



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบครีมจากโลหะบัดกรี
Sn-3.0Ag-0.5Cu และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบครีมจากโลหะบัดกรี
Sn-3.0Ag-0.5Cu และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

600270461
RC00174

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไร้สารตะกั่วแบบคริมจากโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 966,500 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2559

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นาย กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบคริมชนิดใหม่จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 โดยศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การหดตัว โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม SAC305-xZnO กับแผ่นรองทองแดง และความหนืด จากผลการทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลวพบว่า ระดับการเติมที่สูงขึ้นของอนุภาคนาโน ZnO ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรี ในขณะที่อุณหภูมิ Liquidus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับการทดสอบความสามารถในการเปียกพบว่า การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนส่งผลให้การกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในทุกเงื่อนไข นั่นคือ ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนประกอบการกระจายตัวมีค่าสูงขึ้น โดยค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามหากมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไปทำให้ค่าความสามารถในการเปียกมีแนวโน้มที่ลดลง ในด้านความสามารถในการพิมพ์พบว่า ระดับการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนไม่เกิน 0.5 wt% ให้ค่าความสามารถในการพิมพ์บนแผ่นรองทองแดงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในเรื่องของหดตัวของโลหะบัดกรีพบว่า การหดตัวที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าการหดตัวที่อุณหภูมิต่ำ และในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ พบว่า สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นรอยต่อเป็นเฟส Cu_6Sn_5 ทั้งนี้พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ นอกจากนี้พบว่าค่าความหนืดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น โดยพบว่าในเงื่อนไขการทดสอบที่ SAC305-0.75ZnO ให้ค่าความหนืดสูงสุด

คำสำคัญ : โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Surface mount technology นาโนเทคโนโลยี Nano-composite solder

Research Title: A development of nano-composite lead-free solder paste from Sn-3.0Ag-0.5Cu solder and zinc oxide nano-particles

Researcher: Kannachai Kanlayasiri

Faculty: Engineering

Department: Industrial Engineering

ABSTRACT

This research was aimed to develop a new nano-composite lead-free solder from the widely-used SAC305 solder. The influences of zinc oxide (ZnO) nanoparticles on the melting temperatures, wettability, printability, slump, viscosity and interfacial microstructure of SAC305xZnO lead-free solder paste on copper substrate were studied. Results showed that the addition of ZnO had no effect on the solidus temperature, while it slightly changed the liquidus temperature. In spread test, the addition of ZnO improved the solder's wettability in all cases. The wettabilities in terms of spread factor (S_f) and spread ratio (S_r) were increased and contact angle was decreased. However, excessive addition of ZnO beyond 0.5 wt% could degrade the wettability of the solder on copper substrate. With the addition of ZnO no more than 0.5 wt%, the printability of the solder on copper substrate was increased. It was found that the average slump on copper substrate was much higher at high temperature than that of low temperature. After reflow soldering, Cu_6Sn_5 intermetallic compound was found at the interface of solder/copper substrate. The proper amount of ZnO addition could reduce the thickness of the Cu_6Sn_5 layer. In addition, the viscosity of the solder paste increased with the increase of ZnO nanoparticles, and the SAC305-0.75ZnO solder provided the highest viscosity.

Keywords : Lead-free solder Surface mount technology Nanotechnology Nano-composite solder

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

กรรมชัย กัลยาศิริ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	33
3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	35
3.3 การเตรียมโลหะชิ้นงานสำหรับการบัดกรี.....	36
3.4 ขั้นตอนการทดสอบ.....	36
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติ.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย	42
4.1 อุดมภูมิจุดหลอมเหลว.....	42
4.2 ความสามารถในการเปียก.....	43
4.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว.....	45
4.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ.....	50
4.5 ความเหนียว.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต.....	54
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	55
6.1 ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย.....	55
6.2 ผลผลิตที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ประวัตินักวิจัย.....	67

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย โดยในแต่ละปีมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 1 ล้านล้านบาท [1] และเนื่องจากสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นสินค้าที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารมีพิษหลายชนิด ส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ตามมา ทำให้หลายๆ ประเทศได้ออกข้อบังคับ (Regulations) ออกมาเพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ข้อบังคับที่เป็นที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ ข้อบังคับ RoHS (The restriction of the use of certain hazardous substances) ของสหภาพยุโรป ซึ่งระบุสารมีพิษที่ถูกควบคุมการใช้งานในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) Hexavalent chromium (Cr^{6+}) Polybrominated biphenyls และ Polybrominated diphenyl ether [2] จากการออกข้อบังคับเหล่านี้ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในสหภาพยุโรปได้ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงต้องเปลี่ยนแปลงกระบวนการบัดกรี โดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่เป็นโลหะผสม (Alloys) ระหว่างดีบุกและตะกั่ว (Tin-lead solders)

ตั้งแต่สหภาพยุโรปได้ใช้ข้อบังคับ RoHS เมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 ได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อใช้ทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น กลุ่ม Sn-Ag กลุ่ม Sn-Bi กลุ่ม Sn-Cu และกลุ่ม Sn-Ag-Cu เป็นต้น ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การบัดกรีด้วยวิธี Reflow soldering หรือ Wave soldering โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu ซึ่งเป็นสิทธิบัตรของ Ames Laboratory ที่ Iowa State University ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง แต่ Sn-3.0Ag-0.5Cu มีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb eutectic solder) ในเรื่องความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [3-6]

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดความล้าและการคืบ เป็นการวิบัติทางโลหะวิทยา (Metallurgical failure) ที่สำคัญที่เกิดขึ้นกับรอยบัดกรีในระหว่างการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการปรับปรุงให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าได้โดยการทำให้มีขนาดเกรนที่เล็กลง แต่วิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการต่อต้านการเกิดการคืบ เนื่องจากการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงจะทำให้เกิดการคืบโดยกระบวนการเลื่อนของขอบเกรน (Grain boundary sliding) ได้ง่ายขึ้น [3, 7] และเป็นที่ทราบกันดีว่า วิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาค (Particles) ขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรี เพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน [4, 5, 8]

วัสดุเชิงประกอบมีองค์ประกอบสองส่วนด้วยกัน คือ เนื้อพื้น (Matrix) และเฟสกระจาย (Dispersed phase) ด้วยความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้มีความพยายามในการนำอนุภาคนาโน (Nanoparticles) ชนิดต่างๆ เช่น อนุภาคนาโนของโลหะบริสุทธิ์ อนุภาคนาโนของเซรามิก หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) มาใช้เป็นเฟสกระจายในการทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) [9-16] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง ณ.ขณะนี้ ในการใช้อนุภาคนาโนในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบ คือ การเติมอนุภาคนาโนลงไปในโลหะบัดกรีจะทำให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้ มีคุณสมบัติต่างๆในการบัดกรีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น มีความสามารถในการเปียก (Wettability) ลดลง และมีโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีแตกต่างจากเดิม [17-25] ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปที่จะต้องศึกษาสำหรับโลหะบัดกรี ทั้งโลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bars) และโลหะบัดกรีแบบครีม (Solder pastes) อย่างไรก็ตามในการใช้งานโลหะบัดกรีแบบครีม ยังมีคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมอีก คือ ความหนืด (Viscosity) ความสามารถในการพิมพ์ (Printability) และการทรุดตัว (Slump) ซึ่งพบว่า การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแบบครีมยังมีน้อยมาก

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความหนืด ความสามารถในการพิมพ์ การทรุดตัว และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบครีมชนิดใหม่ จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-3.0Ag-0.5Cu และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu กับแผ่นรองทองแดง สำหรับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย ทำให้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ และอนุภาคนาโนซิงค์ ออกไซด์อาจจะใช้เป็นเฟสกระจายในโลหะบัดกรีได้ดี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง (1975°C) ทำให้มีความเสถียรที่อุณหภูมิการบัดกรี (ไม่เกิน 450°C) โดยผลจากงานวิจัยนี้อาจจะนำไปใช้พัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ และสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว และความหนืดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการพิมพ์ และการทรุดตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu
- 3) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu
- 4) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu กับแผ่นรองทองแดง
- 5) เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบครีมชนิดใหม่ จากโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-3.0Ag-0.5Cu และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม Sn-3.0Ag-0.5Cu เพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบคริมชนิดใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำการศึกษาค่าอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความหนืด ความสามารถในการพิมพ์ การหดตัว ความสามารถในการเปียกบนแผ่นรอง และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี ทั้งนี้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะเติมลงในโลหะบัดกรีมีความเข้มข้นไม่เกิน 1.00 wt% เนื่องจากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนพบว่าการเติมอนุภาคนาโนในความเข้มข้นมากกว่า 1.00 wt% จะไม่ช่วยทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยบัดกรีมีค่าลดลง [19, 20, 22-25] ในการศึกษาความสามารถในการพิมพ์ การหดตัว ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรอง และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี จะศึกษาบนแผ่นรองที่ทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ส่วนวิธีการบัดกรีที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จะใช้การบัดกรีแบบ Reflow soldering

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ จะใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม Sn-3.0Ag-0.5Cu ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 217 °C เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐาน แล้วนำมาเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม Sn-3.0Ag-0.5Cu เพื่อนำผลการศึกษาไปพัฒนาเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโนแบบคริมชนิดใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความหนืด ความสามารถในการพิมพ์ การหดตัว ความสามารถในการเปียกบนแผ่นรอง และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี โดยจะทำการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงในโลหะบัดกรีด้วยความเข้มข้นไม่เกิน 1.00 wt% เนื่องจากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนพบว่าการเติมอนุภาคนาโนในความเข้มข้นมากกว่า 1.00 wt% จะไม่ช่วยทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยบัดกรีมีค่าลดลง [19, 20, 22-25] ซึ่งความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะทำการศึกษาคือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 wt% โดยโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมต่างๆจะถูกผสมให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโลหะบัดกรีก่อนที่จะนำไปหาจุดหลอมเหลว (ในรูปของอุณหภูมิโซลิดัส และอุณหภูมิลิกวิดัส) โดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) สำหรับการวัดความหนืดของโลหะบัดกรีจะใช้เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ในการวัดค่าความหนืดของโลหะบัดกรีแบบคริมที่อุณหภูมิ 25 °C ตามมาตรฐาน IPC-TM-650-2.4.34.2 ส่วนความสามารถในการพิมพ์จะทำการวัดโดยใช้เครื่องพิมพ์โลหะบัดกรี (Solder paste printer) พิมพ์โลหะบัดกรีแบบคริมลงบนแผ่นรอง แล้วทำการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่พิมพ์ติดบนแผ่นรองด้วยวิธี Digital holography เพื่อนำไปคำนวณค่าความสามารถในการพิมพ์ต่อไป ในการทดสอบการหดตัวของโลหะบัดกรีหลังจากการพิมพ์จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 150 °C ตามมาตรฐาน IPC-TM-650-2.4.35 สำหรับการวัดความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง จะทำการบัดกรีโลหะบัดกรีแบบคริมบนแผ่นรองทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% และทำการวัดความสามารถในการเปียกในรูปของค่าตัวประกอบการกระจาย (Spread factor) หรืออัตราส่วนของการกระจาย (Spread ratio) ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดงทำโดยใช้ Optical microscope

(OM), Scanning electron microscope (SEM), Energy dispersive spectroscopy (EDS) และ X-ray diffractometer (XRD) ช่วยในการตรวจสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้ อาจจะสามารถนำไปจดสิทธิบัตรได้ และผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในการประชุมวิชาการ และวารสารวิชาการ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วและโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว และอุตสาหกรรมการผลิตโลหะบัดกรีสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ได้



บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

2.1.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus-Liquidus)

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

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

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

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

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

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

2.1.2 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

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

ในงานวิจัยของ Li และคณะ [33] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอินเดียม (In) ที่มีต่อการพัฒนาคุณสมบัติในด้านต่างๆของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu0.2Ni โดยมีการเติม In ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 wt% ตามลำดับ สำหรับความสามารถในการเปียกจะทำการทดสอบบนแผ่นรองทองแดง และทำการบัดกรีในเตาหลอม ที่อุณหภูมิ 270°C เป็นเวลา 5 min วัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรี โดยพบว่าที่ระดับการเติมของ In 0.3 wt% วัดพื้นที่การกระจายตัวได้ 60.54 mm² เพิ่มขึ้นกว่าในเงื่อนไขที่ไม่ได้มีการเติม In ถึง 15.6 % ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเติม In ลงในโลหะบัดกรีในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวให้กับโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี

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

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [31] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu มีการเติมอนุภาคนาโน TiC ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.0, 0.05, 0.1 และ 0.2 wt% ตามลำดับ ทำการวัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดพื้นที่การกระจายตัวและค่ามุมสัมผัสหลังการบัดกรีด้วยวิธีโพลาไรซ์ จากผลการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคนาโน TiC ในระดับการเติมที่น้อยช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกให้กับโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี โดยที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่ 0.1 wt% ให้พื้นที่การกระจายตัวสูงสุดที่ 2.168 mm^2 และมีค่ามุมสัมผัสลดลงต่ำสุดที่ 30.3° ทั้งนี้พื้นที่การกระจายตัวและค่ามุมสัมผัส จะมีแนวโน้มที่ลดลงและสูงขึ้นที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวที่ลดลง

ในงานวิจัยของ Fallahi และคณะ [34] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติม Fe และ In ในโลหะบัดกรีทั้งหมดสี่ชนิด ได้แก่ Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6Fe และ Sn-3.6Ag-0.9Cu-1.7In-0.3Ce บนแผ่นรองทองแดงแบบธรรมดาและแบบเคลือบด้วย Ni-P ขนาด $1.5 \times 1.5 \times 0.5 \text{ mm}$ ใช้น้ำยาประสานชนิด ZnCl_2 จุ่มลงที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 s ที่ความเร็ว 5 mm/s ลึก 5 mm วัดการกระจายตัวด้วยวิธี Wetting balance และการกระจายตัว (Spread test) พบว่าในเงื่อนไขที่มีการเติมอินเดียมช่วยลดค่ามุมสัมผัสจาก 29.6 เหลือเพียง 18° ค่ามุมสัมผัสที่ลดลงแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวที่ดีขึ้นหลังการบัดกรี

ในงานวิจัยของ Guang และคณะ [35] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค ความสามารถในการเปียก สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 96.5Sn-3Ag-0.5Cu ที่มีการเติมอนุภาคนาโนฟลูออไรด์ (FNSs) เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงที่ปริมาณ 0, 0.05, 0.1 และ 0.2 wt% ทำการผสมกับโลหะบัดกรีด้วยเครื่องบด (Ball mill) นำไปอัดและให้ความร้อนในสภาวะสุญญากาศ ทั้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนดังกล่าวที่เตรียมได้อัดลงบนแผ่นรองทองแดง บัดกรีที่อุณหภูมิ 250°C วัดความสามารถในการเปียกด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นรองทองแดง ด้วยกล้องสำหรับวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าการเติมอนุภาคนาโน FNSs ช่วยลดค่ามุมสัมผัสจาก 37.1 เป็น 30.1° เมื่อเติมอนุภาคนาโน FNSs ที่ 0.1 wt% อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมอนุภาคดังกล่าวในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันเป็น 33.2° ที่ระดับการเติม 0.2 wt% ซึ่งการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อยช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างโลหะบัดกรีกับฟลักซ์ขณะการบัดกรีได้ ทำให้โลหะบัดกรีสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น มีค่ามุมสัมผัสที่ลดลง แต่หากใส่อนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคนาโนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีกับฟลักซ์เนื่องจากอนุภาคนาโน FNSs มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ จึงมีความสามารถในการดูดซับพวกอนุภาคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือนกัน หรือพวกโมเลกุลขนาดเล็ก (เช่น โมเลกุลออกซิเจน) ในฟลักซ์ได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้การรวมตัวของอนุภาคดังกล่าวภายในบริเวณนี้ในปริมาณมากจึงส่งผลให้แรงตึงผิวตรงรอยต่อบัดกรีให้เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีลดลงและมีค่ามุมสัมผัสที่สูงขึ้นนั่นเอง

ในงานวิจัยของ Yue และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีผลต่อความสามารถในการเปียกและการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีชนิดที่มีปริมาณของ Ag ต่ำบนแผ่นรองทองแดง ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน Fe_2O_3 และผสมลงในโลหะบัดกรีด้วยวิธีการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 hrs เพื่อให้ได้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-1.0Ag-0.7Cu- $x\text{Fe}_2\text{O}_3$ สำหรับปริมาณของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ที่ทำการผสมเข้าไปในโลหะบัดกรีจะอยู่ในช่วง 0-1 wt% โดยความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีจะถูกวิเคราะห์จากค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่ทำการวัดจากค่าแรงการกระจายตัว (Fw) ด้วยการทดสอบตามกรรมวิธีของ SAT5200T ที่ทำการ

จุ่มแผ่นรองทองแดงลงในโลหะบัดกรีนาโนเชิงประกอบที่หลอมละลายแล้วที่ความเร็ว 0.1 mm/s ความลึก 0.05 mm เป็นเวลา 5 s และยกขึ้นเป็นเวลา 5 mm/s โดยควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบไว้ที่ 260°C พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Fe_2O_3 ลงในโลหะบัดกรีปริมาณ 0.4 wt% จะให้ค่าการกระจายตัวของโลหะบัดกรีสูงสุด

ในงานวิจัยของ Tang และคณะ [37] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีต่อความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยมีการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 อยู่ในช่วง 0–1 wt% จากการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีในปริมาณที่มากกว่า 0.6 wt% สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะบัดกรีได้ส่งผลให้ค่าความสามารถในการเปียกเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยของ Tsao และคณะ [38] ได้ศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu ที่มี การเติมอนุภาคนาโนอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ลงไป ทำการวัดความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีด้วยวิธีการวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าการเติมอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่ปริมาณ 0.5 wt% จะให้ค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุดที่ 28.9° ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีที่ดีขึ้น ขณะที่การเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีลดลงเช่นกัน

2.1.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว (Printability and Slump)

ในงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของโลหะบัดกรีในกลุ่มที่มีส่วนผสมของธาตุ Ag ต่ำ และไม่มี Ag เปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันแพร่หลายอย่าง Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) แบบครีม ทั้งในด้านความสามารถในการพิมพ์ ความสามารถในการเปียก และการหลุดตัว ในการทดสอบจะทำการพิมพ์โลหะบัดกรีลงบนแผ่น Stencil ดูลักษณะการคงตัวที่เวลา 0 และ 4 hrs อัตราเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 50-70 mm/s หรือสูงกว่าเล็กน้อย ขณะที่ทำการทดสอบการหลุดตัวจะเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการทดสอบการพิมพ์โดยนำแผ่น stencil ที่ถูกอัดด้วยโลหะบัดกรีที่ทิ้งไว้ที่ 0 และ 4 hrs นำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 125-150°C เป็นเวลา 20 min จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีในกลุ่มที่มีส่วนผสมของธาตุ Ag ต่ำ และไม่มี Ag นั้นให้ประสิทธิภาพในการพิมพ์ที่ดีใกล้เคียงกับในโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 อย่างไรก็ตามพบว่าในโลหะบัดกรีบางกลุ่ม เช่น SAC307, 99.2Sn-3Bi-0.5Cu-Co และ Sn-0.1Ag-0.7Cu-0.03Co เป็นต้น ยังคงมีความคงตัวที่ไม่ดีเทียบเท่ากับ SAC305 เมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 4 hrs และในผลการทดสอบการหลุดตัว พบว่ามีความใกล้เคียงกับในโลหะบัดกรี SAC305 เช่นกันโดยพิจารณาจากจำนวนที่สัมผัสกันระหว่างช่องว่างของ Stencil ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อน

ในงานวิจัยของ An และคณะ [40] ได้ศึกษาความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการพิมพ์สามารถควบคุมการทำมุมของ Squeegee แรงกดในการพิมพ์ และความเร็วในการพิมพ์ ให้มีความเหมาะสมกับโลหะบัดกรีแบบครีมในหลากหลายชนิดได้ สำหรับแผ่น Stencil ที่ใช้ในการทดสอบถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายลูกกลิ้งที่สามารถทำการพิมพ์ได้อย่างต่อเนื่อง ขณะทดสอบมีการใช้ J-shape probe ให้คอยสัมผัสบริเวณพื้นผิวของโลหะบัดกรีเพื่อป้องกันแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในระหว่างการพิมพ์ จากการทดสอบในโลหะบัดกรีทั้งสองประเภท คือโลหะบัดกรีตะกั่ว (Sn-Pb) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการพิมพ์ที่ดีกว่าในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Sn-Ag-Cu) สังเกตได้จากแรงตัดเฉือนในแนวสัมผัสซึ่งในโลหะบัดกรีตะกั่วจะมีค่าที่สูงและสามารถพิมพ์ในอัตราที่รวดเร็วกว่าในส่วน of โลหะ

บัดกรี SAC มาก ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าโลหะบัดกรีแบบ SAC ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโลหะบัดกรีตะกั่วทุกประการ

ในงานวิจัยของ Durairaj และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบคริม SAC การตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำของโลหะบัดกรีจะแสดงถึงสมบัติการหยุ่นเหนียวของโลหะบัดกรีแบบคริม ที่สังเกตได้จากในกระบวนการพิมพ์ โดยจากการทดสอบพบว่าโลหะบัดกรีบัดกรีแบบคริมแสดงพฤติกรรมของของแข็ง (G') สูงกว่าของเหลว (G'') มากจะทำให้โลหะบัดกรีแบบคริมสามารถติดบนบริเวณฐานรองรับได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านการไหลของโลหะบัดกรีที่พบว่า ยิ่งโลหะบัดกรีแบบคริมมีความต้องการในการไหลมากขึ้นจะสามารถยึดเกาะติดกับฐานรองรับได้มากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาของโลหะบัดกรีแบบคริมชนิดใหม่ขึ้นมา

ในงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [42] ได้ศึกษาวิธีการในการเลือกโลหะบัดกรีแบบคริมที่ดีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการทดสอบทั้งความสามารถในการพิมพ์ การหลุดตัว และความสามารถในการเปียก รวมทั้งการเลือกชนิดของโลหะบัดกรีเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบด้วยโลหะบัดกรีแบบคริมทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ ชนิดที่มีฮาโลเจน ชนิดปราศจากฮาโลเจน และชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ พบว่าค่าความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความเร็วในการพิมพ์อยู่เฉลี่ยที่ 50-70 mm/s หรือสูงกว่าเล็กน้อย และในส่วนของค่าการหลุดตัว พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้อัตราการหลุดตัวของโลหะบัดกรีเกิดขึ้นสูงกว่าที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามแม้ว่าในบางเงื่อนไขให้ค่าการหลุดตัวที่ต่ำเมื่อทดสอบในอุณหภูมิห้อง แต่โลหะบัดกรีที่ดีควรให้ค่าการหลุดตัวที่ต่ำในทุกสภาวะ

2.1.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

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

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

ในงานวิจัยของ Chen และคณะ [31] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอนุภาคนาโนไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีต่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยมีระดับการเติมที่ 0.0, 0.05, 0.10 และ 0.20 wt% ตามลำดับ ทำวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง SEM สำหรับก่อนการบ่มเพาะความร้อน พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปหลังการเติมของอนุภาคนาโน คือ จากทรงกลมเปลี่ยนเป็นรูปร่างคล้ายแท่งไม้ขนาดสั้น และเมื่อทำการวัดขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดเล็กลง จาก $1.75 \pm 0.3 \mu\text{m}$ ลดลงเหลือเพียง $0.72 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ที่ระดับการเติมของอนุภาคนาโนสูงสุด 0.2 wt%

ในงานวิจัยของ Sobhy และคณะ [44] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.5Cu โดยมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.5 wt% และทำการผสมกันด้วยวิธีการหลอมละลายในเตาอบที่สภาวะสูญญากาศ อุณหภูมิ 603 K เป็นเวลา 2 hrs อัดลงในแม่พิมพ์ Stainless Steel ที่งัดให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรี SAC355 สามารถช่วยยับยั้งการเติบโตของเกรนได้เป็นอย่างดี รวมทั้งในบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn และ Cu_6Sn_5 มีความหนาที่ลดลง

ในงานวิจัยของ Tang และคณะ [45] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีต่อการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu บนแผ่นรองทองแดง โดยจะทำการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ปริมาณ 0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.6 wt% ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ พบว่าเมื่อเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีที่ปริมาณ 0.1 wt% ความหนาและขนาดเกรนของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น

ในงานวิจัยของ Chellvarajoo และคณะ [46] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu ที่มีการเติมอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ปริมาณ 0.5, 1.5 และ 2.5 wt% ทำการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์บนแผ่นรองทองแดง พบว่ามีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อบัดกรี ได้แก่ Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn เกิดขึ้น โดยการเติมอนุภาคนาโน NiO ในปริมาณดังกล่าว พบว่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะข้างต้นมีขนาดลดลง 36.1, 58.6, and 60% ตามลำดับ นอกจากนี้อนุภาคนาโน NiO ยังทำให้เกิดเฟสใหม่ คือ $(\text{Cu},\text{NiO})_6\text{Sn}_5$ แทนเฟส Cu_6Sn_5 ที่มีความเสถียรมากกว่าในเฟสของ Cu_6Sn_5 อีกด้วย ซึ่งเป็นการช่วยลดอัตราการเติบโตของ Cu_3Sn โดยยับยั้งการแพร่ของ Sn ผ่านขอบเกรนได้เป็นอย่างดี

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

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การบัดกรี (Soldering)

การบัดกรี หรือ การบัดกรีย่อหน้า หมายถึง กรรมวิธีการยึดหรือต่อ (Joining) แผ่นโลหะชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยโลหะที่นำมาต่อจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนการเชื่อม (Welding) แต่การบัดกรีจะใช้วิธีนำเอาโลหะผสมที่เรียกว่า โลหะบัดกรีหรือตะกั่วบัดกรี (Solder) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า

โลหะขึ้นงานนำมาใช้บัดกรี ทำหน้าที่เป็นตัวประสานขึ้นงานให้ติดกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกิน 450°C การบัดกรีต้องอาศัยตัวช่วยประสานหรือฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดบริเวณผิวหน้าของโลหะขึ้นงานก่อน ให้ปราศจากออกไซด์และคราบน้ำมันมาเกาะ สำหรับช่องว่างระหว่างโลหะขึ้นงานที่โลหะบัดกรีแทรกอยู่ควรมีระยะห่างอยู่ระหว่าง 0.076-0.0127 mm สำหรับการบัดกรีนั้นถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และงานโลหะแผ่นอย่างกว้างขวาง

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

การบัดกรีที่ดีนั้นจะทำให้ได้รอยบัดกรีที่มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบสำคัญ คือ

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

โดยองค์ประกอบทั้ง 3 นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี จึงอาจกล่าวได้ว่า องค์ประกอบทั้ง 3 นี้สัมพันธ์กันอยู่ด้วยความร้อนที่ใช้ในการบัดกรี [48]

2.2.2 โลหะขึ้นงาน (Base metal)

สำหรับในโลหะขึ้นงานทั่วไปแล้วจะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็มีการนำมาใช้งานบ้าง เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา แต่จะทำการบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และอัลลอยของเหล็กกับทองแดง ดังในตารางที่ 2.1 ที่แสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี และสิ่งสำคัญคือต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการบัดกรีทั้งสิ้น

โดยโลหะบัดกรีที่เป็นดีบุก แคดเมียม และทองแดง พบว่าง่ายต่อการเชื่อมประสานของโลหะบัดกรี โดยที่ไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และสามารถใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ แต่ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของอัลไพต์บนผิว ทำให้ประสิทธิภาพการบัดกรีลดลง ส่วนตะกั่วจะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้น และควรต้องทำความสะอาดก่อนทำการบัดกรี ขณะที่ในทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็กอาจเกิดออกไซด์ได้บางบริเวณ ควรทำความสะอาดด้วยสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ หรือล้างด้วยกรดอ่อนก่อนนำไปใช้งาน [48]

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี [49]

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

2.2.3 โลหะบัดกรี (Solder)

โลหะบัดกรี หมายถึง โลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานในการบัดกรี ในอดีตจะใช้เป็นโลหะบัดกรีผสมระหว่างธาตุดีบุก และตะกั่ว มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดหลอมเหลวต่ำ จุดบัดกรีมีความแข็งแรง มีความเงางาม และนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น โดยโลหะบัดกรีที่ดีมักมีดีบุกผสมอยู่ในสัดส่วนที่มากกว่า เนื่องจากดีบุกมีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่ดี แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะชิ้นงานที่จะนำมาบัดกรีด้วยที่จำเป็นต้องมีส่วนผสมของโลหะที่เป็นชนิดเดียวกันกับชิ้นงานผสมอยู่ด้วย เช่น ถ้าต้องการบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงตัวโลหะบัดกรีจะต้องมีส่วนผสมระหว่างดีบุกกับทองแดงอยู่ด้วย เป็นต้น [50] นอกจากนี้ดีบุกยังเป็นส่วนผสมหลักของตะกั่วบัดกรีที่หลายคนคุ้นเคย คือ 63Sn/37Pb อีกด้วยแต่เนื่องจากในปัจจุบันมีการตระหนักถึงความ เป็นพิษของตะกั่วที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์เพิ่มสูงขึ้น มีการออกข้อบังคับเกี่ยวกับการควบคุมการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อมาใช้ทดแทนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่ก็จะมีส่วนประกอบของธาตุดีบุกเป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดิม โดยมีการเติมธาตุอื่นๆลงในโลหะบัดกรีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบัดกรี เช่น Cu, Ag, Zn, Bi, Sb และ Ni เป็นต้น ท่ามกลางโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วระบบสมดุลสองธาตุในกลุ่มต่างๆ กลุ่ม Sn-Ag, Sn-Zn และ Sn-Cu และ Sn-Zn เป็นกลุ่มที่ได้รับความนิยมเพื่อนำไปใช้งานทดแทนตะกั่วบัดกรีมากที่สุด ส่วนในระบบสมดุลสามธาตุของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว กลุ่ม Sn-Ag-Cu เป็นกลุ่มที่ถูกจัดว่ามีประสิทธิภาพดีเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ และมีสมบัติทางกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วนผสมอื่นๆ อย่างไรก็ตามในส่วนของการกระบวนการผลิต หรือการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการพัฒนาในเรื่องคุณสมบัติบางประการของโลหะบัดกรีชนิดไร้สารตะกั่ว เช่น จุดหลอมเหลวที่ยังคงสูงเกินไป ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้แผงวงจรหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เกิดการเปลี่ยนสีหรือเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปได้ , การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn สูงอันเป็นสาเหตุของความเปราะและแตกหักของรอยบัดกรี, การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่มากขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรีให้มีประสิทธิภาพที่ลดลงหลังการบัดกรี, ความง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และความสามารถในการกระจายตัวที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม นอกจากนี้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนใหญ่ที่มีส่วนผสมของดีบุก (Sn) เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนที่สูง อาจทำให้ง่ายต่อการเกิดผลึกของดีบุกที่มีลักษณะเป็นเส้นคล้ายหนวดแมว (Tin whisker) ขึ้น บริเวณผิวของดีบุกเป็นแนวยาว ซึ่งไม่สามารถควบคุมทิศทางและจุดที่จะเกิดได้ ทำให้เมื่อนำไปใช้งานจริงมีโอกาสที่จะเกิดการช็อตกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในแผงวงจรพิมพ์ได้ง่าย [51]

ด้วยเหตุนี้การพิจารณาคุณสมบัติของโลหะบัดกรีที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นไปอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะคุณสมบัติหลักที่สำคัญ ด้านไฟฟ้า และทางกล เพราะแสดงถึงอายุการใช้งานของอุปกรณ์ อีกทั้งคุณสมบัติดังกล่าวควรอยู่ภายใต้ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงเกินไปด้วย ซึ่ง คุณสมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ควรพิจารณาทั้งในส่วนของการกระบวนการผลิตและเมื่อ นำไปใช้งานจริงดังจะแสดงดังตารางที่ 2.2

ในวงการอุตสาหกรรมเรื่องต้นทุนการผลิตถือเป็นเรื่องสำคัญ เพราะในอดีตสามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำได้ เนื่องจากราคาของตะกั่วในท้องตลาดมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะชนิดอื่น เมื่อเวลาผ่านไปการแข่งขันในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้น ทุกฝ่ายต่างพยายามที่จะลดค่าใช้จ่ายโดยรวมในการผลิตเพื่อให้มีต้นทุนต่ำ ที่สุด โดยคุณสมบัติบาง

ประการรวมถึงต้นทุนของธาตุโลหะแต่ละชนิดที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นโลหะ บัดกรีผสมทดแทนตะกั่ว แสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 แสดงถึงส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีตะกั่วโดยมีดีบุกเป็นองค์ประกอบหลักได้

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของโลหะบัดกรี [52]

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

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของโลหะทดแทนตะกั่ว [49]

โลหะ	ราคาโดยประมาณ (US\$) ต่อปอนด์	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25°C (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)	จำนวนที่สามารถผลิตได้ต่อปี (ล้านปอนด์)	ความยากง่ายในการนำมาใช้งาน
สังกะสี (Zn)	0.50	0.258	1560	หาง่าย
พลวง (Sb)	0.80	0.239	100	หาง่าย
ดีบุก (Sn)	3.50	0.264	180	หาง่าย
เงิน (Ag)	84.20	0.379	3.5	มีจำกัด
บิสมัท (Bi)	3.40	0.354	9	มีจำกัด
อินเดียม (In)	125.00	0.264	0.2	ขาดแคลน
ตะกั่ว (Pb)	0.45	0.41	170	หาง่าย
ทองแดง (Cu)	0.65	0.324	4900	หาง่าย

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมต่างๆที่สามารถนำมาทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีสารตะกั่ว [49]

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

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

ตารางที่ 2.5 ข้อเด่น-ด้อยของธาตุเจือที่นิยมใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว [49]

โลหะ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
สังกะสี (Zn)	- ราคาถูก (ใกล้เคียงกับตะกั่ว) - อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ	- ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในบรรยากาศ
พลวง (Sb)	- ช่วยเพิ่มสมบัติด้านความต้านทานต่อความคืบและความล้า	- ทำให้ความสามารถในการเปียกและการแพร่กระจายตัวของโลหะบัดกรีลดลง
ดีบุก (Sn)	- ราคาถูก - นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี - ทนต่อการกัดกร่อน - มีความสามารถในการเปียกและการแพร่กระจายตัวขณะทำการบัดกรีที่ดี	- ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในบรรยากาศ
เงิน (Ag)	- มีความสามารถทำให้โลหะบัดกรีมีการแพร่กระจายตัวที่ดีขึ้น - ช่วยลดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีให้ต่ำลง - เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี	- ราคาสูง
บิสมัท (Bi)	- อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ - มีความสามารถในการเชื่อมประสานดี	- ราคาสูง
อินเดียม (In)	- ช่วยลดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีให้ต่ำลง - ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - เพิ่มสมบัติความเหนียวให้ดียิ่งขึ้น	- ราคาสูง
ทองแดง (Cu)	- เพิ่มความแข็งแรงให้โลหะบัดกรี	- กรณีโลหะบัดกรีผสมกับธาตุดีบุก Sn-Cu อาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin whisker) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่อาจทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้

2.2.3.1 โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste)

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

โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเนื้อครีมมีลักษณะคล้ายยาสีฟัน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีความคงตัวทางจลนศาสตร์สูง (Kinetically stable) มีส่วนประกอบหลักเป็นผงโลหะผสม (Solder powder) และฟลักซ์ (Flux) คุณสมบัติหลายประการของโลหะบัดกรีต่างส่งผลกระทบต่ออาการเกิดของรอยบัดกรีบัดกรี โดยทั้งโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคในโลหะบัดกรี สัดส่วนของโลหะบัดกรี และ พฤติกรรมการไหลของโลหะบัดกรี จัดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดสำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนโลหะขึ้นงาน

โดยข้อที่ควรทราบเกี่ยวกับโลหะบัดกรีแบบครีมมีรายละเอียดดังนี้

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

ขนาดอนุภาคของผงโลหะสามารถวัดขนาดโดยการร่อนผ่านชุดตะแกรงทดสอบ (Test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่างๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้ อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ส่วนช่องบนตะแกรง (Sieve) เกิดจากการนำลวดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (Mesh) ซึ่งหมายถึงจำนวนช่องของ ตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวและกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น เมชขนาดเดียวกันอาจแตกต่างกันถ้าทำจากเส้นลวดที่ต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องบอกขนาดช่องหรือ aperture size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วยเสมอ โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรง มาตรฐานแต่ละแบบอาจจะมีขนาดช่องที่ต่างกันด้วยได้เช่นกัน ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบ จะต้องแสดงรายละเอียด ทั้งขนาดเมช และขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรงทุกครั้งเพื่อความถูกต้องในการนำไปใช้งาน

