

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24  
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

## การศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมแบบความเสียดทานต่อเหล็กกล้าผสมต่ำและไร้ สนิม

### Study on the Mechanical Properties of Friction Welded Joints Low Alloy and Stainless Steels

ธานี ทুমประเสน<sup>\*</sup>, ช่วงชัย ชูบวา, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ สุอังคณา ลี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

ติดต่อ: โทรศัพท์: 045 353 308, โทรสาร: 045 353 309

E-mail: thaneett@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าผสม AISI 4140 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยจะเน้นศึกษาที่คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเป็นหลัก การศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการโดยการนำเหล็กกลมชนิด (AISI 4140) เหล็กกล้าผสม และ (AISI 304) เหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm. ยาวขึ้นละ 70 mm. มาทำการทดลองเชื่อมด้วยค่าตัวแปรเดียวกัน ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 183 MPa เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 12 sec แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 428 MPa เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 7 sec ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1400 rpm เป็นเงื่อนไขในการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมมาทำการตรวจสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อม โดยตรวจสอบค่าความแข็ง และความแข็งแรง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่ารอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงชัน และพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมสูงชันหรือลดลงขึ้นกับชนิดของวัสดุที่รอยเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่ารอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1005 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าชิ้นงานเดิม เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสม 5 % และเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม 48 %

**คำสำคัญ:** การเชื่อมด้วยความเสียดทาน, การเชื่อมโลหะ, เหล็กกล้าผสม, เหล็กกล้าไร้สนิม

#### Abstract

Friction welding has been widely used in many engineering applications. This is because friction welding can join materials through the whole cross section while the conventional welding can do only around the edge of section. Furthermore, friction welding requires shorter welding time and offer very constant welding quality because it is independent from human skill. Therefore, this welding technique has been studied widely and continuously, focusing on many parameters such as friction speed, friction time, friction pressure, micro and macro structures of welding zone. This research is also aimed to investigate the influence of friction time and friction pressure on hardness and strength of welded elements as well as its mechanical properties.

A number of AISI 4140 and AISI 304 round steels was welded by friction welding. Friction pressure was varied from 428 MPa, friction time 7 sec. Upset pressure, Upset time and welding speed were fixed at 183 MPa, 12 seconds and 1,400 rpm respectively. It was found that the hardness of welded area is varied, depending on type of materials. In addition, it was also found that the welded specimen has tensile strength of 1005 MPa. This is 5% higher than AISI 4140 and 48% higher than that of AISI 304

**Keywords:** friction welding, Welding, Alloy Steel, Stainless Steel

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลายเนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานได้คุณภาพความแข็งแรงสูง การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีการผสมผสานทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทานอย่างมากมาย โดยพบว่าเทคนิคการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นสามารถใช้เชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ค่อนข้างดี ประกอบกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมมีมากขึ้น เช่นในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น จึงมีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้แก่ Tomoyuki Uwada และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าโครงสร้างโครเมียม 9Cr กับ Oxide-Dispersion-Strengthened-Steel (ODS) ที่เชื่อมต่อกับวัสดุที่มีเกรน Ferritic-Martensitic-Steel (PNC-FMS) ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ซึ่งศึกษาผลของเกรนที่เกิดขึ้นในบริเวณแนวเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการทดลองได้กำหนดช่วงเวลากการเย็นตัวของชิ้นงานเชื่อมมาเป็นตัวแปรด้วย นอกจากนี้ S.D.Meshram และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานกับวัสดุต่างชนิดกัน โดยทำการเชื่อมต่อ เหล็ก (Fe) กับ ทิตาเนียม (Ti) ,ทองแดง (Cu) กับ ทิตาเนียม (Ti), เหล็ก (Fe) กับ ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe)กับ นิกเกิล

