

**การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อ  
สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาครอยต่อ  
ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304  
และเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง**

**A study on influence of friction welding parameters  
on the mechanical properties and microstructure  
in joining between AISI 304 stainless steel  
and high speed steel**

นิวัฒน์ มุกแก้ว

**Niwat Mookam**

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Industrial Engineering Technology, Rajamangala University of Technology  
Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus, Prachuapkhirikhan, 77110

\*E-mail: niwat.moo@rmutr.ac.th

Telephone Number: 081 981 2963

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการต่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (HSS) ซึ่งใช้ในการผลิตเครื่องมือตัด สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร ประกอบด้วย แรงดันในการเสียดทาน เวลาในการเสียดทาน แรงดันในการอัดและเวลาในการอัด ผลที่พบทุกตัวแปรในการทดลองมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึง และสภาวะการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่เหมาะสมจากการศึกษา คือ แรงดันในการเสียดทาน 20 bar เวลาในการเสียดทาน 20 s แรงดันในการอัด 30 bar และเวลาในการอัด 30 s ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 12,214.50 N ขณะที่ผลความแข็งจุลภาคของบริเวณรอยต่อจะมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แต่น้อยกว่า HSS และยังพบเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทาน, เหล็กกล้าความเร็วรอบสูง, เหล็กกล้าไร้สนิม, ความแข็งจุลภาค

**ABSTRACT**

The aim of this research was to study the influence of the friction welding parameters on the mechanical properties and the microstructure of AISI 304 stainless steel and high speed steel (HSS) joint used in the cutting tool manufacturing. There were four welding variables studied in this investigation including friction pressure, friction time, forging pressure and forging time. The results

found that all variables in this experiment was influential on the tensile strength, and the optimal friction welding condition obtained from the study was 20 bar for the friction pressure, 20 seconds for the friction time, 30 bar for the forging pressure and 30 seconds for the forging time that created the maximum tensile strength of 12,214.50 N. In addition, the microhardness of interface zone was higher than AISI 304 stainless steel, but it was less than HSS, the intermetallic phase formation was found from being connected by friction welding.

**Keywords:** Friction welding, High-speed steel, Stainless steel, Microhardness

## 1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนหนึ่งๆ มีกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เช่น ต้องผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูป การหล่อ การกำจัดเนื้อวัสดุในส่วนที่ไม่ต้องการออกและการเชื่อมประกอบเป็นต้น ดังนั้นการเลือกขั้นตอนการผลิตเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของชิ้นส่วนตลอดจนต้นทุนในการผลิต [1] ซึ่งในการผลิตเครื่องมือและเครื่องมือตัด (Cutting tools) นิยมใช้เหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (HSS) ที่มีความสามารถชุบแข็งได้ดีเป็นพิเศษสามารถรักษาความคมของเครื่องมือตัดไว้ได้เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงขึ้น นำมาผลิตเครื่องมือตัดสำหรับงานตัดเฉือนโดยที่ขั้นตอนการผลิตจะต้องผ่านหลายกระบวนการเช่นกัน ได้แก่ การนำวัสดุมาขึ้นรูปเป็นคมตัดตามที่ต้องการ นำมาเจียรระไนลับคมตัดจากการขึ้นรูปและการปรับปรุงสมบัติที่สำคัญได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ความแกร่ง (Toughness) และความแข็งแรง (Strength) เช่น ผ่านกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งการตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition: PVD) หรือการตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) [2, 3] อย่างไรก็ตามจะมีส่วนค้ำจับของเครื่องมือที่ไว้สำหรับการจับยึดเข้ากับเครื่องจักรซึ่งในส่วนดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับส่วนคมตัดและไม่ต้องการปรับปรุงผิวตลอดจนสมบัติทางกลทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต เช่น การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ดังนั้นสองส่วนนี้จึงจำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง คือ การเชื่อมประสานเข้าด้วยกันซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมหลอมแบบดั้งเดิมจะไม่เหมาะสมกับการนำมาต่อวัสดุต่างชนิด

เนื่องจากให้รอยเชื่อมประสานที่ไม่สมบูรณ์ จะเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณหลอม (Fusion zone) และบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) [4] ดังนั้นจึงมีการนำวิธีการถนอมประสานเหนียว (Induction brazing) การถนอมประสานความต้านทาน (Resistance brazing) มาใช้ซึ่งวิธีเหล่านี้ใช้โลหะเติมที่มีส่วนผสมของเงิน (Ag) เนื่องจากสามารถเชื่อมวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันได้ดี แต่อย่างไรก็ตามธาตุเงินที่ผสมอยู่เป็นโลหะมีค่าจึงทำให้โลหะเติมมีราคาสูงซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตและโลหะเติมมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนักส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเมื่ออุณหภูมิการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น [5-7] ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับเครื่องมือตัดระหว่างใช้งานที่ความเร็วรอบสูง

