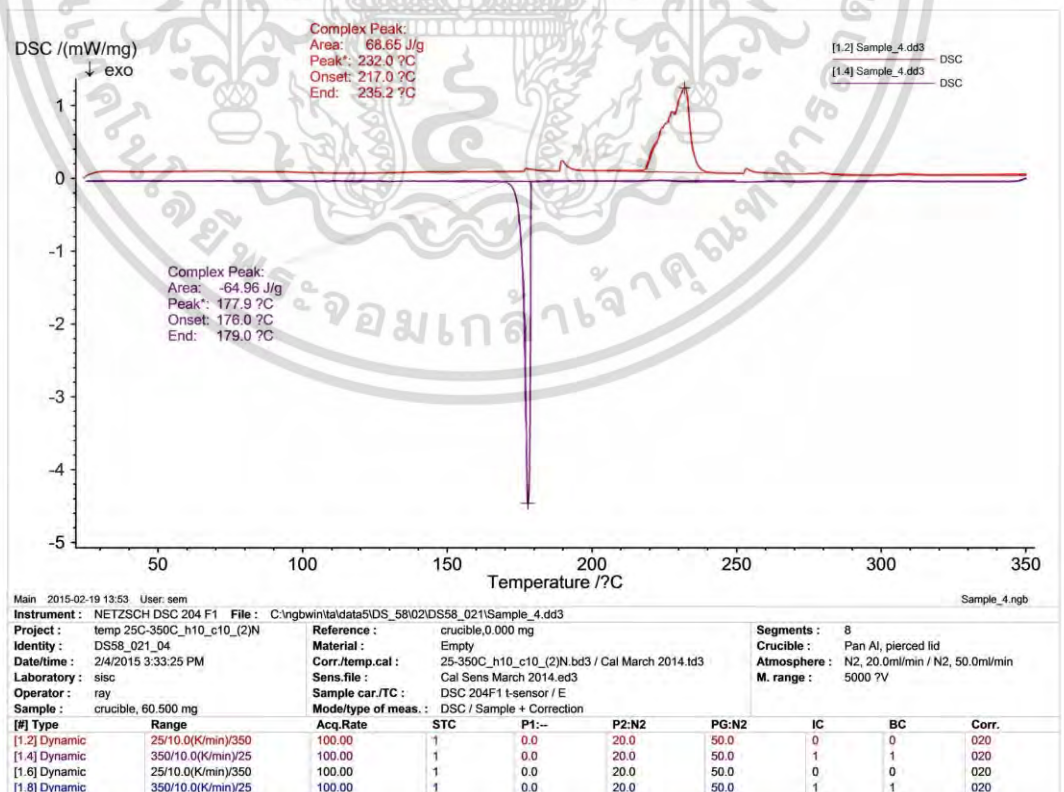


รูปที่ ค.2 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

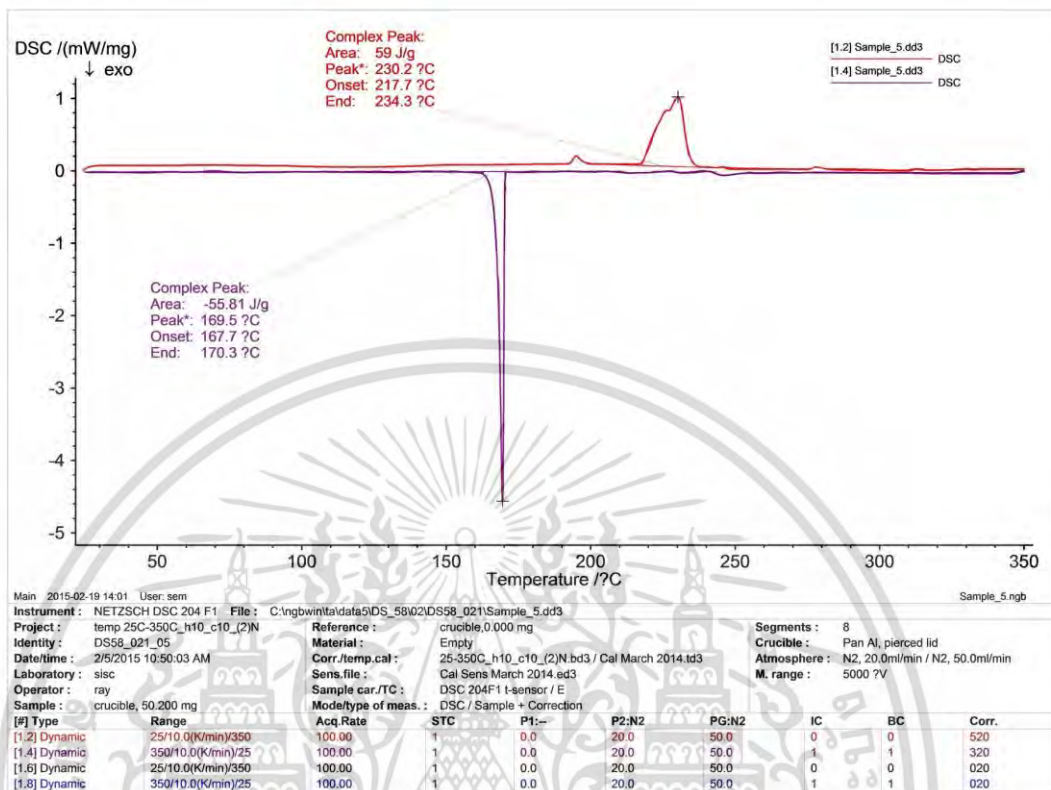


รูปที่ ค.3 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO₂

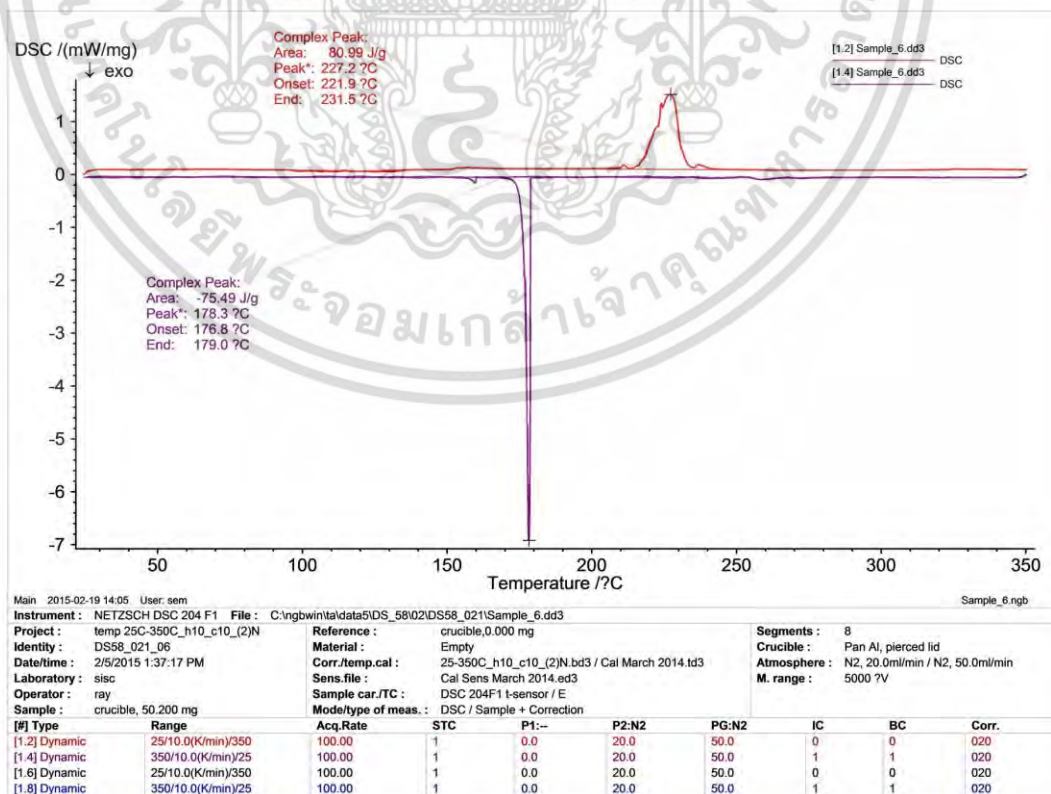


รูปที่ ค.4 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิใช่เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

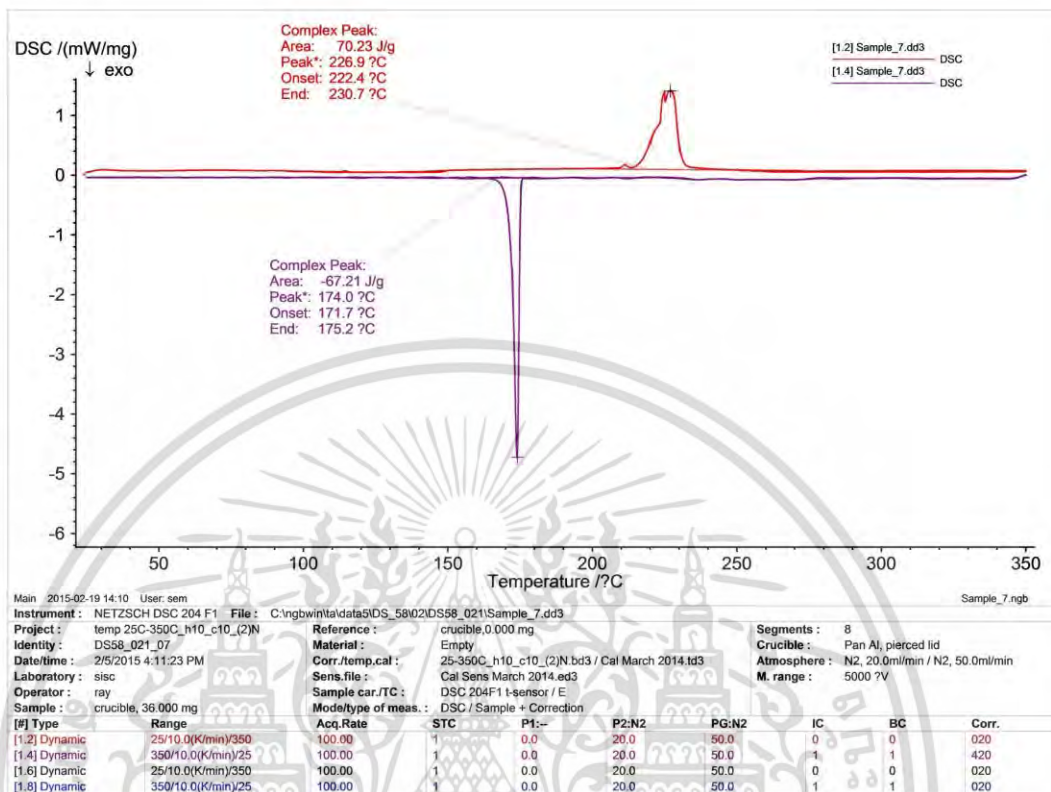


รูปที่ ค.5 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO₂

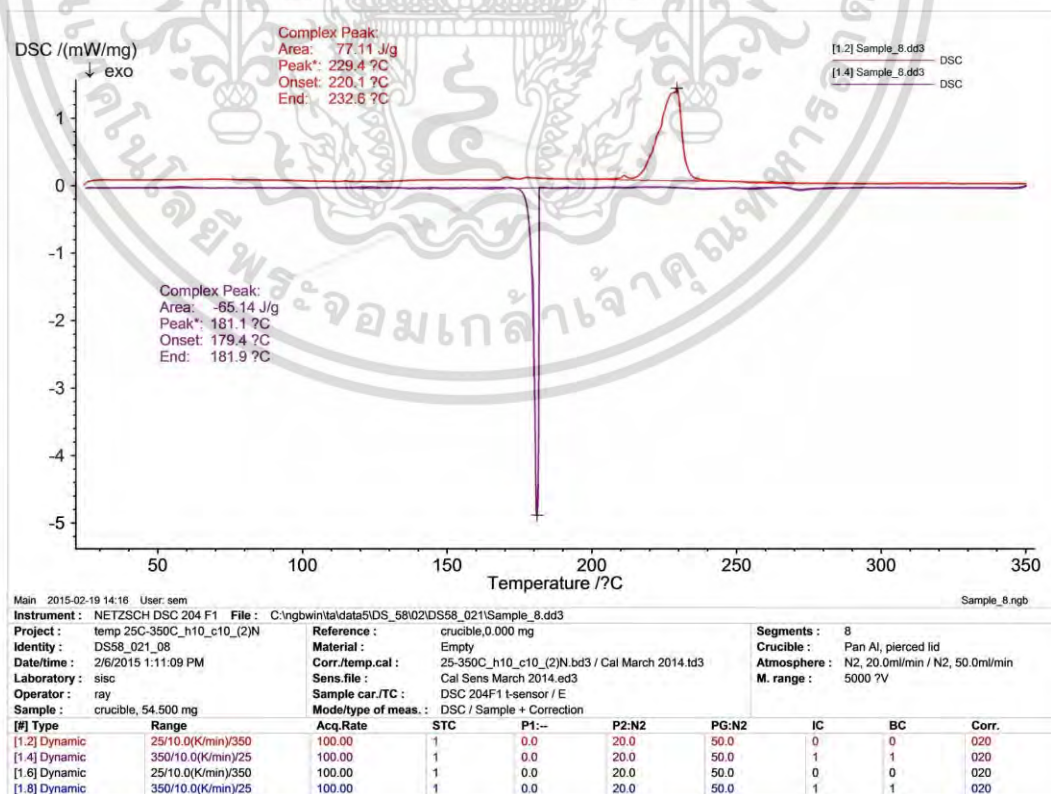


รูปที่ ค.6 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ใ้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารได้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

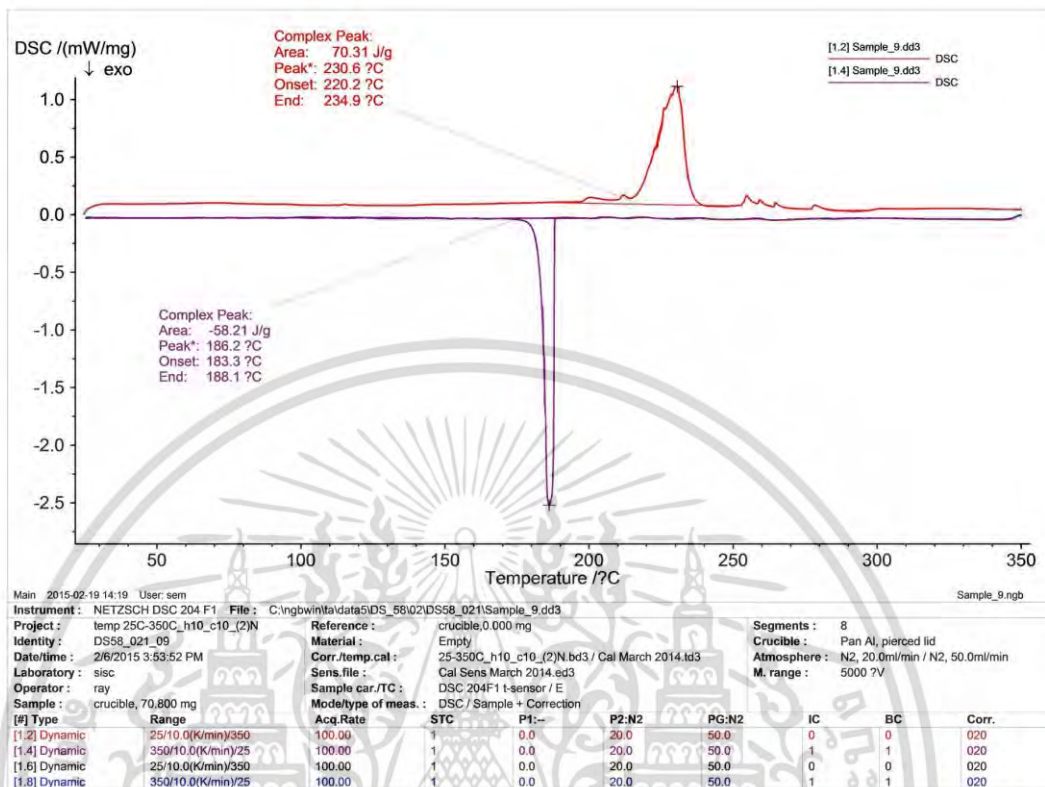


รูปที่ ค.7 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO₂-0.5In

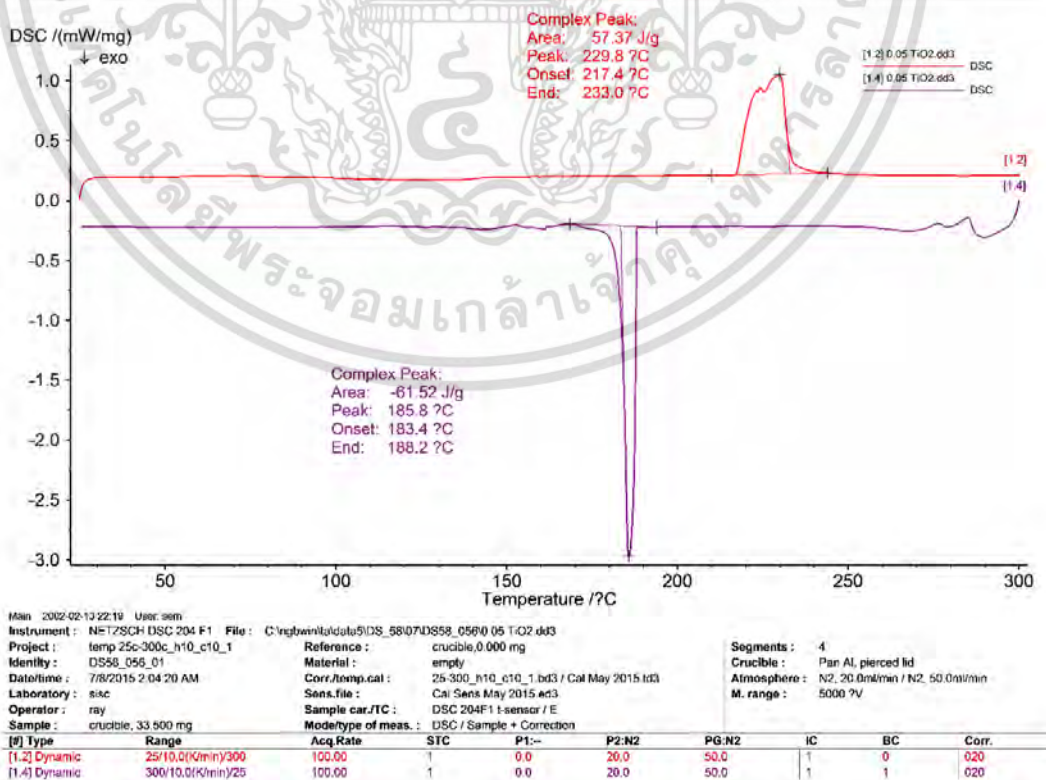


รูปที่ ค.8 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO₂-0.5In

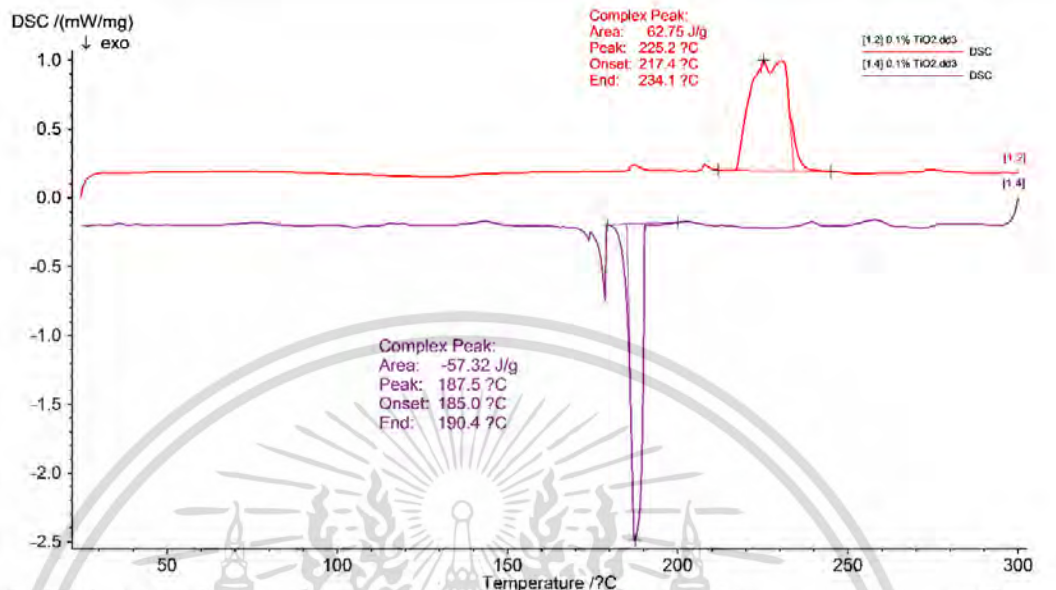
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น มิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO₂-0.5In



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ ค.10 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.05TiO₂ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Main: 2012 02 13 22:14 User: som

Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwin\lal\jula5\DS_58\07\DS58_056\0.1% TiO2.d03

Project: temp 250-300c_h10_c10_1 Reference: crucible,0.000 mg

Identity: DS58_056_02 Material: empty

Date/time: 7/8/2015 3:25:00 AM Corr./temp.cal: 25-300_h10_c10_1.bd3 / Cal May 2015 Id3

Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sen4 May 2015 ed3

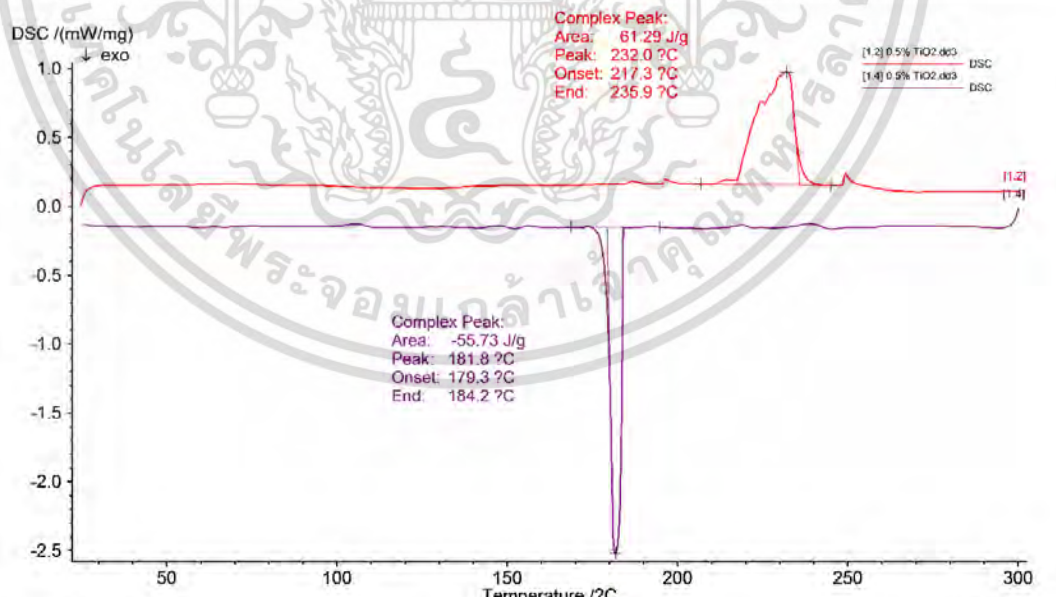
Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E

Sample: crucible_40 200 mg Model/type of meas.: DSC / Sample + Correction

Segments: 4
 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 M. range: 5000 ?V

[#] Type	Range	Acq Rate	STC	P1:-	P2:N2	P6:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/300	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	300/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ ค.11 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂



Main: 2012 02 13 22:23 User: som

Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwin\lal\jula5\DS_58\07\DS58_056\0.5% TiO2.d03

Project: temp 250-300c_h10_c10_1 Reference: crucible,0.000 mg

Identity: DS58_056_03 Material: empty

Date/time: 7/10/2015 12:53:04 AM Corr./temp.cal: 25-300_h10_c10_1.bd3 / Cal May 2015 Id3

Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sen4 May 2015 ed3

Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E

Sample: crucible_53 200 mg Model/type of meas.: DSC / Sample + Correction

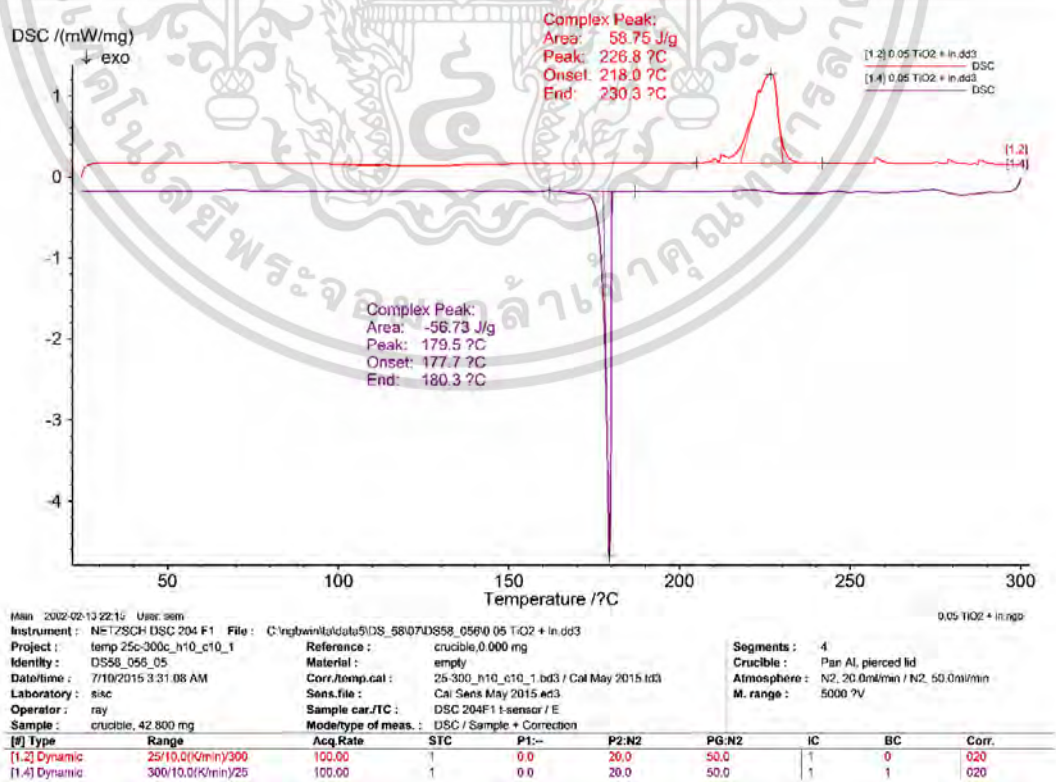
Segments: 4
 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 M. range: 5000 ?V