(Ni) และทองแดง (Cu) กับ นิกเกิล (Ni) ซึ่งผลที่ได้จากการเชื่อมนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ผลคือค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (Layer)ระบบ eutectoid forming System จะได้คู่ (Fe-Ti and Cu-Ti) และระบบ (insoluble) (Fe-Cu) ค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงขึ้นของวัสดุคู่ (Fe-Ti and Cu-Ti) ในโครงสร้างระดับจุลภาค Ahmet Z.Sahin และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมของทองแดงและเหล็กกล้า โดยใช้ทองแดงในทางการค้า 98% H21 (DIN-30 W Cr V93) และเหล็กกล้า AISI1015 (DIN-1141) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในหน้าผิวสัมผัส ในรัศมีบทบาทสำคัญในการแพร่กระจาย และการพัฒนาความร้อนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม Kunihiko Tsuchiya และคณะ [4] ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของทองแดงโครเมียมผสมเซอร์คอน (Zr) และข้อต่อ สแตนเลสสตีล (SS316) ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่ได้รับจากการทดลอง มีความเร็วรอบได้ 2200 รอบต่อนาที ความดันเสียดทาน 353 MPa เวลาเชื่อม 2.0 sec ผลจากการทดสอบแรงดึง มีข้อผิดพลาด 3% อยู่ในระดับดี และ Sare Celik และคณะ [5] ยังได้ทำการศึกษาตรวจสอบคูณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเสียดทานระหว่าง AISI 4140 และ AISI 1050 ผลจากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่าความแข็งแรงของเหล็กเดิม โดยค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจะแตกต่างกันตามเงื่อนไขในการเชื่อม และยังพบอีกว่า

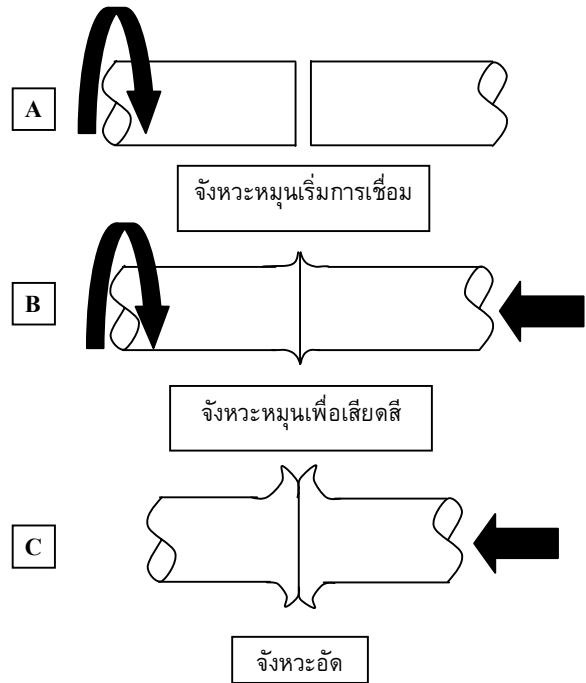
การเพิ่มอุณหภูมิในครั้งแรกจะใช้เวลารวดเร็วที่โซนเชื่อม เงื่อนไขการเชื่อมสูงสุด คือความเร็วรอบ 3000 rpm ความดันเชื่อม 81 MPa เวลาเชื่อม 6 Sec การเข้าร่วมประสานติดกันได้ดีในการใช้กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารอยเชื่อมของเหล็กผสม (AISI 4140) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานโดยการศึกษาได้เน้นไปที่การวิเคราะห์ความแข็งและความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นหลัก

## 2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

### 2.1 แนวคิดเบื้องต้นของระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน ในการเชื่อมนั้นทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็ว และแรงบิดค่าหนึ่งดังรูปที่ 1 A จากนั้นสร้างแรงดันๆให้ชิ้นงานนั้นไปสัมผัสและหมุนเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่ยึดติดกับที่แล้วกำหนดเวลาในการเสียดทานให้เกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนหลอมให้หน้าสัมผัสทั้งสองเข้าสู่สภาวะหนืดดังรูปที่ 1 B จึงให้แรงดันอัดภายในเวลาอันรวดเร็วเพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกันดังรูปที่ 1 C โดยพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานทั้งสองได้รับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบระยะเวลาในการให้แรงในแนวแกน ค่าของแรงดันในแนวแกนในแต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบให้แรงดันอัดด้านเดียว



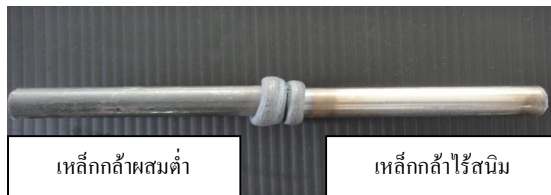
รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ใช้เพื่อการทดลอง