วิธีการต่อวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันจึงสำคัญกับขั้นตอนนี้ วิธีการหนึ่งที่สามารถเชื่อมประสานวัสดุต่างชนิดได้ดี คือ วิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction welding) ซึ่งเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid-state welding) ที่ไม่จำเป็นต้องใช้โลหะเติม เป็นวิธีที่ประหยัดพลังงาน เนื่องจากในการเชื่อมประสานจะใช้พลังงานทางกลจากการหมุนของวัสดุที่นำมาเชื่อมเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ระหว่างพื้นผิวของวัสดุจากการเสียดสีกันของผิวหน้าซึ่งงานระหว่างการหมุนภายใต้ความดันชิ้นงานจะติดกันหลังจากที่อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสสูงพอ กระบวนการสามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็วให้อัตราการผลิตสูงและไม่ก่อให้เกิดควันพิษจากการเชื่อมประสาน [8, 9] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีปัจจัยสำคัญได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน (Rotational speed) เวลาในการเสียดทาน (Friction time) เวลาในการอัดให้เกิดความร้อน (Forging time) แรงดันอัดชิ้นงานให้เกิดความร้อน (Forging pressure) และแรงดันอัดชิ้นงานให้

ติดกัน (Friction pressure) เป็นต้น [9-11] ซึ่งตัวแปรเงื่อนไขเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของรอยเชื่อมประสาน

บทความฉบับนี้ศึกษาการต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar materials joint) ระหว่างเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (High speed steel; HSS) เข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เกรด AISI 304 โดยใช้วิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อมประสานที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลในแง่ของความต้านทานแรงดึง ตรวจสอบความแข็งจุลภาค

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ HSS

Chemical composition (% wt.)					
C	Cr	W	V	Mn	Si
0.65-0.80	3.75-4.00	17.25-18.75	0.90-1.30	0.10-0.40	0.20-0.40

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของ AISI 304 [21]

Chemical composition (% wt.)							
C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	N
0.08	0.75	2.00	10.5	20.00	0.03	0.045	0.10

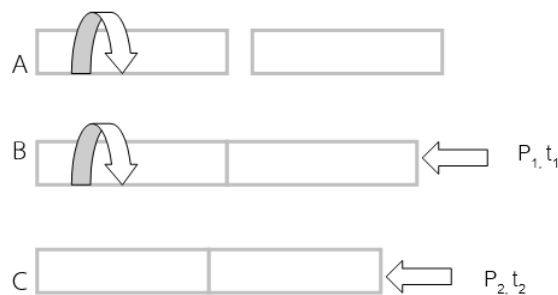
การทดลองวัสดุทั้งสองชนิดเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 90 mm นำมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานจากการประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Lathe ยี่ห้อ GURUTZPE รุ่น CU 587 ซึ่งปรับแต่งและเพิ่มอุปกรณ์สร้างเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทาน โดยการเพิ่มชุดควบคุมแรงดัน ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน มีขั้นตอนตามลำดับแสดงดังรูปที่ 1 โดยขั้นตอน A เหล็กกล้าความเร็วรอบสูงหมุนด้วยความเร็วรอบที่ 1,400 rpm แต่สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่หมุน ในขั้นตอน B ขณะเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงหมุนให้แรงดัน  $P_1$  กับเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองสัมผัสกันด้วยเวลา  $t_1$  และทำให้เกิดการเสียดสีเกิดความร้อนที่ผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงานทั้งสองระหว่างการหมุนภายใต้แรงดัน หลังจากนั้นในขั้นตอน C ทำการหยุดหมุนเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงพร้อมกับเพิ่มแรงดันที่  $P_2$  ด้วยเวลาเป็น  $t_2$  อีกครั้งหนึ่ง การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) ที่ใช้ในการ

โครงสร้างจุลภาคตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีและเฟสที่เกิดขึ้น

## 2. วัสดุและวิธีการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้สำหรับเชื่อมเสียดทาน คือ เหล็กกล้าความเร็วสูงและเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) อื่นนอกจากเหล็กแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ทดลองกำหนดไว้ดังตารางที่ 3 นำมาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full factorial design) โดยมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 48 การทดลอง หลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกลิ้งชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกลิ้ง CNC ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC TURN 50 ตามมาตรฐาน ASTM และทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 กำหนดความเร็วในการทดสอบที่ 4 mm/min เท่ากันทุกชิ้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

