

การศึกษาความสามารถการเปียกและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สาร
ตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง

The Study of Wettability and Microstructure for SAC305 and SAC305-0.5In
Lead-Free Solders on Copper Substrate

สุชาติ จันทรมณี^{1*} ไพโรจน์ สังขไพฑูรย์²

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อ.เมือง จ.สงขลา 90000 E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th^{1*}

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 E-mail: phairote.s@psu.ac.th²
Suchart Chantaramanee^{1*}, Phairote Sungkhaphaitoon²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Srivijaya, Muang, Songkhla, 90000, E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th^{1*}

²Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai,
Songkhla, 90112, E-mail: phairote.s@psu.ac.th²

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาความสามารถการเปียกและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง โดยทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วย Differential Scanning Calorimetric (DSC, NETZSCH, DSC 200 F3 Maia) และทดสอบความสามารถการเปียกด้วยวิธี Sessile drop เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว พื้นที่การกระจายตัว และมุมสัมผัส ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุม โดยได้ศึกษาที่ 2 ตัวแปร 3 ระดับ คือ ที่อุณหภูมิการบัดกรี 240, 260 และ 300 °C และเวลาการบัดกรี 20, 30 และ 60 s ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมธาตุเจืออินเดียม 0.5 wt.% ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 จุดหลอมเหลวลดลง 3.8 °C นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระจายตัว และอัตราส่วนการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นแปรตามอุณหภูมิการบัดกรีที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 91.25±0.53% และ 7.75±0.34 เท่า ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง มีค่าเฉลี่ยลดลงเมื่ออุณหภูมิการบัดกรีเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามุมสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ 19.88±1.29 ° ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C ที่เวลาการบัดกรี 30 s และมีความสามารถในการเปียกที่ดี นอกจากนี้ พบว่า ชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบัดกรีเพิ่มขึ้นและเกิดเฟส Cu₆Sn₅
คำหลัก: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ความสามารถในการเปียก มุมสัมผัส พื้นที่การกระจายตัว

Abstract

The purpose of this research was to study wettability and microstructure for SAC305 and SAC305-0.5In lead-free solders on copper substrate. The melting point of lead-free solder alloys was analyzed by the Differential Scanning Calorimetric (DSC, NETZSCH, DSC 200 F3 Maia). The wettability was studied by sessile drop method for the relationship between the spread factors, spread ratio, spreading area and contact angle of lead-free solder alloys. The parameters were used 2 factors 3 levels at 240, 260 and 300 °C and dwell time of 20, 30 and 60 seconds. As results, the addition of Indium 0.5 wt.% into SAC305 lead-free solder

alloys was decreased the melting point to 3.8 °C. Moreover, the maximum average spread factor and spread ratio were an increased to 91.25±0.53% and 7.75±0.34 times with increasing the soldering temperature, respectively. Whereas, the minimum average contact angle of SAC305-0.5In solder alloys on copper substrate was about 19.88±1.29 ° at 300 °C, 30 seconds and good wettability. Therefore, it found that thickness of intermetallic compound was an increased with the soldering temperature the an increasing and phase for intermetallic compound is Cu₆Sn₅

Keywords: Lead free solders, Wettability, Contact angle, Spreading area

1. บทนำ

ในระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2560 (ม.ค-ก.พ) อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีมูลค่าการส่งออกเครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ และแผงวงจรพิมพ์ โดยมีตลาดส่งออกที่สำคัญคือ สหรัฐอเมริกาและฮ่องกง สามารถทำรายได้ให้กับประเทศเป็นมูลค่าสูงถึง 3,435,666.50 ล้านบาท [1] และมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงในอนาคตเมื่อมีขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นเช่นกัน หากมีระบบการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นไม่ได้ตามมาตรฐาน จะส่งผลเสียต่อระบบนิเวศและสภาพแวดล้อมโดยรวมขึ้นได้ เนื่องจากในกระบวนการบัดกรีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้ากับแผงวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) ในกระบวนการบัดกรีนั้นนิยมใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมระหว่างโลหะดีบุกและตะกั่ว (Tin-lead solder) หรือที่เรียกกันว่า “ตะกั่วบัดกรี” เช่น 63Sn-37Pb มีจุดหลอมเหลวต่ำที่อุณหภูมิ 183 °C และซึ่งมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น ราคาถูก หาได้ง่าย มีสมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนที่ดีเยี่ยม [2] แต่มีส่วนผสมของสารตะกั่วในปริมาณ 37% ซึ่งเป็นโลหะหนักมีสารพิษที่ส่งผลเสียกับมนุษย์ [3] ด้วยเหตุผลที่กล่าวเบื้องต้นนี้ จึงทำให้หลายประเทศทั่วโลกได้ตระหนักถึงความจำเป็นที่จะต้องเลิกใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว ดังเช่น ในสหภาพยุโรป EU (European union) ได้มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 และได้ออกกฎระเบียบว่าด้วยเศษเหลือทิ้งจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (WEEE-Waste

