

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของ
โลหะบัดกรีบนแผ่นตัว Sn-3.0Ag-0.5Cu

A STUDY ON INFLUENCE OF ZnO NANOPARTICLES ON
WETTABILITY OF Sn-3.0Ag-0.5Cu SOLDER PASTE ON
COPPER SUBSTRATE

นางสาวกรรณณ เทียมกัน

MS. KORNKANOK TIAMKAN

นางสาวกานต์ชนก แซ่ทัง

MS. KANCHANOK SAE-LIN

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของ
โลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu

A STUDY ON INFLUENCE OF ZnO NANOPARTICLES ON
WETTABILITY OF Sn-3.0Ag-0.5Cu SOLDER PASTE ON
COPPER SUBSTRATE

นางสาวกรรณก เทียมกัน

MS. KORNBANOK TIAMKAN

นางสาวกานต์ชนก แซ่หลิน

MS. KANCHANOK SAE-LIN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

A STUDY ON INFLUENCE OF ZnO NANOPARTICLES ON
WETTABILITY OF Sn-3.0Ag-0.5Cu SOLDER PASTE ON
COPPER SUBSTRATE

MS. KORNGANOK TIAMKAN

MS. KANCHANOK SAE-LIN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของโลหะ บัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu
นักศึกษา	นางสาวกรรณก เทียมกัน นางสาวกานต์ชนก แซ่หลิน
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อการกระจายตัว (Wettability) ของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0wt%, 0.1wt%, 0.2wt%, 0.3wt%, 0.4wt%, 0.5wt%, 0.6wt%, 1.0wt%, 1.5wt% และ 2.0wt% ตามลำดับ ผสมเข้ากับโลหะบัดกรี โดยศึกษาการกระจายตัวในรูปแบบ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle บนแผ่นทองแดง ซึ่งได้ทำขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งสรุปผลได้ว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถเพิ่มการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมได้เมื่อเติมอนุภาคในอัตราส่วนที่เหมาะสม และถ้าเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.5wt% จะทำให้โลหะบัดกรีมีการกระจายตัวสูงสุด

Thesis Title	A study on influence of ZnO nanoparticles on wettability of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder paste on copper substrate
Student	Ms. Kornkanok Tiamkan Ms. Kanchanok Sae-Lin
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This research was aimed to study on effect of nanoparticles on wettability of Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC 305) solder paste on copper substrate. Zinc oxide (ZnO) nanoparticles were added into the solder paste from 0 to 2 wt%. The wettability was presented in terms of spread ratio, spread factor, and contact angle. Results showed that adding ZnO nanoparticles at 0.5 wt% provides the highest wettability.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านของปริญญาานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ดร.วิภู ศรีสืบสาย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ดร.พลชัย โชติปรายนกุล ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายกำธร สุขพิมาย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทดลอง จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณครอบครัว ที่ช่วยสนับสนุนด้านการเงิน คอยให้กำลังใจ จนสามารถฟันฝ่าอุปสรรคให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวกรรณก เทียมกัน
นางสาวกานต์ชนก แซ่หลิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โลหะบัดกรี (Solder).....	3
2.2 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	4
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free solders).....	5
2.4 โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste).....	7
2.5 โลหะพื้น (Base metal).....	10
2.6 นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nanoparticles).....	11
2.6.1 บทบาทของนาโนซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	13
2.7 ความก้าวหน้าในการวิจัยโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	14
2.7.1 ความนำ.....	15
2.7.2 เหตุผลสำหรับการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	16
2.7.3 วิธีการผลิตโลหะบัดกรีที่ผสมสารประกอบนาโน.....	18
2.7.4 ความสำเร็จในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	19
2.7.5 ปัญหาในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.6 โครงสร้างใหม่ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน	26
2.7.7 สรุป	26
2.8 วิธีการบัดกรี (Soldering methods).....	28
2.8.1 การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering)	28
2.8.2 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering).....	28
2.9 มาตรฐานขึ้นทดสอบโลหะบัดกรีแบบครีม	29
2.10 การคำนวณอัตราการกระจายตัว (Spread factor).....	30
2.11 ภาวะการเปียก (Wettability).....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	33
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุฐานที่ใช้ทดสอบ	34
3.3 ขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบ	35
3.4 การให้ความร้อน	36
3.5 การวัดและวิเคราะห์ผล.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต	43
บรรณานุกรม	44
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก. รูปชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง.....	47
ภาคผนวก ข. ผลที่วัดได้จากโปรแกรม Image-Pro Express®.....	53
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ถูกนำไปใช้แล้วในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	6
ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี.....	10
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nanoparticles).....	13
ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณ.....	40

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผ่นวงจรพิมพ์แบบยึดหยุนที่ใช้งานในฮาร์ดดิสก์.....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะและบรรจุภัณฑ์ของ Solder paste ที่ใช้ในการทดลอง	8
รูปที่ 2.3 การใช้ Solder paste ในกระบวนการผลิตแบบ SMT (Surface mount technology).....	8
รูปที่ 2.4 ZnO nanoparticles powder	12
รูปที่ 2.5 การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering)	28
รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering)	28
รูปที่ 2.7 ขนาดขั้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3	29
รูปที่ 2.8 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี	30
รูปที่ 2.9 มุมสัมผัสบนแผ่นทองแดง	31
รูปที่ 2.10 การเปียกและมุมสัมผัสค่าต่างๆ	32
รูปที่ 3.1 แผ่นทองแดง	34
รูปที่ 3.2 บล็อกปาดโลหะบัดกรีแบบครีม.....	35
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA	36
รูปที่ 3.4 เครื่อง Hot plate	37
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการวัดค่าในโปรแกรม Image-Pro Express	37
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับพื้นที่ของโลหะบัดกรี.....	40
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับเส้นรอบวงของโลหะบัดกรี.....	41
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอัตราการกระจายตัว.....	41
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอัตราส่วนการกระจายตัว.....	42
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับมุมสัมผัสของโลหะบัดกรี	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากในแต่ละปี และเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ สหภาพยุโรปได้ออกข้อบังคับ RoHS (The restriction of the use of certain hazardous substances) ออกมาเพื่อควบคุมการใช้งานสารมีพิษบางชนิด ทำให้ไม่สามารถส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในสหภาพยุโรปได้ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว (Lead-free solders) มาใช้งานแทน

โลหะบัดกรีทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน โดยเฉพาะในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ และมีการออกแบบที่ซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ โลหะบัดกรีจึงมีความสำคัญเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โลหะบัดกรีโดยทั่วไปนั้นจะแบ่งรูปของโลหะบัดกรีได้เป็น 3 รูปแบบ คือ โลหะบัดกรีแบบแท่งซึ่งไม่มีน้ำยาประสาน (Solder bar) โลหะบัดกรีแบบเส้น (มีและไม่มีน้ำยาประสาน) (Solder wire with and without flux) และโลหะบัดกรีแบบครีมซึ่งมีน้ำยาประสานผสมอยู่เสมอ (Solder cream or Solder paste)

ในยุคโลกาภิวัตน์นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากรวมไปถึงการนำนาโนเทคโนโลยีมาพัฒนาโลหะบัดกรีแบบครีมโดยการใช้อนุภาคนาโน (Nano-particles) เป็นองค์ประกอบเพื่อให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) ให้อนุภาคนาโนเล็กนั้น เข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรี เพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน ที่เป็นสาเหตุของการเกิดความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep)

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC 305) และทำการสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 เพื่อทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างชุดทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมี Sn-3.0Ag-0.5Cu
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมี Sn-3.0Ag-0.5Cu

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ใช้โลหะบัดกรีแบบครีมีชนิด SAC 305 และใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 0wt%, 0.1wt%, 0.2wt%, 0.3wt%, 0.4wt%, 0.5wt%, 0.6wt%, 1.0wt%, 1.5wt% และ 2.0wt% ตามลำดับ
2. ศึกษาการกระจายตัวในรูปแบบ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle บนแผ่นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 97 %

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดทดสอบในการทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมี
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมีชนิด SAC 305 บนแผ่นทองแดง
3. ได้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโลหะบัดกรีแบบครีมีต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะบัดกรี (Solder)

โลหะบัดกรีที่มีใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน ได้แก่ โลหะผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันมาก คือ 63 Sn-37Pb (Eutectic tin-lead solder) และ 60Sn-40Pb (Near eutectic tin-lead solder) โลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb นี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก หาได้ง่าย มีสมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนที่เยี่ยม ดังนั้น ในการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) มาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว นั้นจะต้องมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสม

คุณลักษณะเบื้องต้นในการเลือกใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ได้แก่

1. ต้องไม่เป็นพิษหรือมีความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมและร่างกายต่ำ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
2. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เลือกใช้จะต้องมีราคาถูก
3. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เลือกใช้จะต้องมีจุดหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb เพราะถ้ามีจุดหลอมเหลวที่สูงก็หมายความว่าเราต้องปรับอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
4. ควรมีช่วงของคุณสมบัติแบบพลาสติกแคบ (Narrow plastic range)
5. ควรมีคุณสมบัติการเปียก (Wettability) และการเชื่อมบัดกรี (Solder ability) ที่ดี
6. ควรมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ อื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี ไม่ด้อยกว่าโลหะ บัดกรีชนิด Sn-Pb
7. ควรมีคุณสมบัติต้านทานการล้าที่ดี (Good fatigue resistance)
8. สามารถใช้ได้กับระบบพลาซมาที่ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
9. เมื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดครีม (Solder paste) จะต้องมีอายุการเก็บ (Shelf life) ยาวนานไม่เสื่อมคุณภาพ
10. เมื่อถูกนำไปใช้ในงานบัดกรีแบบ Wave soldering จะต้องมีการก่อตัวของ Dross ที่น้อย
11. สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปได้หลายรูปแบบ เช่น โลหะแท่ง ลวดบัดกรี ผงโลหะ ครีมโลหะ เป็นต้น

2.2 ธาตุเจือที่ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปจะมีส่วนผสมของโลหะดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียก (Wettability) และการแผ่กระจาย (Spreading) เวลาบัดกรีได้ดีและสามารถใช้ได้กับsubstrate หลายชนิด ดีบุกมีจุดหลอมเหลวที่ 231C ส่วนธาตุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีหลายชนิดด้วยกัน ธาตุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ เงิน (Ag) อินเดียม (In) บิสมัท (Bi) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

1. เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจาย (Spreading) ดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวต่ำลง

2. อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่น โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น อินเดียมที่เติมลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-Zn สามารถช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลวลง ระยะห่างระหว่างเส้น solidus และ liquidus กว้างขึ้น จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และอินเดียมยังมีความสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียว (Ductility) ให้ดีขึ้น

3. บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่น คือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำมากคือ 139 °C จึงเป็นข้อดี คือ สามารถใช้กับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงๆ ได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ Lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสาน (Solder ability or Wetting) ที่ดีมากแต่มีข้อเสียคือ บิสมัทมีราคาสูง

4. พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านการคืบและการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแผ่กระจาย (Spreading) ของโลหะบัดกรีด้อยลง

5. ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่ 227°Cโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสCu₆Sn₅ ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการที่มีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุก (Tin whisker) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดกระแสไฟลัดวงจร

6. สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุกผสมสังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9 wt.% Zn) มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 199°Cซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุกผสมตะกั่วที่จุดยูเทคติก (183°C) Sn-9 wt.% Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ Sn matrix และ Hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่ประกอบด้วยดีบุกน้อยกว่า 1% โครงสร้างจุลภาคของ Sn-9Zn จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn rich และ Zn rich ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn นี้มีข้อด้อยบางประการ เช่น Zn สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์ (Dross) มาก เมื่อใช้ในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ใน ฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Pbทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solders)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดผสมตะกั่ว สามารถจัดแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ (<180C)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Bi, Sn-In และ Bi-In ตัวอย่างเช่น

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

กลุ่มที่ 2 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวปานกลาง (180C-200C)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Zn, Sn-Zn-Bi และ Sn-Bi-In ตัวอย่างเช่น

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198.5
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

กลุ่มที่ 3 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสูง (200C -230C)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Ag-Bi, Sn-Ag-Cu และ Sn-Ag-Cu-Sb ตัวอย่างเช่น

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

กลุ่มที่ 4 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสูงมาก (>230C)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะผสมระบบ Sn-Sb, Sn-Au และ Sn-Ag-Sb ตัวอย่างเช่น

ระบบโลหะผสม	องค์ประกอบ (wt%)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (C)
Sn-Sb	Sn-5Sb	232-240
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมากบางชนิดได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ บ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้ ตัวอย่างชนิดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว อุตสาหกรรมที่นำเอาไปใช้และบริษัทผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2.1

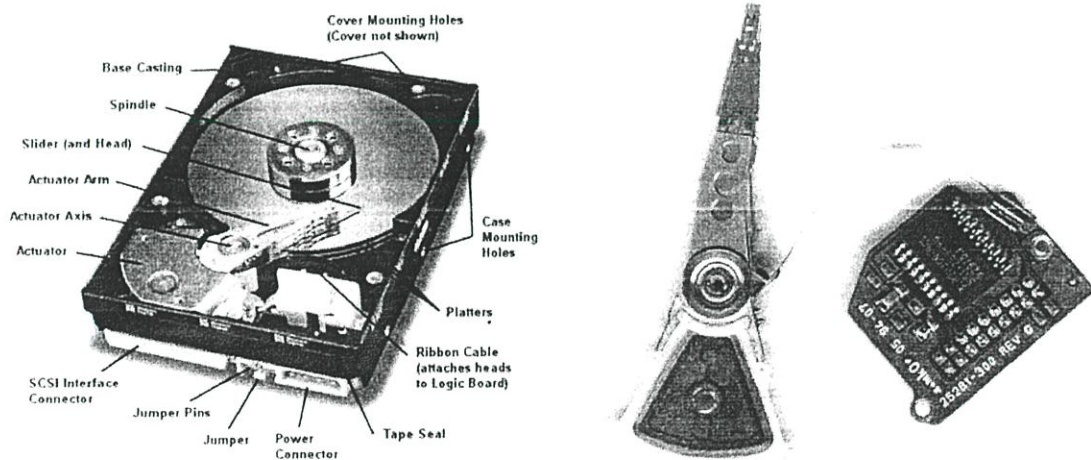
ตารางที่ 2.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ถูกนำไปใช้แล้วในอุตสาหกรรมต่างๆ

โลหะบัดกรี	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (C)	อุตสาหกรรมที่นำไปใช้	บริษัทผู้ผลิต
Sn-Ag	221-226	ยานยนต์	
Sn-Ag-Bi	206-213	การทหาร/อวกาศ	
Sn-Ag-Bi-Cu		ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	
Sn-Ag-Bi-Cu-Ge		การทหาร/อวกาศ	
Sn-Ag-Bi-X	206-213	ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	
Sn-Ag-Cu	217	ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	
Sn-Bi	138	ยานยนต์	Panasonic
		ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	Nortel
			Panasonic
		Toshiba	
Sn-Cu	227	ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	Panasonic
		โทรคมนาคม	Nortel
Sn-Zn	198.5	ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์	Panasonic
			NEC
			Toshiba

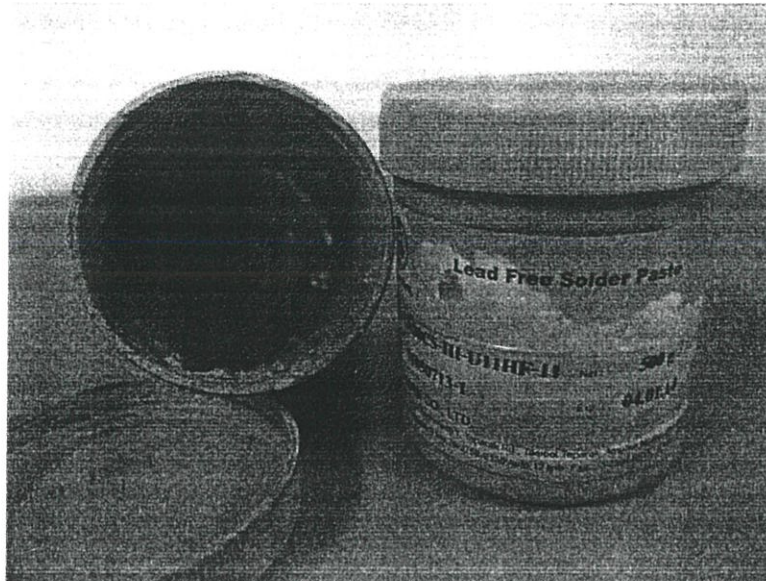
2.4 โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste)

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปในบ้านเราส่วนใหญ่มักเป็นยี่ห้อที่มาจากต่างประเทศ อาทิเช่น เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและโน้ตบุ๊ก โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เครื่องเล่นดีวีดี เป็นต้น ส่วนประกอบบางส่วนได้ผ่านการประกอบจากโรงงานในประเทศไทย โดยเฉพาะส่วนประกอบที่เรียกว่าแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) และแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Flexible printed circuit, FPC) แสดงดังรูปที่ 2.1 ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิด เพราะเป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งของไอซี (IC) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ชิพ (Chip) และอื่นๆ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องทำการบัดกรีให้ยึดติดกับ PCB และ FPC ด้วยวัสดุที่เรียกว่าโลหะบัดกรี รูปแบบของโลหะบัดกรีที่ใช้กันทั่วไปเป็นของแข็งของโลหะผสมของตะกั่วและดีบุก แต่ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องผลิตชิ้นงานจำนวนมากจะใช้โลหะบัดกรีเป็นโลหะหลอมเหลวที่นิยมใช้ในการประกอบ PCB หรือโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งนิยมใช้ในการผลิต FPC แบบ SMT (Surface mount technology) ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อพิมพ์โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ลงบนตำแหน่งที่ต้องการ แล้วจึงวางไอซีหรือตัวเก็บประจุลงบนโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) จากนั้นจึงให้ความร้อนเพื่อให้โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) หลอมตัวและประสานยึดติด ไอซีหรือตัวเก็บประจุกับแผ่นวงจรพิมพ์

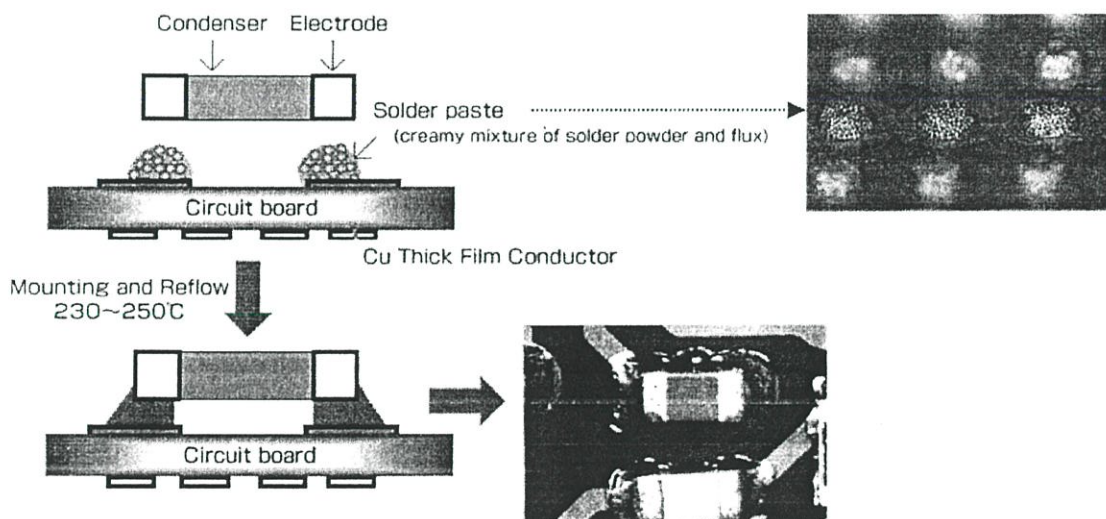
ถึงแม้โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เป็นส่วนประกอบเพียงเล็กน้อยแต่มีความสำคัญอย่างมากต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ โดยทั่วไป Solder paste เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยโลหะ สารอินทรีย์ และสารอินทรีย์หลายชนิดเพื่อให้ได้สมบัติขณะการปฏิบัติงานและสมบัติการยึดติดที่ต้องการ



