



ผลกระทบของธาตุเงินอินเดียมต่อชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง

EFFECTS OF INDIUM FOR THICKNESS OF INTERMETALLIC COMPOUND LAYER OF THE SN-3.0AG-0.5CU-0.5IN LEAD-FREE SOLDER ALLOYS ON THE COPPER SUBSTRATE

สุชาติ จันทรามณี^{1*} ไพโรจน์ สังขไพพชร² พงศ์ศิริ รวยรื่น³ เสกสิทธิ์ สุวรรณชาติ³ และวัฒนา มีสุข³

¹อาจารย์, ³นักศึกษา, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

²อาจารย์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถนนกาญจนวนิช ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของธาตุเงินอินเดียมต่อชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In โดยวิเคราะห์ความสามารถการเปียก โครงสร้างจุลภาค และชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมีตัวแปรคงที่คือ อุณหภูมิ 260°C และตัวแปรตามคือ เวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที พบว่าองค์ประกอบทางเคมีทั้ง 2 ชนิด อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานทุกองค์ประกอบของธาตุ จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ลดลง 3.8°C หรือ 1.7% เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 สำหรับความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In มีค่ามุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 30, 40 และ 50 วินาที มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับโครงสร้างจุลภาคปรากฏเฟสของ $Ag_3(Sn, In)$ และ $Cu_6(Sn, In)_5$ เมื่อปริมาณธาตุอินเดียมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ปรากฏอยู่ระหว่างรอยบัดกรีของโลหะบัดกรีทั้ง 2 ชนิด คือ Cu_6Sn_5

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In, ความสามารถในการเปียก, ชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะ

ABSTRACT

This study investigates the influence of indium on thickness of intermetallic compound layer of lead-free solder SAC305-0.5In on a copper substrate. The samples in the experiment were alloying elements: SAC305 and SAC305-0.35In. In the experiment wettability, microstructure and thickness of intermetallic compound layer were analyzed. An independent variable was the

Suchart Chantaramanee^{1*} Phairote Sungkhaphaitoon² Pongsiri Ruayruen³ Seksit Suwanchatree³ and Wattana Meesuk³

¹Lecturer, ³Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya
1 Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla 90000.

²Lecturer, Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University.

15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90110.

temperature of 260°C and the dependent variables were three durations of time, namely, 30, 40 and 50 seconds. The results of the study indicated that the chemical properties of SAC305 and SAC305-0.35In passed the standard criteria of all components. The melting point of SAC305-0.35In was found to decrease for 3.8°C or 1.7% when compared to that of SAC305. The wettability of SAC305 and SAC305-0.35In with contact angle at temperature of 260°C for 30, 40 and 50 seconds had a tendency to decrease with increasing time. In terms of microstructure, the phase of $\text{Ag}_3(\text{Sn},\text{In})$ and $\text{Cu}_6(\text{Sn},\text{In})_5$ appeared when an amount of indium increased. In addition, the intermetallic compound layer remaining between copper and both types of lead-free solder was Cu_6Sn_5 .

KEYWORDS: SAC305-0.5In lead-free solder, wettability, thickness of intermetallic compound layer