[#] Type	Range	Acq Rate	STC	P1:-	P2:N2	P6:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/300	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	320
[1.4] Dynamic	300/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ค.12 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

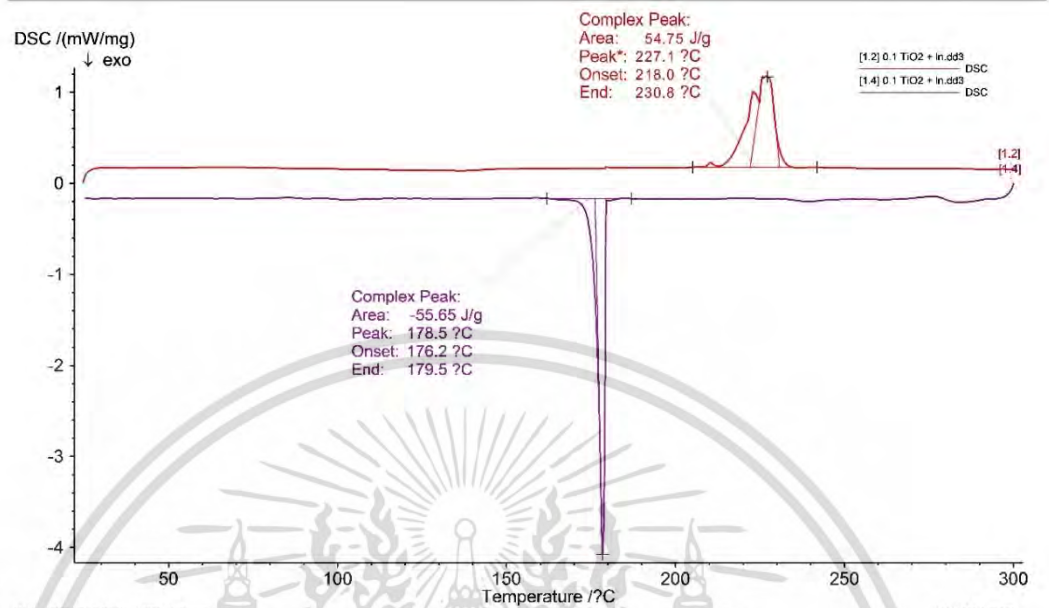


รูปที่ ค.13 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂



รูปที่ ค.14 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.05TiO₂-0.5In

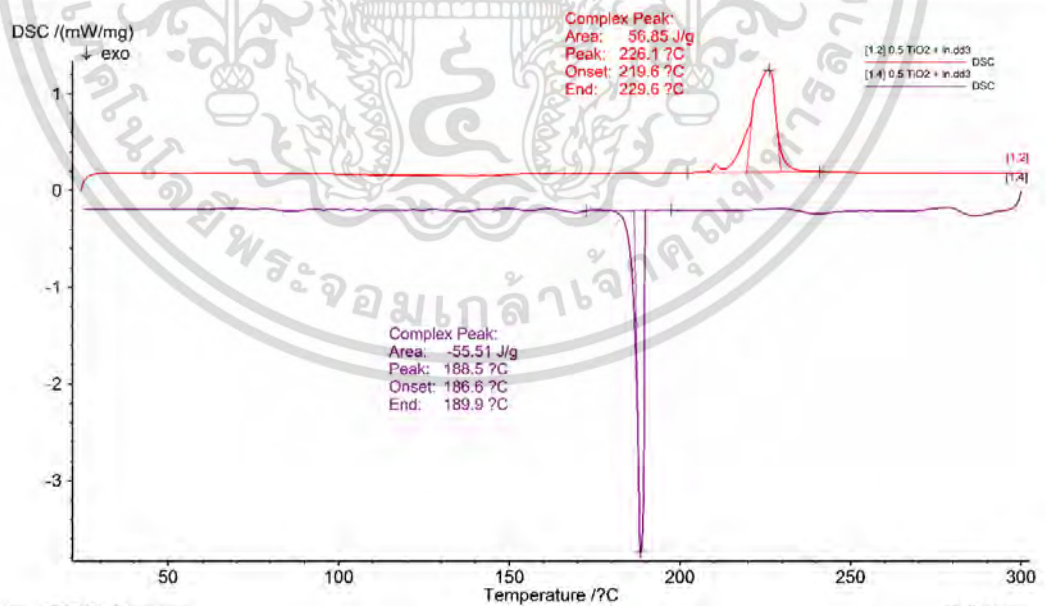
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Main: 2002-02-13 22:10 User: sem
Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngwin\ltd\data5\DS_58\07\DS58_056\0.1 TiO2 + In.dd3
Project: temp 25c-300c_h10_c10_1 Reference: crucible,0.000 mg Segments: 4
Identity: DS58_056_06 Material: empty Crucible: Pan Al, pierced lid
Date/time: 7/10/2015 4:50:17 AM Corr./temp.cal: 25-300_h10_c10_1.bd3 / Cal May 2015.td3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2015.ed3 M. range: 5000 ?V
Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E
Sample: crucible, 42.800 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#] Type	Range	Acq. Rate	STC	P1:-	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/300	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	300/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ ค.15 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂-0.5In

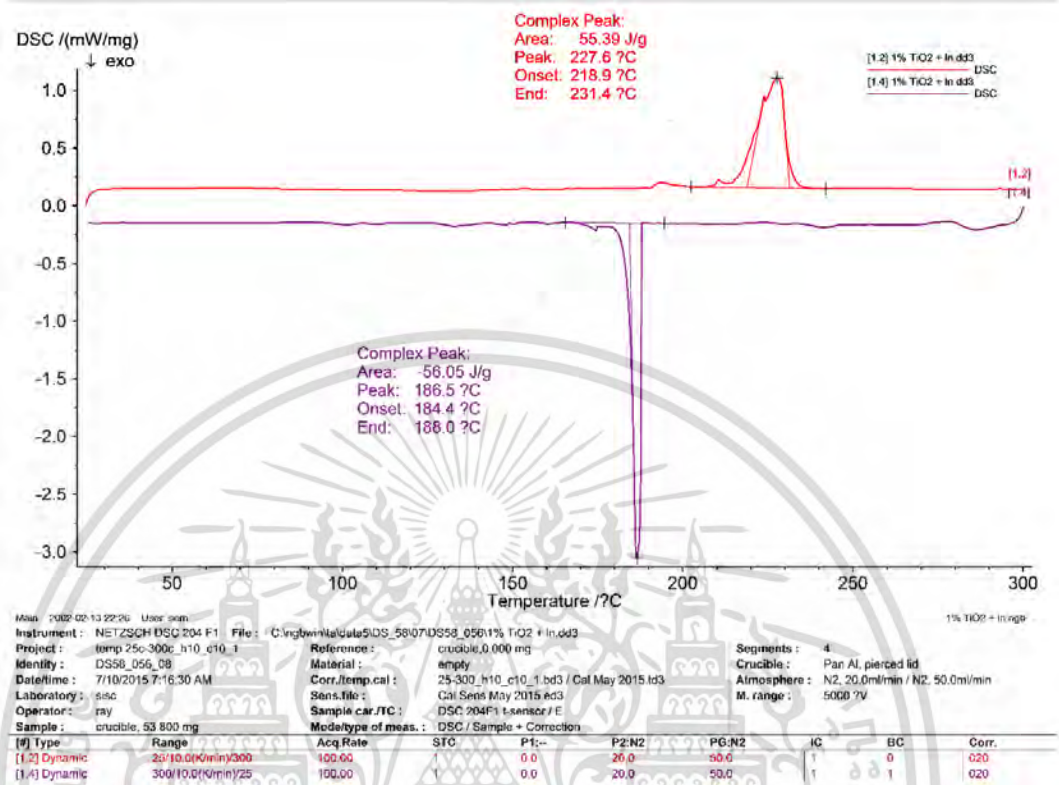


Main: 2002-02-13 22:17 User: sem
Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngwin\ltd\data5\DS_58\07\DS58_056\0.5 TiO2 + In.dd3
Project: temp 25c-300c_h10_c10_1 Reference: crucible,0.000 mg Segments: 4
Identity: DS58_056_07 Material: empty Crucible: Pan Al, pierced lid
Date/time: 7/10/2015 6:01:05 AM Corr./temp.cal: 25-300_h10_c10_1.bd3 / Cal May 2015.td3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2015.ed3 M. range: 5000 ?V
Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E
Sample: crucible, 38.200 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#] Type	Range	Acq. Rate	STC	P1:-	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/300	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	300/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ ค.16 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂-0.5In

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



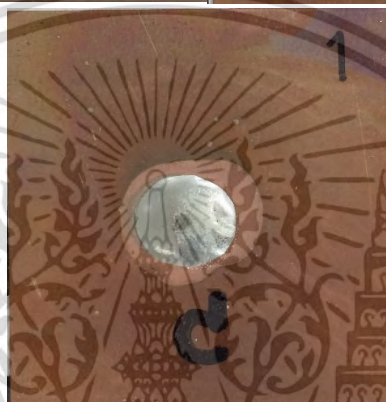
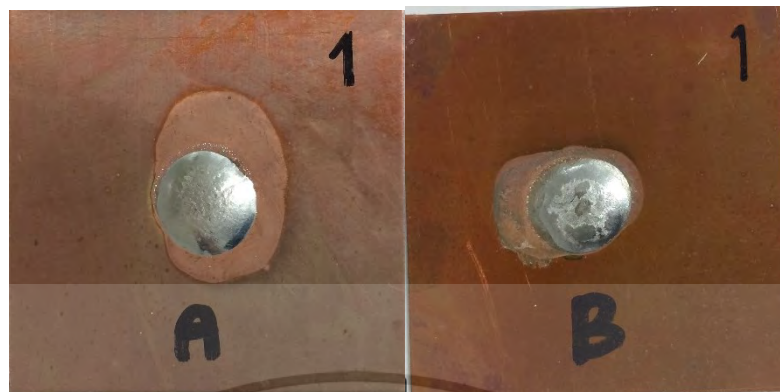
รูปที่ ค.17 ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.
การกระจายตัวของโลหะบัดกรี

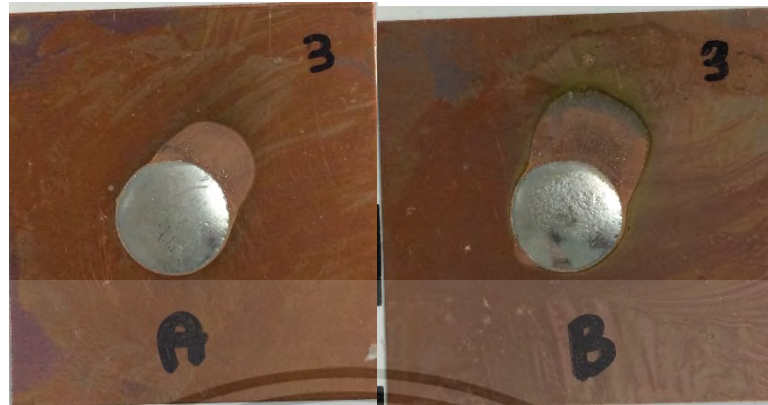
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.1 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ ง.2 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO₂** ชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

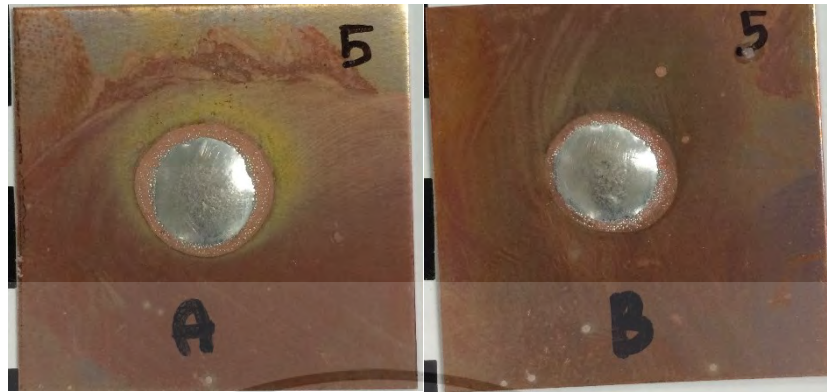


รูปที่ ๓.3 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO_2



รูปที่ ๓.4 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

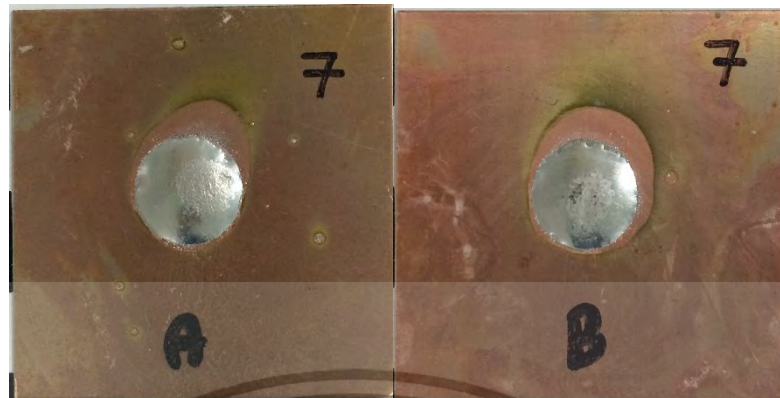


รูปที่ ง.5 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO_2

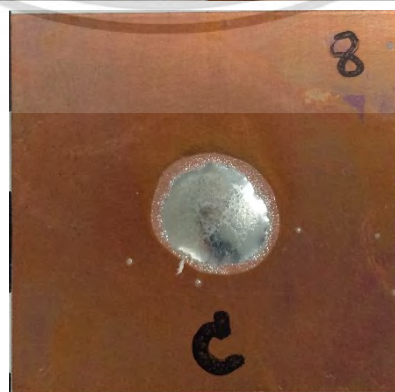


รูปที่ ง.6 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

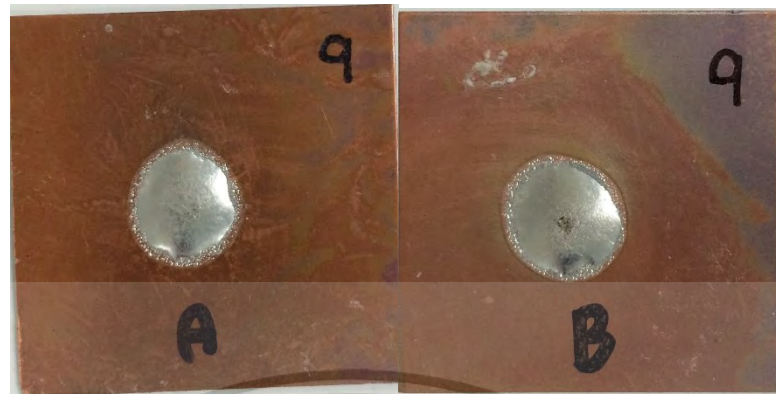


รูปที่ ๗.๗ การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO_2 -0.5In

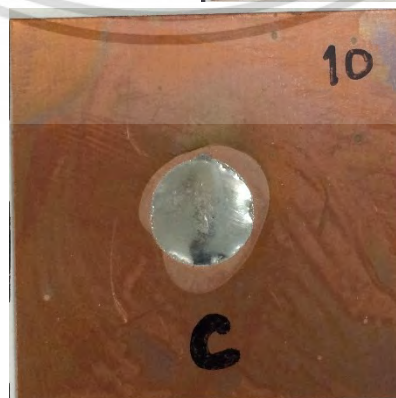


รูปที่ ๗.๘ การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO_2 -0.5In

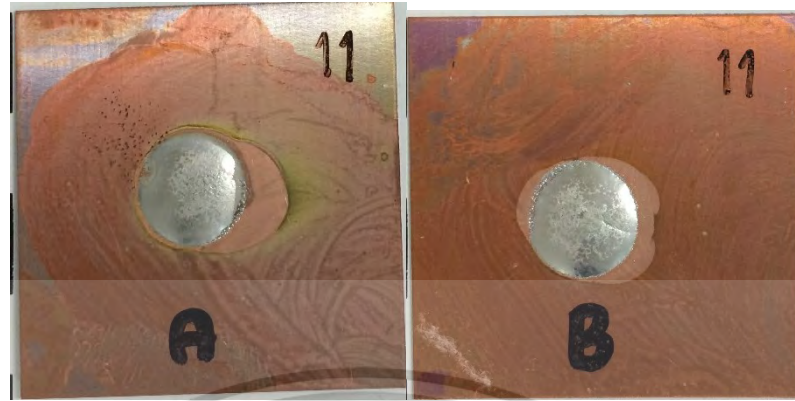
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



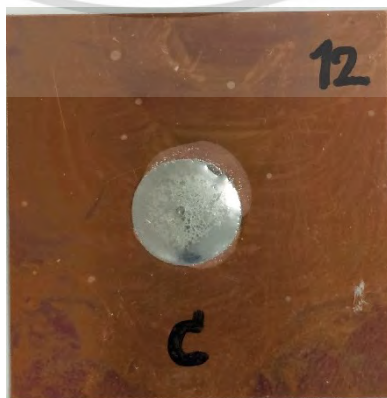
รูปที่ ๙.๙ การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO_2 -0.5In



รูปที่ ๙.๑๐ การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.05 TiO_2
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.11 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂

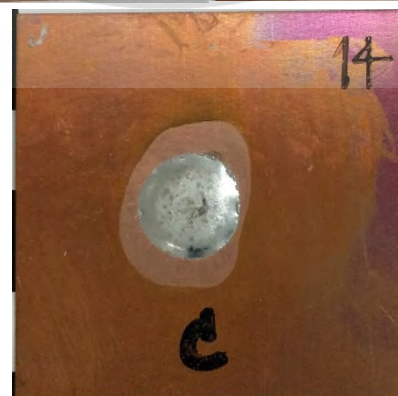


รูปที่ ง.12 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

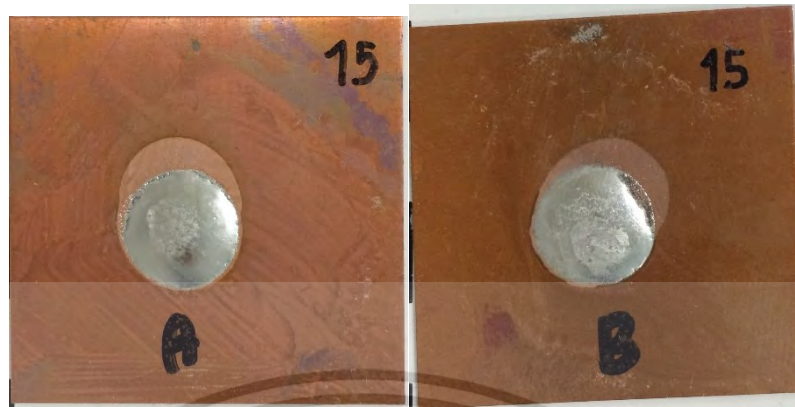


รูปที่ ง.13 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂

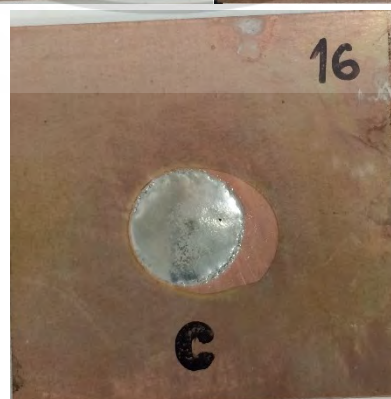


รูปที่ ง.14 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.05TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้เห็นเห็นได้โปรดแจ้งไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15.15 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂-0.5In



รูปที่ 16 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้ซื้อเห็นหนังสือฉบับนี้โปรดแจ้งให้ทราบถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.17 การกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ผลการวัดพื้นที่จากโปรแกรม Image-Pro Express@

โลหะบัดกรี	พื้นที่การกระจายตัว (ตารางมิลลิเมตร)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	36.42	33.515	32.35	33.65	1.92
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	37.08	34.3	35.9	35.6	1.14
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	45.27	43.73	37.9	42.40	3.18
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	32.73	33.95	33.89	33.2	0.74
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	38.62	36.18	33.06	35.73	2.31
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	38.02	35.78	40.64	37.18	2.76
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	41.025	40.46	39.4	39.50	1.71
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	36.93	42.9	39.53	40.64	2.98
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	37.69	42.48	37	38.85	2.46
SAC305-0.05TiO ₂	43.55	40.89	37.57	40.5	2.45
SAC305-0.10TiO ₂	42.63	44.23	40.139	45.22	6.02
SAC305-0.50TiO ₂	42.1	42.07	40.19	41.49	0.89
SAC305-1.00TiO ₂	33.7	36.45	33.14	35	1.84
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	42.72	38.79	37.13	39.30	2.39
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	47.46	46.96	45.994	45.91	1.873
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	41.62	39.15	42.63	41.50	1.63
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	41.69	38.39	43.02	40.43	2.29

ตารางที่ จ.2 ผลการวัดเส้นรอบวงจากโปรแกรม Image-Pro Express@

โลหะบัดกรี	เส้นรอบวง (มิลลิเมตร)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	6.81	6.53	6.42	6.42	0.20
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	6.87	6.61	6.76	6.72	0.13
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	7.59	7.46	6.95	7.38	0.34
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	6.46	6.58	6.57	6.44	0.07
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	7.01	6.79	6.49	6.68	0.26
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	6.96	6.75	7.20	6.61	0.22
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	7.23	7.18	7.08	6.88	0.07
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	6.86	7.39	7.10	7.42	0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 (ต่อ) ผลการวัดเส้นรอบวงจากโปรแกรม Image-Pro Express@

โลหะบัดกรี	เส้นรอบวง (มิลลิเมตร)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	6.93	7.36	6.87	6.98	0.27
SAC305-0.05TiO ₂	7.45	7.22	6.92	7.17	0.27
SAC305-0.10TiO ₂	7.37	7.51	7.15	8.29	0.18
SAC305-0.50TiO ₂	7.32	7.32	7.16	7.28	0.10
SAC305-1.00TiO ₂	6.55	6.81	6.50	6.84	0.17
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	7.38	7.03	6.88	7.01	0.26
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	7.78	7.73	7.65	7.42	0.06
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	7.28	7.06	7.37	7.37	0.16
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	7.29	6.99	7.40	7.01	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ.

ค่าทดสอบความสามารถในการพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

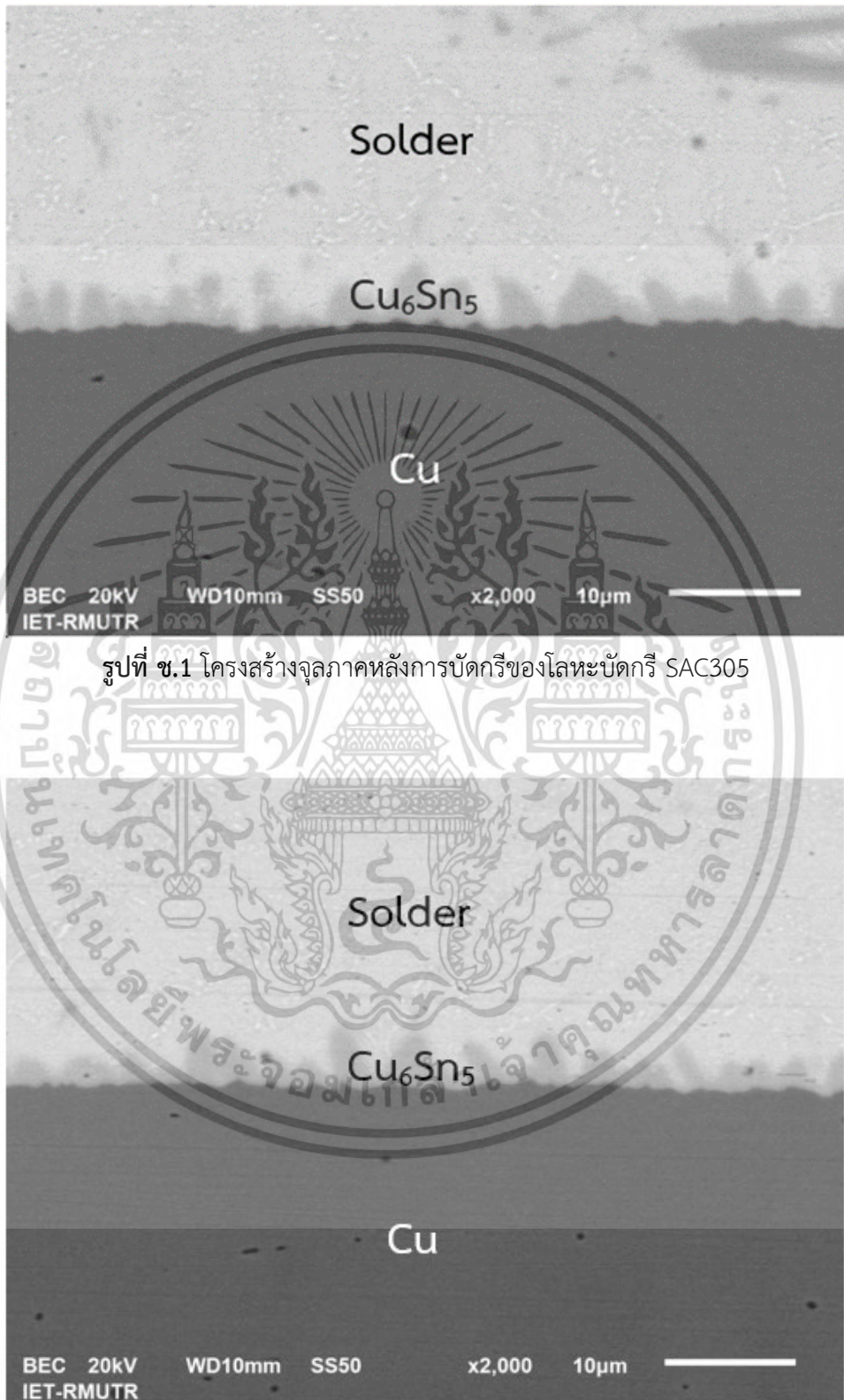
ตารางที่ ๑.1 ผลการวัดน้ำหนักของโลหะบัดกรีที่พิมพ์ลงบนแผ่นทองแดง

โลหะบัดกรี	น้ำหนักของโลหะบัดกรี (กรัม)			ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
SAC305	0.157	0.161	0.166	0.161	0.004
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	0.157	0.158	0.161	0.159	0.002
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	0.148	0.152	0.150	0.150	0.002
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	0.139	0.147	0.129	0.138	0.009
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	0.119	0.102	0.120	0.114	0.010
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	0.154	0.164	0.158	0.159	0.005
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	0.159	0.153	0.161	0.158	0.004
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	0.156	0.149	0.155	0.153	0.004
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	0.154	0.149	0.153	0.152	0.003
SAC305-0.05TiO ₂	0.157	0.160	0.158	0.158	0.002
SAC305-0.10TiO ₂	0.151	0.156	0.153	0.153	0.002
SAC305-0.50TiO ₂	0.137	0.143	0.146	0.142	0.004
SAC305-1.00TiO ₂	0.121	0.115	0.117	0.118	0.003
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	0.159	0.165	0.160	0.161	0.003
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	0.161	0.160	0.162	0.161	0.001
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	0.159	0.161	0.157	0.159	0.002
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	0.150	0.152	0.134	0.145	0.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



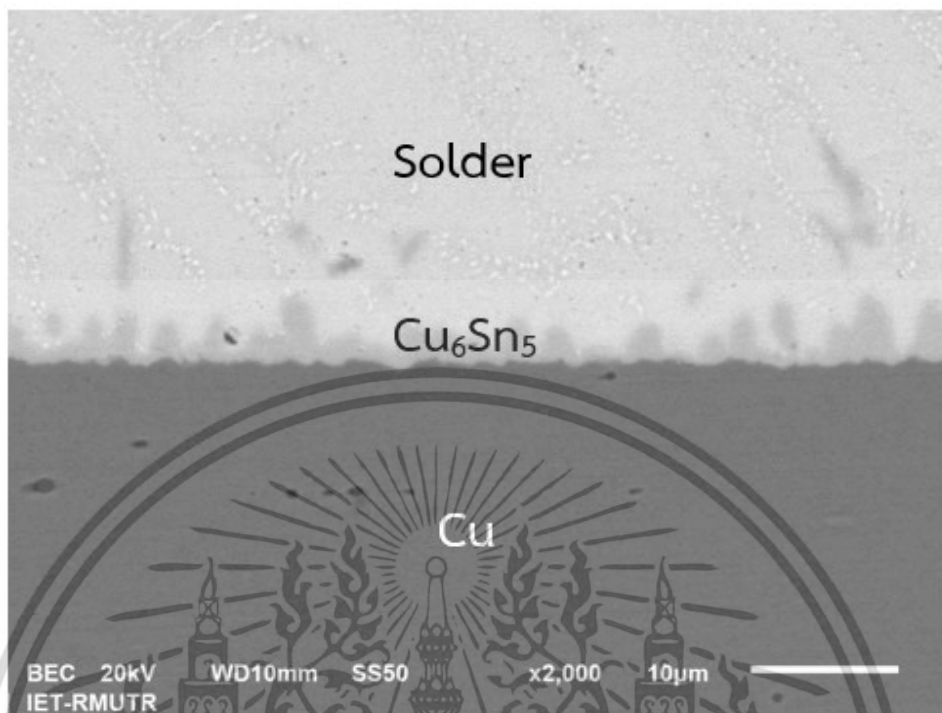
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



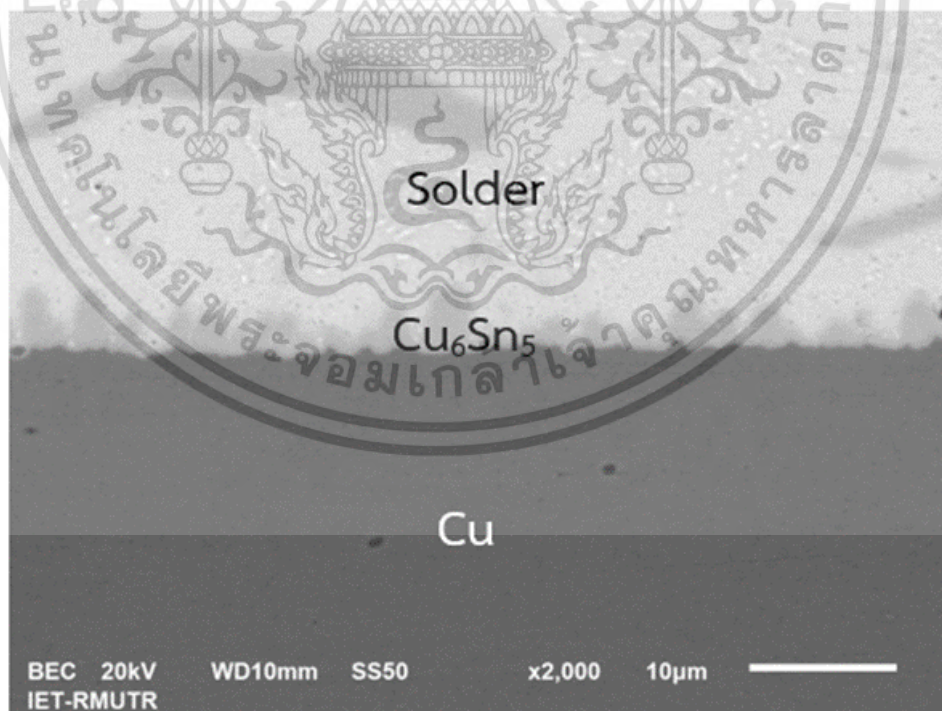
รูปที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305

รูปที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

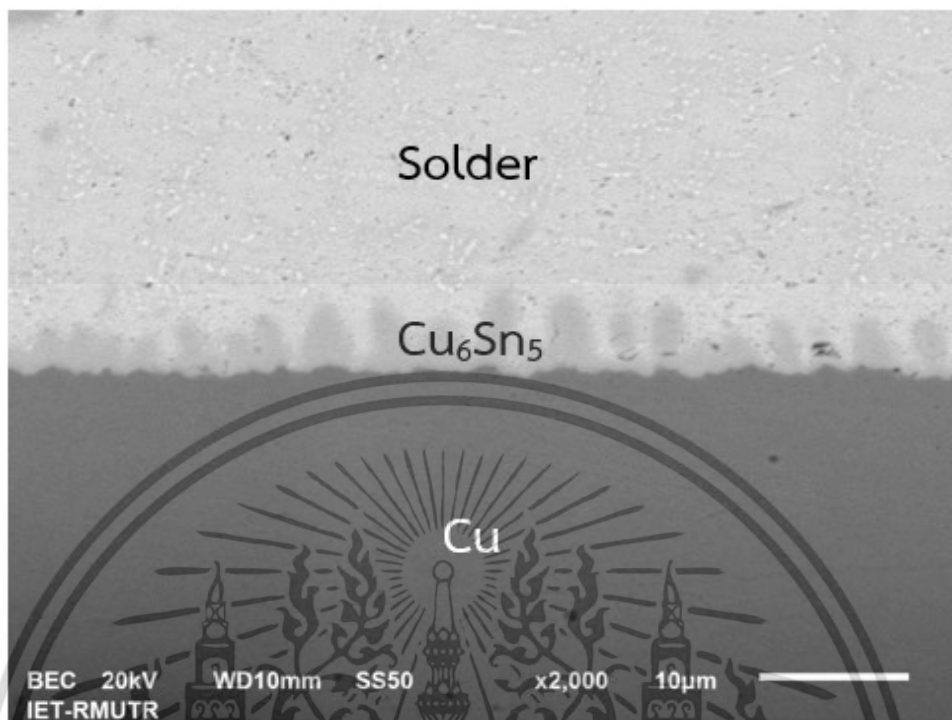


รูปที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO_2

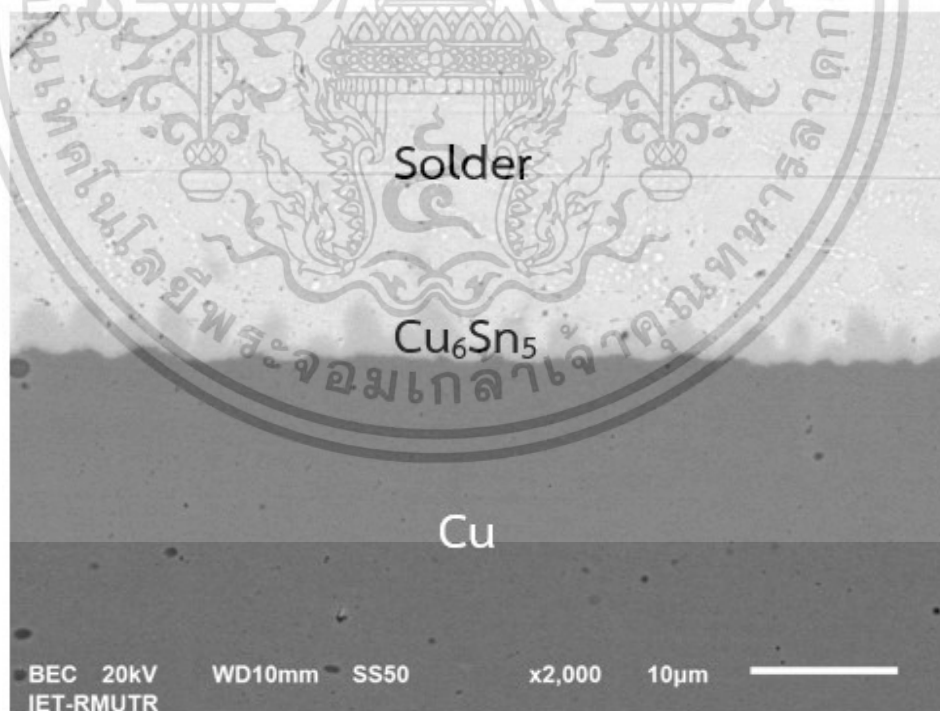


รูปที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

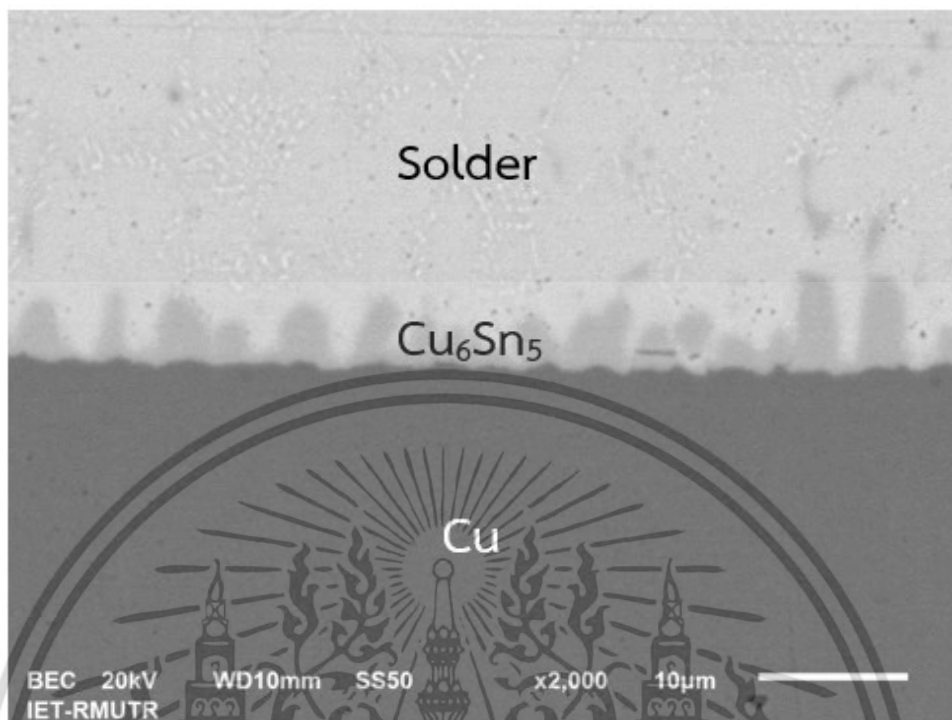


รูปที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO_2

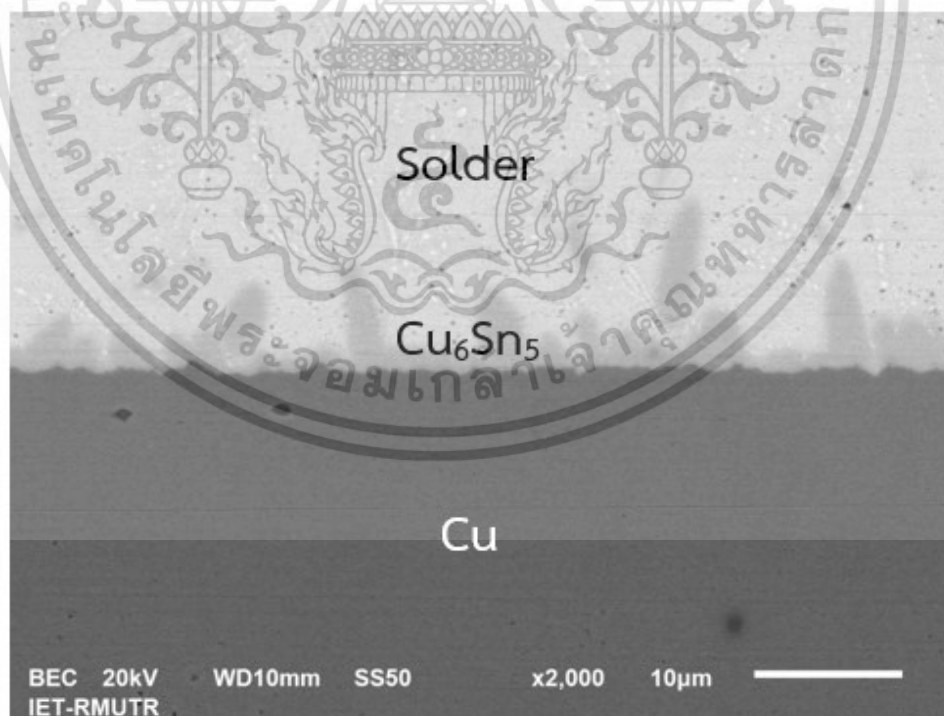


รูปที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

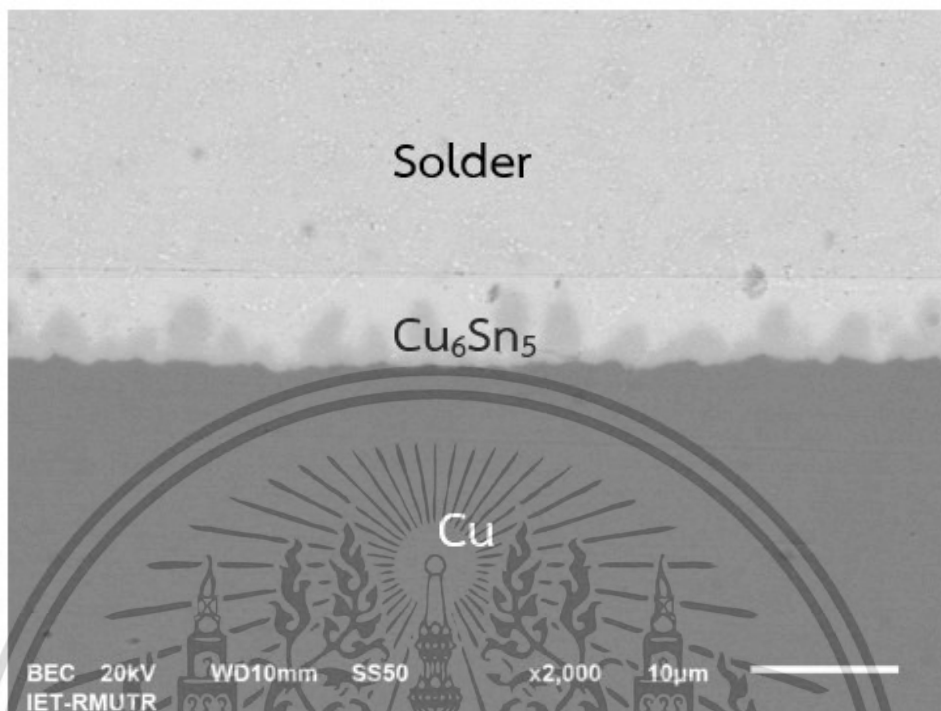


รูปที่ ข.7 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.1Mn-doped TiO_2 -0.5In

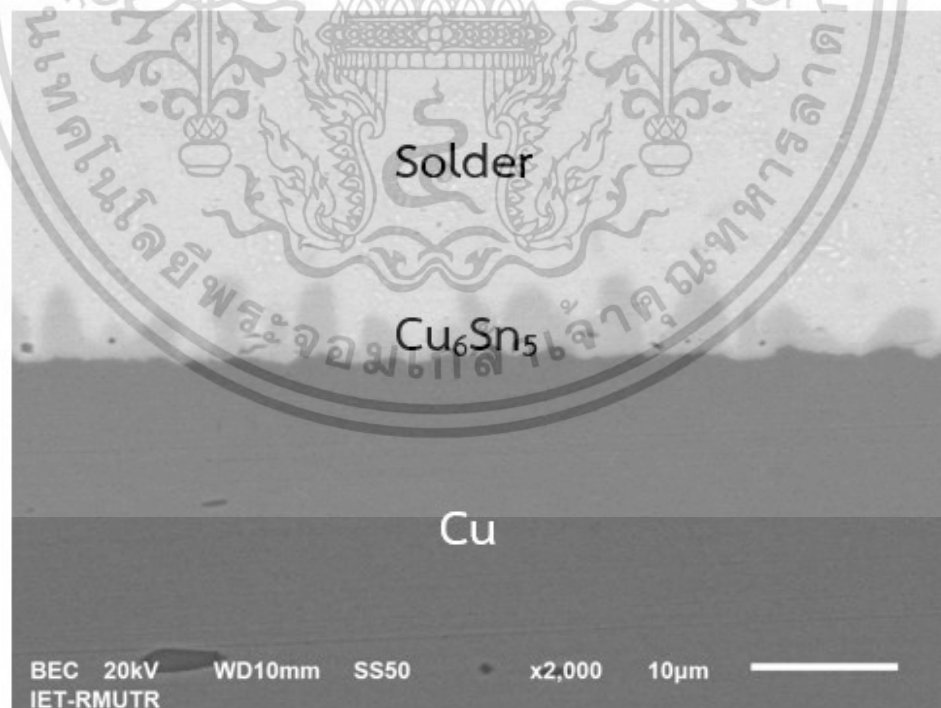


รูปที่ ข.8 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.5Mn-doped TiO_2 -0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

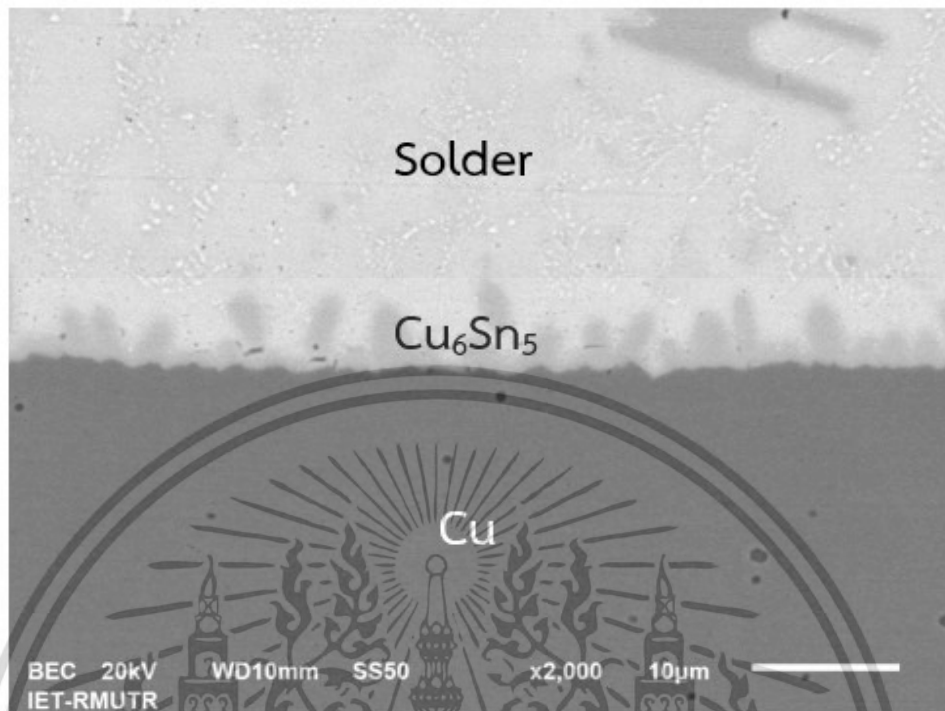


รูปที่ ข.9 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-1.0Mn-doped TiO_2 -0.5In

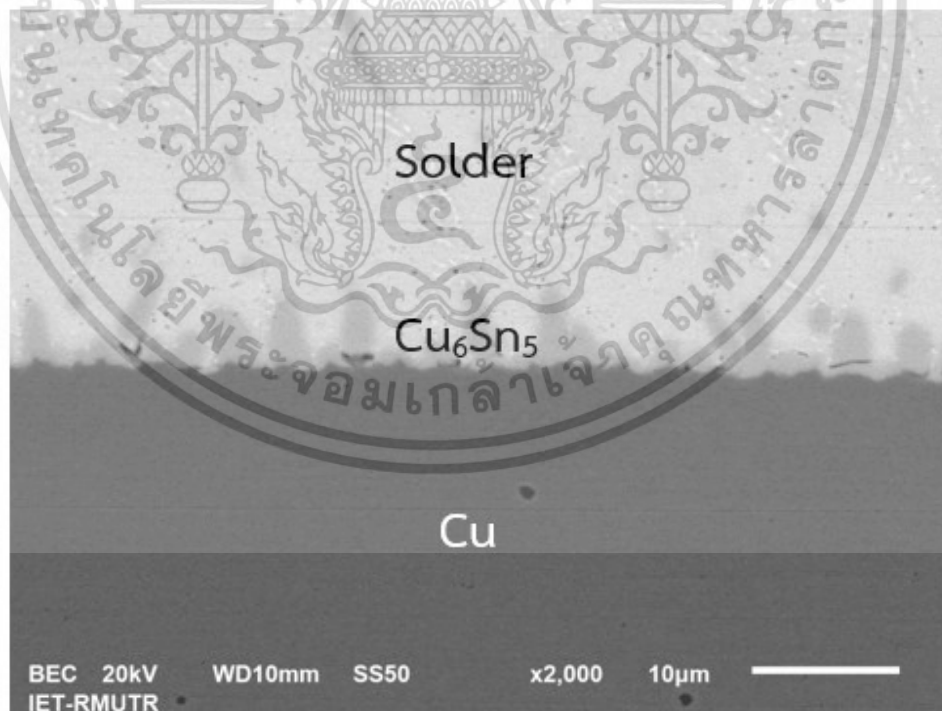


รูปที่ ข.10 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.05 TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