รูปที่ 2.1 แผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นที่ใช้งานในฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.2 ลักษณะและบรรจุภัณฑ์ของ Solder paste



รูปที่ 2.3 การใช้ Solder paste ในกระบวนการผลิตแบบ SMT (Surface mount technology)

โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายยาสีฟัน โดยมีส่วนประกอบที่เป็นผงโลหะผสมกับฟลักซ์ (Flux) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้วัสดุผสมนี้มีลักษณะคล้ายครีม ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของโลหะ

บัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ได้แก่ ส่วนประกอบของโลหะผสม ขนาดและการกระจายตัวอนุภาคของโลหะผสม สัดส่วนของผงโลหะ ชนิดของฟลักซ์ (Flux) โดยมีรายละเอียดดังนี้

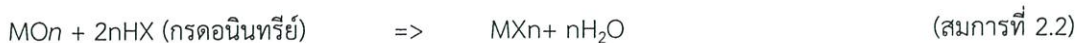
1. ส่วนประกอบของโลหะผสม (Solder alloy) โดยปัจจุบันโลหะบัดกรีแบ่งเป็นประเภทมีโลหะตะกั่วและไม่มีโลหะตะกั่ว โดยโลหะผสมที่ปราศจากตะกั่ว (Lead free) มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าของโลหะบัดกรีของโลหะผสมตะกั่วและดีบุก (Pb-Sn solder) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดประมาณ 183°C ดังนั้นจึงมีความพยายามวิจัยเพื่อปรับปรุงให้โลหะผสมที่ปราศจากตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงและมีสมบัติการบัดกรีดีเทียบเท่ากับโลหะผสมของตะกั่วและดีบุก

โลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วที่ใช้ทั่วไปคือ โลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 66 โลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu-Bi มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 19 โลหะบัดกรี Sn-Ag-Bi-In มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 9 และโลหะบัดกรี Sn-Zn-Bi มีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 6 โดย The Japanese Electronic Industry Association (JEIDA) แนะนำให้ใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักเป็น 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) ส่วน National Electronic Manufacturing Initiative (NEMI) แนะนำให้ใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักเป็น 95.5Sn-3.9Ag-0.6Cu และ 96.5Sn-3.5Ag สำหรับกระบวนการบัดกรีแบบ reflow soldering โดยทางยุโรปก็มีคำแนะนำการใช้คล้ายกับข้างต้นเช่นกัน แต่ถึงอย่างไรการนำโลหะผสมเหล่านี้ไปใช้งานจริงต้องได้รับการประเมินให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้นๆ

2. ผงโลหะ (Solder powder) คุณสมบัติของผงโลหะที่สำคัญคือ ต้องเป็นทรงกลม เกิดโลหะออกไซด์น้อย มีการกระจายขนาดของอนุภาคในช่วงที่กำหนด การที่ผงโลหะต้องเป็นทรงกลมเพราะจะทำให้มีสมบัติการไหลที่ดีขณะพิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ ความเรียบของผิวผงโลหะยังบอกถึงการเกิดออกไซด์บนผิวน้อยมาก โดยทั่วไปผงโลหะที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมจะมีความเรียบของผิวอนุภาคมากกว่าผงโลหะที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมและผงโลหะที่มีโลหะดีบุกเป็นส่วนประกอบสูง

การเกิดออกไซด์บนผิวของผงโลหะควรเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพราะจะส่งผลต่อการบัดกรีโดยตรง ดังนั้นขณะที่ผลิตผงโลหะต้องควบคุมอย่างดีไม่ให้เกิดออกไซด์ของโลหะ จากการศึกษาพบว่าโลหะเงิน ทองแดง และตะกั่วเป็นโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ยาก เพราะมีค่าพลังงานอิสระการเกิดออกไซด์สูง ตัวแปรที่มีผลทำให้เกิดออกไซด์ได้ง่ายคือ การใช้อุณหภูมิสูง มีความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศการผลิตสูง ขนาดอนุภาคของผงโลหะที่มีขนาดเล็กเพราะทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับออกซิเจนมากกว่าอนุภาคของผงโลหะที่มีขนาดใหญ่ และส่วนประกอบของผงโลหะ เช่น การผลิตของผงโลหะ Pb-Sn หรือ Sn-Ag-Cu ส่วนประกอบที่เป็นโลหะดีบุกจะเกิดออกไซด์ขึ้นแต่โลหะอื่นยังไม่เกิดออกไซด์ ผงโลหะหลังจากกระบวนการผลิตจะเกิดขึ้นของออกไซด์มากขึ้น ดังนั้นเพื่อลดการเกิดออกไซด์ของผงโลหะควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำๆ

3. ฟลักซ์ (Flux) เป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง โดยหน้าที่หลักคือการกำจัดออกไซด์บนผิวทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่ทำการบัดกรี และทำให้โลหะบัดกรีหลอมเหลวไหลตัวได้ดีขึ้น โดยทั่วไปฟลักซ์เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ปฏิกริยาของออกไซด์กับฟลักซ์แสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



โดยกำหนดให้	M	คือ โลหะ
	O	คือ ออกซิเจน
	RCOOH	คือ กรดอินทรีย์ (Carboxylic acids)
	HX	คือ กรดอนินทรีย์ (inorganic acids)
	X	คือ F, Cl หรือ Br (Halogen atom)

ปฏิกิริยาของออกไซด์กับฟลักซ์จะเกิดได้ช้าที่อุณหภูมิห้องแต่เกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ฟลักซ์ที่เป็นกรดอินทรีย์เป็นที่นิยมมากกว่า เพราะไม่ทำให้เหลือสารจำพวกไฮโดรเจนตกค้างมากเกินไป กรดอินทรีย์ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากพอที่จะไม่ระเหยไปก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะ แต่กรดอินทรีย์ไม่ควรเหลือตกค้างในรอยบัดกรีเพราะทำให้รอยบัดกรีเกิดความบวมพร่องและมีความแข็งแรงลดลงอย่างมาก

ฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วมีความแตกต่างจากฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว ดังนี้

- ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยา (Flux activity) โดยทั่วไปโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วจะมีการไหลกระจายตัวขณะหลอมเหลวดีกว่าโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว แก้ไขโดยใช้ฟลักซ์ที่มีความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น
- การเข้ากันได้ของฟลักซ์และโลหะบัดกรี (Alloy compatibility) เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่ออายุใช้งานของ Solder paste และการบัดกรี ถ้าใช้ฟลักซ์ที่มีความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยามากเกินไปอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของแผงโลหะมากเกินไปและทำให้ Solder paste มีสมบัติการไหลเปลี่ยนไปในแนวโน้มที่มีความหนืดมากขึ้น
- ความเสถียรภาพต่อความร้อน (Thermal stability) เนื่องจากโลหะบัดกรีปราศจากตะกั่วที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูงจะมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 210 องศาเซลเซียส จึงต้องเลือกใช้ฟลักซ์ที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าฟลักซ์สำหรับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว

4. รีโวลูยี (Rheology) ของโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตโดยตรงในขั้นตอนการพิมพ์โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการความรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งต้องยึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์และยึดติดส่วนประกอบที่จะวางลงบนโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็ง (Solder paste) ได้อย่างดี

2.5 โลหะพื้น (Base metal)

โลหะพื้นในการบัดกรีส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กและทองแดง ส่วนอลูมิเนียมก็มีความสำคัญเพราะมีน้ำหนักเบาแต่จะบัดกรียากกว่าเหล็ก ทองแดง และอัลลอยของเหล็กกับทองแดง ตารางที่ 2.2 แสดงถึงชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรีแต่จะต้องคำนึงถึงฟลักซ์ที่เหมาะสมด้วยว่าเป็นชนิดว่องไวหรือไม่ ซึ่งจะมีผลต่อการบัดกรี

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะต่อความยากง่ายในการบัดกรี

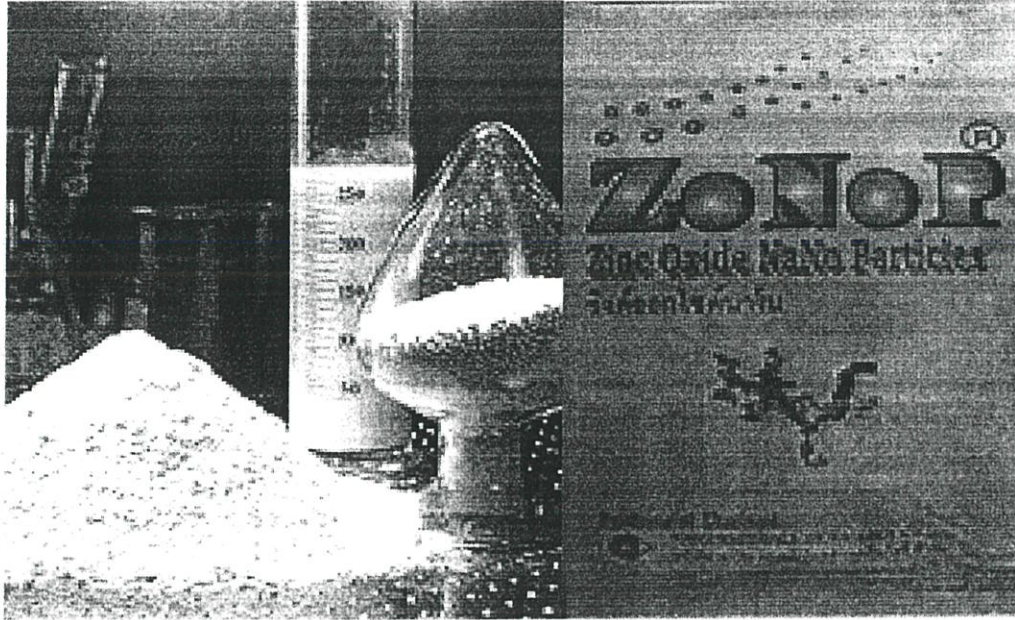
โลหะพื้นหรือโลหะชิ้นงาน	ความสามารถในการบัดกรี
เงิน, ดีบุก, แคดเมียม, แพลลาเดียม, โรเดียม, ทองแดง	ดีเยี่ยม
บรอนซ์, ทองเหลือง, ตะกั่ว, นิกเกิลผสมเงิน	ดีเยี่ยม
เบอริลเลียมผสมทองแดง	ดี
เหล็ก, สังกะสี, นิกเกิล	พอใช้
อลูมิเนียม, อลูมิเนียมผสมบรอนซ์, เหล็กผสมโครเมียม	ยาก
เหล็กหล่อ, โครเมียม, ไททานเนียม, แทนทาลัม, แมกนีเซียม	เคลือบด้วยโลหะบัดกรีอ่อน

โลหะที่เป็นดีบุก แคดเมียมและทองแดงจะง่ายต่อการเปียกของโลหะบัดกรี โดยไม่ต้องทำความสะอาดก่อน และใช้ฟลักซ์ที่ไม่ว่องไวได้ ถ้าเป็นเงินจะเกิดฟิล์มของซิลไฟต์บนผิว ซึ่งจะเป็นตัวลดประสิทธิภาพการบัดกรีทันที ตะกั่ว จะเกิดออกไซด์ที่ผิวเมื่ออยู่ในสภาพขึ้นและอาจต้องทำความสะอาดก่อนการบัดกรี ส่วนทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ และเหล็กจะเกิดออกไซด์บางบริเวณ ซึ่งต้องทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยเอทานอลหรือล้างด้วยกรดอ่อน ความจำเป็นในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของผิวโลหะที่เกิดออกซิเดชันและความว่องไวของฟลักซ์ที่ใช้

2.6 นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nanoparticles)

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นที่รู้จักในนาม คาลาไมล์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่ สมิโรไซต์ (Smithsonite) มนุษย์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในการรักษาโรคตั้งแต่ในยุคอียิปต์โบราณ

นาโนซิงค์ออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้มีอนุภาคขนาดเล็กในระดับอนุภาคนาโนเมตรที่อยู่ในรูปของ Powder form มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรที่มีความบริสุทธิ์สูงมีสีขาวและไม่เปลี่ยนสีซึ่งมีคุณสมบัติสามารถป้องกันแสง UV-A และ UV-B ด้านทานแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.4 of ZnO nanoparticles powder

กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Synthesis of ZnO nanoparticles) สามารถทำได้

4 วิธีได้แก่

1. Coprecipitation
2. Sol-gel
3. Hydrothermal
4. Flame spray pyrolysis

สำหรับบริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด ได้การผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanoparticles) ได้ใช้กระบวนการ สเปรย์ ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยที่ซิงค์ออกไซด์นาโนที่ผลิตได้มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nanoparticles)

Product Name	ZoNoP (Zinc oxide nanoparticles)	
Molecular Formula	ZnO	-
Molecular Weight	81.39	g/mole
Appearance	White powder	-
Crystal Phase	Zincite (hexagonal)	-
Purity	99.5+	%
Average Particles Size	20-40	nm
Specefic Surface Area	26.22	m ² /g
Bulk Density	0.14	g/cc
True Density	5.6	g/cc
P.H.	7-8	-
Boiling Point	-	°C
Melting Point	1975	°C

2.6.1 บทบาทของนาโนซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ

1. อุตสาหกรรมอาหารและยานาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้โดยมีความปลอดภัยสูง สามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและอาหารสัตว์ เนื่องจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายโดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 มิลลิกรัมและเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิกรัม ในสตรีที่ให้นมบุตรซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผลลดการอักเสบและยับยั้งแบคทีเรียได้ดีโดยนำมาใช้เป็นยาสมานผิวและรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนกวางโรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรียโรคลากเกลื้อนผิ อาการคันตามผิวหนังและผิวหนังระคายเคือง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตรซึ่งจากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี

2. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

2.1 นาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UVA และ UVB นอกจากนั้นยังมีอนุภาคเล็กละเอียดมีความบริสุทธิ์สูงและปลอดภัย เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดด สำหรับผิวเพื่อปกป้องรังสี UVA และ UVB ซิงค์ออกไซด์มีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกายโดยได้รับการยืนยันจาก Food and Drug Administration (FDA) ว่าเป็น 1 ใน 2 ชนิดของสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิวซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และ UVB

2.2 อนุภาคปกติของซิงค์ออกไซด์จะมีสีขาวเมื่อนำมาทาลงบนผิว ดังนั้นซิงค์ออกไซด์ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเป็นครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิวอย่างไรก็ตาม นาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการทดสอบโดย Australian commonwealth scientific & industrial research organization (CSIRO) พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมหรือโลชั่นกันแดดจะให้สัมผัสนุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว นาโนซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง

3. อุตสาหกรรมการผลิตยานาโนซิงค์ออกไซด์ถูกใช้เป็นส่วนลดแรงตึงผิว ช่วยในการยืดอายุการใช้งานของยางและใช้ในการผลิตยางที่สามารถป้องกันรอยขีดข่วน

4. อุตสาหกรรมเซรามิก จะใช้ซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาวจากการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยหลังการเผาพบว่าผิวของเซรามิกที่ได้มีความมันวาวราวกับกระจก

5. อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆจะใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ป้องกันแบคทีเรียและเชื้อราการกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้าเสื้อผ้าทำความสะอาดตัวเองและ ผลิตภัณฑ์ใยและสิ่งทอที่สามารถป้องกันรังสี UV ได้

6. อุตสาหกรรมสีจะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนป้องกันไฟฟ้าสถิตตัวใหม่ ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ ทั้งยังสามารถผลิตสีป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

2.7 ความก้าวหน้าในการวิจัยโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

เมื่อเร็ว ๆ นี้ โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) ได้ถูกพัฒนาขึ้นในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เรื่องการปรับปรุง คุณสมบัติการยึดและการต้านทานความล้าของรอยบัดกรีเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงและภายใต้เงื่อนไขความล้าได้ในบทความนี้ได้แสดงความคิดเห็น และความก้าวหน้าในการวิจัยการพัฒนาของโลหะบัดกรีเชิงประกอบเหตุผลสำหรับการเตรียมความพร้อมของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนจะถูกนำเสนอ ในช่วงแรกและในช่วงที่สองจะมีการนำเสนอตัวอย่างโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนวิธีการผลิต วิธีการเชื่อมประสาน วิธีการผสมทางกลและวิธีการในแหล่งกำเนิด (In-situ) ซึ่งจะอธิบายในรายละเอียด และยังมีกล่าวถึงความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน บทสรุป ความยากลำบากและปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนรวมถึงโครงสร้างของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนและความพยายามในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

2.7.1 ความนำ

วัสดุโลหะบัดกรีมีบทบาทสำคัญในเรื่องของความนำเชื่อถือในการผลิตวงจรรีเลย์ทรอนิกส์เนื่องจากการให้ความร้อนต่อเนื่องตลอดการผลิตโลหะบัดกรีแบบผสมสารตะกั่ว มีการใช้งานมาเป็นเวลานานส่งผลให้มีฐานข้อมูลขนาดใหญ่ และมีความนำเชื่อถือมากแต่เมื่อเร็ว ๆ นี้มีความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในเรื่องความเป็นพิษของสารตะกั่ว ดังนั้นจึงมีการออกกฎหมายที่เข้มงวดเพื่อห้ามการใช้สารตะกั่วในโลหะบัดกรี จึงทำให้มีแรงผลักดันให้พัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้น อย่างไรก็ตามตามฐานความรู้เกี่ยวกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมไม่สามารถใช้งานได้โดยตรงในโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ฐานข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ยังไม่มีความนำเชื่อถือ และยังไม่สามารถใช้ได้ในปัจจุบัน

ในการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีความท้าทายหลายประการ เช่น แนวโน้มของขนาดที่เล็กลงและการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานที่ต้องใช้ความหนาแน่นและรอยบัดกรีขนาดเล็กในขั้นตอนการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา และโทรศัพท์มือถือ ที่มีการพัฒนาให้บางขึ้นและมีขนาดเล็กลง พร้อมกับมีฟังก์ชันที่ซับซ้อนมากขึ้นและความนำเชื่อถือของรอยบัดกรีที่ต้องเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นเทคโนโลยี Flip chip (FC) และ Ball grid array (BGA) มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตอุปกรณ์แบบพกพาเหล่านี้ เพราะมีความหนาแน่นสูงและการนำเข้า / ส่งออก (I/O) สามารถทำในพื้นที่จำกัด รอยบัดกรีขนาดเล็กในพื้นที่แคบ ๆ จะนำไปสู่อุณหภูมิที่สูง ใกล้เคียงกันตลอดการเชื่อมประสานซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของรอยบัดกรี ดังนั้นโลหะบัดกรีผสม ผลิตรขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ในความหนาแน่นสูงและอุณหภูมิค่อนข้างสูง นั่นคือที่อุณหภูมิสูง โลหะบัดกรีผสมได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเผชิญหน้ากับความท้าทายของขนาดที่เล็กลงของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในระหว่างการเปิดและปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะร้อนขึ้นและเย็นลง จึงประสบปัญหาการเกิดความล้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนและแรงทางกล (TMF) อันเนื่องมาจากความเครียดที่มีผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวต่อเนื้อทางความร้อน (CTE) ที่ไม่ตรงกันระหว่างการเชื่อมประสานโลหะพื้นและส่วนประกอบ วงจรความร้อนเหล่านี้ทำให้เกิดความเค้นที่รอยบัดกรี ซึ่งเป็นผลมาจากความเครียดสะสมในเวลาที่ยาวนานและอุณหภูมิสองระดับที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นความเครียดนี้อาจเพียงพอที่จะทำให้เกิดอัตราความเครียดต่ำและการคืบผิดปกติ ในช่วงมีอุณหภูมิสูงการต้านทานการคืบในรอยบัดกรีเป็นสิ่งจำเป็นในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูง (เช่น อุตสาหกรรม Optoelectronic) เพราะมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาความถูกต้องของตำแหน่งของส่วนประกอบ Optoelectronic ตัวอย่างเช่น การคืบของโลหะบัดกรี ขึ้นอยู่กับเวลาและแนวระหว่างเลเซอร์ ในสถานะของแข็งและเลนส์ทรงกลมบนเส้นใยใน Lightguide ocean cables ที่จะช่วยลดความรุนแรงของการส่งหรือแม้กระทั่งทำให้เกิดการสูญเสียที่สมบูรณ์ของสัญญาณการสื่อสารคลื่นแสงในสายเคเบิล ในการใช้งานการป้องกันแรงสั่นสะเทือนของรถถัง , เครื่องบินหรือจรวด จะสร้างการสั่นที่มีความถี่และความล้าสูง ซึ่งเป็นเหตุให้ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่แนบมากับอาวุธเหล่านี้ทำงานล้มเหลว ดังนั้นปัญหาที่ต้องพัฒนาและแก้ไขคือการคืบสูงและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

เป็นที่ทราบกันว่าโลหะบัดกรีเป็นโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็น 40-50% ของอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรีในหน่วยเคลวิน ส่วนใหญ่โลหะบัดกรีแบบผสมจะถูกนำมาใช้ในอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิหลอมละลายของตัวเอง ดังนั้นความผิดปกติใด ๆ ที่เกิดขึ้นในรอยบัดกรีจะเกิดจากการเปลี่ยนรูปการคืบในเนื้อโลหะ แต่การคืบในโลหะบัดกรียังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควรเพราะโลหะบัดกรีถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สำหรับกลุ่มผู้บริโภคขนาดใหญ่ และการที่พวกเขาไม่จำเป็นต้องประสบกับสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงและความล้าทางกล แต่อย่างไรก็ตามในปีที่ผ่านมาแนวโน้มของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆและมีความแม่นยำมากขึ้น โดยได้ส่งเสริมการพัฒนาคุณสมบัติด้านการคืบและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรี ทำให้สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงได้

การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว มีเพียง Sn-80Au ที่สามารถทนต่อเงื่อนไขต่างๆที่อุณหภูมิสูงได้ แต่อย่างไรก็ตามโลหะผสมนี้จะไม่สามารถนำมาใช้ในหลายสถานการณ์ของการผลิตเนื่องจากค่าใช้จ่ายและคุณสมบัติการย่อยสลายของชั้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เมื่อทำการบัดกรีที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วอาจเป็นประโยชน์ต่อการต้านทานความล้า แต่อาจจะไม่เหมาะสำหรับการต้านทานการคืบที่มีการเสีรูปร่างที่อุณหภูมิต่างๆที่เกิดจากการเลื่อนของขอบเกรน ดังนั้นวิธีการที่น่าสนใจและมีศักยภาพคือการเติมสารประกอบเข้าไปในโลหะบัดกรี เพื่อที่จะพัฒนาคุณสมบัติต้านทานการคืบและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรี

2.7.2 เหตุผลสำหรับการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

โลหะบัดกรีผสมเมื่อผสมเข้ากับอนุภาคเสริมจะอยู่ในรูปโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยเมื่ออนุภาคเสริมที่เติมเข้ามาอยู่ในหน่วยนาโน โลหะบัดกรีเชิงประกอบจะถูกเรียกว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โลหะบัดกรีเหล่านี้ทำขึ้นเพื่อการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการคืบและการต้านทานความล้าในรอยบัดกรี อนุภาคเสริมขนาดนาโนจะถูกเพิ่มเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงการต้านทานการคืบที่เกิดจากการกระจายตัวบริเวณขอบเกรนซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนของขอบเกรน และหลายขั้นตอนของการเพิ่มอนุภาคนาโนเข้าไปในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนอาจต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้

2.7.2.1 อุณหภูมิหลอมเหลว

อุณหภูมิหลอมเหลวคือปัจจัยแรกและปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการพัฒนาโลหะบัดกรีใหม่ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่อุปกรณ์ที่ใช้อยู่ปัจจุบันถูกออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิ 456K (จุดหลอมเหลว Sn-Pb 456 K) เป็นอุณหภูมิอ้างอิง หากจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนถูกพัฒนาสูงกว่าเดิม อุปกรณ์ใหม่นี้จะต้องถูกซื้อโดยผู้ผลิต นำไปสู่การใช้จ่ายเงินที่สำคัญและเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญของการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน คือการเพิ่มอนุภาคเสริม โดยไม่ควรเพิ่มจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (ถ้าหากเป็นไปได้การเพิ่มอนุภาคจะช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีผสม) แต่อาจจะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุโลหะบัดกรี

2.7.2.2 ภาวะการเปื่อยก

ในการบัดกรีเพื่อสร้างพันธะโลหะที่เหมาะสมระหว่างวัสดุสองชนิด จะเกิดภาวะการเปื่อยกขึ้น ซึ่งหมายความว่า การมีปฏิสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจง จะต้องเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของโลหะบัดกรีและวัสดุฐานที่เป็นของแข็ง โดยความสามารถของโลหะบัดกรีเหลวในการไหลหรือแพร่กระจายระหว่างชั้นตอนการบัดกรี มีความสำคัญต่อการก่อตัวของพันธะโลหะ เพื่อให้เกิดการเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ ดั่งนั้นเพื่อให้ได้รอยบัดกรีที่มีคุณภาพดี การปรับปรุงโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน ควรจะทำให้ได้เหมือนกับโลหะบัดกรีเนื้อเดียว ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการเปื่อยกที่ดีบนพื้นผิว รวมถึงลักษณะการไหลที่เหมาะสมและพันธะที่เชื่อถือได้

2.7.2.3 ผลกระทบของการเสริมสร้างความแข็งแรง

จุดประสงค์ของการใช้เทคโนโลยีการประมวลผลเชิงประกอบเพื่อประยุกต์ใช้โลหะบัดกรีเชิงประกอบ คือการปรับปรุงการคืบและการต้านทานความล้าของโลหะบัดกรี การเสริมสร้างความแข็งแรงที่ดี ต้องเสริมอนุภาคที่เหมาะสมและเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึกของรอยบัดกรี เพื่อรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างจุลภาค ลดจุดแตกหักและเพิ่มการต้านทานความล้า นอกจากนี้อนุภาคเสริมควรจัดให้มีการเชื่อมต่อของขอบเกรนให้เพียงพอ เพื่อป้องกันการเลื่อนของขอบเกรน สำหรับการปรับปรุงการต้านทานการคืบ ควรทำตั้งแต่การกระจายอนุภาคขนาดเล็กให้สม่ำเสมอและกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะสามารถขัดขวางการต้านทานการคืบ โดยจะขัดขวางการเลื่อนของขอบเกรนและการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันตามสมการ Wagner-Lifschitz-Slivoz

$$d^3(t) - d_0^3 = \alpha D \gamma c_0 t \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

โดย	$d(t)$	=	ขนาดของอนุภาคที่เวลา t
	d_0	=	ขนาดเริ่มต้น
	α	=	ค่าคงที่
	D	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
	γ	=	พลังงานพื้นผิวร่วม
	c_0	=	องค์ประกอบการละลายของอนุภาคในเมทริกซ์

สำหรับขนาดใหญ่สุดของอนุภาคการกระจายตัว ควรจะมีการแพร่กระจายต่ำสุด พลังงานพื้นผิวร่วมต่ำและการละลายของอนุภาคในวัสดุเนื้อพื้นต่ำ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน อนุภาคจะต้องมีเสถียรภาพที่ดี มีความคงที่ของขนาดและระยะห่างระหว่างอนุภาค มีการต้านทานการไหลที่สูงกว่าวัสดุเนื้อพื้นและมีการต้านทานการเสียรูปและทนต่อการแตกหัก นั้นหมายถึงอนุภาคขนาดนาโนหรือเส้นใยจะถูกมองว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดของอนุภาคเสริม

2.7.2.4 เสถียรภาพของตัวประสาน

ความบางและความสม่ำเสมอของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMC) ระหว่างโลหะบัดกรีและวัสดุพื้นผิวเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมประสานที่ดี เนื่องจากลักษณะเปราะโดยเนื้อแท้ของสารประกอบเชิงโลหะและแนวโน้มของพวกเขาในการสร้างโครงสร้างข้อบกพร่อง ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่หนาเกินไปบนรอยต่อของโลหะบัดกรีและวัสดุพื้นผิวอาจลดความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรี ลักษณะที่สำคัญของอนุภาคเสริมคือควรจะเข้ากันได้กับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีผสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของชั้นผิวสัมผัสที่อาจทำให้คุณสมบัติของรอยบัดกรีลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการที่จะปรับปรุงความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีภายใต้เงื่อนไขของการต้านทานความล้าอนุภาคเสริมดังกล่าวควรได้รับการออกแบบมาเพื่อชะลอการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและวัสดุพื้นผิว

2.7.2.5 ความเหนียว

เพื่อให้ได้รอยบัดกรีที่มีคุณสมบัติการต้านทานการคืบสูง สิ่งหนึ่งที่ต้องเชื่อคือ เนื้อโลหะบัดกรีมีความสามารถที่จะเป็นไปได้ แต่นี่ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่าจะเป็นเรื่องง่ายที่จะเติมอนุภาคเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรีเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของโลหะบัดกรีผสม นั้นเป็นเพราะ CTE เป็นตัวประสานในตัวเองที่อาจมีการลดความเครียดทางกล ซึ่งเราสามารถพัฒนาให้ CTE ต่ำลงโดยการปรับปริมาณอนุภาคเสริมที่เติมเข้าไป หากการพัฒนานี้โลหะบัดกรีในรอยเชื่อมไม่สามารถที่จะกำจัดความเครียดได้ จะส่งผลให้เกิดความล้มเหลวของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นขั้นตอนการบัดกรี การเพิ่มขึ้นของความเค้น ความเหนียวและการต้านทานการคืบภายใต้น้ำหนักเกินปกติทางกลจะต้องมีการเลือกใช้อย่างเหมาะสม

2.7.3 วิธีการผลิตโลหะบัดกรีที่ผสมสารประกอบนาโน

ในบทความที่ศึกษา วิธีการในการเพิ่มอนุภาคเสริมเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรี มีด้วยกันสองวิธีคือ วิธีการผสมทางกลและวิธี In-situ โดยวิธีการผสมทางกลจะมีการเติมอนุภาคเสริมขนาดนาโนจากภายนอกเข้าไปในโลหะผสม ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการกระจายตัวของของแข็งในการผสมเชิงกล ในทางตรงกันข้ามวิธี In-situ เป็นกลไกการชุบแข็งเพื่อปรับปรุงการคืบและการต้านทานความล้าทางกลในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

2.7.3.1 วิธีการผสมทางกล

วิธีการผสมทางกลที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอนุภาคนาโนต่างชนิดจากภายนอก ที่กระจายตัวเข้าไปในเนื้อโลหะบัดกรีเป็นสารเชิงประกอบ การกระจายตัวเหล่านี้มักจะมีการละลายตัวน้อยมากในที่อุณหภูมิสูง หลากหลายวิธีของการผสมแบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อผสมผสานโลหะบัดกรีเชิงประกอบ

1. การผสมผงโลหะบัดกรีด้วยอนุภาคเสริมนาโน
2. การผสมองค์ประกอบผงโลหะบัดกรีด้วยอนุภาคเสริมนาโน
3. การผสมโลหะบัดกรีแบบครีมด้วยอนุภาคเสริมนาโน
4. การผสมโลหะบัดกรีหลอมละลายด้วยอนุภาคเสริมนาโน

2.7.3.2 วิธี In-situ

วิธี In-situ เป็นเทคนิคของการเสริมอนุภาคนาโนจากภายนอกเข้าไปในโลหะผสม โดยอนุภาคจะเข้าไปฝังตัวในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะผสม ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนของวิธี In-situ ที่ใช้ในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนไม่สามารถนำมาเปิดเผยได้เนื่องจากเป็นความลับทางเทคนิค

วิธีหนึ่งที่จะเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่เสริมด้วยอนุภาค IMCs คือการรีดร้อน เทคโนโลยีของ Lee และคณะ และวิธีของ Shen และคณะ

2.7.4 ความสำเร็จในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

สิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนคือ การปรับปรุงให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต้านทานความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ที่มีสาเหตุมาจากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง และการจัดเรียงตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการระบายความร้อนได้ยากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานสูงขึ้น และเนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีได้ และการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจนำไปสู่การล้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ การทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานความล้าและการคืบมากขึ้นกว่าเดิม

2.7.4.1. ลดความหนาแน่น

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางอย่างที่มีน้ำหนักมาก เป็นปัญหาที่น่ากังวลอย่างหนึ่ง การลดลงของความหนาแน่นของการบัดกรีจะช่วยลดน้ำหนักของรอยบัดกรีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงเป็นการช่วยปรับปรุงขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและเบาขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง

Li และ Gupta ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นโดยการผสมอนุภาค Al_2O_3 โดยการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนและพบว่ามีการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน Al_2O_3 ที่มีน้ำหนักเบาลงในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะผสม Sn ที่น้ำหนักมากกว่า ความหนาแน่นของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนลดลงจาก $7.202 \pm 0.042 - 7.182 \pm 0.075 \text{ gcc}^{-1}$ (1% Al_2O_3), $6.948 \pm 0.074 \text{ gcc}^{-1}$ (3% Al_2O_3) ถึง $6.665 \pm 0.035 \text{ gcc}^{-1}$ (5% Al_2O_3)

2.7.4.2. ปรับปรุงการนำไฟฟ้า

การพัฒนาของรอยบัดกรี ทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic devices) ที่มีการนำไฟฟ้าของโลหะผสม โลหะบัดกรีเป็นเรื่องที่สำคัญ เพราะการต้านทานไฟฟ้าของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนเป็นผลมาบัจจัยต่างๆ ดังนี้ การเพิ่มขึ้นของอนุภาคเสริมแรง ปริมาณของอนุภาคเสริมแรง รูปร่างของอนุภาคเสริมแรง ขนาดของอนุภาคเสริมแรง ชนิดของอนุภาคเสริมและวัสดุเนื้อพื้น

Nai และคณะได้รายงานผลการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนว่าทุกๆ MWCNT เสริมแรง ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงในค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเชื่อได้ว่านี้อาจจะนำมาประกอบกับส่วนปริมาณต่ำของความพรุนที่พบในโลหะบัดกรีเชิงประกอบและจำนวนการเพิ่มของอนุภาคเสริมแรงขนาดเล็ก

ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อนุภาคนาโน Ag ได้รับการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่เท่ากันในทุกทิศทางของสารยึดติดนำไฟฟ้า (ICA) อนุภาคนาโน Ag จึงเป็นที่ต้องการเพื่อที่จะเพิ่มการนำไฟฟ้าของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนเนื่องจากการนำไฟฟ้าสูงของ Ag ($1 \times 10^8 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$)

2.7.4.3. การลดลงของอุณหภูมิการแข็งตัว

อุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะสูงกว่าของโลหะบัดกรีแบบเดิม ซึ่งทำให้เกิดการใช้เงินทุนที่สำคัญในการแก้ไขหรือปรับปรุง และเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ มีความต้องการที่สำคัญคืออนุภาคเสริมแรงไม่ควรที่จะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมโลหะบัดกรีเพิ่มสูงขึ้น เมื่อผสมอนุภาคเสริมแรงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนส่วนประกอบโลหะผสมโลหะบัดกรีจากฟิวชั่น และการแข็งตัวของกระบวนการบัดกรีที่แตกต่างกัน Lin และคณะ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน Cu ในการแข็งตัวของโลหะบัดกรี Sn-Pb ซึ่งจากเส้นโค้งที่แสดงการระบายความร้อนของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชี้ให้เห็นว่า การลดลงของอุณหภูมิการแข็งตัวจะดีขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ เนื่องจากส่วนหนึ่งของอนุภาคนาโน Cu นั้นละลายในโลหะบัดกรีเหลวในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโลหะผสมโลหะบัดกรี แต่อย่างไรก็ตามรายงานการวิจัยที่เกี่ยวกับอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนหรือเส้นใยนาโน (เซรามิก หรือ IMC) กับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะผสมโลหะบัดกรียังไม่ชัดเจนและยังมีผลการวิจัยบางอย่างที่ขัดแย้งกัน

Shen และคณะ ได้ศึกษาถึงอุณหภูมิการละลายและอุณหภูมิการแข็งตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn -3.5Ag-ZrO₂ ด้วยเครื่อง DSC ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งสกปรกซึ่งจะมีผลต่อผลการทดสอบโลหะผสมโลหะบัดกรีโดยใช้การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะบัดกรี Sn-Ag มีผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของ ZrO₂ อนุภาคนาโน ซึ่งจากผลที่ได้นี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการแข็งตัวแบบพื้นฐานคือ ในระหว่างการแข็งตัวของโลหะบัดกรีเชิงประกอบอนุภาคนาโน ZrO₂ จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางนิวเคลียสในการส่งเสริมให้นิวเคลียสของของแข็งในโลหะหลอมเหลวซึ่งจะเป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแข็งตัวของโลหะผสมโลหะบัดกรี

อุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน ซึ่งผลจากการศึกษาข้างต้นของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่น่าเสนอข้างต้นนั้นสามารถนำมาใช้อย่างง่ายดายโดยใช้เงื่อนไขของการบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพราะมีความเหมาะสมและความคงที่ของอุณหภูมิหลอมละลาย นอกจากนี้การลดลงของ

อุณหภูมิการแข็งตัวจะเป็นการช่วยลดเวลาในระหว่างบัดกรีแบบรีโฟลว์ และสนับสนุนการใช้ประโยชน์ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบเหล่านี้ในอุตสาหกรรม

