

AMM-19

ผลกระทบของเงื่อนไขการเชื่อมเสียดทานต่อการเกิดโลหะส่วนเกินในการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน Effect of Friction Welding Conditions on Flash Feature Formation of Similar Material Joining

นายณัฏฐวัฒน์ วีระยุทธ^{1*}, นายชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์² และ นายชัยเดช เกษมนิมิตพร³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ถ.สกลมารค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ 186 หมู่ 1 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000

*ติดต่อ: weerayuth_gm@hotmail.com, 045-353363, Fax : 045-353333

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานจัดเป็นการเชื่อมแบบ Solid State โดยใช้หลักการของแรงเสียดทานทางกลระหว่างชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่และชิ้นส่วนที่หยุดนิ่ง ในการสร้างความร้อนและใช้แรงดันอัดให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก ในการเชื่อมต่อชิ้นงานจึงไม่มีการหลอมละลายของเนื้อโลหะ ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการเชื่อมเสียดทานมาใช้ในการเชื่อมโลหะและวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่นในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และการผลิตเครื่องมืออุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ให้ความแข็งแรงสูง และให้คุณภาพของชิ้นงานเชื่อมที่ดีทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ดี อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้น ทั้งโลหะชนิดเดียวกันและโลหะต่างชนิดกัน ยังมีปัญหาในการเลือกค่าอินพุตพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานซึ่งประกอบไปด้วย ความดันเสียดทาน (Friction Pressure) เวลาเสียดทาน (Friction Time) ความดันอัด (Upsetting Pressure) เวลาอัด (Upsetting Time) และความเร็วรอบ (Speed) โดยค่าอินพุตเหล่านี้มีผลต่อการเกิดวัสดุส่วนเกินที่ล้นออกมาตามผิวรอยเชื่อมหรือ Flash ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมและขบวนการผลิตขั้นต่อไป งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอินพุตพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขในการเชื่อมเสียดทานดังกล่าวในช่วงต้นต่อการเกิด Flash โดยทำการทดลองเชื่อมเสียดทานโลหะชนิดเดียวกันที่เงื่อนไขการเชื่อมที่แตกต่างกัน เพื่อหาข้อสรุปถึงเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อขนาดของ Flash ที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางต่อการหาเงื่อนไขในการเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป

คำหลัก: การเชื่อมเสียดทาน, เงื่อนไขการเชื่อมเสียดทาน, โลหะส่วนเกิน, การก่อตัวของโลหะส่วนเกิน, วัสดุชนิดเดียวกัน

Abstract

Friction welding (FRW) is a solid-state welding process that generates heat through mechanical friction between a moving work piece and a stationary component, with the addition of a lateral force called "upset" to plastically displace and fuse the materials. Technically, because no melt occurs, friction welding is not actually a welding process in the traditional sense, but a forging technique. Friction welding is used with metals and thermoplastics in a wide variety of aviation and automotive applications. There are currently use of friction welding technique for joining metals or thermoplastic materials in various types of industry , such as automotive components and industrial tools for manufacturing, due to using short time, having high strength And provide a good quality of work piece across the cross section of the welding zone. Furthermore, it can also be suitable for joining the dissimilar materials. However, selecting of welding parameters such as friction pressure, friction time, upsetting pressure, upsetting time and speed is still problematic. These inputs can directly cause the formation of excess material at the surface overflow welds (Flash), which affects the quality of welding and manufacturing processes. This research aims to study the effect of these welding conditions of different combination on the

AMM-19

flash feature formation of similar material welding to investigate for the mechanism of formation and size of flash which will lead to further study of the optimum welding condition for friction welding technique.

Keywords: friction welding, friction welding conditions, flash, flash features formation, similar material.