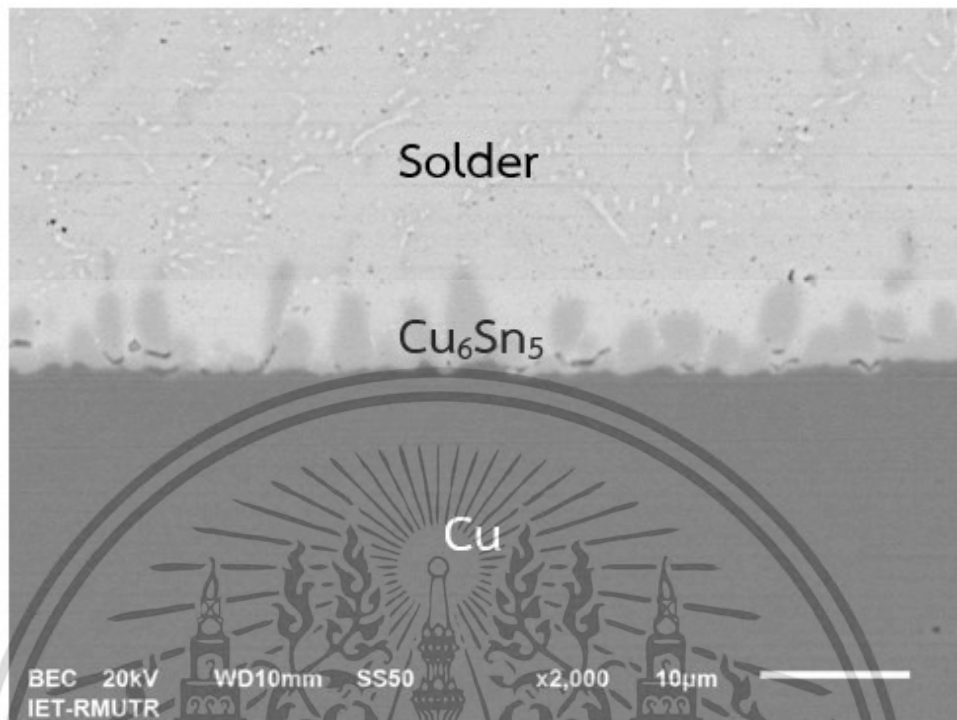


รูปที่ ข.11 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂

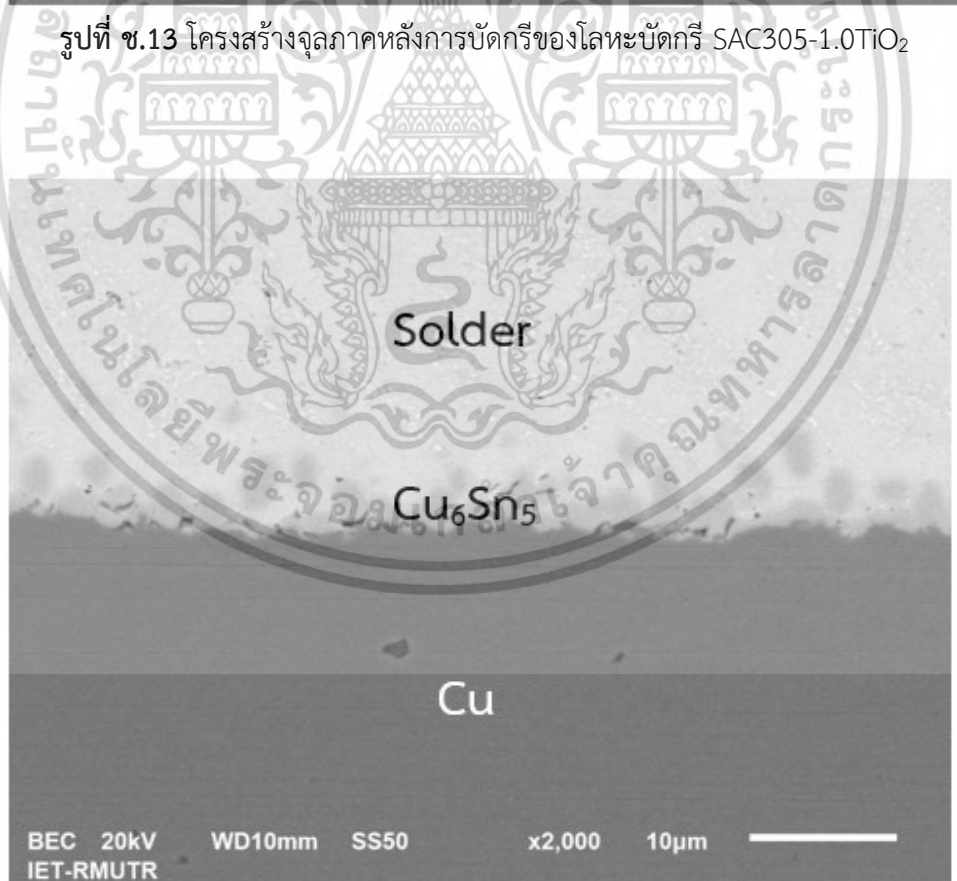


รูปที่ ข.12 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

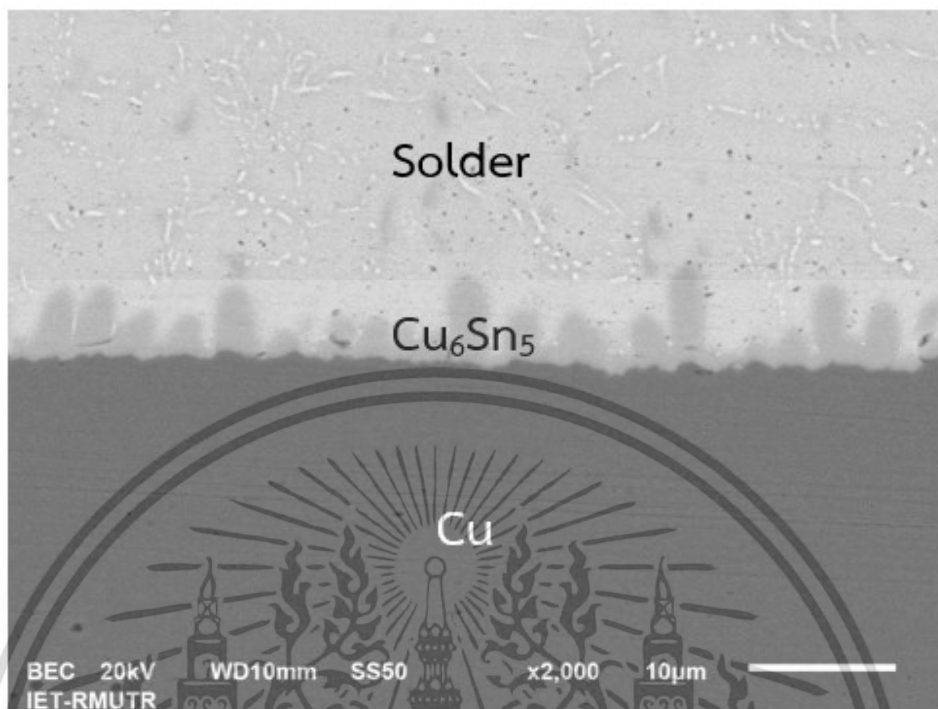


รูปที่ ข.13 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂

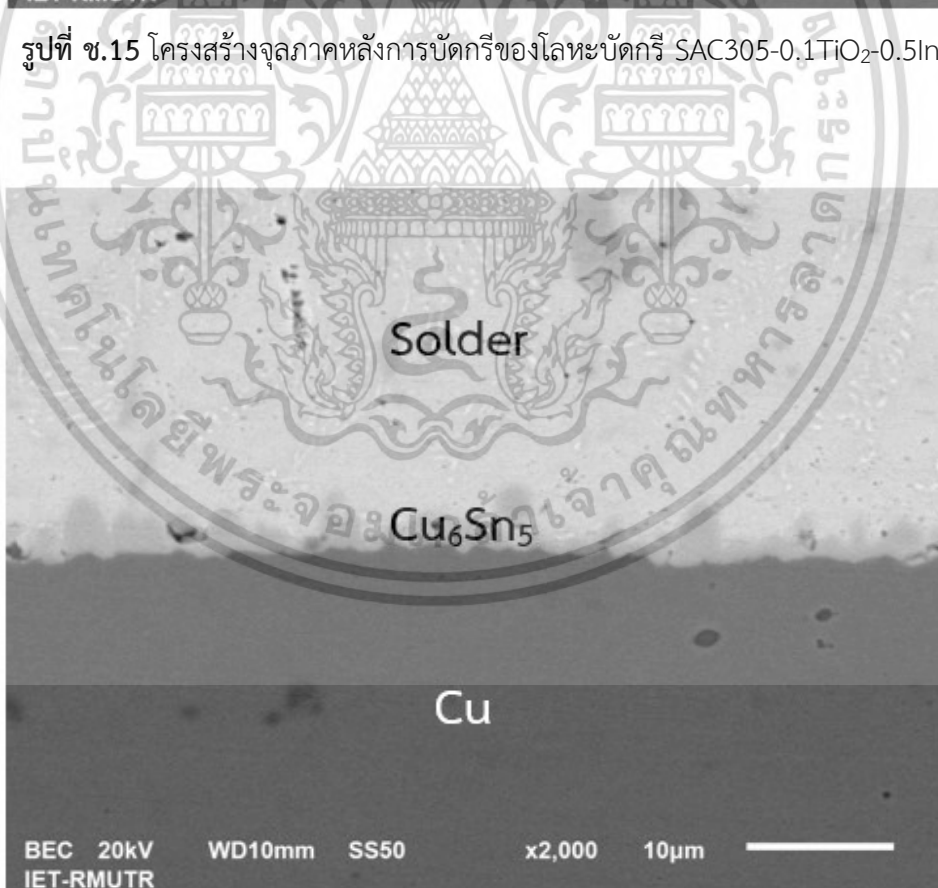


รูปที่ ข.14 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.05TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

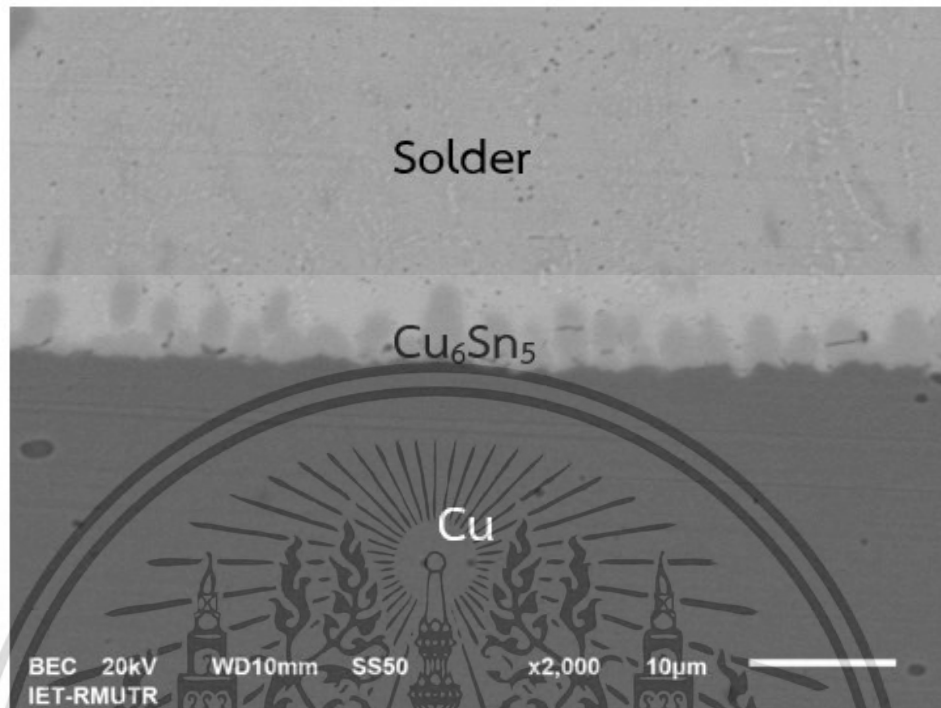


รูปที่ ข.15 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.1TiO₂-0.5In

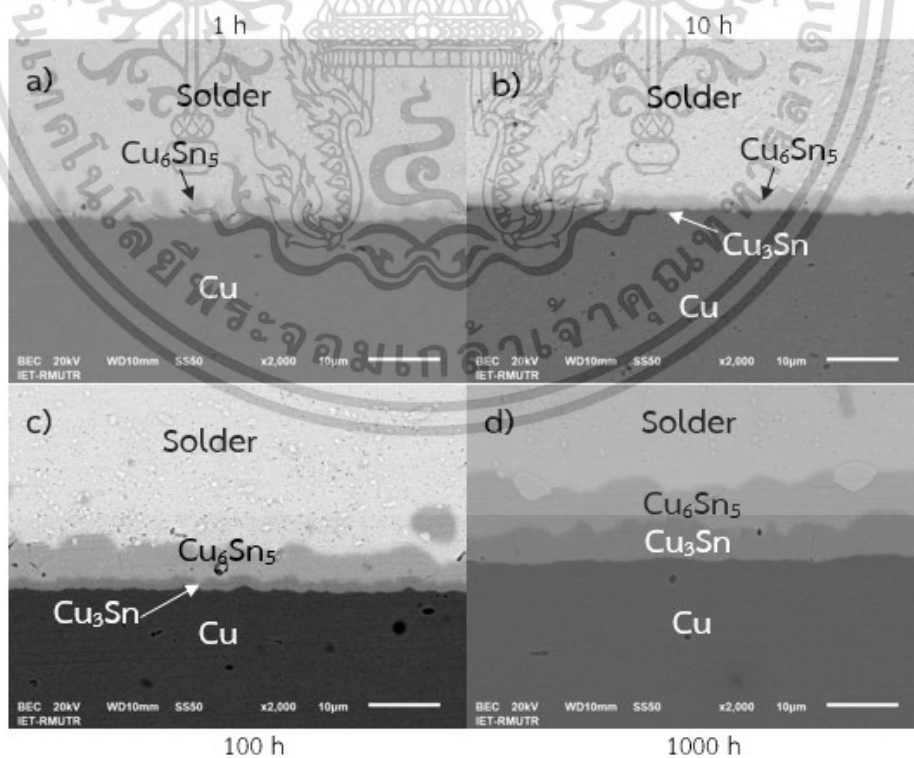


รูปที่ ข.16 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-0.5TiO₂-0.5In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



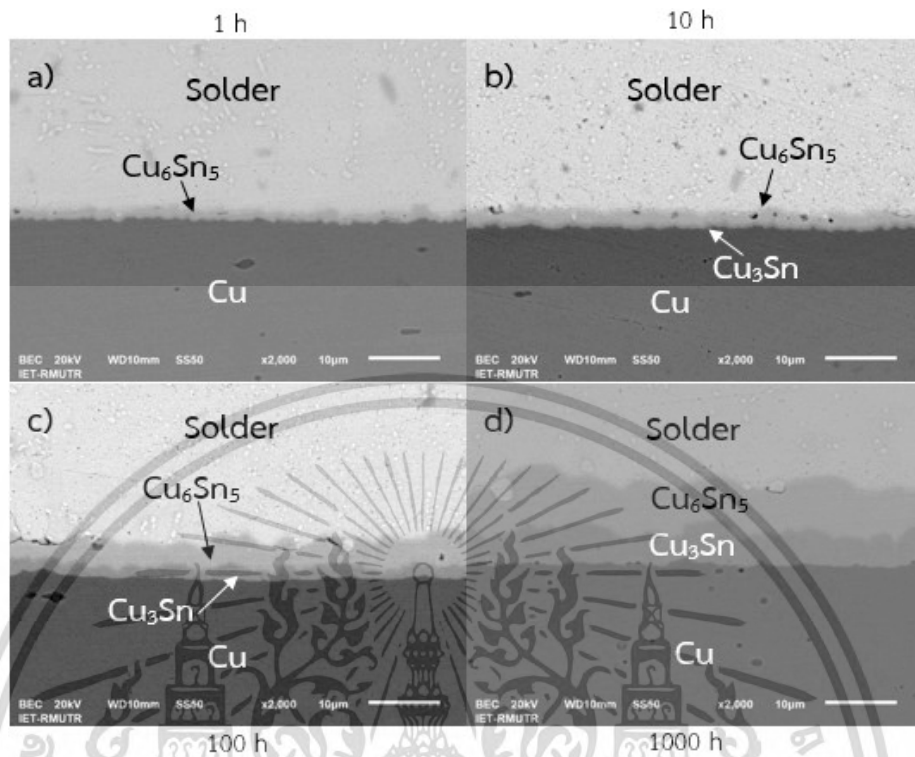
รูปที่ ข.17 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีของโลหะบัดกรี SAC305-1.0TiO₂-0.5In



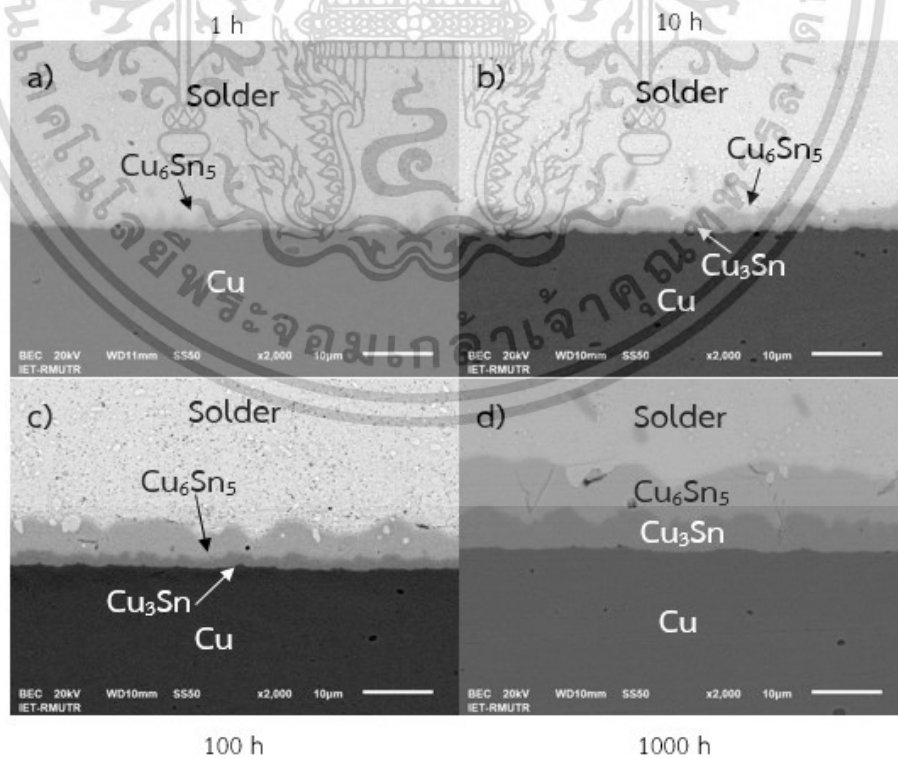
รูปที่ ข.18 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305 หลังป้อนด้วยความร้อน

a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



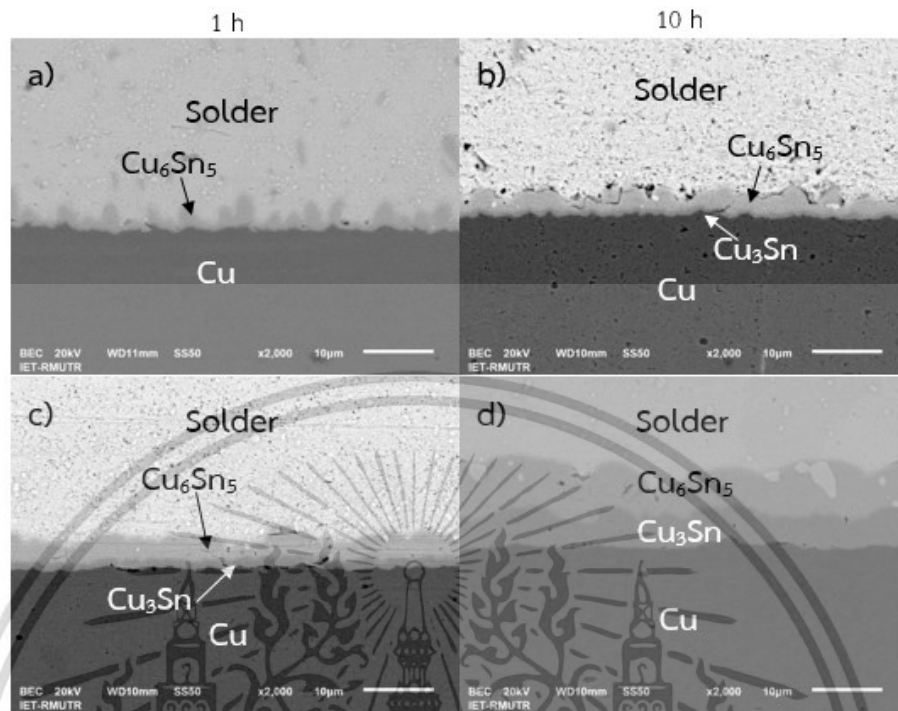
รูปที่ ข.19 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง



รูปที่ ข.20 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.1Mn-doped TiO_2 หลังบ่มด้วยความร้อน

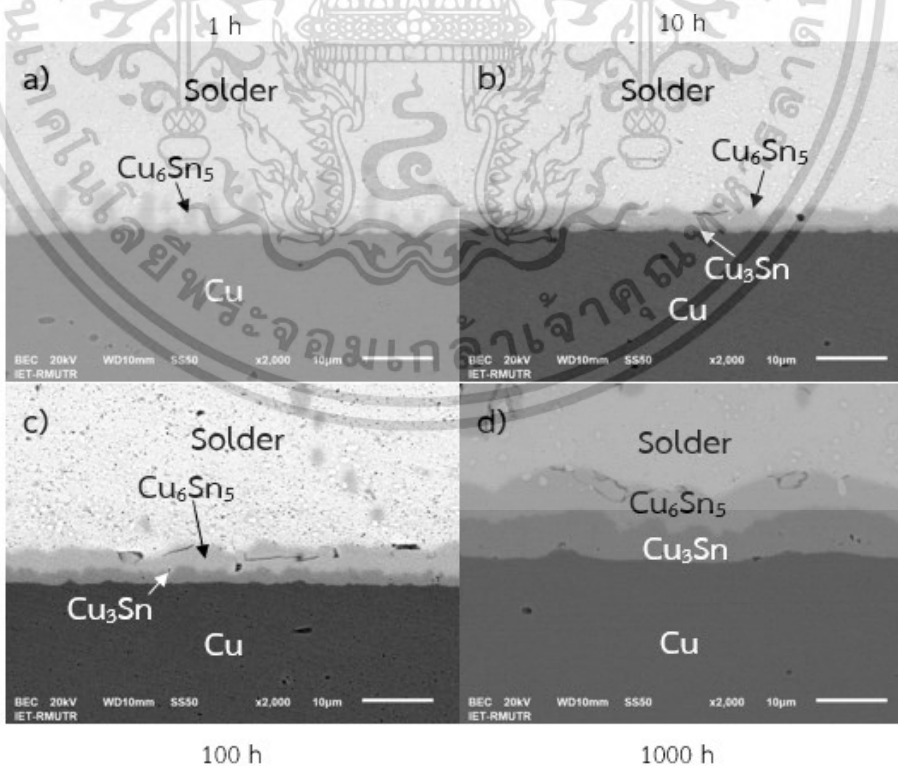
a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.21 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน

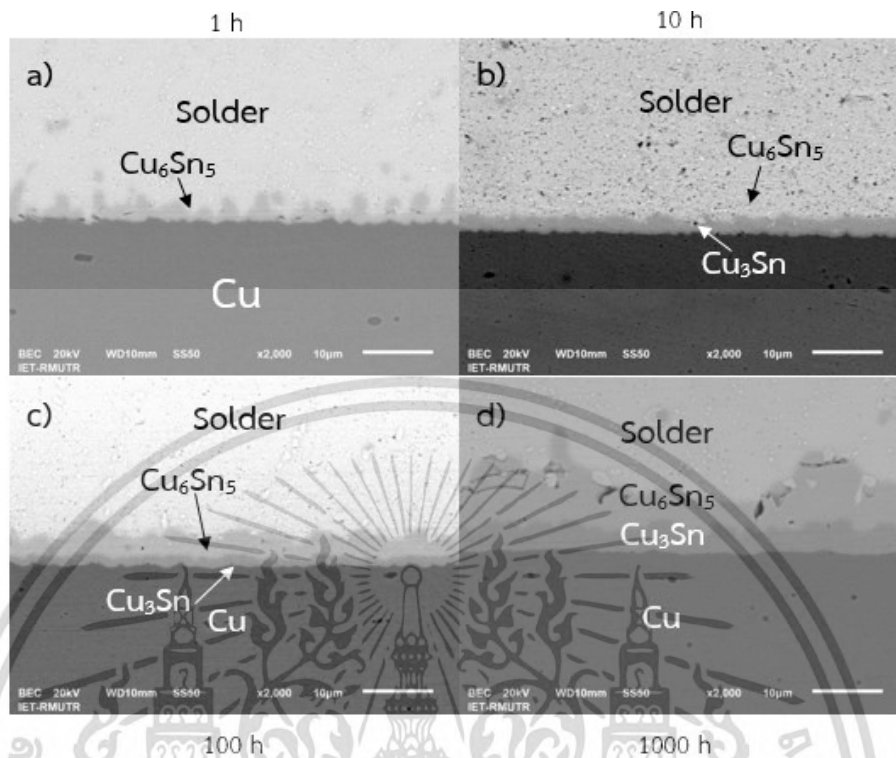
a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง



รูปที่ ข.22 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน

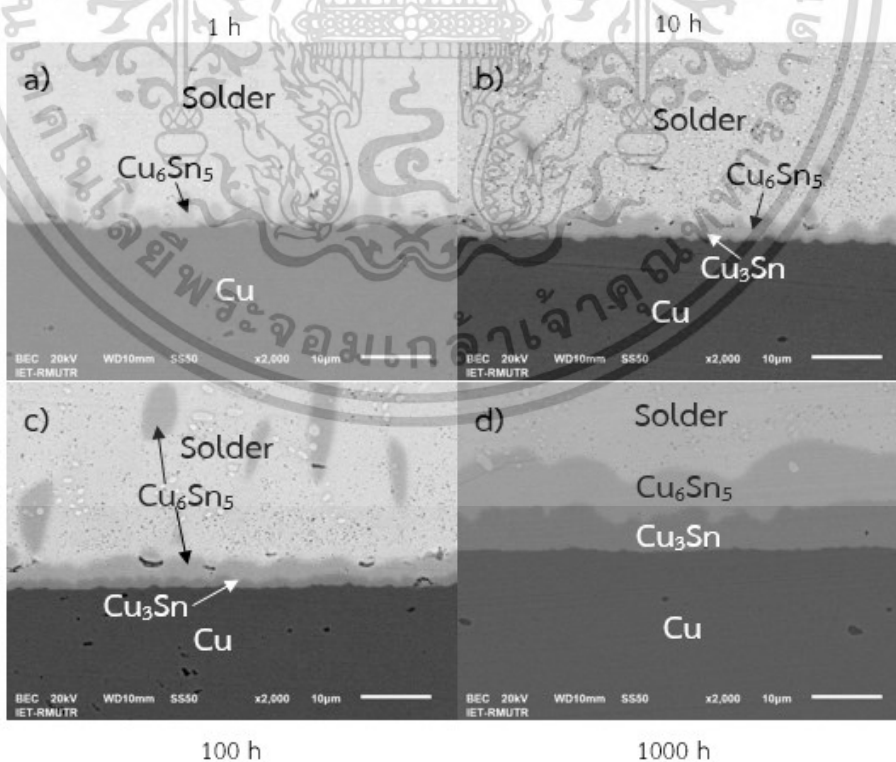
a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในเว็บไซต์นี้โปรดปฏิบัติตามเงื่อนไขการให้บริการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน

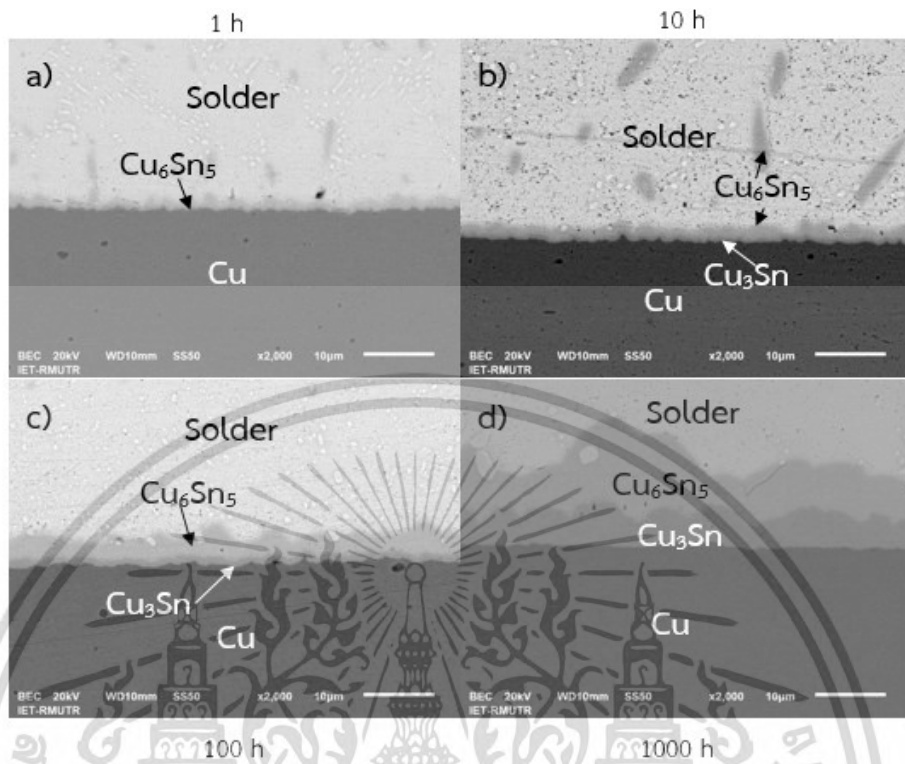
a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง



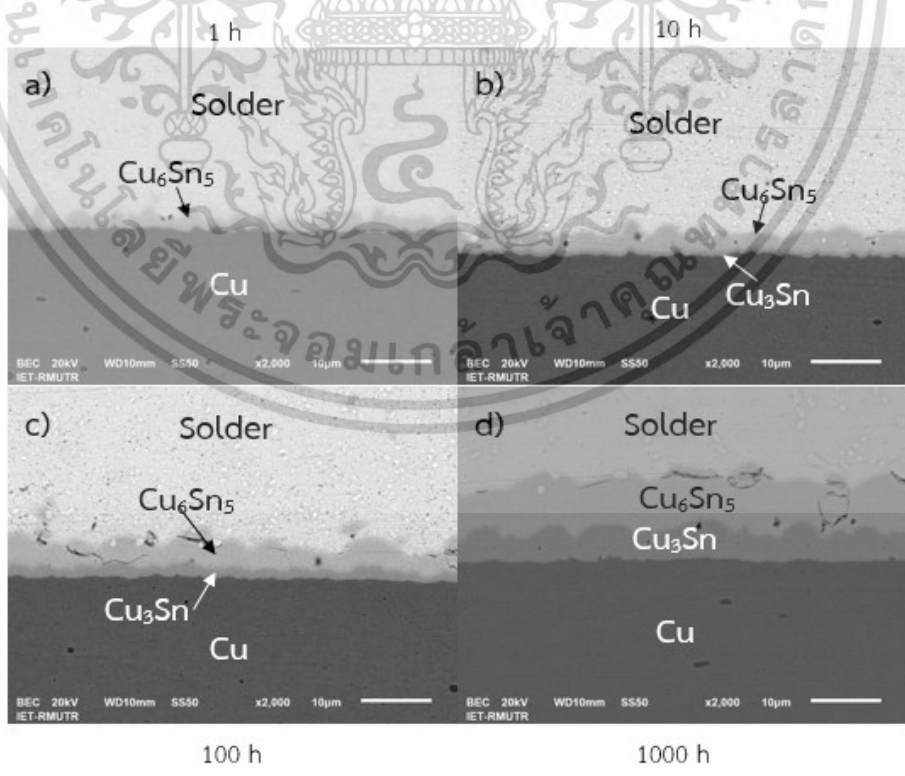
รูปที่ ข.24 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.1Mn-doped TiO_2 -0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน

a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นโปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

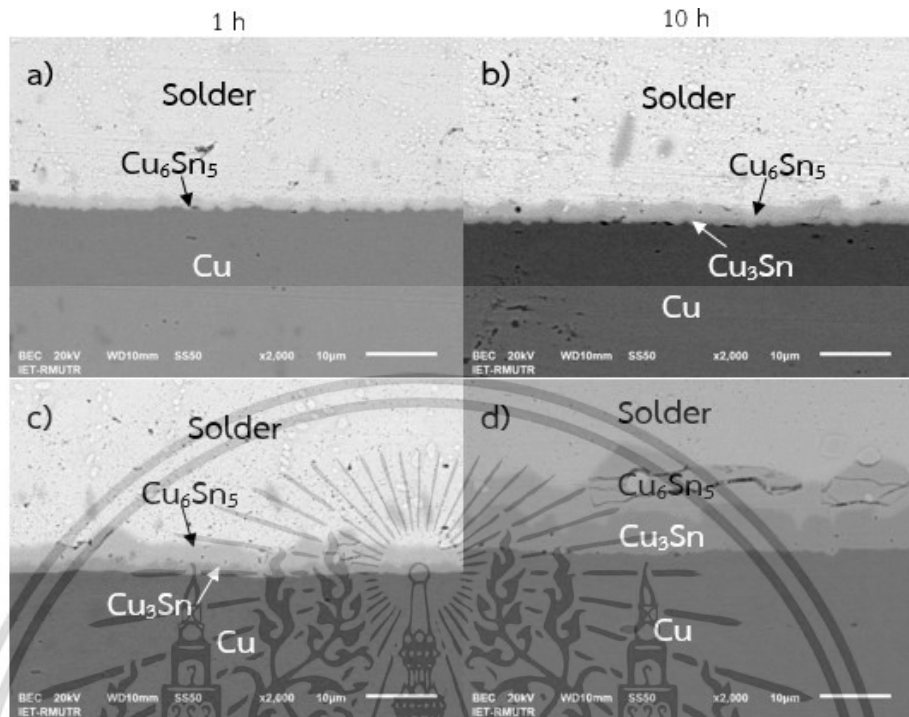


รูปที่ ข.25 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂-0.5In หลังป้อนด้วยความร้อน a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

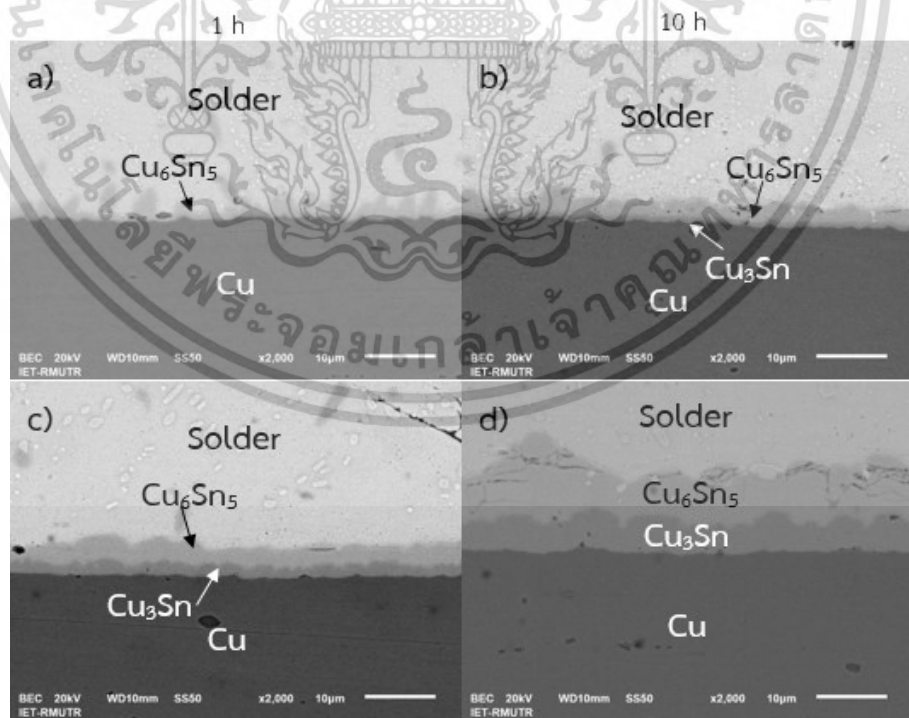


รูปที่ ข.26 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂-0.5In หลังป้อนด้วยความร้อน a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

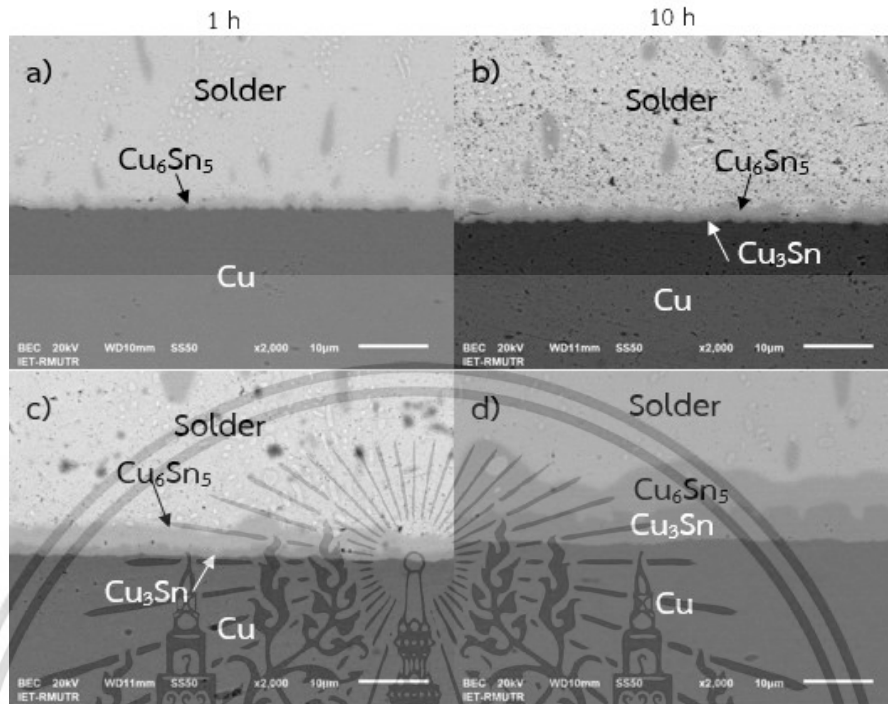


รูปที่ ข.27 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.05TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

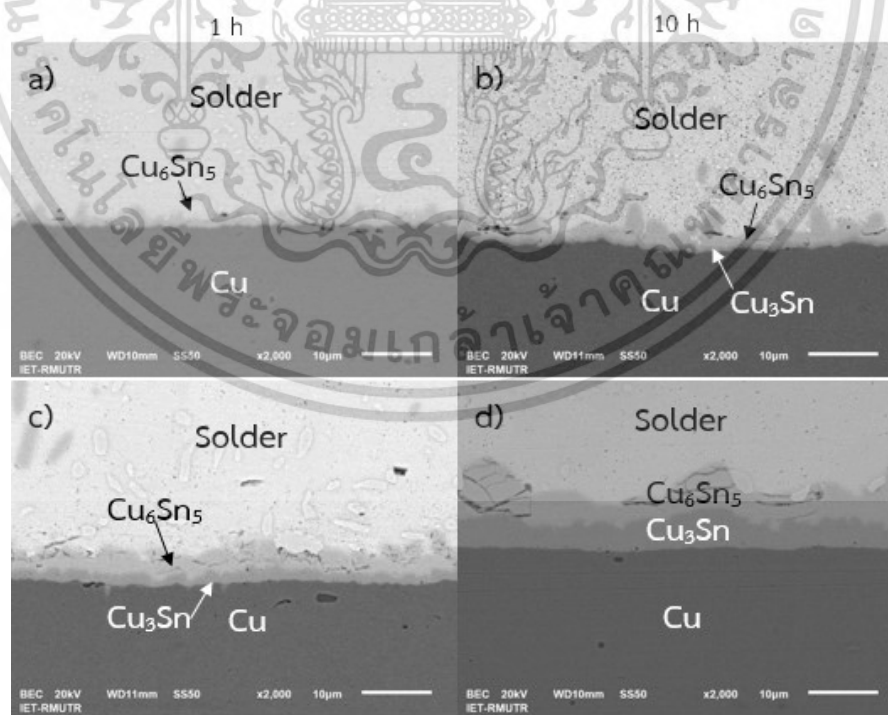


รูปที่ ข.28 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.1TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นโปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

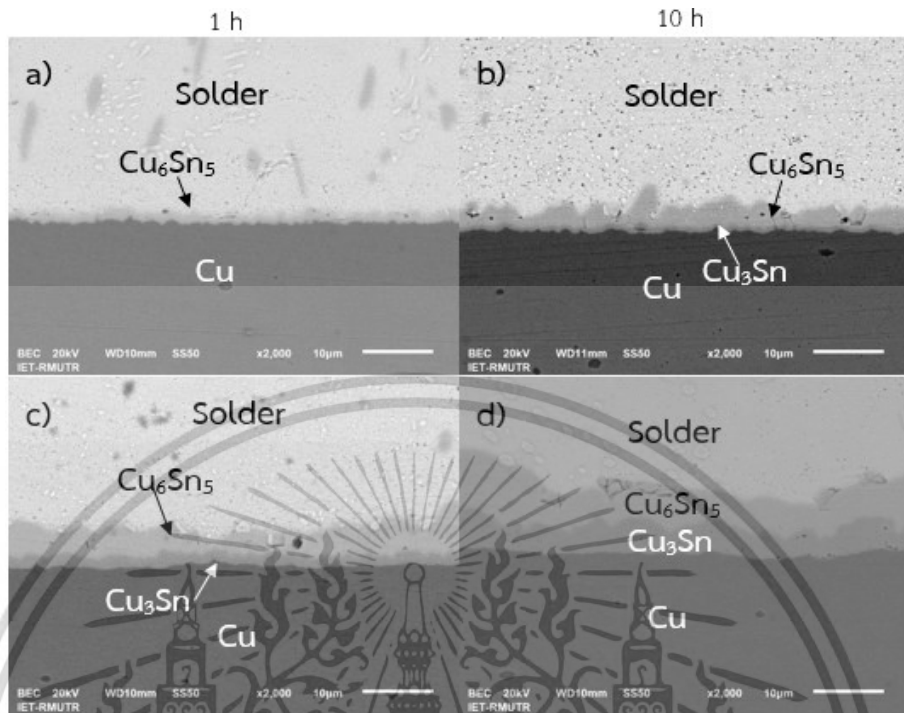


รูปที่ ข.29 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.5TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

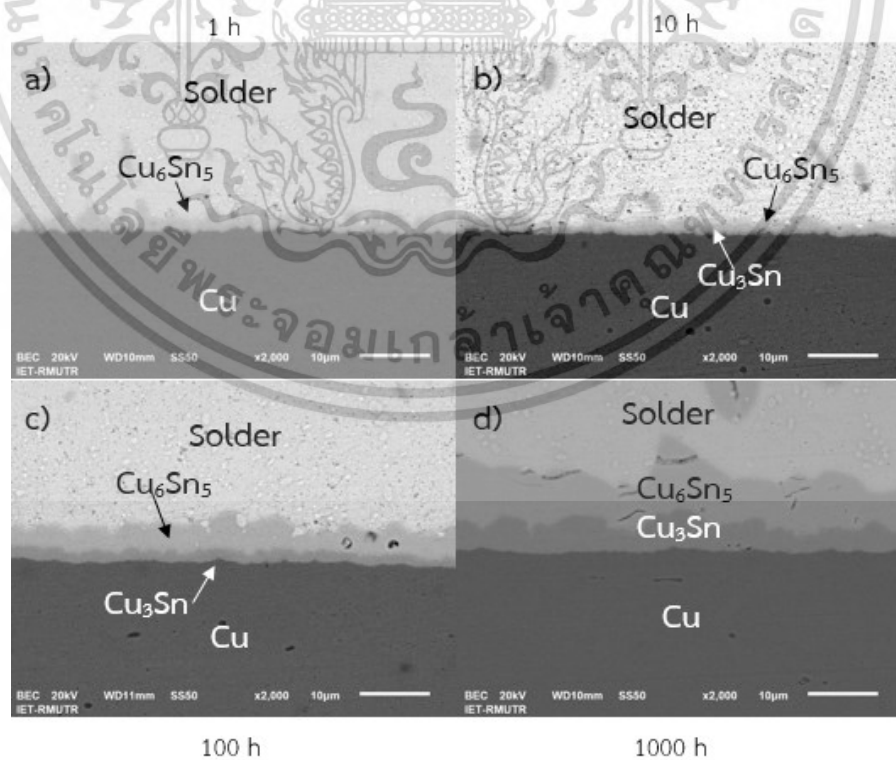


รูปที่ ข.30 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1.0TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นโปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

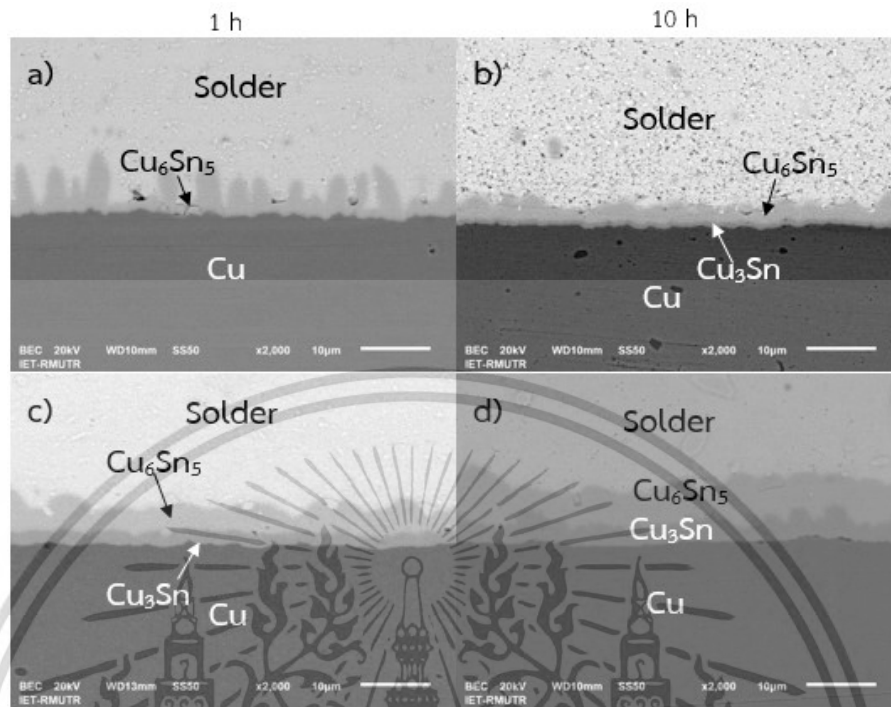


รูปที่ ข.31 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.05TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

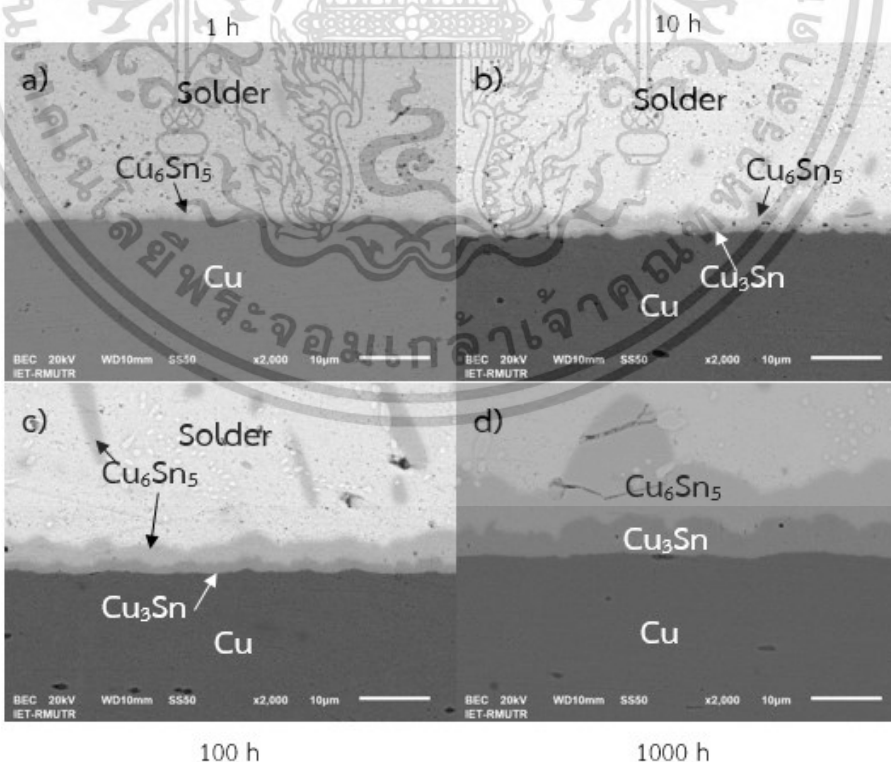


รูปที่ ข.32 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.1TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นโปรดอย่าเผยแพร่
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.33 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-0.5TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน
 a) 1 ชั่วโมง b) 10 ชั่วโมง c) 100 ชั่วโมง d) 1000 ชั่วโมง

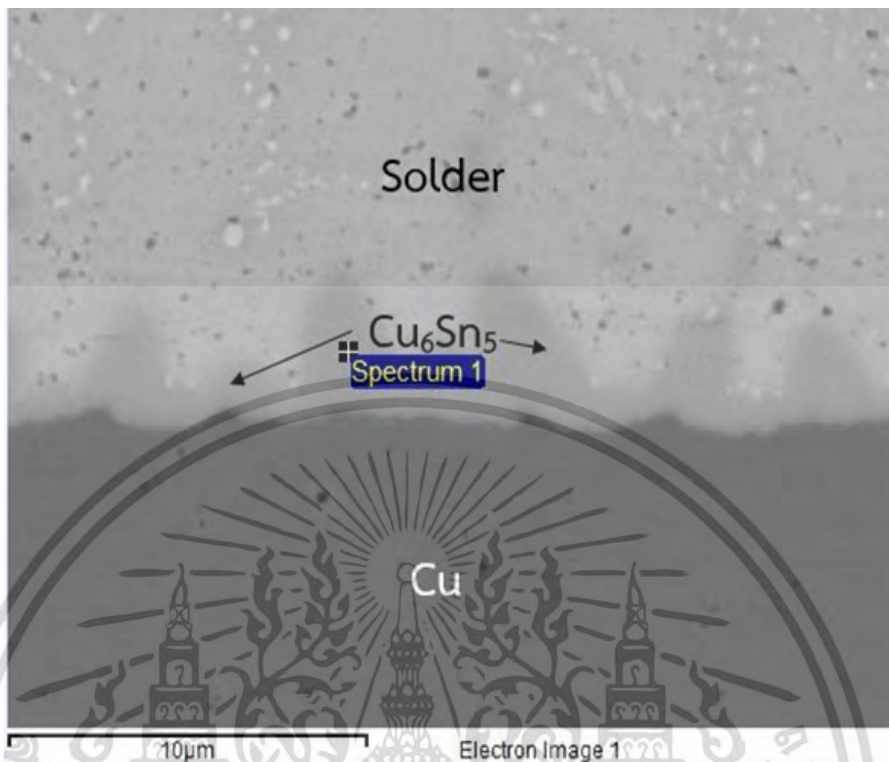


รูปที่ ข.34 โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1.0TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน

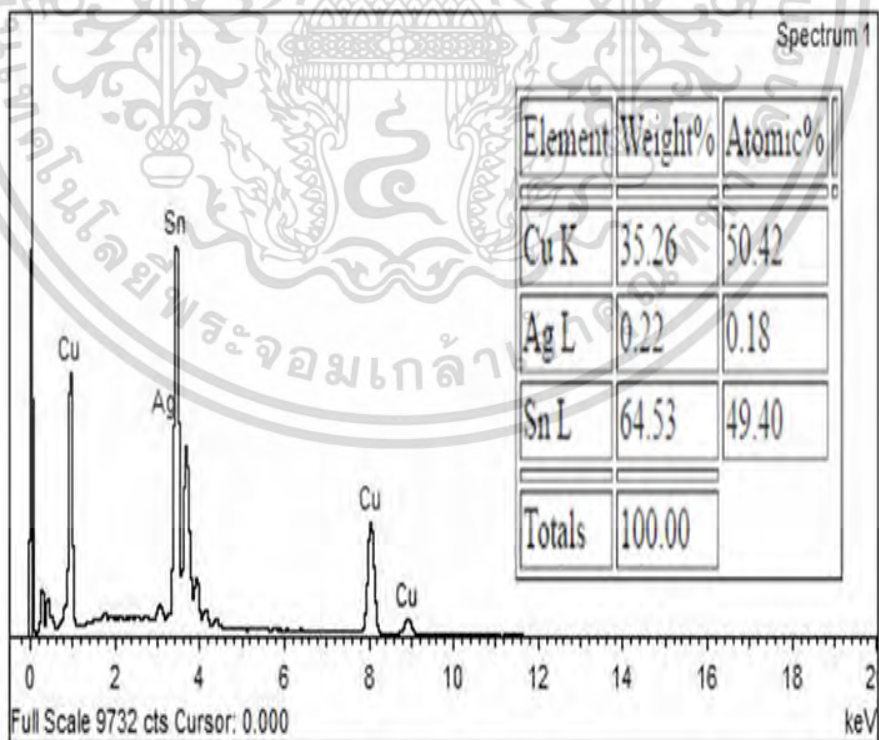
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