2.7.4.4. การปรับปรุงสภาวะการเปียก

การให้ให้อนุภาคเสริมแรงขนาดนาโนรวมอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี เพื่อแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสภาวะเปียกของโลหะบัดกรีกับพื้นผิว สภาวะเปียกของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-Ag-Cu ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเสริมด้วย MWCNTs นอกจากนี้สภาวะการเปียกของ Sn-Ag-Cu ได้เพิ่มขึ้นจากการเกิดของอนุภาค Cu_6Sn_5 IMC โลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็งเชิงประกอบที่ผสมด้วย Ni และ Ni_3Sn_4 จะแสดงสภาวะการเปียกได้ดีเมื่อเทียบกับการไม่ใช้อนุภาคเสริมในโลหะบัดกรีแบบกึ่งของเหลวของแข็งที่มีขายทั่วไป โลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu ที่เสริมด้วยอนุภาคนาโน Ag 0.5%wt. จะทำให้สภาวะการเปียกดีขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu แต่เมื่อปริมาตรของอนุภาคนาโน Ag ที่เพิ่มเข้ามาเพิ่มขึ้นสภาวะการเปียกของอนุภาคนาโน Ag ที่เสริมในโลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu บนพื้นผิวทองมีค่าลดลง เช่นเดียวกับหารเพิ่มอนุภาคนาโนเสริมแรง TiB_2 ในโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu มีสภาวะการเปียกที่ดีที่สุดเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโน TiB_2 เข้าไป 1.5vol.% และเมื่อมีปริมาณอนุภาคนาโน TiB_2 5 vol.% มุขสัมผัสของโลหะบัดกรีกับพื้นผิวมีค่าเฉลี่ย

เนื่องจากอนุภาคนาโนที่ฝังลงไปวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีจะไปยับยั้งการไหลของสารบัดกรีเหลวโดยการเพิ่มความหนืดซึ่งจะ “pins” ในบริเวณขอบของโลหะบัดกรีเหลวจากการแพร่กระจายต่อไป การเพิ่มของอนุภาคนาโนที่มากเกินไปในโลหะบัดกรีเชิงประกอบจะลดสภาวะการเปียกของโลหะผสมโลหะบัดกรี แต่กลไกที่แท้จริงของการเพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อยของอนุภาคนาโนในการปรับปรุงสภาวะการเปียกของโลหะผสมระหว่างโลหะบัดกรีหลอมเหลวและพื้นผิวยังไม่ชัดเจนเท่าไรนักเนื่องจากยังไม่มีเอกสารตีพิมพ์ที่อธิบายถึงเหตุผลของปรากฏการณ์นี้อย่างละเอียด

2.7.4.5. การต่อต้านการเจริญเติบโตของอนุภาค IMC

อนุภาคนาโนส่งผลต่อการเจริญเติบโตของอนุภาค IMC ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีที่อยู่ระหว่างการประสานกันของโลหะบัดกรีกับพื้นผิวในรอยต่อประสาน ในระหว่างการบัดกรีจะเกิดเฟสของอนุภาค IMC ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเนื่องจากการตกตะกอนระหว่างเฟสของโลหะผสมในระหว่างการแข็งตัวของโลหะบัดกรี ชั้น IMC จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสัมผัสของโลหะผสมระหว่างโลหะบัดกรีและพื้นผิวโลหะ ที่เกิดปฏิกิริยาเฉื่อยของอนุภาคนาโนของโลหะ และอนุภาคนาโนที่พบจะเข้าไปต่อต้านการเจริญเติบโตของอนุภาค IMC's ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีและรอยต่อประสานของโลหะบัดกรี

Amagai ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Co, Ni, Pt, Al, P, Cu, Zn, Ge, Ag, In, Sb และ Au ต่อการเจริญเติบโตของชั้น IMC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag และมีการลดการใช้สารที่มีตะกั่ว โดยการใช้สาร Organic solderability preservative (OSP) ผลการวิจัยพบว่า Co, Ni และ Pt มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของชั้น IMC และปรับปรุงประสิทธิภาพจากการทดสอบการตกกระแทกเมื่อเทียบกับ Cu, Ag, Au, Zn, Al, In, P, Ge และ Sb

Yu และคณะ ได้มีการศึกษาถึงรูปร่างลักษณะของชั้น IMC ขึ้นในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาการเปื่อยระหว่างการหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.5Ag และ Sn-3.5Ag-0.7Cu บนพื้นผิว Cu และ Ni บริสุทธิ์ ซึ่งพบว่าอนุภาคขนาดนาโน Ag_3Sn กำลังก่อตัวขึ้นบนพื้นผิวชั้น IMC ในระหว่างการแข็งตัว ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะลดพลังงานสัมผัสและพลังงานการขัดขวางการเจริญเติบโตมากเกินไปของชั้น IMC

Kao และคณะ ได้เพิ่มอนุภาคขนาดนาโนของ Cu_6Sn_5 IMC ลงในโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu ในการควบคุมการเจริญเติบโตของอนุภาค (Cu, Ni) $6 Sn 5$ IMC ในรอยต่อประสาน SnAgCu / Ni-P

Shen และคณะ ได้ประสบความสำเร็จในเพิ่มอนุภาคนาโน ZrO_2 เข้าไปโลหะบัดกรี Sn-Ag เพื่อที่จะต่อต้านการก่อตัวของกลุ่มอนุภาคของ Ag_3Sn IMC ในระหว่างการแข็งตัวของโลหะบัดกรีผสม

วัสดุที่ใช้งานบนพื้นผิวที่มีประสิทธิภาพ อนุภาคนาโนจะสะสมที่ขอบเกรนในวัสดุเนื้อพื้นหรือโลหะผสมโลหะบัดกรีในชั้น IMC เนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุโลหะในโลหะบัดกรี

ดังนั้นทฤษฎีการดูดซับพลังงานของพื้นผิวสามารถใช้ในการอธิบายกลไกการควบคุมของการต่อต้านของการเจริญเติบโตของอนุภาค IMC ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีระหว่างการบัดกรีแบบ Reflow ของอนุภาคนาโน ตามทฤษฎีของการดูดซับพลังงานของวัสดุพื้นผิวที่ใช้งานพลังงานพื้นผิวไม่เสียผลึกทั้งหมดคือ

$$\sum_k \gamma_{(c)}^k A_k = \sum_k (\gamma_{(o)}^k - RT \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc) A_k$$

$$= \sum_k \gamma_{(o)}^k A_k - RT \sum_k A_k \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc$$

เมื่อ	Γ^k	คือ การดูดซับพลังงานของพื้นผิวของวัสดุที่ใช้งานอยู่ในระนาบผลึก k
	C	คือ ความเข้มข้นของพื้นผิววัสดุที่ใช้งานอยู่
	R	คือ ค่าคงที่ที่เหมาะสมก๊าซ
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
	$\gamma_{(c)}^k$	คือ แรงตึงผิวระนาบผลึก k ด้วยการดูดซับพลังงานของวัสดุที่ใช้งานอยู่
	$\gamma_{(o)}^k$	คือ แรงตึงผิวของระนาบผลึกเริ่มต้น k ไม่มีการดูดซับพลังงาน
	A_k	คือ พื้นที่ระนาบผลึก k

การระบุปริมาณของผลึกเป็นค่าคงที่ที่พลังงานพื้นผิวของระนาบผลึกจะต้องเก็บไว้ให้น้อยที่สุดในสถานะสมดุล นั่นคือ

$$\sum_k \gamma_{(0)}^k A_k - RT \sum_k A_k \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc \rightarrow \min$$

ในที่นี้ $\sum_k \gamma_{(0)}^k A_k$ จะถือว่ามีค่าเป็นค่าคงที่เพราะมันเป็นอิสระจากความเข้มข้นของวัสดุพื้นผิวที่ใช้งาน ดังนั้น $\sum_k A_k \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc$ ควรได้รับการขยายให้ใหญ่สุดเพื่อแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของระนาบผลึกที่มีจำนวนของการดูดซับสูงสุด c และ Γ^k ที่มีการใช้งานมากที่สุด

โดยทั่วไประนาบผลึกที่มีแรงดึงผิวสูงสุด (เทียบเท่ากับพลังงานที่พื้นผิวสูงสุด) จะมีการเติบโตอย่างรวดเร็วในขณะที่จำนวนของพื้นผิวดูดซับวัสดุที่ใช้งานจะมีสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในจำนวนขององค์ประกอบดูดซับเพื่อลดพลังงานพื้นผิวนั้นมีผลต่อการลดความเร็วของการเจริญเติบโตระนาบผลึก เมื่อเทียบกับอนุภาค IMC กับขนาดของอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กมากอนุภาคนาโนจะถือว่าเป็นตัวแทนการที่ใช้งานพื้นผิวที่มีประสิทธิภาพซึ่งอาจจะดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาค IMC เพื่อที่จะระงับการเจริญเติบโตที่มากเกินไป

2.7.4.6. การปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค

อนุภาคนาโนสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้เกิดการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน เพราะมีการเติมอนุภาคเข้าไปลดขนาดของเกรนในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี มีผลให้ความแข็งแรงของโลหะผสมโลหะบัดกรีมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Hall-Petch

Kumar และคณะ ได้ศึกษาขนาดเฉลี่ยของเฟสที่สองของ (Cu_6Sn_5 และ Ag_3Sn) จะมีค่าอยู่ประมาณ 3.75 - 4.25 ml. ในโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu ที่ไม่มีการเพิ่มอนุภาคใดๆ ในขณะที่ขนาดของเกรนของโลหะบัดกรีที่เติมอนุภาค SWCNTs 1 wt% มีขนาดประมาณ 0.5-0.8 ml. Shen และคณะ ได้ศึกษาพบว่าการเพิ่มอนุภาคนาโน ZrO_2 เข้าไปโลหะบัดกรี Sn-Ag สามารถลดขนาดเกรนเฉลี่ยและระยะห่างของอนุภาค Ag_3Sn ได้

อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีที่ใช้ตะกั่วจะแตกต่างจากโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว และการเพิ่มของอนุภาคเสริมแรงในโลหะบัดกรีที่ใช้ตะกั่วมีผลในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่อุณหภูมิต่ำของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb ประกอบด้วยหลักของการจัดเรียงกันเป็นชั้นๆที่สลับกันของสองส่วนประกอบ การเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน TiO_2 จำนวนเล็กน้อย จะทำให้พบว่าที่จุดยูเทคติกของโลหะบัดกรี Sn-Pb เกิดการจับรวมเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน แต่ในหลักของการกระจายตัวในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเกิดขึ้นอย่างไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบนาโน Sn-Ag-Cu, สองประเภทของ IMC's equiaxed (Ag_3Sn และ Cu_6Sn_5) จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใน

วัสดุเนื้อพื้น β -Sn ในขณะที่มีการกระจายของอนุภาคนาโน SWCNTs ที่มีมุมของเกรนชนิดอีควิแอกซ์ (Equiaxed grains) ของ Ag_3Sn

2.7.4.7. การเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติทางกล

จากการศึกษาพบว่าความต้านทานการคืบเป็นหนึ่งในส่วนที่สำคัญที่สุดของการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน อย่างไรก็ตามการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนได้แสดงคุณสมบัติที่พึงประสงค์อื่นๆ ที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต้องการ เช่น การที่มีความแข็งแรงสูง ความต้านทานแรงดึงและแรงเฉือนสูง อนุภาคเซรามิก, IMC และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) ได้รับการศึกษาว่าช่วยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี โดยการใช้กระบวนการผสม

โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่เติม MWCNTs และ SWCNTs แสดงให้เห็นถึงการมีเสถียรภาพเชิงมิติที่มากขึ้นกว่าโลหะบัดกรีทั่วไปเพราะมีค่า CTE ลดลง ซึ่งผลจากการศึกษาลักษณะทางวิศวกรรมพบว่าเกิดการแตกออกเป็นเศษชิ้นส่วนขนาดใหญ่ของ MWCNTs และ SWCNTs ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีนำไปสู่ปรับปรุงของ ความแข็งแรงความล้า (Fatigue strength) ความแข็งจุลภาค (Microhardness) ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น แต่ทำให้มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Elastic modulus) มีค่าลดลง การเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนของออกไซด์ชนิดต่างๆ เช่น ZrO_2 , SiC , Al_2O_3 , TiO_2 สามารถเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน แรงเฉือนของรอยต่อในโลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโน Ag จะสูงกว่าที่รอยต่อที่มีปริมาณการใช้อนุภาคนาโน Ag มากกว่า 1% อายุการใช้งานของรอยต่อของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-0.7Cu ในเรื่องการแตกร้าวและการต้านทานการคืบก็เพิ่มขึ้นด้วย ข้อมูลสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน ที่รวบรวมจากบางส่วนของหนังสือมีการระบุไว้ในตารางที่ 1 ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีจะช่วยในการปรับปรุงพฤติกรรมการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน แต่ก็ยังมีผลกระทบที่เป็นต่อความต้านทานการไหลตื้อของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี

จากทฤษฎีพื้นฐานของการเพิ่มการกระจายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่จะกำหนดสถานะและการกระจายตัวของอนุภาคที่มีความระเอียดอย่างมาก ภายในวัสดุเนื้อพื้นและบริเวณขอบเกรนของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี ซึ่งจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนลักษณะการเสีรูปร่างของโลหะผสมโลหะบัดกรีโดยการเข้าปัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน ตามสมการ Wagner-Lifschitz-Slivoz ในทางทฤษฎีการเพิ่มอนุภาคนาโนจะทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น จากการศึกษาในช่วงต้นอนุภาค micro-sized metal, ceramic และ IMC ได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ โดยเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมโลหะบัดกรี Shi และคณะได้ศึกษาถึงผลกระทบของระดับขนาดอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ โดยศึกษาคุณสมบัติการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ Sn-Cu และ Sn-Pb ที่ให้อนุภาคขนาดไมโครเมตรและอนุภาคขนาดนาโนเมตรของ Cu และ Ag ซึ่งพบว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่เติมอนุภาคขนาดไมโครเมตรจะแสดงการต่อต้านการเกิดการคืบที่ดีกว่าโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่เติมด้วยอนุภาคขนาดนาโนเมตร แม้ว่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของข้อต่อที่เติมด้วยอนุภาคขนาดนาโนเมตรอาจจะสูงกว่าที่ของข้อต่อที่เติมอนุภาคขนาด

ไมโครเมตร ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการปรับปรุงให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าได้โดยการทำให้มีขนาดเกรนที่เล็กลง แต่วิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการที่ดีสำหรับการต่อต้านการเกิดการคืบ เนื่องจากการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง จะทำให้เกิดการคืบโดยกระบวนการเลื่อนของขอบเกรน (Grain boundary sliding) เพื่อให้เกิดความต้านทานการคืบที่ดีที่สุดโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยขนาดของอนุภาคเสริมแรงที่ดีที่สุด จึงมีการวิจัยเพิ่มขึ้นพบว่าขนาดของอนุภาคนาโน จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.7.5 ปัญหาในการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

2.7.5.1 การกระจายของอนุภาคเสริมแรงในเมตริกซ์โลหะบัดกรี

อนุภาคนาโนที่กระจายไปยังขอบเกรนของโลหะบัดกรีเชิงประกอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติทางกลของ ข้อต่อของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน แต่อนุภาคนาโนอาจจะรวมตัวกันในรูปแบบของ Brittle agglomerations ใน เมตริกซ์โลหะบัดกรีเนื่องจากพลังงานพื้นผิวสูงจะลดความแข็งแรงของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ ดังนั้นอนุภาคนาโน จะต้องมีการกระจายอยู่ในเมตริกซ์โลหะบัดกรีที่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างกระบวนการผสม ซึ่งเป็นเรื่องยากในการปฏิบัติ ที่จะทำให้เกิดขึ้นจริงของการเตรียมความพร้อมของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ โดยกลไกการผสมอนุภาคนาโนกับการโลหะ บัดกรีผงหรือโลหะบัดกรีแบบครีมแม้เมื่อผสมโดยที่มีการเพิ่มเวลาให้นานขึ้น การรวมตัวกันแบบ Agglomerates จะ ยังคงอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ เพื่อแก้ปัญหานี้ Mavoori และ Jin ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ในการ เตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยใช้เครื่องจักรผสมพร้อมกับกระบวนการการกดซ้ำ ด้วยวิธีนี้โครงสร้างของโลหะ บัดกรีเชิงประกอบนาโนจะมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในกระบวนการนี้ทำให้เกิดการแตกตัวของ อินเตอร์เฟซระหว่างอนุภาคเสริมแรงและวัสดุเนื้อพื้นที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะซึ่งเป็นเสียของวิธีการนี้ นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการสูง เมื่อเทียบกับวิธีการผสมอนุภาคนาโนกับโลหะบัดกรี ผงและโลหะบัดกรีแบบครีม (วิธีการของการผสมของแข็งกับของแข็ง) และวิธีการการผสมอนุภาคนาโนกับโลหะบัดกรี หลอมเหลวอาจทำให้เกิดการกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี (วิธีการของการ ผสมของเหลวที่มีของแข็ง)

2.7.5.2 พันธะระหว่างวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีและอนุภาคเสริมแรง

อนุภาคเสริมแรงจะต้องตอบสนองต่อเงื่อนไขบางอย่าง เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ นาโนปัญหาหนึ่งที่ของอนุภาคเสริมแรงสำคัญคือการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคเสริมแรงกับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี จะเกิดรูพรุนของก๊าซขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาคเสริมแรงในระหว่างบัดกรีได้ง่าย นอกจากนี้มักจะเกิดรอยแตกของผิวสัมผัส ระหว่างอนุภาคเสริมแรงกับเมตริกซ์โลหะบัดกรีจากกระบวนการรีดหรือกด เพราะความแข็งแรงของผิวสัมผัสระหว่าง อนุภาคเสริมแรงและเมตริกซ์โลหะบัดกรีสามารถปรับเปลี่ยนไปตามพฤติกรรมทางกลของโลหะผสมโลหะบัดกรีเชิง ประกอบ ชนิดและขนาดของอนุภาคเสริมแรง และการกระจายตัวของอนุภาคจะต้องมีการพิจารณาอย่างเต็มที่ก่อนที่จะ

ทำให้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน การสร้างพันธะที่ติระหว่างอนุภาคเสริมกับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี การผสมด้วยวิธีการในแหล่งกำเนิดเป็นจริงทางเลือกที่ดีเนื่องจากอนุภาคในสารบัดกรีเสริมเหล่านี้จะเกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคในขั้นตอน IMC ระหว่างกระบวนการของโลหะผสมที่ ดังนั้นพันธะระหว่างอนุภาค IMC ตกตะกอนและวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีที่มีความแข็งแรงพอที่จะเสริมสร้างพฤติกรรมทางกลของโลหะบัดกรีประกอบเหล่านี้