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากต่อระบบเศรษฐกิจและการพัฒนาในประเทศไทยต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทย ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างต่อเนื่องเพื่อนำมาใช้ภายในประเทศ และได้มีการส่งออกผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปยังต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพจีน เนเธอร์แลนด์ มาเลเซีย สิงคโปร์ ใต้หวัน และญี่ปุ่น เป็นต้น โดยมีรายงานมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าระหว่างปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2560 (ม.ค.-ธ.ค.) มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 3,130,752 ล้านบาท [1] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวกันขยับอิเล็กทรอนิกส์จากผลิตภัณฑ์เสื่อมสภาพ ชำรุด เสียหาย หมดยุการใช้งาน และการเปลี่ยนเทคโนโลยีใหม่มีปริมาณเพิ่มขึ้น 10% ต่อปี [2] หากการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ไม่ถูกตามมาตรฐานสิ่งแวดล้อม ตะกั่วที่เป็นธาตุเจือในโลหะบัดกรีเป็นโลหะหนักมีพิษจะตกค้างในดิน แหล่งน้ำ และน้ำใต้ดินมีผลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมซึ่งได้มีระเบียบข้อห้ามการนำเข้าผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าของสหภาพยุโรป เมื่อ 1 กรกฎาคม 2006 [3] จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องมีนักวิจัยได้พัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทดแทนโลหะบัดกรีชนิดตะกั่ว-ตะกั่ว (Sn-Pb) โดยการเติมธาตุเจือชนิดอื่น ๆ ทดแทนตะกั่วและได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และสมบัติความนำเชื่อถือ ตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 2009, Sebo และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลอินเดียมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.13Ag-0.74Cu ในปริมาณ 0, 4, 15, 50 และ 75 wt.% พบว่า การเติมอินเดียมปริมาณมากกว่า 30 wt.% เกิดสารประกอบเชิงโลหะของ Cu_6Sn_5 และที่เติมปริมาณอินเดียมที่ 50 และ 70 wt.% เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะของ $\text{Cu}_{11}\text{Sn}_{11}$ และในปีเดียวกัน Kanlayasiri, Mongkolwongrojn และ Ariga [5] ศึกษาการเติมอินเดียมที่มีผลต่อจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัว เวลาการเปียก แรงการเปียก ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงไม่โครของ Sn-0.3Ag-0.7Cu ปริมาณ 0, 3.0 wt.% พบว่า จุดหลอมเหลว อุณหภูมิการแข็งตัวลดลง ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการแข็งตัวเพิ่มขึ้น เวลาการเปียกลดลงและแรงการเปียกเพิ่มขึ้นเมื่อเจือธาตุนินเดียมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเติมอินเดียมทำให้เฟส Sn-rich มีขนาดเล็กมาก สารประกอบเชิงโลหะมีการกระจายตัว ส่วนมากมีลักษณะเช่นเดียวกันจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 2014, Li และคณะ [6] ศึกษาจุดหลอมเหลว สมบัติการขยายตัวเชิงความร้อน ความสามารถในการเปียก ความต้านทานการกัดกร่อน และความแข็งแรงในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-0.7Ag-0.2Ni พบว่า เมื่อเติมอินเดียมปริมาณ ≤ 0.3 wt.% จุดหลอมเหลวไม่เปลี่ยนแปลง แต่ช่วงของจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้น สำหรับค่าสมบัติการขยายตัวทางความร้อน (CTE) และพื้นที่การแผ่กระจายตัวของ Sn-0.7Ag-0.2Ni-xIn บนแผ่นทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอินเดียมเพิ่มขึ้น ซึ่ง Sn-0.7Ag-0.2Ni-0.3In มีค่า CTE เท่ากับ $17.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีการขยายเพิ่มขึ้น

15.6% และความต้านทานการกัดกร่อนลดลง 32.88% ภายหลังจากการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ ค่าความแข็งมีค่าลดลง 11.7% เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.7Ag-0.2Ni จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นอินเดียมเป็นธาตุหนึ่งที่น่าสนใจและนำมาใช้ในกระบวนการบัดกรีที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กับวงจรพิมพ์ ซึ่งในอนาคตผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีรอยบัดกรีขนาดเล็กลงแต่ต้องการสมบัติความนำเชื่อถือเพิ่มขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของธาตุเจืออินเดียมต่อชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง โดยทดลองการบัดกรีด้วยวิธี Sessile drop [7-9] ระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับแผ่นวัสดุฐานทองแดงที่อุณหภูมิในการบัดกรีที่ 260°C และเวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศปกติ (In air) และภายหลังจากการบัดกรีจะให้ชิ้นงานเย็นตัวในอุณหภูมิห้องเพื่ออธิบายถึงผลจากการเติมธาตุอินเดียมต่อองค์ประกอบทางเคมี จุดหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก โครงสร้างจุลภาค และชั้นความหนาของสารประกอบเชิงโลหะเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตัวควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยโดยมีกลไกการขับเคลื่อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว คือโลหะดีบุกชนิดแท่ง (99.95%) เงินชนิดเม็ดคละขนาด (99.99%) ทองแดงชนิดแผ่น (99.99%) และอินเดียม (99.95%) โดยแบ่งออกเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) และ Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.5In (SAC305-0.5In) ในการเตรียมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 นำโลหะดีบุกและทองแดงที่ตัดเตรียมไว้มาใส่ในเบ้าแกรไฟต์ภายในเตาไฟฟ้า แล้วทำการหลอมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยให้ความร้อนเตาไฟฟ้าจนกระทั่งอุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่อยๆนำโลหะเงินเติมลงในน้ำโลหะเหลวระหว่างดีบุกและทองแดงกวนให้เข้ากันกระทั่งโลหะเงินละลายจนหมดแล้วหลอมต่อไปเป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแพร่และหลอมละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าลงที่อุณหภูมิ 270°C เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นระหว่างโลหะหลอมเหลวกับออกซิเจนในอากาศ ในขั้นตอนสุดท้ายกวนน้ำโลหะหลอมเหลวให้เข้ากันอย่างสมบูรณ์อีกครั้ง เทน้ำโลหะเหลวลงสู่แม่พิมพ์โลหะ (Gravity die casting) ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In นั้นกระบวนการเตรียมเช่นเดียวกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เพียงแต่เมื่อโลหะดีบุกและทองแดงหลอมที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วให้นำโลหะเงินและอินเดียมเติมลงในน้ำโลหะเหลวระหว่างดีบุกและทองแดงกวนให้เข้ากันกระทั่งละลายจนหมดแล้วหลอมต่อไปเป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง สำหรับขั้นตอนอื่น ๆ ทำเหมือนกับการเตรียมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