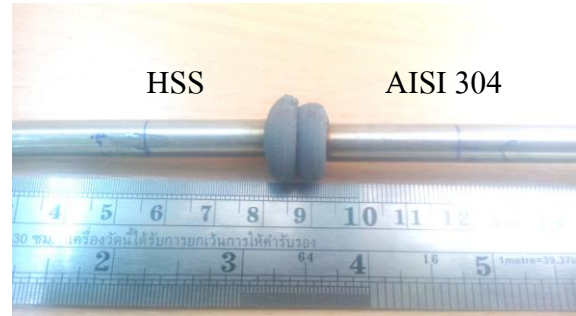
Factor (Symbol; Unit)	Level	
	Low	High
แรงดันในการเสียดทาน ( $P_1$ ; bar)	10	20
เวลาในการเสียดทาน ( $t_1$ ; sec)	10	20
แรงดันในการอัด ( $P_2$ ; bar)	20	30
เวลาในการอัด ( $t_2$ ; sec)	20	30

ส่วนชิ้นงานตัวอย่างจากปัจจัยและระดับที่ให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดนำมาตรวจสอบความแข็งจุลภาค โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม ซึ่งต้องผ่านการตัดชิ้นงานด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) ยี่ห้อ Mitsubithi รุ่น FA 20S Advance หลังการตัดหล่อชิ้นงานตัวอย่างด้วยเรซิน ขัดผิวด้วยกระดาษทรายโดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Stuers รุ่น Dap 7 และสุดท้ายจึงขัด (Polishing) ด้วยผงเพชรบนผ้าสักหลาดแล้วจึงกัดผิวชิ้นงานด้วยกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ประมาณ 10-30 sec นำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของรอยต่อใช้ Energy dispersive spectrometer (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX การศึกษาเฟสและตัวแปรโครงสร้างผลึกใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover สำหรับความแข็งจุลภาคใช้เครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ Wilson Hardness รุ่น Tukon 1102 ทดสอบภายใต้แรงกด 200 gf และเวลากด (Dwell time) ที่ 10 s

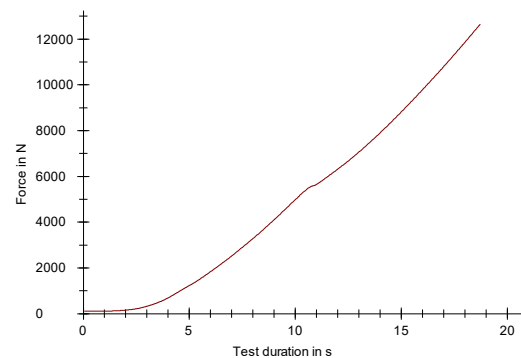
### 3. ผลการทดลอง

ชิ้นงานตัวอย่างจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแสดงดังรูปที่ 2 หลังการเชื่อมปรากฏเนื้อวัสดุที่ยื่นออกมาบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด เนื่องจากการแปรรูป (Deformation) ของวัสดุและตัวอย่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงแสดงดังรูปที่ 3 ผลจากการทดลองตามที่

ออกแบบไว้นำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อสร้างสมการทำนายผลความต้านทานแรงดึงต่อไป



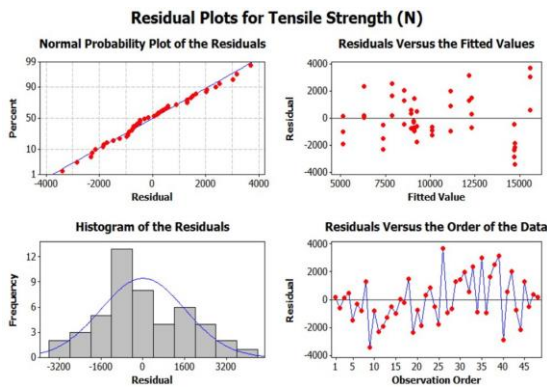
รูปที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่างจากการเชื่อมเสียดทาน

รูปที่ 3 ตัวอย่างผลความต้านทานแรงดึงตัวแปร  $t_1 = 10$  sec,  $P_1 = 20$  bar,  $t_2 = 20$  sec,  $P_2 = 30$  bar

### 3.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การตรวจสอบสมมติฐานเบื้องต้นทางสถิติของข้อมูลแสดงผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4 จากกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) แสดงการพล็อตระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลและเปอร์เซ็นต์สะสม ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะมีการกระจายตัวแบบปกติ เช่นเดียวกับ Histogram ของส่วนตกค้างของข้อมูล สำหรับการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับการเก็บข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีการกระจายที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มในรูปแบบใดๆ และมีการกระจายตัวแบบสุ่มและจากการพล็อตระหว่างส่วนตกค้าง

ของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ในที่นี้คือ ความต้านทานแรงดึงสามารถสรุปได้โดยข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีความเป็นอิสระของข้อมูล และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนนั้นหมายถึงข้อมูลสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจากการตรวจสอบในเบื้องต้นจึงไม่มีการละเมิดสมมติฐานทางสถิติจึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ต่อไป