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

2) ฟลักซ์ (Flux) เป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง โดยหน้าที่หลักของฟลักซ์คือการกำจัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะขึ้นงาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนตรงบริเวณที่ทำการบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวและมีการไหลตัวที่ดีขึ้น โดยฟลักซ์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ ฟลักซ์อินทรีย์ (Organic fluxes) ซึ่งเป็นฟลักซ์ประเภทที่ไม่มีสารกัดกร่อน เช่น ยางไม้ ยางสน แอลกอฮอล์ เป็นต้น และ ฟลักซ์อนินทรีย์ (Inorganic fluxes) เป็นฟลักซ์ประเภทที่มีการกัดกร่อน (Corrosive fluxes) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในจำพวกกรดและเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆ สำหรับปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์กับฟลักซ์จะเกิดขึ้นช้าที่อุณหภูมิห้อง ในทางตรงกันข้ามสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ซึ่งส่วนใหญ่การใช้งานจะนิยมใช้ฟลักซ์อินทรีย์มากกว่า เพราะไม่ทำให้เหลือสาร

จำพวกไฮโดรเจนตกค้างมากเกินไป โดยฟลักซ์อินทรีย์จำเป็นต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากพอที่จะไม่ระเหยไปก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์โลหะ ขณะเดียวกันฟลักซ์อินทรีย์ก็ไม่ควรเหลือตกค้างบริเวณรอยบัดกรีด้วยเช่นกัน เนื่องจากอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยบัดกรีเกิดความบวมพร่อง และมีความแข็งแรงที่ลดลง [50]

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

2.2.4 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

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

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

ตารางที่ 2.6 การรวมตัวของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละเฟส [48]

ชนิดของเฟสเสริมแรง	ชนิดของเฟสเนื้อพื้น		
	โลหะ	เซรามิก	พอลิเมอร์
โลหะ	- อยู่ในรูปของผงโลหะสามารถผสมเข้ากับโลหะด้วยกันได้	ไม่พบข้อมูล	- พลาสติกผสม - ยางลัอร์ด
เซรามิก	- โลหะผสมซีเมนต์คาร์ไบด์ - เส้นใยเสริมแรงโลหะ	- เส้นใย SiC Whiskers - อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	- พลาสติกผสม - เส้นใยแก้ว
พอลิเมอร์	- ผงโลหะที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุพอลิเมอร์	ไม่พบข้อมูล	- พลาสติกผสม - เส้นใยเคฟลาร์
ส่วนประกอบอื่นๆ (C,B)	- เส้นใยเสริมแรงโลหะ	ไม่พบข้อมูล	- ยางผสมคาร์บอน - แบลค - เส้นใยคาร์บอน หรือ โบรอน

หมายเหตุ : C คือ ธาตุคาร์บอน และ B คือ ธาตุโบรอน

2.2.5 การเลือกใช้ออนุภาคนาโนในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับวิธีการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม Sn-Pb พบว่ามีสองวิธีการด้วยกัน วิธีการแรกคือการทำให้เป็นโลหะผสม เช่น การเติมธาตุโลหะที่บางชนิดลงไปซึ่งสามารถเพิ่มความสามารถในการเปียกให้กับโลหะบัดกรีได้ [56, 57] อาทิเช่น การเติมธาตุ Ag ลงไป ถึงแม้จะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเชิงกลที่ลดลง แต่ก็ทำให้มีความเหนียวที่มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก Ag ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และการกระจายตัวของเฟสในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ [58] วิธีการที่สอง คือ การเติมอนุภาคนาโนเล็กลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง เช่น การเติมอนุภาคนาโน Al₂O₃ และ TiO₂ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับโลหะบัดกรี โดยทำให้สามารถทนทานต่อความเค้นและความล้าได้ดียิ่งขึ้น [59, 60]

จากคุณสมบัติที่ดีของการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) และความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) ชนิดต่างๆ ได้แก่ อนุภาคนาโนของโลหะบริสุทธิ์ อนุภาคนาโนเซรามิก หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) มาใช้เป็นเฟสกระจาย ทำให้โลหะบัดกรีดังกล่าวเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) [11-17, 26] โดยในกลุ่มของอนุภาคนาโนเซรามิก เช่น ZrO₂, AlO₂, TiO₂, Cu₂O, SnO₂, La₂O₃ และ ZnO เป็นต้น เป็นกลุ่มของอนุภาคนาโนที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้เป็นเฟสกระจายมากที่สุด เนื่องจากสามารถช่วยยับยั้งการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและสามารถกระจายตัวในเฟสเนื้อพื้นได้เป็นอย่างดี [44] โดยในวิธีการที่มีการเติมอนุภาคนาโนเล็กลงไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนี้ ถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน [61, 62] แต่พบว่างานวิจัยที่มีการเติมอนุภาคนาโนเล็กลงไปโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้งในแบบครีมและแบบแข็งนั้น ยังคงไม่มีผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการที่กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ของโลหะบัดกรีดังกล่าวในการนำไปใช้งานจริง หรือในเชิงพาณิชย์ออกมา

อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงไปบนเนื้อโลหะบัดกรีจะทำให้คุณสมบัติต่างๆในการบัดกรีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น จุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก (Wettability) และ โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี โดยพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงไปจะส่งผลเสียต่อโลหะบัดกรีเชิง ประกอบบนานาโนที่ได้ คือ ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการเปียกที่ลดลง แต่ ส่งผลดี คือ ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ในรอยบัดกรีน้อยลงนั่นเอง [23, 27, 63-66]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิของออกไซด์ (ZnO) เติมนลงไปบนโลหะบัดกรีเพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายให้กับวัสดุประกอบ ซึ่งเป็นอนุภาคที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ และคาดว่าน่าจะทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงในโลหะบัดกรีแบบคริมทีตี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1975°C ทำให้มีความเสถียรที่อุณหภูมิการบัดกรี (ไม่เกิน 450°C) นั่นเอง

2.2.5.1 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nano-particles)

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

ตารางที่ 2.7 สมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [67]

สมบัติทางกายภาพ	
ชื่อผลิตภัณฑ์	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
สูตรเคมี	ZnO
ลักษณะภายนอก	ผงโลหะสีขาว
โครงสร้างผลึกทั่วไป	Wurtzite (Hexagonal)
น้ำหนักโมเลกุล	81.39 g/mol
ความหนาแน่น	5.61 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1975 °C
จุดเดือด	2360 °C
ดัชนีการหักเหแสง	2:008
ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap)	3.37 eV
ค่าขยายตัวทางความร้อน	2.90 μm/m-°C
ค่าการนำความร้อน	60 W/m.K
มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน	0.24

2.2.5.2 อนุภาคคอลลอยด์ (Colloids)

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

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

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

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

ยิ่งมวลของอนุภาคและคอลลอยด์มีขนาดเล็ก (ในระดับนาโนเมตร) จะยิ่งทำให้เกิดพฤติกรรมในรูปของ Body forces ลดลงมากขึ้นไปอีก โดย Surface forces นั้นจะเป็นการแสดงถึงการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคด้วยแรงต่างๆ เช่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Van de waals interaction) เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมนี้จะควบคุมการลอยตัวของคอลลอยด์ โดยแรงดังกล่าวอาจช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์ด้วยกันดึงดูด หรือผลักออกจากกันก็ได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของอนุภาค ชนิดของของไหล รวมทั้งระยะห่างระหว่างอนุภาค ซึ่งปกติแล้วถ้าอนุภาคไม่ได้ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ก็จะสามารถตัวกันด้วยอิทธิพลของแรงแวนเดอร์วาลส์เสมออยู่แล้ว ด้วยเหตุนี้จะแสดงให้เห็นว่า ทำไมผงอนุภาคขนาดเล็กเมื่อมารวมตัวกันถึงทำให้ของไหลมีความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น หรือไหลได้ยากขึ้น นอกจากนี้มวลขนาดเล็กของอนุภาคคอลลอยด์ยังแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกับโมเลกุลเมื่อกระจายตัวอยู่ในของไหล ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคคอลลอยด์นี้สามารถแพร่กระจายในของไหลและเคลื่อนที่แบบสุ่มในทิศทางที่ๆไม่แน่นอนได้ ซึ่งต่อมาเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน [68]

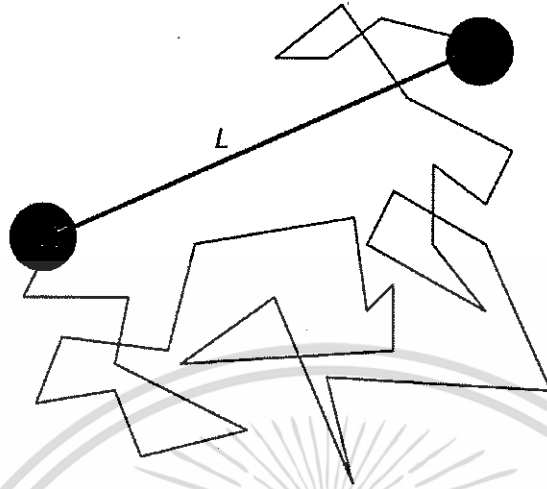
2.2.5.3 การเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion)

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

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

แต่ถึงอย่างไรก็ตามสมการข้างต้นไม่สามารถนำมาใช้คำนวณระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากจุดเริ่มต้นที่แท้จริงได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่ได้เป็นเส้นตรงดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 แต่ใน

สมการดังกล่าวจะบ่งบอกว่า ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กจะส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนในอัตราที่สูงขึ้น [68]

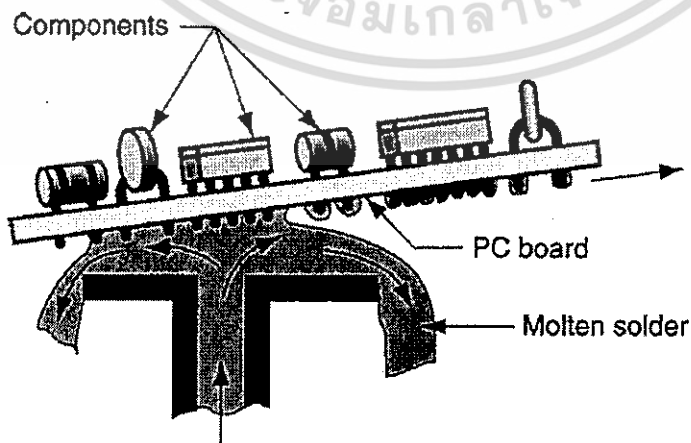


รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาคคอลลอยด์ [68]

2.2.6 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

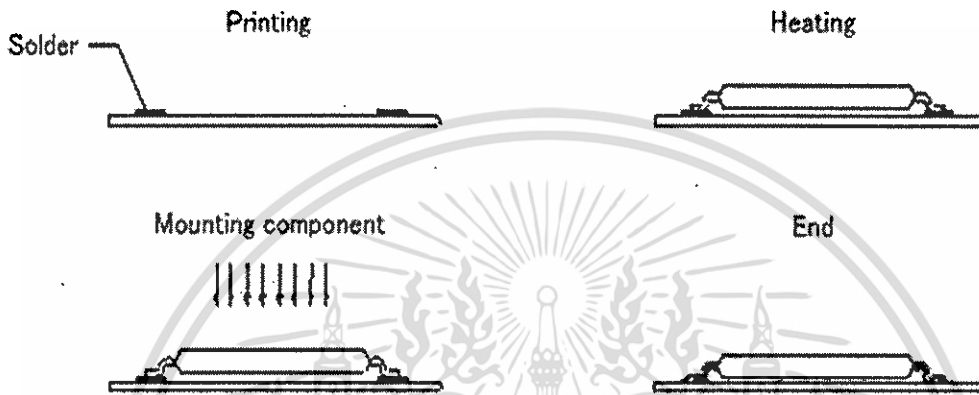
โดยทั่วไปแล้วการบัดกรีจะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการเล่นประสาน (Brazing) แตกต่างกันที่โลหะเติมที่ใช้ในการบัดกรีจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า 450°C โดยนอกจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการอื่นๆดังต่อไปนี้

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



รูปที่ 2.2 การบัดกรีแบบคลื่น [50]

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



รูปที่ 2.3 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ [69]

2.2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะบัดกรี

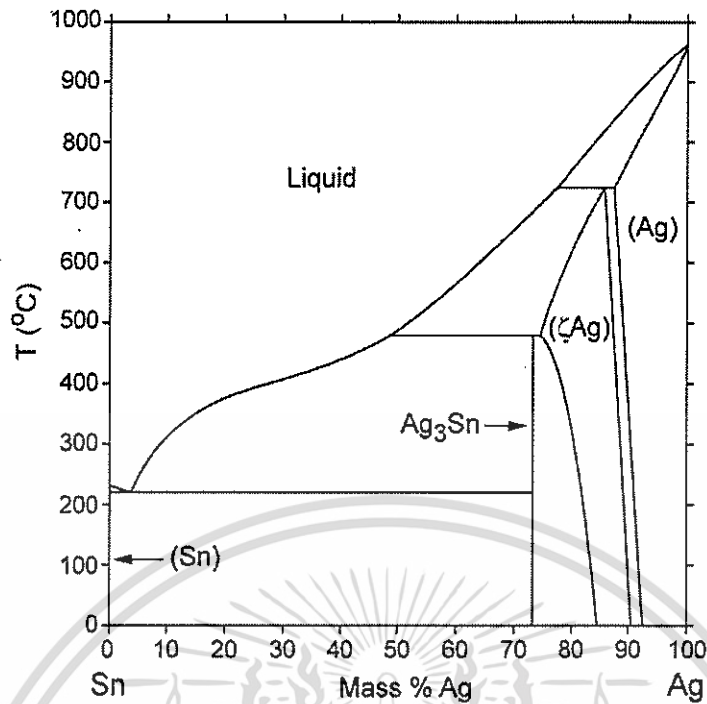
2.2.7.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน (Sn-Ag)

ปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสมดีบุก-เงิน จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220.3°C ที่ อุณหภูมินี้จะ ถูกเรียกว่า อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งอุณหภูมิ ยูเทคติกเป็น อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เฟสของของเหลวจะยังคงอยู่ในระบบ และสภาวะที่จุดยูเทคติกนี้ เฟส ของเหลวจะ เปลี่ยนสภาพเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส โดยในสมการที่ 2.3 จะแสดงถึงปฏิกิริยา- เทคติกของโลหะผสมดีบุกและเงิน ซึ่งจะเกิดเป็นเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ Ag_3Sn และเฟสของ Sn-rich ขณะที่ ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน จะแสดงดัง ตารางที่ 2.8



ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน

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



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน [70]

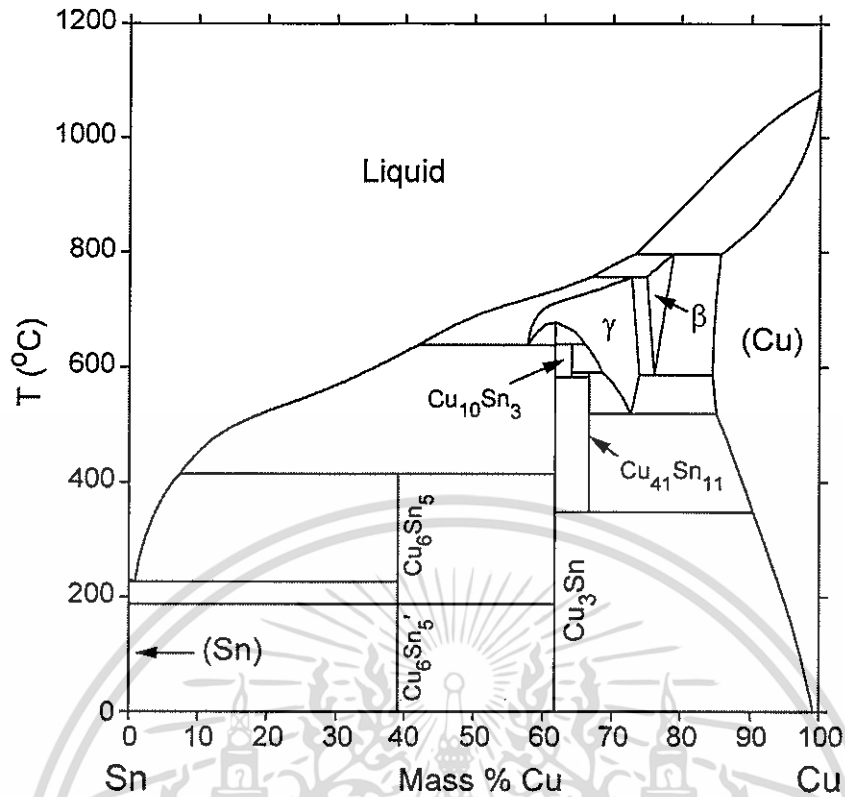
2.2.7.2 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu)

ปฏิกิริยาที่สำคัญประการหนึ่งของโลหะผสมดีบุก-ทองแดง ก็คือปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 226.8°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุทเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่จุดยูทเทคติกนี้ของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส ได้แก่ สารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 กับเฟส Sn-rich ดังสมการที่ 2.4 ขณะที่ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง จะแสดงดังตารางที่ 2.9



ตารางที่ 2.9 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิกิริยายุทเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง

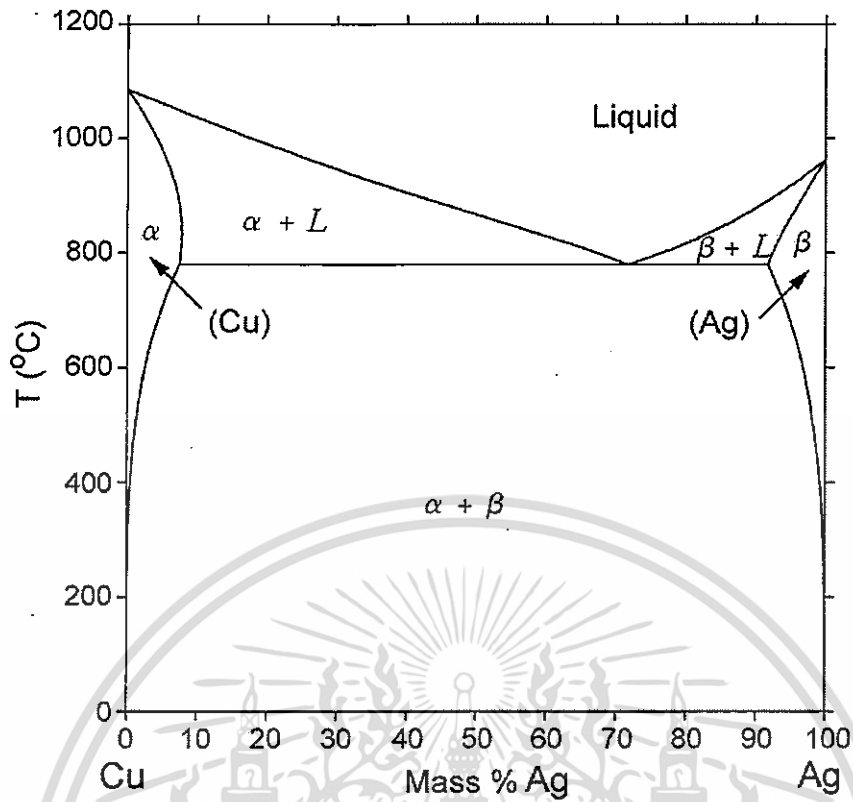
เฟส	Mass %Cu	Mass %Sn
Liquid	0.89	99.11
Cu_6Sn_5	39.07	60.93
Sn	0.01	99.99



รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-ทองแดง [70]

2.2.7.3 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง (Ag-Cu)

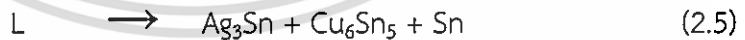
โลหะผสมทั้งสองนี้จะไม่สามารถเกิดการละลายในสถานะของแข็งสมบูรณ์ได้ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเดียวกัน (FCC) โดยโครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณที่น้อย อีกนัยหนึ่งก็คือ มีปริมาณของอะตอมเงินน้อยที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมทองแดง และในขณะเดียวกันความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สารละลายของแข็งที่มีปริมาณเงินอยู่มาก (Ag-rich) และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงอยู่ในปริมาณมาก (Cu-rich) สารละลายของแข็งดังกล่าวถูกจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งชนิดที่ละลายได้บางส่วน (Partial solid solution) โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็นอัลฟา (α) และเบตา (β) อยู่ด้วยกัน และในบริเวณระหว่างเส้นของแข็งสมบูรณ์ (สารละลายของแข็งทั้งสองเฟส) นี้กับเส้นของเหลวสมบูรณ์จะมีส่วนประกอบของของเหลวอัลฟา และของเหลวเบตา และสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งของเฟสไดอะแกรมระหว่างเงินกับทองแดง ก็คือ ณ จุดที่เกิดการบรรจบกันของเส้นของเหลวสมบูรณ์กับเส้นของแข็งสมบูรณ์ ที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 wt% และที่อุณหภูมิเท่ากับ 780°C โลหะผสมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ยูเทคติก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม เงิน-ทองแดง [70]

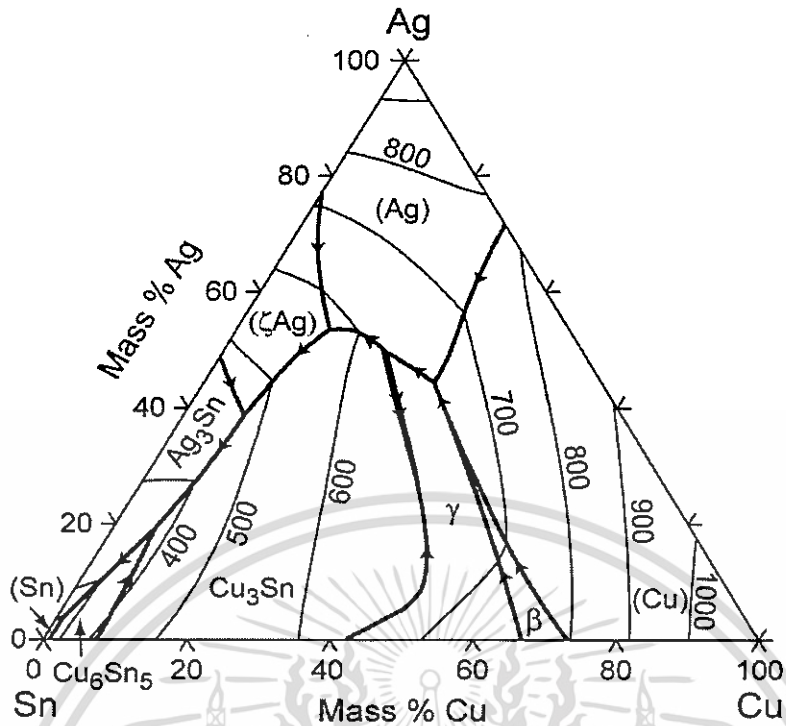
2.2.7.4 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu)

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



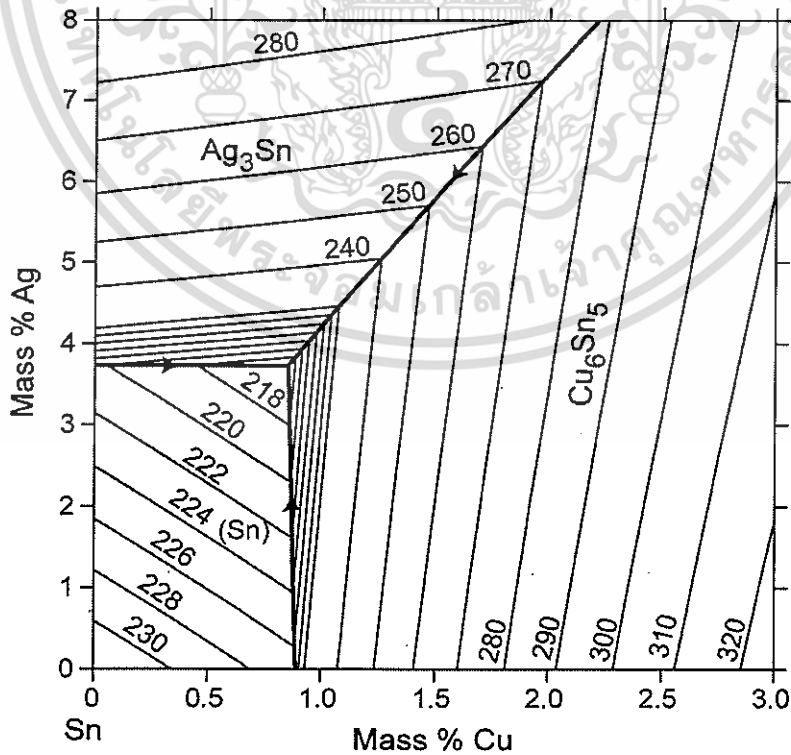
ตารางที่ 2.10 ส่วนผสมในแต่ละเฟสของปฏิริยายูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง

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



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง [70]

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

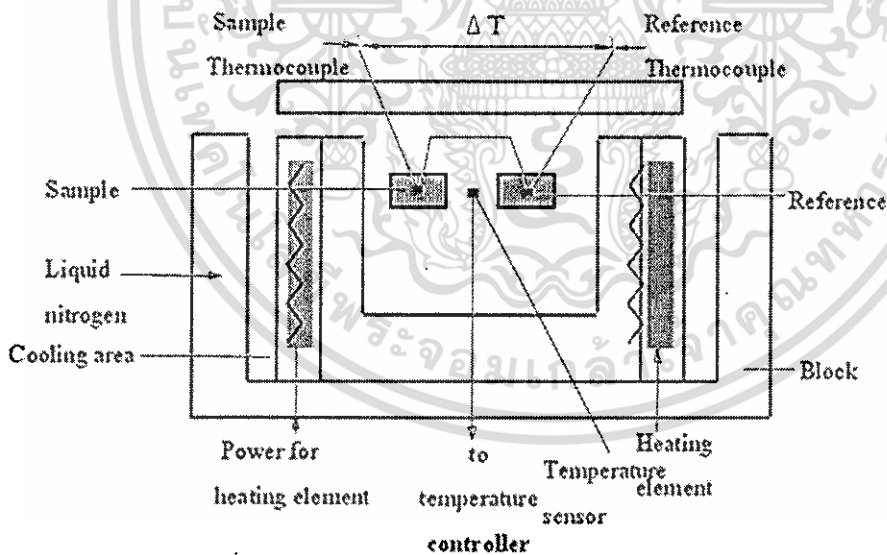


รูปที่ 2.8 ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสม ดีบุก-เงิน-ทองแดง [70]

2.2.8 เครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติ

2.2.8.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC)

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

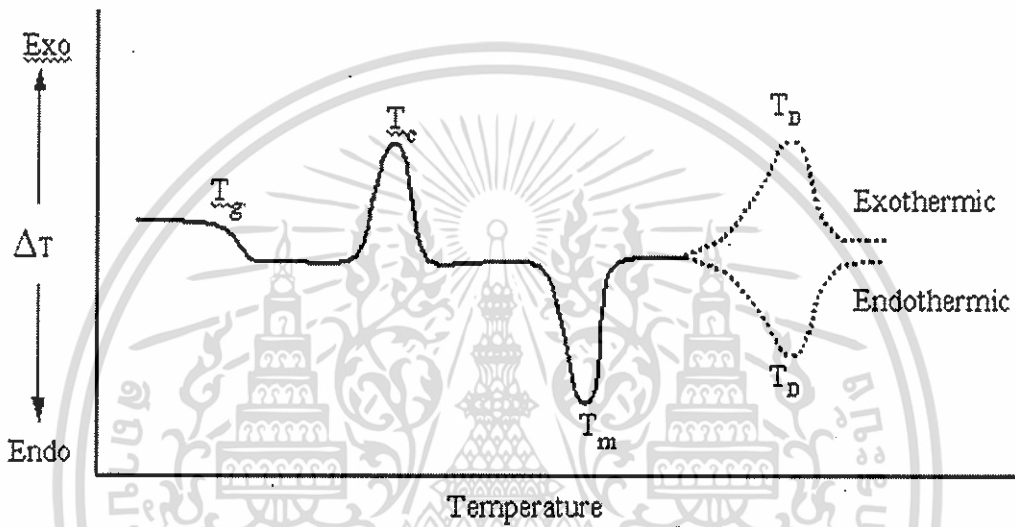


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC [71]

เทอร์โมแกรมที่ได้จาก DSC แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานจะเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลวต้องให้ความร้อน สารตัวอย่างมากกว่าที่ใส่สารอ้างอิงเพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของสารตัวอย่าง และสารอ้างอิงให้เท่ากัน ความ

ร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังสารตัวอย่างมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังสารอ้างอิงนั้น จะขึ้นอยู่กับว่า ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นว่าเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

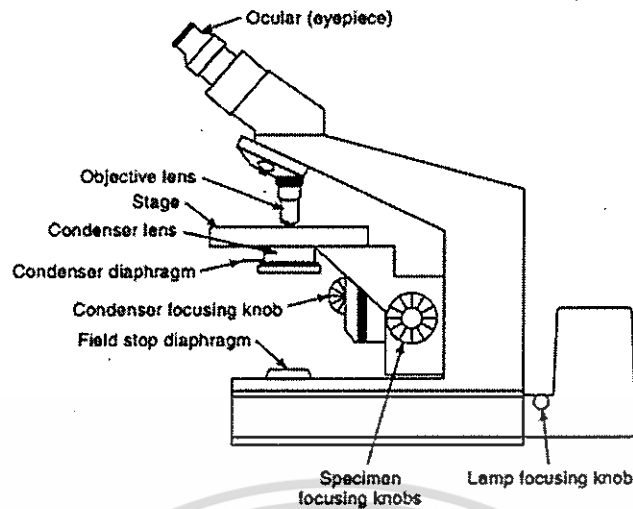
สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือ DSC นั้นถือเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และใช้สำหรับการวิจัยจำนวนมาก ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง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



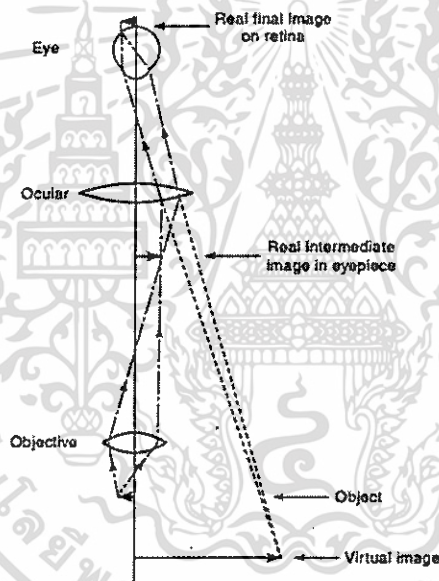
รูปที่ 2.10 แผนภาพเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC [71]

2.2.8.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้นโดยใช้หลักการสะท้อนแสง เหมาะสำหรับวัสดุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์ บางชนิดอาจมีความมิดของภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่ต่างกันในบริเวณต่างๆ สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) เป็นการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการขัดจนเรียบให้สะท้อนแสงได้เหมือนกระจก โดยการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบพื้นผิวของรอยบัดกรีหลังการบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อแสงไฟจากหลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสงจะถูกรวบรวมแสงโดยเลนส์รวมแสงไปตกที่วัตถุที่วางบนแท่นวางวัตถุ จากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุจะเป็นตัวขยายวัตถุให้ได้ภาพที่ใหญ่ขึ้น แล้วจะส่งต่อไปยังเลนส์ใกล้ตา เพื่อขยายภาพเป็นสุดท้าย โดยสามารถปรับกำลังขยายสูงสุดได้ถึง 500 เท่าอีกด้วย



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [72]

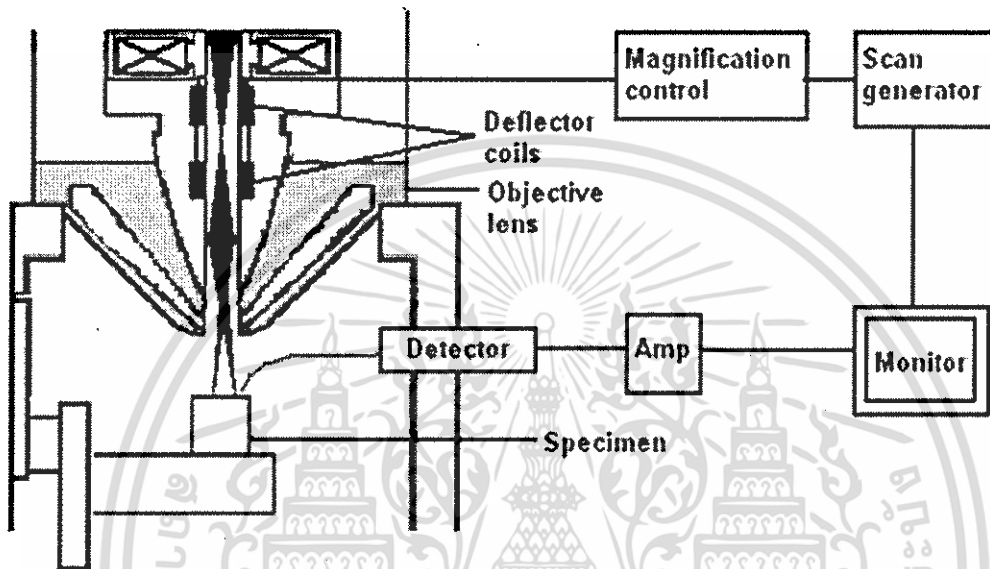


รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [72]

2.2.8.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron microscope, FESEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง (FESEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ เป็นอุปกรณ์ยิ่งล้าอิเล็กตรอนไปตกระทบบนเป้าหมายซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง และสแกนได้ลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดด้วยพลังงานสูง ภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะหักเหโดยเลนส์ไฟฟ้าได้ออกมาเป็นลำแสงขนาดเล็กตกกระทบไปยังวัตถุ จุดบนวัตถุ และมุม โดยความเร็วของอิเล็กตรอนจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นผิวของวัตถุก่อให้เกิดเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic signals) ออกมา โดยสัญญาณนี้จะถูกขยายและเปลี่ยนไปภาพที่สามารถมองเห็นได้บนจอภาพ สามารถบันทึกและนำไปวิเคราะห์ผลต่อไปได้ โดยแผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่อง

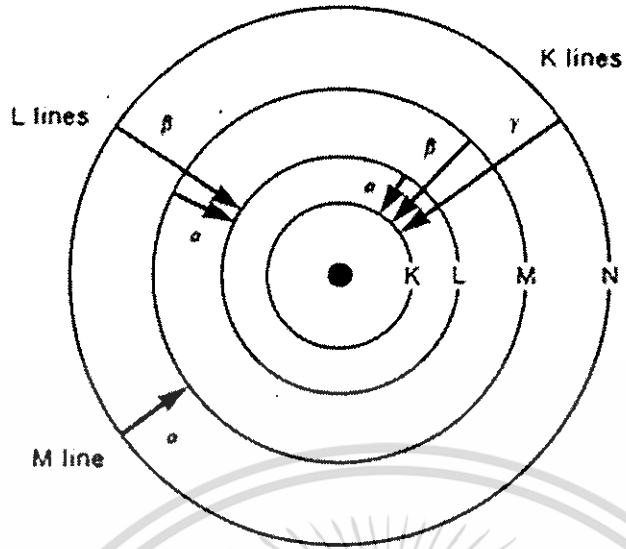
กราดกำลังขยายสูงจะแสดงดังรูปที่ 2.13 ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ SEM โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) รุ่น S-4700 ยี่ห้อ HITASHI เนื่องจากให้ภาพที่มีความละเอียดสูงและใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ที่ 2.5 nm ที่ 1 kv และ 1.5 nm ที่ 15 kv ตามลำดับ สำหรับตัวชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจำเป็นต้องผ่านการขัดผิวหน้าและทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าชิ้นงานดังกล่าวไม่นำไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทองคำ แพททินัม หรือคาร์บอน เป็นต้น [73, 74]



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยายสูง [73]

2.2.8.4 การวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

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



รูปที่ 2.14 แบบจำลองอะตอมของโบร์ [75]



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในงานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305-xZnO ชนิดใหม่ขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการออกแบบการทดลองตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ทำการศึกษาอิทธิพลของอินเดียมและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์ การทูลดตัว ความหนืด และโครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี

3.1 องค์ประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

3.1.1 โลหะบัดกรี SAC305

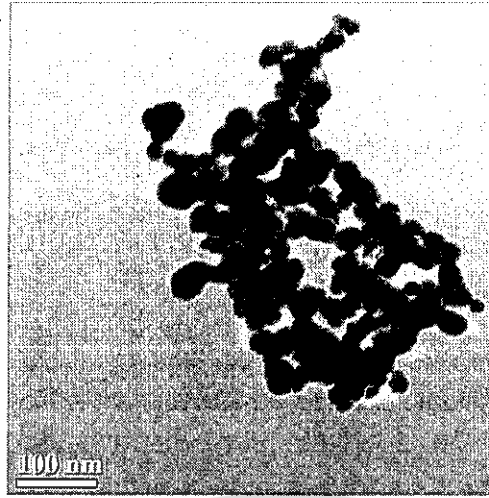
สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะบัดกรี SAC ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วน ได้แก่ ผงโลหะผสม (Solder powder) และ ฟลักซ์ (Flux) โดยขนาดของผงโลหะบัดกรีจัดอยู่ในกลุ่ม W ตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 20-38 μm สำหรับในโลหะบัดกรีชนิดนี้มีส่วนผสมของฟลักซ์ 12 % อยู่ในกลุ่มของ TM-HP ที่มีคุณสมบัติที่ดีคือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากช่วยให้ความหนืดของโลหะบัดกรีลดลง ส่งผลดีต่อกระบวนการพิมพ์บนแผ่นรองทองแดงที่สามารถทำได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ฟลักซ์ในกลุ่มดังกล่าวยังช่วยให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิบัดกรีที่สูงขึ้น และยังทำให้ผิวหน้าของโลหะพื้นมีสิ่งสกปรกจำพวกออกไซด์มาเกาะลดลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี SAC305 นี้ยังคงมีจุดหลอมเหลวที่สูง และเมื่ออยู่ในรูปของโลหะบัดกรีแบบครีม ความหนาแน่นของโลหะบัดกรีจะลดลงเหลือเพียง 4.16 g/cm^3 ขณะที่หากอยู่ในรูปอัลลอยจะมีความหนาแน่นที่ 7.4 g/cm^3 สำหรับสมบัติพื้นฐานอื่นๆของโลหะบัดกรี SAC305 แสดงดังตารางที่ 3.1 [76]

