



KKU Res.j. 2014; 19(2) : 223-232

<http://resjournal.kku.ac.th>

## การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาของการเชื่อมใน สภาวะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสม SSM 356

### Study Temperature Effect on Metallurgical Properties of Semi-Solid State Joining of aluminum SSM 356

ธงชัย เครือผือ<sup>1\*</sup> และ ประภาส เมืองจันทร์บุรี<sup>2</sup>

Thongchai Khruueaphue<sup>1\*</sup> and Prapas Muangjumburee<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชญโลก

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

\* Correspondent author: [mprapas@eng.psu.ac.th](mailto:mprapas@eng.psu.ac.th)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ SSM 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม และเพื่อหาความเหมาะสมทางด้านตัวแปรในการเชื่อม ตัวแปรในการเชื่อมใช้หัวพินแบบทรงกระบอก ใช้ความเร็วในการหมุนของหัวพินที่ 1,110 และ 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 120 และ 160 mm/min มุมเอียงของหัวพิน 2 องศา ใช้ความร้อนจากเปลวไฟคาร์บูไรซิงที่ 575-590 °C และ 590-610 °C และใช้ Data Logger เป็นตัววัดอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมของทั้งสองตัวแปรอยู่ในช่วงที่ต้องการควบคุม ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยความร้อนจากเปลวไฟ ความเร็วในการหมุนของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จากการตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมพบว่าไม่เป็นเส้นตรงและมีลักษณะเป็นคลื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่พบว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min อุณหภูมิ ขณะเชื่อม 590-610 °C จะมีผิวหน้ารอยเชื่อมที่สมบูรณ์และสวยที่สุด เป็นเส้นตรงไม่มีลักษณะเป็นผิวคลื่น จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่ารอยเชื่อมเกิดการไม่ประสานกันและจะเกิดโพรงอากาศเล็กๆ บริเวณด้านบนของรอยเชื่อม แต่โครงสร้างมหภาคที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นที่ 1,110 rpm-120 mm/min อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C รอยเชื่อมเกิดการประสานกันเป็นอย่างดี จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าจะเกิดเป็นรูโพรงอากาศเล็กๆ กระจายตัวทั่วบริเวณรอยเชื่อม และมีแอ่งของเฟสยูเทคติกส์เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ดีที่สุด จะเกิดขึ้นที่ 1,110 rpm-120 mm/min อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C ซึ่งไม่มีรูโพรงอากาศและเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เกรนมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อม

#### Abstract

The purpose of this research was to study the welding condition of semi-solid metal (SSM) 356 which casted by Gas Induced Semi-Solid technology or GISS technique; to compare the transformation of metallurgical properties of welding joint; and to find suitability of parameter in welding, welding parameter of straight cylindrical using rotating speed rate of pin at 1,110 and 1,320 rpm, welding speed at 120 and 160 mm/min, tilt angle pin at 2 degree, heat with carburizing fame at 575-590 °C and 590-610 °C and using Data Logger as the temperature measurement.

From the experiment, it was found that the temperature while welding of the two parameters was in the control period needed which depending on heating factor from flame, speed rotation of pin and welding speeds. From examining the surface appearance of welding, it was not the straight line and obviously waving appearance. However, at 1,100 rpm – 120 mm/min and the temperature while welding at 590-610 °C, the surface appearance of welding was the most fine-looking and complete – straight line and no waving appearance. From examining the macrostructure, it was found that welding joint was not union in addition to the occurrence of a little pneumatic space at the upper part of the welding joint. Nevertheless, the best macrostructure was at 1,110 rpm – 120 mm/min, welding temperature at 590-610 °C which the welding joint was in well connecting. From examining the microstructure, it found the little pneumatic space throughout the welding joint area and eutectic phase basin was occurred in the welding joint area. It was found that the best microstructure was at 1,110 rpm-120 mm/min, welding temperature at 590-610 °C which was no pneumatic spaces and the appearances of grain was a round lump with similar size and well spreading in the area of welding joints.

**คำสำคัญ :** การเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็ง, อะลูมิเนียมผสม SSM 356

**Key Words :** Semi-Solid State Welding, Semi-Solid Metal Aluminum Alloy A356

## 1. บทนำ

กรรมวิธีการเชื่อมโลหะเป็นวิธีการยึดหรือประกอบชิ้นส่วนที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งกระบวนการเชื่อมได้มีการพัฒนาเรื่อยๆ เริ่มจากการเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเปลือย การเชื่อมด้วยแก๊ส จนมาถึงกระบวนการเชื่อมโดยใช้แก๊สปกคลุม ซึ่งล้วนแต่เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ขึ้นมา ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบไม่หลอมละลายหรือเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) โดยที่อุณหภูมิขณะเชื่อมต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของโลหะที่นำมาเชื่อม ความร้อนที่เกิดขึ้นได้มาจากการเสียดทานระหว่างตัวกวน (Tools) กับผิวหน้าชิ้นงานสำหรับการเชื่อมโลหะบางประเภท เช่น อะลูมิเนียม การเชื่อมด้วยวิธีการหลอมละลายจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม เช่น เกิดโพรงอากาศ รอยแตกในรอยเชื่อม ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม จึงได้มีการนำกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมาใช้สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมแบบหลอมละลาย จะทำให้สมบัติทางกลของรอยเชื่อมสูงกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย

ปัจจุบันได้มีการแข่งขันกันทางด้านเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งทั้งต่างประเทศและในประเทศไทยก็ได้เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal: SSM) เพื่อประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศเมื่อประมาณ 1-2 ปี เช่น อุตสาหกรรมเครื่องบิน อุตสาหกรรมสร้างเครื่องจักรและอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้เพื่อช่วยลดน้ำหนักและการใช้พลังงาน เทคโนโลยีล่าสุดที่มีศักยภาพในการหล่อคือการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting ด้วยเทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการหล่อโดยการปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พรุนเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนของน้ำโลหะเพื่อให้ได้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) (1) หลังจากนั้นก็ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวบางส่วน

อย่างไรก็ตามในการนำชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (SSM) ไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปและการซ่อม (Repair) อะลูมิเนียมผสมหล่อก็จะมีกระบวนการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งมีทั้งการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม (Similar Joint) ชนิดเดียวกันและการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสมกับโลหะชนิดอื่น

(Dissimilar Joint) (2) โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งของแข็ง เนื่องจากโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อชนิด นี้เป็นแบบก้อนกลม เพื่อที่จะรักษาโครงสร้างเดิมไว้ให้ ใกล้เคียงกับ โครงสร้างเดิมมากที่สุดหลังจากการเชื่อม กระบวนการเชื่อม จึงมีความสำคัญมากสำหรับการเชื่อมต่อ การเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็งยังเป็นเทคโนโลยีใหม่มากใน งานเชื่อม ซึ่งการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็งน่าจะมี ความเหมาะสมกว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพราะขณะทำ การเชื่อมอุณหภูมิและโครงสร้าง จะอยู่ในสภาวะกึ่งของ แข็ง จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของ โครงการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเหมาะสมของอุณหภูมิและ สมบัติทางโลหะวิทยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้าน โครงสร้างทางจุลภาค และนำผลมาปรับปรุงเลือกใช้ กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและ อุตสาหกรรมต่อไป

**2. วิธีการวิจัย**

**2.1 การเตรียมวัสดุ**

วัสดุที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้เป็น อะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยี กิ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS มีส่วนประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 และทำการเตรียมชิ้นงานสำหรับการ เชื่อม โดยการทำให้ได้ขนาด 100x40x4 มม.

**2.2 การเตรียมเครื่องมือ**

2.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัด แนวตั้งเป็นเครื่องเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็ง ซึ่งเป็นเครื่องกัด ชนิดที่สามารถปรับอัตราการเดินป้อนได้แบบอัตโนมัติ

2.2.2 เครื่องมือ (Tool) ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม (หัวพิน) ทำจากเหล็ก SKH 57 ตามมาตรฐาน JIS มีลักษณะ เป็นแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่า 6 มม. รัศมีระหว่างบ่ากับหัวพิน 1.5 มม. หัวพินมีขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 3.5 มม. ความยาวของหัวพิน 3.2 มม.

2.2.3 เปลวไฟที่ใช้สำหรับทำการเชื่อมเป็น แบบเปลวคาร์บูไรซิง (แก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน)

2.2.4 ใช้เทอร์โมคัปเปิลที่มี Data Logger เป็น ตัววัดอุณหภูมิที่ชิ้นงานและเก็บข้อมูลขณะทำการเชื่อม

**2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง**

2.3.1 ใช้ความเร็วในการหมุนของหัวพินที่ 1,110 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 120 mm/min

2.3.2 ใช้ความเร็วในการหมุนของหัวพินที่ 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 160 mm/min

2.3.3 ใช้ความร้อนควบคุมจากเปลวไฟคาร์บูไรซิง ขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 575-590 °C และ 590-610 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่โครงสร้างเฟสของอะลูมิเนียม SSM 356 อยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง

2.3.4 ปรับมุมเอียงของหัวพิน 2 องศา

2.3.5 ทิศทางการหมุนของหัวพินตามเข็มนาฬิกา

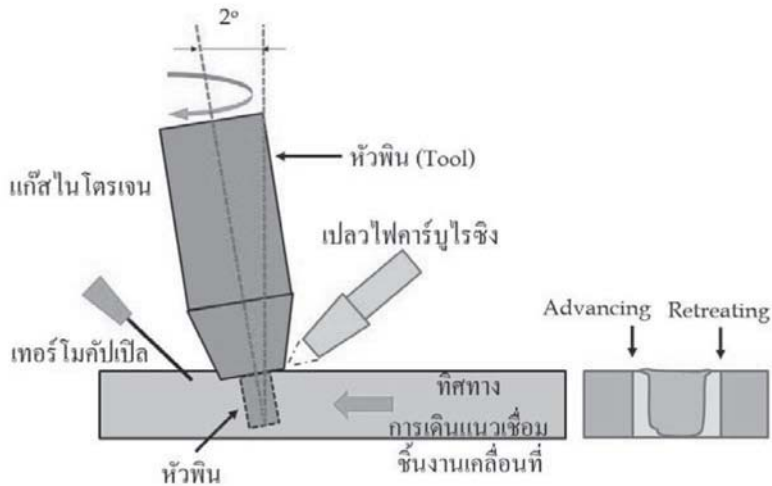
2.3.6 การทดลองนี้จะให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ ขณะทำการเชื่อม

**2.4 กระบวนการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็ง**

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็ง ซึ่งเป็นการเชื่อมในขณะที่โลหะเกิดการหลอมเหลวเพียง บางส่วน กระบวนการเชื่อมนี้จะเป็นการเชื่อมแบบต่อชน ไม่มีกรับบากรองของชิ้นงาน ยึดชิ้นงานติดกับแท่นรองเคลื่อน ก่อนการเชื่อมจะอุ่นชิ้นงานทั้งแผ่นด้วยเปลวไฟคาร์บูไรซิง ประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นทำการเชื่อมโดยใช้เปลวไฟ เป่าบริเวณผิวชิ้นงานติดกับหัวพิน โดยให้ระยะห่าง ประมาณ 1 เซนติเมตร ค้างไว้ประมาณ 10 วินาที กำหนด ให้หัวพินหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แล้วทำการป้อน จุ่มหัวพินลงไป ในชิ้นงานจนบ่าของหัวพินสัมผัสกับ ผิวหน้าชิ้นงาน ค้างไว้ประมาณ 10 วินาที หลังจากนั้น ทำการเดินแนวเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนดจนเสร็จสิ้น กระบวนการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 1 และหลังจากการเชื่อม จะแบ่งรอยเชื่อมออกเป็นด้าน Advancing คือ ด้านที่ทิศทาง การหมุนของหัวพินและทิศทาง การเดินแนวเชื่อมเป็นทิศ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 (wt%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM 356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.



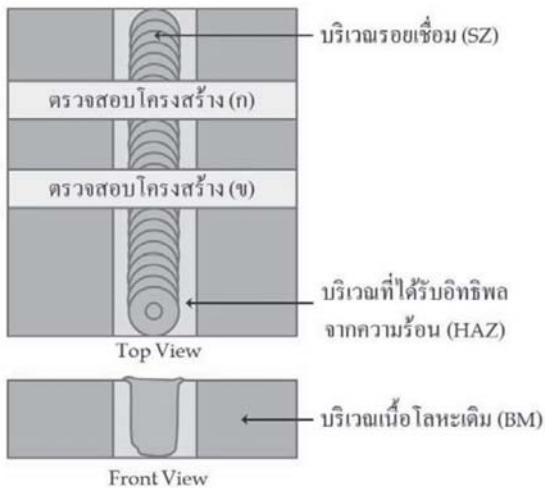
รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็ง

ทางเดียวกัน และด้าน Retreating คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของหัวพินและทิศทางการเดินแนวเชื่อมสวนทางกัน

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.5.1 กล้องดิจิทัล ใช้สำหรับถ่ายภาพผิวหน้ารอยเชื่อมและด้านหลังรอยเชื่อม เพื่อตรวจสอบลักษณะผิวหน้า รอยเชื่อมและการซึมลึกด้านหลัง

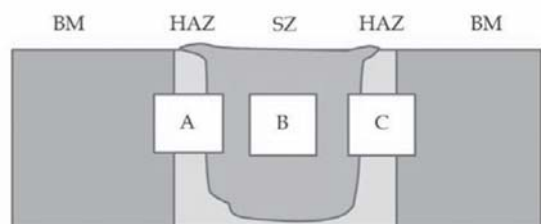
2.5.2 กล้องถ่ายภาพระดับมหภาค (Macro) ใช้สำหรับถ่ายภาพระดับมหภาคเพื่อดูลักษณะรูปแบบของรอยเชื่อม ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงดูรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และดูการประสานของรอยเชื่อม