2.2 วิธีการทดลองและวิเคราะห์ผล

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

นำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จากการเทหล่อตัดด้วยเลื่อยกลขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 25.4 มิลลิเมตร × 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำไปขัดหยาบ (Grinding) ผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบด้วยกระดาษทราย

(Silicon carbide paper, SiC paper) เบอร์ P800 แล้วนำวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรเมตรี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF) Philips PW2400

2.2.2 จุดหลอมเหลว (Melting point)

วิเคราะห์จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetric (DSC, NETZSCH, DSC 200 F3 Maia) โดยนำแท่งตัวอย่างจากการเทหล่อมาตะไบละเอียดให้ได้เป็นผงขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร แล้วชั่งตัวอย่าง (Sampling) น้ำหนักประมาณ 20 มิลลิกรัม ใส่ลงในเบ้าอะลูมิเนียมปิดฝาภายใต้สภาวะก๊าซอาร์กอน (Ar) ทดสอบระหว่างอุณหภูมิ 150 ถึง 300°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min ตามลำดับ

2.2.3 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

การทดสอบความสามารถการเปียกด้วยวิธี Sessile Drop ระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกับวัสดุฐานทองแดง การเตรียมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยนำแท่งตัวอย่างจากการเทหล่อมาตัดขึ้นรูปเป็นแผ่นแบนให้ได้ความหนา 3 มิลลิเมตร และตัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร สำหรับวัสดุฐานใช้ทองแดงชนิดแผ่นความบริสุทธิ์ 99.99% ตัดให้ได้ขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 25.4 มิลลิเมตร × 0.3 มิลลิเมตร ก่อนทำการทดสอบนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วและวัสดุฐานทองแดงขัดละเอียดให้ผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P2500 แล้วทำความสะอาดด้วยสารละลายระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวและทำความสะอาดในเอทานอล (C₂H₅OH) อีกครั้ง ปล่อยให้แห้งในอากาศ ต่อมานำแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ทาด้วยฟลักซ์ชนิด Rosin Mildly Active (RMA-233) ยี่ห้อ RMA AMTECH ขนาด 10 มิลลิเมตร และนำชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร ความหนา 3.0 มิลลิเมตร วางลงบนแผ่นทองแดง แล้วนำไปวางบนแผ่นความร้อน (Hot plate) ที่ 1 ตัวแปร 3 ระดับ คือ อุณหภูมิ 260°C และเวลา 30, 40 และ 50 วินาที ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกจากแผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องและทำความสะอาดล้าง ฟลักซ์ออกด้วยเอทานอลอีกครั้ง แล้วนำชิ้นตัวอย่างคำนวณค่าเฉลี่ย (Average) ของตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว มุมสัมผัส [10] และพื้นที่การกระจายตัว ด้วยโปรแกรม Image Tool Version 3.0 โดยทดลองซ้ำจำนวน 5 ชิ้นทุกสภาวะการทดลอง

