# อิทธิพลของอัตราป้อนที่มีต่อบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการ เชื่อมเสียดทานระหว่างอลูมิเนียม 6063 และ อลูมิเนียมออกไซด์ Effect of feed rate on heat affected zone of friction welding between aluminium AA 6063 and alumina.

ธรรมะสุข มิ่งเมือง <sup>1</sup>\*สุขอังคณา ชาหยอง <sup>2</sup> ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์<sup>3</sup> อนุพงษ์ พรพิจิตร <sup>4</sup>วารุณี บวรเกียรติแก้ว <sup>5</sup> <sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี <sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น <sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี <sup>4,5</sup> สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ

E-mail: air\_ubon11@hotmail.com

Tummasook mingmuang <sup>1\*</sup> Sukangkana Chayong <sup>2</sup> Chawalit Thinvongpituk <sup>3</sup> Anupong pornpichit <sup>4</sup> Warunee Bawornkiatkaew <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani <sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Khonkaen University, Khonkaen <sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani , <sup>4,5</sup>National Metal and Materials

> Technology Center , Patumthani E-mail: air\_ubon11@hotmail.com

### บทคัดย่อ

้บทความนี้น้ำเสนอการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน โดยทำการศึกษาการเชื่อมอลูมินาเซรามิกส์กับอลูมิเนียมด้วยวิธีการ ้เชื่อมเสียดทาน โดยมีวัตถุประสงค์คือศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนระหว่างทำการเชื่อมที่มีต่อบริเวณที่ได้รับ ้ผลกระทบเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมโดยชิ้นงานทดลองคือ เพลาอลูมิเนียมเกรด AA 6063เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตรกับอิฐทนไฟอลูมินาสูง 99% มีขนาด 22x22 มิลลิเมตร มีความหนา 7 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้เพลาอลูมิเนียมเป็นด้านหมุนส่วนอลูมินาเป็นด้านอัด ความเร็วรอบในการหมุนของเพลาอลูมิเนียม ้ คือ 900 รอบต่อนาที แรงดันเสียดทานและแรงดันอัดของอลูมินา คือ 22.4 เมกกะปาสคาล และ 44.8 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เวลาในการเสียดทานและเวลาในการอัดเท่ากับ 20 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ อัตราการป้อน ชิ้นงานอลูมินาเซรามิกส์ได้แก่ 0.1 ,0.3 ,0.5 ,0.7 และ 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที่ จากการทดลองพบการแตกร้าวของ ้อลูมินาในทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อเพิ่มอัตราป้อนจะส่งผลให้อลูมิเนียมมีการเสียรูปมากขึ้น โดยที่ที่อัตราป้อน มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะการเสียรูปสูงสุดในแนวการอัดและในแนวระนาบผิวสัมผัสของรอยเชื่อมคือ 0.9 14.59 มิลลิเมตรและ 18.27 มิลลิเมตรตามลำดับ อัตราป้อนส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดระหว่างทำการเชื่อมสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราป้อนจนถึง 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้คือ 146.1 องศาเซลเซียสที่อัตราป้อน 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิสูงสุด ้ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเชื่อมจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านอลูมิเนียมที่ไหลตัวไปยัง ้บริเวณขอบรอยเชื่อม และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนจะทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีพื้นที่ลดลง โดยบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนปรากฏเกรนเกิดใหม่ที่มีความละเอียด

**คำหลัก** การเชื่อมเสียดทาน อลูมิเนียม อลูมินา อัตราป้อน บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน

#### Abstract

This research was aimed to investigate influence of Feed rate in friction welding between high alumina fire bricks of 99% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AA 6063 aluminum rods. The samples were AA 6063 aluminum rods with diameter of 19 mm and the high alumina fire bricks of 7 mm thick. The welding parameters included friction pressure of 22.4 MPa, forging pressure of 44.8 MPa, friction time of 20 s and a forging time of 3 s. Rotational speed was maintained at 900 rpm. Feed rate were varies from 0.1 mm/s to 0.9 mm/s. It was appeared cracks of alumina in every condition of experiment. The experimental results showed that the amount of deformation of aluminum alloy increased with increasing feed rate. At feed rate of 0.9 mm/s, the maximum deformation in the perpendicular and parallel with welding plane were 14.59 mm and 18.27 mm, respectively. Feed rate was obviously influenced the maximum welding temperature during the welding process. By applying Feed rate, the temperature at the interface was increased until the feed rate of 0.5 mm/s was applied, which was the highest temperature measured through the alumina during welding was 146.1 C<sup>o</sup>. However, at feed rate of 0.7 and 0.9 mm/s, maximum welding temperature decreased due to heat transferred by plastic flow of aluminium from center of interface to the edge of interface. Feed rate was also influenced the amount of heat affected zone area of aluminium alloy. It was found that the area of heat affected zone decreased with increasing feed rate. In the heat affected zone exhibited the fine and recrystallised grain structure.