1. บทนำ

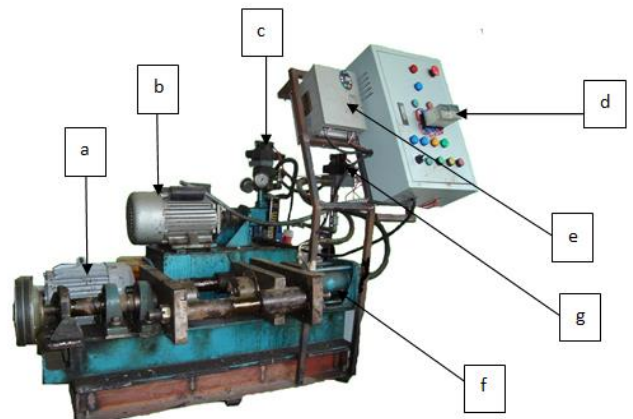
ในปัจจุบัน การเชื่อมเสียดทานซึ่งเป็นเทคนิคการเชื่อมแบบ Solid State ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์และการผลิตเครื่องมือต่าง ๆ [1] โดยมีหลักการทำงานที่ง่าย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานกลสู่พลังงานความร้อนที่พื้นผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมต่อ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อดังกล่าวทั้งพื้นผิวสัมผัส ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการเชื่อมแบบ Arc Welding ซึ่งต้องการความร้อนสูง ในการหลอมเหลวโลหะที่ต้องการเชื่อมเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมต่อไม่ทั่วถึงตลอดพื้นผิวสัมผัสของชิ้นงาน เพราะเป็นลักษณะของการเชื่อมพอกบนผิวนอกของชิ้นงาน [2] เนื่องจากข้อได้เปรียบหลายประการของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน จึงมีการพัฒนาและวิจัยต่อยอดอย่างต่อเนื่อง ทั้งการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในรูปแบบต่างๆ [3-4,5] ควบคู่ไปกับการศึกษาตัวแปรและเงื่อนไขในการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ทั้งในโครงสร้างระดับมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมต่อโลหะชนิดเดียวกัน หรือการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน [5-9] ตลอดจนการศึกษารวบรวมถึงเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมอันได้แก่ เวลาเสียดทาน (Friction time) ความดันเสียดทาน (Friction pressure) เวลาอัด (Upsetting time) ความดันอัด (Upsetting pressure) และความเร็วยรอบ (Speed) ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม [10-12] การวิจัยและพัฒนาดังได้กล่าวไว้ในข้างต้นนั้น ส่งผลให้มีการนำการเชื่อมเสียดทานไปใช้ในภาคการผลิตอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น การลดเวลาในการผลิตชิ้นส่วนที่เกิดจากงานเชื่อมย่อมส่งผลให้ Productivity ของกระบวนการผลิตมากยิ่งขึ้น รอยเชื่อมเสียดทานที่เกิดโลหะส่วนเกินน้อยลง ก็จะใช้เวลาในการตัดแต่งหรือเจียรนัยออกในขั้นตอนสุดท้ายน้อยเช่นกัน โดยปัญหาหลักที่เกิดขึ้นที่รอยเชื่อมเสียดทานของชิ้นงาน คือโลหะส่วนเกินหรือแฟลช (Flash) ที่ล้นออกมาตรงขอบรอยเชื่อม ในช่วงที่ทำให้ความดันอัดหรือ Upsetting Pressure ซึ่งถือว่าเป็น Metal Loss ที่ต้องให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด [13-14]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ของเงื่อนไขการเชื่อมเสียดทาน ที่ประกอบไปด้วย เวลาเสียดทาน ความดันเสียดทาน เวลาอัด ความดันอัด และความเร็วยรอบ ต่อการเกิดขึ้นของแฟลช (Flash) หรือโลหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างรอยเชื่อมของโลหะสองชิ้นที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน เพื่อให้ทราบถึงกลไกการก่อตัวของโลหะส่วนเกินนี้ ซึ่งจะนำไปสู่การวิจัยต่อยอดถึงการสร้างโมเดลจากการทดลอง ที่จะนำไปสู่การพัฒนาหาเงื่อนไขการเชื่อมเสียดทานที่เหมาะสมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีทดลอง

2.1 เครื่องเชื่อมเสียดทาน

เครื่องเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างต่อเนื่องที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยลักษณะและส่วนประกอบตลอดจนอุปกรณ์ทำงานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
a) มอเตอร์ต้นกำลังในการเชื่อมชิ้นงาน	380 V / 7.5 Hp
b) มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 5 Hp
c) ระบบวาล์วควบคุมการ (เปิด-ปิด) ไฮดรอลิกส์	Electrical Solenoid Valves / 220V
d) ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
e) ระบบควบคุมมอเตอร์ต้นกำลังในการเชื่อมชิ้นงาน	Inverter ขนาด 7.5 Hp
g) กระบอกไฮดรอลิกส์	Diameter 4 inches
g) ระบบควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow Control Valves
- ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valves
- แรงดันระบบไฮดรอลิกส์	100 บาร์

รูปที่ 1 เครื่องเชื่อมเสียดทานแบบ Rotary Direct Drive

AMM-19

2.2. ชิ้นงานทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาโครงการนี้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งตามท้องตลาดจะเรียกว่าเหล็กเพลลาขาว โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 16 มิลลิเมตร ยาวท่อนละ 82 มิลลิเมตร และได้นำชิ้นงานไปหาส่วนประกอบทางเคมี เทียบกับมาตรฐานของระบบ SAE-AISI (American Iron and Steel Institute) จากการตรวจสอบพบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับเหล็กเบอร์ AISI 1015 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 และกลึงปาดหน้าชิ้นงานเป็นมุม 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1: ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงาน

% by weight	%C	%P	%S	%Mn	%Si	%Cr
วัสดุทดลอง	0.15	0.03	0.01	0.47	0.17	0.01
AISI 1015	0.13-0.18	0.04	0.05	0.3-0.6	0.1-0.2	-



รูปที่ 2 ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมเสียดทาน

2.3. การออกแบบการทดลอง

ในการทดลอง ได้เลือกใช้ตัวแปรที่มีผลต่อปัจจัยการเกิดโลหะส่วนเกินตามแนวรอยเชื่อม โดยมีเงื่อนไขการเชื่อมเสียดทานที่มีค่าในช่วงดังต่อไปนี้

- ความดันเสียดทาน $10 \leq P_1 \leq 25$ (บาร์)
- เวลาเสียดทาน $T_1 = 10$ (วินาที)
- เวลาอัด $2 \leq T_2 \leq 4$ (วินาที)
- ความดันอัด $25 \leq P_2 \leq 60$ (บาร์)
- ความเร็วรอบ $1300 \leq N \leq 1800$ (รอบ/นาที)
- อัตราป้อน $F = 0.20$ (มิลลิเมตร/วินาที)

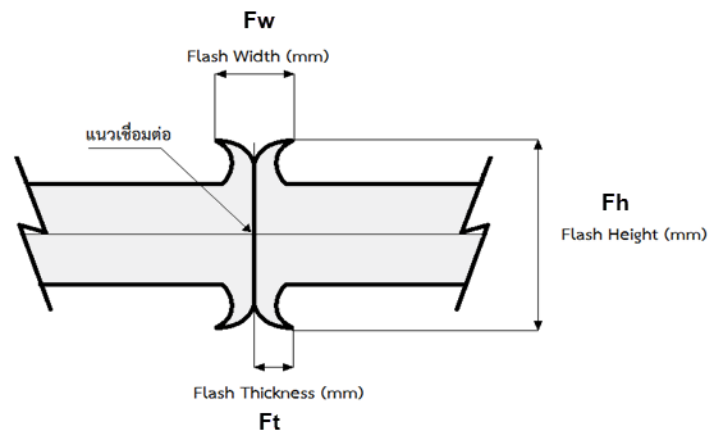
ทั้งนี้ วิธีการทางสถิติได้ถูกนำมาช่วยในการออกแบบเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการ

ทดลองแบบ Full Factorial โดยตัวแปรจะมี 3 ลำดับขั้น ซึ่งจะได้เงื่อนไขการเชื่อมเสียดทานทั้งหมด 144 กรณี

2.4. การดำเนินการทดลอง

ชิ้นงานที่ถูกเตรียมไว้ด้วยขนาดตามที่ระบุในหัวข้อ 2.2 จะถูกเชื่อมโดยเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบ Rotary Direct Drive ดังรูปที่ 1 โดยมีชิ้นงานเป็นโลหะชนิดเดียวกัน (Similar Material) ซึ่งในที่นี้คือเหล็กเพลลาขาว หรือ AISI 1015 ด้วยเงื่อนไขการเชื่อมทั้ง 144 กรณี ตามการทดลองที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 2.3 โดยมีตัวแปรที่ต้องทำการศึกษาคือ การเกิดเนื้อโลหะส่วนเกิน (Flash) ตามแนวรอยเชื่อม ดังรูปที่ 2 โดยมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความกว้างของแฟลช (Flash Width) – Fw
2. ความสูงของแฟลช (Flash Height) – Fh
3. ความหนาของแฟลช (Flash Thickness) – Ft



รูปที่ 3 รูปแบบการก่อตัวของโลหะส่วนเกินที่แนวเชื่อม

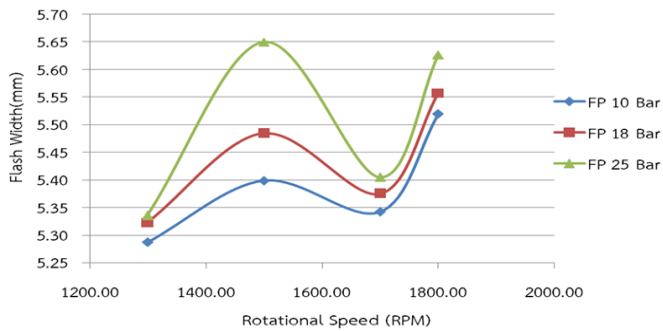
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จแล้วจะถูกนำไปวัดขนาดของแนวรอยเชื่อมที่เกิดโลหะส่วนเกินหรือที่เรียกว่า Flash Feature ที่เกิดขึ้น โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัลเพื่อวัดขนาดความกว้าง (Flash Width), ความหนา (Flash Thickness) และความสูง (Flash Height) ของแฟลช โดยการวัดค่าต่างๆ จะทำการวัดเฉลี่ย รอบชิ้นงานทั้งหมด 6 จุด ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

