# อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305

# Effects of Mn-Doped $TiO_2$ and in Nanoparticles on Melting Point, Printability, and Wettability of SAC305 Lead-Free Solder Paste

วันยุทธ สุวรรณเครือ[1] ประธาน บุรณศิริ[2] กรรณชัย กัลยาศิริ[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกจะผสม Mn-doped $TiO_2$ ในอัตราส่วน 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% และในกลุ่มที่สองจะผสม In ที่มีอัตราส่วน 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มแรก โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีถูกทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) และความสามารถในการพิมพ์ศึกษาจากการวัดอัตราส่วนของน้ำหนักโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออก โดยโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260 $^{o}$C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งหลังการบัดกรีความสามารถในการเปียกของแต่ละชิ้นงานจะถูกศึกษาในรูปแบบของ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle จากผลการศึกษาพบว่า Solidus temperature และ Liquidus temperature ของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะบัดกรี SAC305 อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงอุณหภูมิการหลอมของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีค่าที่สูงกว่าโลหะบัดกรี SAC305 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมีอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ ผสมอยู่ในปริมาณน้อยๆแต่เมื่อปริมาณ Mn-doped $TiO_2$ เพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ลดลง และพบว่าเมื่อทำการผสม In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$ ลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ผสมเฉพาะ Mn-doped $TiO_2$ โดยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลงเมื่อทำการเติม In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$

**คำสำคัญ** : โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว อนุภาคนาโน ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Abstract**

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

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

## 1. บทนำ

คณะกรรมาธิการยุโรปหรืออีซี (EC-European commission) ได้กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS หรือ Restriction of Hazardous Substance [1] จากกฎข้อบังคับดังกล่าวจึงส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว ซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อใช้แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมซึ่งกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) [2, 3] เพราะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง [4, 5] อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี SAC305 ยังมีข้อด้อยในด้านของจุดหลอมเหลว (216-221$^{o}$C) ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม คือ Sn-Pb eutectic ที่มีจุดหลอมเหลว 183$^{o}$C [6] และคุณสมบัติทางกลที่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม [7, 8] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ทัดเทียมกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเติม In ลงในโลหะบัดกรีทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวมีค่าลดลง [9] นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีมีค่าที่ดีขึ้น และช่วยในการลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเมื่อทำการบัดกรี [10,11]

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง ซึ่งอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ เป็นอนุภาคชนิดใหม่ที่คาดว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงได้เนื่องจาก Mn ในปริมาณน้อยๆ สามารถละลายในทองแดงได้ดี [12, 13] และคาดว่าการเติม In จะสามารถช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกเป็นโลหะบัดกรี Sn96.5Ag3.0Cu0.5 (SAC305) ผสม Mn-doped $TiO_2$ ความบริสุทธิ์ 99 % ในปริมาณ 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% ขณะที่กลุ่มที่สองผสม In ความบริสุทธิ์ 99.99 % ยี่ห้อ ALDRICH ในปริมาณ 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มที่หนึ่งโดยผสมด้วยวิธีทางกลเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโลหะบัดกรี ในการบัดกรีใช้แผ่นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30 mm x 30 mm x 0.35 mm โลหะบัดกรีที่ผสมกันอย่างสมบูรณ์แล้วจะถูกนำมาพิมพ์บนแผ่นทองแดงด้วยแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ชิ้นงานในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดลองส่วนผสมละ 3 ชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ

### 2.1 การทดสอบจุดหลอมเหลว

จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมถูกทดสอบด้วยเครื่อง DSC รุ่น NETZSCH DSC 204 การทดสอบจะทดสอบภายใต้บรรยากาศ $N_2$ ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละชิ้นมีน้ำหนักประมาณ 8 mg ซึ่งอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 °C/min โดยเริ่มจากอุณหภูมิตั้งต้นที่ 25 °C จนถึง 350 °C

### 2.2 การวัดความสามารถในการเปียก

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

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

เมื่อ $A_1$ คือ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง และ $A_0$ คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะบัดกรีก่อนการบัดกรี และค่า Spread factor ($S_f$) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

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

เมื่อ H คือความสูงของโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว เช่นเดียวกับการค่า Contact angle ($\theta$) สามารถหาได้จากสมการที่ 3

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

โดยตัวแปรต่างๆสามารถหาได้จากภาพถ่ายของโลหะบัดกรีหลังการเย็นตัวผ่านโปรแกรม Image pro express และความสูงของโลหะบัดกรีสามารถวัดได้โดยไมโครมิเตอร์

