

การศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-Doped TiO₂ ที่มีต่อ
พฤติกรรมการหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305+0.5In
An Investigation on Influence of Mn-doped TiO₂ Nano-Particles on Melting
Behavior, Wettability and Intermetallic Layer of
SAC305+0.5In Lead-Free Solder Paste

ประจักษ์ จัตกุล¹ ธีรวิทย์ เชื้อแก้ว¹ และกรรณชัย กัลยาศิริ^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Prajak Jattakul¹ Teerawut Khuenkaew¹ Kannachai Kanlayasiri^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and
Technology, Chanthaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok

² Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

*Corresponding author Email: kannachai.ka@kmitl.ac.th *

(Received: January 29, 2022; Accepted: June 23, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305+0.5In โดยใช้อนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 wt% ตามลำดับ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนเหล่านี้ที่มีต่อพฤติกรรมการหลอมเหลว ความสามารถในการเปียกบนแผ่นรองทองแดง และชั้นสารประกอบเชิงโลหะของรอยบัดกรี ซึ่งได้ทำขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที จากผลการทดลองการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในโลหะบัดกรีมีผลทำให้ช่วงการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ไม่เกิน 0.5 wt% ทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะลดลง ในทางตรงกันข้ามปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ มีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่ามากขึ้น

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว อนุภาคนาโน พฤติกรรมการหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก สารประกอบเชิงโลหะ

Abstract

This research was performed to study the influence of Mn-doped TiO_2 nanoparticles on the properties of SAC305+0.5In lead-free solder. The nanoparticles were used at 0.05, 0.1, 0.5 and 1.0 wt%. Effects of these factors on alloy melting behavior, wettability of solder on the copper plate and intermetallic layer of the solder joint were studied. The specimens were made according to JIS Z3198-3: 2003 standard and heated at temperature of 260°C for 30 seconds. The nanoparticles increased the melting range and the wettability of the solder. Finally, the nanoparticles decreased the intermetallic layer thickness at the composition below 0.5 wt% but increased the intermetallic layer thickness at the composition above 0.5 wt%.

Keywords: Lead-free solder, Nanoparticles, Melting behavior, Wettability, Intermetallic compound

1. บทนำ

ประเทศไทยผลิตและส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปีมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 1 ล้านล้านบาท [1] แต่เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในสุขภาพของมนุษย์ ทำให้หลายๆประเทศได้ออกข้อบังคับออกมาเพื่อควบคุมการใช้สารมีพิษบางชนิดในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตะกั่ว พรอท แคดเมียม Hexavalent Chromium, Polybrominated Biphenyls และ Polybrominated Diphenyl Ether [2] ซึ่งการออกข้อบังคับเหล่านี้ทำให้ผู้ส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถส่งสินค้าที่ใช้โลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมเข้าไปจำหน่ายในประเทศเหล่านั้นได้ ส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้งานแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่เป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกและตะกั่ว

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อทดแทนโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน คือ โลหะบัดกรีกกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) เพราะมีคุณสมบัติต่างๆเหมาะสมกับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่บัดกรีด้วยวิธี Reflow soldering และ Wave soldering โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะบัดกรี Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีและความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง แต่ SAC305 มีคุณสมบัติด้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม (Sn-Pb Eutectic solder) ในเรื่องความสามารถในการต้านทานความล้า และการคืบ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [3], [4], [5]

วิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีเพื่อให้สามารถต่อต้านความล้าและการคืบได้ดีขึ้น คือ การทำให้โลหะบัดกรีนั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) โดยการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปในเนื้อของโลหะบัดกรีเพื่อใช้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocations) และการเลื่อนของขอบเกรน [5], [6] และด้วยความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้มีการนำอนุภาคนาโน (Nano-particles) ชนิดต่างๆมาใช้เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ในการทำให้โลหะบัดกรีเปลี่ยนเป็นโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโน (Nano-composite solders) [7] ซึ่งจะทำให้โลหะบัดกรีเชิงประกอบที่ได้ มีคุณสมบัติต่างๆในการบัดกรีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพบว่า การเติมอนุภาคนาโนลงไป ส่งผลเสียต่อโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนที่ได้ คือ ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการเปียกที่ลดลง แต่มีผลดี คือ ทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ในรอยบัดกรีน้อยลง [8], [9]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่มีต่อคุณสมบัติในการบัดกรีของโลหะบัดกรี