from Electrical and Electronics Equipments) และได้ประกาศกฎระเบียบว่าด้วยการห้ามใช้สารที่มีโลหะหนักที่เป็นอันตรายบางประเภทในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (RoHS-The Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronics Equipments) ด้วย โดยห้ามการใช้โลหะตะกั่วอย่างเด็ดขาดกับผลิตภัณฑ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า [4] จากการออกกฎระเบียบข้อบังคับดังกล่าวขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตลาดของสหภาพยุโรป และอีกหลายประเทศ เช่น ตุรกี จีน และญี่ปุ่น เป็นต้น [5] จึงเป็นแรงผลักดันที่สำคัญต่อการวิจัยเพื่อพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) เป็นอย่างยิ่งเพื่อต้องการนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ใช้อยู่ คือ ยูเทคติก Sn-Pb ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาในด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วย สำหรับในประเทศไทยนั้น ที่ผ่านมามีได้มีการกล่าวถึงกลไกการขับเคลื่อนความมั่นคงที่เปลี่ยนแปลงประเทศมาโดยตลอดเช่นกัน จากภาคเกษตรกรรมสู่ภาคอุตสาหกรรมกระทั่งมาถึงปัจจุบันกล่าวถึงในเรื่องโมเดลประเทศไทย 4.0 ในอนาคต ซึ่งงานวิจัยนี้ก็เป็งานวิจัยหนึ่งที่สอดคล้องกับกลไกการขับเคลื่อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน (Green growth engine) ในกลุ่มอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องกับคุณภาพชีวิตเช่นกัน ดังนั้น เมื่อการผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบคอมพิวเตอร์ และแผงวงจรพิมพ์ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้านการออกแบบซึ่งทำให้มีรูปทรงกะทัดรัด มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สมรรถนะสูง ความแข็งแรงสูง มีสมบัติความน่าเชื่อถือสูง และมีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีที่รวดเร็วในอนาคต เช่น การศึกษาความสามารถการเปียก (Wettability) และ

ลดอุณหภูมิในการบัดกรีให้ต่ำลงโดยไม่ต้องทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ในขณะบัดกรีกับแผงวงจรพิมพ์ เพื่อความเชื่อมั่นในงานวิจัยมากยิ่งขึ้นจึงได้สืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ พบว่าได้มีการนำธาตุอินเดียมมาใช้เติมในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยมีข้อดีคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังเช่น ในปี ค.ศ. 2007 Yu และคณะ [6] ศึกษาอิทธิพลของการเติมธาตุเจอร์เมเนียม (In) ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีและรอยต่อของผลิตภัณฑ์และศึกษาสมบัติเชิงกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu และ Sn-1.0Ag-0.5Cu-1.0In พบว่าการเติมธาตุอินเดียมและเงินลงใน SAC ในปริมาณน้อยจะส่งผลต่อความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิระหว่าง 230-240 °C นอกจากนี้ การเติมธาตุเจอร์เมเนียมเปอร์เซ็นต์การยึดตัวปรับตัวดีขึ้นเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเติมธาตุเจอร์เมเนียมในปริมาณดังกล่าวสามารถนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu ในปีต่อมา กรรณชัย กัลยาศิริ และคณะ [7] ศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัวเวลาการเปียก แรงการเปียก ความแข็งแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรงไม่โครของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu โดยเติมธาตุเจอร์เมเนียมในปริมาณ Sn-0.7Ag-0.5Cu-xIn (x = 0 และ 3.0 wt.%) พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการแข็งตัวลดลง ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการแข็งตัวเพิ่มขึ้น สำหรับเวลาการเปียกลดลงและแรงการเปียกเพิ่มขึ้นเมื่อเจือธาตุอินเดียมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มอินเดียมพบว่าเฟสของ Sn-rich มีขนาดเล็กลง สารประกอบเชิงโลหะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงไม่โครมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมธาตุอินเดียมของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu จากนั้นในปี พ.ศ. 2556 กำธร สุขพิมาย และคณะ [8] ศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของ Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง โดยการเติมธาตุ

อินเดียมในปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 wt.% ทดสอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีโดยวิธี Spread test ที่อุณหภูมิการบัดกรี 260 °C เป็นเวลา 30 min พบว่า ค่าการกระจายตัวและอัตราส่วนการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า มุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณธาตุอินเดียมเพิ่มขึ้น และค่าความหนาของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 ซึ่งธาตุอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ ที่เติมไม่มีผลต่อชั้นความหนาย่างมีนัยสำคัญ และในปี ค.ศ. 2014 Li และคณะ [9] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิหลอมเหลว สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (CTE) ความสามารถในการเปียก ความต้านทานการกัดกร่อน และความแข็งแรง จากอิทธิพลของการเติมธาตุเจอร์เมเนียม ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.7Ag-0.2Ni พบว่า เมื่อเติมอินเดียมปริมาณ ≤ 0.3 wt.% อุณหภูมิหลอมเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ช่วงของอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้น แต่สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนและพื้นที่ของการแผ่กระจายตัวของ Sn-0.7Ag-0.2Ni-xIn บนแผ่นทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมอินเดียมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่ง Sn-0.7Ag-0.2Ni-0.3In ค่าที่วัดได้ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ $17.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีการขยายเพิ่มขึ้น 15.6% ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง 32.8% ภายหลังจากการจุ่มแช่ในสารละลายของกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C นอกจากนี้ ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลง 11.7% เมื่อเปรียบเทียบกับ Sn-0.7Ag-0.2Ni ด้วยเช่นกัน ลำลุด วันยุทธ สุวรรณเครือ และคณะ [10] ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิแข็งตัวและอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เติมอนุภาคนาโนอุณหภูมิต่ำกว่า SAC305 ความสามารถในการเปียกดีขึ้นเมื่อเติม Mn-doped TiO_2 ปริมาณน้อย ๆ และพบว่าเมื่อเติมอินเดียมร่วมกับ

Mn-doped TiO_2 มีค่าการเปียกต่ำกว่าในกรณีเดิม เฉพาะ Mn-doped TiO_2 เพียงอย่างเดียว สำหรับความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีที่มีค่าลดลง นั่นคือเมื่อเติม อินเดียมร่วมกับ Mn-doped TiO_2

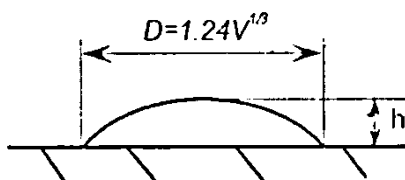
ดังนั้น จากงานวิจัยก่อนหน้านี้จึงมีแรงจูงใจในการวิจัยศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่สุดของอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีที่มีผลต่อความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง ด้วยวิธี Sessile drop เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว พื้นที่การกระจายตัว และมุมสัมผัส ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่พัฒนาขึ้น ที่สภาวะ 2 ตัวแปร 3 ระดับ คือ ที่อุณหภูมิในการบัดกรี 240, 260 และ 300 °C และเวลาในการบัดกรี 20, 30 และ 60 s ตามลำดับ

2. ทฤษฎีความสามารถการเปียก (Wettability)

ความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีคือความสามารถของโลหะบัดกรีในสภาวะหลอมเหลวที่สามารถแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าของวัสดุฐานชนิดต่าง ๆ ซึ่งความสามารถของการเปียกนี้สามารถอธิบายได้ถึงความสามารถของการบัดกรี (Soldering) ที่ดีระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผงวงจรพิมพ์ได้ดังนี้

2.1 มุมสัมผัส (Contact angle, θ)

มุมสัมผัสคือ มุมที่วัดได้ระหว่างโลหะบัดกรีกับวัสดุฐาน มุมสัมผัสที่มีความสามารถการเปียกที่ดี จะมีค่ามุมสัมผัสอยู่ระหว่าง 0 ° ถึง 90 ° แต่ถ้าหากมีมุมสัมผัสที่มีค่ามากกว่า 90 ° ถึง 180 ° แสดงถึงสมบัติการเปียกที่ไม่ดีในการบัดกรี ดังรูปที่ 1 และ สมการที่ 1 [8, 10]