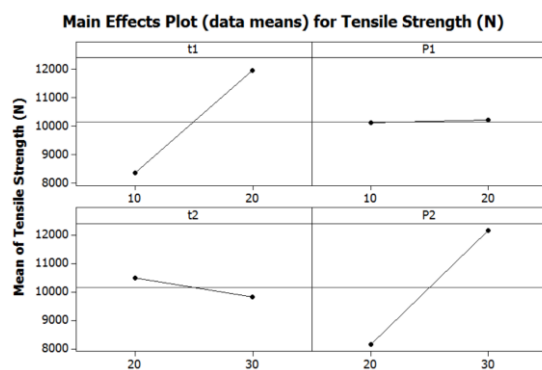
รูปที่ 4 การตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของข้อมูล

สำหรับการเลือกปัจจัยของความต้านทานแรงดึง แสดงผลดังตารางที่ 4 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main effects) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่  $P_1$ ,  $t_2$  และ  $P_2$  สำหรับปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่  $t_1 * P_1$  และ  $t_2 * P_2$  ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมอื่นไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  หรือระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

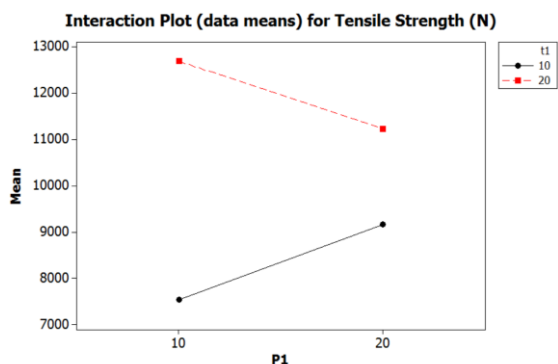
ตารางที่ 4 ANOVA สำหรับการเลือกปัจจัย

Term	Coefficient	SE Coefficient	P-Value
Constant	-28567.3	10781.5	0.012
$t_1$	316.8	408.1	0.443
$P_1$	1029.2	408.1	0.016
$t_2$	765.0	349.5	0.035
$P_2$	969.3	349.5	0.009
$t_1 * P_1$	-30.9	10.5	0.006
$t_1 * t_2$	7.0	10.5	0.508
$t_1 * P_2$	13.3	10.5	0.216
$P_1 * t_2$	-16.9	10.5	0.118
$P_1 * P_2$	-5.4	10.5	0.610
$t_2 * P_2$	-27.4	10.5	0.013

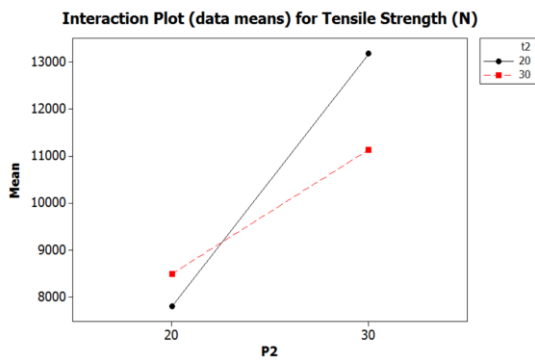
จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยและระดับผลกระทบของปัจจัยหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นการใช้เวลาในการเสียดทาน ( $t_1$ ) ที่ระดับต่ำจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงน้อย แต่ถ้าปรับค่าที่ระดับสูงจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงเช่นเดียวกันกับการใช้แรงดันในการอัด ( $P_2$ ) แต่สำหรับเวลาในการอัด ( $t_2$ ) การปรับค่าที่ระดับสูงจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยที่แรงในการเสียดทาน ( $P_1$ ) ที่ระดับต่ำและสูง (10 และ 20 bar) ผลมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมประกอบ จากรูปที่ 6 และ 7 การใช้เวลาในการเสียดทาน ( $t_1$ ) ที่ระดับสูงและแรงดันในการเสียดทาน ( $P_1$ ) ที่ระดับต่ำส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุด กรณีเวลาในการอัด ( $t_2$ ) และแรงดันในการอัด ( $P_2$ ) ใช้ที่ระดับต่ำและสูงตามลำดับจึงจะทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง ดังนั้นแต่ละปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปเขียนเป็นสมการเส้นตรงต่อไป



รูปที่ 5 ผลกระทบของปัจจัยหลัก



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง  $t_1$  และ  $P_1$



รูปที่ 7 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง  $t_2$  และ  $P_2$

รูปแบบสมการเส้นตรงของการทำนายค่าความต้านทานแรงดึงกรณีในตัวแปรของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในรูปแบบสมการเส้นตรงแบบเต็มรูปสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 P_1 + \beta_3 t_2 + \beta_4 P_2 + \beta_5 t_1 * P_1 + \beta_6 t_1 * t_2 + \beta_7 t_1 * P_2 + \beta_8 P_1 * t_2 + \beta_9 P_1 * P_2 + \beta_{10} t_2 * P_2 \quad (1)$$

เมื่อ  $Y$  คือ ผลตอบสนอง  $\beta_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 10$ ) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Linear coefficient) สำหรับ  $P$  และ  $t$  คือ ตัวแปรปัจจัยในการทดลอง

อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยร่วมแสดงให้เห็นผลกระทบของทุกปัจจัยในการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อคั้งนั้นค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรที่นำมาเขียนเป็นสมการเส้นตรงจากผลการวิเคราะห์ผลแสดงดังตารางที่ 5 และเขียนเป็นสมการเส้นตรงที่ใช้ในการทำนายได้ดังสมการที่ (2) เมื่อแทนค่าปัจจัย  $t_1 = 20$  sec,  $P_1 = 20$  bar,  $t_2 = 30$  sec และ  $P_2 = 30$  bar จะได้ความต้านทานแรงดึง เท่ากับ 12,214.50 N ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการทำนายความต้านทานแรงดึงแสดงดังตารางที่ 6 ทุกเทอมมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการทำนายผลและเมื่อทดลองยืนยันผลจากการทำนายพบว่า ชั่งงาน

ทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 12,647.18 N มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย 3.54%

ตารางที่ 5 ANOVA ตัวแปรสำหรับสมการทำนายความต้านทานแรงดึง

Term	Coefficient	SE Coefficient	P-Value
Constant	-27817.5	7410.360	0.001
$t_1$	824.3	168.350	<0.001
$P_1$	471.7	168.350	0.008
$t_2$	617.4	271.460	0.028
$P_2$	1087.0	271.460	<0.001
$t_1 * P_1$	-30.9	10.650	0.006
$t_2 * P_2$	-27.4	10.650	0.014

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 P_1 + \beta_3 t_2 + \beta_4 P_2 + \beta_5 t_1 * P_1 + \beta_6 t_2 * P_2 \quad (2)$$

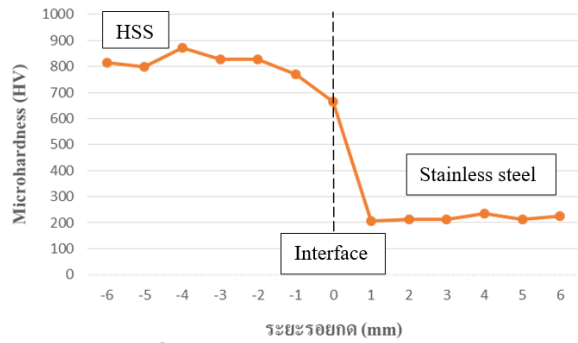
ตารางที่ 6 ANOVA สำหรับสมการทำนาย

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-Ratio	P-Value
Regression	6	4.07 E-08	6.78 E-07	19.95	<0.0001
Linear	4	3.55 E-08	7.35 E-07	21.62	<0.0001
Interaction	2	0.51 E-08	2.55 E-07	7.52	0.002
Residual error	41	1.39 E-08	0.33 E-07		
Total	47	5.46 E-08			

### 3.2 ความแข็งจุลภาค

ความแข็งจุลภาค (Microhardness) ของรอยต่อแสดงผลดังรูปที่ 8 ที่ระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งจุลภาคน้อยกว่า HSS แต่จะมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม และที่บริเวณใกล้กับรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดค่าความแข็งจุลภาคมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งเดิมของวัสดุเนื่องจากผลกระทบจากความร้อนและไกลออกไปจากรอยต่อ ความเครียดแข็ง (Work hardening) และผลกระทบ จากความร้อนเกิดขึ้นน้อยทำให้ค่าความแข็งจุลภาคมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุพื้น [12] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chander S. G. และคณะ [13] จากการต่อ AISI 304 กับ AISI 4140 จะมีความแข็งสูงบริเวณ ที่เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic

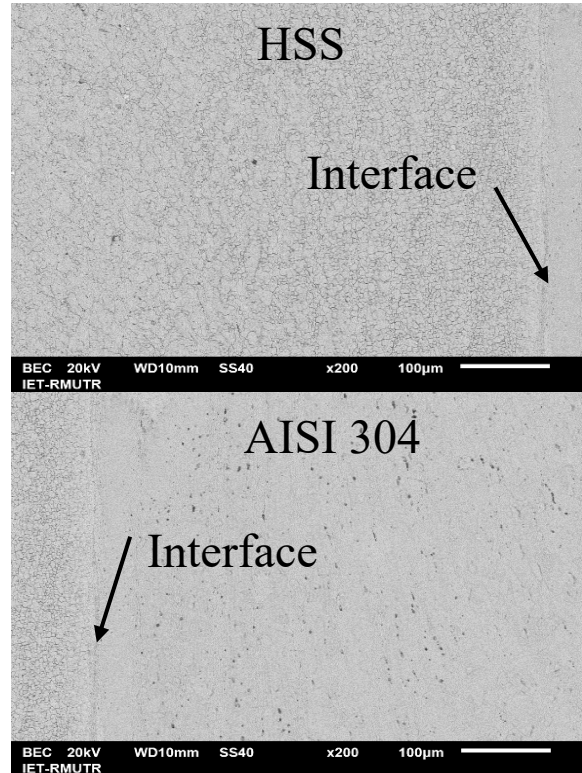
deformation) ที่ระหว่างรอยต่อซึ่งจะทำให้มีค่าความแข็งจุลภาคมากกว่าวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการเสียรูปแบบถาวรนำไปสู่การเกิดความเครียดแข็งที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 8 ความแข็งจุลภาคของรอยต่อ