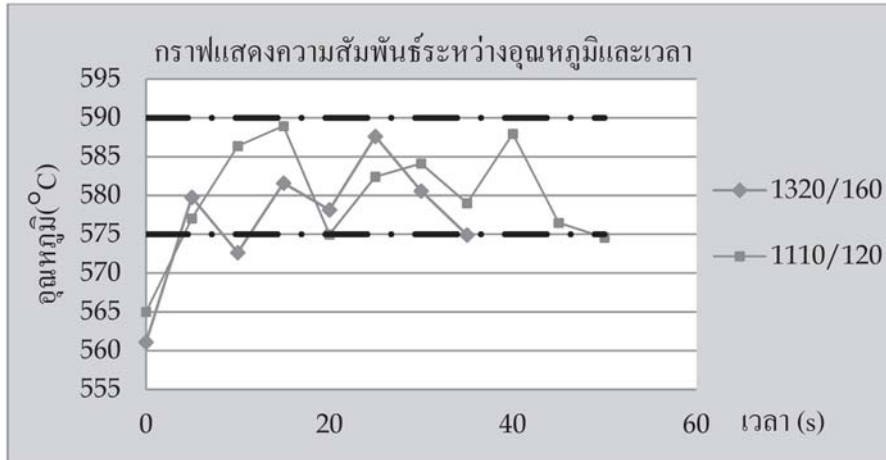
รูปที่ 2 ลักษณะบริเวณของการตัดชิ้นงานทดสอบ

2.5.3 หลังจากนั้นก็จะทำการจัดเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบ ดังรูปที่ 2 คือ ลักษณะของการตัดชิ้นทดสอบ (ก) ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา บริเวณจุดเริ่มต้นรอยเชื่อม (ข) ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม เพื่อตรวจสอบว่าตลอดทั้งรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนกัน

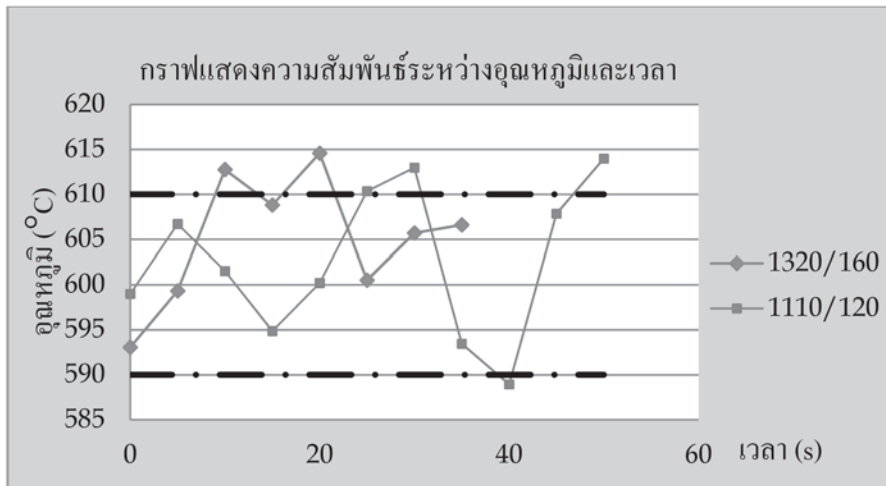
2.5.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟสในรอยเชื่อม รวมไปถึงการตรวจสอบขนาดของเกรน และตรวจสอบความบกพร่อง เช่น รูพรุน รอยแตก ก่อนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคจะนำชิ้นงานไปทำการขัดผิวแล้วกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลาย Keller's reagent ประมาณ 5-8 วินาที บริเวณต่างๆ ที่ทำการตรวจสอบ ดังรูปที่ 3 จุด A คือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน Advancing (A: HAZ) B คือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน Retreating (R: HAZ) C คือ บริเวณรอยเชื่อม (SZ)



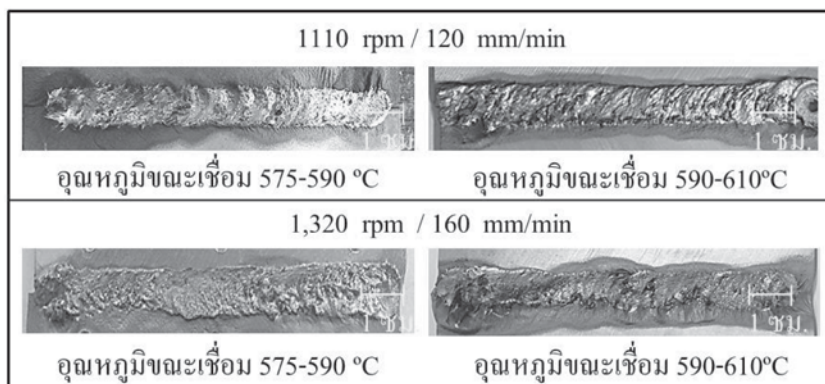
รูปที่ 3 บริเวณที่ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะเชื่อมในช่วงอุณหภูมิ 575-590 °C