SAC305 ที่ผ่านการเติมอินเดียม (In) ปริมาณ 0.5 wt% (SAC305+0.5In) เนื่องจากการเติม In จะช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี และเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีกับแผ่นรองทองแดงได้ [10], [11] โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อพฤติกรรมการหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และชั้นสารประกอบเชิงโลหะของรอยบัดกรี สำหรับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ เป็นอนุภาคนาโนชนิดใหม่ที่สามารถใช้เป็นเฟสกระจายในโลหะบัดกรีได้ดี เพราะอนุภาคนาโน TiO₂ เป็นอนุภาคนาโนชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเติมลงไปในโลหะบัดกรี เนื่องจากมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะบัดกรีพื้นฐาน (SAC) ต่างๆ เช่น Sn, Ag และ Cu รวมทั้งสามารถยึดเกาะกับเนื้อโลหะบัดกรีได้ดี [9] โดยผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ และสร้างองค์ความรู้พื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการทดลองจะมีการเตรียมสารเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบโดยการผสมโลหะบัดกรี SAC305 กับอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ที่อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันคือ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% โดยที่อัตราส่วนผสม 0.05, 0.10, 0.50 และ 1.00 wt% นั้น มีการเติมอินเดียม (In) เข้าไปในโลหะบัดกรีที่อัตราส่วนผสม 0.50 wt%

โดยทำการผสมอนุภาคนาโนและ In ให้กระจายตัวเข้ากับโลหะบัดกรี SAC305 อย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาผสมประมาณ 30 นาที ในส่วนโลหะพื้นจะใช้ทองแดงบริสุทธิ์ ขนาด 30x30x0.35 mm ล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน

2.2 การบัดกรีและพฤติกรรมการหลอมเหลว

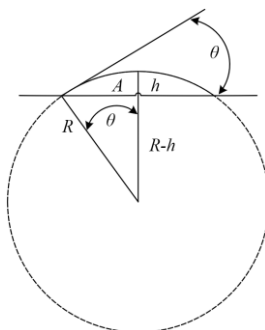
นำโลหะบัดกรีที่ผสมแล้วมาอัดลงในบล็อกที่เตรียมไว้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm (ปริมาตร 0.041 cm³) วางลงบนแผ่นรองทองแดง ให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปล่อยให้ชิ้นทดสอบเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการถ่ายภาพโลหะบัดกรีทั้งก่อนและหลังการหลอม ทำการทดสอบซ้ำ 3 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ

ในการศึกษาเรื่องพฤติกรรมการหลอมเหลว ทำโดยการนำสารที่เตรียมไว้ในแต่ละส่วนผสมไปทดสอบโดยใช้ Different Scanning Calorimeter (DSC) โดยเครื่องที่ใช้ทดสอบเป็น NETZSCH DSC 204 ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศ N₂ โดยอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10°C/min

2.3 ความสามารถในการเปียก

ในการศึกษาเรื่องความสามารถในการเปียกจะใช้ค่ามุมสัมผัส, ค่าตัวประกอบการกระจายตัว และค่าอัตราส่วนการกระจายตัว ในการอธิบายถึงความสามารถในการเปียกของสารแต่ละส่วนผสม ค่ามุมสัมผัสจะบอกถึงความสามารถในการเปียก หากมีค่ามุมสัมผัสน้อยแสดงว่าความสามารถในการเปียกดี ในทางตรงกันข้ามหากค่ามุมสัมผัสมากแสดงว่าความสามารถในการเปียกนั้นไม่ดี ในการหาค่ามุมสัมผัสจะทำการถ่ายรูปจากด้านข้างของโลหะบัดกรี เพื่อหาค่ามุมสัมผัสตั้งสมการที่ 1 และรูปที่ 1 [12], [13]

$$\sin \theta = \frac{2}{((A/h)+(h/A))} \quad (1)$$



รูปที่ 1 การวัดค่ามุมสัมผัส

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส (องศา) A คือ รัศมีของโลหะบัดกรี (mm) และ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรี (mm)

ในการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor) จะนำโลหะบัดกรีหลังการหลอมมาวัดค่าความสูง โดยใช้ไมโครมิเตอร์ จากนั้นแทนค่าตามสมการที่ 2 [12], [13]