2.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructures characterization)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์ความสามารถการเปียกแล้วตัดแบ่งครึ่งบริเวณกึ่งกลางรอยบัดกรี นำมาขึ้นเรือนตัวอย่างแบบเย็น (Cold mounting) ด้วยส่วนผสมระหว่าง Epoxycure resin No. 20-8130-032 ผสมกับ Epoxycure hardener No. 20-8132-008 ยี่ห้อ Buehler อัตราส่วน (5:1) วางตัวอย่างที่จะตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไว้กึ่งกลางโดยวางหน้าตัดลงในแบบหล่อแล้วเทขึ้นที่ผสมเสร็จแล้วลงในแบบหล่อให้แข็งตัวเป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมง ในอากาศ จากนั้นถอดออกจากแบบหล่อนำไปขัดหยาบผิวตัวอย่างให้ผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P320, P600, P800, P1000, P1200, P2000 และ P2500 ตามลำดับ และขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินา (Al₂O₃) ขนาดความละเอียด 5, 1, 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ และกัดกรด (Etching) ชิ้นตัวอย่างด้วยสารละลาย 95 mL Distilled water, 2 mL HCl และ 5 mL HNO₃ โดยจุ่มชิ้นตัวอย่างลงในสารละลายเป็นเวลา 5 วินาที [11] นำตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope Model FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) พร้อมกับวิเคราะห์ส่วนประกอบรอยบัดกรีด้วยเทคนิค

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) และนำรอยบัดกรีจากโครงสร้างจุลภาคทำการวัดค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

2.2.5 ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound, IMC)

การวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของรอยบัดกรี [12-13] ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้วด้วยโปรแกรม Image Tool Version 3.0 และคำนวณค่าชั้นความหนาของ IMC ของตัวอย่างจากภาพโครงสร้างจุลภาค จำนวน 3 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่างดังสมการที่ 1

$$\bar{h} = \frac{A}{L_x} \quad (1)$$

เมื่อ $\bar{h}$ คือความหนาของ IMC A คือ พื้นที่ของ IMC จากภาพโครงสร้างจุลภาค (μm^2) และ L_x คือความยาว IMC จากภาพโครงสร้างจุลภาค (μm) ตามลำดับ

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลขององค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรเมตรีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่เตรียมด้วยกระบวนการเทหล่อจากโลหะดีบุก เงิน ทองแดง และอินเดียมบริสุทธิ์ พบว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ส่วนผสมประกอบด้วยธาตุหลักโดยมีปริมาณของดีบุก 95.91 wt.% เงิน 3.68 wt.% และ ทองแดง 0.41 wt.% และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305-0.5In มีส่วนผสมประกอบด้วยธาตุหลักโดยมีปริมาณของดีบุก 95.20 wt.% เงิน 3.67 wt.% ทองแดง 0.48 wt.% และอินเดียม 0.65 wt.% ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องตามมาตรฐานของผู้ผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในเชิงพาณิชย์ [14]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในงานวิจัยนี้

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)			
	ดีบุก	เงิน	ทองแดง	อินเดียม
SAC305	Bal.	3.68	0.41	-
SAC305-0.5In	Bal.	3.67	0.48	0.65
SAC305 [14]	Bal.	2.80-3.20	0.30-0.70	-

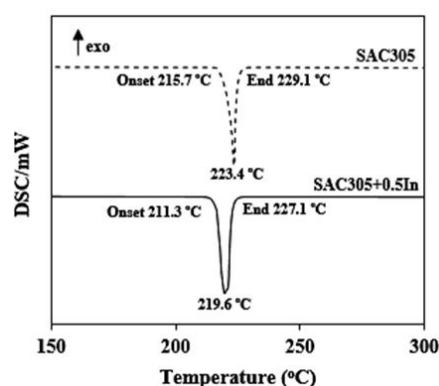
3.2 ผลของจุดหลอมเหลว

ผลการทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยวิธี Differential Scanning Calorimeter (DSC) ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 1 พบว่า SAC305 และ SAC305-0.5In มีค่าพลังงานแบบดูดความร้อนสูงสุด (Endothermic peak) ที่อุณหภูมิ 223.4 และ 219.6°C ตามลำดับ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มีอุณหภูมิแข็งตัว (T_{onset}) และ อุณหภูมิสูงสุด (T_{endset}) เท่ากับ 215.7 และ 229.1°C ตามลำดับ และมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (ΔT) เท่ากับ 13.4°C ในขณะที่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด

SAC 305-0.5In มีอุณหภูมิแข็งตัว (T_{onset}) และอุณหภูมิสูงสุด (T_{endset}) เท่ากับ 211.3 และ 227.1°C ตามลำดับ และมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (ΔT) เท่ากับ 15.8°C ดังนั้นเมื่อเติมธาตุอินเดียม 0.5 wt.% ลงไปใน SAC305 ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวลดลง 3.8°C มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [15] ที่ได้ศึกษาเรื่องการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Sb ที่เติมธาตุอินเดียม พบว่าจุดหลอมเหลวลดลงและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของ SAS-10In เท่ากับ 19.2°C ซึ่งหาก Mushy zone มีค่ามากกว่า 30°C จะเกิดปัญหากับกระบวนการบัดกรีแบบ Wave soldering

ตารางที่ 2 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	จุดหลอมเหลว (°C)			
	อุณหภูมิแข็งตัว (T_{onset})	อุณหภูมิหลอมเหลว (T_{peak})	อุณหภูมิสูงสุด (T_{endset})	ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (ΔT)
SAC305	215.7	223.4	229.1	13.4
SAC305-0.5In	211.3	219.6	227.1	15.8

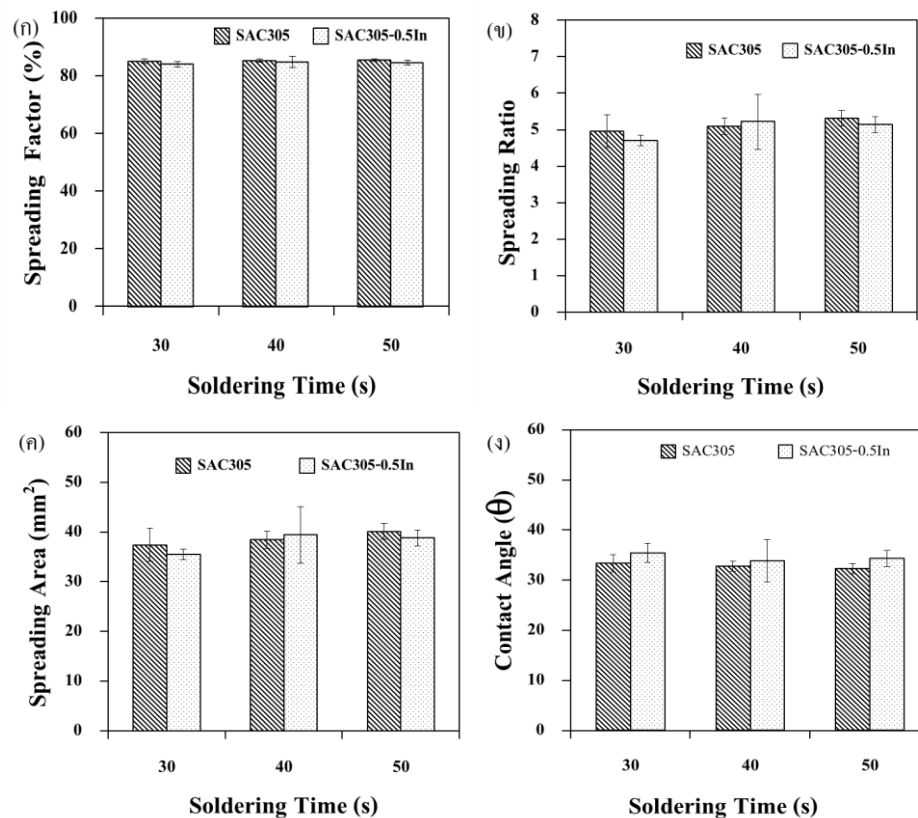


รูปที่ 1 จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

3.3 ผลของความสามารถการเปียก

ความสามารถการเปียกของรอยบัดกรีที่ดีระหว่างรอยบัดกรีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผงวงจรพิมพ์ โดยทั่วไปค่าตัวประกอบการกระจายตัว (Spreading factor) อัตราส่วนการกระจายตัว (Spreading ratio) พื้นที่การกระจายตัว (Spreading area) มีค่ามากและมุมสัมผัส (Contact angle, θ) มีค่าน้อย ความสามารถในการเปียกที่ดีมีค่ามุมสัมผัสระหว่าง 0° ถึง 90° และถ้าหากมีมุมสัมผัสที่มีค่ามากกว่า 90° ถึง 180° แสดงถึงความสามารถการเปียกที่ไม่ดี จากผลการทดลองดังรูปที่ 2(ก-ค) พบว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 และ SAC305-0.5In ค่าตัวประกอบการกระจายตัวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85% อัตราส่วนการกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่เวลาบัดกรี 50 นาที มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.31 ± 0.21 เท่า และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 4.70 ± 0.14 เท่า พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่เวลาบัดกรี 50 นาที มีค่าสูงสุดเท่ากับ $40.12 \pm 1.59 \text{ mm}^2$ และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In มีค่าน้อยสุดเท่ากับ $35.50 \pm 1.09 \text{ mm}^2$ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาบัดกรีเพิ่มขึ้น และค่ามุมสัมผัส ในรูปที่ 2(ง) มีผลสอดคล้องกับตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และพื้นที่