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะเชื่อมในช่วงอุณหภูมิ 590 – 610 °C



รูปที่ 6 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็งที่ตัวแปรการทดลองต่างๆ

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

#### 3.1 การตรวจสอบอุณหภูมิขณะเชื่อม

3.1.1 การตรวจสอบอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 575-590 °C

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าผลของอุณหภูมิขณะเชื่อมทั้งสองตัวแปรอยู่ในช่วงที่ต้องการควบคุม ทั้งนี้ปัจจัยขึ้นอยู่กับทำให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมเพื่อทำการไล่ความชื้นที่อยู่ในชิ้นงาน แต่จะพบว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min มีค่าอุณหภูมิมากกว่าที่ 1,320 rpm-160 mm/min เล็กน้อย อันเนื่องมาจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ช้ากว่าทำให้ความร้อนเกิดการสะสมมากกว่า

3.1.2 การตรวจสอบอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 590-610 °C

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแนวเชื่อมทั้งสองตัวแปรมีบางจุดที่ความร้อนเกินจากจุดที่ต้องการควบคุมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อนจากเปลวไฟคาร์บูไรซิงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถือว่ายังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เพราะอุณหภูมิหลอมเหลวของอลูมิเนียมผสม SSM 356 นั้นอยู่ที่ 613°C แต่จะพบว่าอุณหภูมิจากการเชื่อมของทั้งสองตัวแปร มีลักษณะขึ้น-ลง เช่นเดียวกัน

#### 3.2 การตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min ที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 575-590 °C พบว่า ขอบของรอยเชื่อมไม่เป็นเส้นตรงและผิวของรอยเชื่อมมีลักษณะคล้ายผงละเอียดและผิวเป็นคลื่นอย่างเห็นได้ชัด สาเหตุเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำเกินไปจึงทำให้รอยเชื่อมไม่สวยงามและคล้ายว่าไม่ประสานกับผิวชิ้นงาน และที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C พบว่า รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และสวยที่สุด บริเวณขอบของรอยเชื่อมเป็นเส้นตรงไม่มีลักษณะเป็นผิวคลื่น และผิวของรอยเชื่อมมีความเรียบเสมอกับหน้าตัดของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากตัวแปรและอุณหภูมิในการเชื่อมที่เหมาะสม

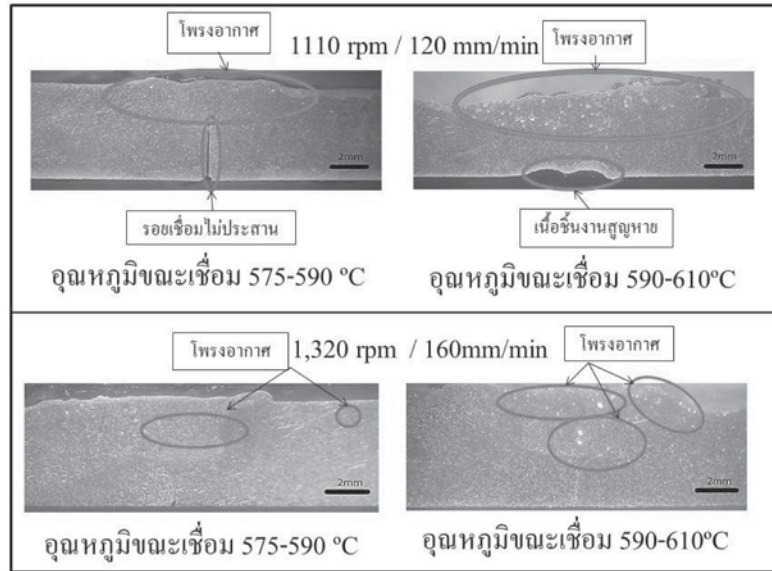
จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่ 1,320 rpm-160 mm/min อุณหภูมิขณะเชื่อม 575-590 °C พบว่า ผิวของรอยเชื่อมตลอดทั้งแนวมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะผิวค่อนข้างขรุขระและมีลักษณะคล้ายผงละเอียด อันเนื่องมาจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่สูงเกินไป

ทำให้ความร้อนไม่เพียงพอขณะเชื่อม และที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C พบว่า รอยเชื่อมไม่ตรงตามแนวและผิวของรอยเชื่อมเกิดความไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากการใช้ความร้อนสูงและประกอบด้วยความเร็วในการหมุนของหัวพินที่สูงทำให้เนื้อแนวเชื่อมเหลวเกินไป