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 [76]

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด
ชื่อผลิตภัณฑ์	SRC Solder Paste LFM-86W TM-HP
องค์ประกอบหลัก	Sn 86.5 %, Ag 3.0 %, Cu 0.5 % และ Flux 12 %
ขนาดอนุภาคของผงโลหะ	20-38 μm
ลักษณะภายนอก	เนื้อครีมสีเทาคล้ายยาสีฟัน
ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus-Liquidus Temperatures)	217-227°C
ความหนาแน่น	4.16 g/cm^3
ความสามารถในการละลายน้ำ/สารละลาย	ไม่ละลาย
ความหนืด	150-300 Pa*s
การเก็บรักษา	หลีกเลี่ยงการเก็บรักษาสารใกล้กับสารชนิดที่ทำให้ปฏิกิริยาอย่างกับบรรยากาศ หรือ สารที่มีความเป็นกรด/เบสสูง และควรเก็บรักษาในภาชนะปิด ภายใต้ อุณหภูมิต่ำ 1-10°C
ข้อควรระวัง	หลีกเลี่ยงการสูดดม หรือสัมผัสบริเวณผิวหนังโดยตรง เพราะอาจทำให้เกิดอาการแพ้ หรือระคายเคือง รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของอวัยวะภายในในระยะยาวได้

3.1.2 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nano-particles) เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยจะทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรี SAC305 เปลี่ยนไปจากเดิมทั้งทางบวกและลบ มีลักษณะเป็นผงสีขาวบริสุทธิ์ 93.73 % มีจุดหลอมเหลวสูง 1970°C และมีอนุภาคขนาดเล็ก 20-40 nm ดังผลการทดสอบลักษณะพื้นผิวและการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโน ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) ในรูปที่ 3.1 นอกจากนี้ยังเป็นอนุภาคนาโนที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมประเทศไทย โดย บริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด ทำให้มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ สำหรับสมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ดังกล่าวจะแสดงดังตารางที่ 3.2 [78]



รูปที่ 3.1 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [78]

ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [78]

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

3.2 การเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

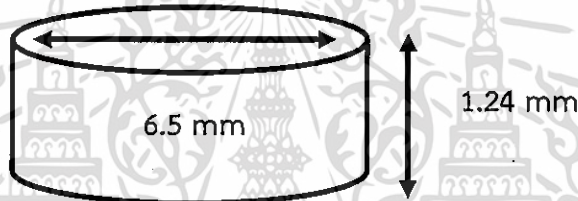
สำหรับการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน SAC305-xZnO ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งองค์ประกอบของวัสดุประกอบได้เป็นสองส่วน คือ เฟสเนื้อพื้น (Matrix) และ เฟสกระจาย (Dispersed phase) นั่นคือ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ตามลำดับ โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 wt% ใช้แท่งคนสารคนโลหะบัดกรีเล็กน้อยเพื่อให้ฟลักซ์เข้ากับเนื้อโลหะบัดกรีได้เป็นอย่างดี จากนั้นนำองค์ประกอบต่างๆตามเงื่อนไขที่กำหนดในแต่ละอันผสมกันในบีกเกอร์ด้วยวิธีเชิงกล โดยใช้แท่งแก้วคนสารดังกล่าวให้เข้ากัน เพื่อให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถกระจายตัวเข้ากับโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 ได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที

3.3 การเตรียมโลหะขึ้นงานสำหรับการบัดกรี

การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะใช้แผ่นรองทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30x30x0.35 mm [78] เป็นโลหะพื้นในการบัดกรี ซึ่งมีความหยาบผิว R_a 0.06 μm โดยก่อนนำมาใช้งานควรทำความสะอาดแผ่นรองทองแดง ด้วยการนำแผ่นรองทองแดงแช่ลงในสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมบนแผ่นรองทองแดงให้หลุดออกไป ซึ่งก่อนนำไปใช้งานทุกครั้งควรทำการเป่าให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และเก็บรักษาไว้ในกล่องสุญญากาศ เพื่อป้องกันการความชื้นและสิ่งแปลกปลอมมาเกาะบริเวณพื้นผิวแผ่นรองทองแดง

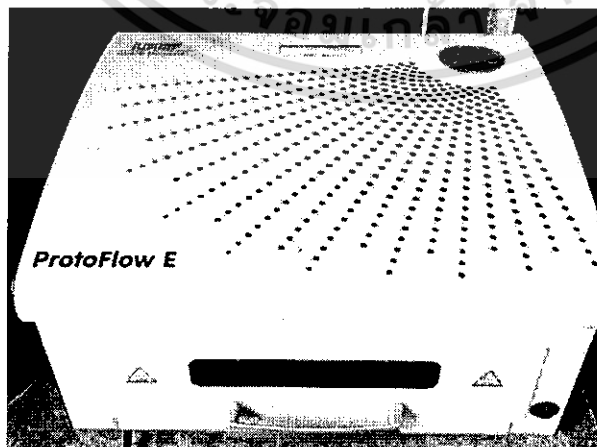
3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ทำการเตรียมบล็อกพิมพ์โลหะบัดกรี โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 50x50x1.24 mm สำหรับทำขึ้นทดสอบทรงกระบอก กำหนดขนาดของรูสำหรับการพิมพ์โลหะบัดกรีลงไป ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm และปริมาตร 0.041 cm^3 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบและขนาดของบล็อกพิมพ์ได้เป็นไปตามมาตรฐานของ JIS Z3198-3:2003 [80] ดังแสดงในรูปที่ 3.2



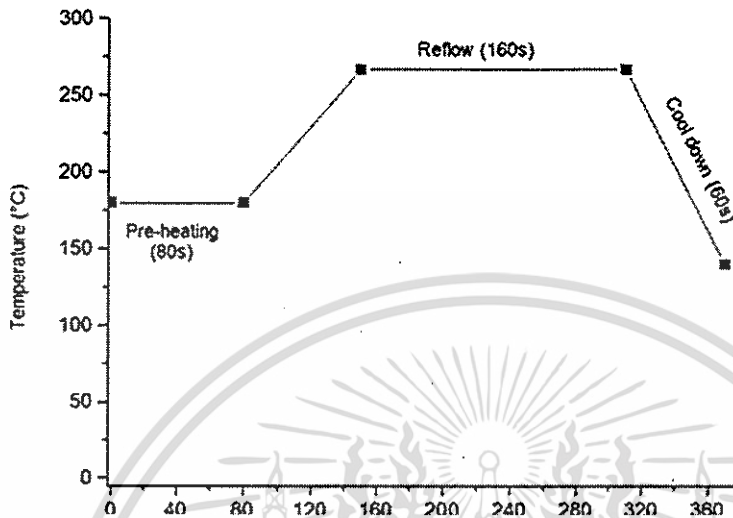
รูปที่ 3.2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3

จากนั้นนำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ทำการผสมไว้ในแต่ละเงื่อนไข พิมพ์อัดลงในบล็อกพิมพ์ที่เตรียมไว้โดยมีแผ่นรองทองแดงที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วรองอยู่ด้านล่าง จะได้แผ่นรองทองแดงที่ถูกพิมพ์ด้วยโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน จากนั้นนำไปทำการบัดกรีด้วยวิธีรีโฟลว์ (Reflow soldering) ในเตาอบรีโฟลว์ รุ่น ProtoFlow E ยี่ห้อ LKFS Laser & Electronics AG ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เตาอบรีโฟลว์

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



รูปที่ 3.4 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการรีโฟลว์ตามมาตรฐาน J-STD-020

และเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้ว จะนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สมบัติต่างๆเป็นลำดับถัดไป ซึ่งการทดสอบในแต่ละเงื่อนไขจะทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ รวมทั้งเพื่อช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติ

3.5.1 จุดหลอมเหลว

นำโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ทำการผสมได้ในแต่ละเงื่อนไข นำไปทดสอบอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนไปจากโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 ในรูปของอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature) และอุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือ Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® กำหนดช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 25 ถึง 350°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 20 mL/min และควบคุมอัตราการให้ความร้อน (Heating) และอัตราการเย็นตัว (Cooling) ที่ 10°C/min

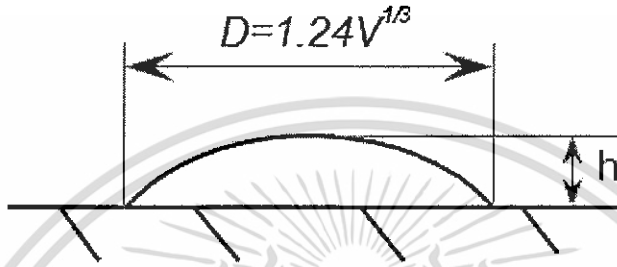
3.5.2 ความสามารถในการเปียก

หลังจากการบัดกรีด้วยวิธีการรีโฟลว์ สามารถวัดความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง โดยทดสอบการกระจายตัว (Spread test) ในรูปของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio) และค่ามุมสัมผัส (Contact angle) การวัดการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง จะใช้วิธีการวัดค่าความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี ด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer) เพื่อนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณเป็นค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

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

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

เมื่อ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีที่ถูก ทดสอบ โดยมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 3.2 [82] โดย V คือปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ และรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะรูปร่าง ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 3.5 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรี

$$D = 1.24V^{1/3} \quad (3.2)$$

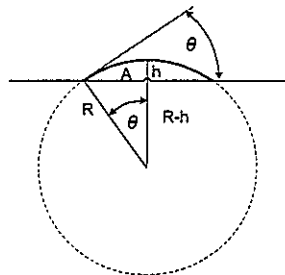
2) คำนวณค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ได้ดังสมการที่ 3.3 [82]

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

นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงยังสามารถวัดได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 [82] และในรูปที่ 3.6 ได้แสดงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่ามุมสัมผัส

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

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี และ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี



รูปที่ 3.6 มุมสัมผัสบนแผ่นรองทองแดง

ทั้งนี้ในการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง จะมีการนำซอฟต์แวร์ Image-pro Express มาใช้ในการวัด เพื่อช่วยคำนวณหาพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีจากภาพถ่ายหลังการหลอมละลายและแข็งตัวบนแผ่นรองทองแดง

3.5.3 ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว

สำหรับความสามารถในการพิมพ์จะทำการวัดโดยใช้การพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง แล้วทำการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ติดบนแผ่นรองทองแดง เพื่อนำไปคำนวณค่าความสามารถในการพิมพ์ ดังสมการที่ 3.5 ดังนี้ [83]

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

เมื่อ	P%	คือ ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี
	V_0	คือ ปริมาตรในอุดมคติของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง
	V_1	คือ ปริมาตรจริงของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดง

สำหรับการทดสอบการหลุดตัวหลังการพิมพ์ตามวิธีการของ Evans และ Beddow [84] จะเริ่มจากการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง ซึ่งโดยทั่วไปในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมจะทำการพิมพ์ผ่าน Stencil ที่มีลวดลายโดยใช้เครื่องพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม ช่วยให้การยึดแผ่น Stencil ให้ตำแหน่งการพิมพ์ที่ถูกต้องและแม่นยำ ช่วยให้สามารถทำการพิมพ์โลหะบัดกรีได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น

สำหรับลวดลายในการพิมพ์ควรมีการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีด้วย จากการที่ได้นำโลหะบัดกรีแบบครีมที่นำมาใช้งานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) จะพบว่าภายในโลหะบัดกรีแบบครีมจะประกอบด้วยโลหะบัดกรีแบบเม็ด (Solder ball) เรียงตัวกันลักษณะเป็นแถวอยู่ในแนวยาว ซึ่งการออกแบบลวดลายของแผ่น Stencil ให้มีความเหมาะสมกับขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีนั้น ขนาดของ Stencil ในแต่ละช่องควรมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคของโลหะบัดกรีคูณด้วย 5 [55] แต่สำหรับในงานวิจัยนี้เมื่อพิมพ์โลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงผ่าน Stencil เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะนำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNIVERSAL OVEN U ที่สามารถตั้งค่ากำหนดเวลา อุณหภูมิ อัตราการเป่าลม และอัตราการเปิดช่องลมได้ โดยค่าการหลุดตัวของโลหะบัดกรีนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 ดังนี้ [55, 84]

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

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

3.5.4 ความหนืด

นำโลหะบัดกรีที่ทำการผสมได้ในแต่ละเงื่อนไขมาทดสอบค่าความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดยี่ห้อ Malcom (Spiral Viscometer) รุ่น PC-10 ทดสอบผ่านซอฟต์แวร์ Model VAM-3 ทำการทดสอบเป็นแบบวนรอบ (Loop test) คือ จะมีการเพิ่มอัตราเร็วขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วลดลง คือ 3, 4, 5, 10, 20, 30 และ 10 รอบต่อนาที (RPM) ตามลำดับ เมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้น แรงเค้นเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อลดอัตราเร็วลง แรงเค้นเฉือนก็จะลดลงเช่นกัน การวัดจะเริ่มต้นขึ้นหลังจากที่เครื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสได้

3.5.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรี

3.5.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

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

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดแล้วไปขึ้นรูปตัวเรือนด้วยการหล่อเรซิน และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 100, 300, 600, 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ เริ่มขัดจากกระดาษทรายที่มีความหยาบมากไปน้อย แล้วจึงขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 และ 1.0 μm ด้วยเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1

หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงานเรียบร้อยแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Optical microscope ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 500 เท่า เพื่อตรวจสอบชิ้นงานบริเวณแผ่นรองทองแดง และโลหะบัดกรีว่ายังมีรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดกระดาษอยู่หรือไม่ รวมทั้งดูความสะอาดของชิ้นงาน และเก็บรักษาชิ้นงานในกล่องสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้นหลังทำการตรวจสอบ

3.5.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบเคมี

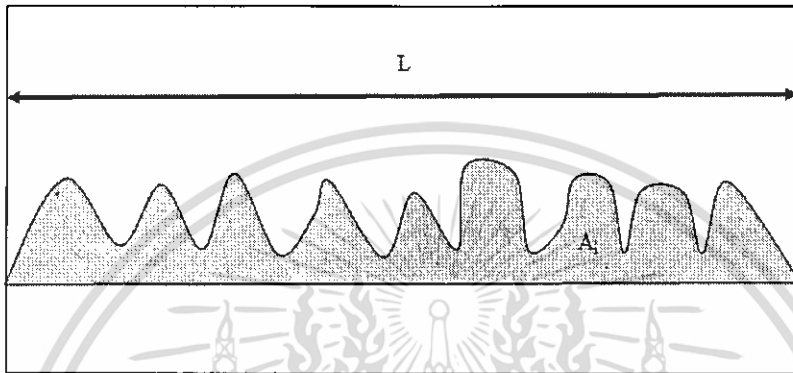
ในการศึกษาชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-4700 และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ยี่ห้อ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

3.5.5.3 วิธีการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

โดยหลังจากการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีแล้ว จะทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อบัดกรี โดยเลือกภาพ FESEM ของแต่ละเงื่อนไขที่ขนาดกำลังขยายภาพเท่ากันมาใช้ในการคำนวณ สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการวัด คือ Image-Pro Express ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในแต่ละชั้นหารด้วยความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังสมการการคำนวณที่ 3.7 และแสดงในรูปที่ 3.7 [86]

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

เมื่อ h คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm) A_i คือ พื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm^2) และ L คือ ความยาวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm) สำหรับการวัดความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะทำการแยกวัดแต่ละชั้นในกรณีที่เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากกว่าสองชั้นระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดง



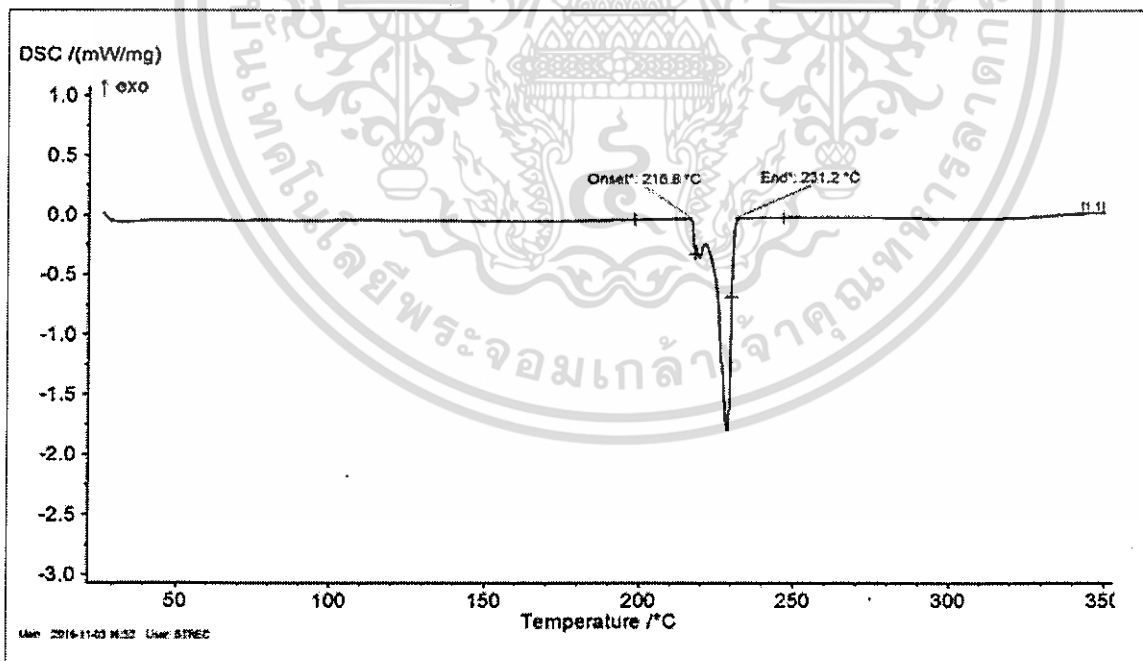
รูปที่ 3.7 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว

สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305-xZnO จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Solidus and liquidus temperatures) ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โดยจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นการทดสอบอรรถิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีผลต่อโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบจะเริ่มต้นตั้งแต่ช่วงที่โลหะบัดกรีเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature; T_S) และหลอมละลายหมดที่อุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature; T_L) จากรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิ Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 ที่ทำการทดสอบได้ คือ 216.6 และ 231.2°C ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิโซลิดัส-ลิควิดัสและช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO ($x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ 1.0 wt%) ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงไป อุณหภูมิ Solidus ของโลหะบัดกรียังคงมีแนวโน้มที่คงที่ ขณะที่อุณหภูมิ Liquidus กลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยหลังการเติมอนุภาคนาโนในสัดส่วนที่สูงขึ้นที่ 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 wt% ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Liquidus เพียงเล็กน้อยนั้นแสดงถึงการเติมอนุภาคนาโน ZnO ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของโลหะบัดกรีมากนัก



รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิโซลิดัส-ลิกวิดัสและช่วงของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%)

โลหะบัดกรี	อุณหภูมิโซลิดัส (°C)	อุณหภูมิลิกวิดัส (°C)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
1. SAC305	216.6	231.2	14.6
2. SAC305-0.25ZnO	216.6	231.1	14.5
3. SAC305-0.5ZnO	216.7	232.2	15.5
4. SAC305-0.75ZnO	216.6	231.5	14.9
5. SAC305-1.0ZnO	216.7	231.6	14.9

4.2 ความสามารถในการเปียก

4.2.1 การกระจายตัว

ในการทดสอบการกระจายตัว (Spread test) ของโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305-xZnO บนแผ่นรองทองแดง สามารถคำนวณผลของค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor; S_p) และอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio; S_r) ของโลหะบัดกรีได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.3 โดยผลจากการคำนวณค่าดังกล่าวพบว่าในโลหะบัดกรีพื้นฐานมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวอยู่ที่ 90.17 ± 0.28 % และอัตราส่วนการกระจายตัว 1.31 ± 0.042 ส่วนในการทดสอบที่มีการเติมเฉพาะอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt% มีแนวโน้มของการกระจายตัวที่ดีขึ้นดังตารางที่ 4.2 สังเกตได้จากค่าการกระจายตัวที่เพิ่มสูงขึ้น และจะเริ่มลดลงเมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโนตั้งแต่ 0.5 wt% ขึ้นไป คือ 95.76 ± 0.21 , 94.89 ± 0.12 , 93.58 ± 0.22 และ 92.54 ± 0.08 % ตามลำดับ จากผลการทดสอบนี้สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆที่แขวนลอยอยู่ในของไหลที่ดูเสมือนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยในการผสมของอนุภาคนาโนดังกล่าวในโลหะบัดกรีจนกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนนี้เป็นการผสมกันแบบคอลลอยด์ นั่นคือ โลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนไม่ได้อยู่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันในระดับอะตอม เมื่อได้รับความร้อนจะส่งผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์เกิดการสั่นไปกระทบกับอนุภาคข้างเคียง โดยจะมีการเคลื่อนที่ไปมาในลักษณะไร้ทิศทาง (Random walk) ดังในสมการที่ 2.2 โดยที่ L คือ ระยะทางการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาค α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และ t คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการบัดกรี โดยทั่วไปแล้วสำหรับระบบที่มีความหนาแน่นน้อยๆ สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานของอนุภาคที่สูงขึ้นจะทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น [68] ทั้งนี้ในสมการที่ 2.2 นั้นไม่สามารถคำนวณหาระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ที่แท้จริงได้ เพราะในความเป็นจริงอนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง แต่ก็สามารถบอกได้ถึงจากระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียนของอนุภาคคอลลอยด์ในโลหะบัดกรีแบบครีมได้มากยิ่งขึ้น [68]

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

ซึ่งในงานวิจัยนี้การเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่มีขนาดเล็กระดับนาโน (20-40 nm) [78] ในปริมาณมากขึ้นอนุภาคนาโนที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะไร้ทิศทางจะเริ่มมารวมกันจนกลายเป็นกลุ่มก้อน โดยที่ปราศจาก

การตกตะกอนหรือแยกตัวออกจากกัน โดยพลังงานพื้นผิวที่มากของอนุภาคนาโนสามารถลดแรงดึงดูดของโลหะบัดกรี ทำให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อเติมในปริมาณน้อย แต่ถ้ามีการเติมอนุภาคดังกล่าวในปริมาณที่มาก จะทำให้ความสามารถในเปียกลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนจะรวมตัวกันเป็นจำนวนมากนำไปสู่ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของโลหะบัดกรีจนทำให้ค่าการกระจายตัวมีแนวโน้มที่ลดลงได้ [87, 88]

ทั้งนี้การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนนั้น พบว่าการกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในทุกเงื่อนไข โดยในเงื่อนไขที่มีระดับการเติมอนุภาคนาโน ZnO 0.25 wt% ให้ค่าเฉลี่ยตัวประกอบกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวสูงสุดที่ $95.76 \pm 0.21 \%$ และ 2.18 ± 0.034 ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณค่าเฉลี่ยตัวประกอบและอัตราส่วนการกระจายตัวของทุกเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยค่าตัวประกอบการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%)

โลหะบัดกรี	ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (%)	อัตราส่วนการกระจายตัว
1. SAC305	90.17 ± 0.28	1.31 ± 0.042
2. SAC305-0.25ZnO	95.76 ± 0.21	2.18 ± 0.034
3. SAC305-0.5ZnO	94.89 ± 0.12	2.10 ± 0.009
4. SAC305-0.75ZnO	93.58 ± 0.22	1.76 ± 0.005
5. SAC305-1.0ZnO	92.54 ± 0.08	1.53 ± 0.020

4.2.2 มุมสัมผัส

นอกจากนี้การทดสอบความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงยังสามารถวัดได้จากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะบัดกรีภายหลังการบัดกรีแบบรีโฟลว์ได้ด้วยวิธีการคำนวณหาค่ามุมสัมผัสจากสมการที่ 3.4 โดยจากตารางที่ 4.3 พบว่าค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนมีค่าลดลงในทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐานที่มีค่ามุมสัมผัส $22.24 \pm 0.61^\circ$ จากนั้นค่ามุมสัมผัสจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงหลังการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25 wt% และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นหลังการเติมอนุภาคนาโนในระดับที่สูงขึ้น คือ 9.69 ± 0.47 , 11.67 ± 0.27 , 14.63 ± 0.50 และ $16.97 \pm 0.17^\circ$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%)

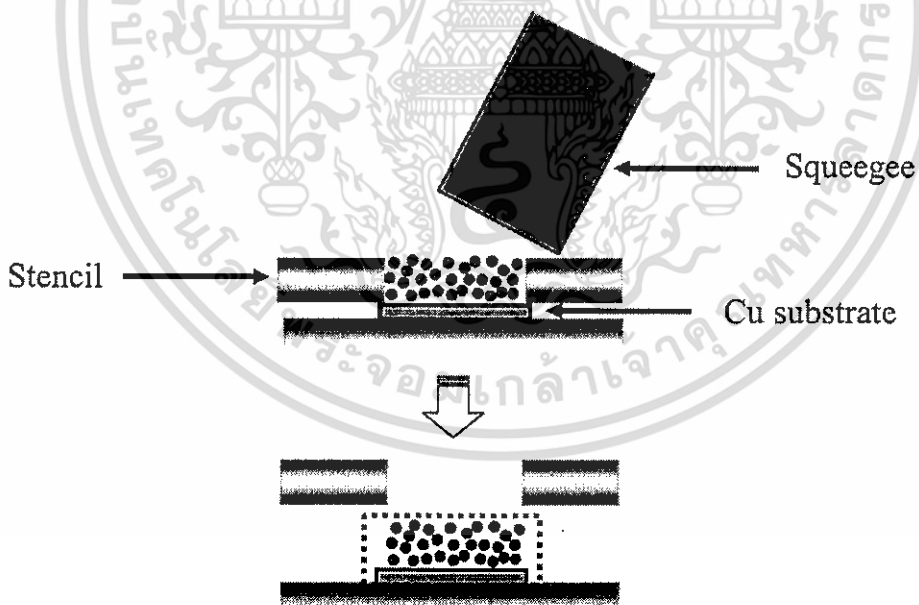
โลหะบัดกรี	ค่าการคำนวณ ($^\circ$)
1. SAC305	22.24 ± 0.61
2. SAC305-0.25ZnO	9.69 ± 0.47
3. SAC305-0.5ZnO	11.67 ± 0.27
4. SAC305-0.75ZnO	14.63 ± 0.50
5. SAC305-1.0ZnO	16.97 ± 0.17

4.3 ความสามารถในการพิมพ์และการทรดตัว

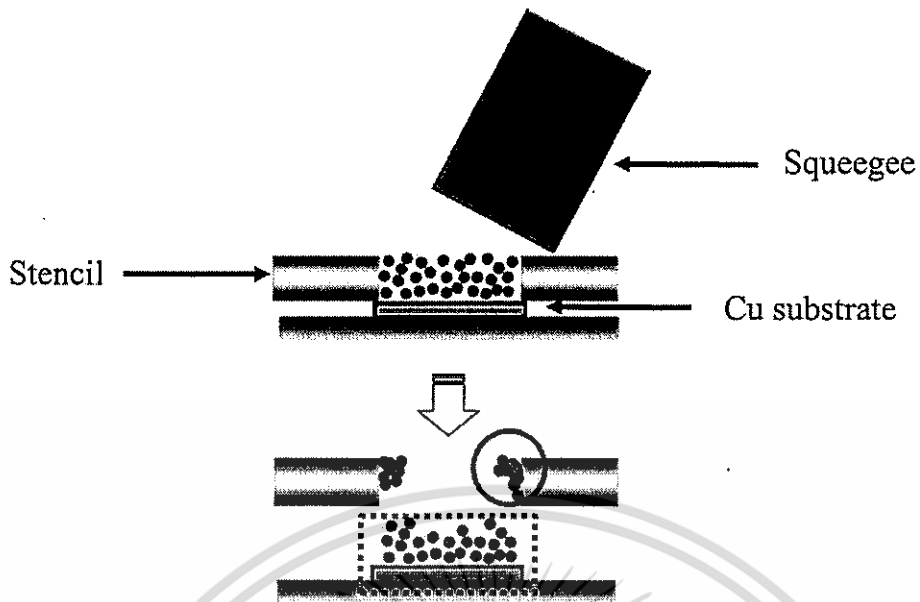
4.3.1 ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

สำหรับความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีแบบครีม สามารถทดสอบด้วยวิธีการวัดปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ติดบนแผ่นรองทองแดงเปรียบเทียบกับปริมาตรของโลหะบัดกรีในอุดมคติบนแผ่นรองทองแดงเพื่อนำไปคำนวณค่าความสามารถในการพิมพ์ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งในขั้นตอนของการทดสอบดังกล่าวจะกระทำทันทีภายหลังกระบวนการพิมพ์เสร็จสิ้นดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากโลหะบัดกรีแบบครีมจัดเป็นของไหลประเภท Thixotropic ที่มีค่าความหนืดลดลงตามระยะเวลาเมื่อได้รับแรงเฉือนในอัตราคงที่ในระหว่างการพิมพ์โลหะบัดกรี อีกทั้งควรมีการควบคุมเงื่อนไขบางประการ เช่น การทำมุมของ Squeegee แรงกดในการพิมพ์ หรือความเร็วในการพิมพ์ ให้มีความใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด

ซึ่งจากผลการคำนวณของค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าปริมาณของอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรีนั้นส่งผลต่อค่าความสามารถในการพิมพ์อย่างเด่นชัด โดยที่ค่าความสามารถในการพิมพ์จะเริ่มมีแนวโน้มลดลงหลังการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากขึ้น จาก 92.87 ± 0.56 % ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 เหลือเพียง 51.15 ± 1.08 % เมื่อระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO สูงสุดที่ 1.0 wt% การเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณที่มากขึ้นลงในโลหะบัดกรีแบบครีม เป็นสาเหตุให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ทำการพิมพ์ได้ยากขึ้น เนื่องจากโลหะบัดกรีเกาะติดกับ Stencil ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีมลงบนแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 4.3 แบบจำลองการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบครีม SAC305-xZnO ลงบนแผ่นรองทองแดง

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการพิมพ์เฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%)

โลหะบัดกรี	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ปริมาตรที่พิมพ์ได้ จริง (cm ³)	ความสามารถในการพิมพ์ของ โลหะบัดกรี (%)
1. SAC305	4.1600	0.0381	92.87 ± 0.56
2. SAC305-0.25ZnO	4.1626	0.0330	80.52 ± 0.89
3. SAC305-0.5ZnO	4.1654	0.0307	74.79 ± 0.86
4. SAC305-0.75ZnO	4.1681	0.0236	57.45 ± 0.79
5. SAC305-1.0ZnO	4.1708	0.0210	51.15 ± 1.08

4.3.2 การทรุดตัวของโลหะบัดกรี

สำหรับการทรุดตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมเป็นการแผ่กระจายตัวรอบทิศทางของโลหะบัดกรีหลังการพิมพ์ หากการทรุดตัวเกิดในช่วงก่อนการบัดกรีแบบรีโฟลว์ จะเรียกว่า การทรุดตัวที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature slump) แต่ถ้าการทรุดตัวเกิดขึ้นในช่วง Preheat ของการบัดกรีจะเรียกว่า การทรุดตัวที่อุณหภูมิสูง (Hot slump) ซึ่งการทรุดตัวลงของโลหะบัดกรีในทั้งสองอุณหภูมิอาจนำไปสู่การเสียรูปของรอยบัดกรีหรือลัดวงจรของอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงกันได้ [55] สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการทรุดตัวเป็นเวลา 30 min ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และที่อุณหภูมิสูง 150°C ด้วยตุ้บลมร้อน เพื่อสังเกตการทรุดตัวของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยจากการทดสอบจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 25°C โลหะบัดกรีเกิดการทรุดตัวน้อยกว่าที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิ 150°C อย่างชัดเจนตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไข ดังตัวอย่างชิ้นงานในรูปที่ 4.4 ที่เปรียบเทียบการทรุดตัวลงของโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 เมื่อเวลาผ่านไป 30 min ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C โดยพบว่าโลหะ

บัดกรีได้เกิดการหดตัวและทรุดตัวลงที่ 12.17 ± 0.76 % และ -99.50 ± 0.50 % ตามลำดับ และสำหรับค่าการหดตัวของทุกเงื่อนไขทดสอบจะแสดงในตารางที่ 4.5

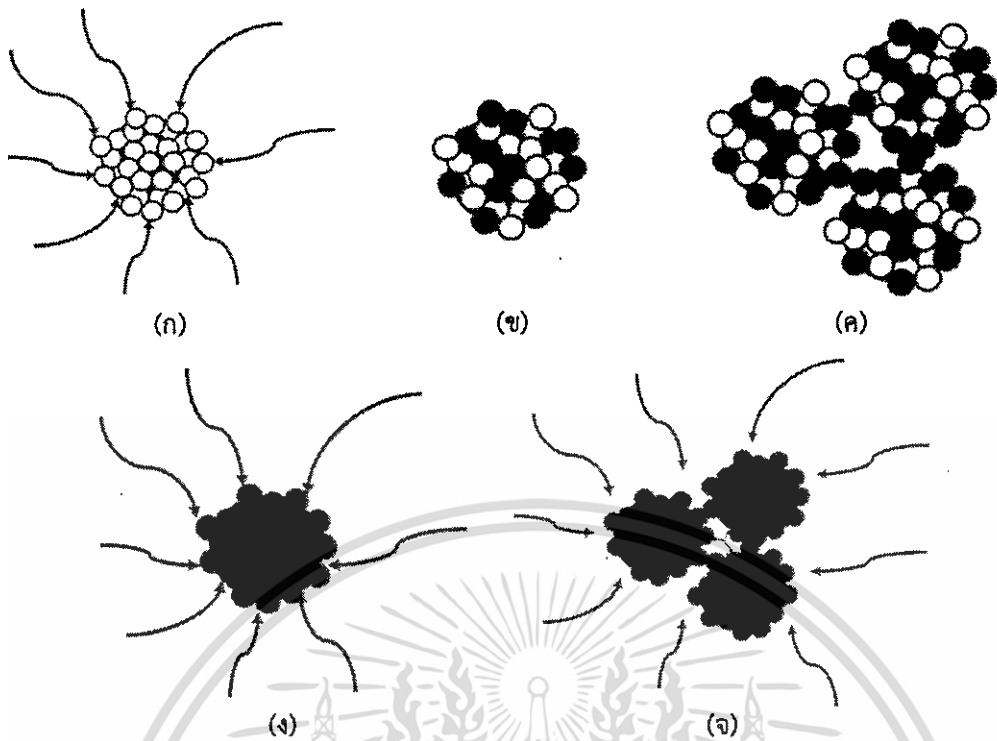
ในกรณีที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ที่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt% ลงในโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305 พบว่าระดับการเติมของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้นส่งผลให้โลหะบัดกรีมีการหดตัวเพิ่มขึ้น คือ 3.67 ± 1.26 , -3.0 ± 1.0 , -9.0 ± 1.32 และที่ระดับการเติม 1.0 wt% โลหะบัดกรีเกิดการหดตัวสูงสุดที่ -26.33 ± 1.61 % ตามลำดับ โดยหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการหดตัวลงของโลหะบัดกรีแบบครีมที่มีการเติมอนุภาคนาโนลงไป คือ ความชื้น เพราะอนุภาคนาโน ZnO ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอนุภาคนาโนเซรามิกที่มีความเป็นรูพรุนสูง โดยผิวหน้าของอนุภาคนาโนจะทำหน้าที่ดูดความชื้นจาก ฟลักซ์ โดยความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไปในอนุภาคนาโนจะเกิดการระเหยและควบแน่นบริเวณพื้นผิวของอนุภาค ทำให้บริเวณพื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะชื้น ส่งผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ข้างเคียงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Liquid Bridge โดยขนาดของ Liquid Bridge จะขึ้นอยู่กับกับความชื้นที่อนุภาคได้ดูดซับไว้ เมื่ออนุภาคได้รับความชื้นจนถึงจุดๆหนึ่งจะเข้าสู่สถานะอึดตัว โดยถ้ายังคงได้รับความชื้นต่อไปจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีเริ่มลดต่ำลง และบริเวณที่เชื่อมต่อกันระหว่างพื้นผิวอนุภาคนาโนจะเริ่มมีความเสถียรน้อยลง เป็นผลให้อนุภาคนาโนที่อยู่ติดกันสามารถแยกออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้น [68] ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การหดตัวที่เพิ่มขึ้นของโลหะบัดกรี ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การหดตัวของโลหะบัดกรีพื้นฐานแบบครีม SAC305