การกระจายตัว เมื่อโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 เวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ $33.38 \pm 1.74^\circ$, $32.82 \pm 1.01^\circ$ และ $32.28 \pm 1.03^\circ$ ตามลำดับและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In เวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ $35.47 \pm 1.87^\circ$, $33.86 \pm 4.22^\circ$ และ $34.34 \pm 1.59^\circ$ ตามลำดับ ดังนั้นค่ามุมสัมผัสของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดงมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอินเดียมช่วยลดแรงตึงผิวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขณะหลอมเหลว [16]

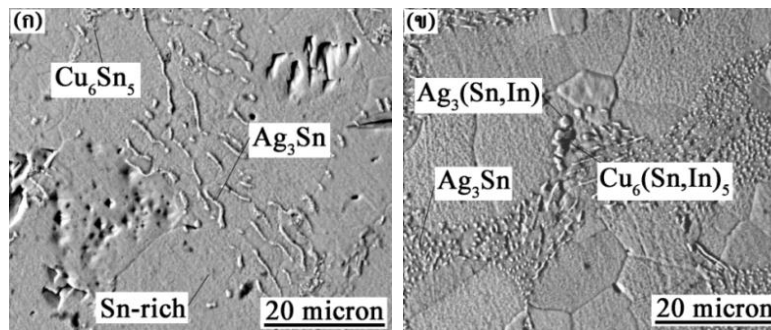


รูปที่ 2 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีที่อุณหภูมิ 260°C และเวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที

3.4 ผลของการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 และ SAC 305-0.5In ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope Model FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) พร้อมกับวิเคราะห์ส่วนประกอบรอยบัดกรีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) ดังรูปที่ 3(ก) พบว่า โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 ปรากฏเฟสของ Sn-rich ล้อมรอบด้วยเฟสขนาดเล็กของสารประกอบเชิงโลหะ คือ เฟส Ag_3Sn และ Cu_6Sn_5 โดยปรากฏอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การเกิดเฟส Ag_3Sn ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของเฟส Sn-rich และการเกิดเฟส Cu_6Sn_5 จะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของเฟส Sn-rich และบริเวณพื้นที่ของเฟส Ag_3Sn ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han และคณะ [12] ที่ได้ศึกษาเรื่องโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu ผสมกับ Ni-CNT พบว่าสารประกอบเชิงโลหะของเฟส Ag_3Sn และเฟส Cu_6Sn_5 มีการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ของโลหะบัดกรี สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305-0.5In ดังรูปที่ 3(ข) ปรากฏเฟสของ Sn-rich ล้อมรอบด้วยเฟสขนาดเล็กของสารประกอบเชิงโลหะ คือ เฟส Ag_3Sn , $\text{Ag}_3(\text{Sn},\text{In})$ และ