Keywords: Friction, Welding, Heat, Affected, Zone.

#### 1. บทน้ำ

เนื่องจากคุณสมบัติของเซรามิกส์ที่สามารถใช้งานที่ อุณหภูมิสูงรวมถึงความสามารถในการต้านทานการสึก หรอและการกัดกร่อนทำให้เซรามิกส์กลายเป็นส่วนสำคัญ ในอุตสาหกรรม อิเล็คโทรนิกส์ อากาศยาน นิวเคลียร์ และยานยนต์[1] ซึ่งรวมถึงในบางกรณีได้มีการประยุกต์ใช้ เซรามิกส์ในงานวิศวกรรมที่จำเป็นต้องรับภาระกรรม ดังนั้นการเชื่อมต่อเซรามิกส์เข้ากับโลหะ ชนิดต่าง ๆ จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมา โดยการเชื่อมต่อโลหะเข้ากับเซรา มิกส์จะเป็นการรวมคุณสมบัติเด่น ๆของวัสดุทั้งสองชนิด เข้าไว้ด้วยกัน ทั้งในด้านความเหนียวและคุณสมบัติ การนำไฟฟ้าและความร้อนของโลหะ รวมถึงคุณสมบัติ ้ด้านความแข็งและการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีของ เซรามิกส์ ดังนั้นการเชื่อมต่อโลหะกับเซรามิกส์ จึงเป็น กลายเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญยิ่งในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ซึ่งโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมักจะใช้ [2] เซอร์โคเนียมออกไซด์และอลูมินารวมถึงอลูมิเนียมไนไตรด์ เป็นหลักในการเชื่อมต่อ [3]

เซรามิกส์กับโลหะสามารถเชื่อมกันได้ยาก เนื่องจาก ความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีการพัฒนาการเชื่อมต่อเซรามิกส์ ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมเซรามิกส์ กับโลหะมาโดยตลอด เข้ากับโลหะด้วยแรงเสียดทานเป็นการเชื่อมในสถานะ ของแข็งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเชื่อมต่อเซรามิกส์ เข้ากับโลหะได้เป็นผลสำเร็จ [4] โดยโลหะที่สามารถ เชื่อมต่อกับเซรามิกส์ได้ดีคืออลูมิเนียม เนื่องจากความ ง่ายต่อเสียรูปและง่ายต่อการเกิดพันธะกับเซรามิกส์ ชนิดต่าง ๆ เช่น อลูมินาเซรามิกส์และอลูมิเนียมในไตรด์ รวมถึงซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยกลไกที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ระหว่างอลูมิเนียมกับเซรามิกส์คือการแพร่ในสถานะ ของแข็ง [5] โดยมีหลักฐานแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จใน การเชื่อมอลูมินาเซรามิกส์เข้ากับอลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ ตามถึงแม้ว่าการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับอลูมินาเซรามิกส์ สามารถเชื่อมได้สำเร็จแต่ก็ยังเกิดปัญหาเรื่องคุณภาพ ของรอยเชื่อม อาทิเช่นการเกิดปัญหาเรื่องการแตกร้าว อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลย์กันของอุณหภูมิในเซรามิกส์ [6]

โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมแบบเสียด ทานที่มักจะนำมาพิจารณามี 5 ตัวแปร คือ ความเร็วรอบ แรงดันในการเสียดทาน แรงดันในการอัด เวลาใน

Weight %								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	CI	K <sub>2</sub> O	SO3	Na <sub>2</sub> O		
99.7	0.19	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01		





รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานก่อนการเชื่อมเสียดทาน และ แสดงการเชื่อมเสียดทานด้านหมุน และด้านอัด

