



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วเชิงประกอบนาโนสำหรับการบัดกรีที่อุณหภูมิต่ำ  
Development of Nano-composite Lead-free Solder for  
Low-temperature Soldering

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH  
TA  
483  
ก 1710

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...131064  
วัน,เดือน,ปี...2.1.พ.ค. 2557

b. 12603119  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วเชิงประกอบนาโนสำหรับการบัดกรีที่อุณหภูมิต่ำ

แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 397,280 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2554 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2555 /

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการกวนผสมด้วยสัญญาณอลวนแบบต่างๆที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิในการบัดกรีที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดงโดยใช้ค่าตัวแปรการแผ่กระจาย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธีการกวนผสมด้วยสัญญาณอลวนแบบต่างๆไม่ทำให้เกิดความแตกต่างในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรี และพบว่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แปรผันตรงกับจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO โดยทั้งอุณหภูมิโซลิดัสและอุณหภูมิลิควิดัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทำให้ช่วงการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO กว้างขึ้นเช่นกัน สำหรับความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดงนั้นพบว่า มีความสามารถในการบัดกรีลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีมากขึ้น โดยสังเกตจากค่าตัวแปรการแผ่กระจายที่มีค่าลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO มากขึ้น และพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการบัดกรีที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าตัวแปรการแผ่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : นาโนเทคโนโลยี โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว การบัดกรีที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Development of Nano-composite Lead-free solder for Low-temperature Soldering

Researcher: Kannachai Kanlayasiri

Faculty of Engineering

Department of Industrial Engineering

## ABSTRACT

This research was aimed to study on effect of various types of chaotic mixing on dispersion of zinc oxide nano-particles in Sn-58Bi lead-free solder. Influence of concentration of zinc oxide nano-particles on melting temperature of Sn-58Bi-xZnO solder was also investigated in this research. In addition, effects of concentration of zinc oxide nano-particles and soldering temperature on solderability of Sn-58Bi-xZnO on copper substrate were examined using spread factor. Results showed that types of chaotic mixing do not affect the dispersion of zinc oxide nano-particles in the solder. The melting temperature of Sn-58Bi-xZnO solder was proportional to the concentration of zinc oxide nano-particles. Both solidus and liquidus temperatures were increased with the increase of concentration of zinc oxide nano-particles, and the melting range of Sn-58Bi-xZnO solder was wider as the concentration of zinc oxide nano-particles increased. For the solderability of Sn-58Bi-xZnO solder on copper substrate, its solderability was adversely affected by the concentration of zinc oxide nano-particles. The spread factor of the solder was decreased as the concentration of zinc oxide nano-particles increased, and the increase of the soldering temperature promoted the spread factor of the solder.

**Keywords :** Nanotechnology, Nano-composite solders, Lead-free solders, Low-temperature soldering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ภรณ์ชัย กัลยาศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 สมมติฐานและกรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	4
1.6 คำสำคัญของการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>36</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2 วิธีการทดลอง.....	39
3.2 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	39
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b> .....	<b>42</b>
4.1 ผลของการกวนผสมด้วยสัญญาณอลวน.....	42
4.2 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี.....	45
4.3 ผลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	52
ประวัตินักวิจัย.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	หน้า
2.1	หน้า
2.2	หน้า
2.3	หน้า
2.4	หน้า
2.5	หน้า
2.6	หน้า
3.1	หน้า
4.1	หน้า
4.2	หน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 Chua's circuit.....	9
2.2 สัญญาณอลวนแบบซิงเกิลสกอรัล และดับเบิลสกอรัล.....	10
2.3 การไหลแบบ Axial flow.....	11
2.4 การไหลแบบ Radial flow.....	11
2.5 การไหลแบบ Tangential flow และ Mixed Flow.....	11
2.6 แผนภาพการควบคุมมอเตอร์แบบ PWM.....	11
2.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกรรมวิธีใดๆ.....	13
2.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากการ reflow ครั้งแรก.....	14
2.9 โครงสร้างจุลภาคของจุดสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดงหลังจากรับการให้ความร้อนด้วยวิธี reflow ครั้งที่ 2.....	14
2.10 ความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีคอมโพสิตต่อจำนวนครั้งในการ reflow.....	15
2.11 การตกตะกอนของกลุ่มอนุภาคใกล้กับผิวสัมผัสหนึ่งจากการ reflow ครั้งที่ 3.....	16
2.12 การทดสอบความสามารถในการบัดกรีบนแผ่นทองแดง.....	18
2.13 อิทธิพลของปริมาณอนุภาคนาโนเงินต่อ Wettability ของโลหะบัดกรีคอมโพสิต.....	18
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อของโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคเงิน.....	19
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคเงิน.....	19
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	20
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่ความเค้นต่างๆ.....	20
2.18 ลักษณะการแตกหักจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรีคอมโพสิตปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆ.....	21
2.19 ภาพท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว.....	22
2.20 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตต่างๆของ Sn-3.8Ag-0.7Cu.....	24
2.21 การกระจายของท่อนาโนที่ขอบของเกรน Ag <sub>3</sub> Sn และ EDX สเปกตรัม.....	25
2.22 เส้นอุณหภูมิที่ได้จาก Differential Scanning Calorimetry.....	26
2.23 ภาพกำลังขยายสูงของผิวรอยแตกของชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการเสริมแรงที่ด้วยท่อนาโนคาร์บอนด้วยสัดส่วนต่างๆ.....	28
2.24 การวัดมุมสัมผัสระหว่างชิ้นงานโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับปริมาณ TiB <sub>2</sub> และ CNT.....	31
2.26 การกระจายตัวของ TiB <sub>2</sub> ใน SAC.....	32
2.27 โครงสร้างเกรนย่อยของ $\beta$ -Sn phase.....	33
3.1 ลักษณะของเข้าหลอมชนิดพอร์ซลิน.....	37
3.2 ไบพัตชนิดกันหอย.....	37
3.3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	38
3.4 ความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะดับเบิ้ลสกอตร์ที่ความถี่ 3 Hz.....	38
3.5 ความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะซิงเกิ้ลสกอตร์ที่ความถี่ 3 Hz.....	39
3.6 เครื่องตัดความเร็วรอบต่ำ.....	40
3.7 ลักษณะการขัดกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ.....	40
3.8 เครื่องขัดสีกหลายแบบจานหมุน.....	41
3.9 Scanning electron microscope.....	41
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi.....	42
4.2 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของ Sn-rich phase.....	42
4.3 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของ Bi-rich phase.....	43
4.4 อนุภาคซิงค์ออกไซด์.....	43
4.5 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์.....	44
4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-ZnO ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	44
4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-ZnO ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากในแต่ละปี เช่น ในปี 2552 มูลค่าการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยมีค่าสูงถึง 31,102 ล้านบาทหรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 17.5 ของมูลค่าการส่งออกรวมทั้งประเทศ [1] และเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ สหภาพยุโรปได้ออกข้อบังคับ RoHS (The restriction of the use of certain hazardous substances) ออกมาเพื่อควบคุมการใช้งานสารมีพิษบางชนิด ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในสหภาพยุโรปได้ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยนำโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว (Lead-free solders) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead-based solders) โดยสหภาพยุโรปได้ใช้ข้อบังคับ RoHS ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006

โลหะบัดกรีเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของรอยบัดกรีทั้งในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีแต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ จากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง ทำให้ขนาดของรอยบัดกรีมีขนาดเล็กลงเช่นกัน การจัดเรียงตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการระบายความร้อนได้ยากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานสูงขึ้น เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีได้ และการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจนำไปสู่การวิบัติ (Failure) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆได้ [4, 6] โลหะบัดกรีเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของรอยบัดกรีทั้งในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีแต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ จากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง ทำให้ขนาดของรอยบัดกรีมีขนาดเล็กลงเช่นกัน การจัดเรียงตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการระบายความร้อนได้ยากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานสูงขึ้น เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีได้ และการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจนำไปสู่การวิบัติ (Failure) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆได้ [4, 6]

การวิบัติทางโลหะวิทยาที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ การเกิดความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) [6, 8-10] ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการปรับปรุงให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าได้โดยการทำให้มีขนาดเกรนที่เล็กลง แต่วิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการต่อต้านการเกิดการคืบ เนื่องจากการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงจะทำให้เกิดการคืบโดยกระบวนการเลื่อนของขอบเกรน (Grain boundary sliding) ได้ง่ายขึ้น [6, 7] โดยทั่วไปแล้ววิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาค (Particles) ขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรีเพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน [8, 9]

ด้วยความก้าวหน้าทางนาโนเทคโนโลยีทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) เช่น อนุภาคนาโนของออกไซด์ชนิดต่างๆ อนุภาคนาโนของธาตุชนิดต่างๆ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) มาใช้ในการทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) [17-24] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง ณ.ขณะนี้ ในการใช้อนุภาคนาโนในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน คือ ไม่สามารถทำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรีได้ ส่งผลให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ผลิตได้ยังมีคุณสมบัติทางกลที่ไม่สม่ำเสมอ [10-25]

ในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาผลของวิธีการผสมแบบสัญญาณอลวน (Chaotic mixing) แบบต่างๆที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide nano-particles) ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi เนื่องจากออกไซด์ของโลหะเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและเลื่อนของขอบเกรน [10] และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนที่มีราคาถูกเนื่องจากสามารถผลิตได้ในภายในประเทศไทย และยังมีรายงานด้วยว่า เมื่อซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรจะมีมุมสัมผัส (Contact angle) กับผิวทองแดงที่เล็กลง หรือเกาะติดกับผิวทองแดงในขณะที่ทำการบัดกรีได้ดีขึ้นนั่นเอง [26] สำหรับโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi นั้นเป็นโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ( $139^{\circ}\text{C}$ ) จึงเป็นโลหะบัดกรีที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการใช้งานที่สูงขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Sn-58Bi-xZnO) ที่ได้จากการผสมแบบสัญญาณอลวนเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน (Sn-58Bi) และโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการกวนผสมแบบเดิม คือ แบบความเร็วคงที่ นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิในการบัดกรีที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดง (Copper substrate) ผลจากงานวิจัยนี้นอกจากจะสร้างองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญทางด้านโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วแล้ว ยังสามารถนำไปเป็นแนวทางในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการผสมแบบสัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิในการบัดกรีที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดง (Copper substrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของการผสมแบบสัญญาณอลวนโดยใช้วงจรแบบ Chua และแบบลอจิสติก เปรียบเทียบกับการผสมโดยใช้ความเร็วคงที่ในการกวนผสม โดยใช้โลหะบัดกรีพื้นฐาน คือ โลหะบัดกรีไร้ตะกั่วชนิด Sn-58Bi เป็นเนื้อพื้น (Matrix) และใช้ออนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ขนาด 20-40 nm เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforced material) โดยใช้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในช่วง 0-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจะทำการศึกษาความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% เท่านั้น

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับโครงการวิจัยนี้จะใช้การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสมแบบสัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi-xZnO ที่ได้จากการผสมแบบสัญญาณอลวน โดยมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

ในการศึกษาผลของการผสมแบบสัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi จะใช้โลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยได้จากการหลอมตีบุก และบิสมัท ที่มีความบริสุทธิ์สูงเข้าด้วยกัน และจะใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ขนาด 20-40 nm เติมลงไปโลหะบัดกรีพื้นฐานในขณะที่อยู่ในสถานะของเหลว และจะใช้การกวนผสมทางกลที่มีใบกวนเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นตัวกวนให้อนุภาคนาโนกระจายตัวในโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยที่การหมุนของใบกวนที่หมุนตามการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า นั้นจะถูกควบคุมรูปแบบของการหมุนโดยการใช้สัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ เช่น แบบ Chua และแบบลอจิสติก เพื่อนำผลการกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่ได้จากการผสมแบบต่างๆ มาเปรียบเทียบกับ การหมุนของใบกวนแบบความเร็วคงที่ที่ใช้กันโดยทั่วไป ในการผลิตโลหะบัดกรี สำหรับการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีและโครงสร้างจุลภาค จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ในการตรวจสอบ ซึ่งรูปแบบการหมุนของใบกวนที่ให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่สม่ำเสมอที่สุด จะถูกนำไปใช้ในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน Sn-58Bi-xZnO สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไปของโครงการวิจัยนี้

จากนั้นจะทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ ออกไซด์และอุณหภูมิในการบัดกรีที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดง ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงในโลหะบัดกรี Sn-58Bi ด้วยความเข้มข้นต่างๆ โดยคาดว่าจะใช้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในช่วง 0-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วทำการหาจุดหลอมเหลวโดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) หลังจากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดง โดยการวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิบัดกรีต่างๆระหว่างโลหะบัดกรีเหลวกับแผ่นทองแดงโดยใช้ Contact angle meter จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ SEM & Energy dispersive spectroscopy (EDS) และ X-ray diffractometer (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 สมมติฐานและกรอบแนวคิดในการวิจัย

การผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยวิธีการกวนผสมทางกลด้วยใบกวนที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ ทำให้ได้โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีคุณสมบัติทางกลที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนที่เติมลงไป ในโครงการวิจัยนี้จะใช้สัญญาณอลวนซึ่งเป็นสัญญาณที่มีระยะคาบที่ไม่คงที่มาควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังของใบกวนที่ใช้ในการกวนอนุภาคนาโนให้เข้ากับโลหะบัดกรีที่อยู่ในสถานะของเหลว ด้วยการหมุนของใบกวนที่เป็นไปตามรูปแบบสัญญาณอลวน คาดว่า จะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนในเนื้อโลหะบัดกรีสม่ำเสมอขึ้น และทำให้ได้โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีคุณสมบัติทางกลที่สม่ำเสมอกว่าโลหะบัดกรีที่ได้จากวิธีการผลิตแบบเดิม

### 1.6 คำสำคัญของการวิจัย

Nanotechnology, Nano-composite solders, Lead-free solders, Low-temperature soldering

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในการประชุมวิชาการ และวารสารวิชาการ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดไร้ตะกั่ว และโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว รวมทั้งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 การบัดกรี

การบัดกรี คือการยึดติดโลหะเข้าด้วยกันโดยการนำโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยใช้ความร้อนไม่สูงมากนักขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะบัดกรีที่นำมาใช้ และไม่มีกระบวนการหลอมละลายของชิ้นงาน ซึ่งตรงข้ามกับการเชื่อม (Welding) การบัดกรีนี้อาจสามารถต้านทานการขยายตัว การบิดตัว และการงอตัวโดยไม่ก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงใดๆต่อรอยเชื่อมเมื่อเวลาผ่านไปและอยู่ภายใต้สภาพที่การบัดกรีจะถูกใช้งาน เช่น ความดันอากาศ อุณหภูมิ เป็นต้น มักจะนิยมใช้ในการยึดติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การบัดกรีสามารถแบ่ง 2 ประเภท ได้แก่

1. การบัดกรีอ่อน (Soldering) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่ว หรือ ดีบุก เติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วย Capillary action ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการบัดกรีอ่อนได้แก่ งานบัดกรีท่อทองแดงสำหรับงานแรงดันต่ำ หรือ งานที่มีอุณหภูมิการใช้งานไม่เกิน 200-300 องศาเซลเซียสหรืองานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อให้เป็นที่เข้าใจมากยิ่งขึ้น อาจพอสรุปได้ว่าจุดสังเกตของการบัดกรีที่ต่างจากการเชื่อม คือโลหะที่นำมาประสานรอยต่อ อุณหภูมิการปฏิบัติงาน รวมทั้งลักษณะการประสานของรอยต่อ เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการบัดกรี มาตัดในแนวขวางของรอยต่อ จะเห็นได้ชัดเจนว่าในการต่อโลหะด้วยวิธีการบัดกรีนั้นโลหะหลักจะไม่หลอมละลาย

2. การบัดกรีแข็ง (Brazing) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะนั้นจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะหลักที่นำมา Brazing ใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่ไม่อยู่ในจำพวกเหล็ก เช่น ลวดเงิน หรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น ลวดทองเหลือง ลวดทองแดงผสมฟอสฟอรัส ก็ได้ โดยที่โลหะเติมนี้เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการ Brazing เติมลงไปที่ยรอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมนี้จะหลอมละลายและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วย Capillary action ลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยการ Brazing ได้แก่ งานต่อคอมตัดคาร์ไบด์ติดกับด้ามมีด งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็น งานเชื่อมต่อท่ออลูมิเนียมบางๆ เป็นต้น โลหะบัดกรี

#### 2.1.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติทางการผลิต โลหะบัดกรีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จึงเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว และยังมีคุณสมบัติอื่นๆที่ใช้พิจารณาการเลือกใช้โลหะบัดกรีทดแทนในเบื้องต้นดังนี้

### 1. ราคาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โดยทั่วไปจะสูงกว่าโลหะบัดกรีเนื่องจากโลหะที่นำมาใช้ผสมแทนตะกั่วมีราคาแพงกว่าและบางชนิดหาได้ยากเช่น บิสมัท (Bismuth) อินเดียม (Indium) เงิน (Silver) หรือ พลวง (Antimony) เป็นต้น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจะตระหนักถึงต้นทุนเป็นอย่างมาก ราคาของโลหะบัดกรีปลอดสารตะกั่วสามารถมีผลโดยตรงกับกับราคาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งราคาของโลหะบัดกรีทุกชนิดมีราคาแพงมากกว่าโลหะบัดกรีผสมระหว่างตะกั่วหรือดีบุก

### 2. จุดหลอมหลอมเหลว

เป็นปัจจัยแรกๆและสำคัญที่สุดสำหรับการพัฒนาวัสดุบัดกรีชนิดใหม่ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากในทุกวันนี้ จะถูกออกแบบที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของโลหะบัดกรีดีบุกผสมตะกั่วคือ 183 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิอ้างอิงถ้าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนแล้วทำให้มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นต้องปรับปรุงอุปกรณ์เพิ่มเติม ทำให้มีราคาสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ลักษณะสำคัญในการพัฒนาโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโน คือการเสริมคุณสมบัติแต่ไม่ทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีสูงขึ้น (ถ้าเป็นไปได้การปรับปรุงโลหะบัดกรีควรจะลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีแต่อาจจะเพิ่มผลดีของอุณหภูมิใช้งานของวัสดุโลหะบัดกรีตั้งต้น)

### 3. ความสามารถในการประสาน (Wettability)

ขณะที่ทำการบัดกรีเพื่อที่จะสร้างพันธะโลหะให้ถูกต้องระหว่างวัสดุสองชนิดต้องเกิดการประสานขึ้น นั้นหมายความว่าต้องเกิดปฏิกิริยาพิเศษระหว่างโลหะบัดกรีเหลวและส่วนที่ถูkBบัดกรีส่วนมากจะเป็นทองแดง ความสามารถในการประสานของโลหะบัดกรี กระจายขณะกระบวนการบัดกรีเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการขึ้นรูปของพันธะโลหะที่ถูกต้องเพื่อจะให้รอยต่อสมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อที่จะได้คุณภาพรอยต่อบัดกรีที่ดี โลหะบัดกรีที่นำมาปรับปรุงส่วนประกอบแล้ว ควรมีการประสานที่ดี การไหลที่เหมาะสมบนพื้นผิว และเกิดพันธะระหว่างโลหะที่ดี

### 4. ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความต้านทานไฟฟ้าถ้าโลหะบัดกรีมีความต้านทานไฟฟ้ามากทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นและสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในเส้นทางไฟฟ้าไปในรูปแบบของความร้อนด้วย ดังนั้นโลหะบัดกรีที่เลือกนำมาใช้ควรมีค่าความนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

### 5. สมบัติการขยายตัว (CTE)

ถ้าโลหะบัดกรีในรอยต่อไม่สามารถที่จะกระจายความเครียดได้จะทำให้เกิดความเสียหายของส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ดังนั้นกระบวนการผสมโลหะบัดกรีเพิ่มความแข็งแรงพอประมาณและมีผลต่อการเพิ่มความอ่อนตัวและต้านทานการหลอมเหลวภายใต้แรง จะเป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุด

### 6. สมบัติทางกายภาพ เช่น แรงดึง แรงเฉือน ต้านทานความล้า และการคืบ

โลหะบัดกรีมีมากมายหลายชนิดควรเลือกโลหะบัดกรีให้เหมาะสมกับสภาพะการใช้งานของอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้งานในบริเวณที่มีการสั่นมากทำให้ต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานความล้ามากกว่าอุปกรณ์ที่อยู่กับที่ หรืออุปกรณ์ที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูงมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ดังนั้นต้องคำนึงถึงการคืบของวัสดุที่นำมาใช้เป็นโลหะบัดกรีด้วย

### 7. การมีอยู่และสามารถหาได้ง่าย

ถ้าส่วนผสมของโลหะบัดกรีนั้นหายากหรือมีจำนวนน้อย ไม่เพียงพอต่อการผลิตจำนวนมากในอุตสาหกรรมควรเลือกชนิดที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันหรือสามารถทดแทนกันได้โดยมีลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sn96 เป็นโลหะบัดกรีพิเศษเฉพาะด้านมีความต้านทานแรงดึงของรอยบัดกรีสูง เจาะจงใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากไม่เป็นพิษ และมีสีเข้ากับได้กับเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม

Sn96Ag4, Sn96.5Ag3.5, Sn97Ag3 เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูงเช่นการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนยานยนต์

Sn95, Sn94, AM, WS ใช้สำหรับอุปกรณ์การแพทย์และเครื่องประดับใช้ต่อท่อทองแดงสำหรับระบบน้ำบริโภคและอุตสาหกรรมอาหาร เป็นโลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการเปียกสูงทนต่อความร้อนสูง

Sn95Sb5 ใช้สำหรับบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 240 องศาเซลเซียสมีความต้านทานแรงดึงสูงสามารถใช้บัดกรีท่อทองแดงในการทำความร้อนด้วยแสงอาทิตย์ท่อประปาและอุปกรณ์ทำความเย็น

Bi58Sn42, Bi57Sn43, Sn50In50 เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

Sn99Cu1 ใช้สำหรับการบัดกรีอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการเวฟโซลเดอร์ริง (wave soldering)

Sn97Cu3 ใช้สำหรับเคลือบขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### 2.1.3 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยวัสดุชนิดใดก็ตาม ที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร คุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (bulk materials) ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ จะได้วัสดุชนิดใหม่หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่าง และน่าสนใจ ตัวอย่างเช่น การใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (Single-wall carbon nanotube) ในการเพิ่มความแข็งแรง ค่าทนแรงดึงสูงสุด (UTS) ของโลหะบัดกรี [6] ผงนาโนทองแดง (copper nanopowder) ในการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะบัดกรี [7] การใช้เงินขนาดนาโน (Nanosized silver) ในการปรับปรุงคุณสมบัติการเคลือบของโลหะบัดกรี [8] หรือ ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคเพื่อให้เกิดความแข็งแรง [9] เป็นต้น

### 2.1.4 วิธีการผสมโลหะบัดกรีกับอนุภาคนาโน

จากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนได้แสดงให้เห็นว่า การทำให้วัสดุอยู่ในรูปวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบมากขึ้นกว่าเดิม [2-5, 7] สำหรับการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดที่เป็นแท่งหรือแผ่นโลหะพบว่าวิธีการผลิตที่สำคัญอยู่ 4 กลุ่มด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1) การทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) ของเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรขึ้นในเนื้อโลหะบัดกรี (Matrix) และให้เฟสที่สองนั้นทำหน้าที่เสริมความสามารถของโลหะบัดกรีในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบ วิธีการนี้สามารถทำให้อนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรี แต่ปัญหาที่พบ คือ เมื่อนำโลหะบัดกรีที่ผลิตด้วยวิธีการนี้ไปบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการบัดกรีจะทำให้อนุภาคนาโนที่เกิดจากการตกตะกอนขยายตัว (Growth) ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม ส่งผลให้มีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะบัดกรีเชิงประกอบลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็สามารถทำให้อนุภาคนาโนที่เกิดจากการตกตะกอนดังกล่าวเกิดการขยายตัวได้เช่นกัน [11-14]