## 2.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิดข้างต้น โดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมนั้นใช้ Inverter ขนาด 7.5 Hp ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่องเชื่อมสร้างบนฐานเหล็กทรงตัวยาวเพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงเครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้วและใช้ในการทดลอง เครื่องดังกล่าวใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่องเชื่อมนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Electric Solenoid Valve ควบคุมแรงดัน ส่วนของการปรับค่าแรงดันใช้ Manual Relief Valves และใช้ Timer ควบคุมเวลาการทำงาน ซึ่งสามารถปรับตามค่าตัวแปรต่างๆ

## 2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าผสม (AISI 4140) ตามท้องตลาดเรียกว่าเหล็กเพลลาฟ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm. ยาว 70 mm. กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ตามท้องตลาดเรียกว่าเหล็กกล้าสแตนเลสสตีลขนาดเท่ากัน โดยได้นำชิ้นงานทั้งสองชนิดไปทดสอบ เพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี ตามมาตรฐานของระบบ SAE-AISI (American Iron and Steel Institute) และจากการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีพบว่าเป็นมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่เชื่อมสำเร็จ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Material	%C	%P	%Si	%Mo	%Ni	%Cr
เหล็กกล้าผสม AISI4140	0.49	0.004	0.25	0.17	0.02	0.95
Material	%C	%P	%Si	%S	%Ni	%Cr
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	0.016	0.01	0.26	0.009	7.33	18.13

นอกจากนี้ยังนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าเหล็กกล้าผสมที่ใช้มีความแข็งแรง 950 MPa ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรง 671 MPa

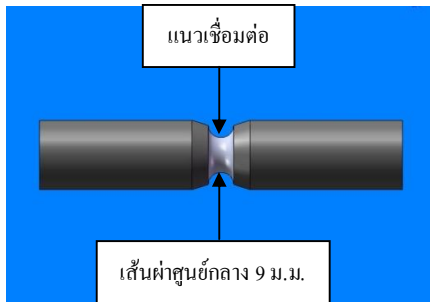
## 2.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ จะใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานดังที่แสดงในรูปที่ 2 ทำการเชื่อมชิ้นงาน ให้ติดกันโดยอาศัยหลักการเชื่อมดังที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมดังต่อไปนี้ ให้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) 183 MPa เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) 12 sec แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) 428 MPa เวลาในการเชื่อม (Upset Time) 7 sec ความเร็วรอบในการหมุน (Rotation Speed) 1400 rpm เป็นเงื่อนไขในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลองดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นและพบว่าเป็นเงื่อนไขที่สามารถเชื่อมชิ้นงานได้ดี จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปทดสอบ เพื่อหาค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งของแนวเชื่อมและส่วนอื่นๆของชิ้นงานที่ได้ผลกระทบจากการเชื่อม โดยใช้เครื่อง Micro Hardness Test และเครื่อง Tensile Test

## 2.5 การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 จะถูกนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยใช้เครื่องทดสอบการดึง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการขาดที่

ตำแหน่งของรอยเชื่อมจริง ๆ จึงจำเป็นต้องทำการกลึง ตกร่องบากชิ้นงานที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม โดยทำการกลึงให้รอยบากมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9mm. ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง โดยทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้นงาน ต่อ 1 เงื่อนไขเพื่อลดข้อผิดพลาดจากการทดลอง และตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึง ดังแสดงในรูปที่ 5



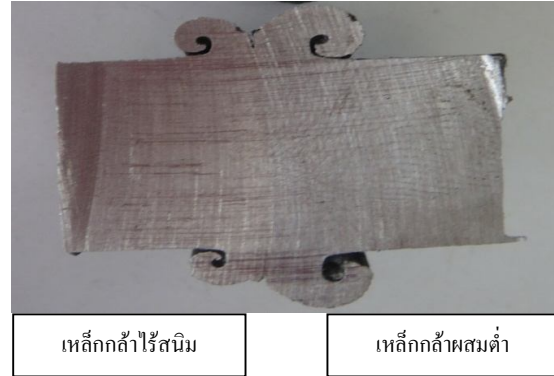
รูปที่ 4 ลักษณะรอยบากของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการกลึง กำหนดจุดขาด