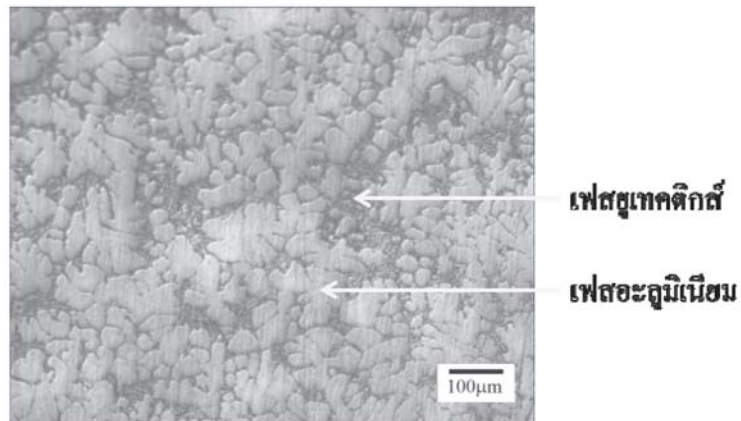
#### 3.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min ที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 575-590 °C พบว่า ด้านล่างของรอยเชื่อมเกิดการไม่ประสานกันของชิ้นงานลึกประมาณ 3 มม. อันเนื่องมาจากอุณหภูมิขณะเชื่อมที่ต่ำซึ่งเกิดจากความเร็วในการหมุนกวนต่ำจึงทำให้เกิดช่องว่าง (3) รวมไปถึงเกิดโพรงอากาศเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วทั้งบริเวณรอยเชื่อม โดยที่บริเวณด้านบนของรอยเชื่อมจะเกิดโพรงอากาศมากกว่าบริเวณอื่นๆ และที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C พบว่าบริเวณรอยเชื่อมเกิดการประสานกันเป็นอย่างดี แต่จะเกิดโพรงอากาศและจะเกิดที่บริเวณด้านบนของรอยเชื่อมเป็นส่วนมากอย่างเห็นได้ชัดเจน อันเนื่องมาจากอากาศเข้าไปผสมในรอยเชื่อมขณะเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง ความบกพร่องอีกประการที่เกิดขึ้นคือ บริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมปรากฏว่าเนื้อชิ้นงานเกิดการหายไปบางส่วน เนื่องจากการไหลวนของเนื้อโลหะขณะทำการเชื่อมเกิดเป็นครีบบ้านบน ทำให้รอยเชื่อมในจุดนั้นมีการสูญหายของเนื้อโลหะ

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าที่ 1,320 rpm-160 mm/min ที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 575-590 °C พบว่า ด้านล่างของรอยเชื่อมเกิดการไม่ประสานกันของชิ้นงานลึกประมาณ 1 มม. อันเนื่องมาจากอุณหภูมิขณะเชื่อมและความเร็วในการหมุนกวนที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ช่องว่างและการไม่ประสานกันลดลง (3) รวมไปถึงเกิดโพรงอากาศเพียงบางส่วนในบริเวณด้านบนของรอยเชื่อม รอยเชื่อมด้านบนเกิดการประสานกันเป็นอย่างดีของชิ้นงาน และที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C พบว่าบริเวณรอยเชื่อมเกิดการประสานกันเป็นอย่างดี แต่จะเกิดโพรงอากาศกระจายในบริเวณด้านบนของรอยเชื่อมอย่างเห็นได้ชัดเจน อันเนื่องมาจากอากาศเข้าไปผสมในรอยเชื่อมขณะเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง



รูปที่ 7 ลักษณะโครงสร้างระดับมหภาคจากการเชื่อมในสภาวะกึ่งแข็งที่ตัวแปรการทดลองต่างๆ



รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม SSM 356

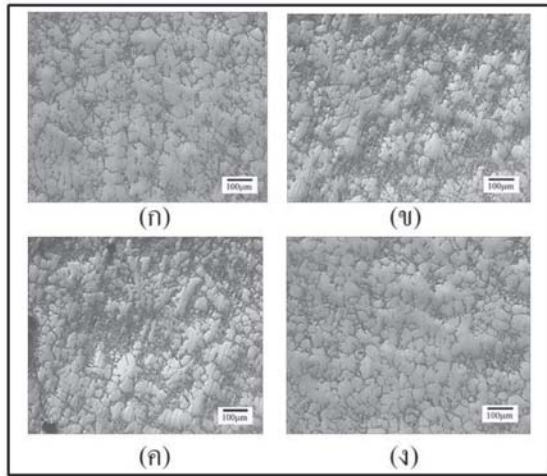
**3.4 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อม**