2.7.6 โครงสร้างใหม่ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน

การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยนำเสนอของ Lee และ Subramanian ได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนใหม่โดยการเพิ่มอนุภาคนาโน Polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) เข้าไปในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเพื่อให้ได้โครงสร้างของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยการใช้รูปร่างของอนุภาคแบบใหม่ จะได้รับโครงสร้างของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนโดยที่อนุภาคเสริมในเมตริกซ์โลหะบัดกรีควรจะเป็นพื้นผิวที่ใช้งานกับภายในพันธะเริ่มต้นของอนุภาคเสริมกับเมตริกซ์โลหะบัดกรีระหว่างการบัดกรีแบบรีโฟร์ แล้วป้องกันไม่ให้อนุภาคนาโนเกิดปฏิกิริยากับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเพิ่มเติมใดๆ ซึ่งในระหว่างการบัดกรีแบบรีโฟร์ พันธะระหว่างอนุภาคเสริมและวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีควรเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการรวมตัวกันของอนุภาคเสริม

2.7.7 สรุป

โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิสูงและเงื่อนไขในการใช้งานที่ก่อให้เกิดการคืบหรือความล้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลง การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และความต้องการของความน่าเชื่อถือของบรรจุภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัตถุประสงค์ของการทำแม่พิมพ์คอมโพสิตคือเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการคืบและความล้าจากความร้อนเชิงกล ด้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรนของโลหะบัดกรี โดยกระจายอนุภาคที่ค่อนข้างแข็งแรงเข้าไปในขอบเกรนและรอยต่อของเกรนของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะผสมโลหะบัดกรี เพื่อที่จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรนในช่วงที่อุณหภูมิสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพอนุภาคที่เติมเข้าไปจะต้องมีละเอียดเพียงพอที่จะเกิดความเสถียรเกี่ยวกับขนาดและระยะห่างระหว่างอนุภาค มีความต้านทานการไหลสูงกว่าวัสดุเนื้อพื้นของโลหะผสมและเป็น Undeformable และต้องทนต่อการแตกหักในการวิจัยโลหะที่มีอนุภาคนาโนของ ceramic และ IMC ได้รับเลือกให้เป็นอนุภาคเสริมแรงเพื่อเปลี่ยนให้เป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ อนุภาคเสริมควรจะมีสมบัติทางกลและความสามารถในการใช้งานของอุณหภูมิที่สูง ในขณะที่ต้องไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติอื่นๆ เช่น จุดหลอมเหลว, Wettability / Solderability และการเจริญเติบโตของชั้น IMC ในโลหะบัดกรีเชิงประกอบอนุภาคที่ผสมอยู่ในการเสริมแรงของวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีควรจะเข้ากันได้กับวัสดุ

โลหะบัดกรี มีพันธะที่ติดกับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี และกระจายอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเป็นเนื้อเดียวกัน ใน การผสมอนุภาคการเสริมแรงเข้าไปในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีมีอยู่ 2 วิธีที่แนะนำ คือ วิธีการผสมเชิงกล และวิธีการ ผสมในแหล่งกำเนิด

อนุภาคนาโนของโลหะและ IMC ทำปฏิกิริยากับวัสดุโลหะบัดกรีระหว่างกระบวนการบัดกรีแบบรีโฟลว์ เพื่อจะ สร้างพันธะที่ติดระหว่างอนุภาคเสริมแรงกับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรี อย่างไรก็ตามความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุเสริมแรง กับวัสดุเนื้อพื้นของโลหะผสมโลหะบัดกรียังคงเป็นปัญหา โดยอย่างน้อยอนุภาคเสริมแรงที่เลือกควรมีสภาวะการเปียก (Wettability) ที่ดี และเรื่องยากที่จะทำให้เกิดกระจายตัวของอนุภาคนาโนในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีให้เป็น เนื้อเดียวกัน เพื่อเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบโดยวิธีการผสมเชิงกลแบบดั้งเดิม ดังนั้นวิธีการการกลึงและการกดได้ถูก นำมาใช้เพื่อที่จะช่วยให้ได้รับโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคเสริมแรง แต่ Entrapment ของก๊าซโดย Stirring and interfacial cracking ที่เกิดจากการกดและการกลึงซึ่งเป็นข้อบกพร่องใน วิธีการเหล่านี้ วิธีการเตรียมโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยกระบวนการในแหล่งกำเนิดเป็นวิธีการทำงานที่จะได้รับ โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคเสริมแรงเพราะอนุภาคเสริมแรงที่นำมาใช้ในวัสดุ เนื้อพื้นของโลหะบัดกรีโดยการการตกตะกอนของอนุภาคในขั้นตอน IMC ระหว่างกระบวนการโลหะการของโลหะผสม

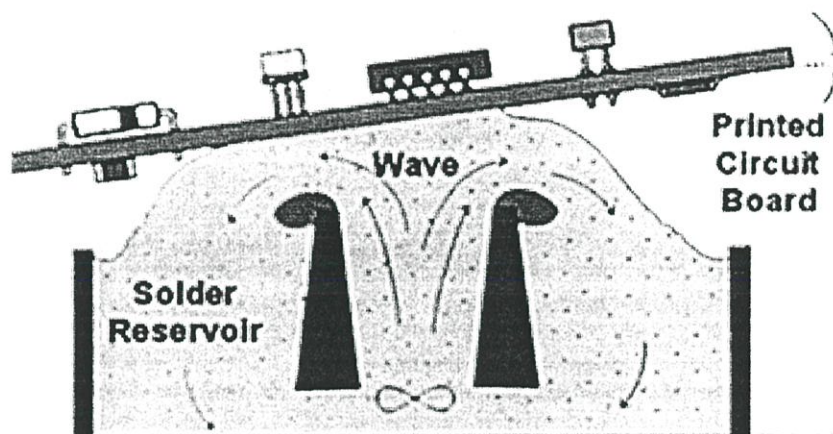
โครงสร้างใหม่ของโลหะบัดกรีเชิงประกอบได้รับการเสนอในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ของอนุภาค ความมีเสถียรภาพของอนุภาคเสริม และมีความน่าเชื่อถือของพันธะระหว่างอนุภาคเสริมแรงและวัสดุเนื้อ พื้นของในการโลหะบัดกรีของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ ในโลหะบัดกรีเชิงประกอบนี้ได้ถูกแนะนำให้การออกแบบโมเลกุล ขนาดนาโน POSS ในวัสดุเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีเป็นอนุภาคเสริมแรง ในโมเลกุล POSS กลุ่ม-OH ของ POSS พันธะ วัสดุเนื้อพื้นของโลหะโดยการก่อตัวของพันธะ Si-O-Sn ภายในและในบริเวณขอบเกรนของโลหะผสมโลหะบัดกรี การ รวมกันของพันธะ Si-O-M และการปรากฏตัวของกลุ่ม Seven inert R ในโครงสร้าง POSS ป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัว กันของอนุภาคเสริมแรงเหล่านี้ในระหว่างกระบวนการ นอกจากนี้พันธะ Si-O และ Si-O-M เป็นพันธะที่เกิดขึ้นได้เอง ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพราะฉะนั้นจึงไม่ได้แยกตัวออกภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน วิธีนี้เป็นวิธีการใหม่ในการคิดค้นเพื่อ แก้ไขโครงสร้างของโลหะบัดกรีเชิงประกอบซึ่งจะช่วยให้มีวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีคุณภาพสูงซึ่ง อาจจะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้ แต่การใช้วิธีการที่ซับซ้อนไม่ได้เป็นวิธีที่ดีที่สุดเนื่องจากค่าใช้จ่ายการผลิต ในขณะที่ การออกแบบที่ดีจะช่วยทำให้อนุภาคเสริมแรงกระจายตัวที่และทำให้ได้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ดี ที่มีคุณภาพ และไม่มี ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

2.8 วิธีการบัดกรี (Soldering methods)

สำหรับกระบวนการบัดกรีที่นอกเหนือจากการบัดกรีด้วยมือ (Hand soldering) แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีวิธีการบัดกรีดังต่อไปนี้

2.8.1 การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering)

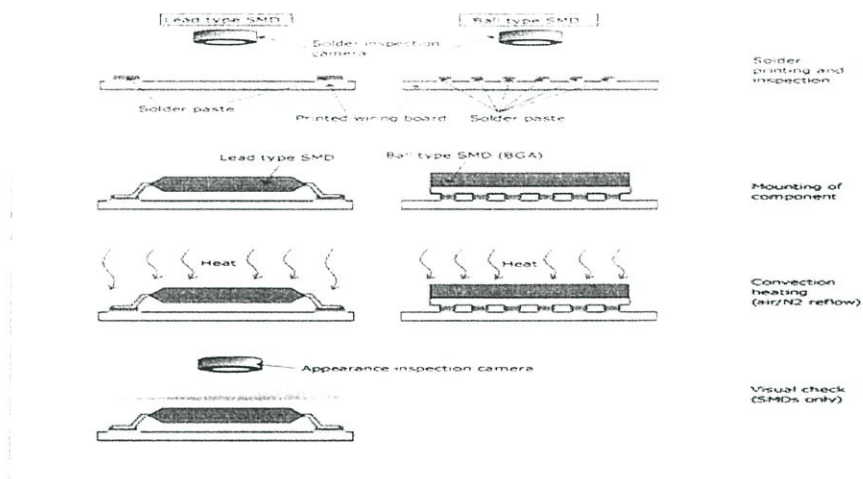
เป็นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่นพีซีบี (Printed circuit board) โดยที่แผงวงจรพิมพ์ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดอยู่เคลื่อนที่ผ่านไปบนอ่างของโลหะบัดกรีเหลว และของเหลวดังกล่าวจะถูกป้อนขึ้นมาและพันไปยังด้านล่างของแผงวงจรพิมพ์เพื่อที่โลหะบัดกรีจะได้เชื่อมติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การบัดกรีแบบคลื่น (Wave soldering)

2.8.2 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering)

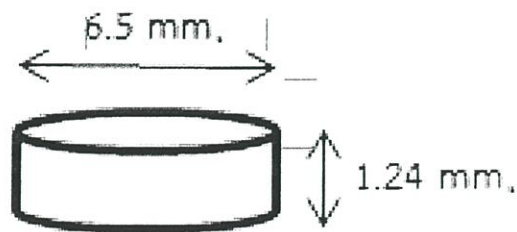
โดยทั่วไปจะใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Surface mount components กับ Printed circuit board ในกระบวนการนี้จะใช้โลหะบัดกรีที่อยู่ในรูปของครีม (Solder paste) โดยโลหะบัดกรีจะผสมอยู่กับฟลักซ์และตัวยึด (Binder) ซึ่งจะถูกสกรีนลงบนตำแหน่งที่ต้องการบน Printed circuit board แล้ววางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นโลหะบัดกรี หลังจากนั้น Printed circuit board จะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งโลหะบัดกรีเกิดการหลอมละลายแล้วเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering)

2.9 มาตรฐานชิ้นทดสอบโลหะบัดกรีแบบครีม

ในการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-0.3Ag-0.5Cu จะมีการทำชิ้นทดสอบขึ้น เพื่อให้ความร้อน และวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ JIS Z3198-3:2003 Test methods for lead-free solders-Part 3 : Methods for spread test โดยได้กำหนดรูปร่างของโลหะบัดกรีตัวอย่างไว้ดังนี้ ชิ้นทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm ความสูง 1.24 mm (ปริมาตร 0.041 cm³) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7



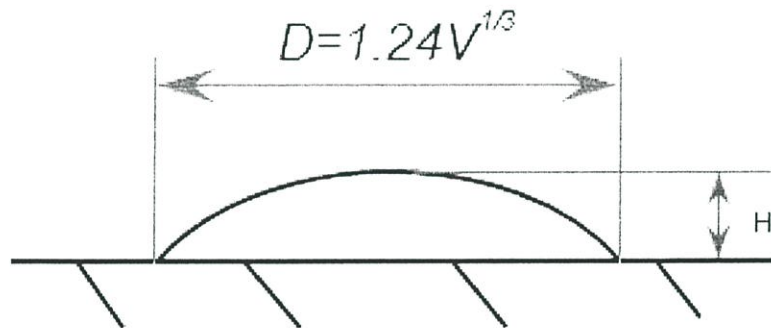
รูปที่ 2.7 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3

2.10 การคำนวณอัตราการกระจายตัว (Spread factor)

การคำนวณอัตราการกระจายตัวของโลหะบัดกรีด้วยการวัดชั้นสูง โดยการวัดด้วยไมโครมิเตอร์หรือกลไกอื่นๆ ที่เหมาะสม การคำนวณอัตราการกระจายตัวตามสูตรการคำนวณ และค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง ดังสมการต่อไปนี้

$$S_f = \frac{D-H}{D} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

- โดยกำหนดให้
- S_f คือ ค่าอัตราการกระจายตัว (Spread factor) (%)
 - H คือ ความสูงของการแพร่กระจาย (mm)
 - D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อการบัดกรีที่ใช้ทดสอบถือว่าเป็นทรงกลม (mm)
 - $D = 1.24V^{1/3}$
 - V คือ ปริมาตรของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.8 ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี

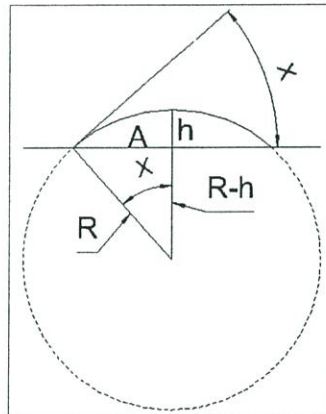
นอกจากนี้การกระจายตัวของโลหะบัดกรียังสามารถคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r) ได้ตามสูตรการคำนวณดังนี้

$$S_r = \frac{\text{Plan area of spread on the substrate surface}}{\text{Plan area of the original spherical pellet}} \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

นอกจากอัตราการกระจายตัวและอัตราส่วนของการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแล้ว ยังสามารถคำนวณหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ได้จากสูตรการคำนวณต่อไปนี้

$$\sin x = \frac{2}{(A/h + h/A)} \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

เมื่อกำหนดให้	x	คือ มุมสัมผัส (θ)
	A	คือ รัศมีของโลหะบัดกรี (mm)
	H	คือ ความสูงของโลหะบัดกรี (mm)



รูปที่ 2.9 มุมสัมผัสบนแผ่นทองแดง

2.11 Wettability

ภาวะการเปียกคือความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งซึ่งเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับขั้นของภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่างแอดฮีชัน (Adhesion) และโคฮีชัน (Cohesion) การที่ของเหลวจะเปียกบนของแข็งได้ดีหรือไม่นั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงสองแรงหลักๆ คือ

1. แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกันในที่นี้คือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเองเป็นหยด
2. แรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกันซึ่งในที่นี้จะหมายถึงแรงระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็งซึ่งเป็นแรงที่ตรงข้ามกับแรงเชื่อมแน่นคือแรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกันและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง

ภาวะการเปียกมีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุสองชิ้นแรงยกตัว (หรือ Capillary effect) ก็เป็นผลมาจากภาวะการเปียกและแรงพื้นผิวที่กำหนดภาวะการเปียก รูปร่างของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งจะมีรูปร่างเป็นรูปทรงหยดน้ำค้าง

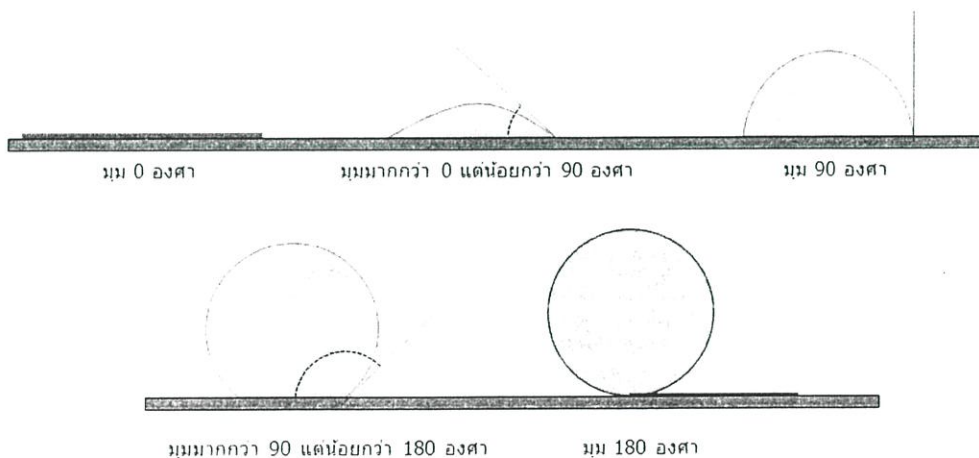
ในการพิจารณาการเปียกของของเหลวบนผิวของของแข็งสภาพสมดุลของแรงสองแรงจะนำไปสู่ปริมาณที่สำคัญอีกปริมาณหนึ่งที่นิยมใช้วัดความเปียกเรียกว่า มุมสัมผัส (Contact angle/Wetting angle) คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณจุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกันและนักวิทยาศาสตร์ใช้มุมนี้เป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดี เกณฑ์มีดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศาคือการเปียกอย่างสมบูรณ์ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิวของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด

2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศาคือ เกิดการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดมนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง

3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศาเรียกว่าผิวเปียกยาก คือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดที่ของเหลวยังคงแตะกับผิวของแข็ง

4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศาเรียกว่า ผิวไม่เปียกเกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลมบริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลมซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ



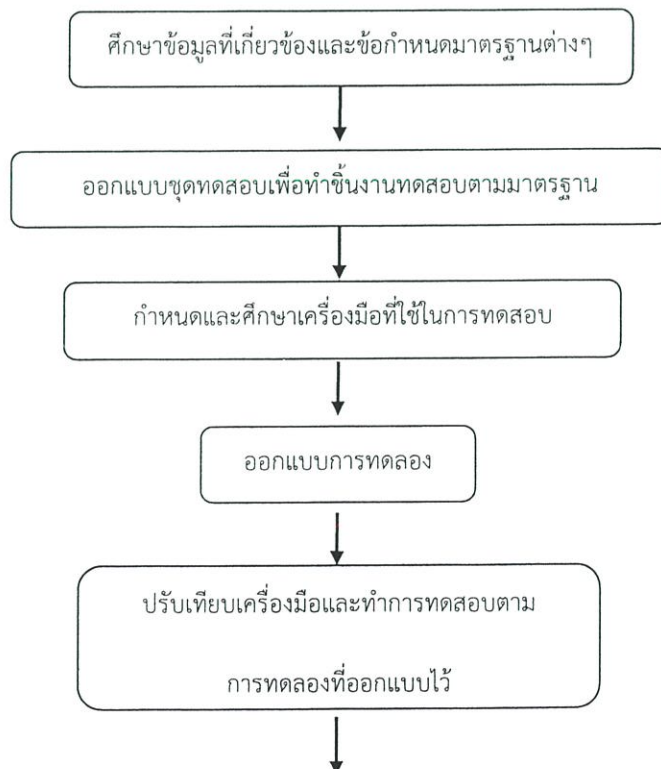
รูปที่ 2.10 การเปียกและมุมสัมผัสค่าต่างๆ