### 2.3 การวัดความสามารถในการพิมพ์

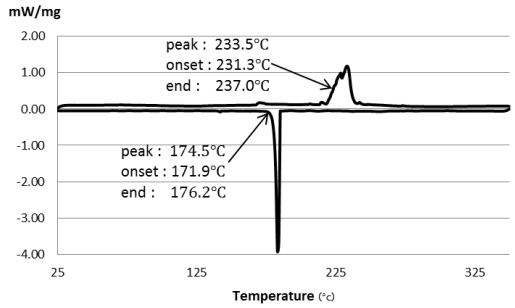
การวัดความสามารถในการพิมพ์สามารถวัดได้จากน้ำหนักของโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออกซึ่งการวัดความสามารถในการพิมพ์จะทำการทดลองก่อนการบัดกรี

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการทดสอบจุดหลอมเหลว

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 1.** ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305

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

**ตารางที่ 1** อุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

| ชิ้นงาน | $T_S$(°C) | $T_L$(°C) | $\Delta T$(°C) |
|---|---|---|---|
| SAC305 | 231.3 | 237.0 | 5.7 |
| SAC305-0.05Mn-$TiO_2$ | 227.0 | 234.8 | 7.8 |
| SAC305-0.1Mn-$TiO_2$ | 220.8 | 236.7 | 15.9 |
| SAC305-0.5Mn-$TiO_2$ | 217.0 | 235.2 | 18.2 |
| SAC305-1.0Mn-$TiO_2$ | 217.7 | 234.3 | 16.6 |
| SAC305-0.05Mn-$TiO_2$-0.5In | 221.9 | 231.5 | 9.6 |
| SAC305-0.1Mn-$TiO_2$-0.5In | 222.4 | 230.7 | 8.3 |
| SAC305-0.5Mn-$TiO_2$-0.5In | 220.1 | 232.6 | 12.5 |
| SAC305-1.0Mn-$TiO_2$-0.5In | 220.2 | 234.9 | 14.7 |

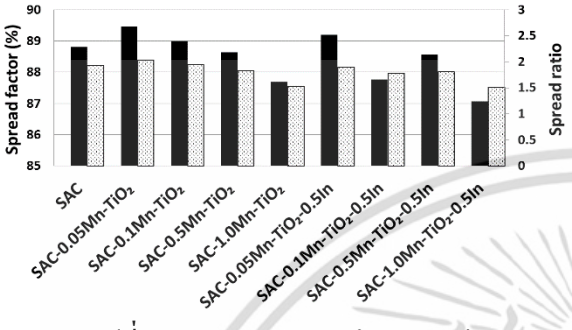
**3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการเปียก**

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

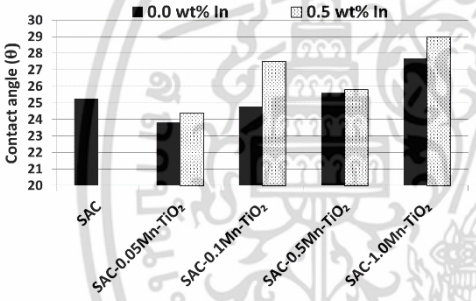
การกระจายตัวที่ลดลงของโลหะบัดกรีเมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรีมีมากขึ้น หรือการกระจายตัวที่ลดลงจากการเติมอนุภาคนาโน In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$ ลงในโลหะบัดกรีมีความเป็นไปได้จากการเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องจากการมีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรี [10,14] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคนาโนจะไปขัดขวางการไหลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนขณะหลอมบนแผ่นทองแดง โดยการขัดขวางการไหลของโลหะบัดกรีขณะหลอมทำให้มุมสัมผัสมีค่าที่มากขึ้น หรือมีการกระจายตัวที่ลดลง



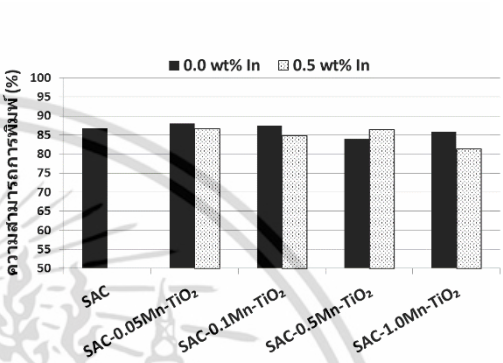

**รูปที่ 2.** การกระจายตัวของโลหะบัดกรี




**รูปที่ 3.** มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

**3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการพิมพ์**

โลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการพิมพ์ที่ดีควรพิมพ์ติดกับแผ่นรองได้ตามปริมาตรของแม่พิมพ์ และไม่ควรได้รับผลกระทบจาก Wall-slip effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดึงแม่พิมพ์ออกจากแท่นพิมพ์ ซึ่งขณะดึงแม่พิมพ์ออกจะมีโลหะบัดกรีบางส่วนติดไปกับแม่พิมพ์ ส่งผลให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง [15] จากผลการทดลองในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเติม Mn-doped $TiO_2$ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% ทำให้ความสามารถการพิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 1.28 และ 0.63 % ตามลำดับ และเมื่อปริมาณของ Mn-doped $TiO_2$ มีมากกว่า 0.1 wt% หรือเติม In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$ ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่าความสามารถการพิมพ์มีค่าต่ำกว่า 86.79 % ซึ่งเป็นค่าความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยในงานวิจัยของ Liu et al. [16] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน SAC ในโลหะบัดกรี Sn-Bi พบว่าเมื่ออนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีมากขึ้นทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง




**รูปที่ 4.** ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

## 4. สรุปผล

จากผลการวิจัยพบว่าการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped $TiO_2$ หรือ In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$ สามารถช่วยลด $T_S$ และ $T_L$ ของโลหะบัดกรีSAC305 อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงโลหะบัดกรีส่งผลให้ $\Delta T$ ของโลหะบัดกรีมีค่าที่สูงขึ้น โดยความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเติม Mn-doped $TiO_2$ ในปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติม In ร่วมกับ Mn-doped $TiO_2$ ในปริมาณ 0.05 wt% ขณะที่ความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐานถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมี Mn-doped $TiO_2$ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% โดยจากผลการทดสอบการเติม Mn-doped $TiO_2$ ในปริมาณ 0.05 wt% มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีค่าสามารถเปียก และความสามารถในการพิมพ์ที่สูงที่สุด ขณะที่ $T_S$ และ $T_L$ มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน และมี $\Delta T$ ต่ำที่สุดเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. เอกสารอ้างอิง


[1] E. Bradley, C. A. Handwerker, J. Bath, R. D. Parker, and R. W. Geaney,"Lead-free electronics iNEMI Projects lead to successful manufacturing," Wiley-IEEE Press, United State of America, 2007

[2] M. Abtew, and G. Selvaduray,"Lead-free solderin microelectronic," Materials Science & Engineering R: Reports, vol. 27, pp. 95-141, 2000.

[3] R. Mahmudi, and S. Mahin-Shirazi, "Effect of Sb addition on tensile deformation behavior of lead-free Sn-3.5Ag solder alloy," Materials and Design, vol. 32, pp. 5027-5032, 2011.

[4] H. Conrad, Z. Guo, Y. Fahmy, and D. I. Yang, "Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate, and low-cycle fatigue of solder joint," Journal of Electronic Materials, vol. 28, pp. 1062-1070, 1999.

[5] J. L. Marshall, J. Calderon, J. Sees, G. Lucey, and J. S. Hwang, "Composite solder," IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 14, pp. 698-702, 1991.

[6] Z. Moser, P. Sebo, W. Gasior, P. Svec, and J. Pstrus, "Effect of indium on wettability of Sn-Ag-Cu solders," Experiment vs Modeling Part I, CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, vol. 33, pp. 63-68, 2009.

[7] H. S. Betrabet, S. M. McGee, and J. K. McKinlay, "Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solder to achieve microstructural refinement and stability," Scripta Metallurgica et Materialia, vol. 25, pp. 2323-2328, 1991.

[8] H. Mavoori, and S. Jin, "New, creep-resistant, low melting point solder with ultrafine oxide dispersions," Journal of Electronic Materials, vol. 27, pp. 1216-1222, 1998.

[9] K. Kanlayasiri, T. Ariga, and M. Ongkolwongrojn, "Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy," Journal of Alloys and Compounds, vol. 485, pp. 225-239, 2009.

[10] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites," Tin Soild Films, vol. 504, pp. 401-404, 2006.

[11] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes," Materials. Science and Engineering: A, vol. 423, pp.166-169, 2006.

[12] T. B. Massalski, Binary alloy phase diagram, 2nd Edition, ASM International, Materials Park, 1990.

[13] A. J. Boesenberg, I. E. Anderson, and J. L. Harringa, "Development of Sn-Ag-Cu-X solder for electronic assembly by micro-alloying with Al," Journal of Electronic Materials, vol. 41, pp. 1868-1881, 2012.

[14] R. Ashayer, S. H. Mannan, S. Sajjadi, M.P. Clode, and M. M. Miodownik, "Nanoparticle enhanced solders for high temperature environments," 9th Electronics packaging technology conference, Singapore, pp. 109-113, 2007.

[15] S. Mallik, N. N. Ekere, R. Durairaj, A. E. Marks, and A. Seman, "Wall-slip effects in SnAgCu solder pastes used in electronics assembly applications," Materials and Design, vol. 30, pp. 4502-4506, 2009.

[16] J. Liu, Y.L. Gao, and Q. J. Zhai, "Recent development of nano-solder paste for electroincs interconnect applications," Electronics Packaging Technology Conference, pp. 84-93, 2008.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้