2) การใช้วิธีการขึ้นรูปทางกล เช่น การรีด (Rolling) หรือการตีขึ้นรูป (Forging) ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโน วิธีหนึ่งในกลุ่มนี้ คือ การทำให้เฟสที่สองเกิดการตกตะกอนในเนื้อโลหะบัดกรีเพื่อเสริมความสามารถของโลหะบัดกรีในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบ โดยการให้เฟสที่สองเกิดการตกตะกอนจนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ กระจายไปทั่วเนื้อโลหะบัดกรี แล้วทำการลดขนาดของแท่งโลหะบัดกรีด้วยวิธีการขึ้นรูปทางกล เพื่อให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นเกิดการแตกหักกระจายเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง เมื่อแท่งโลหะบัดกรีผ่านกระบวนการขึ้นรูปเหล่านี้ซ้ำกันหลายครั้ง อนุภาคของเฟสที่สองในเนื้อโลหะบัดกรีก็จะมีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนอีกวิธีหนึ่งในกลุ่มนี้ คือ ผสมผงโลหะบัดกรีเข้ากับอนุภาคนาโนในของเหลวเพื่อให้อนุภาคนาโนเคลือบบนผิวของผงโลหะบัดกรี แล้วทำให้แห้งก่อนที่จะนำไปอัดเป็นแท่ง หลังจากนั้นทำการรีดร้อนให้แท่งโลหะบัดกรีกลายเป็นแผ่นบาง แล้วนำแผ่นโลหะบัดกรีที่ผ่านการรีดมาตัดเป็นแผ่นที่มีขนาดเล็กลง และนำมาซ้อนกันเพื่ออัดให้เป็นแท่งโลหะบัดกรีอีกครั้ง เพื่อรีดซ้ำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำซ้ำหลายๆครั้งจนกระทั่งได้แท่งโลหะบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ถึงแม้จะพบว่าการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยวิธีในกลุ่มนี้ทำให้อนุภาคของเฟสที่สองมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่การผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยวิธีนี้จะทำให้การยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเฟสที่สองกับเนื้อโลหะบัดกรีถูกทำลายโดยแรงทางกลที่มากระทำกับโลหะบัดกรีในระหว่างการขึ้นรูป ทำให้สูญเสียความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ [10, 15, 16]

3) การผลิตแบบโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โดยการนำผงโลหะบัดกรีพื้นฐานทำการผสม (Mixing) เข้ากับอนุภาคนาโนตามกรรมวิธีของการผลิตแบบโลหะผงวิทยา เพื่อให้ผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนผสมเข้ากันได้ดี แล้วนำผงโลหะที่ผ่านการผสมแล้วไปทำการอัดและทำการเผาซินเทอร์ (Sintering) ให้ผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนยึดเกาะกันได้ดี แต่ในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการผสมผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนที่ค่อนข้างนาน (ประมาณ 10-15 ชั่วโมง) เนื่องจากการเป็นการผสมอนุภาคของแข็งเข้ากับของแข็งด้วยกัน และอนุภาคชนิดหนึ่งก็มีขนาดที่เล็กมาก นอกจากนี้ยังพบปัญหาการเกิดโพรงอากาศและการกระจุกตัวของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ผลิตด้วยวิธีนี้ [17-22]

4) การหลอมโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะบัดกรีให้เป็นของเหลวแล้วเติมอนุภาคนาโนที่ต้องการลงไป จากนั้นจึงทำการกวนผสมทางกลเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ซึ่งวิธีการกวนผสมทางกลพบว่ามีทั้งการกวนด้วยการใช้ตัวกวน (Stirrer) และการใช้แรงสั่นสะเทือนจากการสั่นแบบอัลตราซอ닉 (Ultrasonic) อย่างไรก็ตามการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยวิธีการกวนผสมทางกลเหล่านี้พบว่า ยังไม่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนได้ ทำให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้มีคุณสมบัติทางกลที่ไม่สม่ำเสมอ แต่วิธีการหลอมโลหะแล้วเติมอนุภาคนาโนลงไปเป็นวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีศักยภาพมากที่สุดที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโลหะบัดกรี เนื่องจากความไม่ซับซ้อนของขั้นตอนการผลิต และเป็นวิธีการผลิตที่ผู้ผลิตสามารถใช้เครื่องมือการผลิตร่วมกับการผลิตโลหะบัดกรีทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังพบการใช้วิธีการผลิตในลักษณะนี้ในการผลิตโลหะเชิงประกอบชนิดอื่นด้วย [23-25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 ทฤษฎีความอลวน

ทฤษฎีความอลวน (Chaos theory) เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงลักษณะพฤติกรรมของระบบพลวัต (คือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป) โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เรียกว่าอลวนนี้ จะมีลักษณะที่ปั่นป่วนจนดูคล้ายว่า การเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบสุ่มหรือไร้ระเบียบ (random/stochastic) แต่จริง ๆ แล้ว ระบบอลวนนี้เป็นระบบแบบไม่สุ่ม หรือระบบที่มีระเบียบ (deterministic) สามารถสรุปเงื่อนไขความอลวนได้ดังนี้

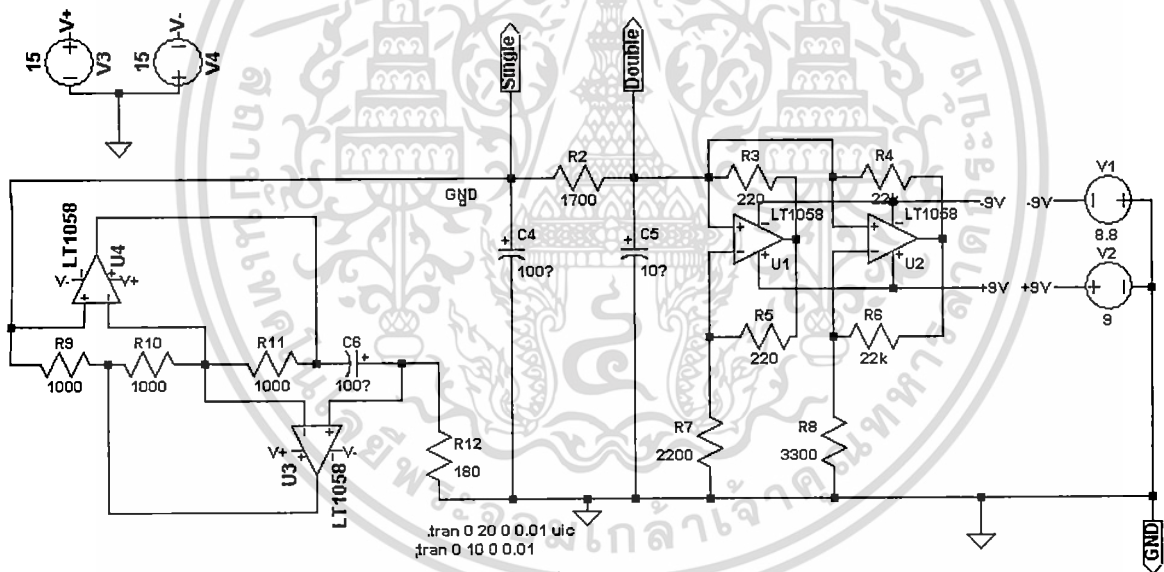
1 มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearly) คือผลลัพธ์ทั้งหมดของระบบไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากส่วนย่อย ๆ รวมกัน

2 ไม่ใช่การเกิดแบบสุ่ม เหตุการณ์ทั้งหลายจึงเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์อันแน่นอน

3 มีความไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitive dependency on initial conditions)

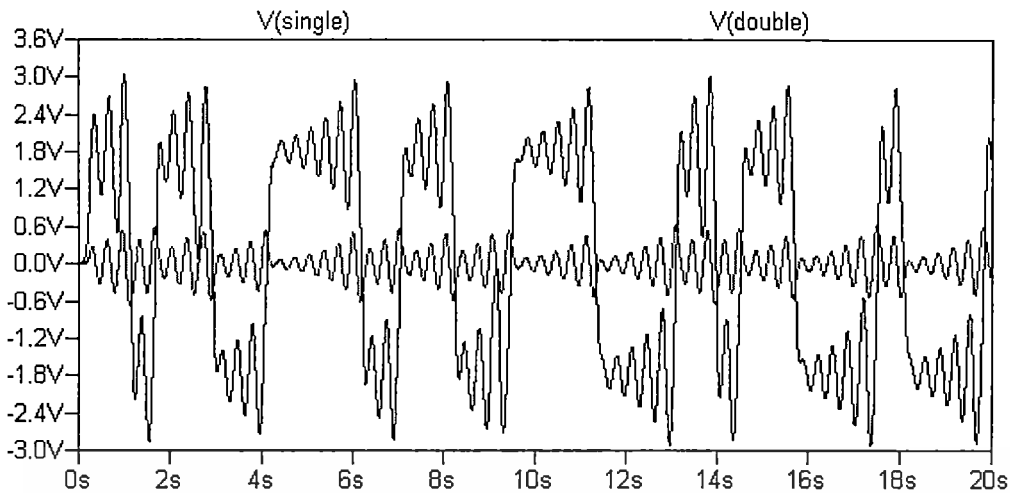
4 ไม่สามารถทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดล่วงหน้าได้ระยะยาว เพราะเราไม่รู้ว่าจะมีเหตุ (ปัจจัย)ใดที่กระทบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

สัญญาณอลวนสามารถสร้างจากจาก Chua's circuit ดังภาพที่ 2.1 จะกำเนิดสัญญาณ 2 ชนิด คือแบบซิงเกิลสกอรัล (single scroll) และดับเบิลสกอรัล (double scroll) แสดงดังภาพที่ 2.2 ตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $V_R$ ) และตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) สามารถแทนด้วยวงจรดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 Chua's circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 สัญญาณอลวนแบบซิงเกิลสกอ์ล และดับเบิลสกอ์ล

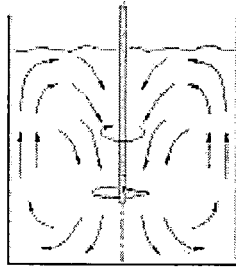
### 2.1.6 ประเภทของการกวน

การกวนของเหลวมีบทบาทสำคัญในการผลิตสินค้าหลายอย่าง สินค้าส่วนใหญ่ต้องการการกวนบางอย่างในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นการกวนของเหลวจึงเป็นขั้นตอนที่พบบ่อยในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร ปิโตรเคมี ยา กระดาษ การกำจัดน้ำเสีย รวมทั้งการปกป้องสิ่งแวดล้อม ความต้องการการกวนหรือการผสม ประกอบด้วยการกวนของเหลวที่ความหนืดต่ำและความหนืดสูงเข้าด้วยกัน ของแข็งในของเหลว การกระจายแก๊สในของเหลว การถ่ายเทมวลหรือความร้อน (mass transfer or heat transfer) โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งประเภทการกวนตามขบวนการทางกายภาพและเคมีดังต่อไปนี้

1. Blending การผสมของเหลวสองชนิดที่สามารถละลายเข้าด้วยกัน (miscible liquid)
2. Suspension การผสมของแข็งกับของเหลว
3. Dispersion การลดขนาดและแพร่กระจายของแข็งในของเหลว
4. Emulsion การผสมของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน (immiscible liquid)
5. Aeration การผสมแก๊สกับของเหลว หรือขบวนการถ่ายเทมวล (mass transfer)
6. Heat transfer การถ่ายเทความร้อน ซึ่งอาจทำให้ร้อนขึ้นหรือเย็นลง โดยให้ของเหลว เคลื่อนผ่านผิวสัมผัสของภาชนะ ทั้งนี้ก็มีขบวนการอื่นๆ ดังกล่าวข้างต้นรวมอยู่ด้วย

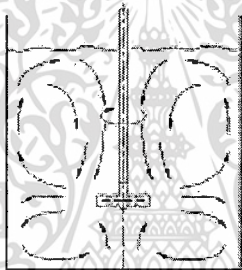
เครื่องผสมของเหลวหรือเครื่องกวน เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยตัวต้นกำลังหรือตัวขับ เพลลา และใบกวน (impeller) หนึ่งใบหรือมากกว่า ติดตั้งอยู่บนเพลลา โดยจำนวนใบมีความหมายถึงจำนวนชั้นของใบกวน (impeller stage) สำหรับใบกวนผสม (mixing impeller) ที่ยึดติดอยู่บนเพลลาทำหน้าที่หมุนวนของเหลวเพื่อแลกเปลี่ยนสารตามความต้องการของขบวนการผลิต ใบกวนมีด้วยกันหลายแบบ โดยหลักแล้วสามารถแบ่งประเภทใบกวนได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่ม ตามลักษณะการไหลของของเหลว ดังนี้

1. Axial flow ของเหลวถูกดูดและไหลในแนวแกนขนานกับเพลลา ดังภาพที่ 2.3 เช่น Marine propeller Hydrofoil และ Pitched blade turbine และใบกวนกลุ่มนี้ใช้เพิ่มการไหลของของเหลว (pumping capacity) เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้าด้วยกัน (blending) และ การผสมของแข็งเข้ากับของเหลว (suspension)



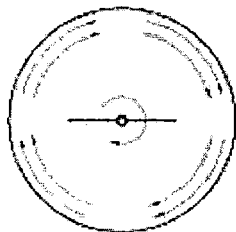
ภาพที่ 2.3 การไหลแบบ Axial flow

2. Radial flow ของเหลวถูกผลักออกในแนวรัศมีหรือในแนวตั้งฉากกับแกนเพลาดังภาพที่ 2.4 เช่น Rushton disc Saw disc Bar disc ฯลฯ ใบกวนกลุ่มนี้ใช้เพิ่มแรงเฉือนหรืออัตราการเฉือน (shear rate) ให้กับของเหลว เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียว (immiscible liquid) การลดขนาดของของแข็งให้แขวนลอยในของเหลวและการลดขนาดของแก๊สในของเหลว เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) โดยขบวนการ emulsion dispersion และ aeration ตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 การไหลแบบ Radial flow

3. Tangential flow เป็นลักษณะการไหลของของเหลวที่หมุนรอบขอบถังดังภาพที่ 2.5 ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนหรือความเย็นกับภาชนะที่บรรจุได้ แต่ tangential flow ไม่ค่อยช่วยในการผสมของเหลวให้เข้ากัน ดังนั้นเราจึงใช้แผ่นกั้น (baffles) ในการเปลี่ยนทิศของเหลวให้ขึ้นลงในแนวตั้ง ทำให้การผสมของเหลวให้เข้ากันกินเวลาน้อยลง ซึ่งสามารถใช้กับความเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางกับสูง เรามักใช้ใบกวนที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนชิ้นมากในการกวนของเหลวให้เข้ากัน เช่น Anchor Paddle, Helical Ribbon ฯลฯ

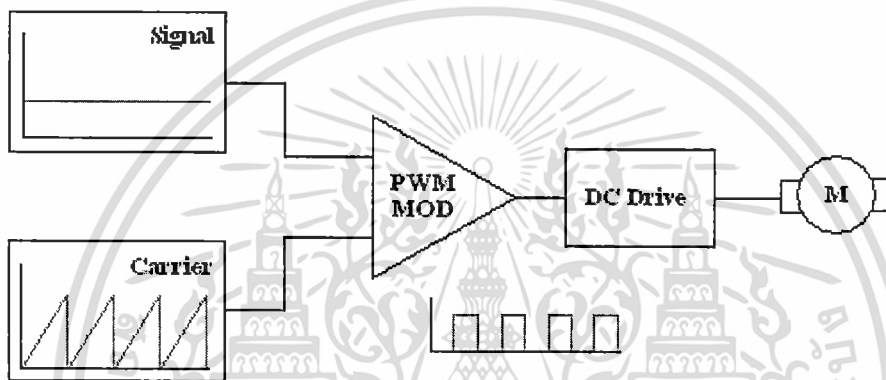


ภาพที่ 2.5 การไหลแบบ Tangential flow และ Mixed Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7 การควบคุมความเร็ว

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการการผสมโลหะบัดกรีชนิดตีบุก บิสมัทกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยสัญญาณออสซิลเลชันและสัญญาณแบบอื่นๆ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงมีหลายวิธีด้วยกันซึ่งอาจจะใช้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานทั่วไปเช่นการควบคุมด้วยวิธีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าโดยต่ออนุกรมกับมอเตอร์หรือใช้วิธีการการควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์แต่การควบคุมในวิธีดังกล่าวถึงแม้ว่าจะควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ได้แต่ที่ความเร็วต่ำจะส่งผลให้แรงบิดต่ำไปด้วยดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เป็นช่วงๆโดยอาศัยกระแสไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงซึ่งเราเรียกว่าวิธีการของการมอดูเลตขึ้นทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แผนภาพการควบคุมมอเตอร์แบบ PWM

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันมีการศึกษาการพัฒนาโลหะบัดกรีไว้มากมายโดยเฉพาะการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อทดแทนการใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบของตะกั่ว เพื่อตอบสนองจุดประสงค์ในการใช้งานตามที่ต้องการ รวมถึงโดยมีกรรมวิธีและชนิดของธาตุที่หลากหลายในการผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเชิงประกอบ

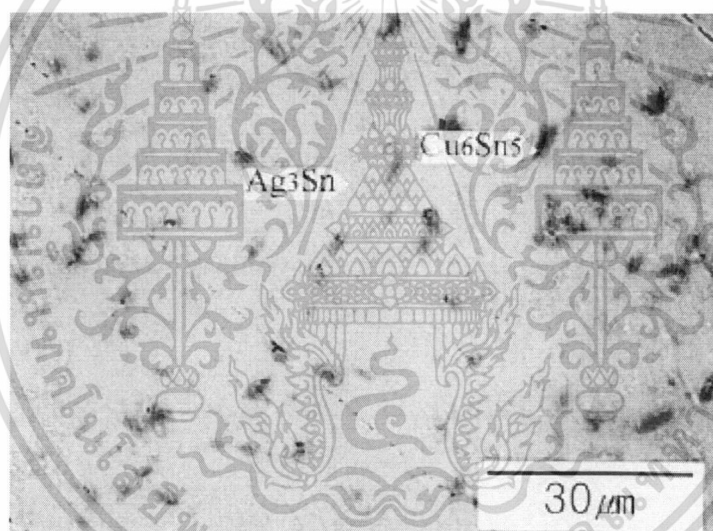
ในการพิจารณาวิธีการผสมโลหะบัดกรีคอมโพสิตเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากวิธีการผสมต่างๆมีประสิทธิภาพในการเจือธาตุลงไปต่างกัน หลักการผสมขั้นพื้นฐานคือวัสดุที่จะนำมาผสมกันจำเป็นต้องสามารถรวมตัวกันหรือเกิดปฏิกิริยากันได้ เช่น วิธีของ Lee และคณะ ได้เลือกผงทองแดงมาเป็นอนุภาคเสริมโดยใช้วิธีผสมแบบ in-situ เพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

สารประกอบเชิงโลหะ  $Cu_6Sn_5$  ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.5Ag ถูกนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาอินไซด์ระหว่างผงทองแดงและโลหะบัดกรีหลอมเหลว โดยเติมผงทองแดงที่นำมาเคลือบกับฟลักซ์ลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวเข้าหลอมอลูมิเนียมภายในบรรยากาศปกคลุมด้วยก๊าซอาร์กอน ผงทองแดงที่ได้รับการเคลือบฟลักซ์แล้วสามารถรวมตัวได้ดีกว่าไม่ได้เคลือบไว้ ซึ่งมันเกิดจากฟลักซ์จะปลดออกไซด์บนผิวของผงทองแดง ขนาดของผงทองแดงที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตรและในสัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ โลหะบัดกรีและผงทองแดงถูกผสมด้วยวิธีทางกล ช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างตีบุก และ ผงทองแดง จากนั้นคงไว้ที่อุณหภูมินั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

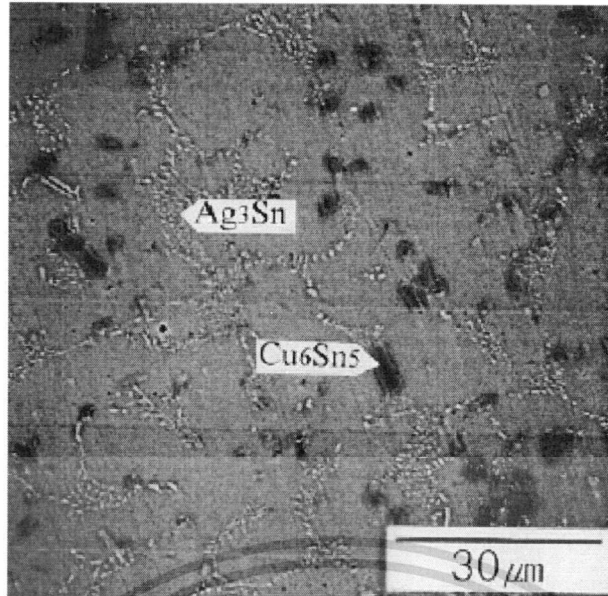
เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วนำไปลดอุณหภูมิในแอลกอฮอล์เพื่อทำให้แข็งตัวขึ้นซึ่งควรจะทำให้ความหยาบและการแยกตัวของอนุภาคที่ใช้เสริมขณะแข็งขึ้นน้อยที่สุด ก้อนโลหะบัดกรีที่ได้นำมาถูกรีดร้อนทำให้เป็นแผ่นบาง ซึ่งจะนำไปกดให้เป็นแผ่นกลมเล็กๆแล้วนำแผ่นโลหะบัดกรีที่ได้ไปหลอมอีกครั้งนำมันซิลิโคนในคอลัมน์ซึ่งอุณหภูมิค่อยๆสูงขึ้นสูงสุดที่ 250 องศาเซลเซียส ขณะที่ตกตะกอนในคอลัมน์โลหะบัดกรีค่อยๆกลายเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 760 ไมโครเมตร อันเนื่องมาจากแรงตึงผิว จากนั้นนำมาให้ความร้อนด้วยวิธี Reflow บนเครื่อง FR-4 ซึ่งปกติแล้วนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์ชนิด Ball Grid Array (BGA) โดยให้ความร้อนแบบหมุนเวียนในเตาอบ และมีพื้นผิวสัมผัสเป็นแผ่นทองแดง อุณหภูมิสูงสุดในการบัดกรีแบบ Reflow คือ 255 องศาเซลเซียส และอยู่ที่จุดหลอมเหลวประมาณ 160 วินาที

จากนั้นเอาชิ้นงานไปตรวจสอบจากภาพที่ 2.7 แสดงภาพที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกรรมวิธีใดๆ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ในโลหะพื้น (เมทริกซ์) และขนาดที่วัดได้อยู่ในช่วง 1-3 ไมโครเมตร หลังจากกระบวนการขึ้นรูปเป็นทรงกลมในคอลัมน์น้ำมัน พบว่าการกระจายยังคงมีรูปร่างแบบเดิม จากภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของลูกบอลโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากการ reflow ครั้งแรก บนฐานทองแดง พบว่าขนาดของการกระจายเพิ่มขึ้นในช่วง 2-5 ไมโครเมตร



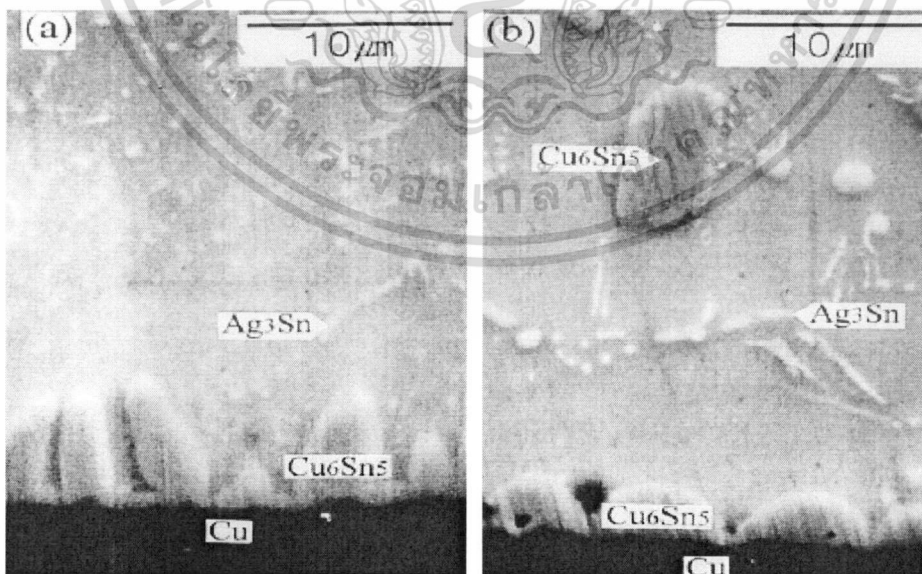
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกรรมวิธีใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