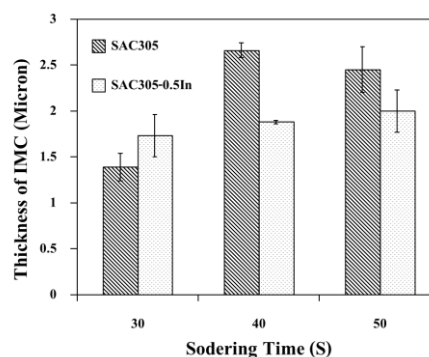
$\text{Cu}_6(\text{Sn},\text{In})_5$ โดยปรากฏอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การเกิดเฟส $\text{Ag}_3(\text{Sn},\text{In})$ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของเฟส Sn-rich และเฟส $\text{Cu}_6(\text{Sn},\text{In})_5$ เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของเฟส Sn-rich และบริเวณพื้นที่ของเฟส Ag_3Sn เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ เมื่อเติมธาตุอินเดียม 0.5 wt.% ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ขนาดของเฟสยูเทคติกจะมีเกรนขนาดใหญ่ขึ้น (Coarsening) [15, 17]



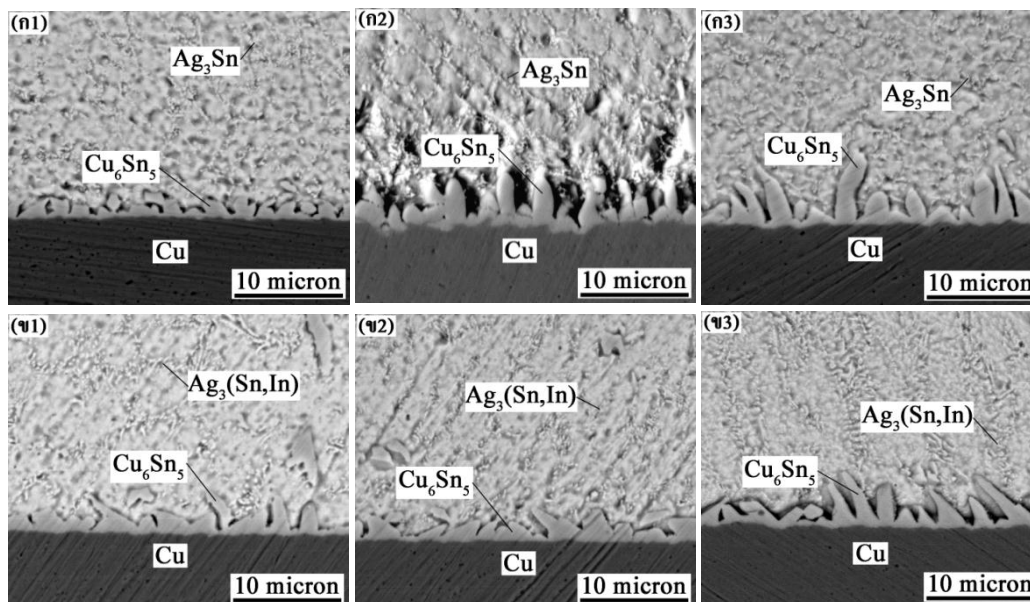
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (ก) SAC305 และ (ข) SAC305-0.5In

3.5 ผลของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ในรูปที่ 4 ผลการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 และ SAC 305-0.5In บนวัสดุฐานทองแดง ที่อุณหภูมิ 260°C และเวลาบัดกรีต่าง ๆ เกิดจากการแพร่ของอะตอมทองแดงไปสู่โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วอย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการบัดกรี พบว่า ชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 ที่เวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที มีค่าความหนาเท่ากับ 1.39 ± 0.15 , 2.66 ± 0.08 และ 1.45 ± 0.25 ไมครอน ตามลำดับ และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305-0.5In ที่เวลาบัดกรีที่ 30, 40 และ 50 วินาที มีค่าความหนาเท่ากับ 1.73 ± 0.23 , 1.88 ± 0.02 และ 2.00 ± 0.23 ไมครอน ตามลำดับ ดังนั้น ความหนาชั้นสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้งสองสูตรมีค่าความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาบัดกรีเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์รอยบัดกรีระหว่างทองแดงกับโลหะบัดกรีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) พบว่า ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจากการทดลอง คือ Cu_6Sn_5 ดังรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Ag-Cu [12, 18]



รูปที่ 4 ความหนาสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิ 260°C และเวลาบัดกรี 30, 40 และ 50 วินาที