จากรูปที่ 8 เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม SSM 356 ที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค GISS ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (ก้อนสีขาว) เป็นเฟสอะลูมิเนียม ( $\alpha$ ) และบริเวณเฟสยูเทคติกส์ประกอบด้วยเฟสอะลูมิเนียมผสมกับเฟสซิลิกอน (สีดำสลับขาว)

จากรูปที่ 9-12 (ก) คือ บริเวณด้านบนของรอยเชื่อม (ข) คือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน Advancing (ค) คือ บริเวณด้านล่างของรอยเชื่อม (ง) คือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนด้าน Retreating

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 9 พบว่า ไม่มีรูโพรงอากาศเกิดขึ้นและเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสอะลูมิเนียมและเฟสยูเทคติกส์ (4) จากรูปที่ 9 (ก) ขนาดของเกรนมีลักษณะค่อนข้างเล็กกว่าโครงสร้างในรูปที่ 9 (ข) และ (ค) อันเนื่องมาจากการกวนของบ่าหัวพินและความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงทำให้ขนาดของเกรน มีลักษณะเล็ก ซึ่งความร้อนที่มากจะทำให้เนื้อโลหะเข้าใกล้จุดหลอมเหลวมากขณะที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินและการเดินแนวเชื่อมต่ำ ส่วนในรูปที่ 9 (ง) นั้น

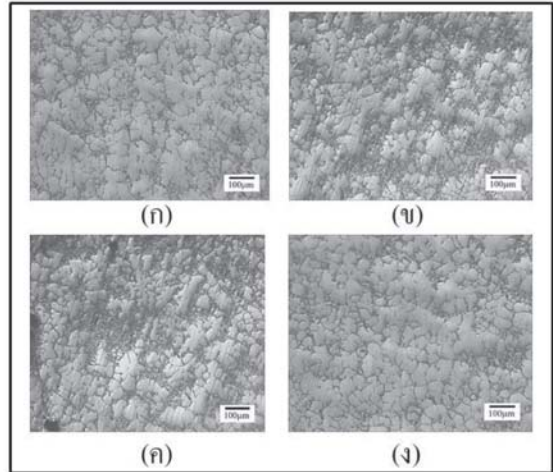
ไม่มีลักษณะของเกรนที่กลมและมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้ปะปนอยู่



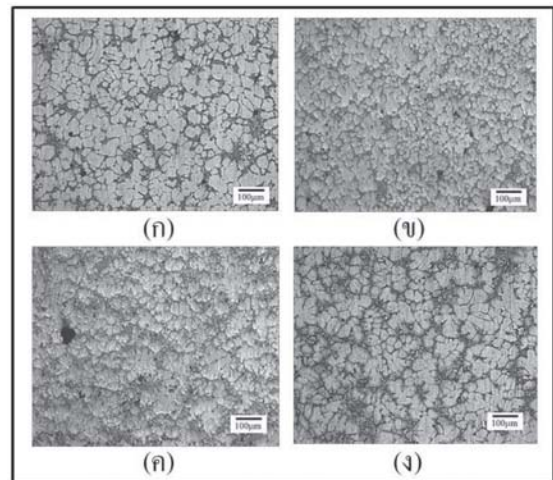
**รูปที่ 9** โครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,110 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 120 mm/min และอุณหภูมิขณะเชื่อมที่ 575-590 °C

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 10 (ก) และ (ง) พบว่า ไม่มีรูโพรงอากาศและเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เกรนมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดจากการกวนของหัวพินขณะที่เนื้อโลหะอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง แต่ในรูปที่ 10 (ข) และ (ค) จะสังเกตเห็นว่ามีแอ่งของเฟสยูเทคติกส์เกิดขึ้นในลักษณะที่กว้าง ซึ่งถือว่าเป็นผลดีในด้านคุณสมบัติทางโลหะวิทยา ซึ่งจะทำให้รอยเชื่อมแข็งแรงและเปราะเมื่อนำไปใช้งาน

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 11 (ก) และ (ง) มีลักษณะขนาดของเกรนที่ใกล้เคียงกัน คือมีลักษณะเป็นก้อนกลมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และพบว่า มีรูโพรงอากาศเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ รูปที่ 11 (ข) และ (ค) จะพบว่า มีขนาดเกรนเป็นก้อนกลมเล็กๆ กระจายตัวอย่างหนาแน่นมากกว่าและมีรูโพรงอากาศเล็กๆ กระจายทั่วไปมากกว่าเช่นกัน อันเนื่องมาจากความเร็วในการหมุนกวนของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เร็วเกินไป (5) ทำให้การไหลวนของเนื้อโลหะเกิดโพรงอากาศ