### 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองจะใช้เครื่องเชื่อมความเสียดทานที่สร้าง และพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ดังแสดง ในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้เป็นการเชื่อมเสียดทานแบบ Direct drive โดยมีอลูมิเนียมเป็นด้านหมุนและอลูมินา เซรามิกส์เป็นด้านอัด



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมเสียดทานที่สร้างและพัฒนาโดยภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

### 2.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะกำหนดให้ตัวแปรคงที่ คือความเร็ว รอบในการหมุนของอลูมิเนียม 900 รอบต่อนาที ในขณะ ที่แรงดันในการเสียดทานและแรงดันในการอัดคือ 22.4 และ 44.8 เมกกะปาสคาลตามลำดับ เวลาในการเสียดทาน และเวลาในการอัดเท่ากับ 20 และ 3 วินาที อัตราป้อน เซรามิกส์ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับดังปรากฏในตารางที่ 3

การเสียดทาน และเวลาในการอัด [7] ซึ่งส่งผลกับสมบัติ ของรอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้วเมื่อพิจารณาการป้อนแรงดัน อัดและแรงดันเสียดทานให้แก่รอยเชื่อม มักจะพิจารณา แต่เพียงปริมาณของแรงดันที่ป้อนแก่พื้นที่สัมผัสของ ชิ้นงานเท่านั้น แต่ไม่ได้ถึงพิจารณาถึงอัตราเร็วใน การป้อนชิ้นงานขณะทำการเชื่อมแต่อย่างใด ประกอบกับ ได้มีการศึกษาแล้วพบว่าอัตราป้อนชิ้นงานมีผลต่อพื้นที่ สัมผัสของรอยเชื่อม [8] รวมถึงได้มีการศึกษาทฤษฎี การทดสอบแรงดึงพบว่าการป้อนแรงเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าการยืดตัวและ ค่าความต้านทานความเค้นดึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [9] ซึ่งค่าความเค้นที่แตกต่างกันของวัสดุส่งผลต่อ คุณสมบัติของรอยเชื่อมเช่นกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพล ของอัตราป้อนชิ้นงานที่มีต่อรอยเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม กับอลูมินาเซรามิกส์ โดยทำการทดสอบปัจจัยเรื่องอัตรา ป้อนชิ้นงานที่มีผลต่อการเสียรูปของอลูมิเนียมและ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมรวมถึงบริเวณที่ได้รับ ผลกระทบเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม

### 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เพลาอลูมิเนียม เกรด AA 6063 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ถูกตัดยาว 65 มิลลิเมตร และแผ่นอลูมินาเซรามิกส์ที่ใช้จะตัดด้วยใบ ตัดเพชรให้ได้ขนาดกว้าง 22 มิลลิเมตร ยาว 22 มิลลิเมตร หนา 7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1

ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA 6063ด้วยวิธี Energy Dispersive Spectrometer ถูกแสดงใน ดารางที่ 1 ในขณะที่ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีอลูมินา เซรามิกส์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ถูกแสดง ในตารางที่ 2 โดยก่อนการเชื่อมทั้งอลูมิเนียมและอลูมินา จะถูกขจัดคราบไขมันด้วย acetone

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม AA 6063

Weight %								
AI	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr		
98.4	0.72	0.53	0.15	0.06	0.05	0.02		

# 2.6 การตรวจสอบบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจาก ความร้อนจากการเชื่อม

ในการตรวจสอบบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจาก ความร้อนจะทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของ รอยเชื่อมและลักษณะเกรนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยจะทำการตัดชิ้นงานด้วยใบตัดเพชรและนำชิ้นงานไป ขัดด้วยจานขัดเพชร จากนั้นนำชิ้นงานไปทำ Etching ด้วย Keller's Reagent นำไป Etching ซ้ำอีกครั้งด้วย Weck's Reagent จะปรากฏโครงสร้างมหภาคของรอย เชื่อมขึ้นมา จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมครอนอีกครั้ง โดยชิ้นงานจะปรากฏขอบเกรนขึ้นมา

# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ การตรวจสอบการเสียรูปของอลูมิเนียม AA 6063 และอุณหภูมิของรอยเชื่อมระหว่างทำการเชื่อม

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบ ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.9 มิลลิเมตรต่อ วินาทีและชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยชิ้นงานที่ถูกเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที จะมีการเสียรูปทั้งในแนวแกน x (แนวระนาบของรอยเชื่อม) และแกน y (แนวการอัดตัว ของเพลา) มากกว่าชิ้นงานที่ถูกเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.1มิลลิเมตรต่อวินาที อย่างเห็นได้ชัด