รูปที่ 1 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโลหะบัดกรีบนวัสดุฐาน [8]

$$\sin \theta = \left(\frac{2}{\frac{D}{2H} + \frac{2H}{D}} \right) \quad (1)$$

โดยที่ θ คือมุมสัมผัส H คือความสูงของโลหะบัดกรีภายหลังการทดสอบการบัดกรี (mm) และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายหลังทดสอบการบัดกรี (mm)

2.2 อัตราการแผ่กระจายตัว

การวัดอัตราการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีคือความสามารถของโลหะบัดกรีในสภาวะหลอมเหลวที่สามารถแผ่กระจายตัวบนผิวหน้าของวัสดุฐานชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นความสามารถการเปียกอีกวิธีหนึ่ง โดยทั่วไปสามารถคำนวณค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spread factor: S_f) สมการที่ 2 [8, 10]

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

โดยที่ S_f คือตัวประกอบการกระจายตัว (%) H คือความสูงของโลหะบัดกรีภายหลังทดสอบการบัดกรี (mm) และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายหลังทดสอบการบัดกรี (mm) เมื่อ D คือ $1.24V^{1/3}$ และ V คือน้ำหนักต่อความหนาแน่นของโลหะบัดกรีใช้ในการทดสอบ

2.3 อัตราส่วนการกระจายตัว (Spreading ratio: S_r)

อัตราส่วนการกระจายตัวคือ ความสามารถของโลหะบัดกรีในสภาวะของแข็งจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีภายหลังการบัดกรีกับพื้นที่ก่อนการบัดกรีของโลหะบัดกรีบนวัสดุฐาน สมการที่ 3 [10]

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

โดยที่ S_r คืออัตราส่วนการกระจายตัว A_1 คือพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีภายหลังการบัดกรีบนวัสดุฐาน (mm^2) และ A_0 คือพื้นที่ก่อนการบัดกรีของโลหะบัดกรีบนวัสดุฐาน (mm^2)

2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการแยกความแปรปรวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นทั้งหมดออกตามสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความแปรปรวนเหล่านั้น เช่น ความแปรปรวนระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละประชากรและความแปรปรวนของข้อมูลภายในประชากรเดียวกัน [11]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและการเตรียมแท่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้

เตรียมชิ้นตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในงานวิจัยนี้จากโลหะดีบุก เงิน ทองแดง และอินเดียม ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.95% โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกนำโลหะดีบุกชนิดแท่งและทองแดงแผ่นที่ตัดเตรียมไว้มาหลอมรวมกันด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิหลอมเหลว 400 °C เป็นระยะเวลา 12 h ต่อมานำโลหะเงินและอินเดียมเติมลงในน้ำโลหะเหลวของดีบุกและทองแดงในแต่ละสูตร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 สูตร คือ SAC305 และ SAC305-0.5In โดยให้หลอมเหลวเป็นระยะเวลา 24 h เพื่อให้เกิดการแพร่ของโลหะและหลอมละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิภายในเตาไฟฟ้าลงที่อุณหภูมิ 270 °C ก่อนเทหล่อเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีหลอมเหลวกับออกซิเจนในอากาศก่อนเทน้ำโลหะลงสู่แม่พิมพ์โลหะ ในขั้นตอนสุดท้ายทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวให้ละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์อีกครั้ง แล้วเทน้ำโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์โลหะ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์โลหะและเมื่อเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำแท่งตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์โลหะและตัดชิ้นตัวอย่างไปวิเคราะห์หองค์ประกอบทาง

เคมีด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) [12]

3.2 การทดสอบจุดหลอมเหลว (Melting point test)

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetric (DSC, NETZSCH, DSC 200 F3 Maia) โดยการสุมเจาะด้วยสว่านจากแท่งตัวอย่าง ได้เป็นเกล็ดโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขนาดเล็กประมาณ 1 mm แล้วชักตัวอย่าง (Sampling) น้ำหนักประมาณ 20 mg นำไปใส่ลงในเบ้าอะลูมิเนียมขนาดมาตรฐานแล้วปิดฝาทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อยคือ ก๊าซอาร์กอน (Ar) โดยทดสอบระหว่างอุณหภูมิ 150 ถึง 300 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 °C/min แล้วให้เย็นตัวในน้ำแข็ง [12]

3.3 การทดสอบความสามารถการเปียก (Wettability)