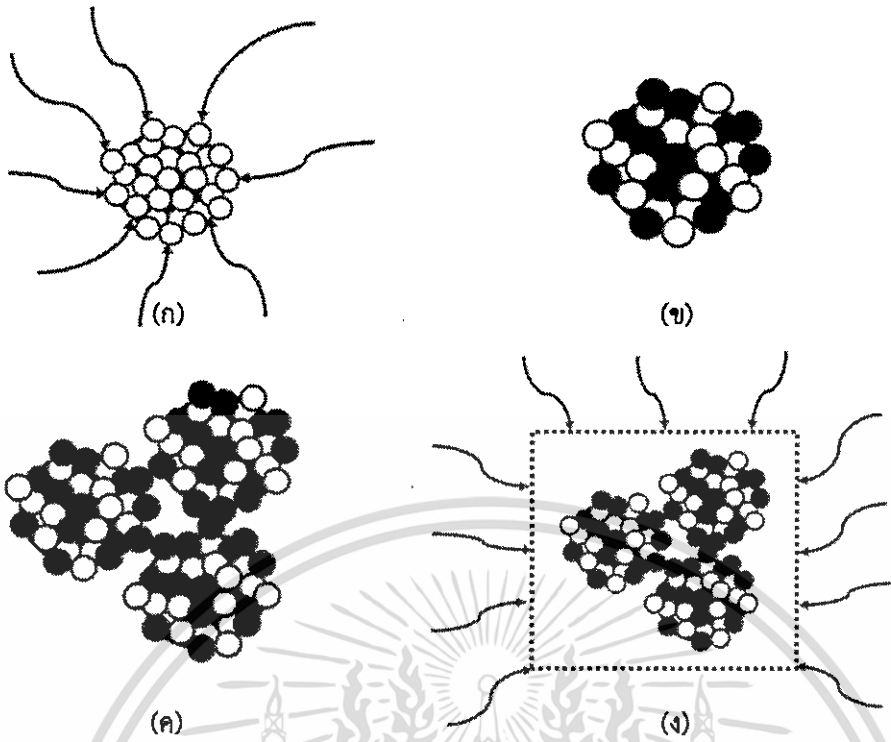
ตารางที่ 4.5 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO (x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%) ที่อุณหภูมิ 25 และ 150°C

โลหะบัดกรี	ค่าการหดตัวของโลหะบัดกรี (%)	
	25°C	150°C
1. SAC305	12.17 ± 0.76	-99.50 ± 0.50
2. SAC305-0.25ZnO	3.67 ± 1.26	-136.50 ± 1.00
3. SAC305-0.5ZnO	-3.0 ± 1.00	-82.00 ± 1.73
4. SAC305-0.75ZnO	-9.0 ± 1.32	-50.67 ± 0.29
5. SAC305-1.0ZnO	-26.33 ± 1.61	-27.67 ± 0.76



รูปที่ 4.5 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ 25°C (ก) – (จ) ตามลำดับ

ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิสูงพบว่าแนวโน้มการหลุดตัวของโลหะบัดกรีกลับลดลง เนื่องจากได้ทำการทดสอบภายในตู้อบลมร้อน โดยความร้อนจากการอบทำให้ความชื้นในอนุภาคนาโนมีแนวโน้มที่ลดลง และจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนโดยไม่แยกออกจากกัน ทำให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบัดกรี ดังแสดงในแผนภาพจำลองในรูปที่ 4.6 ทั้งนี้ความหนืดของโลหะบัดกรีจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ส่งผลให้โอกาสที่โลหะบัดกรีจะเกิดการหลุดตัวเกิดขึ้นได้ลดลงดังรูปที่ 4.7 ก-ง เมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐาน (รูปที่ 4.4)

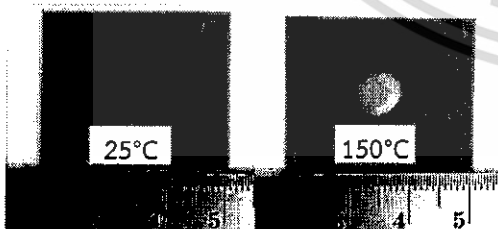


รูปที่ 4.6 แผนภาพจำลองลำดับการเกิดปรากฏการณ์ Liquid Bridge ของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO สำหรับการทดสอบการหลุดตัวที่อุณหภูมิ 150°C

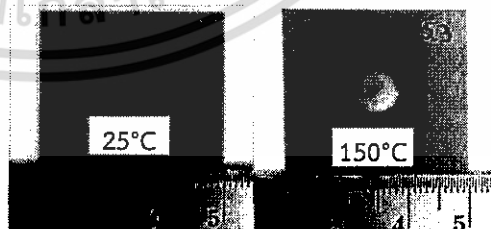


(ก) SAC305-0.25ZnO

(ข) SAC305-0.5ZnO



(ค) SAC305-0.75ZnO



(ง) SAC305-1.0ZnO

รูปที่ 4.7 การหลุดตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแบบครีม

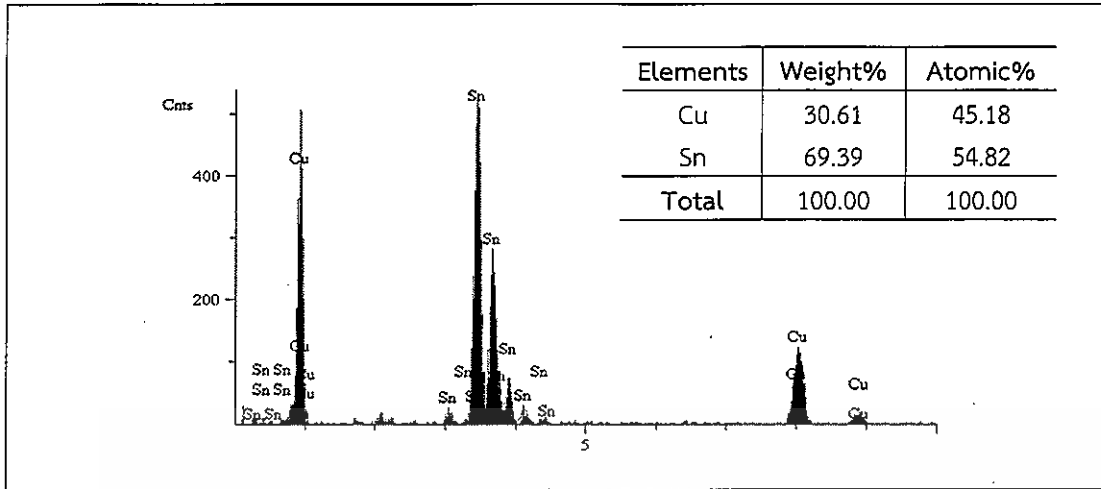
4.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds: IMC)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย FE-SEM และ EDS ที่รอยบัดกรี พบว่าเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีแบบครีม SAC305-xZnO กับแผ่นรองทองแดงชั้น โดยนำภาพหลังการทดสอบจากเครื่อง FE-SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า มาทำการศึกษาและใช้โปรแกรม Image-pro Express ในการวัดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และจากการตรวจสอบชนิดของธาตุที่พบบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDS ในงานวิจัยนี้พบเฉพาะชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 เพียงชนิดเดียวเท่านั้น

สำหรับการตรวจสอบปริมาณธาตุของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย EDS จะแสดงผลเป็นหน่วยของเปอร์เซ็นต์อะตอม (at%) เพื่อแสดงส่วนผสมของแต่ละเฟส ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะพบว่ามีปริมาณของธาตุ Cu 45.18 at% และ Sn 54.82 at% ดังรูปที่ 4.9 จากส่วนผสมดังกล่าวพบว่าเป็นเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5



รูปที่ 4.8 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรี SAC305



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของ SAC305 บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5

สำหรับเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมทองแดง (Cu) ของแผ่นรองทองแดง และดีบุก (Sn) ของเนื้อโลหะบัดกรี จนเกิดเป็นชั้นสารประกอบดังกล่าวขึ้น มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับเปลือกหอย (Scallop) ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งหลังจากได้มีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงไปในโลหะบัดกรี พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ดังแสดงในตารางที่ 4.6

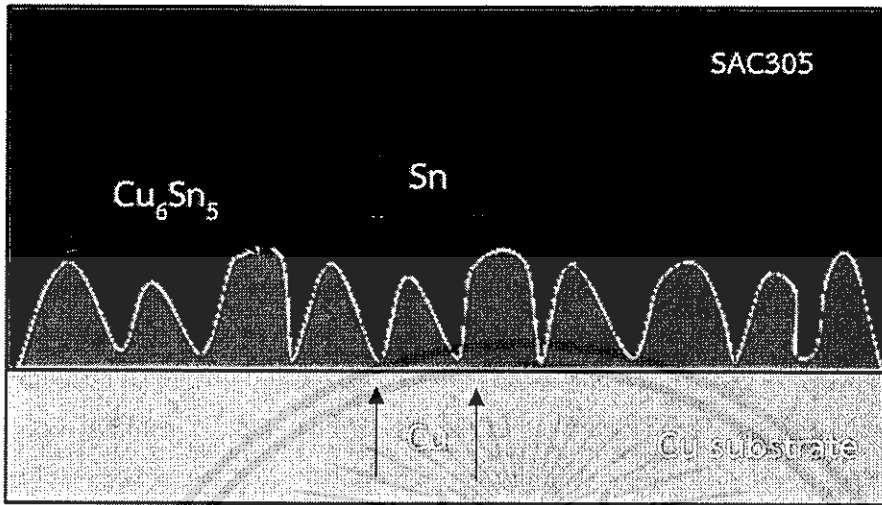
ตารางที่ 4.14 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO ($x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ 1.0 wt%) กับแผ่นรองทองแดง

โลหะบัดกรี	ความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (μm)
1. SAC305	3.31 ± 0.02
2. SAC305-0.25ZnO	3.71 ± 0.02
3. SAC305-0.5ZnO	3.61 ± 0.06
4. SAC305-0.75ZnO	3.48 ± 0.02
5. SAC305-1.0ZnO	3.12 ± 0.01

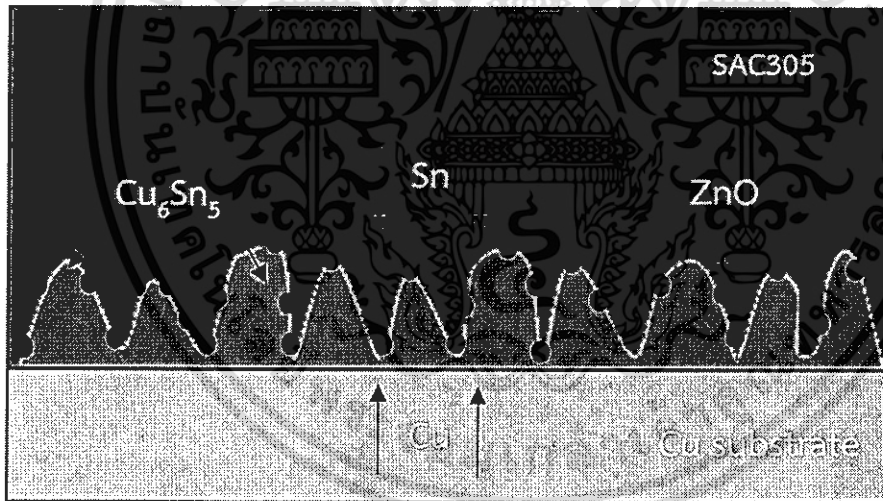
ในส่วนของเงื่อนไขที่มีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงในโลหะบัดกรี พบว่าที่ระดับการเติมอนุภาคนาโน (≤ 0.25 wt%) มีแนวโน้มของค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับในโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 คือ 3.71 ± 0.02 และ 3.31 ± 0.02 μm ตามลำดับ โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงไปในโลหะบัดกรี ที่ช่วยเพิ่ม Nucleation site หรือ พื้นที่ในการเกิด Cu_6Sn_5 ให้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิด Cu_6Sn_5 ได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.11 ตามลำดับ

ขณะที่ค่าความหนาจะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น (> 0.25 wt%) โดยการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่มากเกินไปจะทำให้อนุภาคนาโนบางส่วนขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอม Cu และ Sn ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ดังนั้นการเติม

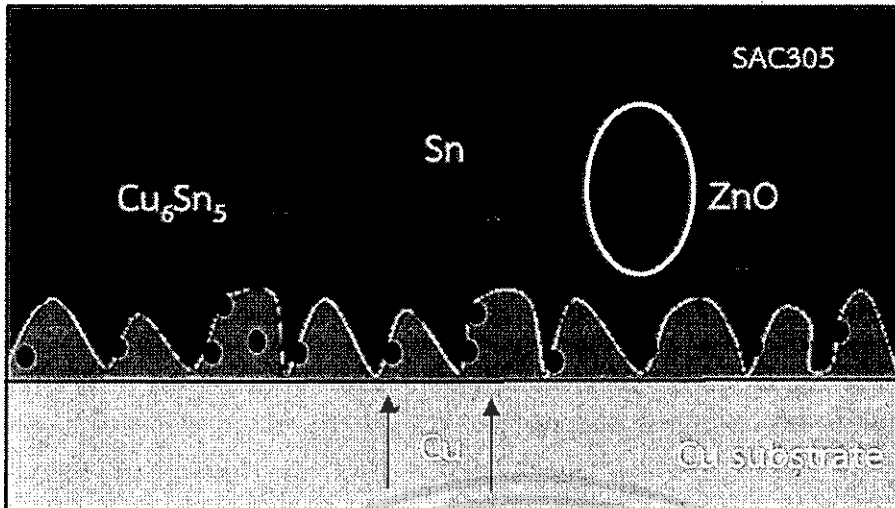
อนุภาคนาโนในสัดส่วนที่มากขึ้นมากกว่า 0.25 wt% ขึ้นไป จึงช่วยลดค่าความหนาของสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 ให้มีค่าลดลงได้ [31, 93]



รูปที่ 4.10 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305 และแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 4.11 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305-xZnO ($x \leq 0.25$ wt%) และแผ่นรองทองแดง



รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมการรวมตัวของ Sn กับ Cu บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีพื้นฐาน SAC305-xZnO ($x > 0.25$ wt%) และแผ่นรองทองแดง

4.5 ความหนืด

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่มีต่อความหนืดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 หลังทำการทดสอบได้ค่าค่าความหนืดดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยค่าความหนืดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น โดยพบว่าในเงื่อนไขการทดสอบที่ SAC305-0.75ZnO ให้ค่าความหนืดสูงสุด ซึ่งค่าความหนืดถือเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีแบบครีมเป็นอย่างมาก เพราะค่าความหนืดมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการพิมพ์ Stencil โดยค่าความหนืดควรมีค่าที่ไม่สูงมากเกินไป และต้องมีความหนืดเพียงพอที่จะทำให้ Squeegee สามารถพิมพ์เนื้อโลหะบัดกรีลงในช่องว่างของ Stencil ได้ เพื่อการยึดเกาะของที่ดีของเนื้อโลหะบัดกรี อีกทั้งค่าความหนืดที่น้อยเกินไปอาจนำไปสู่ปัญหาการหลุดตัวได้ง่ายของโลหะบัดกรีแบบครีม

ตารางที่ 4.7 ค่าความหนืดของโลหะบัดกรี SAC305-xZnO ($x= 0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ และ 1.0 wt%)

โลหะบัดกรี	ความหนืด (Pa*s)
1. SAC305	169.1
2. SAC305-0.25ZnO	175.3
3. SAC305-0.5ZnO	211.1
4. SAC305-0.75ZnO	256.0
5. SAC305-1.0ZnO	194.7

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์และการหลุดตัว โครงสร้างจุลภาคของรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO บนแผ่นรองทองแดง และความหนืด โดยจากการทดสอบสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO มีแนวโน้มคงที่ เมื่อมีระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ที่เพิ่มสูงขึ้น

2. จากการทดสอบความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ทุกความเข้มข้นของการเติมอนุภาคนาโน ZnO (0.0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 wt%) ให้แนวโน้มของการกระจายตัวที่ดีขึ้น คือ มีค่าตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัวเพิ่มสูงขึ้น และมีค่ามุมสัมผัสลดลง ตามลำดับ แต่พบว่าหากมีระดับการเติมของ ZnO สูงกว่า 0.5 wt% จะส่งผลให้ความสามารถในการเปียกลดลง

3. จากการทดสอบความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO ระดับการเติมของอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนไม่เกิน 0.5 wt% ช่วยให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการพิมพ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี $\geq 68\%$ แต่หากมีการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีในสัดส่วนที่มากเกินไป จะส่งผลให้โลหะบัดกรีมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ทำการพิมพ์ได้ยากขึ้น

4. จากการทดสอบความสามารถในการหลุดตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO พบว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C โลหะบัดกรีมีแนวโน้มเกิดการหลุดตัวมากกว่าที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25°C ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การทำให้โลหะบัดกรีกลายเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยการเติมอนุภาคนาโน ZnO ไม่ช่วยให้โลหะบัดกรีมีแนวโน้มเกิดการหลุดตัวลดลงในการทดสอบทั้งสองอุณหภูมิ

5. จากการตรวจสอบชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย FE-SEM และตรวจสอบปริมาณธาตุด้วย EDS ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO บนแผ่นรองทองแดง พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในสัดส่วนที่มากกว่า 0.25 wt% ส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Cu_6Sn_5 มีแนวโน้มที่ลดลง

6. การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อค่าความหนืด พบว่าค่าความหนืดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโน ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น โดยพบว่าในเงื่อนไขการทดสอบที่ SAC305-0.75ZnO ให้ค่าความหนืดสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องความสามารถของรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-xZnO กับแผ่นโลหะ เช่น การทดสอบแรงดึง ทดสอบความล้า ทดสอบการคืบ และการนำไฟฟ้าของรอยต่อ หรือทดสอบกับสภาวะการใช้งานจริง

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

6.1 ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย คือ คาดว่าสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยเป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR ได้ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบแบบไร้สารตะกั่ว และโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว และเป็นองค์ความรู้ที่ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

6.2 ผลผลิตที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ

ผลผลิตงานวิจัยของโครงการวิจัยนี้ที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ คือ การเขียนต้นฉบับ (Manuscript) ของบทความวิจัยที่จะนำเสนอผลการวิจัยที่ได้ ซึ่งคาดว่าจะส่งไปตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR เช่น Materials & Design หรือ Journal of Alloys and Compounds



เอกสารอ้างอิง

- [1] "WEEE/RoHS Hot Issues." [Online]. Available : <http://www.thairohs.org>. 2006.
- [2] Abtey, M. and Selvaduray, G. "Lead-free Solders in Microelectronics." *Materials Science and Engineering R*, Vol. 27, 2000. Pp. 95-141
- [3] Kim K.S. and Sukanuma K. "Development of new Sn-Ag-Cu lead-free solders containing fourth elements." *Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Ibaraki, JAPAN, December, 2003. Pp. 414-415
- [4] Conrad H., Guo Z., Fahmy Y. and Yang D.I., "Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate and low-cycle fatigue of solder joints." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 28, 1999. Pp. 1062-1070
- [5] Marshall J.L., Calderon J., Sees J., Lucey G. and Hwang J.S., "Composite solders" *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 14, 1991. Pp. 698-702
- [6] Betrabet H.S., McGee S.M. and McKinlay J.K., "Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability." *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, 1991. Pp. 2323-2328
- [7] Mavoori H. and Jin S., "New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, 1998. Pp. 1216-1222
- [8] Kim K.S., Huh S.H. and Sukanuma K., "Effects of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead free soldered joint." *Journal of Alloys Compounds*, Vol. 532, 2003. Pp. 226-236
- [9] San F., Hochstenbach P., Van Driel W.D. and Zhang G.Q., "Fracture Morphology and mechanism of IMC in Low-Ag SAC Solder/UBM (Ni(P)-Au) for WLCSP." *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, 2008. Pp. 1167-1170
- [10] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., "Effect of carbon nanotubes on the shear strength and electrical resistivity of a lead-free solder." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 37, 2008. Pp. 515-522
- [11] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., "Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 423, 2006. Pp. 166-169