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาแนวการเสียรูปตามแนว การอัดตัวของเพลาอลูมิเนียม AA 6063 จะพบว่ายิ่งเพิ่ม อัตราป้อนระหว่างการเชื่อมจะยิ่งส่งผลให้ระยะเสียรูปตาม แนวการอัดตัวเพลาของอลูมิเนียม AA 6063 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 6 ที่แสดงระยะเสียรูปสูงสุดตามแนว ระนาบของรอยเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยในช่วงกระบวนการการเสียดทานและการอัด กราฟมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงและมีการดีดตัวกลับ เล็กน้อยหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ

### ตารางที่ 3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง				
ความเร็วรอบ (rpm)	900			
แรงดันเสียดทาน (MPa)	22.4			
เวลาในการเสียดทาน (s)	20			
แรงดันในการอัด (MPa)	44.8			
เวลาในการอัด (s)	3			
อัตราป้อนชิ้นงาน (mm/s)	0.1,0.3,0.5,0.7,0.9			

# 2.4 การตรวจสอบการเสียรูปของอลูมิเหียมใน ระหว่างการเชื่อม

การตรวจสอบการเสียรูปของอลูมิเนียมระหว่าง การเชื่อมจะทำการตรวจสอบโดยนำเครื่องมือวัดระยะ การอัดตัวของอลูมิเนียม (dial gauge) ติดตั้งให้สัมผัสเข้า กับบริเวณอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในขณะทำการเชื่อม โดยในขณะเชื่อม เมื่อไฮโดรลิคดันชิ้นงานอลูมินาเซรามิกส์ เข้ากับชิ้นงานอลูมิเนียม ระยะที่อลูมิเนียมเสียรูปก็จะ แสดงผลออกมา ดังในรูปที่ 3 โดยระยะการเสียรูปทั้งใน แนวการอัดและในแนวระนาบของรอยเชื่อมจะถูกนำมา พิจารณา

# 2.5 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม ระหว่างการเชื่อม

การตรวจสอบความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม ระหว่างการเชื่อมจะทำการตรวจสอบโดยนำเครื่องมือวัด อุณหภูมิ(Thermocouple type-K) ต่อเข้าบริเวณด้านหลัง ของแผ่นอลูมินาเซรามิกส์ ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณ รอยเชื่อมจะกระจายตัวผ่านเนื้อเซรามิกส์เข้ามาจนถึง เครื่องมือวัดดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิที่ได้จะไม่ใช่ อุณหภูมิของรอยเชื่อมที่แท้จริงแต่จะทำให้ทราบถึงอัตรา การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา โดยจะนำอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละเงื่อนไขมาทำ การพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์



รูปที่ 3 ภาพจำลองแสดงการตรวจสอบอุณหภูมิที่ส่งผ่านเซรามิกส์ และการเสียรูปของอลูมิเนียมขณะทำการเชื่อม

ตามแนวระนาบของรอยเชื่อมระหว่างอัตราป้อน 0.9 และ
0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าระยะเพียง 2.6 มิลลิเมตร
เท่านั้น โดยมีปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์
ดังกล่าวคือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเชื่อมและ
ช่วงเวลาที่เนื้อโลหะที่มีอุณหภูมิสูงสัมผัสผิวหน้า
รอยเชื่อม

แนวโน้มการเสียรูปที่แตกต่างกันในแต่ละเงื่อนไข การทดลอง สามารถอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในรูปที่ 7 โดยการเชื่อมด้วยอัตรา ป้อน 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิยังมี แนวโน้มที่สูงขึ้นเนื่องจากเนื้อโลหะที่มีความร้อนสูงยังถูก อัดบริเวณจุดศูนย์กลางของรอยเชื่อม ทำให้บริเวณ ดังกล่าวมีอุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น

แต่ในขณะที่การเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิที่วัดได้ขณะทำการเชื่อม มีแนวโน้มที่จะลดลง และแนวโน้มการเสียรูปไม่เปลี่ยนแปลง มากนัก เนื่องจากเนื้อโลหะที่มีอุณหภูมิสูงได้ถูกดันไป บริเวณขอบของรอยเชื่อมหมด จึงมีแต่เพียงเนื้อโลหะที่ อุณหภูมิต่ำกว่าที่ได้สัมผัสกับรอยเชื่อม ส่งผลให้อุณหภูมิ บนรอยเชื่อมที่แพร่ผ่านอลูมินาลดต่ำลง โดยพื้นที่ของ โลหะที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2