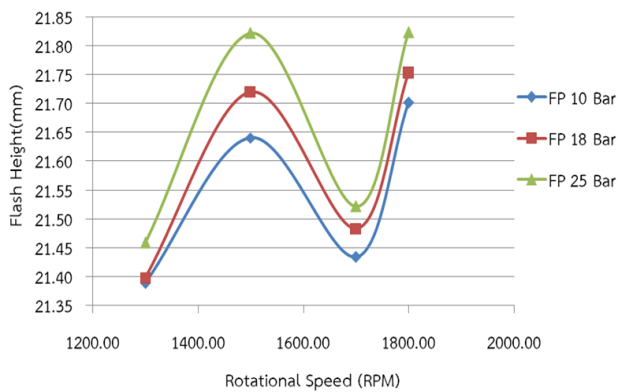
AMM-19

3.1 ผลการทดลอง

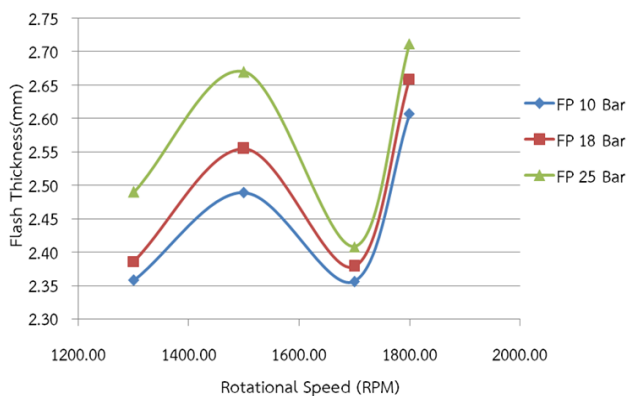
3.1.1 ผลของความดันเสียดทาน (FP) และความเร็วรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช



a) Flash Width



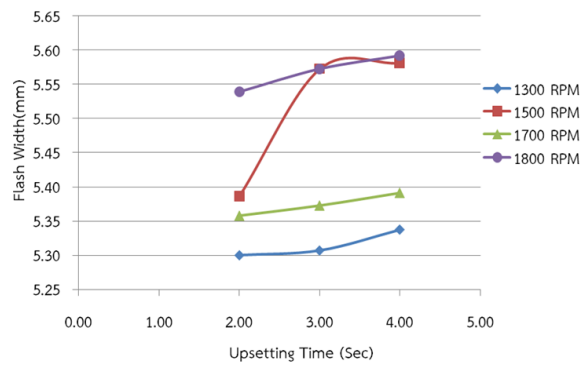
b) Flash Height



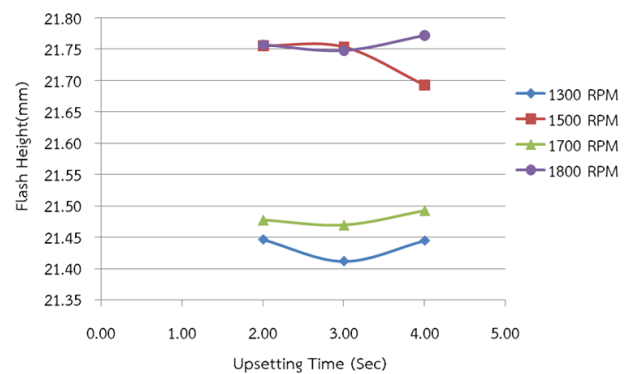
c) Flash Thickness

รูปที่ 4 ผลของความดันเสียดทาน (FP) และความเร็วรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช

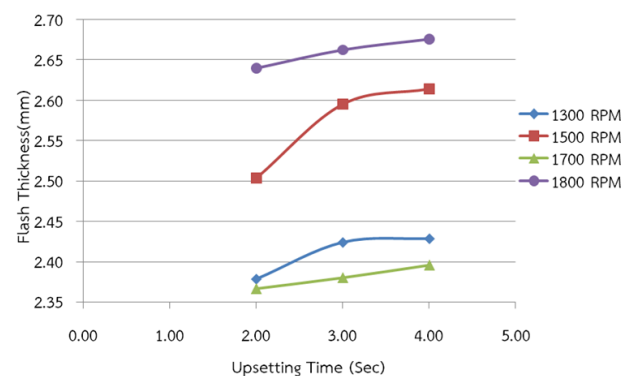
3.1.2 ผลของเวลาอัด (UT) และความเร็วรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช



a) Flash Width



b) Flash Height

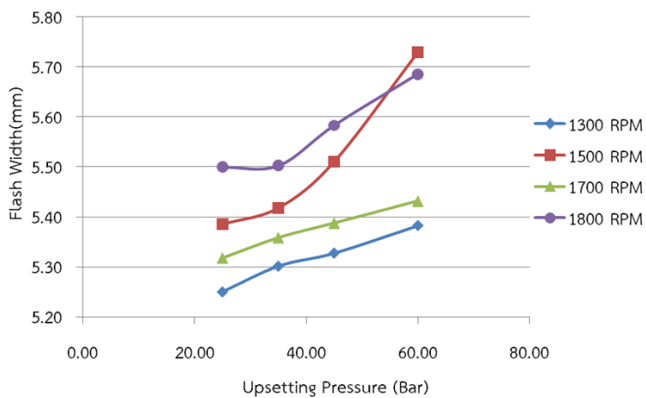


c) Flash Thickness

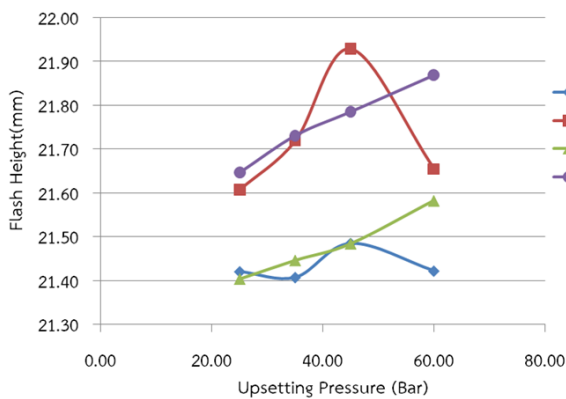
รูปที่ 5 ผลของเวลาอัด (UT) และความเร็วรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช

AMM-19

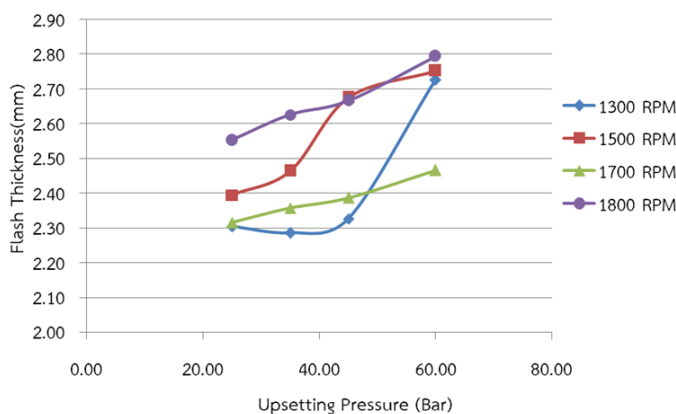
3.1.3 ผลของความดันอัด (UP) และความเร็วยรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช



a) Flash Width



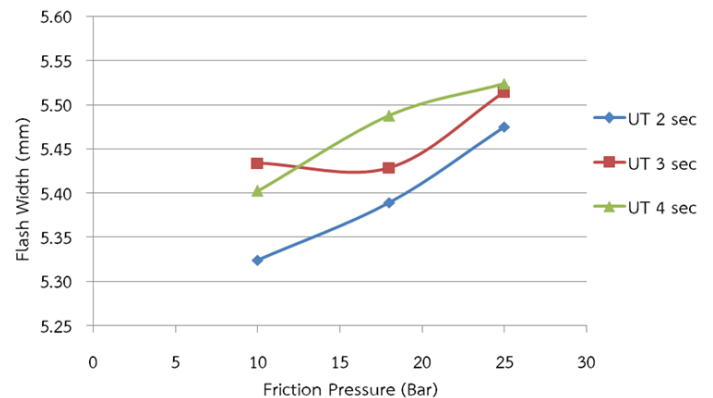
b) Flash Height



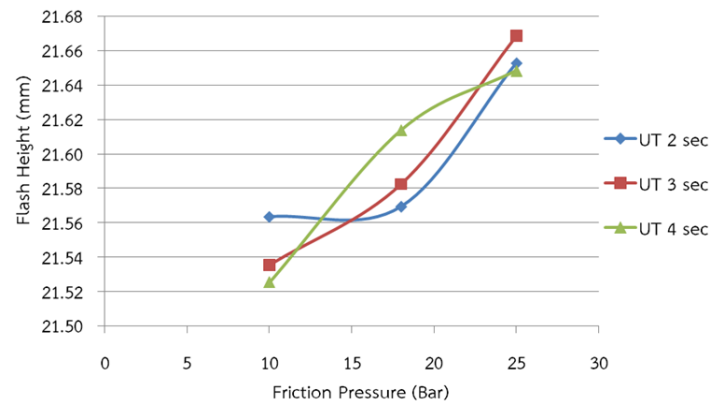
c) Flash Thickness

รูปที่ 6 ผลของความดันอัด (UP) และความเร็วยรอบ (N) ต่อขนาดของแฟลช

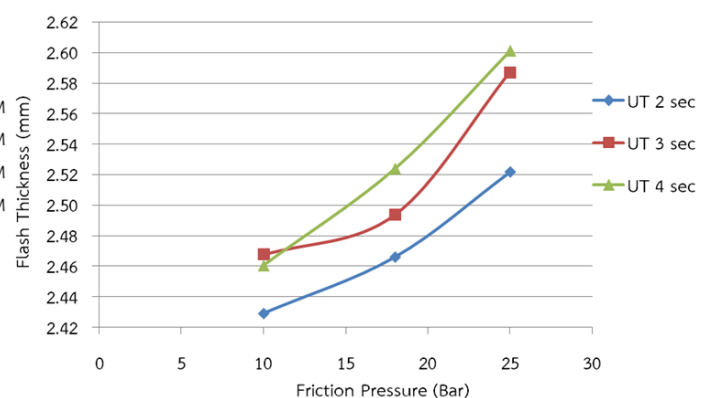
3.1.4 ผลของเวลาอัด (UT) และความดันเสียดทาน (FP) ต่อขนาดของแฟลช [N=1800 rpm]



a) Flash Width



b) Flash Height

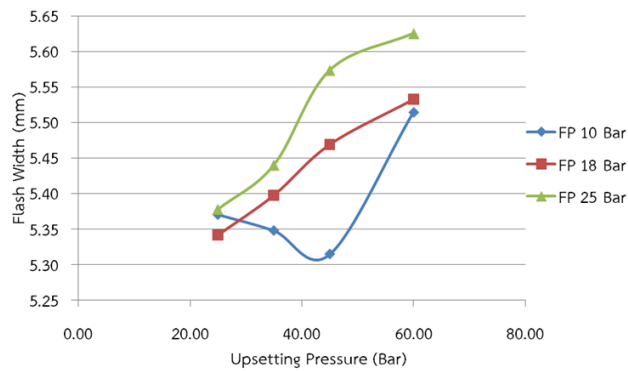


c) Flash Thickness

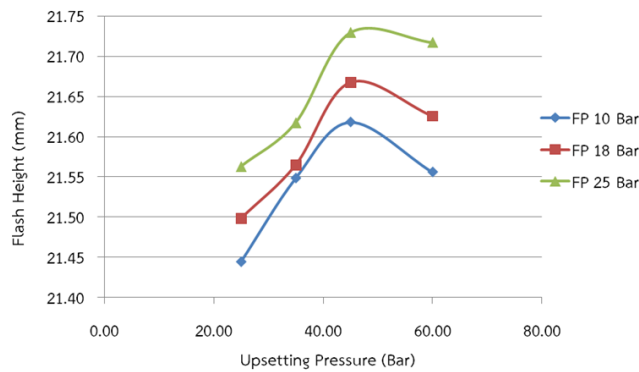
รูปที่ 7 ผลของเวลา (UT) และความดันเสียดทาน (FP) ต่อขนาดของแฟลช

AMM-19

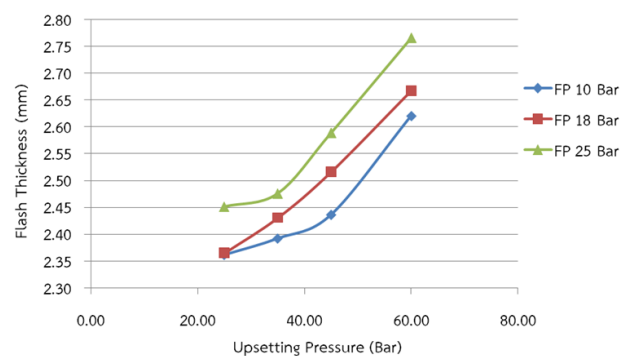
3.1.5 ผลของความดันอัด (UP) และความดันเสียทาน (FP) ต่อขนาดของแฟลช [N=1800 rpm]