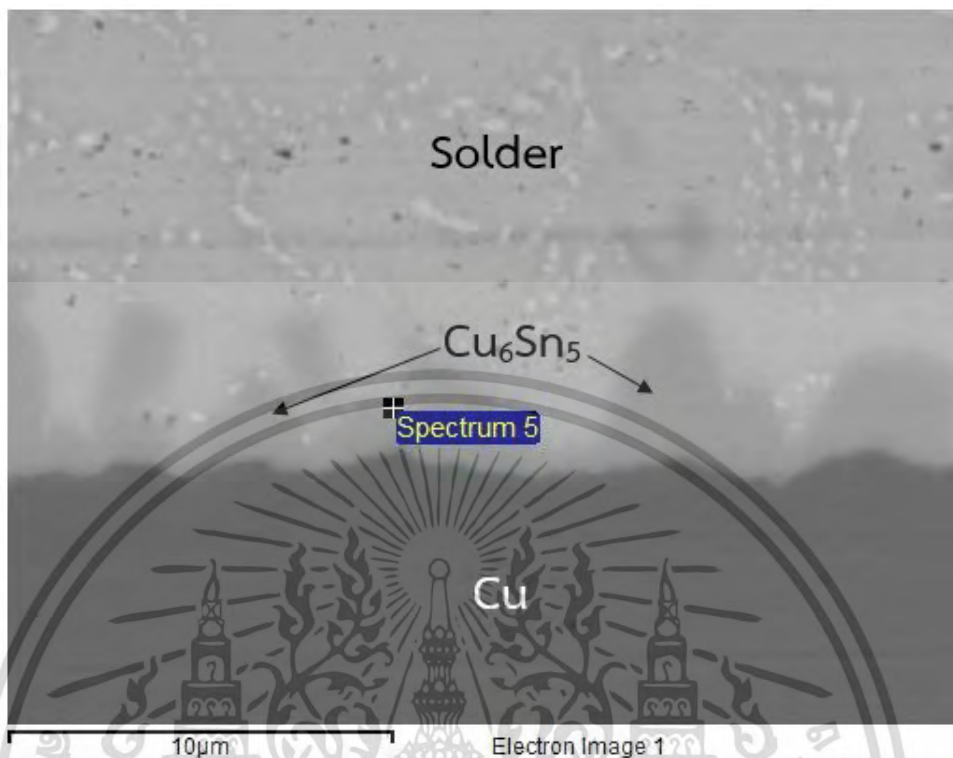


รูปที่ ซ.1 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.05TiO₂ หลังการบัดกรี

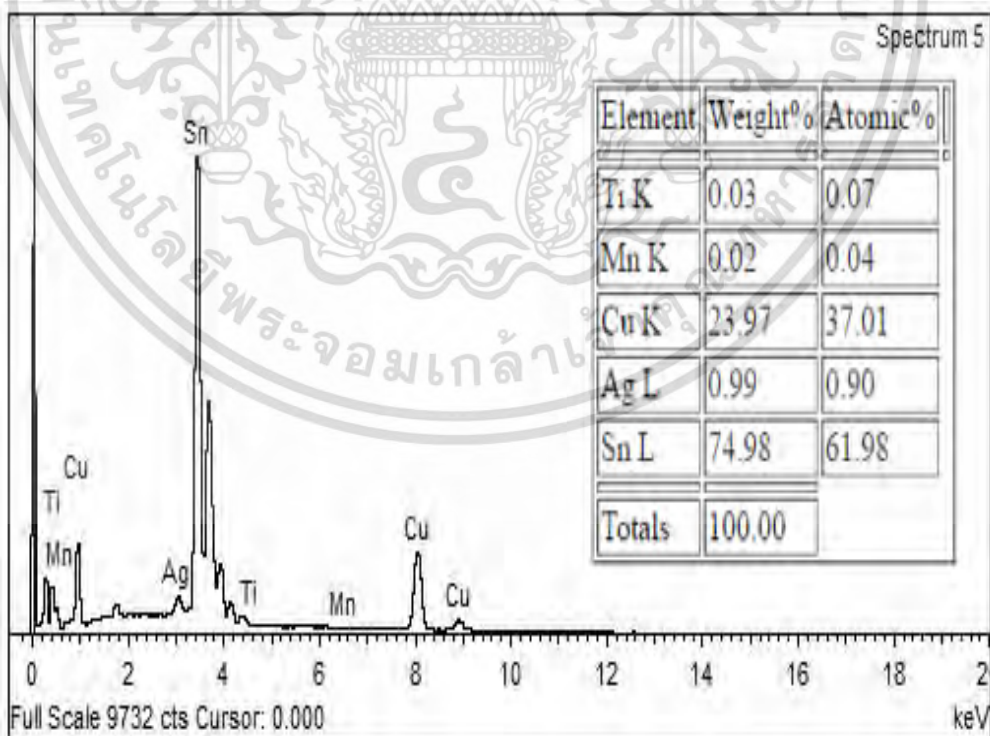


รูปที่ ซ.2 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.05TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

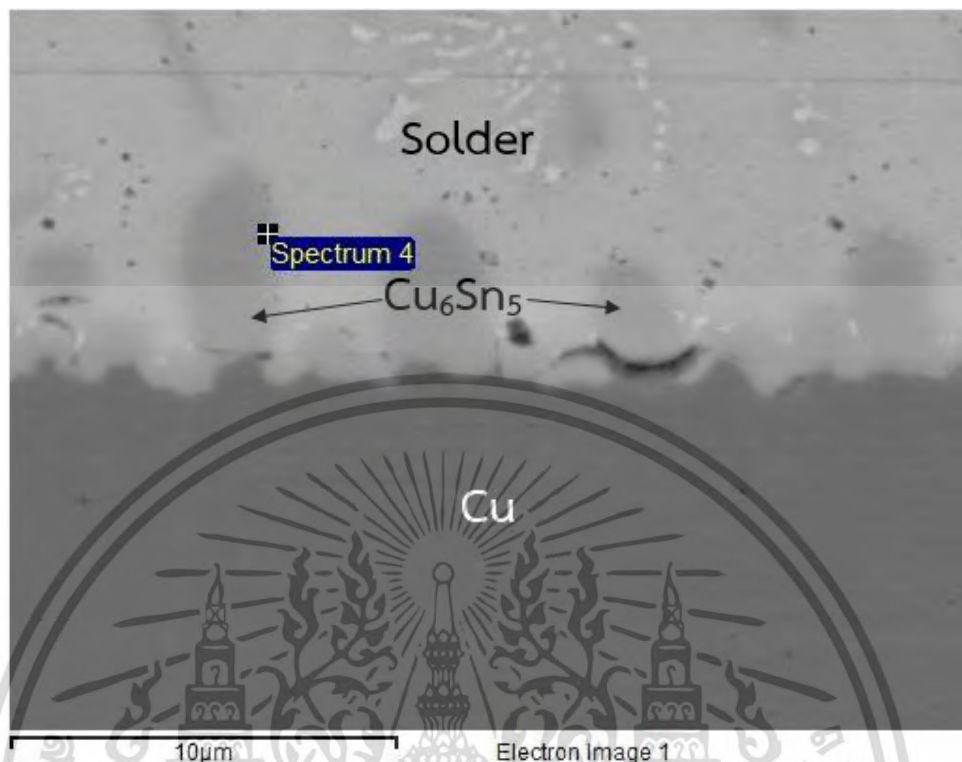


รูปที่ ๗.3 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรี

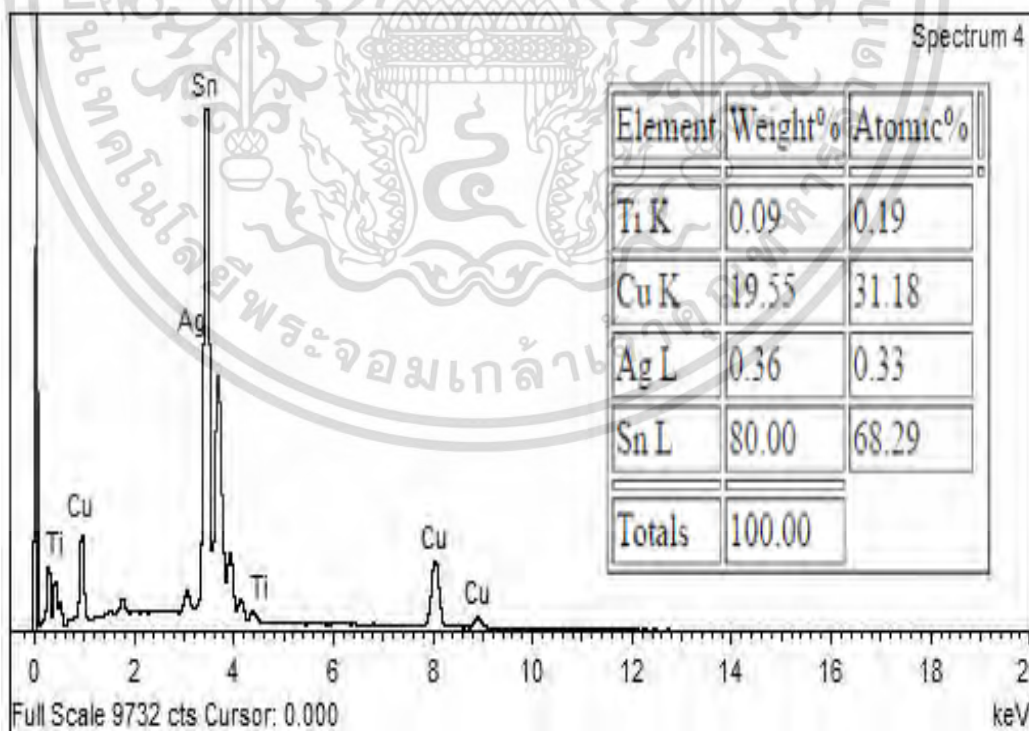


รูปที่ ๗.4 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

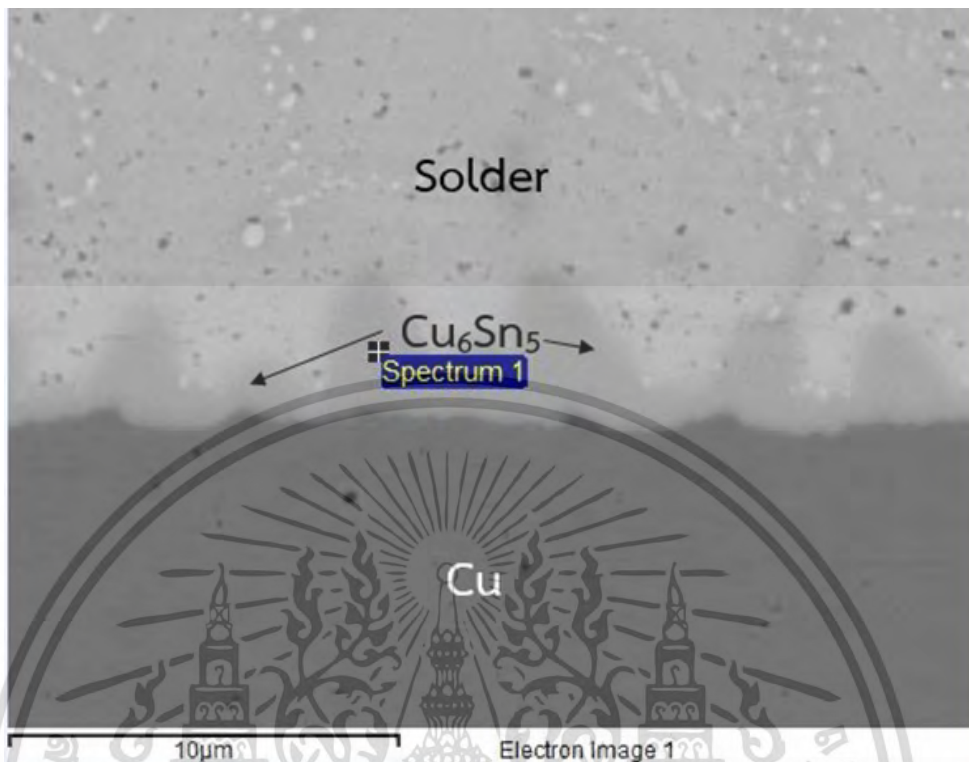


รูปที่ ซ.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.5TiO₂ หลังการบัดกรี

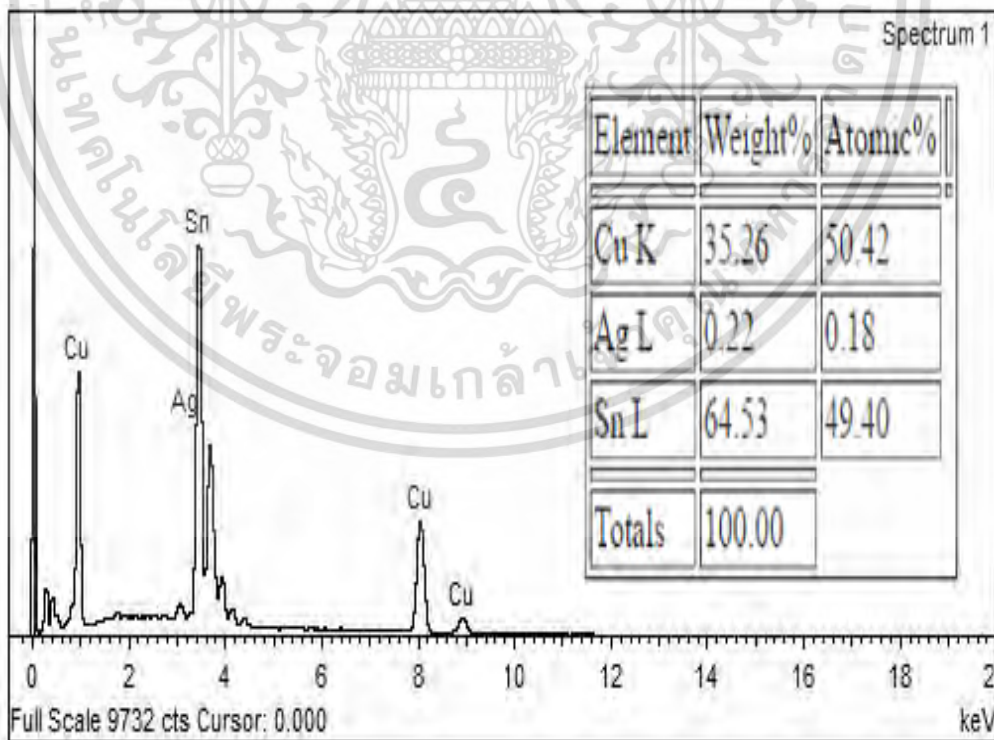


รูปที่ ซ.6 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.5TiO₂
หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

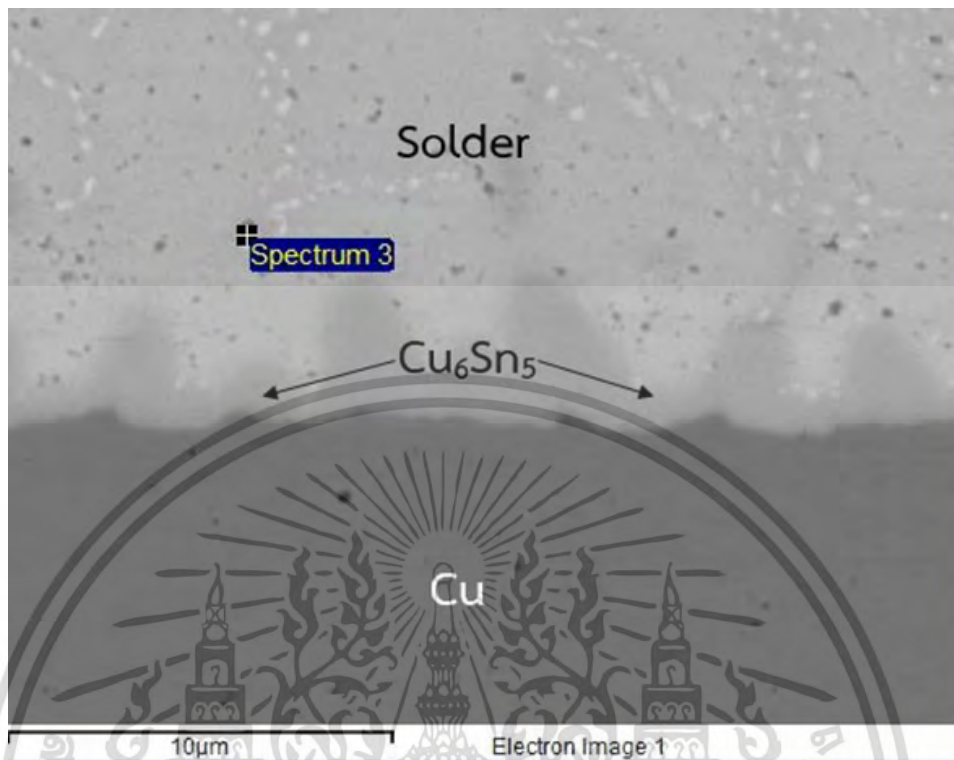


รูปที่ ซ.7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In หลังการบัดกรี

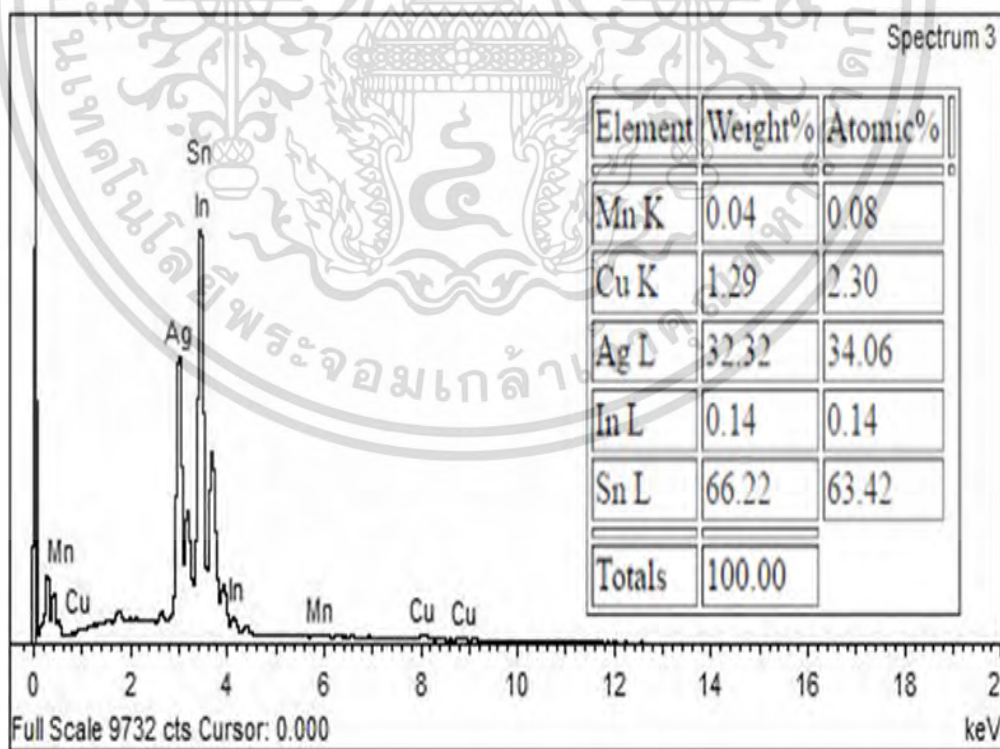


รูปที่ ซ.8 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

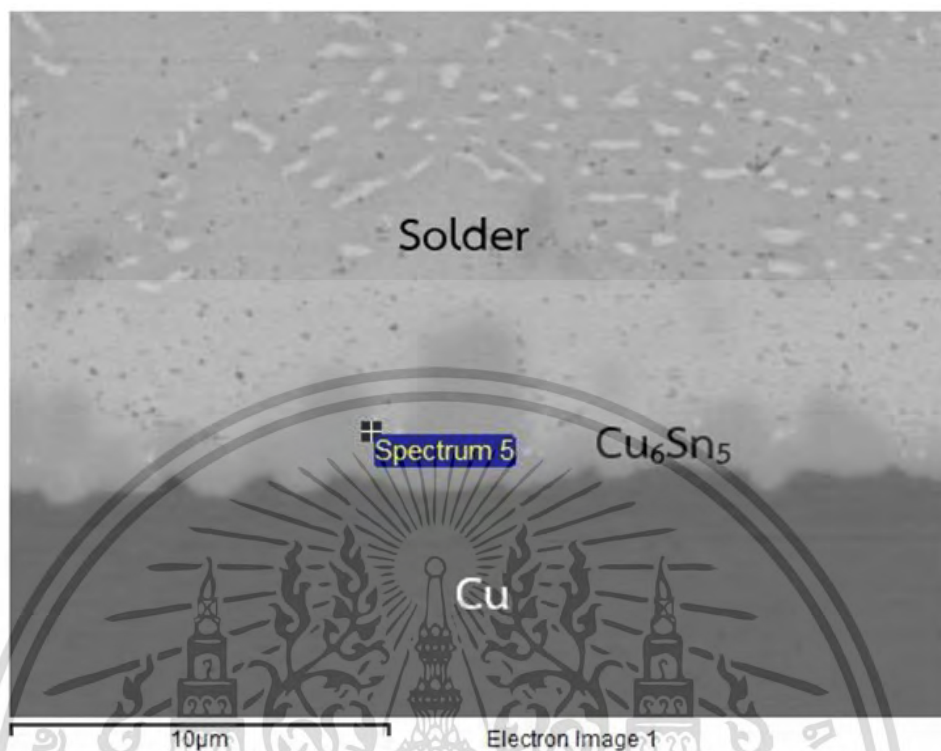


รูปที่ ซ.9 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂-0.5In หลังการบัดกรี

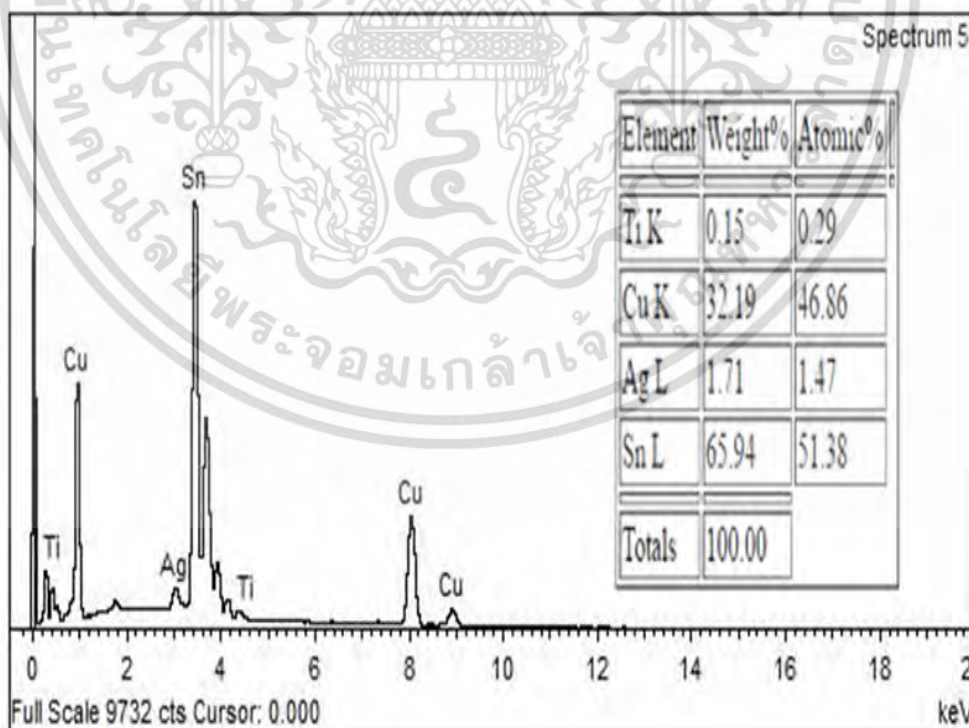


รูปที่ ซ.10 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂-0.5In หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