รูปที่ 5 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึงแล้ว

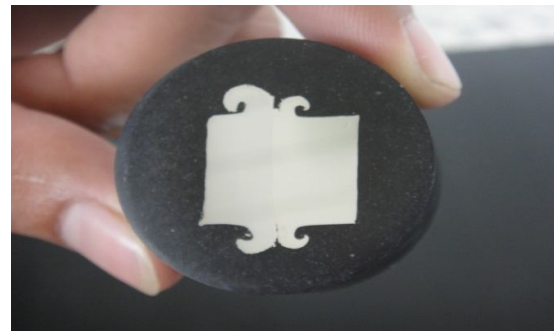
**2.6 การทดสอบหาค่าความแข็ง**

ในการทดสอบหาค่าความแข็งชิ้นงานจะถูกตัดมาเฉพาะส่วนที่เชื่อมติดกันประมาณ 15 mm จากแนวรอยเชื่อมในแต่ละด้าน แล้วนำมาผ่าตามแนวแกน เพื่อให้เห็นรอยเชื่อมตลอดหน้าตัดแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชิ้นงานเชื่อมที่ผ่าเพื่อทดสอบความแข็ง

เมื่อผ่าชิ้นงานที่จะทดสอบเสร็จแล้ว ต้องนำชิ้นงานไปทำเรือนหุ้มเพื่อความสะดวกในการเตรียมพื้นผิว รวมทั้งการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยเรือนหุ้มจะมีความหนามากกว่าความหนาของชิ้นทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถยึดชิ้นงานได้ดี จากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัดเตรียมผิวจนมัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำเรือนหุ้มและขัดผิวแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทำเรือนหุ้มแล้ว

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานไปวัดค่าความแข็ง โดยใช้เครื่อง Micro Hardness ดังรูปที่ 8 ซึ่งในการวัดค่าความแข็งนั้นจะทำการวัดในแนวแกนที่ระยะทุก ๆ 0.5 mm. จากแนวรอยเชื่อม





รูปที่ 8 แสดงเครื่องวัดความแข็ง ของ Multitoyo รุ่น MVK-H1 Micro Hardness Test

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 3.1 ความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ในงานวิจัยนี้ได้นำชิ้นงานมาทดลองเชื่อมตามขบวนการที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยทำการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำกับเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงตั้งได้อธิบายมาแล้ว ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำกับเหล็กกล้าไร้สนิม

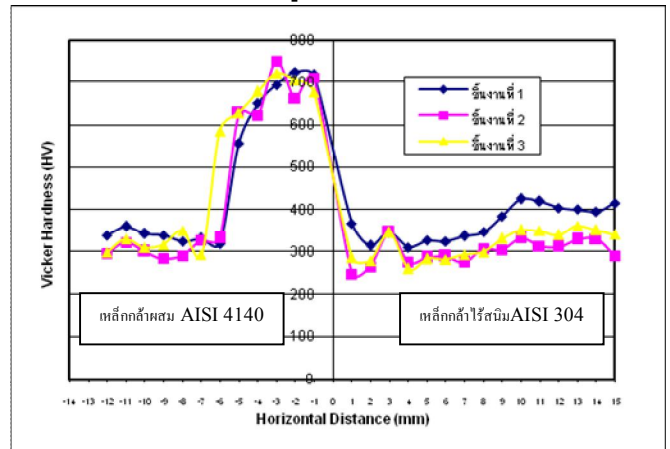
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อม

ตัวอย่างที่	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่าความ แข็งแรง (Tensile Strength,MPa)	974	1050	990	1005