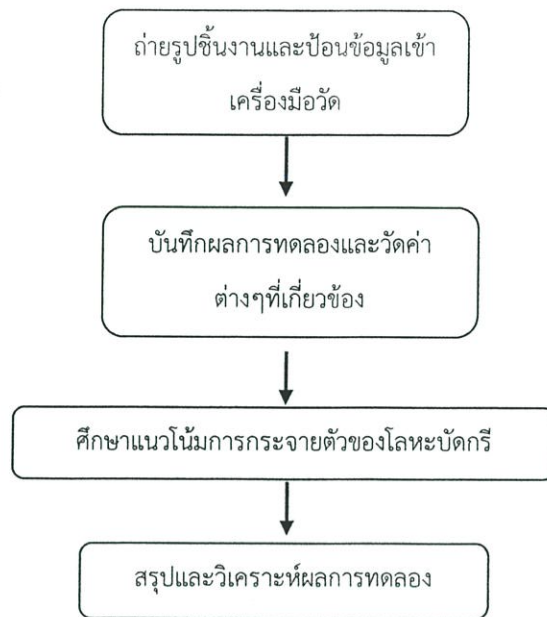
บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC 305) มีตัวแปรที่สำคัญในการวิจัยครั้งนี้คือเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เติมเข้าไปในโลหะบัดกรีแบบครีมพื้นฐานชนิด SAC 305 โดยมีการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เข้าไปในอัตราส่วน 0wt%, 0.1wt%, 0.2wt%, 0.3wt%, 0.4wt%, 0.5wt%, 0.6wt%, 1.0wt%, 1.5wt% และ 2.0wt% ตามลำดับ หลังจากเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เข้าไปในอัตราส่วนที่กำหนดไว้แล้ว ก็จะทำการศึกษาอัตราการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงบริสุทธิ์

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน





3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุฐานที่ใช้ทดสอบ

1. เตรียมแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ 97% ขนาด 30 mm X 30 mm X 0.35 mm โดยใช้เครื่องตัดแผ่นโลหะ

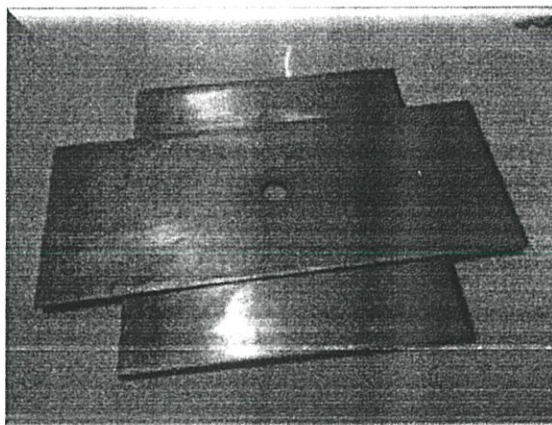


รูปที่ 3.1 แผ่นทองแดง

2. เตรียมสารละลาย HNO_3 70 vol% (ความเข้มข้น 10%) เพื่อล้างทำความสะอาดฟิล์มออกไซด์และสิ่งแปลกปลอมที่เกาะบนแผ่นทองแดง โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 2.1 นำ HNO_3 70 vol% มา 15 ml
 - 2.2 เติมน้ำกลั่น 85 ml เพื่อให้ได้ปริมาตรรวม 100 ml
3. แช่แผ่นทองแดงไว้ในสารละลายที่เตรียมไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นทำการขัดออกไซด์และสิ่งแปลกปลอมที่เกาะบนแผ่นทองแดงออกด้วยผ้าสะอาด
4. นำแผ่นทองแดงที่ผ่านการล้างด้วยสารละลาย HNO_3 70 vol% (ความเข้มข้น 10%) มาล้างทำความสะอาดอีกครั้งด้วยเอทานอลจากนั้นเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด และนำไปเก็บไว้ในกล่องสุญญากาศ

3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

1. เตรียมบล็อกปาดโลหะบัดกรี โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 50 mm X 50 mm X 1.24 mm สำหรับทำชิ้นทดสอบทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm (ปริมาตร 0.041 cm^3) ตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003



รูปที่ 3.2 บล็อกปาดโลหะบัดกรีแบบครีม

2. ผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เข้ากับโลหะบัดกรีแบบครีม SAC 305 ลงในบีกเกอร์ ในอัตราส่วน 0wt%, 0.1wt%, 0.2wt%, 0.3wt%, 0.4wt%, 0.5wt%, 0.6wt%, 1.0wt%, 1.5wt% และ 2.0wt% ตามลำดับ โดยใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA

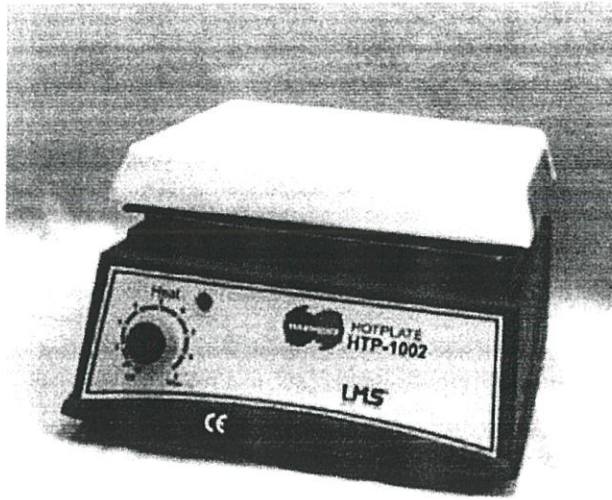


รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA

3. ใช้แท่งแก้วคอนนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้กระจายตัวเข้ากับโลหะบัดกรีแบบครีม SAC 305 อย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที
4. นำโลหะบัดกรีแบบครีมที่ผสมแล้ว มาอัดลงในบล็อกที่เตรียมไว้ เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3198-3 : 2003

3.4 การให้ความร้อน

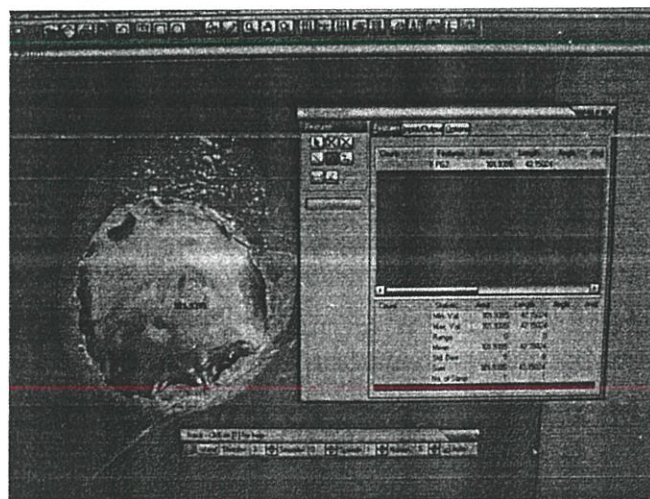
นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ มาให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ยี่ห้อ LMS รุ่น HTP-1002 ที่อุณหภูมิเหนือจุดเริ่มหลอมเหลว (Solidus) 40°C ($217 + 40^{\circ}\text{C}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 260°C ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 3^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 วินาที โดยเริ่มจับเวลาเมื่อโลหะบัดกรีหลอมเหลว จากนั้นปล่อยให้ชิ้นทดสอบเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปล้างฟลักซ์ด้วยเอทานอล และทำการทดสอบซ้ำ 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ



รูปที่ 3.4 เครื่อง Hot plate

3.5 การวัดและวิเคราะห์ผล

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแล้วไปวัดค่าความสูงของโลหะบัดกรี ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรี และเส้นรอบวง โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Express ในการวัดเพื่อใช้ในการคำนวณ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการวัดค่าในโปรแกรม Image-Pro Express

- สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง, เส้นรอบวง, Spread ratio, Spread factor, Contact angle และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซึ่งค่ออกไซด์ เพื่อศึกษาแนวโน้มของการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโน

บทที่ 4

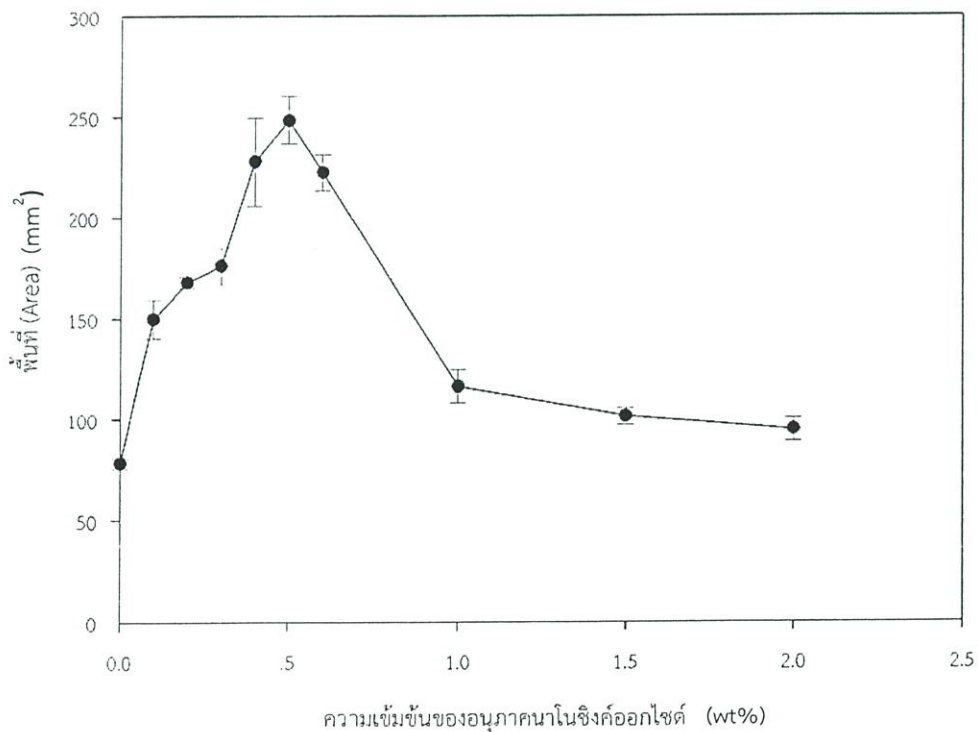
ผลการทดลอง

4.1 ความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

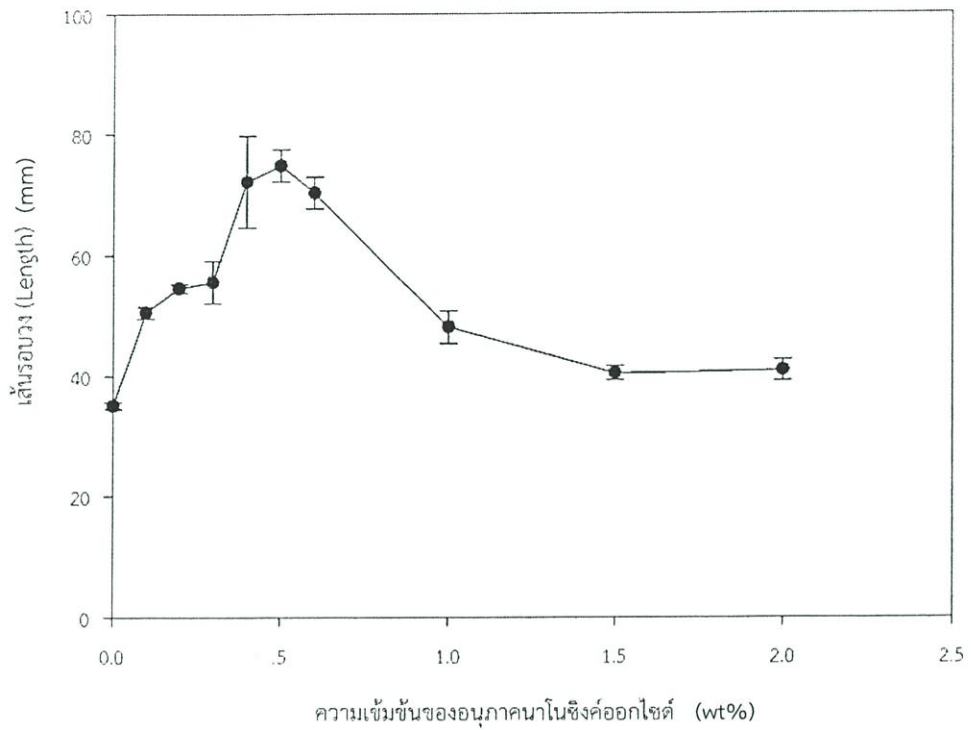
จากการนำชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีไปวัดพื้นที่ เส้นรอบวง ในโปรแกรม Image-Pro Express จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณโดยใช้สูตรของ Spread factor, Spread ratio และ Contact angle ได้ผลดังตารางที่ 4.1 จากนั้นนำค่าในตารางไปเขียนกราฟเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ และได้ผลดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราส่วนอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยการกระจายตัวจะมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงอัตราส่วน 0.5 wt% จะมีการกระจายตัวมากที่สุด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เข้าไปอีก โลหะบัดกรีจะมีการกระจายตัวที่ลดลง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไป มีผลต่อแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยจะทำให้แรงตึงผิวของโลหะบัดกรีลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งอัตราส่วน 0.5%wt ที่มีแรงตึงผิวน้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโนเข้าไปอีก จะทำให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีผลมากกว่าแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีมีการกระจายตัวน้อยลงดังนั้นสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีแบบครีมได้เมื่อเติมอนุภาคในอัตราส่วนที่เหมาะสม นั้นหมายถึง อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงได้

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณ

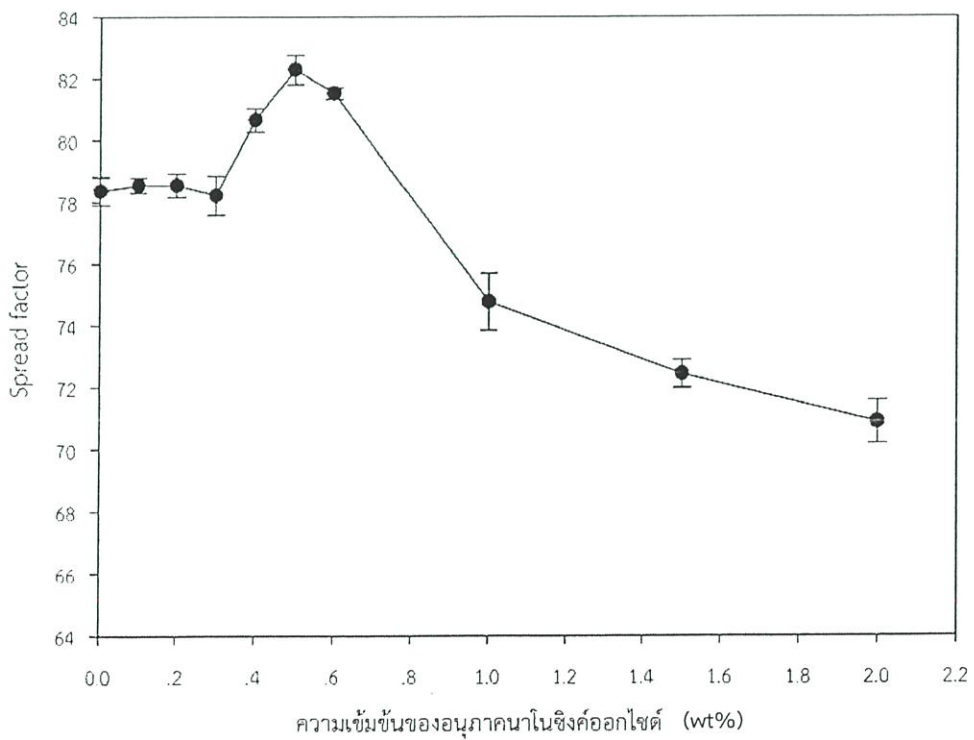
อัตราส่วนอนุภาคนาโน ZnO (%wt)	พื้นที่ (mm ²)	เส้นรอบวง (mm)	Spread factor (S _f)	Spread ratio (S _r)	Contact angle (องศา)
0	78.21	35.09	78.3645	2.35832	29.97
0.1	149.73	50.51	78.5514	4.51518	20.08
0.2	167.79	54.49	78.5514	5.05976	18.56
0.3	175.82	55.53	78.2243	5.30189	18.40
0.4	227.54	72.12	80.6542	6.86148	12.53
0.5	248.26	74.83	82.2897	7.48610	11.04
0.6	222.05	70.32	81.5238	6.69593	12.23
1.0	115.95	48.05	74.7664	3.49629	25.07
1.5	101.22	40.41	72.4299	3.05218	33.39
2.0	94.59	40.89	70.8879	2.85225	35.19



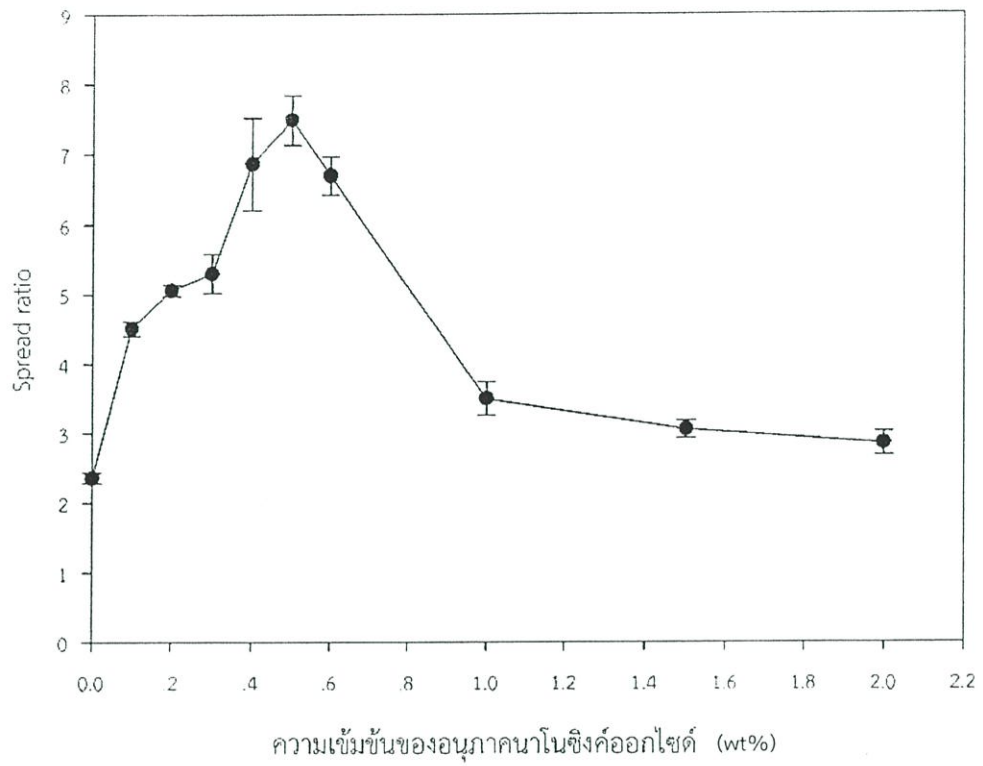
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับพื้นที่ของโลหะบัดกรี