a) Flash Width

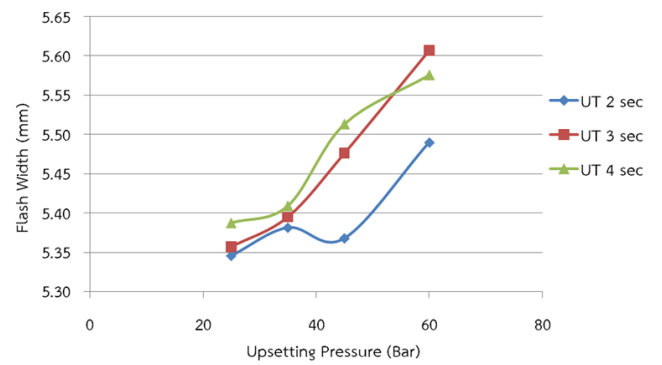


b) Flash Height

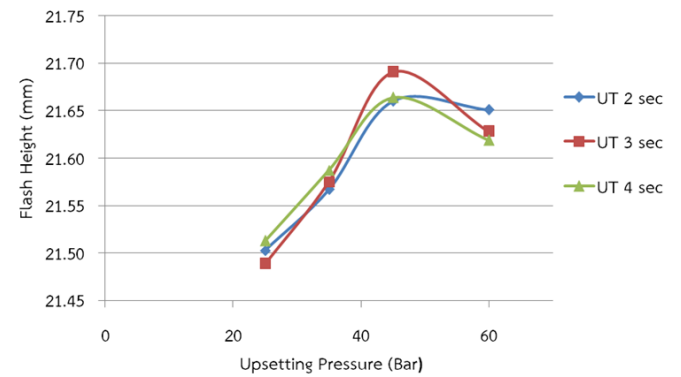


c) Flash Thickness

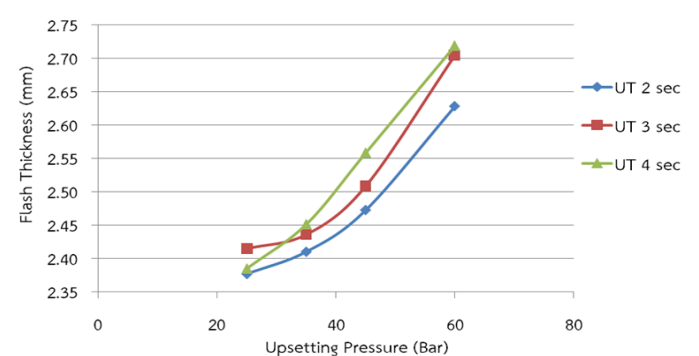
3.1.6 ผลของความดันอัด (UP) และเวลาอัด (UT) ต่อขนาดของแฟลช [N=1800 rpm]



a) Flash Width



b) Flash Height



c) Flash Thickness

รูปที่ 8 ผลของความดันอัด (UP) และความดันเสียทาน (FP) ต่อขนาดของแฟลช

รูปที่ 9 ผลของความดันอัด (UP) และเวลาอัด (UT) ต่อขนาดของแฟลช

AMM-19

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อความดันเสียตทาน (FP) และความเร็รรอบ (N) มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ความกว้างของโลหะส่วนเกิน (Fw) มีขนาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ ความสูงและความหนาเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนใกล้เคียงกัน (เมื่อไม่คิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน) เช่นเดียวกับรูปที่ 5 เมื่อมีการขึ้นของเวลาอัด (UT) และความเร็รรอบ จะมีผลทำให้ขนาดแฟลชเพิ่มมากขึ้น โดยมีผลกับความกว้างของแฟลช (Fw) อย่างเด่นชัด ในกรณีของรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันอัด (UP) มากขึ้น และความเร็รรอบ (N) สูงขึ้น จะทำให้ขนาดแฟลชใหญ่มากขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งขนาดของ Fw Ft และ Fh ตามลำดับ จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเวลาอัด (UT) และความดันเสียตทาน (FP) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ขนาดของแฟลชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ไม่เด่นชัดเท่าการเพิ่มของความดันอัดและความเร็รรอบ จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 จะพบว่า เมื่อความดันอัดและความดันเสียตทานสูงขึ้น และเมื่อความดันอัดและเวลาอัดมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของแฟลชมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน คือ Fw และ Ft เพิ่มขึ้นแต่ไม่เด่นชัด ในขณะที่ความสูงของแฟลช (Fh) จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันอัดเพิ่มมากขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-9 และการวิเคราะห์ผลในหัวข้อที่ 3.2 สามารถสรุปได้ว่า มีตัวแปรหรือพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเงื่อนไขในการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding Conditions) ที่มีผลต่อการก่อตัวของโลหะส่วนเกิน (Flash Features Formation) จะประกอบไปด้วย เวลาเสียดทาน ความดันเสียตทาน เวลาอัด ความดันอัดและความเร็รรอบของการหมุนชิ้นงาน โดยเมื่อเรียงลำดับความสำคัญตามผลกระทบที่มีต่อการเพิ่มขนาดของแฟลชหรือโลหะส่วนเกิน ซึ่งประกอบไปด้วย ความกว้างของแฟลช (Fw) ความสูงของแฟลช (Fh) และความหนาของแฟลช (Ft) จะได้ลำดับความสำคัญคือ