รูปที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แพร่ผ่านอลูมินาขณะ ทำการเชื่อมต่อเวลาโดยเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขของ การทดลอง

# 3.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนจาก การเชื่อม

จากรูปที่ 8-12 เมื่อได้พิจารณาโครงสร้างมหภาค ของรอยเชื่อมในส่วนของอลูมิเนียม AA 6063 แสดงให้ เห็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone) โดยพื้นที่ดังกล่าวคือบริเวณเนื้อโลหะที่มีอุณหภูมิ



รูปที่ 4 ชิ้นงานสำเร็จที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5 อัตราการเสียรูปโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียม AA 6063 ตาม แนวการอัดต่อเวลาขณะทำการเชื่อม



รูปที่ 6 ระยะเสียรูปสูงสุดตามแนวระนาบของรอยเชื่อมในแต่ละ เงื่อนไขการทดลอง

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 6 จะพบว่าระยะ เสียรูปสูงสุดตามแนวระนาบของรอยเชื่อมที่อัตราป้อนที่ สูงกว่ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับ การเชื่อมด้วยอัตราป้อนต่ำกว่า โดยที่การเชื่อมด้วยอัตรา ป้อน 0.1 และ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลต่างของระยะ เสียรูปสูงสุดตามแนวระนาบของรอยเชื่อมมีระยะ 15.07 มิลลิเมตร ในขณะที่ผลต่างของระยะเสียรูปสูงสุด



รูปที่ 8 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและการแตกร้าวของ อลูมินาจากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 9 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและการแตกร้าวของ อลูมินาจากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.3 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 10 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและการแตกร้าว ของอลูมินาจากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 11 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและการแตกร้าว ของอลูมินาจากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.7 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 12 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและการแตกร้าวของ อลูมินาจากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที

สูงดังกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวจะ ประกอบด้วยพื้นที่ Dead metal zone หรือบริเวณที่เนื้อ โลหะไม่เกิดการไหลตัว และบริเวณ Shear band ซึ่งเป็น พื้นที่ขอบเขตของ Dead metal zone [10] ซึ่งพื้นที่ที่ ได้รับผลกระทบจากความร้อนได้ปรากฏขึ้นในทุกเงื่อนไข การทดลอง

จากรูปที่ 8-11ได้แสดงถึงรูปแบบพื้นที่ที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อน โดยรูปแบบที่ปรากฏคือ พื้นที่ที่ ได้รับผลกระทบจากความร้อนแบบแรงดันต่ำเกินไปหรือ ความเร็วรอบสูงจนเกินไป (low pressure or high speed) [11] โดยพื้นที่ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นแนวโค้ง ออกจากระนาบรอยเชื่อม ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้ เห็นถึงพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจะมีแนวโน้ม ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราป้อนให้สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 8-11 และเมื่อพิจารณาภาพที่ 12 พบว่าปรากฏพื้นที่ที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อนแบบความเร็วรอบสมดุลย์กับ แรงดัน (optimum) [11]

จากรูปที่ 8-11เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของ รอยเชื่อมในชิ้นงานอลูมินา จะปรากฏรอยร้าวขึ้นในทุก เงื่อนไขการทดลอง โดยรอยร้าวที่พบในรอยเชื่อมจะมี 2 แบบ รอยร้าวแบบแนวตั้งฉากกับรอยเชื่อม (Vertical cracks) และรอยร้าวแบบเว้าไปตามระนาบรอยเชื่อม (Convex cracks) ซึ่งเป็นรอยร้าวมาจากการกระจายตัว ของความร้อนที่ไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้าง บนรอยเชื่อมส่งผลให้เกิดรอยร้าวเกิดขึ้น โดยรอยร้าว ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ทั่วไปในรอยเชื่อมระหว่างโลหะและ เซรามิกส์ (16)