### 3.3 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

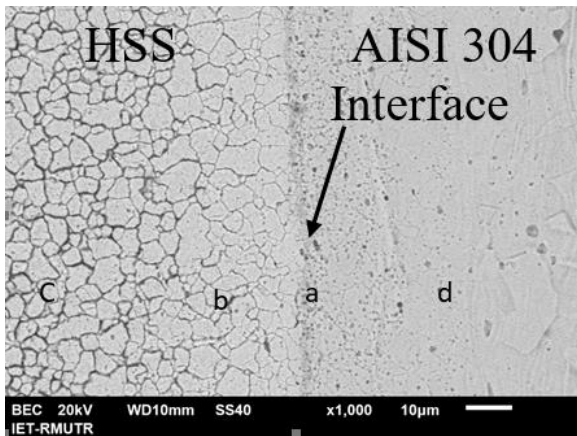
รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า บริเวณรอยต่อมีเกรนที่ละเอียดกว่าเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเห็นได้ชัดจาก HSS ผลจากงานวิจัยของ Lee และคณะรายงานว่าขนาดเกรนตำแหน่งใกล้รอยต่อจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแต่ละบริเวณการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อม [14] สำหรับผลกระทบจากโครงสร้างจุลภาคนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล [15] ซึ่งเป็นที่ทราบสำหรับการเกิดขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ที่มีความเปราะโดยธรรมชาติส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลเช่นกัน ความแข็งและเปราะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสภาวะการดึงขอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถเกิดรอยแตกขนาดเล็ก โดยในงานวิจัยของ Seli และคณะ [16] พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีโอกาสเกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานและจะมีขนาดบางมากเนื่องจากการใช้เวลาในการต่อในช่วงสั้นๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยในกระบวนการต่อทำให้การเชื่อมเสียดทานมีกลไกการเจริญเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นจากการแพร่ของธาตุได้น้อยเช่นกัน [17, 18]



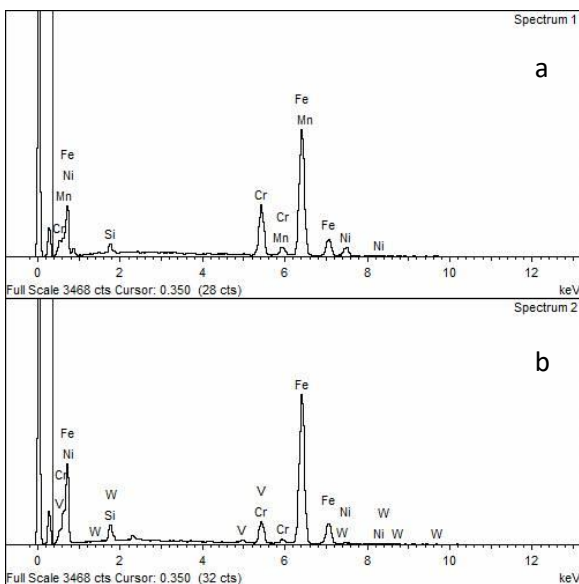
รูปที่ 9 รอยต่อระหว่างพื้นผิว

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีตำแหน่ง a, b, c และ d จากการทำ SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จากรูปที่ 10 แสดงผลไว้ดังรูปที่ 11 โดยจุด (a) คือรอยต่อมีธาตุที่ปรากฏใกล้เคียงกับโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมสังเกตได้จากธาตุ Mn ปรากฏอยู่เช่นเดียวกับจุด (d) ซึ่งแตกต่างกับจุด (b) และ (c) ที่ไกลออกไปจากขอบเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งไม่พบธาตุดังกล่าว จากการทำ Mapping ของธาตุที่บริเวณรอยต่อจากภาพถ่ายของ SEM ในรูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆที่สามารถพบได้ดังรูปที่ 13 จากรูปแสดงขอบเขตของรอยต่อของวัสดุแต่ละชนิดไว้อย่างชัดเจนซึ่งจะมีการแบ่งขอบเขตรอยต่อเป็นเส้นโค้ง โดยหลักๆจะถูกแบ่งโดย Cr และ Ni พบเฉพาะบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิม รูปที่ 14 แสดงผลการ XRD ของรอยต่อในช่วงมุมการเลี้ยวเบนตั้งแต่ 25-80 เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า (Voltage) ที่ 40 kV ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Current) ที่ 40 mA และความเร็วในการสแกนเท่ากับ 0.5 sec/step พบเฟส โครงสร้าง