การทดสอบความสามารถการเปียกในงานวิจัยนี้ทดสอบด้วยวิธี Sessile drop ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In กับวัสดุฐานทองแดง โดยเตรียมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจากแท่งตัวอย่างนำมารีดขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดสองลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นแบนความหนา 3 mm แล้วนำขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 mm สำหรับวัสดุฐานใช้ทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% ชนิดแผ่นตัดให้ได้ขนาดกว้าง 25.4 mm x ยาว 25.4 mm x หนา 0.3 mm ก่อนทำการทดสอบความสามารถการเปียกนำชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปแล้วและแผ่นทองแดงมาขัดละเอียดให้ผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P2500 จากนั้นทำความสะอาดผิวของชิ้นตัวอย่างและแผ่นทองแดงด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ผสมกับน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรและทำความสะอาดอีกครั้งในเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ ต่อมานำแผ่นทองแดงที่เตรียมได้ทาด้วยฟลักซ์ชนิด Rosin Mildly Active (RMA-223) ยี่ห้อ RMA AMTECH ขนาด 10 mL แล้วนำขึ้น

ตัวอย่างวางบนแผ่นทองแดง ต่อมานำชิ้นตัวอย่าง ทดลองความสามารถการเปียกโดยวางบนแผ่นความร้อน โดยทำการทดลองความสามารถการเปียกในสภาวะอากาศ (Ambient temperature) ที่ 2 ตัวแปร 3 ระดับ คือ ที่อุณหภูมิในการบัดกรี 240, 260 และ 300 °C และเวลาในการบัดกรี 20, 30 และ 60 s ในแต่ละการทดลองเรียบรอยให้นำชิ้นตัวอย่างออกจากแผ่นความร้อน แล้วให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องและทำความสะอาดล้างฟลักซ์ออกด้วยเอทานอลอีกครั้ง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าเฉลี่ยของ ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว พื้นที่การกระจายตัว และมุมสัมผัส โดยทดลองซ้ำจำนวน 5 ชิ้นทุกการทดลอง [12]

3.4 การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Interface Intermetallic compound)

นำชิ้นทดสอบภายหลังจากการวิเคราะห์ความสามารถการเปียกมาตัดแบ่งกึ่งกลาง แล้วนำมาหล่อขึ้นเรือนตัวอย่างแบบเย็นตัวเร็วขึ้น เมื่อเรชันแข็งตัวถอดชิ้นตัวอย่างออกนำมา ขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่ เบอร์ P320 ถึง P2500 จากนั้นนำมาขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 0.05 µm ทำความสะอาดเป่าให้แห้งด้วยลมเย็น แล้วนำไปกัดด้วยกรดเพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope Model FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) และวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) เมื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเรียบร้อยแล้วนำวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปและคำนวณหาค่าชั้นความหนาด้วยการนำค่าพื้นที่ของอินเตอร์เฟสหารด้วยความยาวของอินเตอร์เฟสจากรูปโครงสร้างจุลภาคจำนวน 3 ครั้งต่อชิ้นตัวอย่าง [12]

4. ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลขององค์ประกอบทางเคมี

ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากกระบวนการหล่อของโลหะดิบ เงิน ทองแดง และอินเดียมบริสุทธิ์ ได้นำวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในงานวิจัยนี้ [12]

Solder alloys	Chemical composition (wt.%)			
	Sn	Ag	Cu	In
SAC305	Bal.	3.68	0.41	-
SAC305-0.5In	Bal.	3.67	0.48	0.65
SAC305*	Bal.	2.80	0.30	-
		-	-	
		3.20	0.70	

* THAISARCO is an ISO 9001, ISO 14001 and ISO 17025 registered company

ผลการทดสอบ พบว่าชิ้นตัวอย่างของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ประกอบด้วยธาตุหลักคือ 95.91 wt.%Sn, 3.68 wt.%Ag และ 0.41 wt.%Cu และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In ประกอบด้วยธาตุหลักคือ 95.20 wt.%Sn, 3.67 wt.%Ag, 0.48 wt.%Cu และ 0.65 wt.%In ซึ่งมีค่าของปริมาณธาตุที่สอดคล้องกับค่ามาตรฐานของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผู้ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะปริมาณของทองแดงอยู่ในช่วงค่าที่กำหนด แต่ในขณะที่ธาตุเงินมีปริมาณสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้สารประกอบเชิงโลหะในเนื้อพื้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีขนาดเติบโตได้และอาจจะส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับวัสดุฐานภายหลังจากกระบวนการบัดกรีขึ้นได้ด้วยเช่นกัน