1. ความดันอัด (Upsetting Pressure)
2. ความเร็รรอบ (Speed of Rotation)
3. ความดันเสียตทาน (Friction Pressure)
4. เวลาอัด (Upsetting Time)

โดยความดันอัดและความเร็รรอบที่มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของแฟลชมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนและมี

นัยสำคัญเมื่อพิจารณาจากกราฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ การเพิ่มขึ้นของความกว้างของแฟลช (Fw) ความหนาของแฟลช (Ft) และความสูงของแฟลช (Fh) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ได้ลำดับความสำคัญไว้ในข้างต้น ทั้งนี้จะมีการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าความไว (Sensitivity Analysis) ของตัวแปรในเงื่อนไขของการเชื่อมเสียดทานโลหะชนิดเดียวกัน ต่อการก่อตัวของแฟลชหรือโลหะส่วนเกินในงานวิจัยขั้นต่อไป เพื่อเป็นการยืนยันสมมุติฐานข้างต้นของงานวิจัยนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ รวมถึง นายสมชาย วรรณญาติ, นายกิตติพงษ์ เงินลาด และ นายเพทาย ผาดโรสง ที่มีส่วนช่วยสำคัญในการทดลองและเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ ตลอดจน ว่าที่ร้อยตรีสรวิชัย จันทรมณี, นายธรรมะสุข มิ่งเมือง และ นายกฤตยา ไชยยศ ที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิคและการปรับปรุงเครื่องเชื่อมเสียดทานต้นแบบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mehmet UZKUT et al (2009). Friction Welding And Its Applications In Today ' s World. Celal Bayar Universitesi. <http://eprints.ibu.edu.ba/id/file/8615>
- [2] Arayangkun S, Bootarawong A, Thinvongpituk C.A study of properties of round steel rod jointswelded by friction welding., J Sci Technol UBU.,2009;11(1),83-98. Thai.
- [3] J. Luo; X. J. Wang; J. X. Wang. New technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding. J.Science and Technology of Welding and Joining, 2009 ; Vol.14 (7): 650-654.
- [4] G. A. Moraitis, G. N. Labeas. Investigation of friction stir welding process with emphasis on calculation of heat generated due to material stirring. J.Science and Technology of Welding and Joining, 2009 ; Vol.15 (2): 177-184.

AMM-19

- [5] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail: Advances in friction welding process: a review. J.Science and Technology of Welding and Joining, 2010 ;Vol.15(7):534-558.
- [6] G. M. Reddy and K.S.Rao: Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction weld. Int.J.Adv.Manuf.Technol.,2009,Vol.45(9),875-888.
- [7] D.Ananthapadmanaban, V.S. Rao, N.Abraham and K.P.Rao: A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joint.. Mater.Des.,2009,Vol.30(7),2642-2646.
- [8] ช่างชัย ชูปวา และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์(2552). การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 4-7 พฤศจิกายน 2552.
- [9] ช่างชัย ชูปวา และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์(2553). การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทาน, วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์, ม.อบ., 3(2), กรกฎาคม-ธันวาคม 2553, หน้า 17-24.
- [10] Ittipon Worapun , Chuanchai Chooppava and Chawalit Thinvongpituk. Optimal Conditions of Friction Welding Process for AISI 1015 Steel using Response Surface Methodology, KKU Res. J. 2013; Vol.18(6): 909-924.
- [11] M. Ghosh, K. Kumar, S.V. Kailas, and A.K. Ray.: Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys., Materials & Design, Vol. 31(6), June 2010, Pages 3033–3037
- [12] R.Paventhana, PR.Lakshminarayanan, V. Balasubramanian. Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel. J.Iron and Steel Research, International. Vol.19(1), January 2012, Pages 66–71.
- [13] P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq, K. Paneerselvam. Optimization of friction welding parameters using simulated annealing.,Indian J.Eng. &MAT. Science.,2006, Vol.13, pp.37-44.
- [14] P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq, K. Paneerselvam.: Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques., J. MATER PROCESS TECHNOL.,2009, Vol. 209(5), pp. 2576-2584.