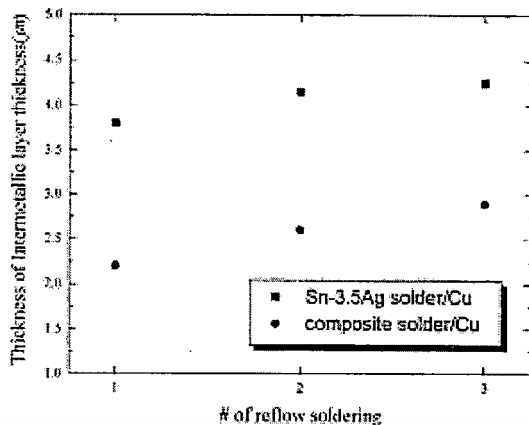


ภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากการ reflow ครั้งแรก

จากภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของจุดสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดงหลังจากได้รับการให้ความร้อนด้วยวิธี reflow ครั้งที่ 2 ในกรณีที่โลหะบัดกรีเป็นชนิด Sn-3.5Ag ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะมีโครงสร้างเป็นขอบกลมๆ ความหนาของชั้นที่วัดได้เพิ่มขึ้นเมื่อทำการให้ความร้อนด้วยวิธี reflow ซ้ำ สังเกตว่าลักษณะรูปร่างของชั้นระหว่างผิวสัมผัสที่ได้จากการใช้โลหะบัดกรีคอมโพสิตคือมีความเรียบและบางกว่า ตามภาพที่ 2.10 ความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีคอมโพสิตมีค่าน้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบปกติอยู่ครึ่งหนึ่ง โดยค่าความหนาเฉลี่ยสามารถหาได้จากพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาที่สังเกตได้หารด้วยความยาวของหน้าสัมผัสซึ่งสมมุติให้เป็นเส้นตรง



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของจุดสัมผัสระหว่างโลหะบัดกรีและแผ่นทองแดงหลังจากได้รับการให้ความร้อนด้วยวิธี reflow ครั้งที่ 2 a) โลหะบัดกรี Sn-3.5Ag b) โลหะบัดกรีคอมโพสิต  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 ความหนาของชั้นของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีคอมโพสิตต่อจำนวนครั้งในการ reflow

พบว่าขนาดเฉลี่ยของการกระจายเพิ่มขึ้นจาก 1.5 ไมโครเมตร ถึง 7 ไมโครเมตร หลังจากทำการ reflow ครั้งที่ 3 หนึ่งในลักษณะที่น่าสนใจของคุณลักษณะการ reflow ของโลหะบัดกรีคอมโพสิตคือ พบการกระจายหยาบ และการแยกตัวใกล้ผิวสัมผัสขณะทำการ reflow จากภาพที่ 2.11 เนื่องจากความหนาแน่นของโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag และสารประกอบ  $Cu_6Sn_5$  คือ  $7.33 \text{ g/cm}^3$  และ  $8.23 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ ตะกอนที่เกิดจากแรงดึงดูดอาจจะเป็นสาเหตุของการแยกตัวก็เป็นได้ ความเร็วในการตกตะกอนของโลหะบัดกรีหลอมเหลวประมาณการโดยใช้ Stokes' law เมื่ออนุภาคจมลงในของเหลวเนื่องจากแรงโน้มถ่วงดังสมการ

$$\eta = \frac{2R^2(\rho_d - \rho_s)g}{9\nu} g$$

- เมื่อ  $\eta$  คือ ความเร็วของโลหะบัดกรีที่หลอมละลายมีค่า  $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$   
 $R$  คือ รัศมีของอนุภาค  
 $\rho_d$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  
 $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของโลหะบัดกรี  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  
 $\nu$  คือ ความเร็วคงที่

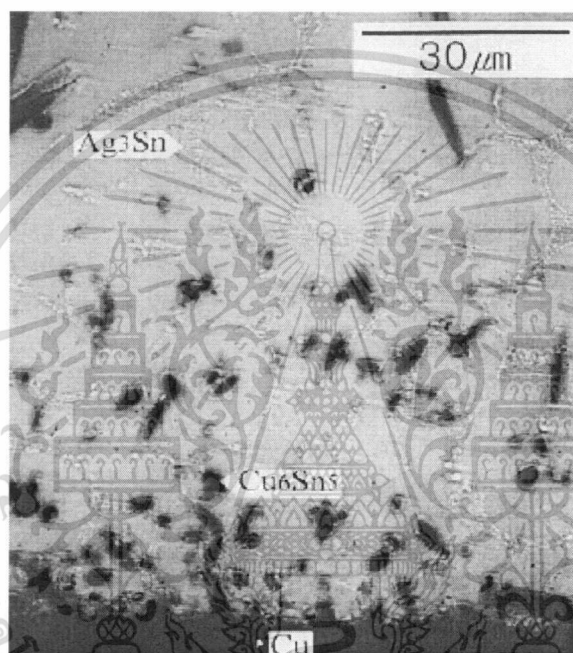
เมื่อความเร็วคงที่  $\nu = 1$  ไมโครเมตร/วินาที เมื่อรัศมีคือ 1 ไมโครเมตร ระยะทางรวมของการกระจายขณะทำการ reflow (เมื่อจับเวลาในการหลอมละลายของโลหะบัดกรีคือ  $160 \times 3$ ) ควรจะประมาณ 500 ไมโครเมตรซึ่งใกล้เคียงกับที่สังเกตได้จากการทดลอง ดังนั้นความเร็วของการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบฟังก์ชันกำลังสองของรัศมี และความหยาบของการกระจายควรช่วยในการตกตะกอน

ในการศึกษานี้สรุปว่าเป็นการอธิบายการเติมผงทองแดงลงในโลหะบัดกรีหลอมเหลวชนิด Sn-Ag ที่สามารถทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะของ  $Cu_6Sn_5$  ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากธาตุทองแดงที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับดีบุกแล้ว ยังมีธาตุเงิน (Ag) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงโลหะกับดีบุกโดยใช้โดยการเติมลงในโลหะบัดกรีเหลวชนิด Sn-Cu ซึ่งถูกรายงานโดย Tai และคณะดังต่อไปนี้

เป้าหมายในการพิสูจน์ในตอนนี้เป็นการพัฒนาโลหะบัดกรีคอมโพสิตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการคืบ การใช้วัสดุที่ไม่แพงและจำนวนของอนุภาคเสริมที่เติมลงไป การใช้อนุภาคนาโนเงินถึงแม้ว่าจะแพงแต่ก็เป็นอนุภาคเสริมที่ดี เพราะว่าธรรมชาติของมันจะไม่หยาบ เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวที่อุณหภูมิจำลองการใช้งานของดีบุก แต่ภายใต้เงื่อนไขด้านราคาทำให้โลหะบัดกรี Sn-0.7Cu ถูกคาดหวังให้เป็นโลหะบัดกรีคอมโพสิต โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจากโลหะบัดกรีแบบครีม โดยโลหะบัดกรีพื้นที่เลือกใช้คือโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.7Cu และเลือกใช้อุณหภูมิเงินเป็น secondary phase



ภาพที่ 2.11 การตกตะกอนของกลุ่มอนุภาคใกล้กับผิวสัมผัสหนึ่งจากการ reflow ครั้งที่ 3

อนุภาคนาโนบริสุทธิ์โดยมีขนาดของอนุภาคปกติอยู่ระหว่าง 10- 100 นาโนเมตร และมีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสัดส่วนของโลหะบัดกรีคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 - 5 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะทำไปใช้ต้องนำไปผ่านกระบวนการแช่เพื่อให้อนุภาคปราศจากออกไซด์ โลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้ จะถูกนำมาผสมกับอนุภาคนาโนด้วยวิธีทางกล อย่างต่ำ 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่ามีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยสัดส่วนการผสมโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ใช้ทดลองได้แสดงดังตารางที่ 2.1

วิธีการทดสอบสามแบบคือ การทดสอบความสามารถในการบัดกรี คือได้ทำการทดสอบการแผ่กระจายตามมาตรฐานนานาชาติ รหัส GB11364-89 “The Testing Method of Spreadability and Clearance Fillability of Solder” โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นฐานที่มีขนาด 40×40×0.2 มิลลิเมตร โดยเอาไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์600 แล้วนำไปจุ่มในเอทานอล เป็นระยะเวลา 5 นาทีเพื่อให้ได้พื้นผิวที่สะอาด แล้วนำน้ำหนักของโลหะบัดกรีเหลวที่ใช้หนัก 0.227 กรัม และการทดสอบการกระจายที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักของโลหะบัดกรีและอนุภาคเงินที่ใช้สำหรับสร้างโลหะบัดกรีคอมโพสิต

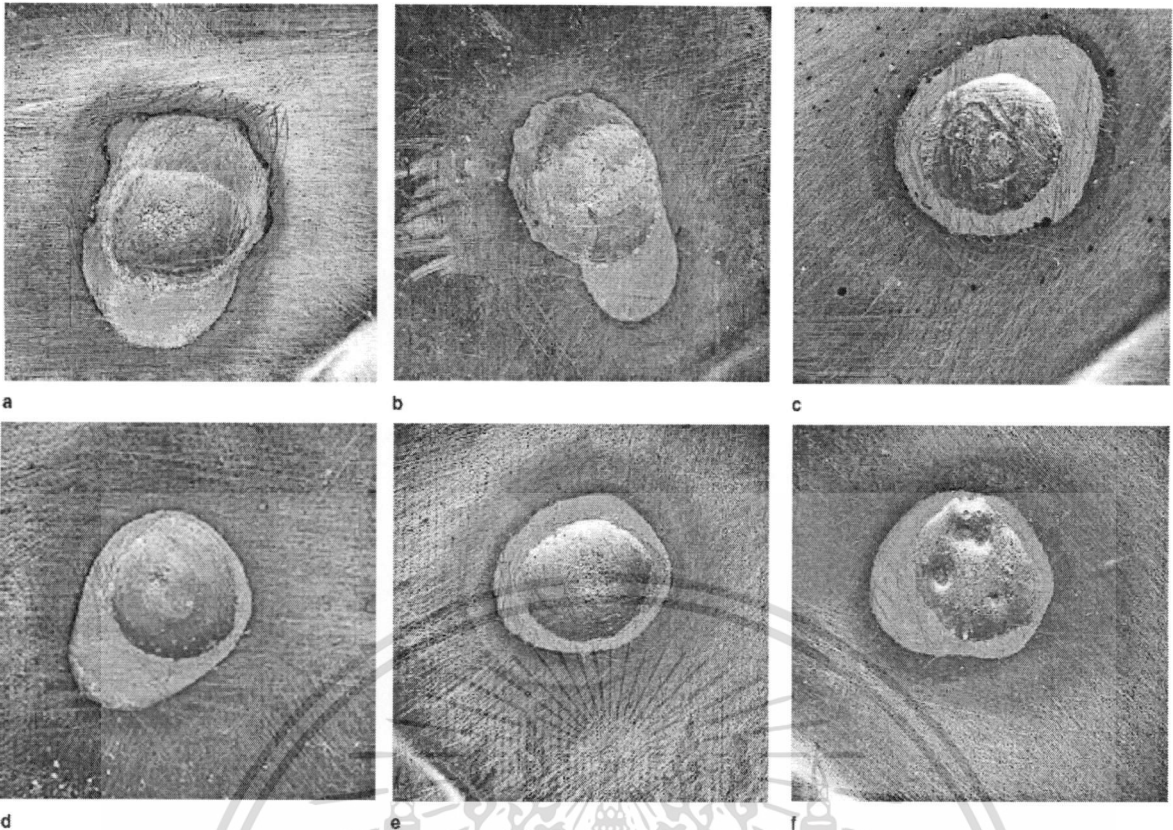
ส่วนประกอบ	Sn-0.7Cu	ฟลักซ์	อนุภาคเงิน				
สัดส่วน (%)	88	12	0.5	1	2	3	5
ปริมาณ (กรัม)	5	0.785	0.0347	0.07	0.141	0.2137	0.365
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	7.6		10.5				

รอยต่อของโลหะบัดกรีโดยจะใช้ฐานทองแดงขนาด 80×25×3 มิลลิเมตร รอยต่อโลหะบัดกรีที่ได้จากการให้ความร้อนประกบแผ่นทองแดงโดยมีโลหะบัดกรีชนิดเหลวอยู่ภายในและให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 280 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 5 นาที แล้วลดอุณหภูมิเตาอบเหลือ 100 องศาเซลเซียสอีก 1 ชั่วโมง ต่อจากนั้นรอยต่อโลหะบัดกรีทั้งหมดถูกนำออกมาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งงานทดสอบความเค้นเฉือนที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ โดย MTS810.22M/Teststar IIS โดยให้มีแรงเฉือนสูงสุด 100 KN และใช้ความเร็วโหลด 1 มิลลิเมตรต่อนาทีและ การทดสอบการแตกหักของรอยต่อเนื่องจากการคืบโดยกำหนดเงื่อนไขตามจริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ความหนาของรอยต่อของโลหะบัดกรีอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตรและพื้นที่ควบคุมที่ 1 ตารางมิลลิเมตรโดยอุปกรณ์ยึดจับพิเศษการทดสอบการคืบทำในตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่โดยมีนาฬิกาจับเวลาเวลาที่ผ่านไปก่อนที่จะเกิดการแตกหักโดยระยะเวลาในการแตกหักแทนการแตกหักเนื่องจากการคืบของมัน ในขั้นต้นการทดสอบการแตกหักเนื่องจากการคืบของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ปริมาณเงิน 0.5%, 1%, 2% และ 3% ที่ 75 องศาเซลเซียสและแรงกด 1.65 กิโลกรัม

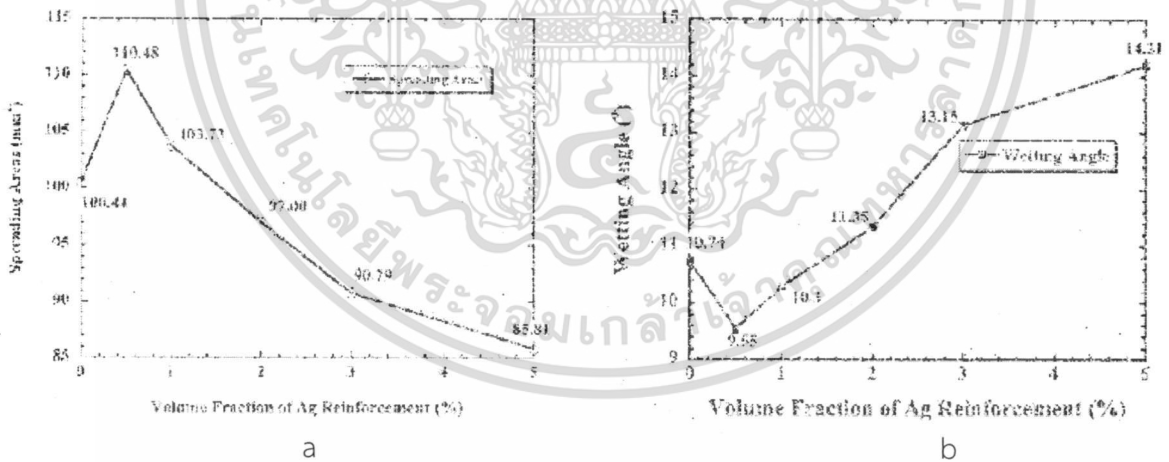
การศึกษาขั้นต้นเหล่านี้ข้อมูลของการแตกหักเนื่องจากการคืบ พร้อมทั้ง ความสามารถในการบัดกรี และผลการทดสอบความเค้นเฉือน นำมาใช้เพื่อประเมินสัดส่วนของอนุภาคนาโนที่ดีที่สุด ที่อุณหภูมิและแรงกดต่างๆ โดยอุณหภูมิมีการเบี่ยงเบนน้อยกว่า 2 องศาเซลเซียส ลักษณะของรอยแตกของโลหะแล้วนำไปส่องดูรอยแตกของรอยต่อของโลหะบัดกรี

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.12 - 2.13 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการกระจายตัวของโลหะบัดกรีโดยในภาพที่ 2.12c แสดงโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu ที่ได้รับการเสริมด้วยอนุภาคนาโนเงินปริมาณ 1% โดยรูปร่างค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นทรงกลม และเมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าลักษณะผิวบนแผ่นทองแดงดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีคอมโพสิตในอัตราส่วนอื่นๆ และภาพที่ 2.13a และ 2.13b เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การกระจายและมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีเมื่อเทียบกับสัดส่วนการเติมอนุภาคเงิน ทั้งสองรูประบุว่าคุณสมบัติเปียกลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่เติมลงไปเพิ่มมากขึ้น แต่คุณสมบัติเปียกไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสริมอนุภาคในปริมาณที่น้อย โดยโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการเสริมด้วยอนุภาคนาโนเงินปริมาณ 0.5% และ 1% แสดงผลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเปียกของโลหะบัดกรีคอมโพสิต

คอมโพสิตที่ได้รับการเสริมด้วยอนุภาคเงิน 1% ให้ระยะเวลานานที่สุดจนกระทั่งรอยต่อแตกหักเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีสัดส่วนอื่นๆที่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า จากผลทั้ง ความสามารถในการบัดกรี ความเค้นเฉือนและการทดสอบการแตกหักเนื่องจากการคืบเบื้องต้น สรุปว่า การเติมปริมาณการเติมสัดส่วนนาโนเงิน 1% เป็นสัดส่วนการเติมที่เหมาะสมสำหรับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.7Cu



ภาพที่ 2.12 การทดสอบความสามารถในการบัดกรีบนแผ่นทองแดง (a) Sn-0.7Cu, (b) Sn-Cu + 0.5% Ag, (c) Sn-Cu + 1% Ag, (d) Sn-Cu + 2% Ag, (e) Sn-Cu + 3% Ag และ (f) Sn-Cu + 5% Ag.

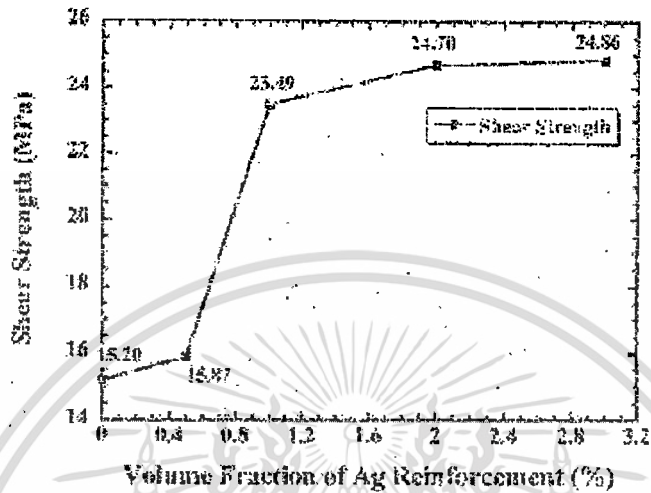


ภาพที่ 2.13 อิทธิพลของปริมาณอนุภาคนาโนเงินต่อ Wettability ของโลหะบัดกรีคอมโพสิต a) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การกระจายของโลหะบัดกรีคอมโพสิตและปริมาณอนุภาคนาโนเงิน b) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีคอมโพสิตและปริมาณอนุภาคนาโนเงิน

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลจากภาพที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนของแรงเฉือนเดี่ยวสูงสุดของโลหะบัดกรีเมื่อเทียบกับปริมาณอนุภาคเงิน โดยทั่วไปแล้วแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนของอนุภาคนาโนเงินที่เพิ่มขึ้น จากการประมาณการพบว่า การเติมอนุภาคนาโนเงินมากกว่า 1% สามารถเพิ่มแรงเฉือนของรอยต่อของโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu มากกว่า 50% และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบจากภาพที่ 2.15 แสดงระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการทดสอบปริมาณอนุภาคนาโนที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ภายใต้ความเค้น 16.17 MPa ซึ่งระบุว่ารอยต่อของโลหะบัดกรี



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อของโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคนาโนเงิน

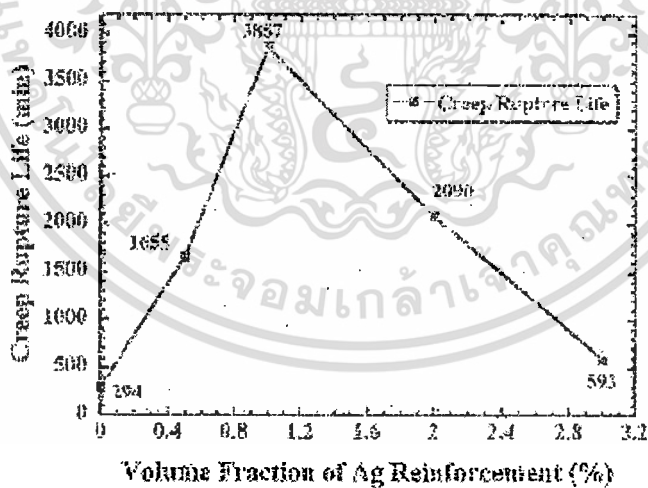
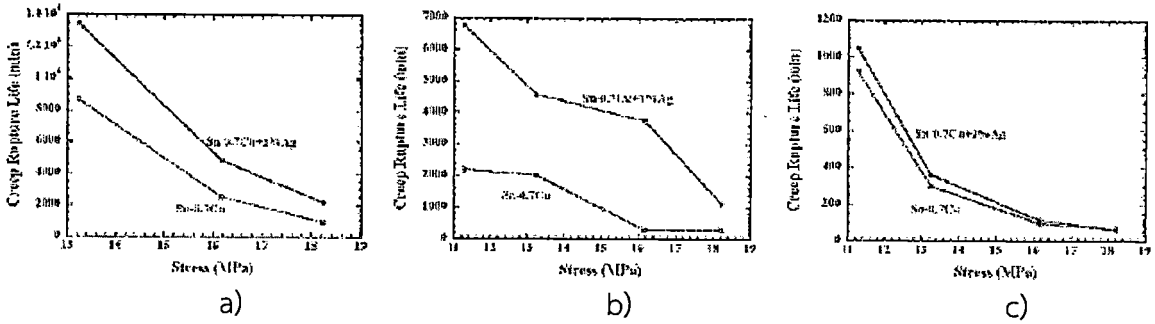


Fig. 5. Creep rupture lives of composite solder joints as a function of Ag particle volume fraction tested at 75°C under an applied stress of 16.17 MPa.