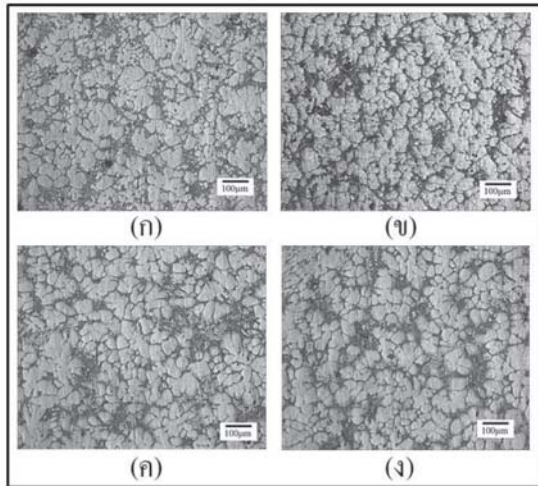
**รูปที่ 10** โครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,110 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 120 mm/min และอุณหภูมิขณะเชื่อมที่ 590 – 610 °C



**รูปที่ 11** โครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 160 mm/min และอุณหภูมิขณะเชื่อมที่ 575 – 590 °C

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 12 พบว่า ทุกบริเวณของการเชื่อมจะเกิดเป็นรูโพรงอากาศเล็กๆ กระจายตัวทั่วบริเวณรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความเร็วในการหมุนของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มากเกินไปจึงทำให้มีอากาศเข้าไปผสมในรอยเชื่อม จากการสังเกตพบว่าทุกบริเวณของรอยเชื่อมจะมีโครงสร้างเป็นแบบก้อนกลมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ





**รูปที่ 12** โครงสร้างทางจุลภาคที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 160 mm/min และอุณหภูมิขณะเชื่อมที่ 590-610 °C

## 4. สรุปผลการวิจัย

4.1 จากการตรวจสอบอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมพบว่า ทั้งสองตัวแปรอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการควบคุม ทั้งนี้ปัจจัยขึ้นอยู่กับความร้อนจากเปลวไฟ ความเร็วในการหมุนของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อม แต่ที่ในช่วงอุณหภูมิ 590-610 °C มีบางขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าที่ต้องการควบคุมเล็กน้อย

4.2 จากการตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อม พบว่าขอบของรอยเชื่อมไม่เป็นเส้นตรงและมีลักษณะเป็นคลื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่จะเห็นได้ว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min และที่อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C จะมีรอยเชื่อมที่สมบูรณ์และสวยที่สุด บริเวณขอบของรอยเชื่อมก็เป็นเส้นตรงไม่มีลักษณะเป็นผิวคลื่น และผิวของรอยเชื่อมมีความเรียบเสมอกับหน้าตัดของชิ้นงาน

4.3 จากการตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาคพบว่าด้านล่างของรอยเชื่อมเกิดการไม่ประสานกันของชิ้นงาน และจะเกิดโพรงอากาศเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วบริเวณรอยเชื่อม โดยที่บริเวณด้านบนของรอยเชื่อมจะเกิดโพรงอากาศมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ และโครงสร้างที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นที่ 1,110 rpm-120 mm/min อุณหภูมิขณะเชื่อม 590-610 °C ซึ่งพบว่าบริเวณรอยเชื่อมเกิดการประสานกันเป็นอย่างดี

4.4 จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า จะเกิดเป็นรูโพรงอากาศเล็กๆ กระจายตัวทั่วบริเวณรอยเชื่อม และมีแอ่งของเฟสยูเทคติกส์เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม แต่จากการตรวจสอบพบว่าที่ 1,110 rpm-120 mm/min อุณหภูมิ ขณะเชื่อม 590-610 °C ไม่มีรูโพรงอากาศ และเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เกรนมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดจากการกวานของหัวพิน ขณะที่เนื้อโลหะอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และหน่วยงาน MRG ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงขอขอบคุณนายอารยะ เจริญจินดา นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือ ในด้านการทำงานวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Chucheept T, Burapa R, Janudom S, Wisutmethangoon S, Wannasin J. Semi-solid gravity sand casting using gas induced semi-solid process. Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University. 2549; In Thailand.
- (2) Muangjunburee P. Welding and Joining Metallurgical for Aluminum. Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University. 2550; In Thailand.
- (3) Huibin Xu, Quanxiang Luo, Bofang Zhou, Youliang Zeng, Changhua Du. The Effect of Stirring Rate on Semisolid Stirring Brazing of SiCp/A356 Composites in Air. 2011; 452-458. In China.
- (4) Narimannezhad A, Aashuri H, Kokabi AH, Khosravani A. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Semi-Solid Stir Welded Zinc AG40A Die Cast Alloy. 2008; 4112-4121. In Iran.
- (5) Alvani SMJ, Aashuri H, Kokabik A, Beygi R. Semisolid Joining of Aluminum A356 Alloy by Partial Remelting and Mechanical Stirring. 2010; 1792-1798. In Iran.