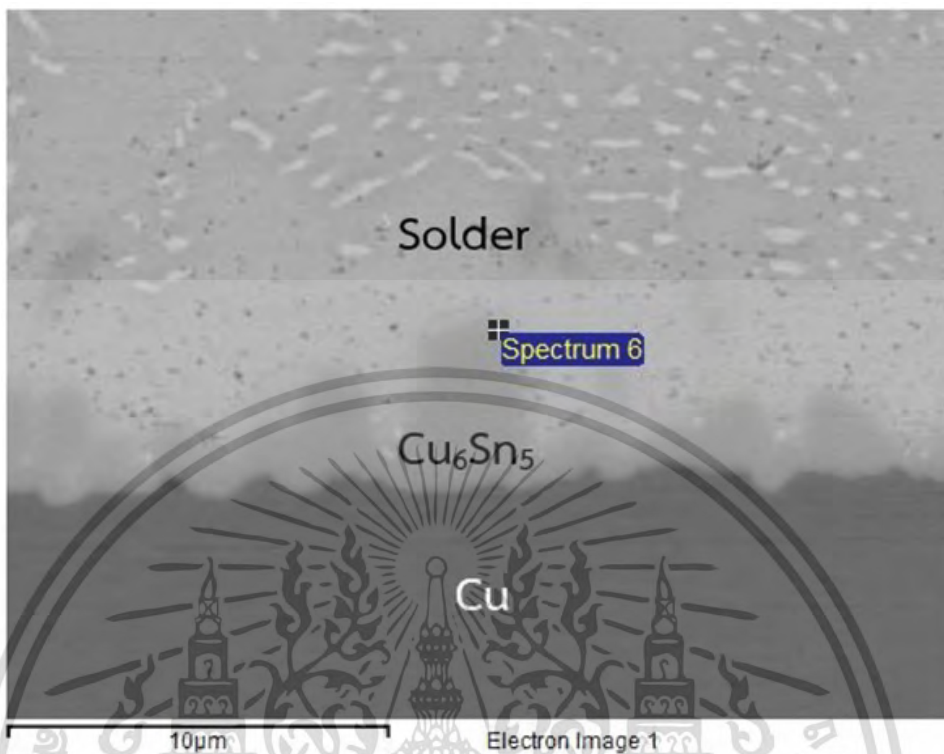


รูปที่ ซ.11 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรี

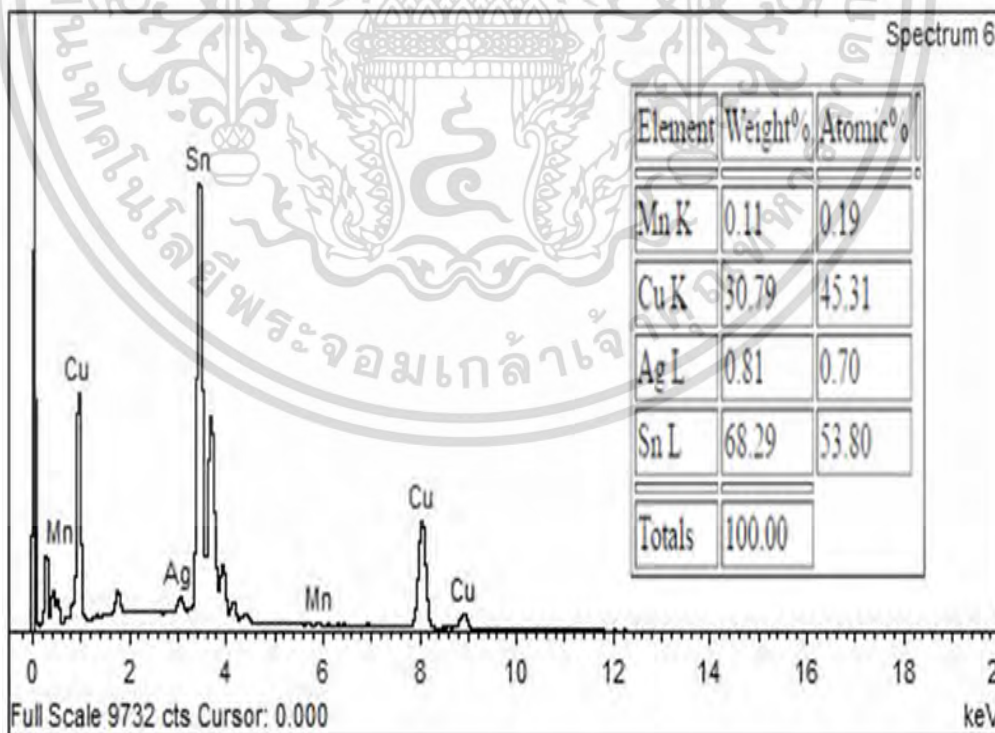


รูปที่ ซ.12 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

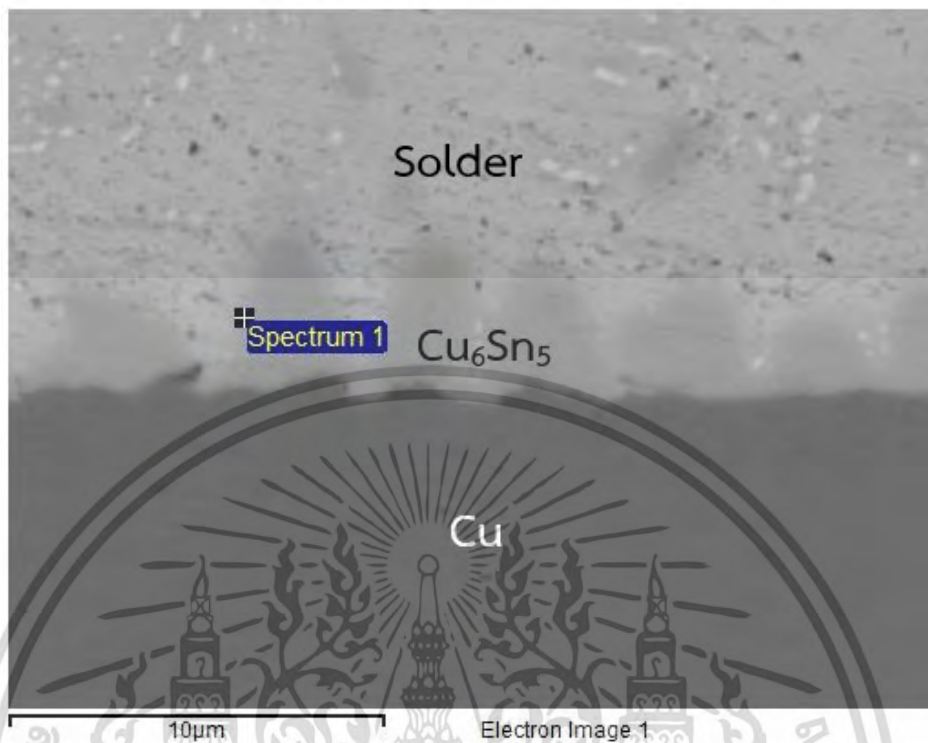


รูปที่ ซ.13 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรี

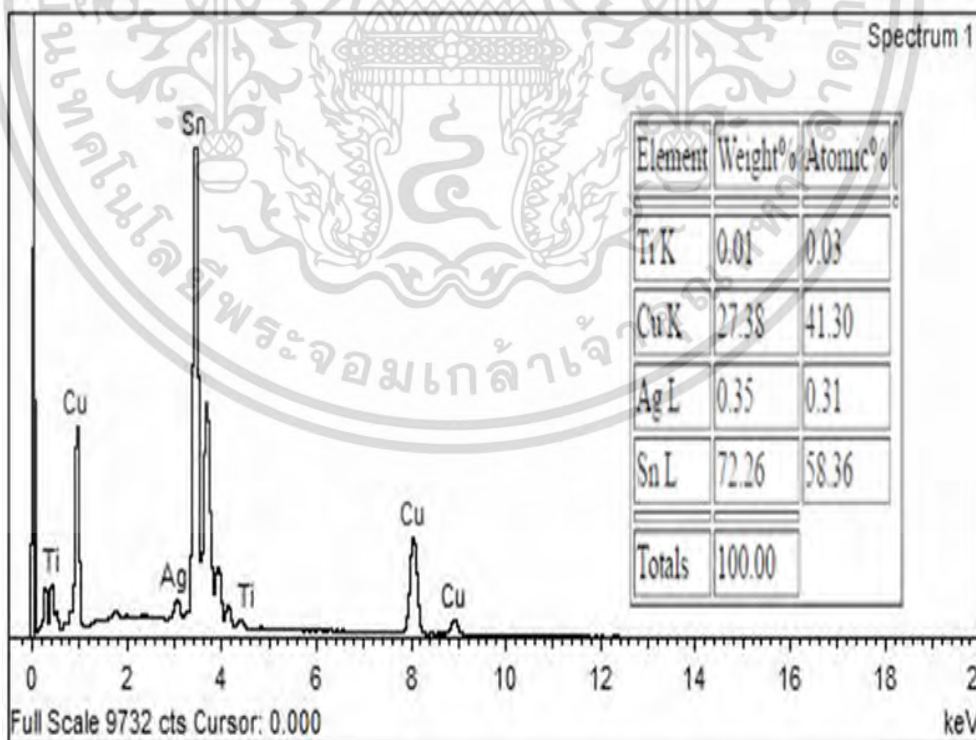


รูปที่ ซ.14 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.5Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

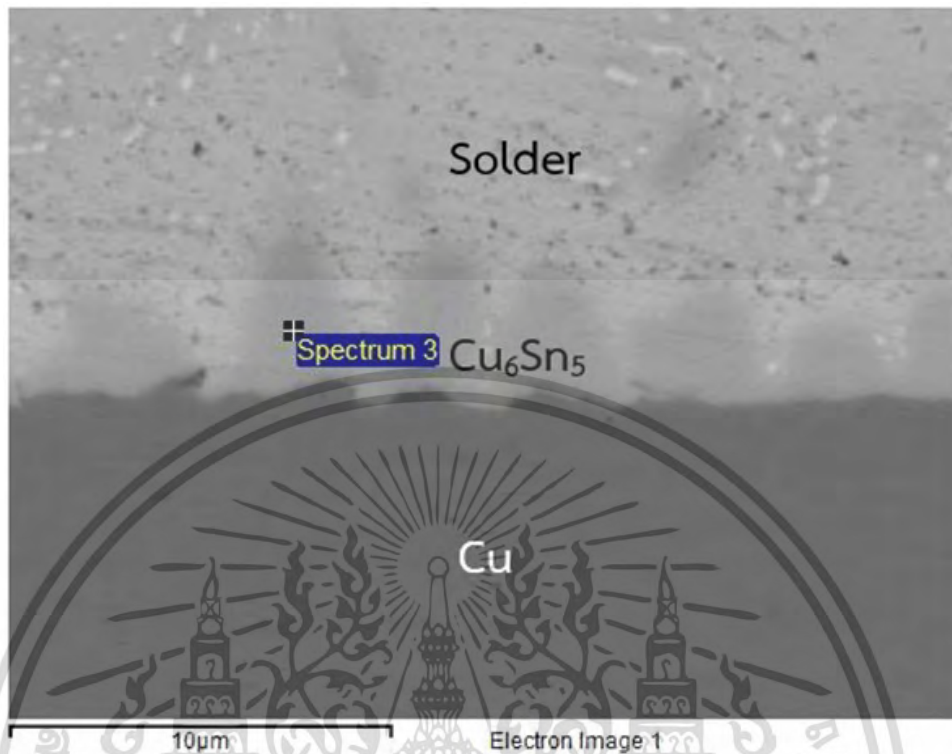


รูปที่ ซ.15 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรี

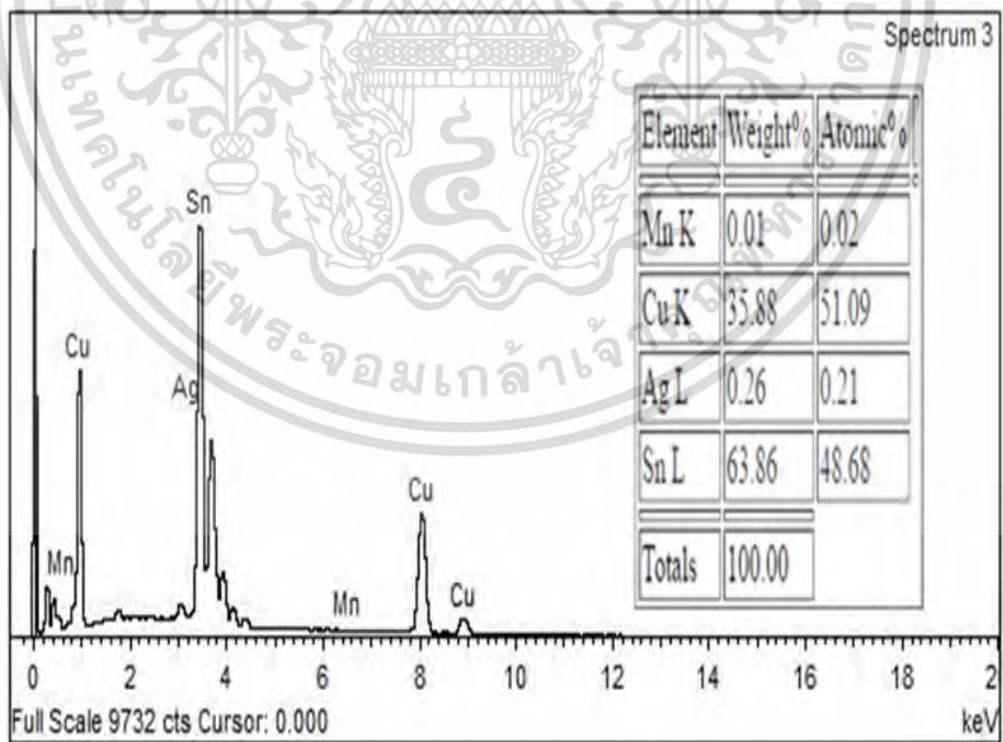


รูปที่ ซ.16 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

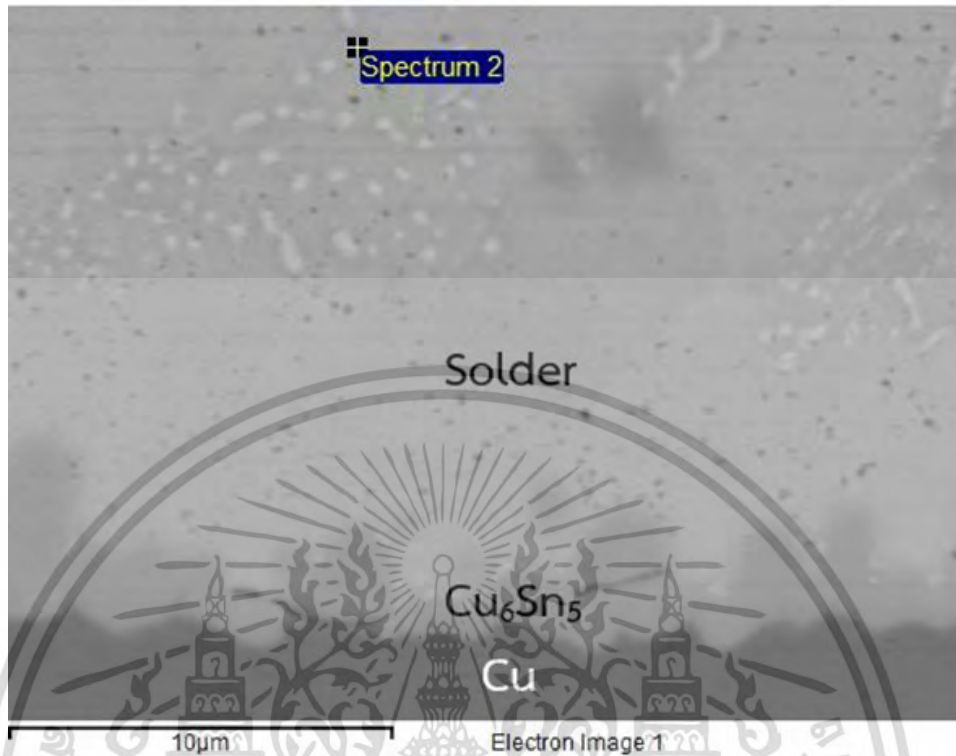


รูปที่ ซ.17 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรี

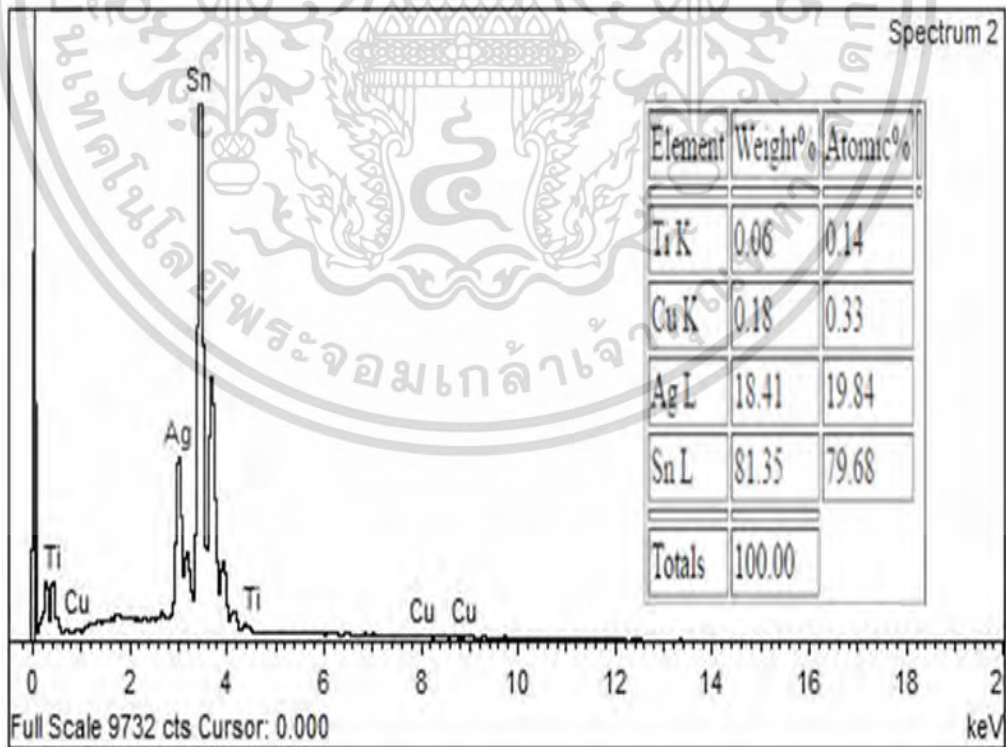


รูปที่ ซ.18 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-1.0Mn-doped TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

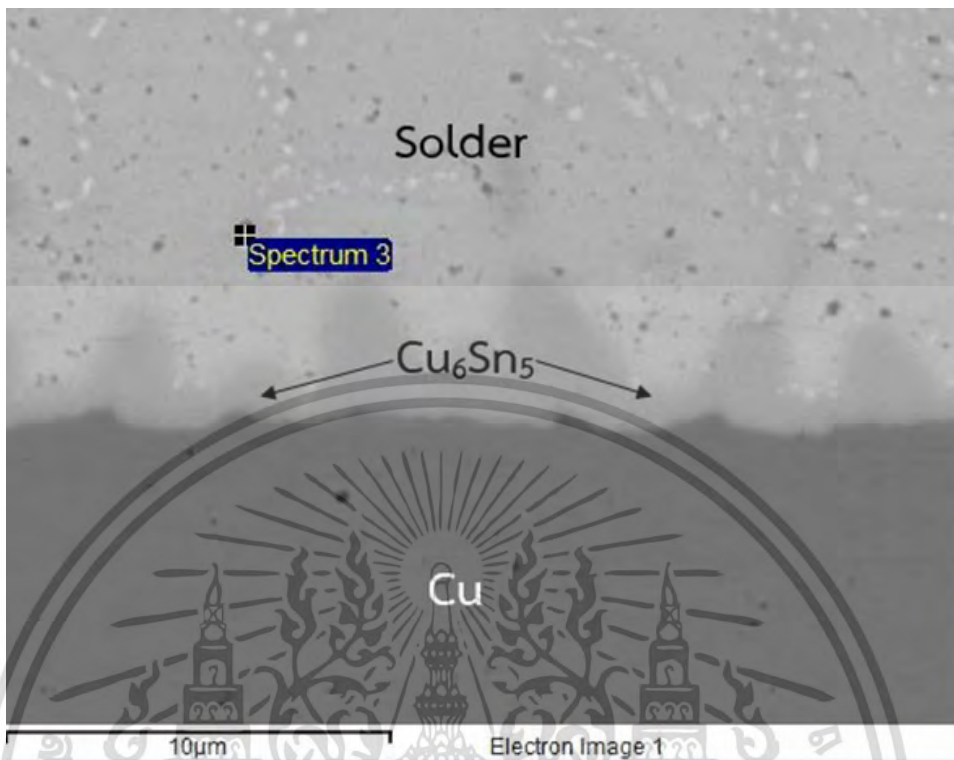


รูปที่ ๑๙.19 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-1.0TiO₂ หลังการบัดกรี

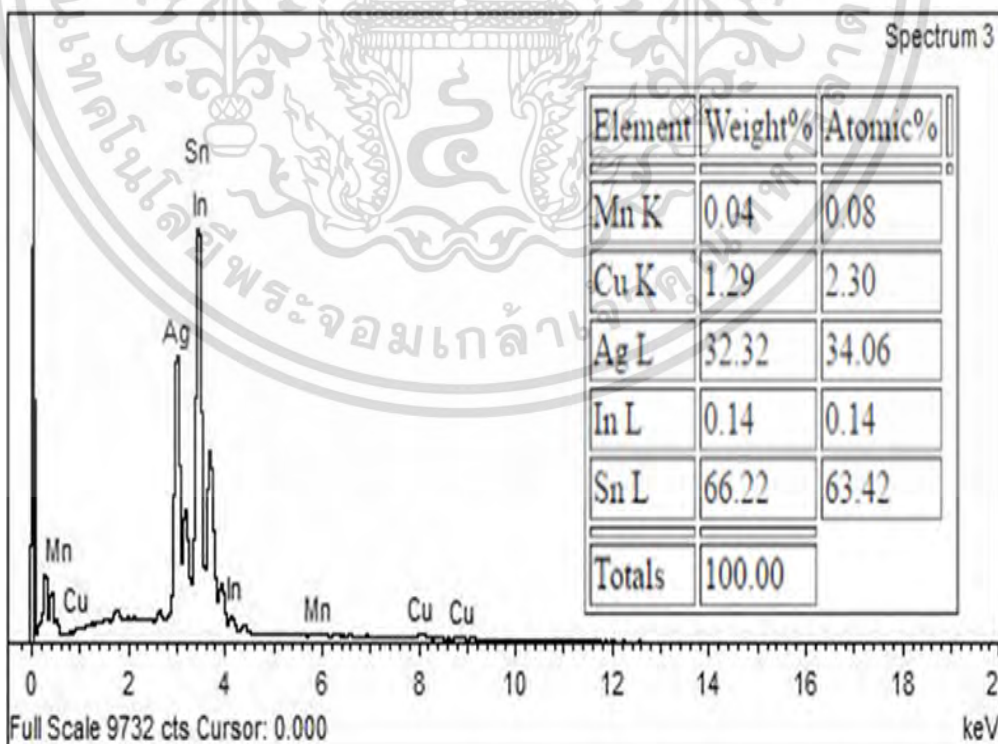


รูปที่ ๑๙.20 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-1.0TiO₂ หลังการบัดกรีที่จุด Spectrum 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

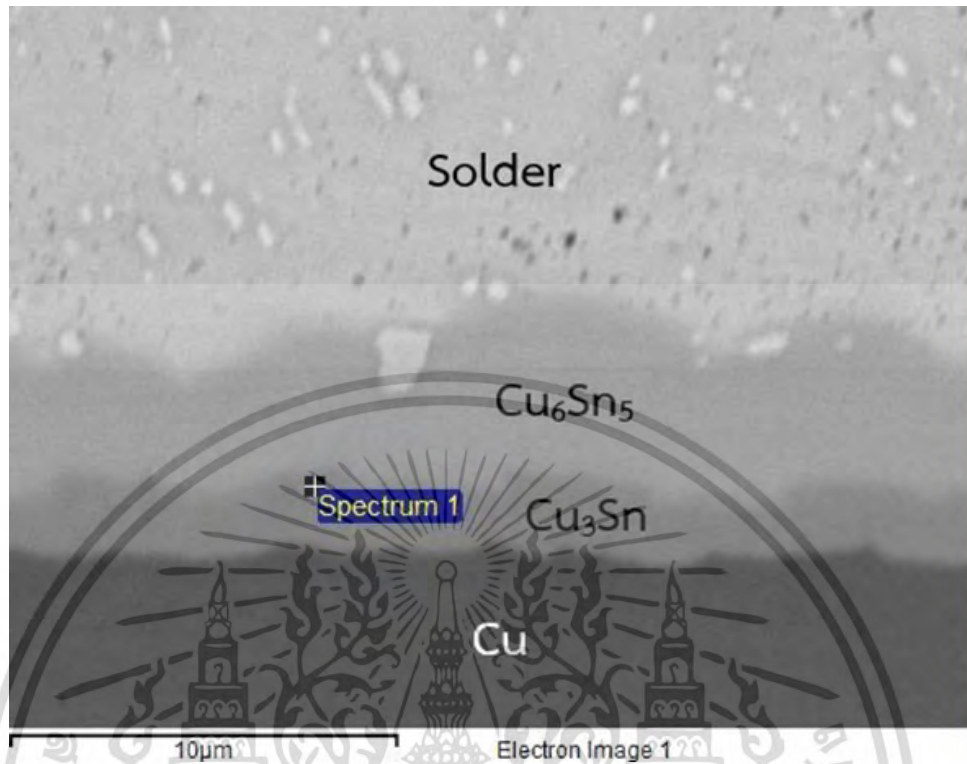


รูปที่ ซ.21 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂-0.5In หลังการบัดกรี

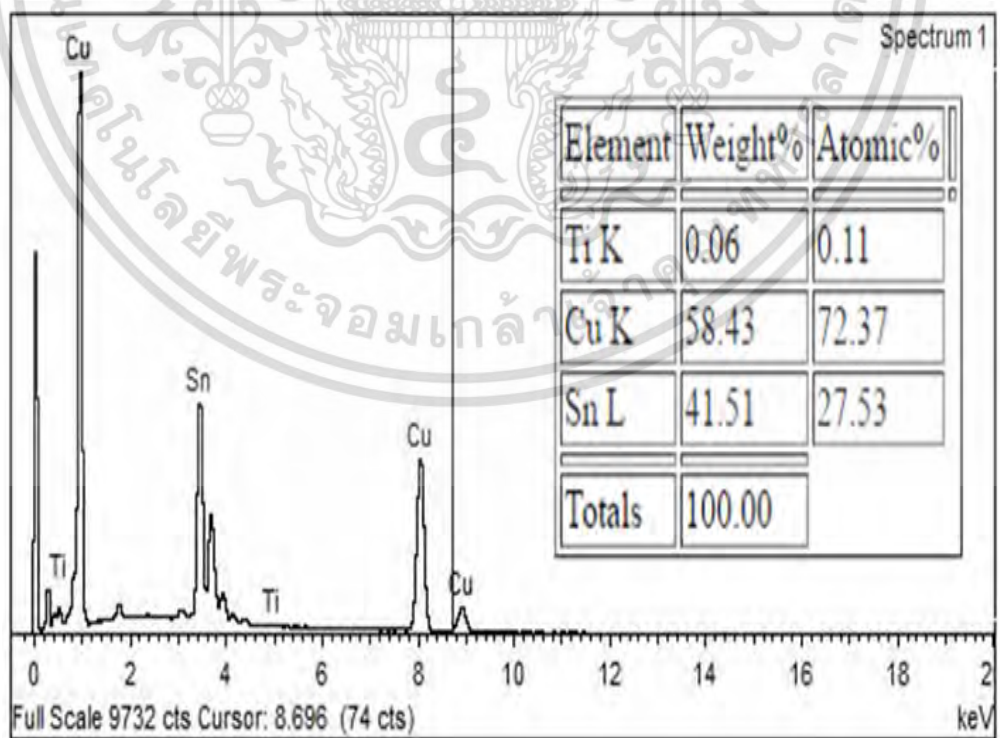


รูปที่ ซ.22 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.05Mn-doped TiO₂-0.5In