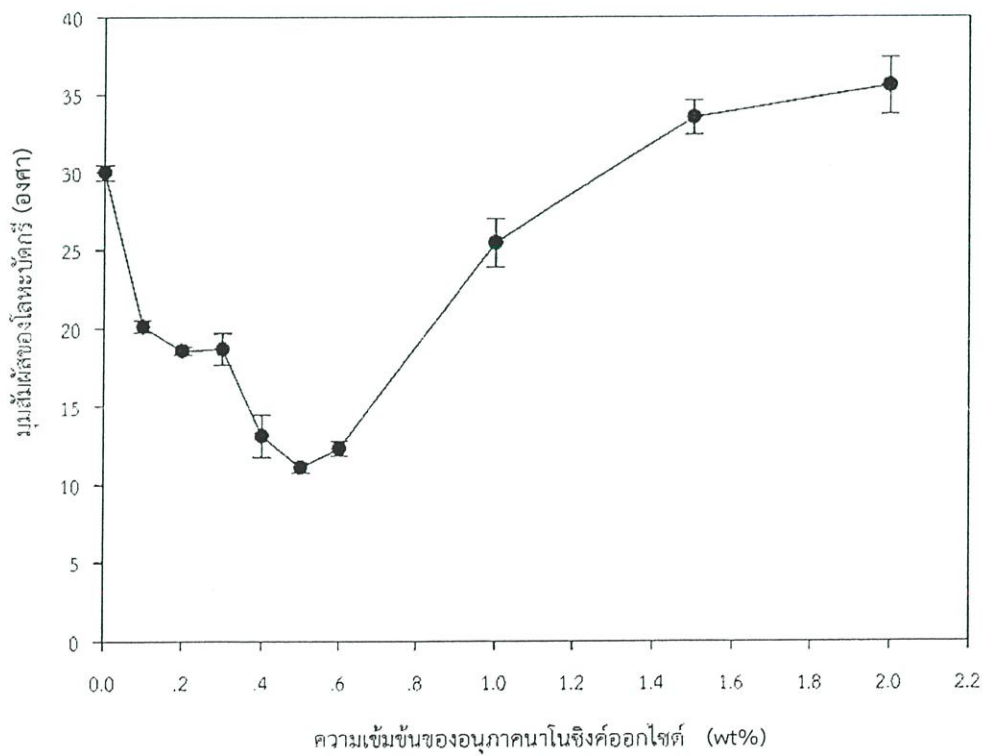
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับเส้นรอบวงของโลหะบัดกรี



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอัตราการกระจายตัว



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอัตราส่วนการกระจายตัว



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับมมส์มีล์ของโลหะบัดกรี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม Sn-3.0Ag-0.5Cu สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในโลหะบัดกรี มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะบัดกรีแบบครีม โดยการกระจายตัวจะมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงอัตราส่วน 0.5wt% จะมีการกระจายตัวมากที่สุด
2. เมื่อเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในอัตราส่วนที่มากเกินไป จะทำให้ค่าความหนืดของโลหะบัดกรีมีผลมากกว่าการลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีมีลักษณะที่มีการกระจายตัวน้อยลง ดังนั้นสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีแบบครีมได้เมื่อเติมอนุภาคในอัตราส่วนที่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบด้านอื่นๆของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีต่อโลหะบัดกรีแบบครีม เช่นคุณสมบัติการคืบ การต้านทานความล้า และการใช้งานในที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น รวมไปถึงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการพัฒนาประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีแบบครีมเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างคุณสมบัติที่แตกต่างกันและราคาต้นทุนที่เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] กำธร สุขพิมาย, กัลยา ผาโผน และกรรณชัย กัลยาศิริ. “การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง.” การประชุมวิชาการขายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556
- [2] สารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS, 4 มีนาคม 2549, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. กรกฎาคม 2556.
< http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=98>
- [3] ผศ. ดร. ชวิชัย ปลูกผล. สิงหาคม 2553. การศึกษาสมบัติเชิงสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ชนิด Sn-9Zn-xCu: 2-5.
- [4] Conrad H., Guo Z., Fahmy Y., 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*, 1999, 28, pp:1062-1070.
- [5] Eustathopoulos, N.; Nicholas, M.G. and Drevet B. (1999). *Wettability at high temperatures*. Oxford, UK: Pergamon. ISBN 0080421466.
- [6] Identification Standards for hazardous wastes – Identification for extraction toxicity. ICS GB 5085.3-2007 Solid Waste – Determination of Elements – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS); 2007: 4
- [7] J. Shen, Y.C. Chan, Research advances in nano-composite solders, *Microelectronics Reliability* 49 (2009): 223–234
- [8] Standardization Promotion Department Japanese Standards Association. JIS Z 3198-3:2003(IWES) Test methods for Part 3; 2003: 3-4.
- [9] <http://vcharkarn.com/varticle/43544> (7 July 2013)

[10] <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html> (15 AUG 2013)

[11] <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3> (15 AUG 2013)

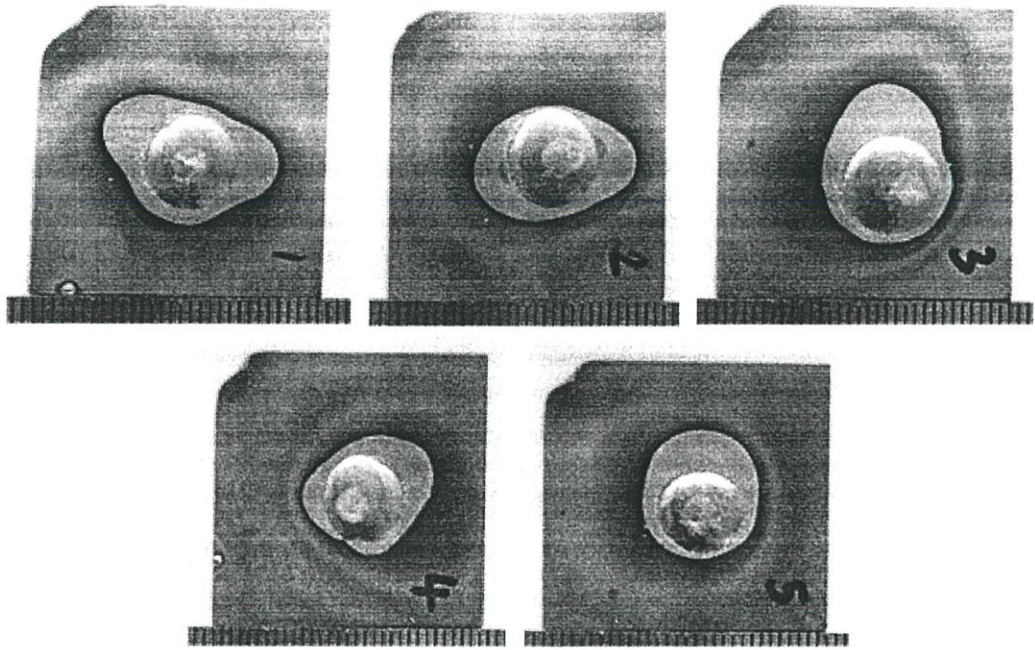
[12] <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html> (15 AUG 2013)

[13] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html> (15 AUG 2013)

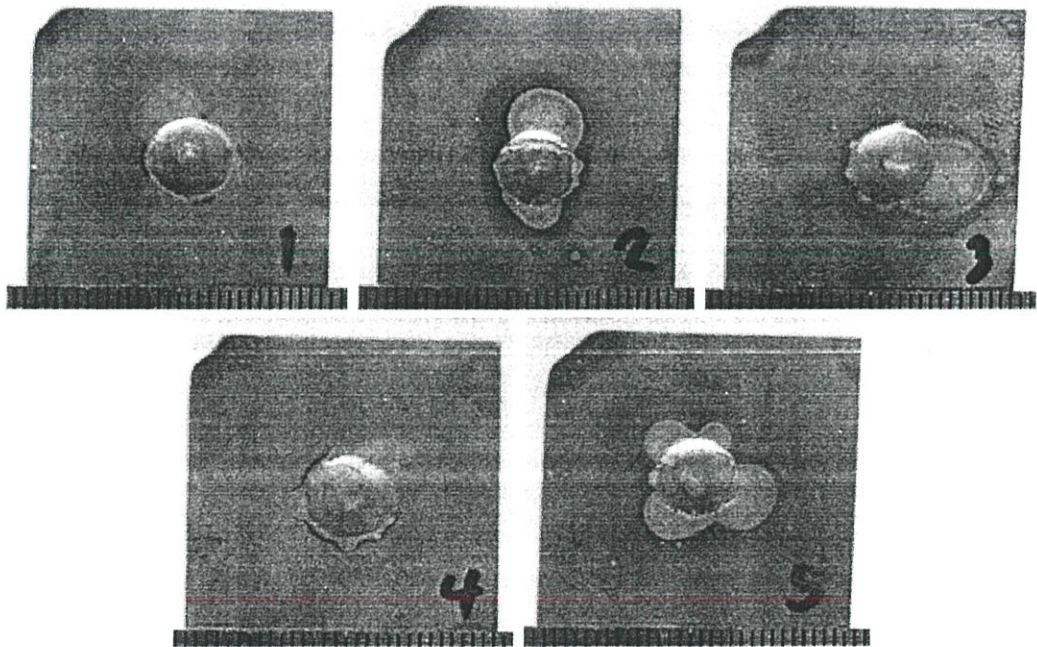
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

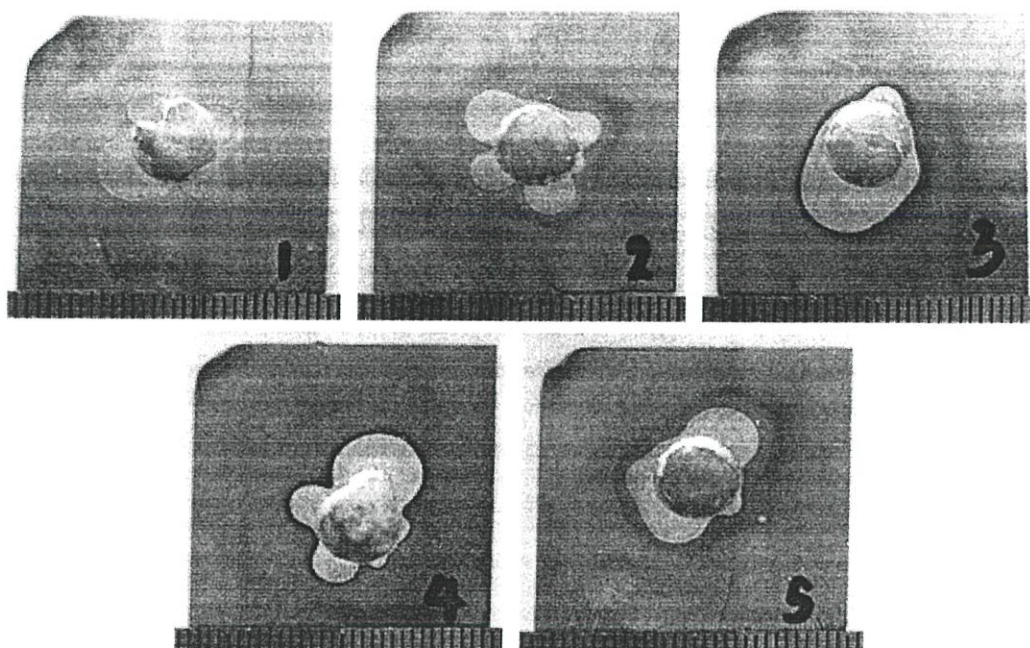
ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง



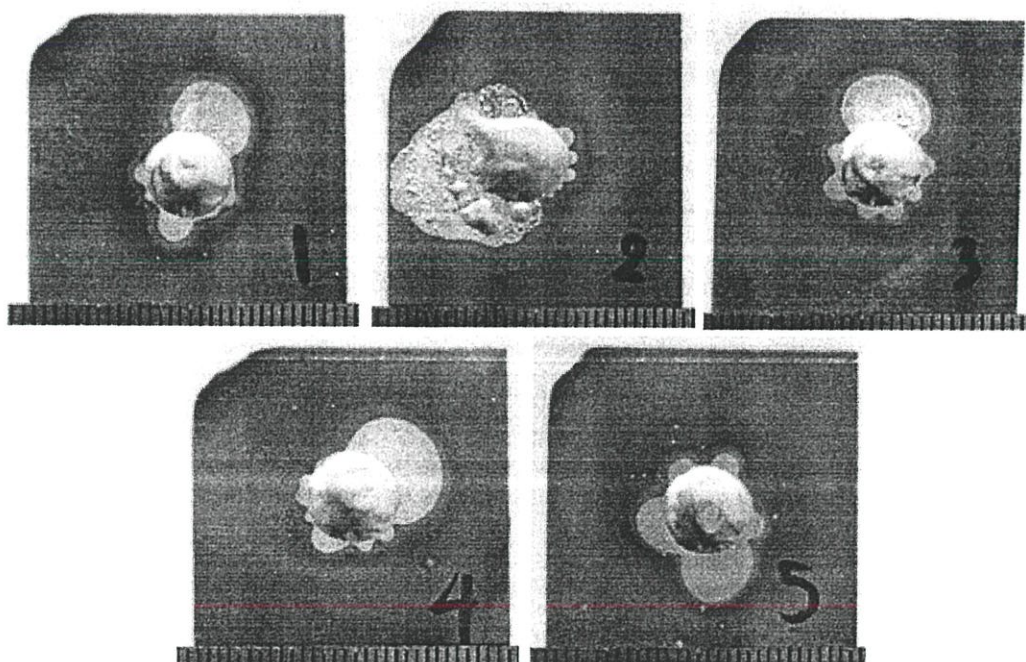
รูปที่ ก.1 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0 wt%



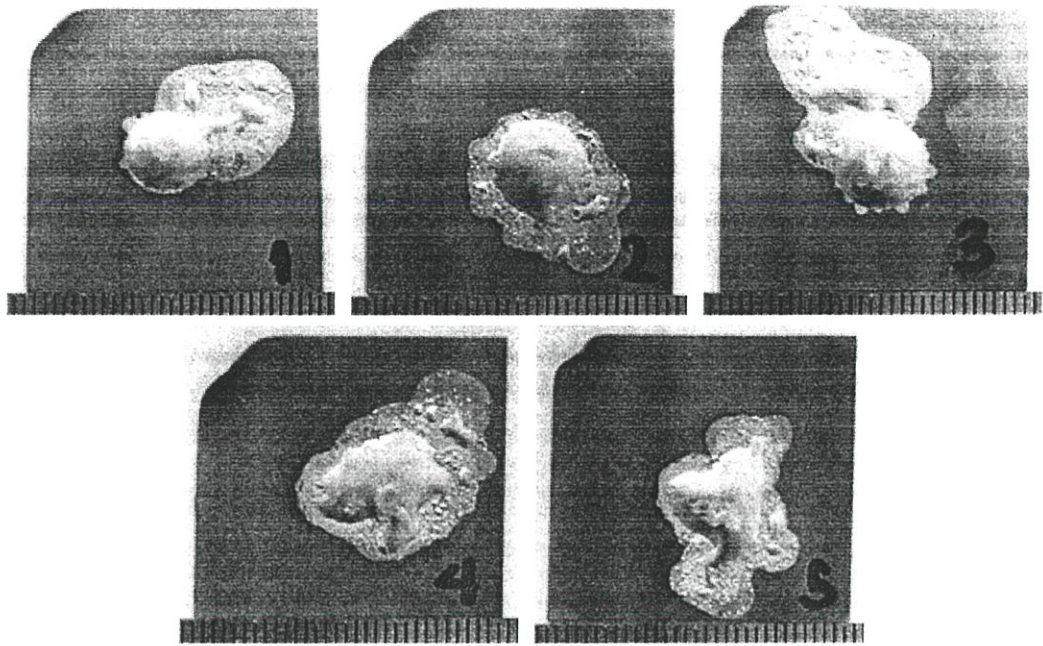
รูปที่ ก.2 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.1 wt%



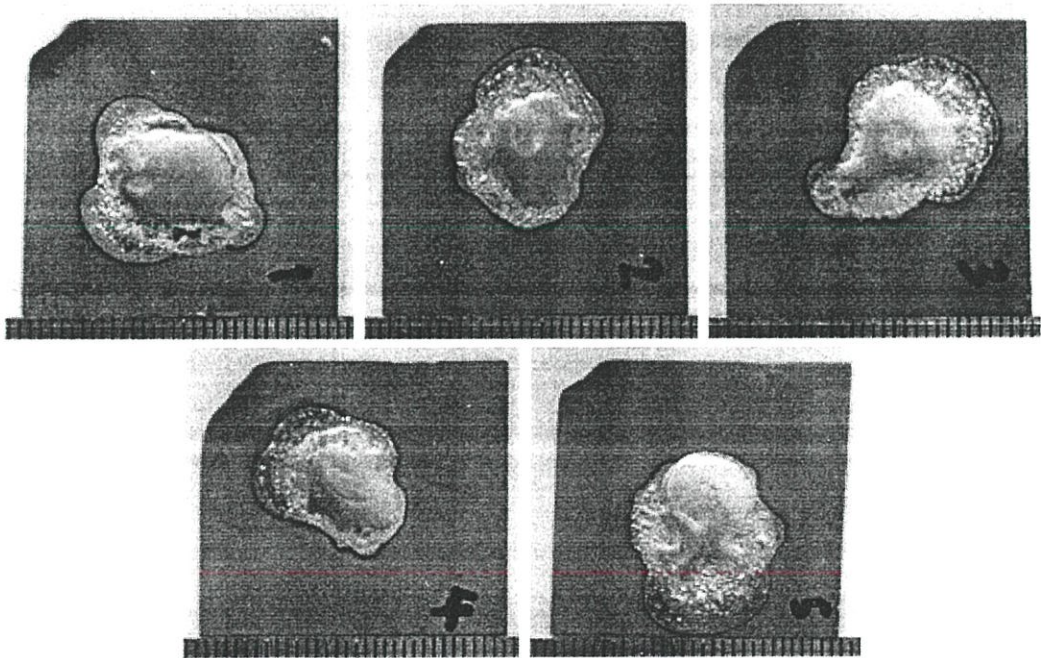
รูปที่ ก.3 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.2 wt%



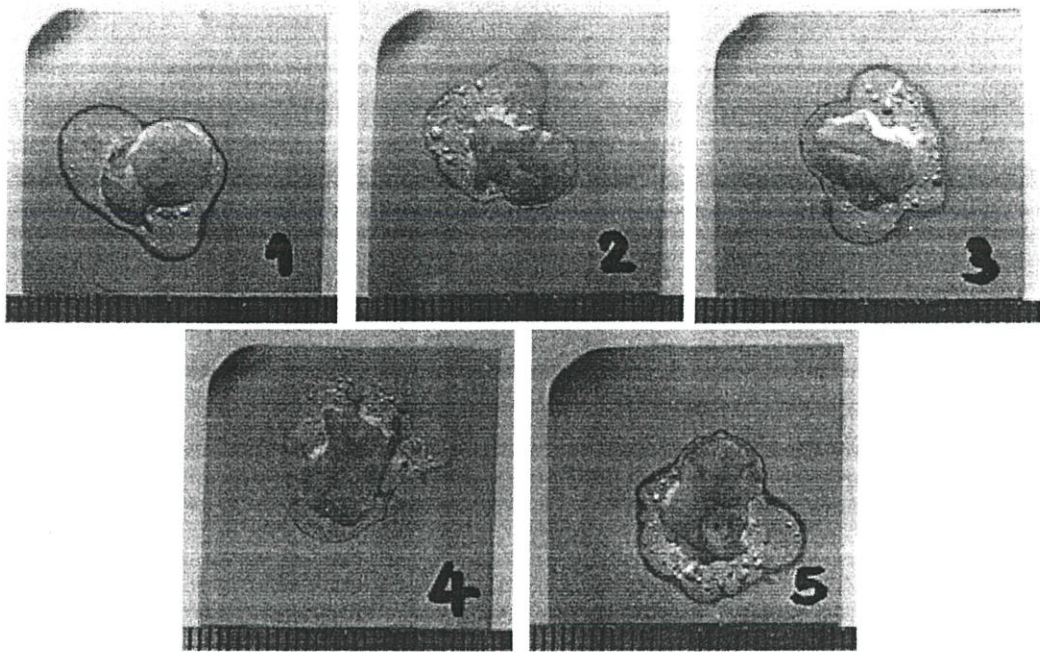
รูปที่ ก.4 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.3 wt%