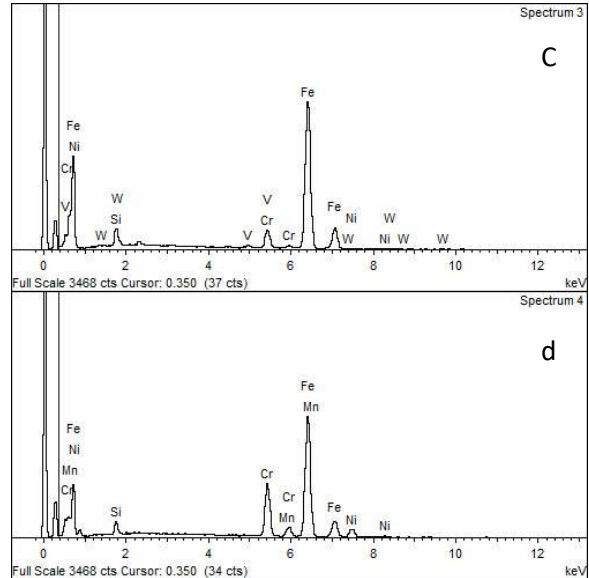
กลุ่มระนาบและตัวแปร โครงสร้างผลึกแสดงไว้ดังตารางที่ 7 โดยแต่ละเฟสมีปริมาตรต่อหน่วยเซลล์ (Unit cell volume; V) แสดงดังตารางที่ 8 อย่างไรก็ตามปริมาตรต่อหน่วยเซลล์และค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constants) สามารถเพิ่มขึ้นได้จากผลของความร้อน เนื่องจากการเจริญเติบโตของผลึกเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มอุณหภูมิ [19] ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากปริมาตรต่อหน่วยเซลล์ของสารประกอบเชิงโลหะที่พบแสดงให้เห็นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจาก Fe และ Ni จะมีขนาดโตกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะอื่นๆ



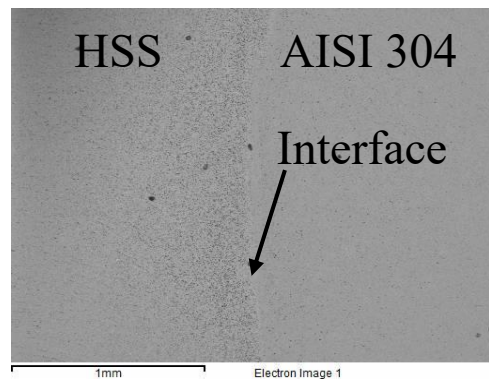
รูปที่ 10 SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



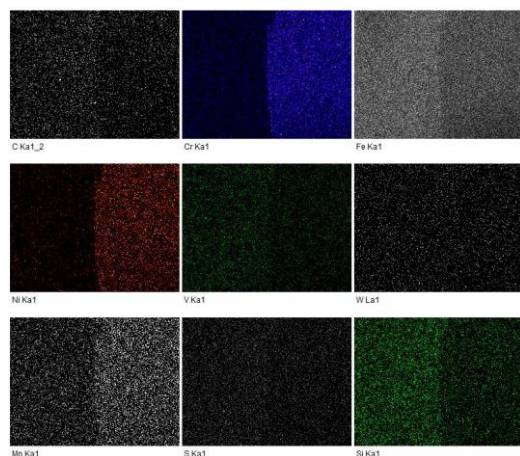
รูปที่ 11 ผลการตรวจสอบ EDS



รูปที่ 11 (ต่อ) ผลการตรวจสอบ EDS

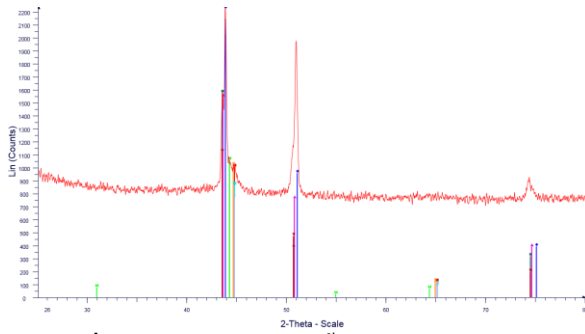


รูปที่ 12 SEM รอยต่อจากสำหรับทำ Mapping



รูปที่ 13 Mapping ของธาตุที่ระหว่างรอยต่อ





รูปที่ 14 ผลตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ตารางที่ 7 ข้อมูลเฟส โครงสร้างและตัวแปรโครงสร้างผลึก

Symbol	Phase/ Structure	Space group (No.)	Lattice parameter (Å)
	Fe/ BCC	Im-3m (229)	a=b=c = 2.86080
	Cr <sub>4</sub> Ni <sub>15</sub> W/ FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.57290
	FeNi/ FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.59750
	Fe <sub>0.64</sub> Ni <sub>0.36</sub> / Cubic	Pm-3m (221)	a=b=c = 3.59220
	Fe <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> / FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.59800
	Fe <sub>19</sub> Ni/ BCC	Im-3m (229)	a=b=c = 2.86850
	MnNi/ Cubic	Pm-3m (221)	a=b=c = 2.89170