จากผลการทดลอง พบว่ารอยร้าวแบบแนวตั้งฉาก กับรอยเชื่อมพบในทุกเงื่อนไขการทดลอง ในขณะที่ รอยร้าวแบบเว้าไปตามระนาบรอยเชื่อมปรากฏขึ้นในทุก เงื่อนไขการทดลอง ยกเว้นการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า การเชื่อม ด้วยเงื่อนไขดังกล่าว มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นการเชื่อม ที่มีการกระจายความร้อนได้ดีที่สุดและส่งผลให้เกิดความ เค้นตกค้างน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไข การทดลองอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม ควรมีการทำการทดลอง เพื่อที่จะบ่งชี้สาเหตุการแตกร้าวเซรามิกส์ให้ชัดเจนขึ้น

### 4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมินาด้วย การเชื่อมเสียดทานที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที แรงดันอัดและแรงดันเสียดทาน 22.4 และ 44.8 เมกกะ ปาสคาล ช่วงเวลาอัดและช่วงเวลาเสียดทาน 20 และ 3 วินาที ที่อัตราการป้อนแตกต่างกันสามารถสรุปผล การทดลองได้ดังนี้

4.1 สามารถเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมินาให้ติดกันด้วย การเชื่อมเสียดทานได้สำเร็จ โดยพบหลักฐานการขัด ประสานทางกลในทุกเงื่อนไขการเชื่อม แต่อย่างไรก็ตาม ยังพบปัญหาเรื่องการแตกร้าวของอลูมินา

4.2 อิทธิพลของอัตราป้อนส่งผลต่อการเสียรูปทั้งใน แนวการอัดและในแนวระนาบผิวสัมผัสของรอยเชื่อม โดยระยะเสียรูปสูงสุดของอลูมิเนียม AA 6063 ในแนว การอัดและในแนวระนาบผิวสัมผัสของรอยเชื่อมคือ 14.59 มิลลิเมตร และ 18.27 มิลลิเมตรตามลำดับ ที่อัตรา ป้อน 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่การเชื่อมที่อัตรา ป้อน 0.1มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะการเสียรูปของ อลูมิเนียม AA 6063 ในแนวการอัดตัวของเพลามีค่าเพียง 2.59 มิลลิเมตรและระยะเสียรูปสูงสุดตามแนวระนาบของ รอยเชื่อมมีระยะการเสียรูปเพียง 7.6 มิลลิเมตรเท่านั้น

4.3 เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา ป้อนกับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง พบว่าที่อัตราป้อน 0.1,0.3 และ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมมีแนวโน้มสูงขึ้น ในทาง ตรงกันข้ามที่อัตราป้อน 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม ้มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดยอุณหภูมิต่ำสุดที่แพร่ผ่าน เนื้ออลูมินาที่วัดได้ระหว่างทำการเชื่อม คือ 112 องศา เซลเซียส ที่อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่ อุณหภูมิสูงสุดที่วัดผ่านแผ่นอลูมินาระหว่างทำการเชื่อม คือ 146.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราป้อน 0.5 มิลลิเมตรต่อ ้วินาที ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดจาก แรงดัน ความเร็วรอบ และพื้นที่ผิวสัมผัสของรอยเชื่อม ในทางตรงกันข้าม แนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิ ระหว่างการเชื่อมเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนผ่าน การไหลของเนื้ออลูมิเนียมออกไปบริเวณด้านข้างของ รอยเชื่อม

เมื่อพิจารณาลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นบริเวณ รอยเชื่อม พบว่าเกรนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสและ บริเวณภายใน Dead metal zone จะเป็นเกรนที่มี ลักษณะแบบ Dynamic recrystallization โดยเกรนจะมี ความสมมาตรและความละเอียดสูงอันเนื่องมาจาก พลังงานสะสมตามขอบเกรนที่มีสูงกว่าบริเวณภายนอก บริเวณ Dead metal zone โดยบริเวณภายใน Dead metal zone อลูมิเนียมเกิดการเสียรูปไม่มากนัก ส่งผลให้ มีการถ่ายเทพลังงานสะสมตามขอบเกรนให้กับ สิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่าบริเวณภายนอก Dead metal zone ทำให้พลังงานสะสมตามขอบเกรนสูงมากพอที่จะ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Dynamic recrystallization ดังแสดงในรูปที่ 13