รูปที่ 5 ชั้นความหนาสารประกอบเชิงโลหะของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (ก) SAC305 และ (ข) SAC305-0.5In
อุณหภูมิบัดกรี 260°C และเวลาบัดกรี (1) 30, (2) 40 และ (3) 50 วินาที

4. สรุป

ผลจากการวิจัย พบว่าองค์ประกอบทางเคมีทั้ง SAC305 และ SAC305-0.5In อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305-0.5In ลดลง 3.8°C หรือ 1.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 สำหรับความสามารถการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 และ SAC305-0.5In ที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 30, 40 และ 50 วินาที ตัวประกอบการกระจายตัว อัตราส่วนการกระจายตัว และพื้นที่การกระจายตัว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับโครงสร้างจุลภาคปรากฏเฟสของ $Ag_3(Sn,In)$ และ $Cu_6(Sn,In)_5$ เมื่อเติมธาตุอินเดียม นอกจากนี้ ชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่ปรากฏอยู่ระหว่างรอยบัดกรีทองแดงและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้ง 2 ชนิด คือ Cu_6Sn_5 กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ให้การสนับสนุนสถานที่เตรียมวัสดุ และเครื่องมือในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of Commerce. *Thailand trading report*, 2017. Available from: <http://www2.ops3.moc.go.th/> [Accessed 11 October 2017].
- [2] ASTV manager online. *Thailand electronic waste crisis*, 2017. Available from: <http://www.manager.co.th/Weekly54/ViewNews.aspx?NewID=9570000113873> [Accessed 18 October 2017].
- [3] 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, pp. 319-330.

-
- [4] Sepo, P. *et al.* Effect of indium on the microstructure of the interface between Sn-31.3Ag-0.74Cu solder and Cu substrate. *Journal of Alloy and Compounds*, 2009, 480, pp. 409-415.
- [5] Kanlayasiri, K., Mongkolwongrojn, M. and Ariga, T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloy and Compounds*, 2009, 485, pp. 225-230.
- [6] Li, L.F. *et al.* Effects of indium addition on properties and wettability of Sn-0.7Cu-0.2Ni lead-free solders. *Materials and Design*, 2014, 64, pp. 15-20.
- [7] Uozumi, H. *et al.* Fabrication process of carbon nanotube/light metal matrix composites by squeeze casting. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 495, pp. 282-287.
- [8] Fujii, H. *et al.* Evaluation of unusual change in contact angle between MgO and molten magnesium. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 417, pp. 99-103.
- [9] Kondoh, K. *et al.* Wettability of pure Ti by molten pure Mg droplets. *Acta Materialia*, 2010, 58, pp. 606-614.
- [10] Suwankreua, W. Buranasiri, P. and Kanlayasiri, K. Effects of Mn-doped TiO₂ and in nanoparticles on melting point printability and wettability of SAC305 lead-free solder paste. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2016, 33, pp. 64-69.
- [11] Vander Voort, G.F. *Metallography: principles and practice*, New York: McGraw-Hill, 1984.
- [12] Han, Y.D. *et al.* Effect of Ni-coated carbon nanotubes on interfacial reaction and shear strength of Sn-Ag-Cu solders joints. *Journal of Electronics Materials*, 2012, 41, pp. 2478-2486.
- [13] Yoon, J.W. and Jung, S.B. Effect of isothermal aging on intermetallic compound layer growth at the interface between Sn-3.5Ag-0.75Cu solder and Cu substrate. *Journal of Materials Science*, 2004, 39, pp. 4211-4217.
- [14] THAISARCO. SAC305 chemical composition, 2017. Available from: http://www.thaisarco.com/solder_lead_free.html [Accessed 18 October 2017].
- [15] Lee, H.T. *et al.* Microstructural evolution of Sn-Ag-Sb solder with indium additions. *Journal of Electronics Materials*, 2009, 38, pp. 2112-2121.
- [16] Zang, L. *et al.* Wettability of molten Sn-Bi-Cu solder on Cu substrate. *Materials Letters*, 2009, 63, pp. 797-801.
- [17] Chantaramanee, S. Sungkhaphaitoon, P. and Plookphol, T. Influence of indium and antimony additions on mechanical properties and microstructure of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead free solder alloys. *Solid State Phenomena*, 2017, 266, pp. 196-200.
- [18] Mayappan, R. *et al.* 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.