4.2 ผลการทดสอบจุดหลอมเหลว

ผลการทดสอบ จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

ไร้สารตะกั่วของ SAC305 และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ด้วยวิธี DSC ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มีจุด Solidus temperature (T_{onset}), Peak temperature (T_{peak}) และ Liquidus temperature (T_{endset}) เท่ากับ 215.7, 223.4 และ 229.1 °C ตามลำดับ และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 13.4 °C

ตารางที่ 2 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

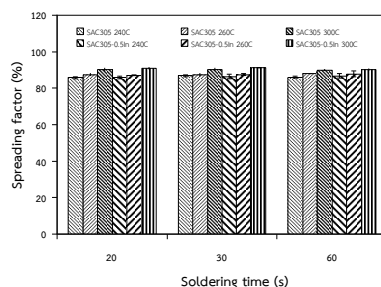
[12]

Solder alloys	Melting point (°C)		
	T_{onset}	T_{endset}	T_{peak}
SAC305	215.7	229.1	223.4
SAC305-0.5In	211.3	227.1	219.6

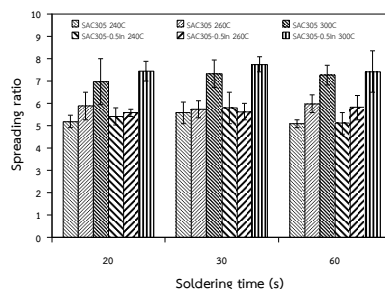
ในขณะที่ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In มีจุด Solidus temperature (T_{onset}) Peak temperature (T_{peak}) และ Liquidus temperature (T_{endset}) เท่ากับ 211.3, 219.6 และ 227.1 °C ตามลำดับ และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว 15.8 °C ดังนั้น เมื่อเติมธาตุเจืออินเดียมปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก ลงไปใน SAC305 ทำให้จุดหลอมเหลวลดลงเท่ากับ 3.8 °C และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวกว้างขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการเติมอินเดียมกับ Sn-0.3Ag-0.5Cu [7] และการเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In กับ Sn-3.0Ag-0.5Cu [10]

4.3 ผลการทดสอบความสามารถการเปียก

การทดสอบความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง ผลของตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และพื้นที่การกระจายตัว ดังในรูปที่ 1, 2 และ 3 [12]



รูปที่ 1 ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

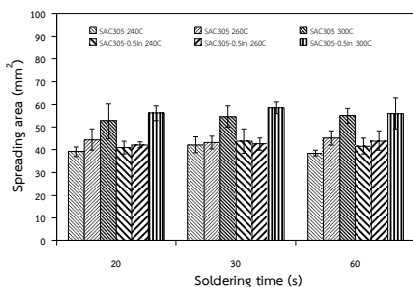


รูปที่ 2 อัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

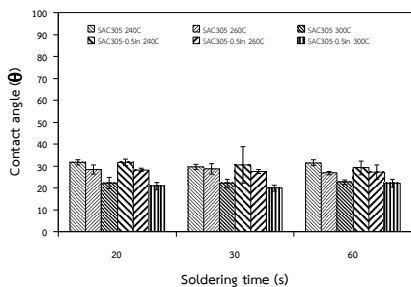
พบว่า ตัวประกอบการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่อุณหภูมิ 240 °C เวลา 20 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 s มีค่าน้อยสุด 85.83±0.54% และมีค่ามากที่สุด 91.25±0.53% ตามลำดับ อัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่อุณหภูมิ 240 °C เวลา 60 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 s มีค่าน้อยสุด 5.09±0.17 เท่า และมีค่ามากที่สุด 7.75±0.34 เท่า ตามลำดับ และพื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่อุณหภูมิ 240 °C เวลา 60 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 s มีค่าน้อยสุด 38.42±1.30 mm² และมีค่ามากที่สุด 58.49±2.60 mm² ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมอินเดียม

สำหรับค่ามุมสัมผัสแสดงในรูปที่ 4 [12] ซึ่งมีผลสอดคล้องกับตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วน

การกระจายตัว และพื้นที่การกระจายตัว เนื่องจากมีค่ามัมส์ของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมอินเตียมที่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่อุณหภูมิ 240 °C เวลา 60 s มีค่าน้อยสุด 19.88 ± 1.29 ° และมีค่ามากที่สุด 31.47 ± 1.30 ° ตามลำดับ เนื่องจากอินเตียมช่วยลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรี [8] ทำให้กระบวนการบัดกรีขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้ากับแผงวงจรพิมพ์ดีขึ้น