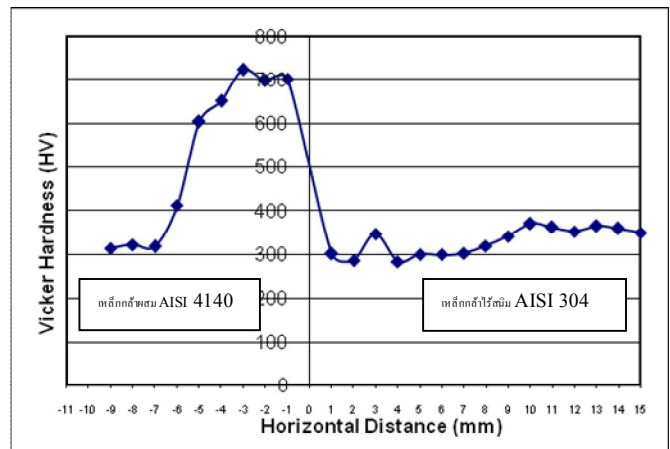
จากผลการทดสอบความแข็งแรงที่แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมที่ระบุ นั้น รอยเชื่อมที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยประมาณ 1005 MPa ซึ่งพบว่าเป็นความแข็งแรงที่สูงขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม ทั้งนี้เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสมพบว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้นประมาณ 5.8 % และเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่ามีความแข็งแรงสูงขึ้นประมาณ 49.8 % ตามลำดับ

#### 3.2 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆของรอยเชื่อม

ผลการวัดค่าความแข็งของรอยเชื่อมในแนวแกนของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 9 ส่วนค่าเฉลี่ยความแข็งแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 10 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าลักษณะค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น มีลักษณะคล้ายกันมากซึ่งเมื่อนำค่าที่จุดต่างๆ มาเฉลี่ยกันจะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ระยะต่างๆ ตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อพิจารณาวัสดุเหล็กกล้าผสม (AISI 4140) จะพบว่าค่าความแข็งที่บริเวณใกล้รอยเชื่อมมีค่าสูง ประมาณ 700 HV และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อห่างจากรอยเชื่อมออกไป จนกระทั่งถึงระยะห่างประมาณ 7-8 mm พบว่าค่าความแข็งจะ

คงที่ ที่ประมาณ 300 HV ซึ่งเป็นความแข็งเดิมของชิ้นงาน และหากพิจารณาวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) จะพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่บริเวณใกล้รอยเชื่อมมีค่าลดลง คือประมาณ 300 HV และจะค่อยๆ สูงขึ้นเมื่อระยะห่างออกจากรอยเชื่อมไปจนกระทั่งถึงระยะห่างประมาณ 7-8 mm ค่าความแข็งของรอยเชื่อมจะคงที่ ที่ประมาณ 350 HV ซึ่งเป็นค่าความแข็งเดิมของชิ้นงาน

#### 4. สรุปผลการศึกษาวิจัย

บทความนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติรอยเชื่อมด้วยความเสียดทานของวัสดุที่แตกต่างกัน คือ เหล็กกล้าผสม (AISI 4140) และเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ซึ่งพบว่ารอยเชื่อมที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นไปประมาณ 5.8 % เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสม และ 49.8 % เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งของรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าผสมจะมีค่าสูงขึ้นไปบริเวณรอยเชื่อม และในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า ค่าความแข็งจะลดลงบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งจากการวัดค่าความแข็งดังกล่าวจะเห็นว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat effect zone : HEZ ) ของรอยเชื่อมคือประมาณ 7-8 mm

การศึกษาเกี่ยวกับรายละเอียดอื่นๆ ของรอยเชื่อม เช่น โครงสร้างจุลภาคและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ อยู่ในระหว่างการศึกษา และจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผศ.สุริยา โชคสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Uwaba, T., Ukai, S. Nakai, T. and Fujiwara, M. (2007). Properties of friction welds between 9Cr-ODS martensitic and ferritic-martensitic steels, *Journal of nuclear materials*, vol. (1213-1217), 2007, pp.367-370.
- [2] Meshram, S.D., Mohandas, S. and Madhusudhan Reddy, G. (2007). Friction welding of dissimilar pure metals, *materials Processing Technology*, vol. 184(-), November 2007, pp.330-337.
- [3] Sahin, A.Z., Yibas, S. and Ahmed, J. (1998). Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars, *materials Processing Technology*, vol. 82 (-), March 1998, pp.127-136.
- [4] Tsuchiya, K., Kawamura, H. Nakai, T. (1996). Mechanical properties of Cu-Cr-Zr alloys and SS316 joint fabricated by friction welding method, *Journal of nuclear materials*, vol. (233-237), 1996, pp.233-237.
- [5] Sathiya, P., Aravindan, S. and Noorul, A. (2007). Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joint between AISI 4140 and AISI 1050 steels, *materials & Design*, vol. 30(-), June 2007, pp.970-976.