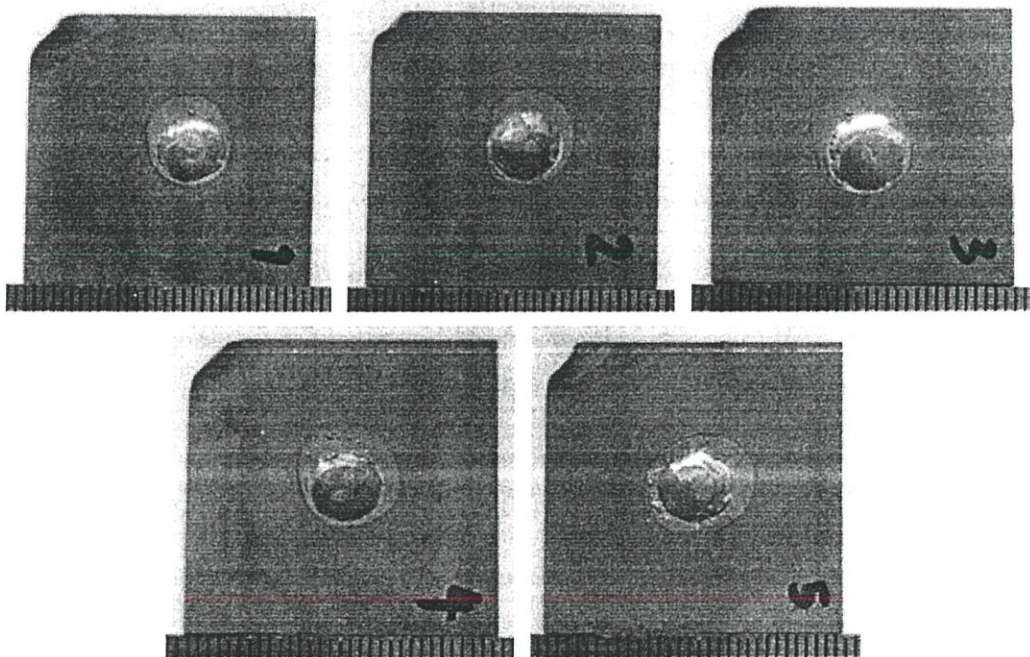
รูปที่ ก.5 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.4 wt%



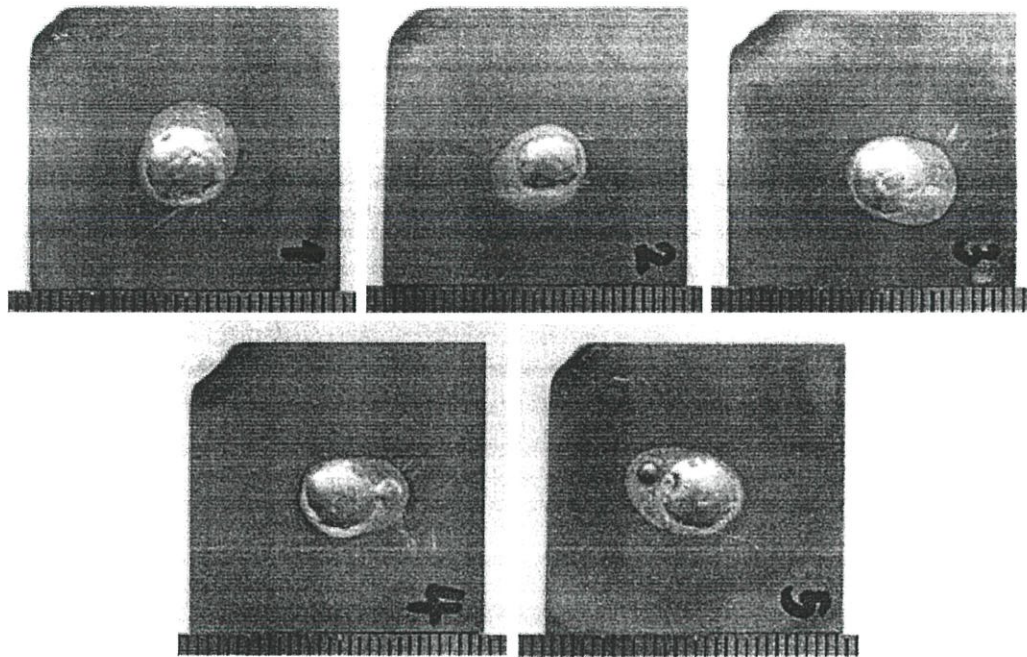
รูปที่ ก.6 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.5 wt%



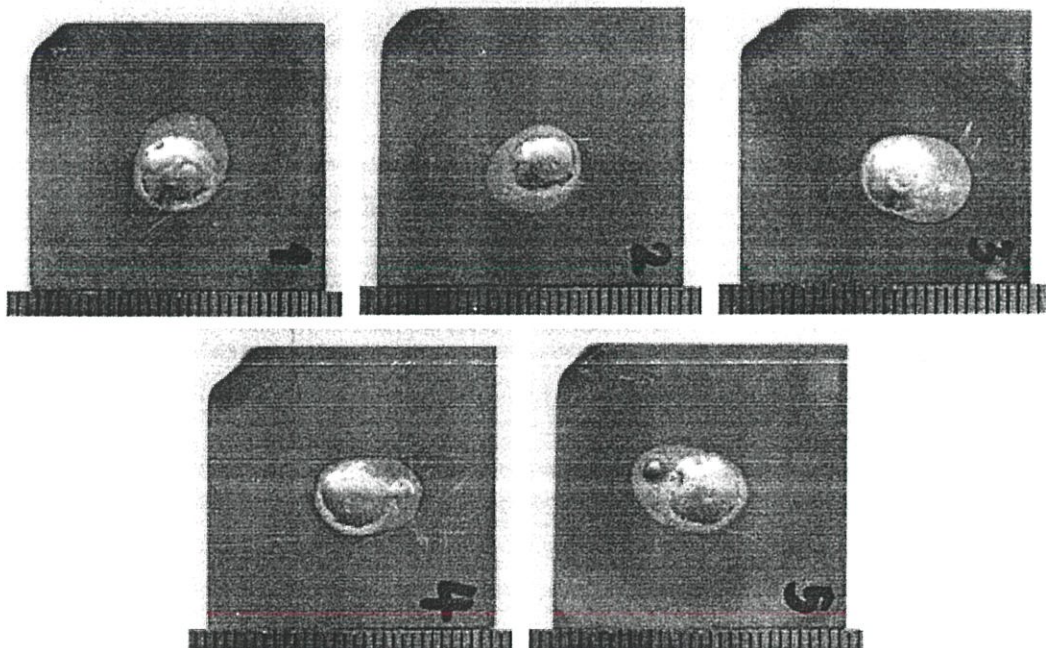
รูปที่ ก.7 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.6 wt%



รูปที่ ก.8 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 1.0 wt%



รูปที่ ก.9 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 1.5 wt%



รูปที่ ก.10 ชิ้นงานทดสอบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2.0 wt%

ภาคผนวก ข.

ผลที่วัดได้จากโปรแกรม Image-Pro Express®

ตาราง ข.1 ผลที่ได้จากโปรแกรม Image-Pro Express®

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	ชั้นงาน	พื้นที่ (Area) (mm ²)				เส้นรอบวง (Length) (mm)			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	1	72.26	72.12	72.31	72.23	33.78	33.70	34.62	34.04
	2	83.03	83.05	83.15	83.08	37.42	35.32	36.03	36.26
	3	84.05	84.08	84.13	84.09	36.32	35.52	34.87	35.57
	4	72.58	72.86	72.97	72.80	34.34	33.42	33.05	33.60
	5	79.11	78.55	78.87	78.84	35.79	36.16	36.11	36.02
	ค่าเฉลี่ย	78.21				35.10			
0.1	1	157.36	158.14	157.62	157.71	52.41	52.50	50.69	51.86
	2	139.58	139.95	140.14	139.89	48.49	49.01	49.59	49.03
	3	154.62	154.37	154.57	154.52	49.30	48.29	49.66	49.09
	4	154.07	153.93	154.21	154.07	53.36	53.85	54.06	53.75
	5	142.67	142.36	142.44	142.49	48.51	48.62	49.30	48.81
	ค่าเฉลี่ย	149.73				50.51			
0.2	1	162.62	162.68	162.41	162.57	53.30	53.43	52.52	53.08
	2	164.92	164.96	165.00	164.96	55.66	57.23	59.06	57.32
	3	169.01	168.47	169.14	168.87	52.87	53.97	53.07	53.30
	4	177.88	178.25	178.00	178.04	54.17	54.89	55.61	54.89
	5	164.44	164.48	164.66	164.53	53.87	54.30	53.38	53.85
	ค่าเฉลี่ย	167.79				54.49			
0.3	1	160.99	161.38	161.16	161.17	51.74	51.01	50.92	51.23
	2	211.70	212.23	211.38	211.77	70.01	69.67	68.41	69.36
	3	164.69	164.74	164.81	164.74	50.90	52.15	51.14	51.39
	4	175.21	174.89	174.62	174.91	52.15	53.60	51.82	52.53
	5	166.29	166.53	166.76	166.53	53.22	52.97	53.25	53.15
	ค่าเฉลี่ย	175.82				55.53			
0.4	1	161.14	160.86	161.13	161.04	53.15	53.47	57.08	54.57
	2	225.87	225.93	224.89	225.56	65.13	65.25	64.74	65.04
	3	206.06	206.37	205.90	206.11	60.75	60.63	60.37	60.58
	4	289.95	290.99	289.81	290.25	87.01	90.27	88.75	88.68
	5	254.31	255.77	254.17	254.75	92.78	90.89	91.52	91.73

ตาราง ข.1 ผลที่ได้จากโปรแกรม Image-Pro Express® (ต่อ)

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	ชั้นงาน	พื้นที่ (Area) (mm ²)				เส้นรอบวง (Length) (mm)			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.4	ค่าเฉลี่ย	227.54				72.12			
0.5	1	287.32	288.13	285.42	286.96	74.03	73.91	75.27	74.40
	2	225.21	224.31	226.64	225.39	69.73	69.49	70.46	69.89
	3	234.02	233.82	234.77	234.20	76.71	76.08	77.08	76.62
	4	232.11	225.87	235.17	231.05	69.25	70.08	68.68	69.34
	5	261.55	263.92	265.60	263.69	83.42	80.84	87.45	83.90
	ค่าเฉลี่ย	248.26				74.83			
0.6	1	206.92	207.07	207.48	207.16	66.17	66.45	66.07	66.23
	2	222.26	222.72	224.31	223.10	68.59	69.05	70.41	69.35
	3	197.56	196.02	197.26	196.94	63.02	64.02	64.56	63.87
	4	242.17	242.44	240.22	241.61	73.85	73.06	73.09	73.33
	5	242.44	242.42	239.53	241.46	79.96	79.15	77.36	78.82
	ค่าเฉลี่ย	222.05				70.32			
1.0	1	105.78	105.36	105.15	105.43	42.27	42.31	41.09	41.89
	2	125.17	124.27	124.90	124.78	49.32	49.44	48.40	49.05
	3	143.47	142.89	143.92	143.43	55.82	55.07	56.19	55.69
	4	108.62	107.65	106.76	107.68	52.30	52.19	50.45	51.65
	5	98.01	98.44	98.81	98.42	42.84	42.00	41.09	41.98
	ค่าเฉลี่ย	115.95				48.05			
1.5	1	91.87	91.88	92.04	91.93	37.82	38.21	37.82	37.95
	2	99.30	98.98	99.16	99.15	40.29	41.56	41.96	41.27
	3	115.56	115.20	115.48	115.41	43.74	45.41	43.87	44.34
	4	95.17	95.03	95.42	95.20	38.16	37.82	37.68	37.89
	5	104.38	104.51	104.29	104.39	40.72	40.50	40.62	40.61
	ค่าเฉลี่ย	101.22				40.41			
2.0	1	102.12	102.00	103.07	102.39	43.84	41.17	42.27	42.42
	2	73.22	73.38	73.26	73.29	35.44	35.35	35.07	35.29
	3	101.54	100.81	101.29	101.21	40.71	40.77	41.26	40.91
	4	102.34	102.16	102.36	102.29	39.60	39.67	40.19	39.82
	5	93.49	93.68	94.10	93.76	45.89	45.77	46.35	46.00
	ค่าเฉลี่ย	94.59				40.89			

ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของพื้นที่ (Area)

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0
Mean	78.208	149.73	167.79	175.82	227.54	248.26	222.05	115.95	101.22	94.588
Median	78.845	154.07	164.96	166.53	225.56	234.2	223.1	107.68	99.149	101.21
Std. Dev	5.5592	7.9773	6.1682	20.716	48.883	26.233	20.079	18.162	9.1959	12.435
Std. Error	2.4862	3.5676	2.7585	9.2645	21.861	11.732	8.9794	8.1222	4.1125	5.5609
95% Conf	6.9025	9.9049	7.6586	25.722	60.694	32.571	24.93	22.55	11.418	15.439
99% Conf	11.444	16.421	12.697	42.643	100.62	53.999	41.331	37.386	18.93	25.596
Size	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	391.04	748.67	838.97	879.12	1137.7	1241.3	1110.3	579.73	506.09	472.94
Minimum	72.231	139.89	162.57	161.17	161.04	225.39	196.94	98.42	91.931	73.288
Maximum	84.087	157.71	178.04	211.77	290.25	286.96	241.61	143.43	115.41	102.39
Min. Pos	72.231	139.89	162.57	161.17	161.04	225.39	196.94	98.42	91.931	73.288

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของเส้นรอบวง (Length)

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0
Mean	35.097	50.508	54.489	55.53	72.12	74.831	70.321	48.052	40.412	40.89
Median	35.57	49.086	53.847	52.525	65.04	74.4	69.351	49.053	40.614	40.914
Std. Dev	1.2008	2.2058	1.7286	7.7715	16.957	5.9215	5.9314	6.0661	2.6756	3.9067
Std. Error	0.537	0.9865	0.773	3.4755	7.5834	2.6482	2.6526	2.7129	1.1965	1.7471
95% Conf	1.4909	2.7388	2.1463	9.6494	21.055	7.3523	7.3647	7.5319	3.3221	4.8506
99% Conf	2.4718	4.5406	3.5582	15.997	34.906	12.189	12.21	12.487	5.5076	8.0418
Size	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	175.48	252.54	272.44	277.65	360.6	374.15	351.61	240.26	202.06	204.45
Minimum	33.604	48.809	53.084	51.226	54.565	69.336	63.866	41.89	37.887	35.286
Maximum	36.256	53.753	57.317	69.359	91.73	83.902	78.824	55.694	44.34	46.004
Min. Pos	33.604	48.809	53.084	51.226	54.565	69.336	63.866	41.89	37.887	35.286

ตาราง ค.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

ความเข้มข้น ZnO (%wt)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0
Mean	2.357	4.512	5.057	5.299	6.857	7.481	6.692	3.494	3.05	2.851
Median	2.376	4.643	4.971	5.018	6.798	7.058	6.723	3.245	2.988	3.05
Std.Dev	0.168	0.24	0.186	0.624	1.473	0.791	0.605	0.547	0.277	0.375
Std.Err	0.075	0.108	0.083	0.279	0.659	0.354	0.271	0.245	0.124	0.168
95% Conf	0.28	0.299	0.231	0.775	1.829	0.982	0.751	0.68	0.344	0.465
99% Conf	0.345	0.495	0.383	1.285	3.032	1.627	1.246	1.127	0.571	0.771
Size	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	11.78	22.56	25.28	26.49	34.29	37.41	33.46	17.47	15.25	14.25
Minimum	2.176	4.216	4.899	4.857	4.853	6.792	5.935	2.966	2.77	2.209
Maximum	2.534	4.753	5.365	6.382	8.747	8.648	7.281	4.322	3.478	3.086
Min. Pos	2.177	4.2	4.899	4.857	4.853	6.792	5.935	2.966	2.77	2.209

ตาราง ค.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการกระจายตัว (Spread factor)

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0
Mean	78.365	78.551	78.551	78.224	80.654	82.29	81.542	74.766	72.43	70.888
Median	78.271	78.738	78.505	77.804	80.608	82.243	81.542	74.766	72.43	71.028
Std. Dev	1.0131	0.5578	0.6892	1.4154	0.8489	1.0758	0.4371	2.0569	1.0049	1.5463
Std. Error	0.4531	0.2495	0.3082	0.633	0.3796	0.4811	0.1955	0.9199	0.4494	0.6915
95% Conf	1.2579	0.6926	0.8557	1.7575	1.054	1.3357	0.5427	2.5539	1.2478	1.9199
99% Conf	2.0854	1.1483	1.4186	2.9136	1.7474	2.2145	0.8998	4.234	2.0687	3.183
Size	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	391.82	392.76	392.76	391.12	403.27	411.45	407.71	373.83	362.15	354.44
Minimum	77.103	77.57	77.804	76.636	79.673	80.841	81.075	71.729	71.028	68.692
Maximum	79.907	78.972	79.673	80.374	82.009	83.645	82.243	77.336	73.832	72.43
Min. Pos	77.103	77.57	77.804	76.636	79.673	80.841	81.075	71.729	71.028	68.692

ตาราง ค.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของมุมสัมผัส (Contact angle)

ความเข้มข้น ZnO (wt%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.5	2.0
Mean	30.002	20.114	18.575	18.67	13.106	11.092	12.296	25.452	33.552	35.686
Median	29.527	20.689	18.79	19.497	13.919	11.102	12.399	24.52	33.207	34.662
Std. Dev	1.1462	0.8923	0.5937	2.2747	3.0095	0.855	1.0272	3.4557	2.4507	6.154
Std. Error	0.5126	0.399	0.2655	1.0173	1.3459	0.3824	0.4594	1.5454	1.096	2.7521
95% Conf	1.4232	1.1079	0.7372	2.8243	3.7367	1.0616	1.2754	4.2907	3.0428	7.641
99% Conf	2.3595	1.8367	1.2222	4.6823	6.195	1.76	2.1144	7.1135	5.0446	12.668
Size	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	150.01	100.57	92.875	93.351	65.528	55.459	61.482	127.26	167.76	178.43
Minimum	28.915	18.821	17.611	14.64	9.8204	9.8308	10.89	21.44	30.109	29.182
Maximum	31.444	20.812	19.067	20.012	16.662	11.924	13.483	29.077	35.949	45.71
Min. Pos	28.915	18.821	17.611	14.64	9.8204	9.8308	10.89	21.44	30.109	29.182