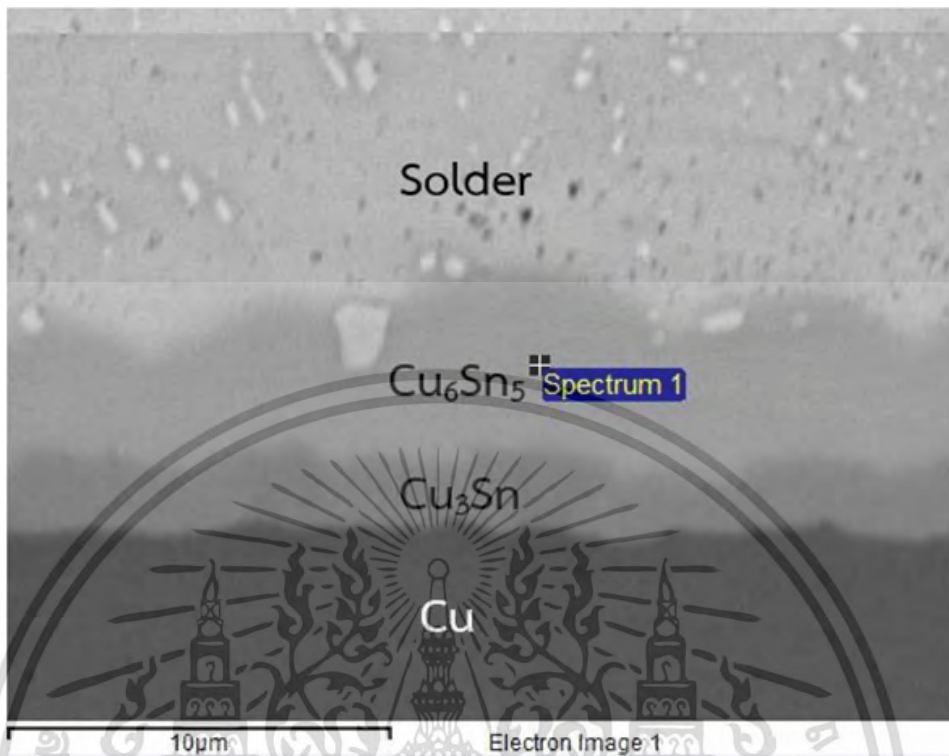
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้าน เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



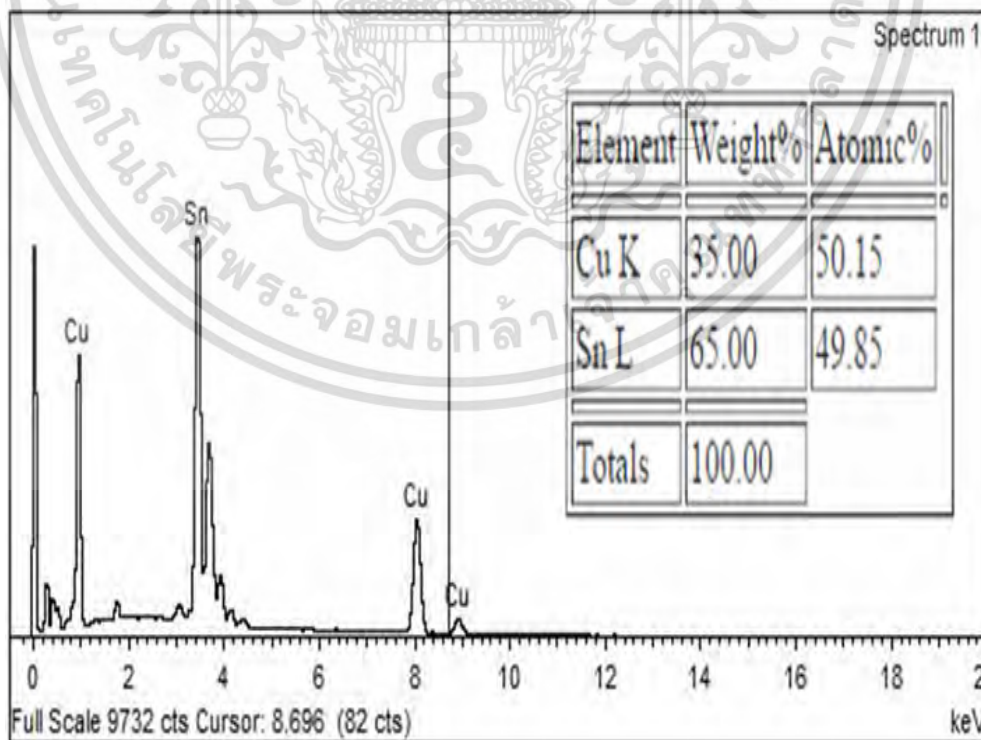
รูปที่ ซ.23 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.5TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อน เป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง



รูปที่ ซ.24 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.5TiO₂-0.5In หลังบ่ม
เอกสารถือเป็นเอกสารถี่สงวนไว้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ข้อมูลที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ซ.25 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ SAC305-0.5TiO₂-0.5In หลังบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง



รูปที่ ซ.26 องค์ประกอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ SAC305-0.5TiO₂-0.5In หลังบ่ม

ด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด Spectrum 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นใบประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฅ.

การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

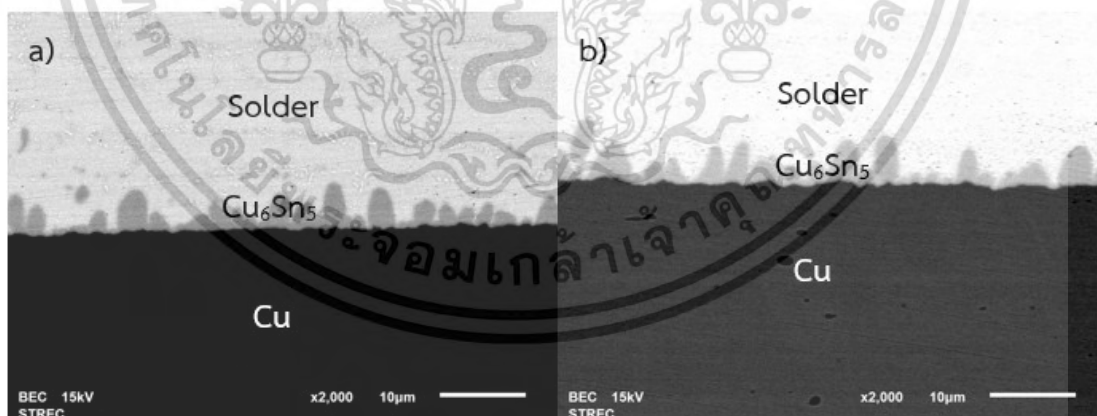
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ได้ทำการวัดค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีและหลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C แล้ว จึงทำการทดสอบความถูกต้องของความหนาของชั้นสารประกอบที่วัดได้ โดยจัดทำชิ้นงานตัวอย่างเพิ่มเติม 2 ชุด ชุดละ 6 ชิ้นงาน ตามสูตรและระยะเวลาในการบ่มด้วยความร้อนเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ ณ.1

ตารางที่ ณ.1 โลหะบัดกรีที่ทำการทดสอบเพิ่มเติม

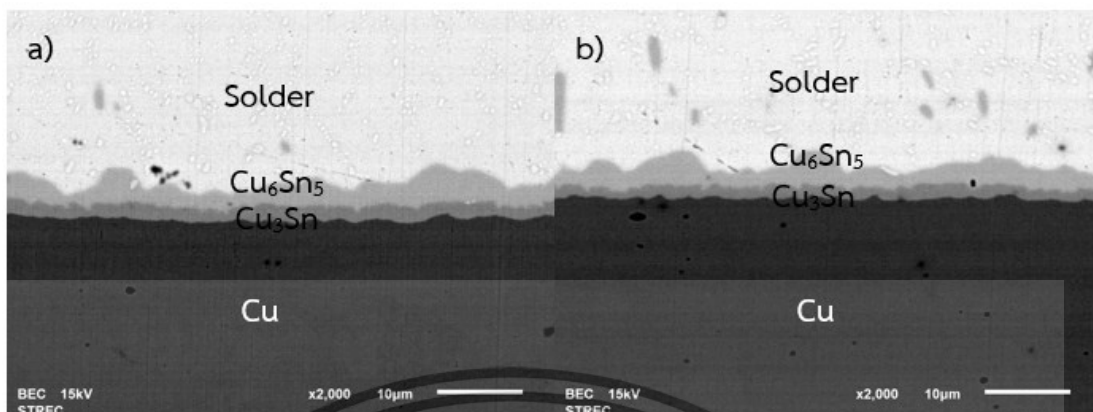
สูตรที่	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
1	SAC305	SAC305
2	SAC305 บ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง	SAC305 บ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง
3	SAC305-1Mn -doped TiO ₂	SAC305-1Mn -doped TiO ₂
4	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 1 ชั่วโมง	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 1 ชั่วโมง
5	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 10 ชั่วโมง	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 10 ชั่วโมง
6	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง	SAC305-1Mn -doped TiO ₂ บ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง

หลังจากเตรียมชิ้นงานตัวอย่างแล้ว จึงนำชิ้นงานในแต่ละชุดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ผลจากการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ ณ.1-6

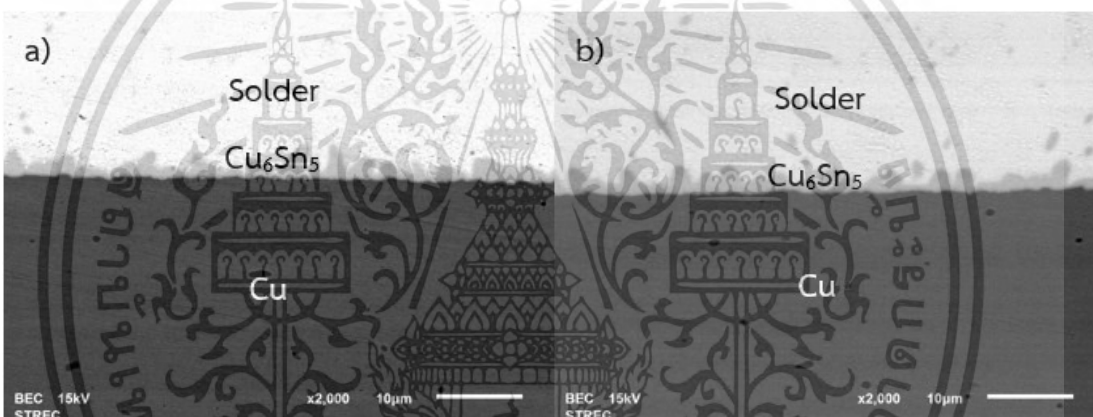


รูปที่ ณ.1 a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305 ชุดที่ 1 b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305 ชุดที่ 2

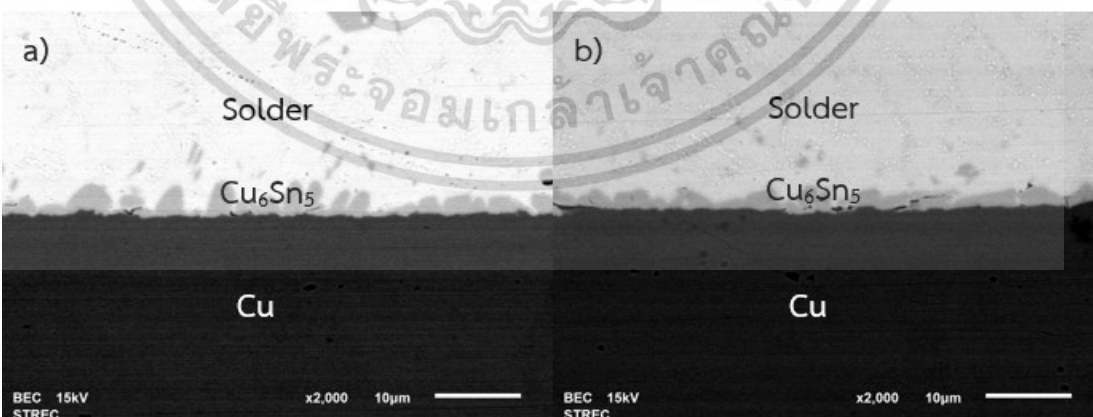
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๒ a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305 หลังบ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง ชุดที่ 1
b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305 หลังบ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง ชุดที่ 2

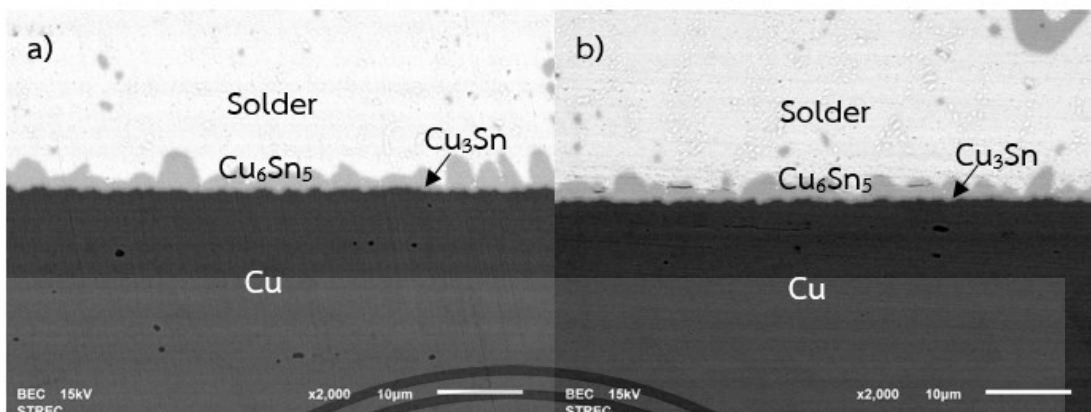


รูปที่ ๓.๓ a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ ชุดที่ 1
b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ ชุดที่ 2

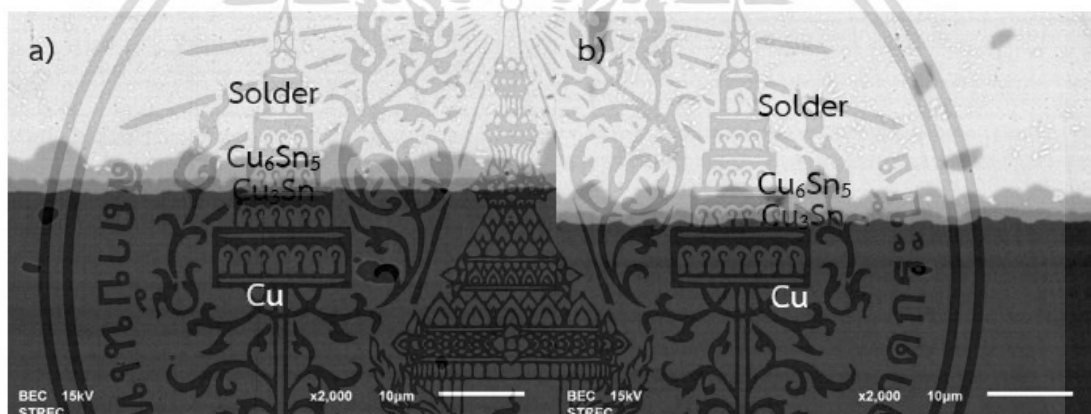


รูปที่ ๓.๔ a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 1 ชั่วโมง ชุดที่ 1
b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 1 ชั่วโมง ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๕.๕ a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 10 ชั่วโมง ชุดที่ 1
 b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 10 ชั่วโมง ชุดที่ 2



รูปที่ ๕.๖ a) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง ชุดที่ 1
 b) โครงสร้างจุลภาคของ SAC305-1Mn-doped TiO₂ หลังบ่มด้วยความร้อน 100 ชั่วโมง ชุดที่ 2

ทั้งนี้ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu₆Sn₅+Cu₃Sn) ของแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ ๕. 2

ตารางที่ ๕.๒ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (Cu₆Sn₅+Cu₃Sn) ของแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง

สูตรที่	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม (um)	
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
1	2.29	2.34
2	4.31	4.12
3	1.7	1.81
4	1.98	1.82
5	2.34	2.14
6	3.93	3.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานในแต่ละสูตรและในแต่ละสถานะ จึงนำค่าความหนาที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นงานทั้งหมด มาทดสอบด้วยวิธี Paired t-test โดยกำหนดสมมติฐานให้

H_0 : ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 1 เท่ากับค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 2

H_1 : ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 1 ไม่เท่ากับค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 2

โดยผลการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired t-test แสดงดังตารางที่ ฅ.1

ตารางที่ ฅ.1 ผลการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired t-test

Paired T for ชุดที่ 1 - ชุดที่ 2				
	N	Mean	St Dev	SE Mean
ชุดที่ 1	6	2.758	1.086	0.443
ชุดที่ 2	6	2.665	1.014	0.414
Difference	6	0.0933	0.1363	0.0557
95% CI for mean difference: (-0.0497, 0.2364)				
T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0) : T-Value = 1.68 P-Value = 0.154				

จากตารางที่ ฅ.1 พบว่า ค่า P-Value มีค่า 0.154 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า α (0.05) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้ ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 1 จึงเท่ากับค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่วัดได้จากชิ้นงานชุดที่ 2 ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความหนาของชิ้นงานในแต่ละสูตรและในแต่ละสถานะจะไม่มี ความแตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อคัดเลือกชิ้นงานที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำค่าที่ได้จากการทดลองความสามารถในการบำบัดมาใช้เป็นเกณฑ์ในการให้คะแนนกับโลหะบัดกรีแต่ละชนิด โดยให้คะแนนเต็ม 100 คะแนน แบ่งเป็น อุณหภูมิหลอมเหลว 25 คะแนน ความสามารถในการพิมพ์ 25 คะแนน ความสามารถในการเปียก 25 คะแนน และ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 25 คะแนน

1. อุณหภูมิหลอมเหลว

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าที่บ่งชี้ถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ อุณหภูมิโซลิดัส อุณหภูมิลิควิดัส และช่วงหลอมเหลว แต่เนื่องจากอุณหภูมิลิควิดัสซึ่งเป็น อุณหภูมิที่โลหะบัดกรีเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับ ความสามารถในการเปียก ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิลิควิดัสเป็นเกณฑ์ในการให้คะแนน โดยคะแนนของโลหะบัดกรีในแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ ญ.1

ตารางที่ ญ.1 คะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจากการทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว

โลหะบัดกรี	T _L 237.0- 235.52 °C	T _L 235.52- 234.04 °C	T _L 234.04- 232.56 °C	T _L 232.56- 231.08 °C	T _L 231.08- 229.6 °C
	5 คะแนน	10 คะแนน	15 คะแนน	20 คะแนน	25 คะแนน
SAC305	x				
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂			x		
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	X				
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂		x			
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂			X		
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In					x
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In			x		
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In			X		
SAC305-0.05TiO ₂			X		
SAC305-0.10TiO ₂		x			
SAC305-0.50TiO ₂	x				
SAC305-1.00TiO ₂			X		
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In				x	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความสามารถในการพิมพ์

คะแนนของโลหะบัดกรีในแต่ละชนิดจากการทดสอบความสามารถในการพิมพ์แสดงดังตารางที่ ญ.2

ตารางที่ ญ.2 คะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจากการทดสอบความสามารถในการพิมพ์

โลหะบัดกรี	Print	Print	Print	Print	Print
	66.32-71.86 %	71.86-77.41 %	77.41-82.96 %	82.96-88.51 %	88.51-94.06 %
	5 คะแนน	10 คะแนน	15 คะแนน	20 คะแนน	25 คะแนน
SAC305					X
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂					X
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂				X	
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂			X		
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	X				
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.05TiO ₂					X
SAC305-0.10TiO ₂					X
SAC305-0.50TiO ₂				X	
SAC305-1.00TiO ₂	X				
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In				X	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความสามารถในการเปียก

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดในรูปแบบของค่าตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และมุมเปียก ซึ่งทั้ง 3 ค่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเลือกเพียงค่าเดียวเพื่อเป็นตัวแทนของทั้ง 3 ค่า โดยในที่นี้จะเลือกใช้ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดเป็นเกณฑ์ในการให้คะแนน ซึ่งคะแนนของโลหะบัดกรีในแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ ญ.3

ตารางที่ ญ.3 คะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจากการทดสอบความสามารถในการเปียก

โลหะบัดกรี	S _f	S _f	S _f	S _f	S _f
	86.94- 88.09 %	88.09- 89.24 %	89.24- 90.39 %	90.39- 91.54 %	91.54- 92.7 %
	5 คะแนน	10 คะแนน	15 คะแนน	20 คะแนน	25 คะแนน
SAC305	X				
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂			x		
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂					X
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂		X			
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂		X			
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In			X		
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In				X	
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In				X	
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In				X	
SAC305-0.05TiO ₂				X	
SAC305-0.10TiO ₂					X
SAC305-0.50TiO ₂					x
SAC305-1.00TiO ₂			X		
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In				X	
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In					X
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In				X	
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In			x		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดในสถานะที่แตกต่างกันได้แก่ หลังการบัดกรี และหลังการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1 10 100 และ 1,000 ชั่วโมง ซึ่งขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหลังการบัดกรีและการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลาไม่เกิน 100 ชั่วโมง จะเห็นความแตกต่างของขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะรวม ($\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Cu}_3\text{Sn}$) หลังการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง เป็นเกณฑ์ในการให้คะแนน ซึ่งคะแนนของโลหะบัดกรีในแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ ๓.๔

ตารางที่ ๓.๔ คะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดจากการวัดขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

โลหะบัดกรี	IMC	IMC	IMC	IMC	IMC
	12.81-12.02 um	12.02-11.23 um	11.23-10.44 um	10.44-9.65 um	9.65-8.86 um
	5 คะแนน	10 คะแนน	15 คะแนน	20 คะแนน	25 คะแนน
SAC305		X			
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2		X			
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2	X				
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2		X			
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2			X		
SAC305-0.05Mn-doped TiO_2 -0.5In				X	
SAC305-0.10Mn-doped TiO_2 -0.5In	X				
SAC305-0.50Mn-doped TiO_2 -0.5In	X				
SAC305-1.00Mn-doped TiO_2 -0.5In		X			
SAC305-0.05 TiO_2		X			
SAC305-0.10 TiO_2	X				
SAC305-0.50 TiO_2			X		
SAC305-1.00 TiO_2			X		
SAC305-0.05 TiO_2 -0.5In			X		
SAC305-0.10 TiO_2 -0.5In		X			
SAC305-0.50 TiO_2 -0.5In					X
SAC305-1.00 TiO_2 -0.5In		x			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลรวมคะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

จากตารางที่ ๕.5 พบว่าโลหะบัดกรีชนิดที่ได้คะแนนสูงที่สุดคือ SAC305-0.50TiO₂-0.5In ดังนั้นโลหะบัดกรีชนิดนี้จึงเป็นชนิดที่ดีที่สุดใมหาวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ ๕.5 ผลรวมคะแนนของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

โลหะบัดกรี	คะแนน T _L	คะแนน Print	คะแนน S _f	คะแนน IMC	คะแนน รวม
SAC305	5	25	5	10	45
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂	15	25	15	10	65
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂	5	20	20	5	50
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂	10	15	10	10	45
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂	15	5	10	15	45
SAC305-0.05Mn-doped TiO ₂ -0.5In	25	25	15	20	85
SAC305-0.10Mn-doped TiO ₂ -0.5In	25	25	20	5	75
SAC305-0.50Mn-doped TiO ₂ -0.5In	15	25	20	5	65
SAC305-1.00Mn-doped TiO ₂ -0.5In	15	25	20	10	70
SAC305-0.05TiO ₂	15	25	20	10	70
SAC305-0.10TiO ₂	10	25	25	5	65
SAC305-0.50TiO ₂	5	20	25	15	65
SAC305-1.00TiO ₂	15	5	15	15	50
SAC305-0.05TiO ₂ -0.5In	25	25	20	15	85
SAC305-0.10TiO ₂ -0.5In	25	25	25	10	85
SAC305-0.50TiO ₂ -0.5In	25	25	20	25	95
SAC305-1.00TiO ₂ -0.5In	20	20	15	10	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายวันยุทธ สุวรรณเครือ
 วัน เดือน ปีเกิด 14 กันยายน 2534
 ที่อยู่ 7/49 ซ.นวลจันทร์ 56 แขวงนวลจันทร์ เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร
 ประวัติการศึกษา ระดับมัธยมศึกษา แผนการเรียน : วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์
 สถานศึกษา : เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2553
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2556
 ผลงานทางวิชาการ อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุดหลอมเหลว
 ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้
 สารตะกั่วแบบครีม SAC305 ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง
 ปีที่ 33, ฉบับที่ 2 (มี.ย. 2559) 64-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้