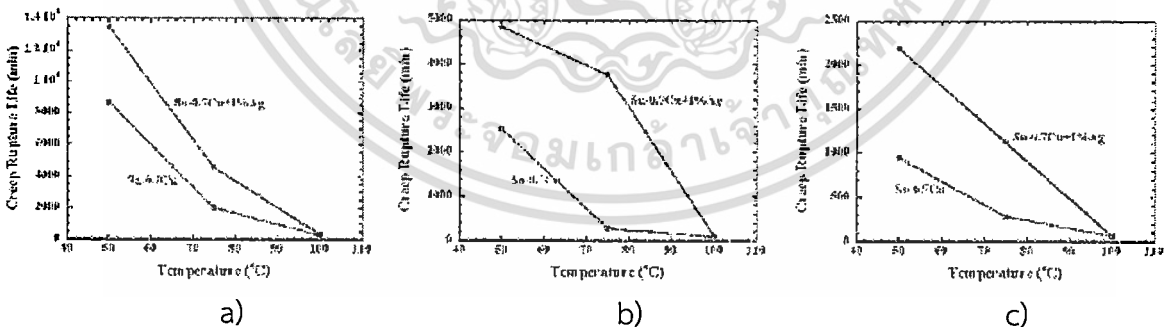
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคนาโนเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตกับปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิต่างๆ a) 50°C, b) 75°C และ c) 100 °C

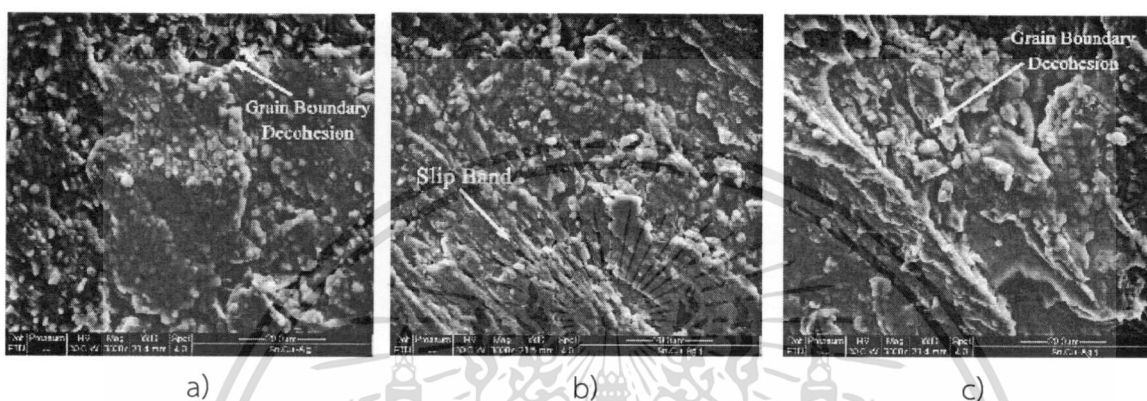
ระบบการทดสอบการแตกหักเนื่องจากการคืบของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ปริมาณอนุภาคเงินนาโน 1% ที่อุณหภูมิและแรงเค้นระดับต่างๆ โดยภาพที่ 2.16a - 2.16c แสดงแทนรอยต่อของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับแรงเค้นที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกับการทดสอบการแตกหักเนื่องจากการคืบ โดยวาดกราฟเพื่อนำมาเปรียบเทียบ สำหรับทั้งโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตพบว่าระยะเวลาในการทดสอบการแตกหักลดลงเมื่อได้รับแรงเค้นเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 2.16 จะเห็นว่าการแตกหักเนื่องจากการคืบของโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu เพิ่มขึ้นจากเดิมเมื่อได้รับการผสมด้วยอนุภาคเงิน 1% และภาพที่ 2.16a - 2.16c จะเห็นว่าการเสริมจะมีผลอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำ ภาพที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการแตกหักเนื่องจากการคืบที่อุณหภูมิต่างๆ และแรงเค้นที่ได้รับต่างกัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นที่ชัดเจนแล้วว่าทั้งสองวัสดุมีระยะเวลาแตกหักลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นที่แรงเค้นทุกระดับ เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าโลหะบัดกรีที่ได้รับการเสริมอนุภาคนาโนปริมาณ 1% มีระยะเวลาในการแตกหักที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากการคืบมากกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.7Cu โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่ความเค้นต่างๆ a) 13.23 MPa, b) 16.17 MPa และ c) 18.13MPa

ผิวรอยแตกของโลหะบัดกรีคอมโพสิตของ Sn-0.7Cu ที่ได้รับการเสริมด้วยอนุภาคเงินนาโน 1% แสดงให้เห็นในภาพที่ 2.18a - 2.18c ที่อุณหภูมิต่างกัน ที่การทดสอบทุกอุณหภูมิและความเค้น พบลักษณะของการเลื่อนและการไม่ประสานกันที่ขอบเกรนของทุกรอยต่อบัดกรีที่นำมาเป็นตัวอยางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังระบุว่ารอยแตกจะเริ่มที่ขอบของเกรนระหว่างตีบุกและตีบุก ซึ่งโดยปกติโลหะบัดกรีที่ทำจากตีบุกเป็นวัสดุพื้นฐาน ในบริเวณขอบเกรนมักจะไม่แข็งแรงเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิไม่สอดคล้องกันระหว่างเกรนตีบุกที่ติดกันเมื่อได้รับผลของแรงที่กระทำและอุณหภูมิ ทำให้เกิดความเค้นภายในเนื้อวัสดุ โดยการเติมอนุภาคเงินนาโนน่าจะสามารถเป็นหลักสำคัญของขอบเกรน โดยถ้าอนุภาคนาโนเหล่านั้นไปอยู่ในบริเวณขอบเกรนระหว่างตีบุกจะช่วยเป็นอุปสรรคในการเสีรูบ อนุภาคนาโนเหล่านี้ไม่ว่าจะอยู่ในโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu ในรูปแบบของการกระจายตัวอย่างดี เกาะกลุ่มกัน หรือสารประกอบเชิงโลหะ Ag<sub>3</sub>Sn ก็จะได้ว่าเป็นการเสริมแรงที่เป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณสมบัติการคืบ

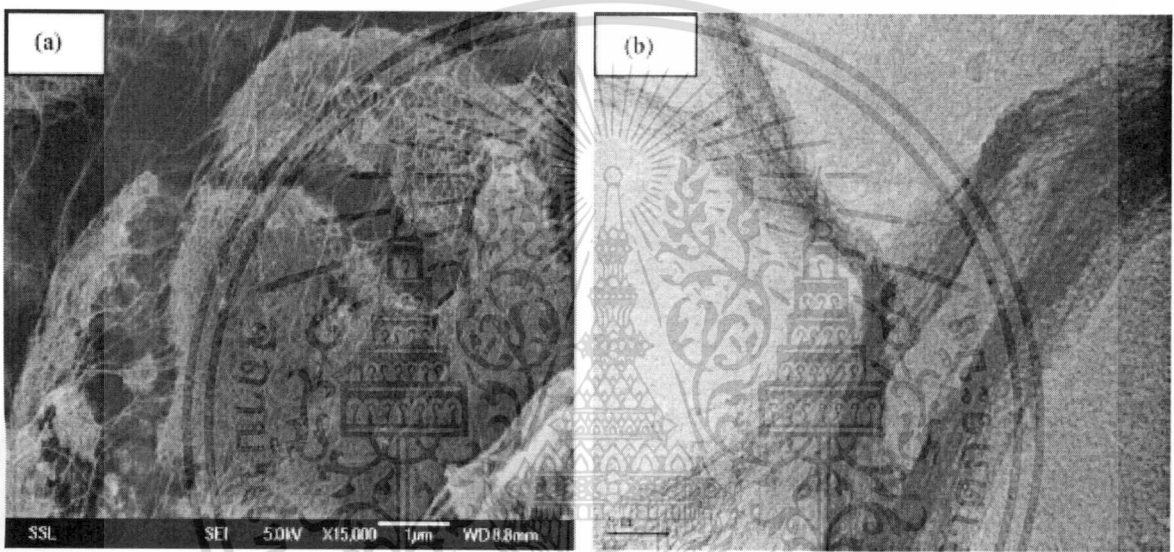


ภาพที่ 2.18 ลักษณะการแตกหักจากการคืบของรอยต่อโลหะบัดกรีคอมโพสิตปริมาณอนุภาคเงิน 1 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆ a) ที่ 50°C 18.13 MPa, b) ที่ 75°C 13.23 MPa และ c) ที่ 100°C 11.27 MPa

ในบทความนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติการคืบ ระยะเวลาในการแตกหักเนื่องจากการคืบ เนื่องจากการเสริมแรงให้กับโลหะบัดกรีคอมโพสิต Sn-0.7Cu และรอยต่อของโลหะบัดกรีด้วยอนุภาคเงิน และยังตรวจสอบการผสานของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้กับแผ่นทองแดงพบว่า มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเปียกยังไม่ดีผลอย่างมีนัยสำคัญกับสัดส่วนของอนุภาคเงินเมื่อการเสริมแรงจำนวนน้อย และที่การเสริมอนุภาคนาโนเงิน 0.5% และ 1% ให้ผลดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu และแรงเฉือนของรอยต่อของโลหะบัดกรีคอมโพสิตมีค่ามากกว่าโลหะบัดกรี Sn-0.7Cu เมื่อปริมาณสัดส่วนของอนุภาคมากกว่า 1% และที่ 75 องศาเซลเซียสเมื่อได้รับแรงเค้น 16 MPa มีระยะเวลาการแตกหักเนื่องจากการคืบนานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อของโลหะบัดกรีที่ได้รับการผสมอนุภาคนาโนในสัดส่วนอื่นๆ ดังนั้นการเสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนที่ปริมาณ 1% จึงได้รับการพิจารณาให้เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ช่วยให้โลหะบัดกรี Sn-0.7Cu มีคุณสมบัติที่ครอบคลุม และเมื่อพิจารณาในเรื่องของอุณหภูมิและแรงเค้นที่กระทำต่อรอยต่อของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโนปริมาณ 1% พบว่า มีผลในการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าในอุณหภูมิต่ำ โดยสรุปแล้วแนวคิดในการเติมอนุภาคเงินจำนวนเล็กน้อยลงในโลหะบัดกรีที่ทำจากวัสดุราคาไม่แพงค่อนข้างจะประสบความสำเร็จในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ

แต่วัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยากันก็สามารถนำมารวมกันได้ซึ่ง Kumar และคณะ เคยได้ทดลองผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในโลหะบัดกรี Sn-Ag-Cu เป้าหมายของงานที่กำลังจะทำคือศึกษารูปร่างโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติการหลอมละลายของโลหะบัดกรีคอมโพสิตชนิดตีบุกเงินและทองแดงเมื่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ในสัดส่วนต่างๆโดยส่วนประกอบที่เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่จะขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ได้แก่ท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีตกสะสมไอเคมี (chemical vapor deposition คำย่อ: CVD) ตามภาพที่ 2.19 ท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.2 นาโนเมตร และความยาว 5-10 ไมโครเมตร ส่วนผงโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu มีขนาด 2-11 ไมโครเมตรนำทั้งโลหะบัดกรีและท่อานาโนคาร์บอนมาผสมกันด้วยเครื่องผสมรูปกรวยตัววี (V-cone blender) ระยะเวลา 15 ชั่วโมง ด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เพื่อให้โลหะบัดกรีและท่อานาโนคาร์บอนผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ผงที่ผสมได้นำมาบีบอัดเย็น (cold compacted) ที่แรงดัน 120 บาร์ เป็นระยะเวลา 30 วินาทีเพื่อให้ได้ความหนาแน่นของวัสดุที่ถูกบีบอัด (green compact) สูงขึ้น จากนั้นจึงนำไปทำการสตุ (Sintering) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซเฉื่อย ชิ้นงานที่ได้รับการสตุแล้วจึงออกมาอัดรีดเย็น (cold extrusion) ที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราส่วนการอัดรีด 20:1



ภาพที่ 2.19 ภาพท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว b) ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีตกสะสมไอเคมี

จากนั้นนำแท่งชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตถูกตัดแบ่งเพื่อนำไปสังเกตโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่จะเอาไปวิเคราะห์จะถูกนำไปเตรียมชิ้นงานทางโลหะแบบมาตรฐาน โดยขีดที่ความละเอียดสูงสุดที่ 0.02 ไมโครเมตร แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดรุ่น HITACHI 4100 ที่ 10kV และวิเคราะห์ธาตุเพื่อระบุเฟสให้สมบูรณ์โดยใช้เครื่อง EDX ที่ติดตั้งเพิ่มอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจากการสังเกตลักษณะของชิ้นงานโลหะบัดกรีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด field-emission ซึ่งแสดงลักษณะดังนี้ คือ โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปแล้วประกอบเกรนชนิด อีคิวแอกซ์ ในโลหะพื้นดีบุกเฟสบีตา ภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.20b - 2.20f เพื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ยังไม่ได้เจืออนุภาคเสริมโดยแสดงในภาพที่ 2.20a

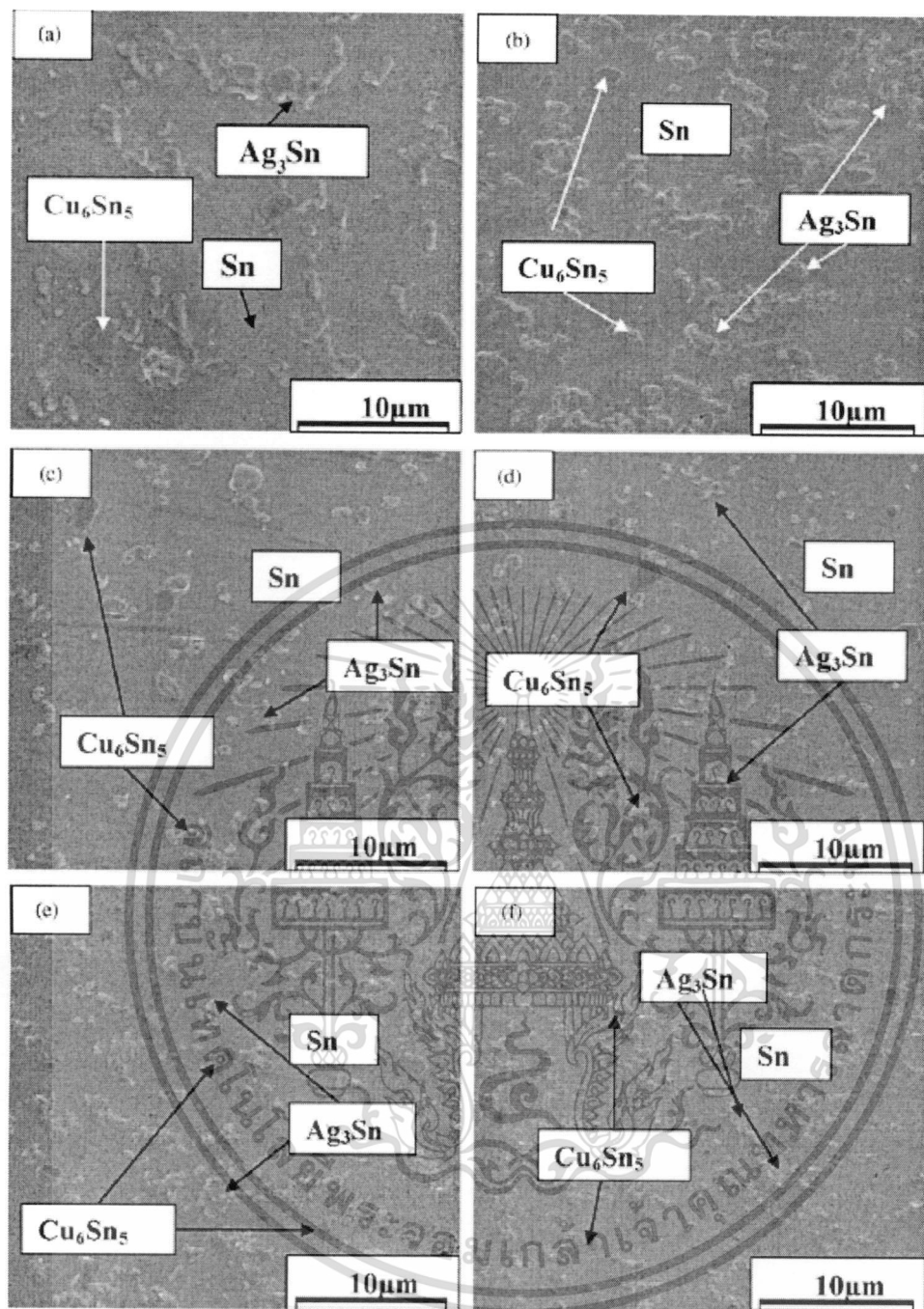
จากภาพที่ 2.20 เป็นภาพโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสิ่งที่สังเกตได้จากโครงสร้างจุลภาค คือมีเกรน 2 ชนิด เกรนชนิดแรกมีลักษณะกลมๆที่มีสีเทาเข้มคือสารประกอบ  $Cu_6Sn_5$  และเกรนสีเทาอ่อนทรงกลมคือ  $Ag_3Sn$  เกรนทั้งสองชนิดมีการเติบโตของเกรนทุกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางทำให้มีลักษณะเป็นทรงกลม สารละลายของแข็งเฟสที่สองเหล่านี้ขนาดรูปร่างเฉลี่ยประมาณ 3.75 ถึง 4.25 ไมโครเมตรแทรกในโลหะบัดกรีชนิดดีบุกเงินและทองแดงที่ยังไม่ได้ทำการเสริม และที่การเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ด้วยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเกรนเหล่านี้จะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 0.5 ถึง 0.8 ไมโครเมตร

จากตัวอย่างโลหะบัดกรีที่เสริมด้วยอนุภาคเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวพบการกระจายของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวที่บริเวณขอบของเกรนทรงกลมของเฟส  $Ag_3Sn$  ซึ่งสามารถระบุได้โดยดูที่ความแตกต่างของความสว่าง โดยพิจารณาพร้อมกับความแตกต่างของเลขอะตอมของแต่ละเฟส ซึ่งในด้านที่สว่างกว่าจะแสดงถึงเลขอะตอมที่มากกว่า ส่วนในเฟสที่เข้มกว่าจะอ้างถึงเลขอะตอมที่ต่ำกว่า เมื่อพิจารณารูปจากการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จาก EDX แสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งยอดที่สูงๆของ “C” แทนการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนที่ขอบของเกรน  $Ag_3Sn$  ซึ่งแสดงว่าการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวภายในโลหะบัดกรียังคงเหลืออยู่ในตัวอย่างหลังจากกรรมวิธีการสตัแล้ว

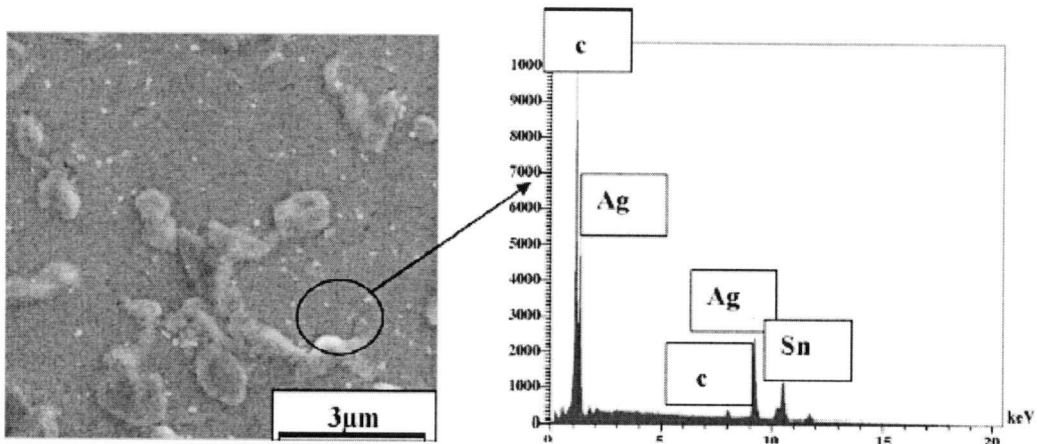
จากภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่อหาขนาดรูปร่างเฉลี่ยของเฟสสองของชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิต มันระบุว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปยับยั้งการโตของเกรนทำให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยลดลงกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้เติมท่อนาโนคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปร่างเฉลี่ยของเฟสที่สองของโลหะบัดกรีที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงจะเป็นรูปร่างกลมประมาณ 3.75 ถึง 4.25 ไมโครเมตร จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเปอร์เซ็นต์โดนนํ้าหนักของอนุภาคเสริมที่เติมลงไปมีผลต่อการกระจายและขนาดของเกรน โดยสามารถดูได้จากขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่ของภาพที่ 2.20a จะมีขนาดลดลงจากชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่เสริมด้วยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจากภาพที่ 2.20f

สาเหตุที่เป็นไปได้น่าจะเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคเสริม โดยท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุเซรามิก ในกระบวนการสร้างโลหะบัดกรีคอมโพสิตนั้นการโตของเฟส  $Ag_3Sn$  สามารถถูกหยุดได้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนอย่างยิ่งยวดที่ของวัสดุเซรามิก ขณะการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสตั [23] การเสริมโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในภาพที่ 2.20 ด้วยการเปลี่ยนปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว พิสูจน์ให้เห็นว่า โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการสตัแล้วขึ้นอยู่กับรูปร่างของโลหะคอมโพสิตและรูปร่างลักษณะของวัสดุตั้งต้นที่ใช้



ภาพที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu และโลหะบัดกรีคอมโพสิตต่างๆของ Sn-3.8Ag-0.7Cu (a) โลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิตที่แสดงโครงสร้างเกรนและการกระจายตัวของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  และ  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  พร้อมกับ CNTs (b) Sn-3.8Ag-0.7Cu + 0.01 wt% SWCNT, (c) Sn-3.8Ag-0.7Cu + 0.03 wt% SWCNT, (d) Sn-3.8Ag-0.7Cu + 0.08 wt% SWCNT (e) Sn-3.8Ag-0.7Cu + 0.1 wt% SWCNT, (f) Sn-3.8Ag-0.7Cu + 1 wt% SWCNT แสดงชิ้นงานโลหะบัดกรีที่ได้รับการเสริมแล้วมีโครงสร้างเกรนละเอียดขึ้น

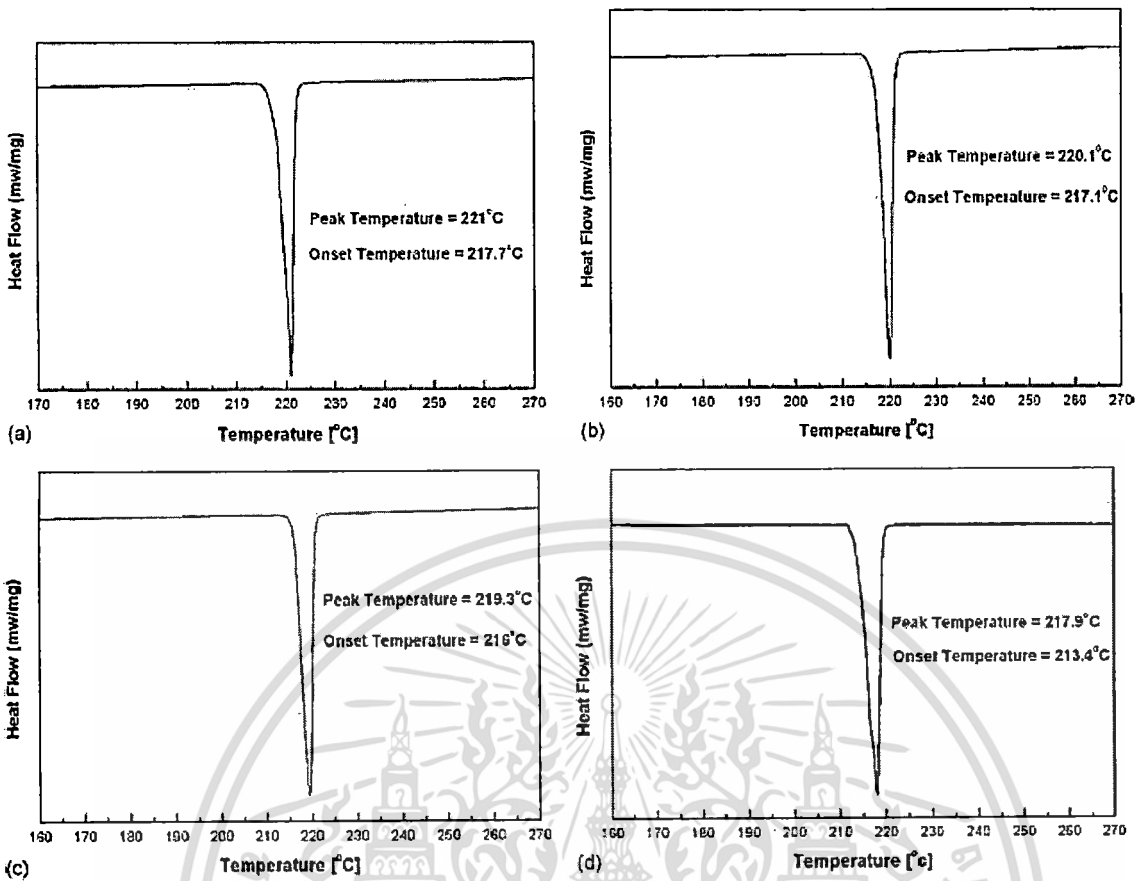
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.21 การกระจายของท่อนาโนที่ขอบของเกรน  $Ag_3Sn$  และ EDX สเปกตรัม

จากการตรวจสอบ DSC ของโลหะบัดกรีคอมโพสิต (ภาพที่ 2.22) เป็นที่แน่ชัดว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงในโลหะบัดกรีเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งจุดที่อุณหภูมิเริ่มลดลงและอุณหภูมิสูงสุดของโลหะบัดกรีตีบูกเงินทองแดง ผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวลงในโลหะบัดกรีตีบูกเงินทองแดงทำให้เกิดการลดลงของทั้งจุดที่อุณหภูมิเริ่มลดลงและจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีตีบูกเงินทองแดง สาเหตุที่น่าจะเป็นไปได้เนื่องจากการลดลงของจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความไม่เสถียรที่ผิว ประกอบกับพลังงานอิสระที่ผิวมากขึ้นเพราะ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่เติมลงไปเคลือบอยู่ ยิ่งไปกว่านั้นผลของขนาดท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะขอบเกรนและผิวสัมผัสของเกรนของโลหะบัดกรีคอมโพสิตทั้งๆที่ การเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนนาโนสามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีคอมโพสิตให้เกรนมีขนาดเล็กลงมากขึ้น เนื่องจากการยับยั้งการเติบโตของเกรน แต่พลังงานอิสระที่ผิวของขอบเกรน (surface free energy) และพลังงานอิสระที่ผิวสัมผัส (interfacial free energy) ยังไม่ถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ทำให้การโตของเกรนยังเกิดขึ้นในโลหะบัดกรี เนื่องจากการโตของเกรนถูกจำกัดไว้ด้วย ทำให้ค่าพลังงานอิสระที่ผิวของขอบเกรนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่ไม่ได้รับการเสริมแรง เพราะฉะนั้น ในชิ้นงานเหล่านี้จะพบการลดลงของจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่ได้รับการเสริมแรง

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมทางกลจากตารางที่ 2.2 แสดงค่าของรอยยุบในหน่วยวิกเกอร์ส จากค่าความแข็งของวิกเกอร์พบว่าความลึกของโลหะบัดกรีตีบูกเงินทองแดงที่ได้รับการเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ได้ทำการเสริมอย่างชัดเจน ซึ่งพบว่าค่าความแข็งในหน่วยวิกเกอร์สของท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาใช้เสริมแรงมีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรี  $Sb-3.8Ag-0.7Cu$  บริสุทธิ์ และลักษณะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่ขอบเกรนของ  $Ag_3Sn$  สามารถเป็นตัวช่วยเพิ่มค่าความแข็งได้



ภาพที่ 2.22 เส้นอุณหภูมิจาก Differential Scanning Calorimetry (a) Sb-3.8Ag-0.7Cu, (b) Sb-3.8Ag-0.7Cu+0.03wt%, (c)Sb-3.8Ag-0.7Cu+0.1wt%, (d)Sb-3.8Ag-0.7Cu+1wt%,

ดังที่ระบุในตารางที่ 2.2 ค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ได้รับการเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว โดยเมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวลงในโลหะบัดกรี Sb-3.8Ag-0.7Cu ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะบัดกรีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจาก 158.8 เป็น 187.3 MPa

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิต

Alloy type	Microhardness (MPa)	UTS (MPa)	Ductility (%)
SAC	158.8 ± 2.4	37.72 ± 1.53	33.32 ± 1.01
SAC+0.01CNT	160.8 ± 1.4	40.39 ± 1.78	32.79 ± 0.72
SAC+0.03CNT	163.8 ± 1.2	41.48 ± 1.92	28.72 ± 0.89
SAC+0.08CNT	172.6 ± 2.3	44.28 ± 1.35	27.32 ± 1.52
SAC+0.1CNT	178.5 ± 2.4	48.65 ± 1.42	26.57 ± 1.18
SAC+0.8CNT	184.4 ± 1.79	53.47 ± 1.96	23.28 ± 1.05
SAC+1CNT	187.3 ± 1.9	56.74 ± 1.39	24.36 ± 0.91

SAC, Sn-3.8Ag-0.7Cu solder; UTS, ultimate tensile strength.