รูปที่ 3 พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว



รูปที่ 4 มุมสัมผัสของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิคงที่

One-way ANOVA: Spreading Area SAC305, 260 °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
260_305	2	100.8	50.4	4.69	0.031
Error	12	129.0	10.8		
Total	14	229.8			
S = 3.279		R-Sq = 43.86%		R-Sq(adj) = 43.51%	

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเวลาคงที่

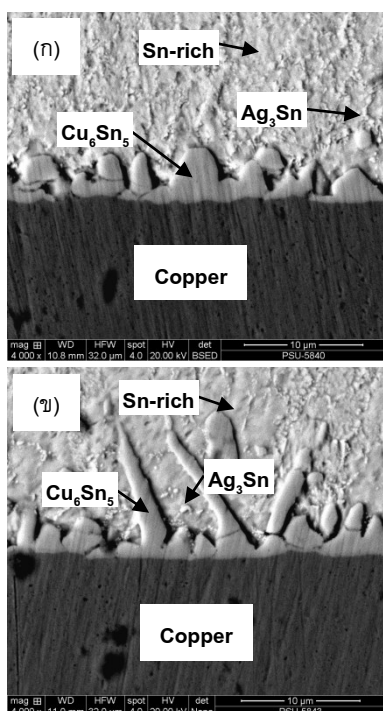
One-way ANOVA: Spreading Area SAC305, 30 s					
Source	DF	SS	MS	F	P
30_305	2	474.8	237.4	16.69	0.000
Error	12	170.7	14.2		
Total	14	645.4			
S = 3.771		R-Sq = 73.56%		R-Sq(adj) = 69.15%	

นอกจากนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถการเปียกของค่าพื้นที่การกระจายตัว โดยปัจจัยสำคัญที่พิจารณา คือ อุณหภูมิและเวลาในการบัดกรี ผลการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิการบัดกรีคงที่ ดังตารางที่ 3 พบว่า โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่อุณหภูมิ 260 °C เวลาการบัดกรี 20, 30 และ 60 s ตามลำดับ มีค่า P-value = 0.031 แต่สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีอื่น ๆ นั้นมีค่า P-value > 0.05 และเมื่อวิเคราะห์ที่เวลาการบัดกรีคงที่ ดังตารางที่ 4 พบว่าค่า P-value ทุกการทดลองมีค่า P-value ระหว่าง 0.000 - 0.006 ซึ่งมีค่า P-value < 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิการบัดกรีมีผลต่อกระบวนการบัดกรีอย่างมีนัยสำคัญ [12]

4.4 ผลของโครงสร้างจุลภาค

ในรูปที่ 5 ผลของโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่อุณหภูมิการบัดกรี 260 °C และเวลาการบัดกรี 60 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C และเวลาการบัดกรี 30 s บนวัสดุฐานทองแดง โดยบริเวณพื้นที่แสดงสีเทาเข้มคือทองแดง และบริเวณพื้นที่แสดงสีเทาอ่อนคือโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ได้เกิดปฏิกิริยาการแพร่ของอะตอมทองแดงไปสู่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วระหว่างกระบวนการบัดกรี และพบว่าได้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่อุณหภูมิการบัดกรี 260 °C เวลาการบัดกรี 60 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิการบัดกรี

300 °C เวลาการบัดกรี 30 s มีค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเท่ากับ 2.60 และ 3.45 ไมครอน ตามลำดับ ดังนั้น ชั้นความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้งสองสูตรมีค่าความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการบัดกรีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) SAC305 ที่อุณหภูมิการบัดกรี 240 °C เวลาการบัดกรี 60 s และ (ข) SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C เวลาการบัดกรี 30 s

และเมื่อวิเคราะห์รอยบัดกรีระหว่างทองแดงกับโลหะบัดกรีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) ปรากฏชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นคือ Cu_6Sn_5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Ag-Cu [13-14]