ตารางที่ 8 ปริมาตรต่อหน่วยเซลล์

Phase	Unit cell volume; V (Å <sup>3</sup> )
Fe	23.40
Cr <sub>4</sub> Ni <sub>15</sub> W	45.60
(Fe,Ni)	46.60
Fe <sub>0.64</sub> Ni <sub>0.36</sub>	46.40
Fe <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	46.60
Fe <sub>19</sub> Ni	23.60
MnNi	24.18

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Sahin, M. and Akata, H.E. Joining with friction welding of plastically deformed steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003; 142: 239–246.
- [2] Chong, C.W. Research and development of multipurpose carbide end mill. university of southern queensland faculty of engineering and surveying. Available [Online]: <https://core.ac.uk/download/pdf/11034547.pdf>.
- [3] Byrne, G., Dornfeld, D. and Denkena, B. Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003; 52: 483–507.
- [4] Ji, H., Li, M., Lu, Y. and Wang, C. Mechanical properties and microstructures of hybrid ultrasonic resistance brazing of WC-Co/BeCu. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012; 212: 1885– 1891.

### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ P1, t2 และ P2 สำหรับปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ t1\*P1 และ t2\*P2 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และสมการทำนายความต้านทานแรงดึงมีความคลาดเคลื่อน 3.54 %

การนำไปใช้ประโยชน์สำหรับองค์ความรู้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการต่อวัสดุต่างชนิดอื่น ๆ ได้ โดยเฉพาะการต่อโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานการใช้งานจะมีข้อจำกัดเช่นกัน ได้แก่ การเกิดครีปที่ยื่นออกมาบริเวณรอยต่อซึ่งต้องผ่านการกำจัดออกก่อนนำไปใช้งาน และกระบวนการสามารถต่อชิ้นงานที่มีรูปทรงกระบอกได้เท่านั้นจึงเกิดข้อจำกัดสำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงอื่นๆ

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนตามสัญญาเลขที่ A-22/2559

- [5] Noda, T., Shimizu, T., Shimizu, M. and Iikubo, T. Joining of TiAl and steels by induction brazing. *Materials Science and Engineering*, 1997; A239–240: 613–618.
- [6] Iamboliev, T., Valkanov, S. and Atanasova, S. Microstructure embrittlement of hard metal–steel joint obtained under induction heating diffusion bonding. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013; 37: 90–97.
- [7] Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and Reddy, G.M. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding. *Materials and Design*, 2011; 32: 3036–3050.
- [8] Moat, R., Karadge, M., reuss, M., Bray, S. and Rawson. W. Phase transformations across high strength dissimilar steel inertia friction weld. *Journal of materials processing technology*, 2008; 204: 48–58.
- [9] Celik, S. and Ersozlu, I. Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels. *Materials and Design*, 2009; 30: 970–976.
- [10] Ozdemir, N., Sarsilmaz, F. and Hascalik, A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials and Design*, 2007; 28: 301–307.
- [11] Sathiya, P., Aravindan, S. and Haq, A.N. Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. *Materials and Design*, 2008; 29: 1099–1109.
- [12] Boonseng, K., Chainarong, S. and Meengam, C. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welding in SSM356 Aluminium Alloys. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2014; 2: 20-24.
- [13] Avinash, M., Chaitanya, G. V. K., Giri, D. K., Upadhya, S. and Muralidhara, B. K. Microstructure and mechanical behaviour of rotary friction welded titanium alloys. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2007; 1: 641-643.
- [14] Lee, W.B. and Jung, S.B. Effect of microstructure on mechanical properties of friction-welded joints between Ti and AISI 321 stainless steel. *Materials Transactions*, 2004; 45: 2805-2811.
- [15] Boonseng, K., Chainarong, S. and Meengam, C. Microstructure and mechanical properties of friction welding in SSM356 aluminium alloys. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2014; 2: 20-24.
- [16] Seli, H., Ismail, A.I.M., Rachman, E. and Ahmad. Z.A. Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010; 210: 1209–1216.
- [17] Wei, G., Guoqiang, Y., Guangyu Y. and Zhang, X. Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017; 695: 3267-3277.
- [18] Prasanthi, T.N., Sudha Ravikirana, C., Saroja, S., Naveen Kumar, N. and JanakiRam, G.D. Friction welding of mild steel and titanium: Optimization of process parameters and evolution of interface microstructure. *Materials and Design*, 2015; 88: 58–68.
- [19] Lawrence, K. Pawan, K. Amarendra, N. and Manoranjan, K. Rietveld analysis of XRD patterns of different sizes of nanocrystalline cobalt ferrite. *International Nano Letters*, 2013; 1-12.