จากภาพที่ 2.16 เป็นเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด(Stress-Strain Curve) ของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากการทดสอบแรงดึง(Tensile Test) จุดประสงค์ของการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น ความเครียด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโลหะบัดกรีตีบุกเงินทองแดงแสดงในภาพที่ 2.16a ซึ่งจากรูปพบว่าชิ้นงานโลหะบัดกรีทุกชิ้นมีค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength คำย่อ: UTS) สูงกว่าชิ้นงานโลหะบัดกรีตีบุกเงินทองแดงบริสุทธิ์ และชิ้นงานมีการยึดตัวลดลงเหลือเกือบ 23 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากมีการเสียหายแบบเหนียว

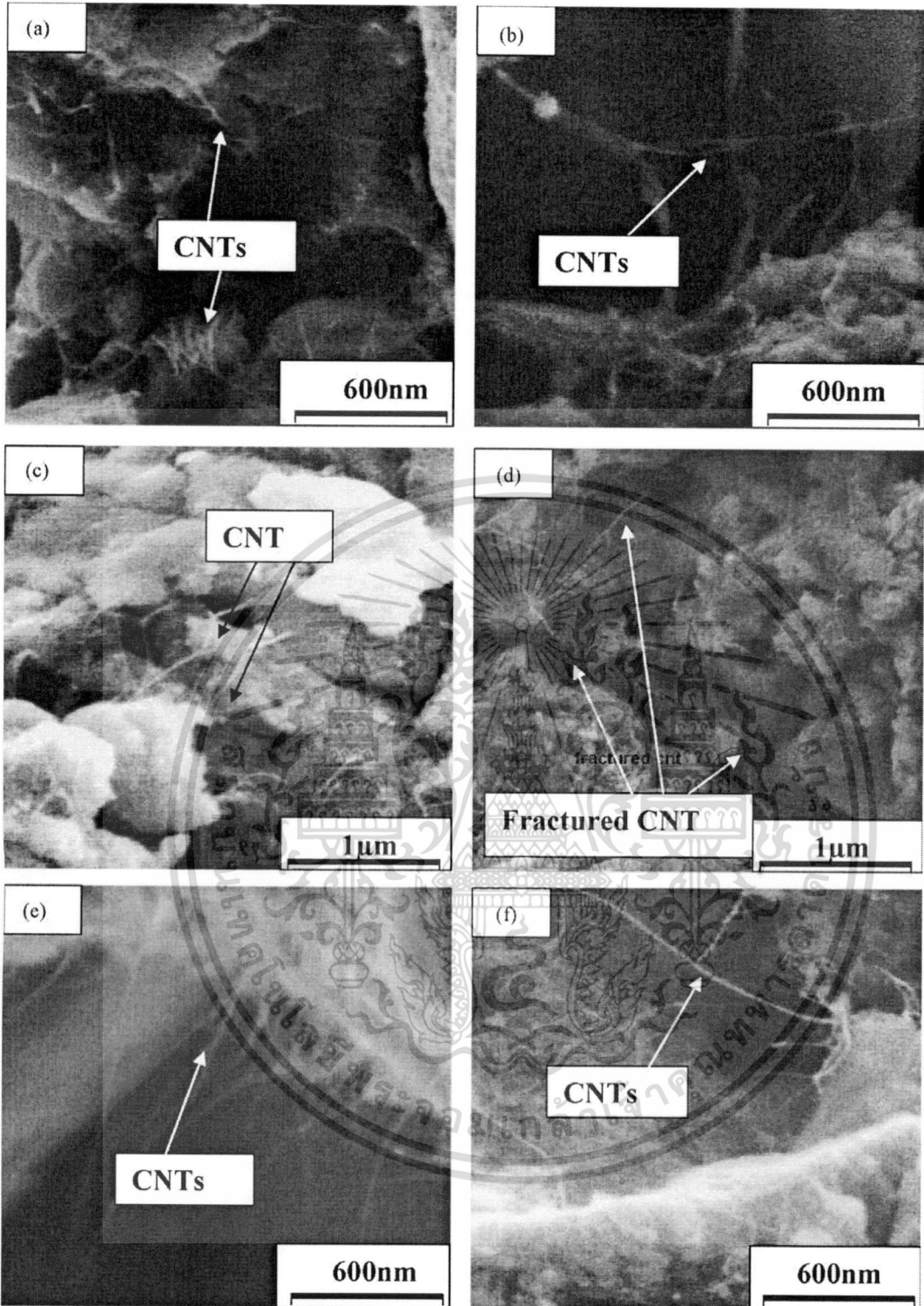
จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของการเติมท่อานาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ จะสังเกตว่าท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมีบทบาทที่สำคัญต่อคุณสมบัติของโลหะบัดกรีคอมโพสิต เนื่องจากเกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งมีค่าแรงดึงสูงสุดและความเหนียวสูง การสร้างสารประกอบคอมโพสิตด้วยการใช้ท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าทนแรงดึงสูงกว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์อื่นๆที่นำมาเสริมแรง ค่าความเครียดที่สูงขึ้นอาจจะเนื่องมาจากปริมาณสัดส่วนที่สูงขึ้นของท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในโลหะบัดกรีที่นำมาเสริมแรง

จากตารางที่ 2.2 จะสังเกตได้ว่าการเติมท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวปริมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลต่อค่าแรงดึงสูงสุดน้อยมาก แต่โลหะบัดกรีที่ได้รับการเสริมแรงปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดมีสูงขึ้นซึ่งค่าแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นถึงเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มเหมือนกันเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณท่อานาโนคาร์บอนที่เติม โดยเมื่อเติม 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าแรงดึงสูงสุดค่าเพิ่มขึ้นเป็น 42.33MPa ในทำนองเดียวกัน การเติมท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าแรงดึงสูงสุดค่าเพิ่มขึ้นเป็น 44.28 MPa ซึ่งสูงขึ้นเกือบจะ 17.4% เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีตั้งต้น

จากภาพที่ 2.23 พบว่าท่อานาโนคาร์บอนกระจายอยู่ที่ขอบของสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะคอมโพสิตประกอบไปด้วยเส้นใยของท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวเกรนของ  $Ag_3Sn$  และโลหะบัดกรีพื้นฐาน เส้นใยของท่อานาโนคาร์บอนและบริเวณเฟส  $Ag_3Sn$  เป็นเส้นใยเปราะหักได้เมื่อนำมาเสริมแรงในโลหะบัดกรีคอมโพสิต จากลักษณะแบบนี้การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีคอมโพสิตแสดงให้เห็นและอธิบายรายละเอียดในส่วนของการศึกษารอยแตกจากภาพ (Fractography) และการเพิ่มขึ้นคุณสมบัติทางกลของสารประกอบคอมโพสิตที่ได้รับการเสริมแรงด้วยท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวสาเหตุน่าจะมาจากการเสีรูปร่างเนื่องจากอุณหภูมิที่ไม่พอดีกัน และการทำให้ขนาดเกรนละเอียดขึ้นตามรูปโครงสร้างจุลภาค ยิ่งไปกว่านั้นก็มีกลไกการกระจายน้ำหนักจากโลหะบัดกรีไปยังท่อานาโนคาร์บอน ทำให้โลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้จากท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว มีความน่าเชื่อถือในการปรับปรุงคุณสมบัติทนแรงดึงอีกด้วย

เมื่อไรก็ตามที่ชิ้นงานโลหะบัดกรีได้รับแรง แรงจะถูกส่งผ่านไปยังท่อานาโนคาร์บอนด้วยกลไกในการเฉือน ทำให้ความเค้นเฉือนสามารถกระจายได้ในทิศทางตามยาว และเมื่อพันธะที่ผิวสัมผัสเอาชนะแรงเฉือนจะทำให้ชิ้นงานคอมโพสิตสามารถรับแรงได้มากขึ้น กลไกการส่งผ่านแรงจากมีอยู่ 3 ประเภท (1) การล็อกเชิงกล (micromechanical interlocking), (2) พันธะทางเคมีที่ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุที่ใช้เสริมและวัสดุตั้งต้น, (3) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) ระหว่างเมทริกซ์และท่อานาโนคาร์บอน ในการศึกษาปัจจุบัน ยังไม่พบการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างท่อานาโนคาร์บอนและโลหะบัดกรี ดังนั้นยังคงเหลืออีกสองกลไกที่สามารถมีผลในการส่งผ่านแรง

เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงเพื่อที่จะตรวจสอบชิ้นงานที่ทำให้แตกขณะรับแรงดึง จากการสังเกตแสดงว่าความเสียหายทั้งหมดโลหะบัดกรีของการเชื่อมท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวกับโลหะบัดกรีคอมโพสิตมีรอยแตกเกิดจากการทำให้ยึด



ภาพที่ 2.23 ภาพกำลังขยายสูงของผิวรอยแตกของชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการเสริมแรงที่ด้วยท่อนาโนคาร์บอนด้วยสัดส่วนต่างๆ (a) 0.01 wt%, (b) 0.03 wt%, (c) 0.08 wt%, (d) 0.1 wt%, (e) 0.8 wt% และ (f) 1 wt%

ภาพที่ได้จากการส่องรอยแตกที่ผิวของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการเจือท่อนาโนคาร์บอนค่าต่างๆที่กำลังขยายสูงแสดงในภาพที่ 2.23a และ 2.23b เป็นภาพรอยแตกของโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณการเติมตัวเสริมแรง 0.01 เปอร์เซ็นต์ และ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพที่ได้จากเครื่อง SEM สามารถระบุว่ารอยแตกบางส่วนมีลักษณะที่เกิดจากความเหนียว และยังระบุได้อีกว่าลักษณะรอยแตกของผิวยังแตกต่างกันตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ของท่อนาโนคาร์บอนที่เติม

จากภาพที่ 2.23 ยังแสดงอีกว่าในกรณีสารประกอบที่ได้จากท่อนาโนคาร์บอน รอยแตกจะแตกไปตามท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ซึ่งยังอยู่ในเนื้อโลหะบัดกรี มันเป็นหลักฐานว่าการแตกที่เกิดขึ้นส่วนมากเกิดจากโลหะบัดกรีเมทริกซ์ไม่ได้เกิดจากการสลายพันธะระหว่างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวกับโลหะบัดกรี ตามที่การทดสอบชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิต เมื่อชิ้นงานค่อยๆ เสื่อมรูปตามแรงที่กระทำเพิ่มขึ้น พบว่ามีการสลายพันธะบางส่วนที่ผิวสัมผัสระหว่าง  $Ag_3Sn$  และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ขณะที่ผิวพันธะที่แข็งแรงระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและโลหะบัดกรี เพราะว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นแท่งยาวๆ ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) สูง ซึ่งทำให้เกิดหลุมเล็กๆ (micro cavities) ที่ขอบของเฟส  $Ag_3Sn$  และนี่คือหนึ่งในสาเหตุที่เกิดโพรงภายในเนื้อเมทริกซ์

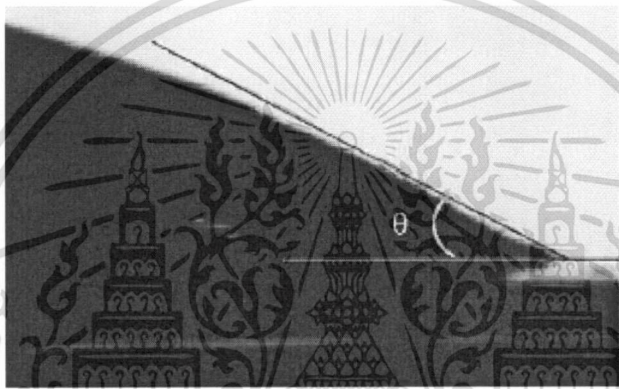
เนื่องจากเกรน  $Ag_3Sn$  มีลักษณะเป็นอริคิแอกซ์ คือ มีรูปทรงค่อนข้างกลม เมื่อการเสียมรูปเพิ่มขึ้น โพรงในเนื้อเมทริกซ์ที่มีอยู่แล้วจะค่อยๆ โตขึ้นขนานกับทิศทางในการดึงและการเสียมรูปจะค่อยๆ ถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณที่เสียมรูปจากแรงดึงสูงสุด และสามารถทำลายพันธะได้อย่างสมบูรณ์ก็คือบริเวณ  $Ag_3Sn$  ความเสียหายสุดท้ายเกิดขึ้นจากการรวมกันของโพรงและช่องว่างในบริเวณที่เสียมรูปเนื่องจากแรงดึงและสุดท้ายจึงเป็นการแตกของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวตามลำดับ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานี้สรุปว่าการผลิตโลหะบัดกรีคอมโพสิตชนิด Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในสัดส่วนปริมาณต่างๆ ด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะ แล้วจึงนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกล และ คุณสมบัติของจุดหลอมเหลว ของโลหะบัดกรีคอมโพสิต พบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่ขอบของเกรน  $Ag_3Cu$  การเติมและการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนมีผลทำให้ขนาดของรูปร่างเฉลี่ยของของสารประกอบเฟสที่สองของโลหะบัดกรีคอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของท่อนาโนคาร์บอนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่ไม่ได้รับการเสริมแรงใดๆ พบว่าความแข็งแรง ค่าทนแรงดึงสูงสุด ดีขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิตตามเปอร์เซ็นต์การเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว น่าจะเกิดจากขนาดรูปร่างเฉลี่ยของโลหะบัดกรีเฟสที่สองลดลงจนมีขนาดเล็กที่สุดตามที่ได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานโลหะบัดกรีคอมโพสิตด้วยเครื่อง FE-SEM และคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นก็เนื่องมาจากผลของการส่งผ่านแรงระหว่างโลหะบัดกรีและท่อนาโนคาร์บอน จากการสังเกตลักษณะของจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่เสริมด้วยอนุภาคนาโนพบว่าการลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่ไม่ได้ทำการเสริมแรง ก็เนื่องมาจากพลังงานอิสระที่ผิว และความไม่เสถียรภาพที่ผิวสัมผัส

และอีกบทความที่มีวิธีการผสมคล้ายกันที่เสนอโดย S.M.L. Nai, J.Weil, M Gupta แต่ต่างกันที่ชนิดของอนุภาคนาโนที่นำมาเจือลงไปโดยการศึกษาค้นคว้าได้มีการเติม  $TiB_2$  และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเพื่อนำมาสังเคราะห์สารประกอบคอมโพสิตสองชนิดด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะและศึกษาคุณสมบัติ เช่น การทดสอบคุณสมบัติเปียกของโลหะบัดกรีคอมโพสิต คุณสมบัติทางกลโดยใช้การทดสอบแรงดึง นอกจากนี้ยังมีส่วนที่เน้นย้ำคือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเสริมอนุภาคกับคุณสมบัติเปียก การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของสารประกอบคอมโพสิตที่ได้ โดยวิธีที่ในการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

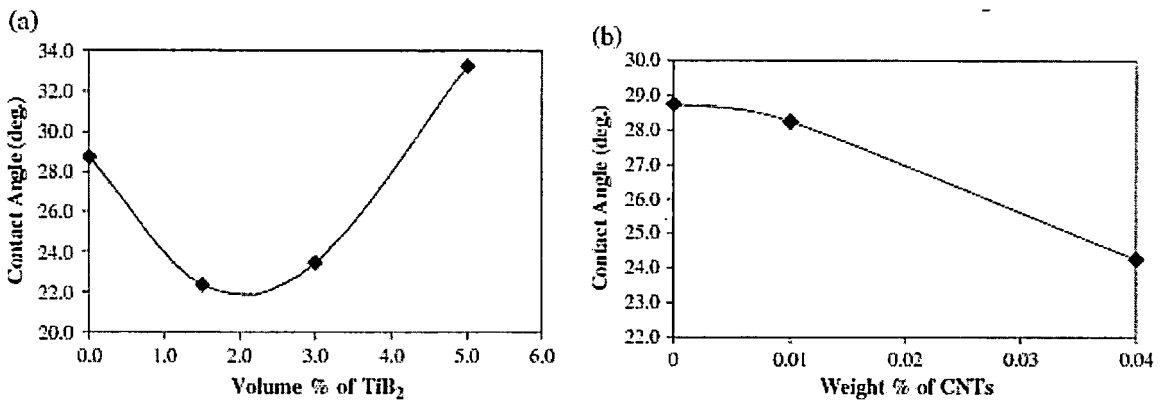
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.5Ag-0.7Cu มีขนาดประมาณ 25 - 45 ไมโครเมตร และ อนุภาคนาโนที่เลือกใช้คือ ไทเทเนียมไดโบไรด์ ( $TiB_2$ ) ขนาดขนาดประมาณ 3 - 5 ไมโครเมตร และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 - 20 นาโนเมตร และมีความยาว 10 ไมโครเมตร โดยกำหนดปริมาณของ  $TiB_2$  และ MWCNT เปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่จะนำไปรวมกลับโลหะบัดกรีเพื่อจะสังเคราะห์โลหะบัดกรีคอมโพสิตแบบต่างๆ โดยออกแบบการอัตราส่วนการผสมไว้ดังนี้ SAC-1.5 $TiB_2$ , SAC-3 $TiB_2$ , SAC-5 $TiB_2$ , SAC-0.01CNT และ 0.04CNT ในบทความนี้ทำการทดสอบคุณสมบัติเปียกโดยตัดแท่งโลหะบัดกรีที่ถูกดันออกมาให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นโลหะบัดกรีมาวางบนแผ่นทองแดงแล้วใช้ฟลักซ์ทา ระหว่างแผ่นทองแดงและแผ่นโลหะบัดกรี แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสในเตาอบ แล้วทำการวัดมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีโดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส OCA-20 จากภาพที่ 2.24 แสดงมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ที่วัดได้ของตัวอย่างโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง



ภาพที่ 2.24 การวัดมุมสัมผัสระหว่างชิ้นงานโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง

ผลของคุณสมบัติเปียกของโลหะบัดกรีที่ได้เติม  $TiB_2$  และ CNTs เป็นอนุภาคเสริมแรง คุณสมบัติเปียกที่ปรับปรุงแสดงตามรูปภาพที่ 2.25a และ 2.25b ตามลำดับ โลหะการผสมมีความสำคัญมากในการบัดกรี และมีบทบาทสำคัญในการสร้างพันธะที่ติระหว่างวัสดุโลหะบัดกรีและพื้นผิวบัดกรี เป็นประเด็นที่สำคัญในเรื่องความน่าเชื่อถือของบรรจุภัณฑ์ของวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ โดยปกติแล้วคุณสมบัติเปียกจะเทียบกับคุณสมบัติเปียกกับแผ่นทองแดง โดยเป็นที่ยอมรับกันว่าถ้ามุมสัมผัสน้อยแสดงว่ามีความสามารถในการผสมที่ดีกว่า ผลของความสามารถในการผสมของตัวอย่างโลหะบัดกรีที่วัดได้จากมุมสัมผัสแสดงว่าการเติมอนุภาคเสริมลงไปช่วยคุณสมบัติเปียก สำหรับโลหะบัดกรีที่เติม  $TiB_2$  สังเกตได้ว่าการเติม  $TiB_2$  1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ได้คุณสมบัติเปียกเหมาะสม โดยมุมสัมผัสขึ้น 22.2% อย่างไรก็ตามการเติม  $TiB_2$  ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มุมสัมผัสแยลง เนื่องมาจากการเติม  $TiB_2$  มากเกินไป จะไปยับยั้งการไหลของของเหลวเนื่องจากไปเพิ่มความหนืดขณะหลอมเหลว ในทางกลับกันการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปปริมาณ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มุมสัมผัสขึ้น 15.7 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับปริมาณ TiB<sub>2</sub> และ CNT a) มุมสัมผัสและปริมาณเปอร์เซ็นต์การเติม TiB<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรี และ b) มุมสัมผัสและปริมาณเปอร์เซ็นต์การเติม CNT ในโลหะบัดกรี

จากผลการทดสอบแรงดึงในอุณหภูมิแวดล้อมของชิ้นงานแสดงว่า คุณสมบัติทางกลทั้งหมดของโลหะบัดกรีคอมโพสิตดีขึ้น โดยพิจารณาจากตารางที่ 2.3 และ 2.4 อย่างไรก็ตาม โลหะบัดกรีที่ได้รับเสริมอนุภาค TiB<sub>2</sub> โดยคุณสมบัติของแรงดึงที่ค่าที่ดีที่สุดได้จากโลหะบัดกรีคอมโพสิตที่ได้รับการเติมอนุภาค TiB<sub>2</sub> ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยค่าของแรงดึงของโลหะบัดกรีคอมโพสิตแสดงค่าจาก 0.2% ของค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (YS) และค่าทนแรงดึงสูงสุด (UTS) ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นคือความแข็งแรงที่เกิดจากการกระจายของอนุภาค TiB<sub>2</sub> จากภาพที่ 2.26 การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค TiB<sub>2</sub> ในโลหะบัดกรีช่วยกีดขวางการเสียรูป