ในขณะที่ภายนอกบริเวณ Dead metal zone จะมี ลักษณะเป็นเกรนที่มีการไหลตัวเนื่องจากความร้อนและ การอัดรีดผสมกับเกรนแบบ recrystallization สอดแทรก อยู่ แสดงถึงพลังงานสะสมตามขอบเกรนที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเกรนที่อยู่ในบริเวณ Dead metal zone ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณภายใน Dead metal zone จากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณภายนอก Dead metal zone จากการเชื่อมด้วยอัตราป้อน 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที

อิทธิพลของอัตราป้อนส่งผลต่อการเกิดพื้นที่ 4.4 Dead metal zone ของรอยเชื่อมในด้านของอลูมิเนียม โดยการเชื่อมที่อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที จะ ปรากฏพื้นที่ของ Dead metal zone มากที่สุด เมื่อเพิ่ม อัตราป้อนพื้นที่ของ Dead metal zone จะมีขนาดลดลง ตามลำดับ โดยบริเวณภายใน Dead metal zone จะมี โครงสร้างแบบ Dynamic recrystallization ที่มีขนาด เกรนที่ละเอียดและมีความสมมาตรเนื่องจากเป็นบริเวณที่ เนื้ออลูมิเนียมไม่ไหลตัว ในขณะที่บริเวณภายนอกเขต Dead metal zone จะมีโครงสร้างแบบ Recrystallization แต่มีเกรนหยาบและไม่สมมาตรเนื่องจากการไหลตัวของ เนื้ออลูมิเนียม เมื่ออลูมิเนียมไม่เกิดการไหลตัวส่งผลให้มี โอกาสได้รับความเค้นกดจากการเชื่อมนานกว่าในบริเวณ ที่เกิดการไหลตัว ส่งผลให้เกิดพลังงานสะสมที่ขอบเกรนที่ อยู่ในบริเวณ Dead metal zone มากขึ้นตามไปด้วย เมื่อได้รับความร้อนจากการเสียดทานกระตุ้นเข้าไปจึงทำ ให้เกิดเกรนแบบ Dynamic Recrystallization ได้ง่ายกว่า เกรนที่อยู่ในบริเวณที่เกิดการไหลตัว

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุขอังคณา ชาหยอง อาจารย์ ที่ปรึกษา รวมถึงคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งกรุณาสละเวลา ให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำ วิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์ และ ผศ.ดร. รุ่งนภา ทิพากรฐิติกุล รวมถึงคณาจารย์ ภาควิชา วิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นาย อาทิตย์ ฤทธิ์แผลง และ นาย ศิรวุธ คำภา และนายสรวิชย์ จันทร์มณี ที่ให้การช่วยเหลือใน การทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohamad Zaky Noh, Luay Bakir Hussain, Zainal Arifin Ahmad. 2008. Alumina – mild steel Friction welded at lower rotational speed.Journal of materials processing technology, 204 : 279-283
- [2] C.Kohnle,O.Mintchev,D.Brunner,S.Schmauder.2000. Fracture of metal / ceramic interfaces, Computational Materials Science, 19 : 261-266
- [3] Y.Zhou. 2008. Micro joining and nano joining.Woodhead Publishing , China
- [4] A.A.Essa and A.S.Bahran I.1991. The friction joining of ceramics to metals. Journal of Materials Processing Technology, 26 : 133-140
- [5] Jolanta Zimmerman, Wladyslaw Wlosinski, Zdzislaw R.Lindemann.2009.Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding. Journal of materials processing technology, 209: 1644-1653
- [6] M.N.Ahmad Fauzi, M.B.Uday, H. Zuhailawati, A.B. Ismail.2010. Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding. Materials and Design, 31 : 670-676
- [7] ช่วงชัย ชุปวา. 2554. การศึกษาตัวแปรสำหรับการ เชื่อมเสียดทานด้วยวิธีทางสถิติ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี
- [8] สุรสิงห์ อารยางค์กูร. 2551. การศึกษาโครงสร้าง จุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียด ทาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- [9] มานพ ตันตระบัณฑิต. 2531. งานทดสอบวัสดุ อุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร

- [10] ดิลก ศรีประไพ. 2546. การทำนายรูปร่างของ บริเวณปลาสติกด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ของเนื้อ อลูมิเนียม AA 6063 จากการทดสอบโดยวิธีการ การกดร้อน.การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41 สาขา วิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ : 392-398
- [11] M.M. SCHWARTZ. 1979. METAL JOINING MANUAL. Mcgraw-hill book company, New York