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

เมื่อ h คือ ความสูงของโลหะบัดกรีที่แผ่กระจาย (mm) D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีที่ถูกทดสอบ (mm)

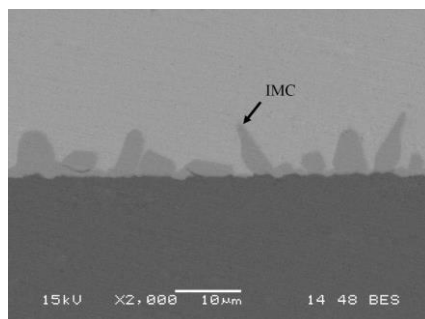
ในการหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัว สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (*Image-Pro Express*) ในการวัดเพื่อคำนวณหาพื้นที่ของโลหะบัดกรี โดยทำการหาพื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอม โดยค่า D ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดบล็อคที่ใช้ในการเติมโลหะบัดกรีก่อนทำการหลอม ซึ่งมีค่า $D = 6.5$ mm จากนั้นหาค่าอัตราส่วนการกระจายตัวโดยแทนในสมการที่ 3 [12], [13]

$$S_r = \frac{A_1}{A_0} \quad (3)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่ของโลหะบัดกรีก่อนการหลอม และ A_1 คือ พื้นที่ของโลหะบัดกรีหลังการหลอม ดังนั้นสามารถหาพื้นที่ก่อนการหลอมโลหะบัดกรีได้โดยหาค่า D จากเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดบล็อคที่ใช้ในการเติมโลหะบัดกรีก่อนทำการหลอมซึ่งมีค่า $D = 6.5$ mm

2.4 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

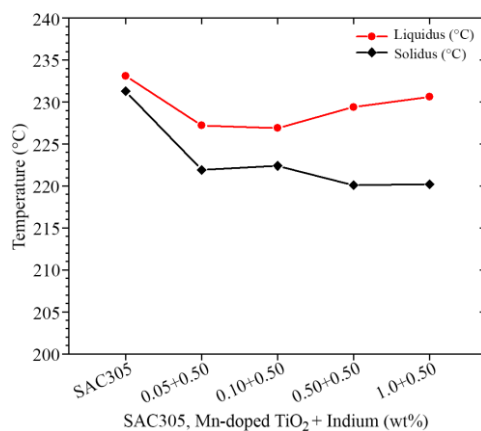
ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนผสมของโลหะบัดกรี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยตัวอย่างของ IMC แสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 IMC ของ SAC305+0.5In+1.0wt% Mn-doped TiO₂

3. ผลและการอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวด้วย DSC ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และโลหะบัดกรีผสมจากรูปที่ 3 พบว่าอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus) ของ SAC305 มีค่า 231.3 °C เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ปริมาณเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.5, และ 1.0 wt% ตามลำดับ และ In 0.5 wt% ส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสของโลหะบัดกรีเป็น 221.9 °C, 222.4 °C, 220.1 °C และ 220.2 °C ตามลำดับ ดังนั้นการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ส่งผลให้อุณหภูมิโซลิดัสมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรี SAC305

จากรูปที่ 3 จะพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus) ของ SAC305 มีค่า 233.1 °C เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ตามส่วนผสม และ In 0.5 wt% พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าเป็น 227.2 °C, 226.9 °C, 229.4 °C และ 230.6 °C ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าการเติม In และอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ มีผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวลดลง เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรี SAC ซึ่งจะเห็นว่าช่วงของการหลอมเหลวจะกว้างขึ้นเมื่อมีอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 Solidus และ Liquidus ของโลหะบัดกรี

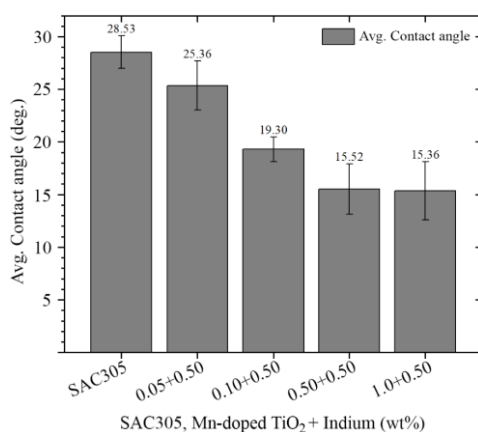
3.1 ความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีจะถูกพิจารณาในรูปของค่ามุมสัมผัส (θ) ค่าตัวประกอบของการกระจาย และ อัตราส่วนของการกระจาย การที่จะอธิบายความสามารถในการเปียกนั้น ได้ทำการหาค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสม

หลังทำการหลอม โดยหาค่ามุมสัมผัสของทั้งด้านซ้ายและขวาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด โดยค่ามุมสัมผัสที่ได้จากการทดสอบเฉลี่ยแสดงดังรูป 4

3.1.1 ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

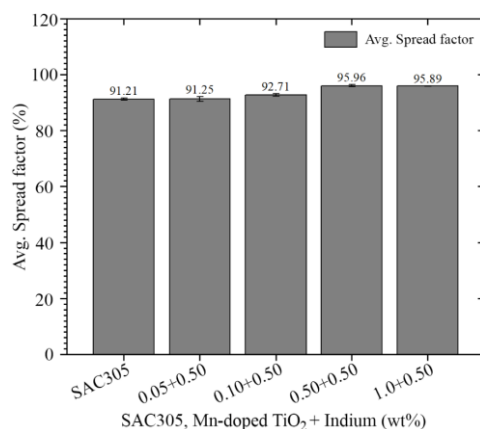
จากรูปที่ 4 พบว่าค่ามุมสัมผัส (θ) จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยมุมสัมผัสของโลหะบัดกรีจะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วถึงปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เท่ากับ 0.5 wt% จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามุมสัมผัสจะลดลง เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsao และคณะ [14] โดยโลหะบัดกรี SAC ที่ใช้เป็น Sn3.5Ag0.5Cu ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250°C พบว่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC มีค่า 28.5 องศา ซึ่งจากผลของการศึกษานี้พบว่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรี SAC305 นั้นมีค่า 28.53 องศา และมุมสัมผัสจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ในโลหะบัดกรี SAC มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4 ค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน

3.1.2 ค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_f)

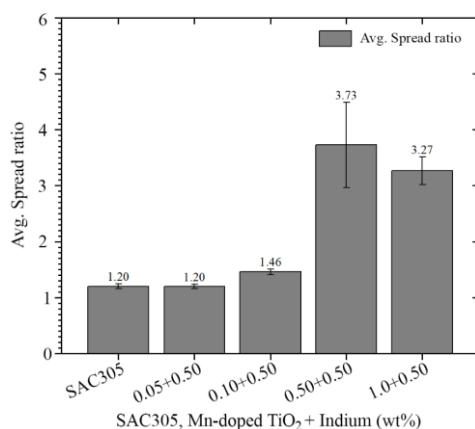
จากรูปที่ 5 จะพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่มีการเติม In 0.5 wt% มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนถึง 0.5 wt% และลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มมากขึ้นเป็น 1.0 wt% แต่ยังคงมีค่าตัวประกอบการกระจายตัวมากกว่าโลหะบัดกรี SAC305



รูปที่ 5 ค่าตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

3.1.3 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio: S_r)

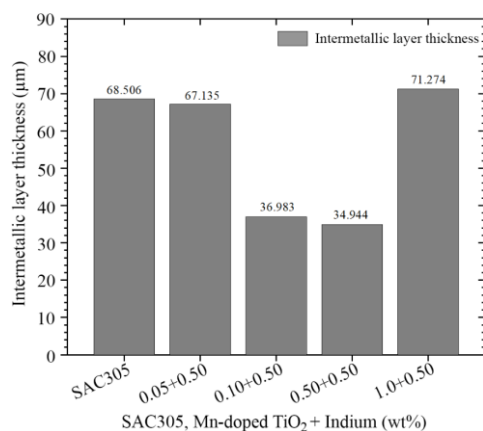
จากรูปที่ 6 พบว่าค่าอัตราส่วนการกระจายตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ไม่เกิน 0.5 wt% เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เกิน 0.5 wt% อัตราส่วนการกระจายตัวมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 6 ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรี