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.3 และ 2.4 การปรับปรุงแรงดึงจะไม่เกิดผลเมื่อเติม TiB<sub>2</sub> ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและการเติมที่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นอาจจะเกิดจากลักษณะของโลหะบัดกรีที่สังเกตเห็นว่ามีรูเล็ก ๆ เกิดขึ้น ซึ่งเคยมีการรายงานในบทความว่ารูเล็ก ๆ ที่ระดับไมโครนั้นสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อความแข็งแรง โดยของรูเล็ก ๆ มีผลต่อจุดเริ่มในการร้าว

จุดสูงสุดของค่าความแข็งแรงที่จุดคราก และ ค่าทนแรงดึงสูงสุดของโลหะบัดกรีคอมโพสิตของ TiB<sub>2</sub> อยู่ที่สัดส่วนการเติม TiB<sub>2</sub> ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยปรับปรุงค่าความแข็งแรงที่จุดคราก 26% และค่าทนแรงดึงสูงสุด 23% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดั้งเดิม ในทางกลับกัน พบว่าค่าความเหนียวของชิ้นงานโลหะบัดกรีลดลงตามจำนวนของอนุภาคการเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นในโลหะบัดกรีดูได้จากตารางที่ 2.3 และ 2.4 โดยถือว่าลักษณะของบริเวณที่ช่องที่เปราะเป็นตำแหน่งที่การแตกเริ่มขึ้น เป็นผลให้ความเหนียวลดลงเมื่อได้รับแรงดึง

ตารางที่ 2.3 ผลของแรงดึงของโลหะบัดกรีและโลหะบัดกรีคอมโพสิตจากTiB<sub>2</sub>

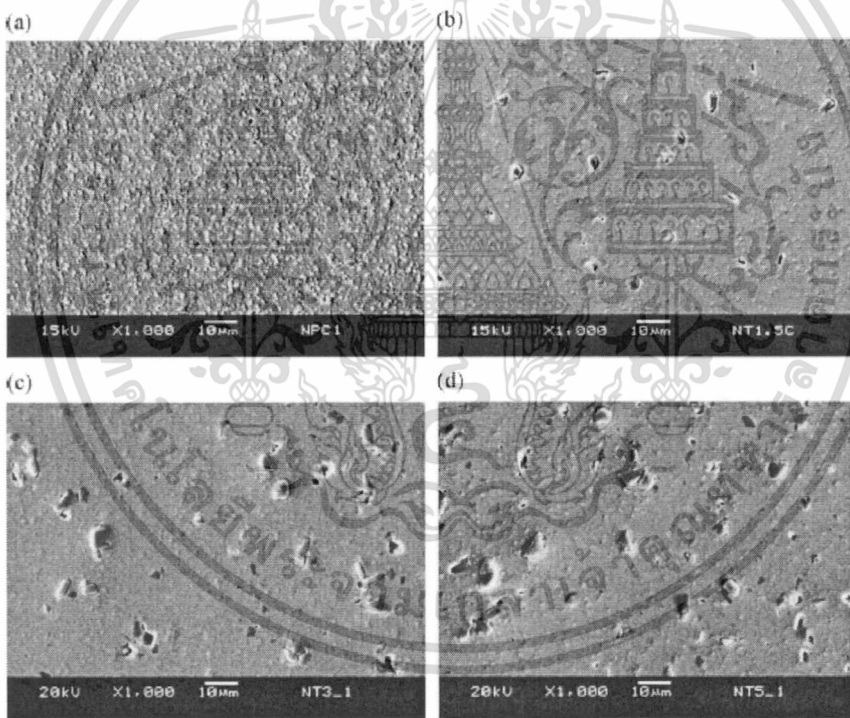
Material	Reinforcement (vol.%)	0.2% YS (MPa)	UTS (GPa)	Ductility(%)
SAC	--	31 ± 2	35 ± 1	41 ± 8
SAC-1.5TiB <sub>2</sub>	1.5	32 ± 1	38 ± 1	30 ± 2
SAC-3TiB <sub>2</sub>	3.0	39 ± 4	43 ± 5	29 ± 2
SAC-5TiB <sub>2</sub>	5.0	34 ± 4	38 ± 2	24 ± 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ผลของแรงดึงของโลหะบัดกรีและโลหะบัดกรีคอมโพสิตจากCNT

Material	Reinforcement (wt.%)	0.2% YS (MPa)	UTS (GPa)	Ductility (%)
SAC	–	31 ± 2	35 ± 1	41 ± 8
SAC-0.01CNT	0.01	36 ± 2	47 ± 1	36 ± 2
SAC-0.04CNT	0.04	36 ± 4	46 ± 6	37 ± 5

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเสริมแรงโลหะบัดกรีคอมโพสิตชนิด SnAgCu ด้วยการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นปริมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไทเทเนียมไดโบไรด์ ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยวิธีทางกล ผลของคุณสมบัติเชิงกลแสดงการปรับปรุงของโลหะบัดกรีเมื่อได้รับการเสริมแรง แต่ค่าการผานที่เหมาะสมได้จากการเติมอนุภาค  $TiB_2$  ในปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และหลังจากการเติม  $TiB_2$  ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้ความสามารถในการผานแย่ง แต่การเติมอนุภาคเสริมเพื่อช่วยในการผานได้ ทำยที่สุดคุณสมบัติทางกลของทั้งโลหะบัดกรีคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีดั้งเดิม



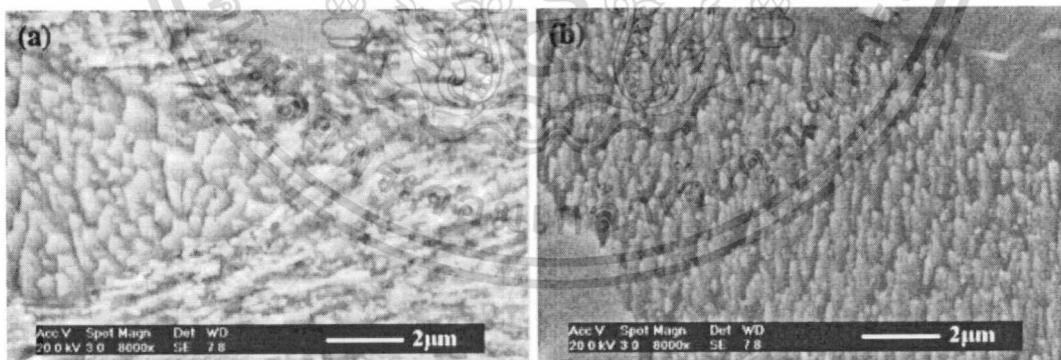
ภาพที่ 2.26 การกระจายตัวของ  $TiB_2$  ใน SAC a) สารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีคอมโพสิต b) อนุภาค  $TiB_2$  ใน SAC-1.5  $TiB_2$  c) อนุภาค  $TiB_2$  ใน SAC-3  $TiB_2$  d) อนุภาค  $TiB_2$  ใน SAC-5  $TiB_2$

จะเห็นการสร้างโลหะบัดกรีคอมโพสิตด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะสามารถรวมโลหะบัดกรีกับวัสดุที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากันได้อาจจะเนื่องมาจากแรงอีกสองชนิดที่ผู้เขียนได้ระบุไว้ในบทความว่าเป็นแรงกระทำที่ระหว่างโลหะบัดกรีและท่อนาโนคาร์บอนก็เป็นได้ นอกจากวิธีที่เพิ่งกล่าวไปแล้วยังมีวิธีการผสมอีกวิธีหนึ่งโดยได้ถูกนำเสนอโดย Shen และคณะได้ทดลองผสม  $ZrO_2$  ลงในโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของสารประกอบโลหะภายในชนิด  $Ag_3Sn$  โดยขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทำโดยนำแท่งโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag และอนุภาคนาโน  $ZrO_2$  วางลงในเข้าหลอมอุณหภูมิเนื้อมอกไซด์ในเตาอบสุญญากาศโดยใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาลวดอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อกำจัดผิวออกไซด์และสารเจือปนอื่นๆ

ผลสรุปว่า การเติมอนุภาคนาโน  $ZrO_2$  ลงในโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag สามารถทำให้ได้สารประกอบเชิงโลหะของ  $Ag_3Sn$  ละเอียดขึ้นและกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นซึ่ง อนุภาคนาโนจะถูกซึมซับอยู่ที่บริเวณขอบเกรนของ  $Ag_3Sn$  ขณะที่เริ่มแข็งตัวซึ่งช่วยยับยั้งการโตของเกรนสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  กระจายอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น และนอกจากบทบาทในการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและขนาดละเอียดขึ้นแล้วของสารประกอบเชิงโลหะ  $Ag_3Sn$  แล้วยังส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงของโลหะบัดกรีคอมโพสิตอีกด้วย

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในสร้างโลหะบัดกรีคือการผสมโลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิตชนิดครีมเพื่อให้เกิดโลหะบัดกรีคอมโพสิตเมื่อโลหะบัดกรีได้รับความร้อนในกระบวนการบัดกรีแบบ Reflow ซึ่งได้มีการทดลองโดย Liu และคณะเป็นวิธีที่ง่ายและตรงที่สุดในการเตรียมครีมโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโน คือการรวมสารเสริมขนาดนาโนกับโลหะบัดกรีเหลว เคยมีการผสมอนุภาค ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ปริมาณต่างๆกับ Sn-3.8Ag-0.7Cu เพื่อที่จะสร้างครีมโลหะบัดกรีผสม (SAC-xSiC) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ซึ่งผลที่ได้คือการเติม ซิลิกอนคาร์ไบด์ ลงทำให้การโตของขนาดสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรีเล็กลงแต่อย่างไรก็ตามขนาดของสารประกอบเชิงโลหะไม่ได้ลดลงต่อปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ เสมอไปเช่นการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ ปริมาณ 0.2% และ 0.01% จะให้ขนาดของเกรนสารประกอบเชิงโลหะเท่ากัน นี้อาจจะถือว่าการจับตัวกันและการตกตะกอนของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในแท่งโลหะบัดกรีเพราะแรงแวนเดอร์วาลส์ทำให้อนุภาคนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ ผสมกันเองมากขึ้นซึ่งการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ ปริมาณ 0.2% จะไม่ทำให้ขนาดของสารประกอบเชิงโลหะไม่ลดลงไปกว่านี้อีกแล้ว การพิจารณาจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นว่าทั้งตัวอย่างโลหะบัดกรีคอมโพสิตและโลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิต มีโครงสร้างของ  $\beta$ -Sn phase ในภาพที่ 2.27 มีแนวโน้มเหมือนกันแต่โลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิตแสดงขนาดเกรนย่อยที่ใหญ่กว่า



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างเกรนย่อยของ  $\beta$ -Sn phase (a) โลหะบัดกรีคอมโพสิต และ (b) โลหะบัดกรีนาโนคอมโพสิต

เพื่อให้ความถูกต้องในการหาว่าอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ ในโครงสร้างของสารประกอบเชิงโลหะ ขนาดของสารประกอบเชิงโลหะ และพื้นที่ว่างระหว่างสารประกอบเชิงโลหะ ในโลหะบัดกรีพบว่าการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ลงในโลหะบัดกรี Sn-3.8Ag-0.7Cu ลดทั้งขนาดเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะ และพื้นที่ว่างระหว่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังตารางที่ 2.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบขนาดและพื้นที่ว่างระหว่างสารประกอบเชิงโลหะในอนุภาคนาโนคอมโพสิต

Table I. Comparison of the IMCs average size and the spacing between IMCs in composite solder matrices (units:  $\mu\text{m}$ )

	SAC	SAC-0.01SiC	SAC-0.05SiC	SAC-0.2SiC
Average size	$0.45 \pm 0.08$	$0.3 \pm 0.03$	$0.24 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.02$
Average spacing	$0.6 \pm 0.1$	$0.38 \pm 0.04$	$0.32 \pm 0.03$	$0.39 \pm 0.04$

วิธีผสมทางกลที่เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อนแต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของธาตุที่เลือกนำมาใช้และวิธีผสมแบบต่างๆ ซึ่งเคยได้มีการกล่าวถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น ปัญหาในการสร้างการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีตั้งต้น เนื่องจากถ้าหากอนุภาคนาโนเมื่อรวมตัวกันจะทำให้ในบริเวณนั้นเพราะดั่งนั้นจำเป็นต้องให้เกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรีแบบตั้งต้นในกระบวนการผลิตโลหะบัดกรีคอมโพสิต ถึงว่าฟังดูจะง่ายแต่ว่ายากในทางปฏิบัติแม้ว่าจะผสมโดยใช้เวลานานอนุภาคเหล่านั้นก็ยังคงจับตัวกันในโลหะบัดกรีอยู่

แต่มีแนวทางหนึ่งวิธีการผสมทางกลคือ การใช้สัญญาณอลวนในการช่วยลดระยะเวลาในการผสม ซึ่งเคยมีการศึกษาว่าการใช้สัญญาณอลวนช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคผสมมากขึ้น การผสมด้วยสัญญาณอลวนเนื่องจากทุกวิธีที่ได้ยกตัวอย่างไปแล้วใช้การปั่นผสมด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งผลการกระจายตัวของอนุภาคนาโนยังไม่ค่อยสม่ำเสมอ และใช้เวลานานในการปั่นผสม จึงมีการศึกษาการใช้สัญญาณอลวน (Chaos signal) ในการลดเวลาในการปั่นผสมและเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของ

ตารางที่ 2.6 เวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการละลายซูโครสในน้ำโดยใช้สัญญาณต่างกันความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคของแข็ง Zhang และ Chen ยังเคยมีการศึกษาการเสริมการผสมของเหลวโดยเปรียบเทียบการใช้การสัญญาณการปั่นแบบคงที่ สัญญาณไซน์ และ สัญญาณอลวนในถังปั่น โดยศึกษาการละลายของซูโครสในน้ำโดยการใช้การผสมทั้ง 3 แบบแล้วเปรียบเทียบเวลาในการผสมที่ทำให้ซูโครสมีความเข้มข้นโดยประมาณ  $1.32 \text{ g/ml}$  และเพื่อไม่ให้ยุติธรรมสำหรับการเปรียบเทียบกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอยู่ที่  $2.5 \text{ V}$  และจำกัดการแปรผันของสัญญาณที่ไม่คงที่ภายใน  $\pm 0.5 \text{ V}$  และจากเปรียบเทียบกับสัญญาณแบบอื่นๆเวลาที่ใช้น้อยกว่าทุกสัญญาณในการทดสอบดังนั้นเมื่อทำการทดลองในห้องทดลอง สัญญาณอลวนจึงเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมความถี่ของสัญญาณไซน์คือ  $0.9\text{Hz}$  ซึ่งมีความเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบ 10 ความถี่ และทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองเวลาที่ใช้ในการผสมโดยใช้สัญญาณอลวน

Control signal	Average Time	Variance(%)
Constant	>3600	N/A
Sinusoidal	1552	7.63
Chaotic	1479	5.48

นอกจากนั้นยังมีการใช้สัญญาณอลวนในการผสมต่างๆ อีก เช่น ใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยควบคุมความเร็วการปั่นด้วยสัญญาณแบบต่างๆ โดยศึกษาคุณสมบัติความหนืดแล้วนำมาเปรียบเทียบกับโดยเลือกใช้สัญญาณแรงดันไปตรง สัญญาณรูปคลื่นไซน์ สัญญาณอลวนจากวงจรจั่ว (Chua circuit) สัญญาณอลวนจากวงจรลอจิสติกส์ โดยพบว่าการใช้สัญญาณอลวนจากวงจรจั่วแบบซิงเกิลสกออร์ให้ผลโดยรวมดีที่สุดเมื่อพิจารณาในแง่ของความหนืดที่ได้ร่วมกับความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง แต่หากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเฉพาะผลของความหนืดที่ได้ต่ำที่สุดนั้น จะเป็นการใช้อินพุตแบบโลจิสติกส์ที่ค่า  $r = 3.60$  และความถี่ 14 Hz แต่หากพิจารณาในส่วนของความเร็วที่ปั่นผสมที่ใช้จะมีค่ามากกว่าสัญญาณแบบอื่น หรือหากพิจารณาเฉพาะในส่วนของ ความเร็วที่ต่ำที่สุดจะเป็นการใช้อัตราการไหลของสัญญาณจากวงจรนับแบบดับเบิลสก็อร์แต่ค่าความหนืดที่ได้ไม่ดีเช่นกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ถ้าจะพิจารณาทั้งความหนืดและความเร็วซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ การใช้อัตราการไหลของสัญญาณจากซิงเกิลสก็อร์ให้ผลดีที่สุดทั้งได้ความหนืดต่ำที่สุดและใช้พลังงานในการปั่นต่ำเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-58Bi

เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมเป็นบิสมัท (Bi) 58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีดีบุก (Sn) 42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีชนิดนี้มีค่าประมาณ 138.8 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้เป็น อุณหภูมิยูเทกติก (Eutectic temperature) ของโลหะบัดกรีชนิดนี้

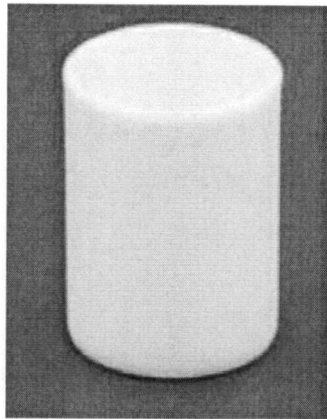
#### 3.1.2 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nano-particle)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์มีสูตรทางเคมีเป็น ZnO ซึ่งมักจะปรากฏเป็นผงสีขาวเกือบไม่ละลายในน้ำ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเป็นสารเติมแต่งในวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ ยาง (เช่น ยางรถ) ผลิตภัณฑ์หล่อลื่น กาว เม็ดสี อาหาร (แหล่งของสังกะสี สารอาหาร) แบตเตอรี่ แม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ พลาสติกชีวภาพ เป็นต้น ซิงค์ออกไซด์มีอยู่ในเปลือกโลกเป็นแร่ zincite อย่างไรก็ตาม ซิงค์ออกไซด์ส่วนมากที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ โดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาด 20-40 นาโนเมตร มีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลม มีความหนาแน่นจริง 5.606 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอุณหภูมิหลอมเหลว 1975 องศาเซลเซียส

#### 3.1.3 เบ้าหลอม (Crucible)

เบ้าหลอมทำมาจาก Porcelain คือ ภาชนะที่มีการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นผลให้มีค่าดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีความทนทาน แข็งแกร่งทั้งในผิวหน้า และตัวเนื้อภาชนะ สามารถนำมาทำเป็นเบ้าหลอมโลหะบัดกรี เบ้าหลอมที่นำมาใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้วย  $D = 60$  มิลลิเมตร ภาพที่ 3.1 แสดงลักษณะของเบ้าหลอมชนิดพอร์ซเลนที่ใช้ในการทดลองนี้ การหลอมโลหะบัดกรีจะทำในเบ้าหลอมภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโลหะบัดกรีกับก๊าซออกซิเจนในอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 ลิตร/นาที

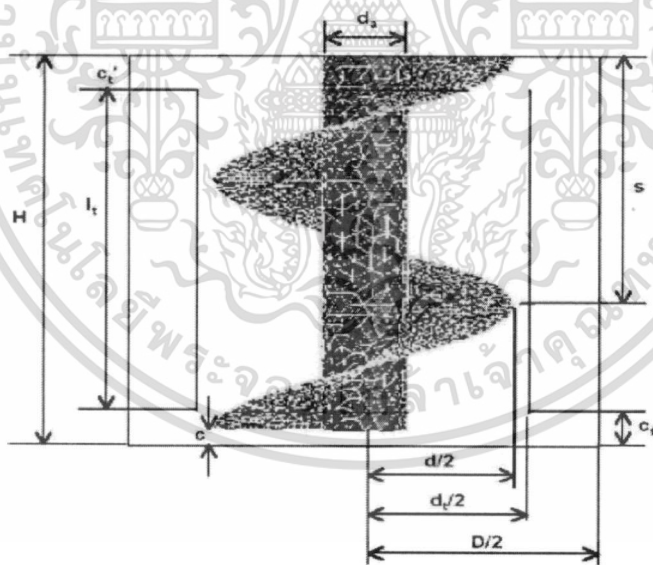
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของเบ้าหลอมชนิดพอร์ซลิน

### 3.1.4 ไบควนชนิดเกลียวกันหอย (Helical screw)

ในการเลือกใช้ไบควนจะคำนึงถึงชนิดของวัสดุที่นำมาผสมกันและความหนืดของวัสดุโดยในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้ไบควนชนิดกันหอยเนื่องจากสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในการผสมผงลงในวัสดุหลอม โดยการออกแบบอัตราส่วนของไบพัตจะพิจารณาเส้นผ่าศูนย์กลางของเบ้าหลอมที่จะนำมาใช้ในภาพที่ 3.2 แสดงขนาด (Dimensions) ต่างๆของไบควน และตารางที่ 3.1 แสดงขนาดไบควนชนิดกันหอยเมื่อได้รับการออกแบบแล้ว



ภาพที่ 3.2 ไบพัตชนิดกันหอย

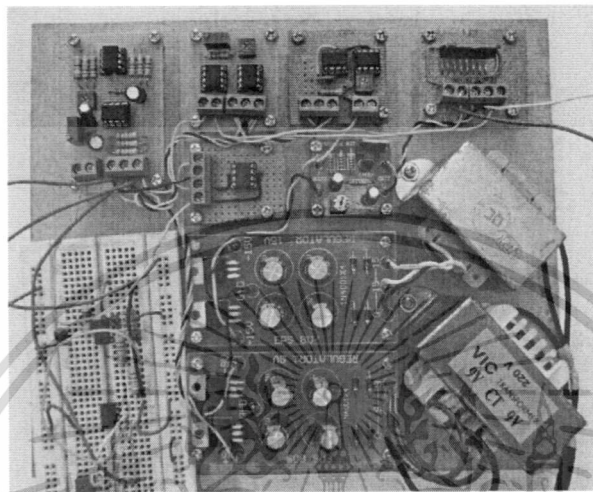
ตารางที่ 3.1 ขนาดไบควนชนิดกันหอย

D	H	d	dt	da	s	c	ct	l	lt
60	60	38.4	42.24	10.8	38.4	2.304	4.992	57.7	49.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 ชุดควบคุมการกวน

ชุดควบคุมการกวนสามารถควบคุมทิศทางการหมุนได้ทิศทางเดียว โดยการกำหนดให้ระดับของสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้อยู่เฉพาะค่ามากกว่าศูนย์ แรงดันที่จ่ายใช้กับมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0 – 15 โวลต์ ภาพที่ 3.4 และ 3.5 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะดับเบิ้ลสก็อรัลและซิงเกิ้ลสก็อรัลที่มีความถี่ 3 Hz ตามลำดับ

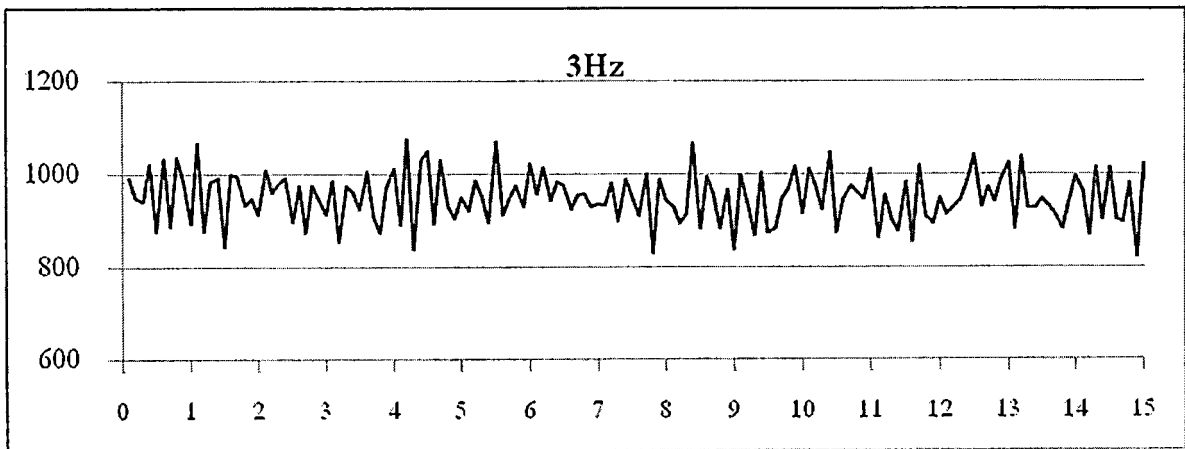


ภาพที่ 3.3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์



ภาพที่ 3.4 ความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะดับเบิ้ลสก็อรัลที่มีความถี่ 3 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