5. สรุป

งานวิจัยนี้การศึกษาความสามารถการเปียกและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดงพบว่า เมื่อเติมธาตุเจืออินเดียม 0.5 wt.% จุดหลอมเหลวลดลง 3.8 °C เมื่อเปรียบเทียบกับ SAC305 สำหรับตัวประกอบการกระจายตัวอัตราส่วนการกระจายตัว และพื้นที่การกระจายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการบัดกรีเพิ่มขึ้น มีค่ามากที่สุดเท่ากับ $91.25 \pm 0.53\%$, 7.75 ± 0.34 เท่า และ $58.49 \pm 2.60 \text{ mm}^2$ และค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาการบัดกรีเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุด $19.88 \pm 1.29^\circ$ ของ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C เวลาการบัดกรี 30 s มีความสามารถในการเปียกดีที่สุด นอกจากนี้พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่อุณหภูมิการบัดกรี 260 °C และเวลาการบัดกรี 60 s และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิการบัดกรี 300 °C และเวลาการบัดกรี 30 s มีค่าเพิ่มขึ้นและชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น คือ Cu_6Sn_5

กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สนับสนุนสถานที่ในการวิจัย นอกจากนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ปลุกผล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาติรืหอมเขียว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉลอง อุไรรัตน์ ที่ให้การแนะนำการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมศุลกากร. รายงานสินค้าส่งออก 10 อันดับแรกของประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. 2560 [เข้าถึงเมื่อ 24 มีนาคม 2560]. เข้าถึงได้จาก: <http://www2.ops3.moc.go.th/>

- [2] ประพิน ประคุณหังสิต และ วาสนา คงสุข. โลหะบัดกรี. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2544; ปีที่ 49: ฉบับที่ 155. หน้า 21-23.
- [3] ปราโมทย์ ศรีสุวรรณ และ รินทวัฒน์ สมบัติศิริ. ตะกั่วและพิษของตะกั่ว กลุ่มวิเทศสัมพันธ์สิ่งแวดล้อม สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม [อินเทอร์เน็ต]. 2560. [เข้าถึงเมื่อ 24 มีนาคม 2560]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.web/html/.../news/ตะกั่วและพิษของตะกั่ว.pdf>
- [4] Frear D.R. Issues related to the implementation of Pb-free electronic solders in consumer electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2007; 18: 319-330.
- [5] Cheng S, Huang C.M, Pecht M. A review of lead free for electronics applications. *Microelectronics Reliability*. 2017; 75: 77-95.
- [6] Yu A.M, Lee C.W, Kim J.H, Kim M.S, Lee J.H. Effect of in addition on the reaction and mechanical properties in Sn-Ag-Cu-In solder alloy. *Electronic Materials and Packaging (EMAP) International Conference on IEEE*, 2007;
- [7] Kanlayasiri K, Mongkolwongrojn M, Ariga T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloy and Compounds*. 2009; 485: 225-230.
- [8] กำธร สุขพิมาย กัลยา ผ่าโผน และ กรรชัย กัลยาศิริ. การศึกษาอิทธิพลต่อการกระจายตัวและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn บนแผ่นทองแดง. เอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2556; 16-18 ตุลาคม พ.ศ. 2556; ชลบุรี; 2556.
- [9] Li L.F, Cheng Y.K, Xu G.L, Wang E.Z, Zhang Z.H, Wang H. Effects of indium addition on properties and wettability of Sn-0.7Cu-0.2Ni lead-free solders. *Materials and Design*. 2014; 64: 15-20.
- [10] วันชัย สุวรรณเครือ ประธาน บุรณศิริ และ กรรชัย กัลยาศิริ. อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุดหลอมเหลวความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 2559. ปีที่ 33: ฉบับที่ 2. หน้า 64-69.
- [11] สรชัย พิศาลบุตร. สถิติวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์; 2553.
- [12] สุชาติ จันทรมณี และ ไพโรจน์ สังขไพฑูรย์. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีที่มีผลต่อความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง. เอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2560; 12-15 กรกฎาคม พ.ศ. 2560; เชียงใหม่; 2560. หน้า 311-318.
- [13] Han, Y.D, Jing, H.Y, Nai, S.M.L, Xu, L.Y, Tan, C.M. Wei, J. Effect of Ni-coated carbon nanotubes on interfacial reaction and shear strength of Sn-Ag-Cu solders joints. *Journal of Electronics Materials*. 2012; 31: pp. 72-78.
- [14] Mayappan, R, Yahya, I, Ghani, N.A.A, Hamid, H.A. The effect of Zn into the Sn-Ag-Cu solder on the intermetallic growth rate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2014; 25: pp. 2931-2922.