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., "Lead-free solder reinforced with multiwalled carbon nanotubes." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 35, 2006. Pp. 1518-1522
- [13] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., "Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites." *Thin Solid Films*, Vol. 504, 2006. Pp. 401-404
- [14] Kumar K.M., Kripesh V. and Tay A.A.O., "Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solders." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 450, 2008. Pp. 229-237
- [15] Kumar K.M., Kripesh V. and Tay A.A.O., "Study on the microstructure and mechanical properties of a novel SWCNT-reinforced solder alloy for ultra-fine pitch applications." *Thin Solid Films*, Vol. 504, 2006. Pp. 371-378
- [16] Shen J., Liu Y.C., Han Y.J., Tian Y.M. and Gao H.X., "Strengthening effects of ZrO₂ nanoparticles on the microstructure and microhardness of Sn-3.5Ag lead-free solder." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 35, 2006. Pp. 1672-1679
- [17] Chantaramanee S., Plookphol T., Wisuthmethangoon S. and Sikong L., "Lead-free solder SWCNT nano-composite processing by ultrasonic." 4th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals And Environment and 2nd Asian Symposium on Materials and Processing, Penang, Malaysia, 2009.
- [18] El-Daly A.A., Fawzy A., Mansour S.F. and Younis M.J., "Thermal analysis and mechanical properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder alloy after modification with SiC nano-sized particles." *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, Vol. 24, 2013. Pp. 2976-2988
- [19] Lee J.S., Chu K.M., Patzelt R., Manassis D., Ostmann A. and Jeon D Y., "Effects of Co addition in eutectic Sn-3.5Ag solder on shear strength and microstructural development." *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, 2008. Pp. 1577-1583
- [20] Mohankumar K. and Tay A.A.O., "Nano-particle reinforced solders for fine pitch applications." *Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference*, Singapore, 2004.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] El-Daly A.A. and El-Taher A.M., "Evolution of thermal property and creep resistance of Ni and Zn-doped Sn-2.0Ag-0.5Cu lead-free solders." *Materials and Design*, Vol. 51, 2013. Pp. 789-796
- [22] Shen Y., Qi F., Xie M. and Li J., "The Effect of Nano-Cu Particles on Mechanical Properties of Micro-joining Joint with Lead-free solder." *Advanced Materials Research*, Vol. 291-294, 2011. Pp. 929-933
- [23] Tsao L.C., Huang C.H., Chung C.H. and Chen R.S., "Influence of TiO₂ nanoparticles addition on the microstructural and mechanical properties of Sn0.7Cu nano-composite solder." *Materials Science & Engineering A*, Vol. 545, 2012. Pp. 194-200
- [24] Wang Y., Zhao X., Xie X., Gu Y. and Liu Y., "Effects of nano-SiO₂ particles addition on the microstructure, wettability, joint shear force and the interfacial IMC growth of Sn3.0Ag0.5Cu solder." *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, Vol. 26, 2015. Pp. 9387-9395
- [25] Mohd Salleh M.A.A., Hazizi M.H., Ahmad Z.A., Hussin K. and Ahmad R., "Wettability, Electrical and Mechanical Properties of 99.3Sn-0.7Cu/Si₃N₄ Novel Lead-Free Nanocomposite Solder." *Advanced Materials Research*, Vol. 277, 2011. Pp. 106-111
- [26] Kanlayasiri K., Mongkolwongrojn M. and Ariga T. "Influence of Indium Addition on Characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 485, 2009. Pp. 225-230
- [27] Dong M.J., Gao Z.M., Liu Y.C., Wang X. and Yu L.M. "Effect of indium addition on the microstructural formation and soldered interfaces of Sn-2.5Bi-1Zn-0.3Ag lead-free solder." *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 19, 2012. Pp. 1029-1035
- [28] Nai S.M.L., Wei J. and Gupta M., "Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 423, 2006. Pp. 166-169
- [29] Xiang K.K., Haseeb A.S.M.A., Arafat M.M. and Yingxin G., "Effects of Mn Nano-particles on Wettability and Intermetallic Compounds in between Sn-3.8Ag-0.7Cu and Cu Substrate during Multiple Reflow." *IEEE.2012 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design*, Penang, Malaysia, July, 2012.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Tay S.L., Haseeb A.S.M.A., Johan M.R., Munroe P.R. and Quadir M.Z., "Influence of Ni nanoparticle on the morphology and growth of interfacial intermetallic compounds between Sn_{3.8}Ag_{0.7}Cu lead-free solder and copper substrate." *Intermetallics*, Vol. 33, 2013. Pp. 8-15
- [31] Chen G., Peng H., Silberschmidt V. V., Chan Y.C., Liu C. and Wu F. "Performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu composite solder with TiC reinforcement: Physical properties, solderability and microstructural evolution under isothermal ageing." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 685, 2016. Pp. 680–689
- [32] Jian-Chun L., Gong Z., Zheng-Hong W., Ju-Sheng M. and Katsuaki S., "Thermal property, wettability and interfacial characterization of novel Sn–Zn–Bi–In alloys as low-temperature lead-free solders." *Materials and Design*, Vol. 84, 2015. Pp. 331–339
- [33] Li L.F., Cheng Y.W., Xu G.L., Wang E.Z., Zhang Z.H. and Wang H., "Effects of indium addition on properties and wettability of Sn–0.7Cu– 0.2Ni lead-free solders." *Materials and Design*, Vol. 64, 2014. Pp. 15-20
- [34] Fallahi H., Nurulakmala M.S., Fallahi Arezodarb A. and Jamaluddin A., "Effect of iron and indium on IMC formation and mechanical properties of lead-free solder." *Materials Science & Engineering A*, Vol. 553, 2012. Pp. 22-31
- [35] Guang C., Fengshun W., Changqing L., Weisheng X. and Hui L., "Effects of fullerenes reinforcement on the performance of 96.5Sn–3Ag–0.5Cu lead-free solder." *Materials Science & Engineering A*, Vol. 636, 2015. Pp. 484-492
- [36] Yue G., Xiuchen Z., Yi L., Ying L., Yong W. and Zhenyu L., "Effect of nano-Fe₂O₃ additions on wettability and interfacial intermetallic growth of low-Ag content Sn–Ag–Cu solders on Cu substrates." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 627, 2015. Pp. 39–47
- [37] Tang Y., Pan Y.C. and Li G.Y., "Influence of TiO₂ nanoparticles on thermal property, wettability and interfacial reaction in Sn–3.0Ag–0.5Cu–xTiO₂ composite solder." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 24, 2013. Pp. 1587-1594

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [38] Tsao L.C., Chang S.Y., Lee C.I., Sun W.H. and Huang C.H., "Effects of nano- Al_2O_3 additions on microstructure development and hardness of Sn3.5Ag0.5Cu solder." **Materials and Design**, Vol. 31, 2010. Pp. 4831–4840
- [39] Nguyen J., Aranda R., Geiger D. and Kurwa M., "Assembly Processes Feasibility of Low/No Silver Alloy Solder Paste Materials." **IPC APEX EXPO Conference Proceedings**, Las Vegas, United State of America, March, 2013.
- [40] An B., Xu Z., Chen H., Wu F. and Wu Y., "Solder Paste Printability Tester an Method." **IEEE.2006 7th International Conference on Electronics Packaging Technology**, Shanghai, China, August, 2006.
- [41] Durairaj R., Ramesh S., Mallik S., Semen A. and Ekere N., "Rheological characterization and printing performance of Sn/Ag/Cu solder pastes." **Materials and Design**, Vol. 30, 2009. Pp. 3812-3818
- [42] Nguyen J., Geiger D. and Shangguan D., "Evaluation of Lead Free Solder Paste Materials for PCBA." **IPC APEX EXPO Conference Proceedings**, Las Vegas, United State of America, April, 2011.
- [43] Kanlayasiri K and Sukpimai K. "Effect of indium on the metallic layer between low-Ag SAC0307-xIn lead-free solders and Cu substrate." **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 668, 2016. Pp. 169–175
- [44] Sobhy M. , El-Refai A.M., Mousa M.M. and Saad G., "Effect of ageing time on the tensile behavior of Sn–3.5 wt%Ag–0.5 wt% Cu (SAC355) solder alloy with and without adding ZnO nanoparticles." **Materials Science and Engineering A**, Vol. 646, 2015. Pp. 82–89
- [45] Tang Y., Li G.Y. and Pan Y.C., "Influence of TiO_2 nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-x TiO_2 solder joints in reflow process." **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 554, 2013. Pp. 195-203
- [46] Chellvarajoo S. and Abdullah M.Z., "Microstructure and mechanical properties of Pb-free Sn-3.0Ag-0.5Cu solder pastes added with NiO nanoparticles after reflow soldering process." **Materials and Design**, Vol. 90, 2016. Pp. 499-507

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [47] Liu P., Yao P. and Liu J., "Effect of SiC Nanoparticle Additions on Microstructure and Microhardness of Sn-Ag-Cu Solder Alloy." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 37, 2008. Pp. 874-879
- [48] Mikell P. Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems*. 4th ED. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [49] ฉวีวรรณ ลิ้มสุวรรณ. "การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [50] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. *กระบวนการผลิต Manufacturing Processes*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2559
- [51] Adel M. A. Mohamed and Teresa D. Golden. 2016. *Electrodeposition of Composite Materials*. : InTech.
- [52] R.D. Brown, Jr., "Indium in Mineral Commodity Summaries." *U.S. Geological Survey*, 1999. Pp. 84-85
- [53] Bradley E., Carol A. Handwerker, Bath J., Richard D. Parker and Ronald W.G edney. *Lead-Free Electronics: iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing*, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [54] พูลสวัสดิ์ แผงสมศรี และ วรรณิภา ทองสายใหญ่. "การออกแบบเครื่องวัดความหนืดของอาหารเหลวโดยใช้ระบบท่อ." *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*. 2544
- [55] John W. Evans., Kwon D. and Jillian Y. Evans. *A Guide to Lead-free Solders : Physical Metallurgy and Reliability*. London : Springer. 2007.
- [56] Yu D.Q., Zhao J. and Wang L., "Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 376, 2004. Pp. 170-175
- [57] Wu C.M.L., Yu D.Q., Law C.M.T. and Wang L., "The properties of Sn-9Zn lead-free solder alloys doped with trace rare earth elements." *Journal of Electronic Materials*. Vol. 31, 2002. Pp. 921-927

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [58] Song J.M., Lan G.F., Liu T.S. and Chen L.H., "Microstructure and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solder alloys." *Scripta Materialia*, Vol. 48, 2003. Pp. 1047-1051
- [59] Das S.K., Sharif A., Chan Y.C., Wong N.B. and Yung W.K.C., "Effect of Ag micro-particles content on the mechanical strength of the interface formed between Sn-Zn binary solder and Au/Ni/Cu bond pads." *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, 2009. Pp. 2086-2093
- [60] Mavoori H., Jin S., "New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, 1998. Pp. 1216-1222
- [61] K.N. Subramanian, *Lead-free solders: materials reliability for electronics*. Wiley, 2011.
- [62] Shen J. and Chan Y.C., "Research advances in nano-composite solders." *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, 2009. Pp.223-234
- [63] Bukat K., Sitek J. and Koscielski M., "SAC305 solder paste with carbon nanotubes-part I: investigation of the influence of the carbon nanotubes on the SAC solder paste properties." *Soldering and Surface Mount Technology*, Vol.24, 2012. Pp. 267-279
- [64] Jakubowska M., Bukat M. Koscielski, Mlozniak A., Niedzwiedz W., Sloma M. and Sitek J., "Investigation of properties of the SAC solder paste with the silver nanoparticle and carbon nanotube additives and the nano solder joints." *Electronic System Integration Technology Conference*, Berlin, Germany, 2010.
- [65] Tay S.L., Haseeb A.S.M.A and Johan M.R., "Addition of cobalt nanoparticles Into Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder by paste mixing." *Soldering and Surface Mount Technology*, Vol. 23, 2011. Pp. 10-14
- [66] Lin D.C., Liu S., Guo T.M., Wang G.X., Srivatsan T.S. and Petraoli M., "An Investigation of nanoparticles addition on solidification kinetics and Microstructure development of tin-lead solder." *Materials Science & Engineering A*, Vol. 360, 2003. Pp. 285-292
- [67] Mohammad V., Ahmah U. and Yoon-Bong H., "ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications." *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications*, Vol. 5, 2010. Pp. 1-36

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [68] Rhodes M. *Introduction to Particle Technology*. 2nd ED. United Kingdom : John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [69] "Flow and Reflow." [Online]. Available : https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9_3.html. 2016.
- [70] Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian and Kacprzak. *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2nd ED. Vol.3. United State of America : ASM International 2001.
- [71] "การวิเคราะห์พอลิเมอร์." [Online]. Available : http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html. 2016.
- [72] Douglas B. Murphy. *FUNDAMENTALS OF LIGHT MICROSCOPY AND ELECTRONIC IMAGING*. United States of America : A John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [73] Hafner B. "Scanning Electron Microscopy Primer." [Online]. Available : http://www.charfac.umn.edu/sem_primer.pdf. 2007.
- [74] Radboud University Nijmegen. "Information on the FESEM (Field-emission Scanning Electron Microscope)." [Online]. Available : http://www.vcbio.science.ru.nl/public/pdf/fesem_info_eng.pdf. 2016.
- [75] Hafner B. "Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM: A Primer." [Online]. Available : http://www.charfac.umn.edu/instruments/eds_on_sem_primer.pdf. 2016.
- [76] Kumasawa M. "Material Safety Data Sheet." March 2010. Pp. 1-8
- [77] "Safety Data Sheet." [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/264032?lang=en®ion=TH>. 2016.
- [78] "Materials Safety Data Sheet-Zinc Oxide Nanopowder." March 2008. Pp. 1-7
- [79] "Zinc Oxide Nanoparticles." [Online]. Available : <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=21>. 2016.
- [80] Japanese Industrial Standards Committee Standards Board. *JIS Z 3198-3 : 2003*. Japan : Japanese Standards Association. 2003.
- [81] IPC Plastic Chip Carrier Cracking Task Group (B-10a) and the JEDEC JC-14.1 Committee. *IPC/JEDEC J-STD-020D.1*. United State of America : JEDEC Solid State Technology Association. 2008.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [82] Humpston G. and David M. Jacobson. **Principles of Soldering**. United States of America : ASM International. 2004.
- [83] Amalu E.H., Ekere N.N. and Mallik S., "Evaluation of rheological properties of lead-free solder pastes and their relationship with transfer efficiency during printing process." **Materials and Design**, Vol. 32, 2011. Pp. 3189-3197
- [84] Evans J. and Beddow, J.K., "Characterization of Particle Morphology and Rheological Behavior in Solder Paste." **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, Vol. CHM-T 10, 1987. Pp. 224-231
- [85] "Hitachi S-4700 FE-SEM." [Online]. Available : <http://mcff.mtu.edu/acma/electron-microscopy/hitachi-s-4700-fe-sem/>. 2014.
- [86] Kanlayasiri K. and Ariga T., "Physical properties of Sn58Bi-xNi lead-free solder and its interfacial reaction with copper substrate." **Materials and Design**, Vol. 86, 2015. Pp. 371-378
- [87] Sharma A., Baek B.G. and Jung J.P., "Influence of La₂O₃ nanoparticle additions on microstructure, wetting, and tensile characteristics of Sn-Ag-Cu alloy," **Materials and Design**, Vol. 87, 2015. Pp. 370-379
- [88] Liu X., Huang M., Wu C.M.L. and Wang L., "Effect of Y₂O₃ particles on microstructure formation and shear properties of Sn-58Bi solder," **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Vol. 21, 2010. Pp. 1046-1054
- [89] Howard H. Manko. **Solder and Soldering**. United States of America : McGraw-Hill, Inc.. 1979.
- [90] "General Information on Solder Paste." [Online]. Available : http://www.pmdtkk.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3_4%20priedas.%2023_Solder_paste_general_info_KOKI.pdf. 2016.
- [91] Ganesan S. and Pecht M. **Lead-Free Electronics**. United States of America : A John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- [92] Jennie S. Hwang. **Solder paste in electronics packaging**. United States of America : Van Nostrand Reinhold. 1989.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [93] Li Y., Zhao X., Liu Y. and Yuan W. "Effect of TiO_2 addition concentration on the wettability and intermetallic compounds growth of $\text{Sn}_{3.0}\text{Ag}_{0.5}\text{Cu-xTiO}_2$ nano-composite solders." : *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 25, 2014. Pp. 3816–3827
- [94] Nishikawa H., Piao J.Y. and Takemoto K. "Interfacial reaction between Sn-0.7Cu (-Ni) solder and Cu substrate." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 35, 2006. Pp. 1127-1132



ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล กรรณชัย กัลยาศิริ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ปีที่สำเร็จ
Ph.D.	Industrial Engineering Major: Manufacturing Engineering Minor: Materials Science	Oregon State University, USA.	2546
M.Eng	Industrial Engineering	Lehigh University, USA.	2541
วศบ.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2536

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- 1) Joining of Materials (Soldering and Brazing)
- 2) Electric-Discharge Machining

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2555	รางวัลชมเชย ผลงานวิจัยสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2552	รางวัลชนะเลิศ บทความดีเด่น ประเภทการวิจัยพื้นฐาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2555	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2554	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2553	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2551	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่	สกอ. และ สกว.
2539	ทุนพัฒนาอาจารย์ เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญา โท-เอก ในต่างประเทศ	ทบวงมหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Kanlayasiri K, Jattakul P. Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed K460 tool steel. *Precision Engineering*. 2013; 37: 556-561.

Mookam N, Kanlayasiri K. Evolution of the intermetallic compounds found between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver, lead-free solder and Cu substrate during thermal aging. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012; 28: 53-59.

Mookam N, Kanlayasiri K. Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011; 509: 6276-6279.

Kanlayasiri K, Ariga T. Influence of thermal aging on microhardness and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 504: L5-L9.

Kanlayasiri K, Mongkolwongrojn M, Ariga T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 485: 225-230.

Kanlayasiri K, Boonmung S. Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 192-193: 459-464.

Boonmung S, Chomtee B, Kanlayasiri K. Evaluation of artificial neural networks for pineapple grading. *Journal of Texture Studies*. 2006; 37: 568-579.