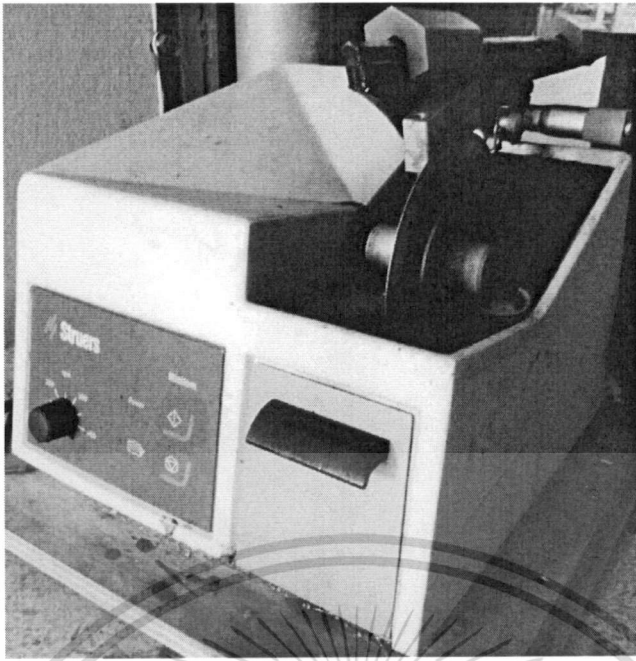
ภาพที่ 3.5 ความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะซิงเกิ้ลสกออร์ลที่ความถี่ 3 Hz

### 3.2 วิธีการทดลอง

- 1) เตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ชั่งน้ำหนักของ โลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการทดลองนี้กำหนดให้น้ำหนักของโลหะบัดกรีชนิดปลอดสารตะกั่วชนิดดีบุกและบิสมัท 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 2) ใส่โลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนลงในเบ้าหลอม และทำการหลอมโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสด้วย Hot Plate จนกระทั่งโลหะบัดกรีหลอมละลายทั้งหมด
- 3) ปั่นผสมโลหะบัดกรีกับอนุภาคนาโนด้วยใบกวนแบบก้นหอยด้วยความเร็วเฉลี่ย 900 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 25 นาที
- 4) ทำการลดอุณหภูมิชิ้นงานอย่างรวดเร็วโดยใช้น้ำเพื่อป้องกันการแยกตัวของอนุภาคนาโนเนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีความหนาแน่นน้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิดดีบุกบิสมัท
- 5) นำชิ้นงานออกจากเบ้าหลอม แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

### 3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำชิ้นงานมาทำการตัดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด  $1 \times 1 \times 1$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัดความเร็วรอบต่ำที่ 300 รอบต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เพื่อตัดชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



ภาพที่ 3.6 เครื่องตัดความเร็วรอบต่ำ

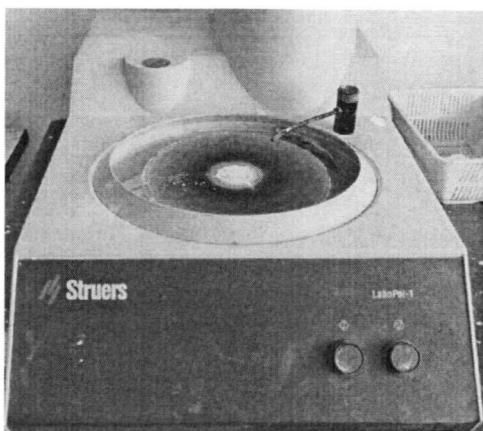
หลังจากนั้นทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 100, 400, 800, 1200, 2000 และ 4000 ตามลำดับโดยขัดไปในทิศทางเดียวกันตลอดเมื่อยังใช้กระดาษทรายเบอร์เดียวกัน และขัดสลับทิศทางกันเมื่อเปลี่ยนความละเอียดของกระดาษทรายขัด ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ลักษณะการขัดกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ

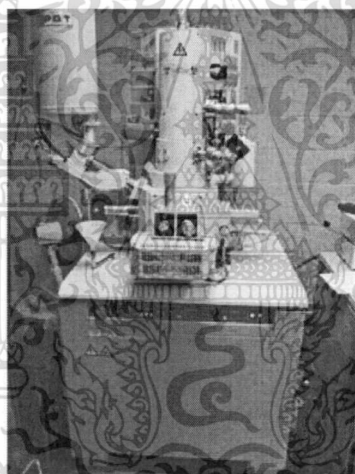
จากนั้นจึงทำการขัดโดยใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ขนาด 1 ไมครอน และขนาด 0.3 ไมครอน ตามลำดับ บนเครื่องขัดสีกหลายแบบงานหมุนดังภาพที่ 3.8 แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดไปทำความสะอาดด้วยคลื่นล้างอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 เครื่องขัดสั๊กหลาดแบบจานหมุน

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ดังภาพที่ 3.9 โดยใช้ รุ่น HITACHI 4700 FE-SEM มีกำลังขยายสูงสุด 500,000 เท่า



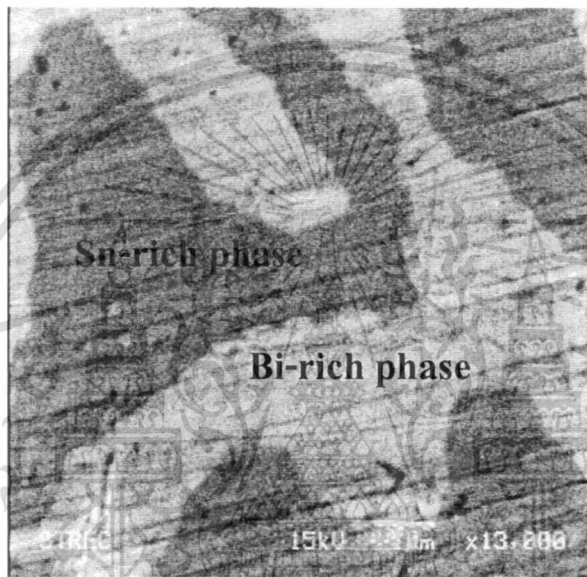
ภาพที่ 3.9 Scanning electron microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

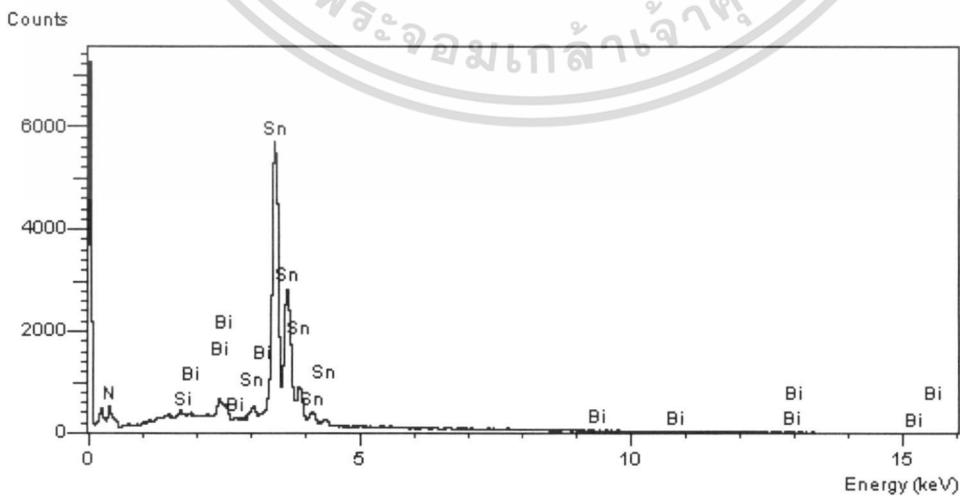
## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลของการกวนผสมด้วยสัญญาณอลวน

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เป็นโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และ EDX พบว่าดีบุก (Sn) ปรากฏในรูปของ Sn-rich phase (สีเข้ม) มีโครงสร้างแบบ Dendrite และบิสมัท (Bi) ก็ปรากฏในรูปของ Bi-rich phase (สีอ่อน) มีโครงสร้างแบบ Dendrite เช่นกัน ภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีพื้นฐาน Sn-58Bi และภาพที่ 4.2 และ 4.3 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของ Sn-rich phase และ Bi-rich phase ตามลำดับ

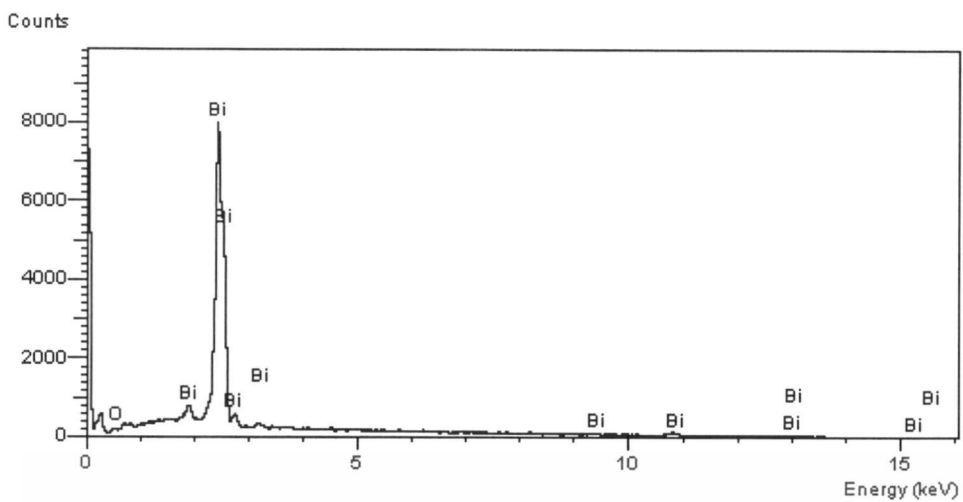


ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-58Bi



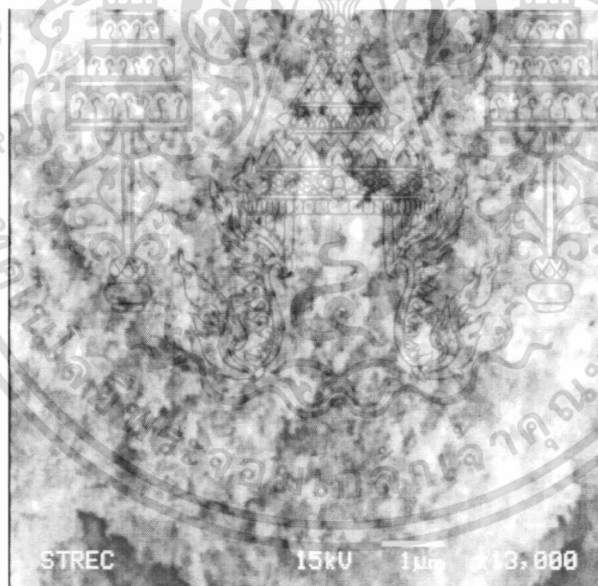
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของ Sn-rich phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



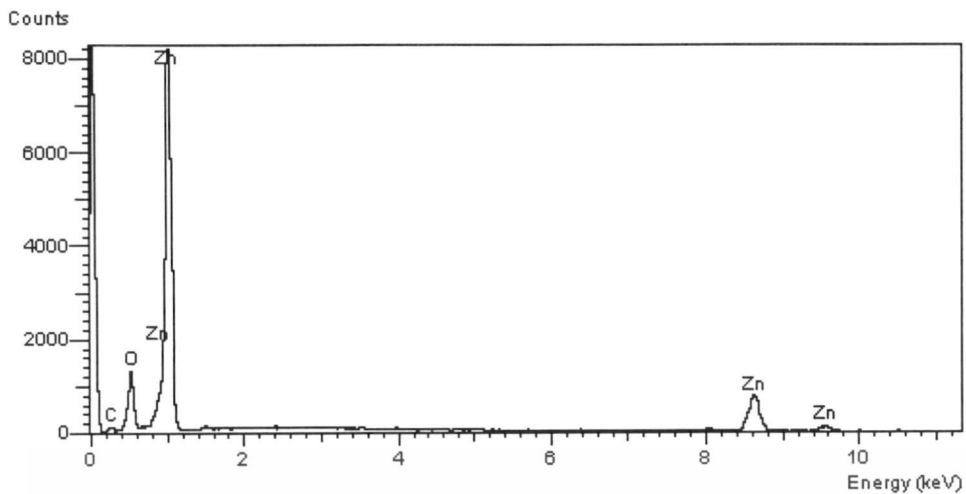
ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของ Bi-rich phase

กลุ่มของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ก่อนที่จะทำการผสมกับโลหะบิรี Sn-58Bi จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในภาพที่ 4.4 และในภาพที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมขององค์ประกอบต่างๆ ของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากเครื่อง EDX ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในภาพที่ 4.4



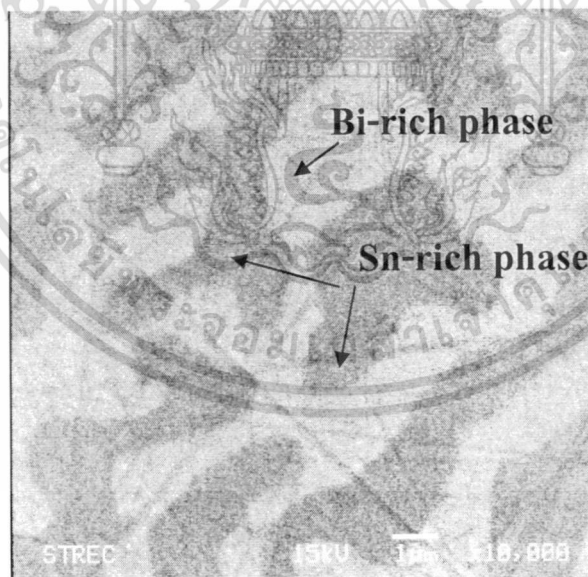
ภาพที่ 4.4 อนุภาคซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



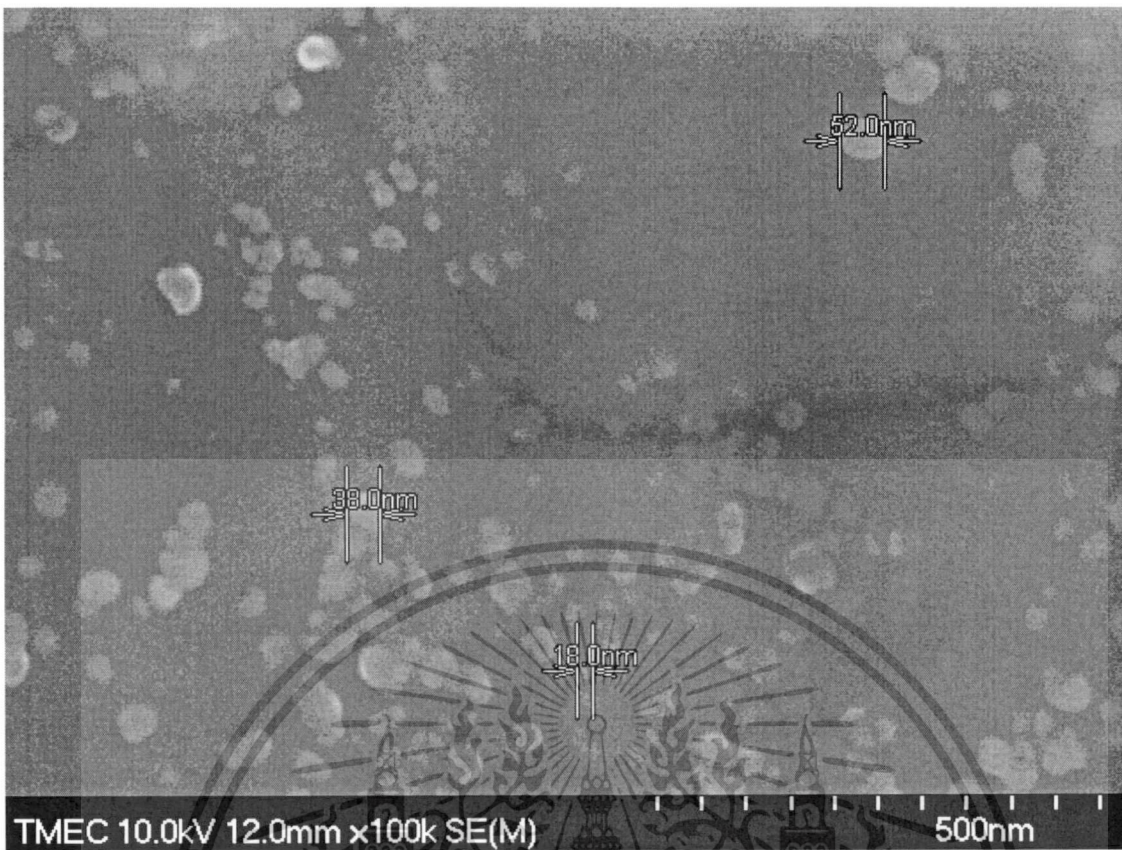
ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง EDX ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์

เมื่อทำการผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไปโลหะบัดกรี Sn-58Bi พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังปรากฏในรูปของโครงสร้างแบบ Dendrite เช่นเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีดังกล่าวที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่ามีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แทรกอยู่ใน Sn-rich phase และ Bi-rich phase ดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วชนิด Sn-58Bi จะเป็นเนื้อพื้น (Matrix) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ปรากฏกระจายอยู่ทั่วไปในลักษณะของ Reinforced phase หรือ Secondary phase



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-ZnO ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-ZnO ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าการใช้สัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi ไม่ว่าจะเป็ยสัญญาณอลวนโดยใช้วงจรแบบลอจิสติก แบบ Chua หรือการผสมโดยใช้ความเร็วคงที่ในการกวนผสม

#### 4.2 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

จากการทดสอบอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO สูงขึ้น (ทั้ง Solidus และ Liquidus temperatures) รวมทั้งทำให้ช่วงของการหลอมเหลวกว้างขึ้นด้วย ตารางที่ 4.1 แสดงจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO ที่ความเข้มข้นต่างๆของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สาเหตุที่ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถดูดซับความร้อนได้ดี ทำให้จุดหลอมเหลวของ Sn-58Bi-xZnO สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO

โลหะบัดกรี	Solidus temperature (°C)	Liquidus temperature (°C)
Sn-58Bi	138.9	138.9
Sn-58Bi-0.1ZnO	139.3	141.2
Sn-58Bi-0.2ZnO	139.8	142.9
Sn-58Bi-0.3ZnO	140.4	145.0
Sn-58Bi-0.4ZnO	141.1	147.6
Sn-58Bi-0.5ZnO	141.9	150.1

#### 4.3 ผลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุกรมในการบัดกรีที่มีต่อความสามารถในการบัดกรี (Solderability) ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO บนแผ่นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ทำโดยการวัดการแผ่กระจายของโลหะบัดกรี (Spread factor) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 10 วินาที โดยที่ค่า Spread factor สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง ตารางที่ 4.2 แสดง Spread factor ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีจะลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะไปขัดขวางการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีเหลว ทำให้ Spread factor ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง

$$\text{Spread factor} = \frac{(6V/\pi)^{1/3} - h}{(6V/\pi)^{1/3}} \times 100$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของก้อนโลหะบัดกรีก่อนที่จะทำการทดสอบ และ h คือ ความสูงของหยดโลหะบัดกรี หลังจากการแข็งตัว และยังพบว่าค่า Spread factor ของโลหะบัดกรีจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการบัดกรีสูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 Spread factor ของโลหะบัดกรี Sn-58Bi-xZnO

โลหะบัดกรี	Spread factor (%)
Sn-58Bi	75.40
Sn-58Bi-0.1ZnO	74.64
Sn-58Bi-0.2ZnO	73.12
Sn-58Bi-0.3ZnO	71.36
Sn-58Bi-0.4ZnO	70.25
Sn-58Bi-0.5ZnO	68.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน ( $\text{Sn-58Bi-xZnO}$ ) ที่ได้จากการผสมแบบสัญญาณอลวนเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีพื้นฐาน ( $\text{Sn-58Bi}$ ) และโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการกวนผสมแบบเดิม คือ แบบความเร็วคงที่ พบว่าเมื่อทำการผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไปโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi}$  พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังปรากฏในรูปของโครงสร้างแบบ Dendrite เช่นเดิม และพบว่ามีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แทรกอยู่ใน  $\text{Sn-rich phase}$  และ  $\text{Bi-rich phase}$  โดยโลหะบัดกรีไร้ตะกั่วชนิด  $\text{Sn-58Bi}$  จะเป็นเนื้อพื้น (Matrix) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ปรากฏกระจายอยู่ทั่วไปในลักษณะของ Secondary phase และการใช้สัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆ ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว  $\text{Sn-58Bi}$  ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณอลวนโดยใช้วงจรแบบ Chua แบบลอจิสติก หรือการผสมโดยใช้ความเร็วคงที่ในการกวนผสม

นอกจากนี้ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi-xZnO}$  พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi-xZnO}$  สูงขึ้น (ทั้ง Solidus และ Liquidus temperatures) รวมทั้งทำให้ช่วงของการหลอมเหลวกว้างขึ้นด้วย

ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีของโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi-xZnO}$  บนแผ่นทองแดง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น การแผ่กระจายของโลหะบัดกรีจะลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะไปขัดขวางการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีเหลว ทำให้ Spread factor ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรจะทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ (Interface) ระหว่างโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi-xZnO}$  กับแผ่นทองแดง เพื่อศึกษาว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีผลอย่างไรต่อรอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีกับแผ่นทองแดง รวมทั้งทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรี  $\text{Sn-58Bi-xZnO}$  เช่น ความแข็งจุลภาค ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงความล้า (Fatigue strength) และ Creep-rupture life เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมักจะมีข้อเด่นในแง่ของคุณสมบัติทางกลต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [www.thaigov.go.th](http://www.thaigov.go.th)
- [2] Callister W.D., Rethwisch, D.G., Materials science and engineering, 8<sup>th</sup> edition, 2010, Singapore, John Wiley & Sons.
- [3] Smith W.F., Hashemi J., Foundations of materials science and engineering, 4<sup>th</sup> edition, 2006, New York, McGraw-Hill.
- [4] Evans R.W., Wilshire B., Creep of metals and alloys, 1985, London, The Institute of Metals.
- [5] Martin J.W., Precipitation hardening, 2<sup>nd</sup> Edition, 1998, Oxford, Butterworth Heinemann.
- [6] 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.
- [7] Shi Y., Liu J., Yan Y., Xia Z., Lei Y., Guo F., Li X., Creep properties of composite solders reinforced with nano- and micro-sized particles, Journal of Electronic Materials, 2008, 37, pp:507-514.
- [8] Marshall J.L., Calderon J., Sees J., Lucey G., Hwang J.S., Composite solders, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1991, 14, pp:698-702.
- [9] Betrabet H.S., McGee S.M., McKinlay J.K., Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability, Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25, pp:2323-2328.
- [10] Mavoori H., Jin S., New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions, Journal of Electronic Materials, 1998, 27, pp:1216-1222.
- [11] Guo F., Composite lead-free electronics solders, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18, pp:129-145.
- [12] Subramanian K.N., Bieler T.R., Lucas J.P., Microstructural engineering of solders, Journal of Electronic Materials, 1999, 28, pp:1176-1183.
- [13] Shen J., Liu Y.C., Gao H.X., In situ nanoparticulate-reinforced lead-free Sn-Ag composite prepared by rapid solidification, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2007, 18, pp:463-468.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Tai F., Guo F., Han M.T., Xia Z.D., Lei Y.P., Shi Y.W., Creep and thermomechanical fatigue properties of in situ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  reinforced lead-free composite solder, *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527, pp:3335-3342.
- [15] Lee J.H., Park D.J., Heo J.N., Lee Y.H., Shin D.H., Kim Y.S., Reflow characteristics of Sn-Ag matrix in-situ composite solders, *Scripta Materialia*, 2000, 42, pp:827-831.
- [16] Hwang S.Y., Lee J.W., Lee Z.H., Microstructure of a lead-free composite solder produced by an in-situ process, *Journal of Electronic Materials*, 2002, 31, pp:1304-1308.
- [17] Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Effect of carbon nanotubes on the shear strength and electrical resistivity of a lead-free solder, *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37, pp:515-522.
- [18] Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes, *Materials Science & Engineering A*, 2006, 423, pp:166-169.
- [19] Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Lead-free solder reinforced with multiwalled carbon nanotubes, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:1518-1522.
- [20] Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites, *Thin Solid Films*, 2006, 504, pp:401-404.
- [21] Kumar K.M., Kripesh V., Tay A.A.O., Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solders, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 450, pp:229-237.
- [22] Kumar K.M., Kripesh V., Shen L., 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*, 2006, 504, pp:371-378.
- [23] Shen J., Liu Y.C., Han Y.J., Tian Y.M., Gao H.X., Strengthening effects of  $\text{ZrO}_2$  nanoparticles on the microstructure and microhardness of Sn-3.5Ag lead-free solder, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:1672-1679.
- [24] Chantaramanee S., Plookphol T., Wisuthmethangoon S., Sikong L., Lead-free solder-SWCNT nano-composite processing by ultrasonic, 4<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment and 2<sup>nd</sup> Asian Symposium on Materials and Processing, 2009, Penang, Malaysia.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Lan J., Yang Y., Li X., Microstructure and microhardness of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method, *Materials Science & Engineering A*, 2004, 386, pp:284-290.