3.2 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการวิเคราะห์ชั้น IMC ในแต่ละส่วนผสมทั้ง SAC305 และการเติม Mn-doped TiO_2 และ In โดยตัวอย่างของโครงสร้างจุลภาคของ IMC ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งการศึกษาความหนาของ IMC นั้นจะใช้โปรแกรม *Image-Pro Express* ในการวัดความหนาของ IMC โดยความหนาของ IMC แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความหนาของ IMC จะลดลง เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ไม่เกิน 0.5 wt% และมีแนวโน้มของความหนาของ IMC เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เกิน 0.5 wt% ดังนั้นการเติมอนุภาคนาโนจะส่งผลต่อชั้นของรอยต่อบัดกรีและระงับการเติบโตของ IMC อย่างไรก็ดีตามเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากในโลหะบัดกรีส่งผลให้ความสามารถในการระงับการเจริญเติบโตของ IMC ลดลง ทำให้ความหนาของ IMC มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 IMC ของโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมที่ต่างกัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ที่มีพฤติกรรมการหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และชั้นสารประกอบเชิงโลหะในโลหะบัดกรี SAC305+0.5In กับแผ่นรองทองแดงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ในโลหะบัดกรีมีผลทำให้ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรี SAC305+0.5In และเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305+0.5In สำหรับการเติมปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ไม่เกิน 0.5 wt% มีผลทำให้ความหนาของ IMC ลดลง แต่เมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาของ IMC มีค่ามากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fact sheet electronic products. 2020. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/contents_attach/749352/749352.pdf (In Thai)
- [2] RoHS/ELV. 2019. [Online]. Available: <https://thairohs.org/index.php/th> (In Thai)
- [3] S. Cheng, C.M. Huang and M. Pecht, "A review of lead-free solders for electronics applications", *Microelectronics Reliability*, Vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 77–95, 2017. doi: 10.1016/j.microrel.2017.06.016
- [4] O.R. Adetunji, R.A. Ashimolowo, P.O. Aiyedun, O.M. Adesusi, H.O. Adeyemi and O.R. Oloyede, "Tensile, hardness and microstructural properties of Sn-Pb solder alloys", in *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, 2021, pp. 321–325. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.656
- [5] H. Mavoori and S. Jin, "New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 27, No. 11, 1998, pp. 1216–1222. doi: 10.1007/s11664-998-0072-9
- [6] A. El-Daly, A. Fawzy, S.F. Mansour and M.J. Younis, "Thermal analysis and mechanical properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder alloy after modification with SiC nano-sized particles", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 24, 2013, pp. 2976–2988. doi: 10.1007/s10854-013-1200-8

- [7] F. Khodabakhshi, M. Zareghomsheh and G. Khatibi, “Nanoindentation creep properties of lead-free nanocomposite solders reinforced by modified carbon nanotubes”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 797, 2020. doi: 10.1016/j.msea.2020.140203
- [8] S.Y. Chang, C.C. Jain, T.H. Chuang, L.P. Feng and L.C. Tsao, “Effect of addition of TiO₂ nanoparticles on the microstructure, microhardness and interfacial reactions of Sn3.5AgxCu solder”, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 10, 2011, pp. 4720–4727. doi: 10.1016/j.matdes.2011.06.044
- [9] Y. Tang, G.Y. Li, and Y.C. Pan, “Influence of TiO₂ nanoparticles on IMC growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO₂ solder joints in reflow process”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 554, 2012, pp. 195–203. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.12.019
- [10] K. Kanlayasiri, M. Mongkolwongrojn, and T. Ariga, “Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 485, 2009, pp. 225–230. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.06.020
- [11] K. Kanlayasiri and K. Sukpimai, “Effects of indium on the intermetallic layer between low-Ag SAC0307-xIn lead-free solders and Cu substrate”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 668, 2016, pp. 169–175. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.231
- [12] K. Kanlayasiri and N. Meesathien, “Effects of zinc oxide nanoparticles on properties of SAC0307 lead-free solder paste”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, Article ID 3750742, 2018. doi: 10.1155/2018/3750742
- [13] X. Wang, L. Zhang, M. Li, X. Wang, and M. Zhao, “Enhancement of structure and properties of Sn58Bi solder by AlN ceramic particles”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 19, 2022, pp. 2584–2595. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.001
- [14] L.C. Tsao, B.C. Wang, C.W. Chang, and M.W. Wu, “Effect of nano-TiO₂ addition on wettability and interfacial reactions of Sn0.7Cu composite solder/Cu solder joints”, in *2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2010, pp. 250–253. doi: 10.1109/ICEPT.2010.5582427