[26] Kasatkin I., Kniep B., Ressler T., Cu/ZnO and Co/ZrO<sub>2</sub> interactions studied by contact angle measurement with TEM, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9, pp:878-883.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ชื่อผลงานวิจัย: การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Development of nano-composite solders)

การเผยแพร่: วารสารการเชื่อมไทย (Thai Welding Journal) ฉบับที่ 56 กันยายน-ธันวาคม 2555 หน้าที่ 10-

16

## การพัฒนาโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Development of nano-composite solders)

รศ.ดร.นงนุช วัฒนศิริ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10520  
e-mail: kkkannac@kmitp.ac.th  
โทรศัพท์ 02-329-8339 โทรสาร 02-329-8340

โลหะบัดกรีเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของรอยบัดกรีทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ความน่าเชื่อถือของรอยบัดกรีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีแต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ จากการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง ทำให้ขนาดของรอยบัดกรีมีขนาดเล็กลงเช่นกัน รวมทั้งการจลน์ศาสตร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการระบายความร้อนได้ยากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานสูงขึ้น เนื่องจากโลหะบัดกรีเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีได้ และการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจนำไปสู่การวิบัติ (Failure) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ ได้ [1, 2]

การวิบัติทางโลหะวิทยาที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ การเกิดความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) [2-5] ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการปรับปรุงให้โลหะบัดกรีมีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าได้โดยการทำให้มีขนาดเกรนที่เล็กลง แต่วิธีการนี้ไม่ใช่วิธีการที่ดีสำหรับการต่อต้านการเกิดการคืบ เนื่องจากการทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงจะทำให้เกิดการคืบโดยกระบวนการเลื่อนของขอบเกรน (Grain boundary sliding) ได้ง่ายขึ้น [2, 6] โดยทั่วไปแล้ววิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทาง

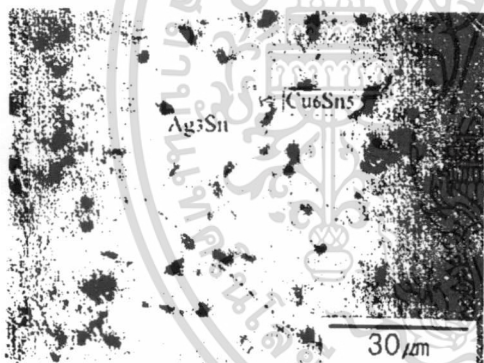
กลของโลหะบัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาค (Particles) ขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรี เพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน [1, 3, 4, 6-9]

ด้วยความก้าวหน้าทางนาโนเทคโนโลยีทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) เช่น อนุภาคนาโนของออกไซด์ชนิดต่างๆ อนุภาคนาโนของธาตุชนิดต่างๆ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) มาใช้ในการทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-Composite solders) ซึ่งอนุภาคทุกชนิดที่นำมาใช้จะต้องละลายเข้ากับโลหะบัดกรีได้น้อยหรือไม่ได้เลย ไม่ว่าที่อุณหภูมิบัดกรี หรือที่อุณหภูมิใช้งาน [10-17] ถึงแม้ว่าอนุภาคนาโนจะเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบัดกรีเพื่อต่อต้านความล้าและการคืบ อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง ณ.ขณะนี้ในการใช้อนุภาคนาโนในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบคือ ไม่สามารถทำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรีได้ ส่งผลให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ผลิตได้ยังมีคุณสมบัติทางกลที่ไม่สม่ำเสมอ [5, 10-24] สำหรับการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดที่เป็นแท่งหรือแผ่นโลหะพบว่ามีวิธีการผลิตที่สำคัญอยู่ 4 วิธีด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1) การทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) ของเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรขึ้นในเนื้อโลหะบัดกรี (Matrix) และให้เฟสที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

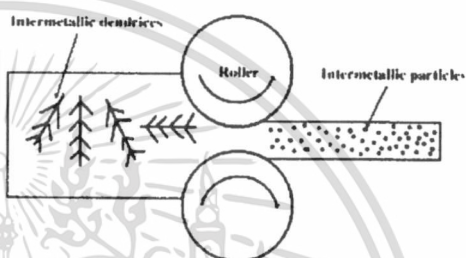
นั้นทำหน้าที่เสริมความสามารถของโลหะบัดกรีในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบ วิธีการนี้สามารถทำให้ออนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรี แต่ปัญหาที่พบ คือ เมื่อนำโลหะบัดกรีที่ผลิตด้วยวิธีการนี้ไปบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการบัดกรีจะทำให้อนุภาคนาโนที่เกิดจากการตกตะกอนขยายตัว (Growth) ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม ส่งผลให้มีความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็สามารถทำให้ออนุภาคนาโนที่เกิดจากการตกตะกอนดังกล่าวเกิดการขยายตัวได้เช่นกัน [18-21] รูปที่ 1 แสดงการตกตะกอนของเฟส Ag<sub>3</sub>Sn และ Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ในเนื้อโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag เพื่อให้เกิดเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ [21]



รูปที่ 1 การทำให้เกิดโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยวิธีการตกตะกอน [21]

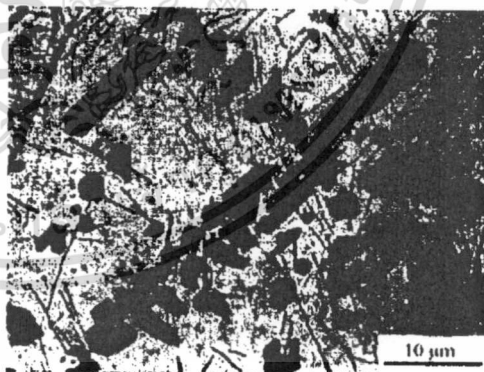
2) การใช้วิธีการขึ้นรูปทางกล เช่น การรีด (Rolling) หรือการตีขึ้นรูป (Forging) ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโน วิธีหนึ่งในกลุ่มนี้ คือ การทำให้เฟสที่สองเกิดการตกตะกอนในเนื้อโลหะบัดกรีเพื่อใช้เสริมความสามารถของโลหะบัดกรีในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบ โดยการให้เฟสที่สองเกิดการตกตะกอนจนกลายเป็นอนุภาคนาโนใหญ่ กระจายไปทั่วเนื้อโลหะบัดกรี

แล้วทำการลดขนาดของแท่งโลหะบัดกรีด้วยวิธีการขึ้นรูปทางกล เพื่อให้อนุภาคนาโนใหญ่ที่เกิดขึ้นเกิดการแตกหักกระจายเป็นอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กลง เมื่อแท่งโลหะบัดกรีผ่านกระบวนการขึ้นรูปเหล่านี้ซ้ำกันหลายๆครั้ง อนุภาคของเฟสที่สองในเนื้อโลหะบัดกรีก็จะมีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ เช่นกัน [5, 22, 23] ดังแสดงในรูปที่ 2

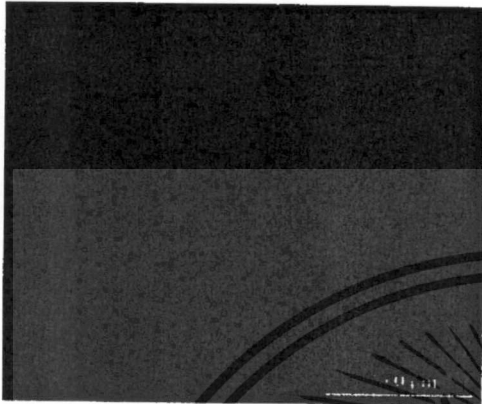


รูปที่ 2 การลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีการขึ้นรูปทางกล [23]

รูปที่ 3 แสดงการลดขนาดอนุภาค Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ในเนื้อโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag ด้วยวิธีการขึ้นรูปทางกลโดยใช้การรีดลดความหนาของชิ้นงาน เพื่อให้ได้อนุภาค Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ขนาดเล็ก [22]

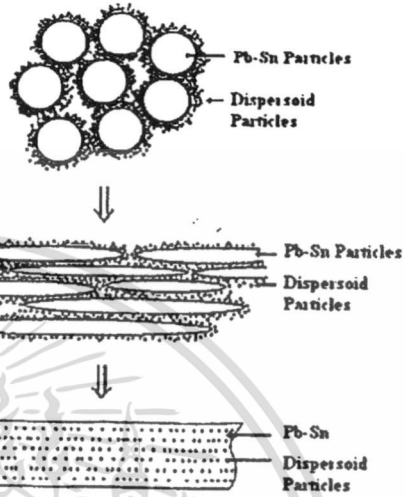


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 การลดขนาดอนุภาค  $Cu_3Sn$  ขนาดใหญ่ในรูป 3(a) ด้วยวิธีการขึ้นรูปทางกลให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กในรูป 3(b) [22]

นอกจากนี้ยังมีวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนอีกวิธีหนึ่งในกลุ่มนี้ คือ ผสมผงโลหะบัดกรีเข้ากับอนุภาคนาโนในของเหลวเพื่อให้อนุภาคนาโนเคลือบบนผิวของผงโลหะบัดกรี แล้วทำให้แห้งก่อนที่จะนำไปอัดเป็นแท่ง หลังจากนั้นทำการรีดร้อนให้แท่งโลหะบัดกรีกลายเป็นแผ่นบาง แล้วนำแผ่นโลหะบัดกรีที่ผ่านการรีดมาตัดเป็นแผ่นที่มีขนาดเล็กลง และนำมาซ้อนกันเพื่ออัดให้เป็นแท่งโลหะบัดกรีอีกครั้ง เพื่อรีดซ้ำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำซ้ำหลายครั้งจนกระทั่งได้แท่งโลหะบัดกรีที่มีอนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [5] ดังแสดงในรูปที่ 4

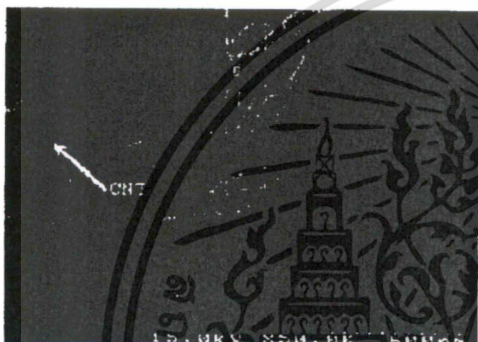


รูปที่ 4 การรีดให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อโลหะบัดกรี [5]

ถึงแม้จะพบว่าการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยวิธีในกลุ่มนี้ทำให้อนุภาคของเฟสที่สองมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่การผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยวิธีนี้จะทำให้การยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเฟสที่สองกับเนื้อโลหะบัดกรีถูกทำลายโดยแรงทางกลที่มากระทำกับโลหะบัดกรีในระหว่างการขึ้นรูป ทำให้สูญเสียความสามารถในการต่อต้านการเกิดความล้าและการคืบของโลหะบัดกรีเชิงประกอบ [5, 22, 23]

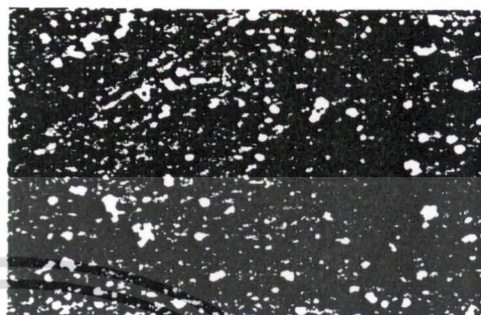
3) การผลิตแบบโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน โดยการนำผงโลหะบัดกรีพื้นฐานทำการผสม (Mixing) เข้ากับอนุภาคนาโนตามกรรมวิธีของการผลิตแบบโลหะผงวิทยา เพื่อให้ผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนผสมเข้ากันได้ดี แล้วนำผงโลหะที่ผ่านการผสมแล้วไปทำการอัดและทำการเผาซินเทออร์ (Sintering) ให้ผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนยึดเกาะกันได้ดี แต่ในการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการผสมผงโลหะบัดกรีและอนุภาคนาโนที่ค่อนข้าง

ข้างนาน (ประมาณ 10-15 ชั่วโมง) เนื่องจากเป็นการผสมอนุภาคของแข็งเข้ากับของแข็งด้วยกัน และอนุภาคนิดหนึ่งก็มีขนาดที่เล็กมาก นอกจากนี้ยังพบปัญหาการเกิดโพรงอากาศและการกระจุกตัวของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ผลิตด้วยวิธีนี้ [10-15] ในรูปที่ 5 แสดงโลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ผลิตด้วยวิธีโลหะผงวิทยา โดยผสมคาร์บอนนาโนทิวป์กับเนื้อโลหะบัดกรี Sn-3.5Ag-0.7Cu เพื่อให้เกิดเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ



รูปที่ 5 โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ผสมด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNT) และผลิตโดยวิธีโลหะผงวิทยา [11]

4) การหลอมโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะบัดกรีให้เป็นของเหลวแล้วเติมอนุภาคนาโนที่ต้องการลงไป จากนั้นจึงทำการกวนผสมทางกลเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ซึ่งวิธีการกวนผสมทางกลพบว่ามีทั้งการกวนด้วยการใช้ตัวกวน (Stirrer) และการใช้แรงสั่นสะเทือนจากการสั่นแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic) อย่างไรก็ตามการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนด้วยวิธีการกวนผสมทางกลเหล่านี้พบว่า ยังไม่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนได้ ทำให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้มีคุณสมบัติทางกลที่ไม่สม่ำเสมอ [16, 17, 24] รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโน SiC โดยใช้การสั่นแบบอัลตราโซนิก [24]

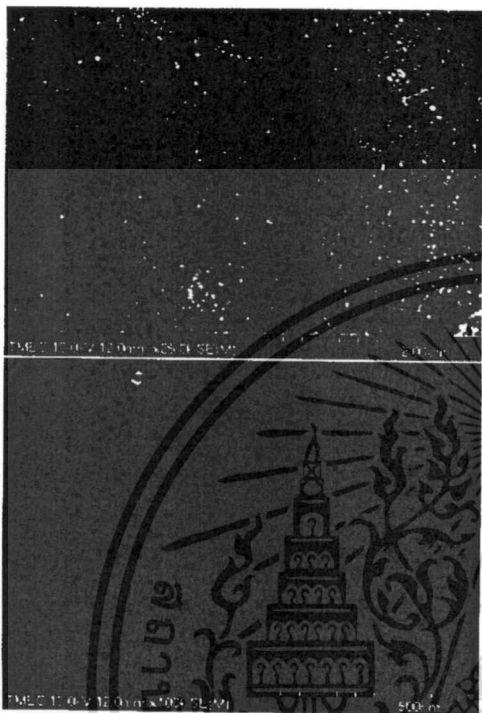


รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคนาโนโดยใช้การสั่นแบบอัลตราโซนิก [24]

วิธีการหลอมโลหะแล้วเติมอนุภาคนาโนลงไปเป็นวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่มีศักยภาพมากที่สุดที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโลหะบัดกรี เนื่องจากความไม่ซับซ้อนของขั้นตอนการผลิต และเป็นวิธีการผลิตที่ผู้ผลิตสามารถใช้เครื่องมือการผลิตร่วมกับการผลิตโลหะบัดกรีทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังพบการใช้วิธีการผลิตในลักษณะนี้ในการผลิตโลหะเชิงประกอบชนิดอื่นมาแล้ว [16, 17, 24]

ผู้เขียนบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนอีกวิธีหนึ่งด้วยการใช้วิธีการกวนผสมทางกลโดยใช้สัญญาณอลวน (Chaotic mixing) ในการผสมอนุภาคนาโนเชิงค็อกไซด์ (Zinc oxide nanoparticles) ในโลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว Sn-58Bi ซึ่งในการผลิตจะผสมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีที่กำลังหลอมเหลวแล้วใช้สัญญาณอลวนควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการกวนผสมทางกล โดยพบว่าวิธีการกวนผสมโดยใช้สัญญาณอลวนสามารถทำให้อนุภาคนาโนกระจายตัวในโลหะบัดกรีได้ดีพอสมควร รูปที่ 7 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กวนผสมโดยใช้สัญญาณอลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอนุภาคนาโน ZnO ในโลหะบัดกรี Sn-58Bi ที่กำลังขยายต่างๆ

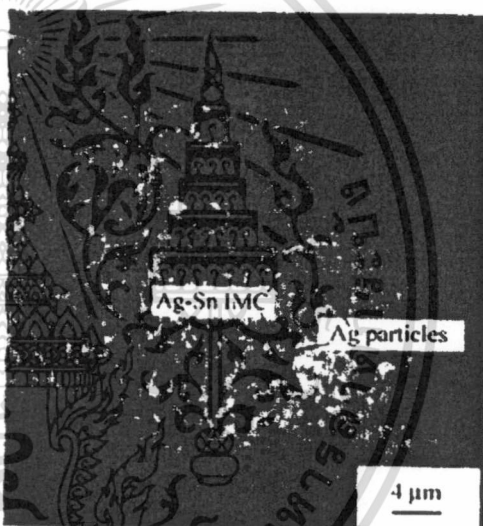
นอกจากนี้จากการสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนในรูปแบบครีม (Nano-composite solder pastes) สามารถทำได้ง่ายกว่าการผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนชนิดที่เป็นแท่งหรือแผ่นโลหะ การผลิตโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนแบบครีมสามารถทำได้โดยการกวนผสมทางกล ซึ่งมีการผลิตใน 2 รูปแบบด้วยกัน คือ

1) การผสมอนุภาคนาโนกับผงโลหะพื้นฐาน ซึ่งในวิธีนี้จะนำอนุภาคนาโนในปริมาณที่ต้องการผสมเข้ากับผงของโลหะพื้นฐานที่ใช้ในการทำโลหะบัดกรีแบบครีมโดยทั่วไป แล้วทำการกวนผสมทางกลให้อนุภาคนาโนและผงโลหะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงผสมกับฟลักซ์ และทำการกวนผสมให้อนุภาคนาโน ผงโลหะ และฟ

ลักซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออีกครั้งหนึ่ง [25-27]

2) การผสมอนุภาคนาโนกับโลหะบัดกรีแบบครีม สำหรับวิธีการนี้จะผสมอนุภาคนาโนในปริมาณที่ต้องการลงไป ในโลหะบัดกรีแบบครีมที่ได้ผลิตเอาไว้แล้ว หลังจากนั้นจะทำการกวนผสมทางกลให้อนุภาคนาโนกระจายทั่วทั้งเนื้อโลหะบัดกรีแบบครีม [28, 29]

รูปที่ 8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเงิน (Ag) ในโลหะบัดกรีแบบครีมชนิด Sn-0.7Cu หลังจากผ่านการบัดกรีแบบรีโฟลว์ (Reflow soldering) เกิดเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบ [27]



รูปที่ 8 การกระจายตัวของอนุภาคเงิน (Ag) ในโลหะบัดกรีแบบครีม [27]

กิตติกรสุประสงค์

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ.2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Evans R.W., Wilshire B., Creep of metals and alloys, 1985, London, The Institute of Metals.
- 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.
- Marshall J.L., Calderon J., Sees J., Lucey G., Hwang J.S., Composite solders, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1991, 14, pp:698-702.
- Betrabet H.S., McGee S.M., McKinlay J.K., Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, 25, pp:2323-2328.
- Mavoori H., Jin S., New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions, *Journal of Electronic Materials*, 1998, 27, pp:1216-1222.
- Shi Y., Liu J., Yan Y., Xia Z., Lei Y., Guo F., Li X., Creep properties of composite solders reinforced with nano- and microsized particles, *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37, pp:507-514.
- Callister W.D., Rethwisch, D.G., *Materials science and engineering*, 8th edition, 2010, Singapore, John Wiley & Sons.
- Smith W.F., Hashemi J., *Foundations of materials science and engineering*, 4th edition, 2006, New York, McGraw-Hill.
- Martin J.W., *Precipitation hardening*, 2nd Edition, 1998, Oxford, Butterworth Heinemann.
- Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Effect of carbon nano tubes on the shear strength and electrical resistivity of a lead-free solder, *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37, pp:515-522.
- Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes, *Materials Science & Engineering A*, 2006, 423, pp:166-169.
- Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Lead-free solder reinforced with multiwalled carbon nanotubes, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:1518-1522.
- Nai S.M.L., Wei J., Gupta M., Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites, *Thin Solid Films*, 2006, 504, pp:401-404.
- Kumar K.M., Kripesh V., Tay A.A.O., Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solders, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 450, pp:229-237.
- Kumar K.M., Kripesh V., Shen L., 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*, 2006, 504, pp:371-378.
- Shen J., Liu Y.C., Han Y.J., Tian Y.M., Gao H.X., Strengthening effects of ZrO<sub>2</sub> nanoparticles on the microstructure and microhardness of Sn-3.5Ag lead-free solder, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:1672-1679.
- Chantaramanee S., Plookphol T., Wisuthmethangoon S., Sikong L., Lead-free solder-SWCNT nanocomposite processing by ultrasonic, 4th International Conference on Recent Advances

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- in Materials, Minerals and Environment and 2nd Asian Symposium on Materials and Processing, 2009, Penang, Malaysia.
- Guo F., Composite lead-free electronics solders, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2007, 18, pp:129-145.
- Subramanian K.N., Bieler T.R., Lucas J.P., Microstructural engineering of solders, *Journal of Electronic Materials*, 1999, 28, pp:1176-1183.
- Shen J., Liu Y.C., Gao H.X., In situ nanoparticle-reinforced lead-free Sn-Ag composite prepared by rapid solidification, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2007, 18, pp:463-468.
- Lee J.H., Park D.J., Heo J.N., Lee Y.H., Shin D.H., Kim Y.S., Reflow characteristics of Sn-Ag matrix in-situ composite solders, *Scripta Materialia*, 2000, 42, pp:827-831.
- Tai F., Guo F., Han M.T., Xia Z.D., Lei Y.P., Shi Y.W., Creep and thermomechanical fatigue properties of in situ Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> reinforced lead-free composite solder, *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527, pp:3335-3342.
- Hwang S.Y., Lee J.W., Lee Z.H., Microstructure of a lead-free composite solder produced by an in-situ process, *Journal of Electronic Materials*, 2002, 31, pp:1304-1308.
- Lan J., Yang Y., Li X., Microstructure and microhardness of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method, *Materials Science & Engineering A*, 2004, 386, pp:284-290.
- Kao S.T., Lin Y.C., Duh J.G., Controlling intermetallic compound growth in SnAgCu/Ni-P solder joints by nanosized Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> addition, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:486-493.
- Lee H.Y., Duh J.G., Influence of Ni concentration and Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> nanoparticles on morphology of Sn-Ag-Ni solders by mechanical alloying, *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35, pp:494-503.
- Yan Y., Feng L., Zhang K., Wen J., Influence of temperature on creep behavior of Ag particle enhancement SnCu based composite solder, *Tsinghua Science & Technology*, 2007, 12, pp:296-301.
- Liu P., Yao P., Liu J., Effect of SiC nanoparticle additions on microstructure and microhardness of Sn-Ag-Cu solder alloy, *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37, pp:874-879.
- Tai F., Guo F., Xia Z.D., Lei Y.P., Yan Y.F., Liu J.P., Processing and creep properties of Sn-Cu composite solders with small amounts of nanosized Ag reinforcement additions, *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34, pp:1357-1362.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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, Brazing, and Diffusion Bonding)
- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
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)

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, Mongkolwongroj 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้