



โครงสร้างจุลภาคและการแตกร้าวในโลหะเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม  
ของรอยต่อตัวที่ระหว่างเหล็กกล้า SS400/SUS304

MICROSTRUCTURE AND CRACKING IN GAS METAL ARC WELD METAL OF DISSIMILAR  
SS400/SUS304 STEELS T-JOINT

วราญา วัฒนจิตศิริ<sup>1\*</sup> สุรัตน์ ตรีชวนพงษ์<sup>2</sup> และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการเชื่อมรอยต่อตัวที่เหล็กกล้าต่างชนิด SS400/SUS304 ด้วยการใช้ลวดเชื่อมโครเมียมสูง และศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ รอยต่อตัวที่ถูกเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ถูกออกแบบถูกเตรียมด้วยวิธีทางกลและตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของรอยต่อเชื่อม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ รอยต่อตัวที่สามารถทำการเชื่อมได้ด้วยการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมโดยไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อม กระแสเชื่อมที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 160 แอมแปร์ซึ่งแสดงรอยแตกร้าวต่ำสุดในการทดลองการดัด โค้งที่ 0.247 มม. ความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและโลหะเชื่อมโครเมียมสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสที่มีพื้นที่การรวมตัวกันของธาตุเสริมความแข็งแรงและโลหะหลักน้อยและส่งผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสเชื่อมสามารถเพิ่มการรวมตัวของธาตุเสริมความแข็งแรงและโลหะหลักที่ผิวสัมผัสและเพิ่มความแข็งแรงที่รอยต่อได้

**คำสำคัญ :** การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม, เหล็กกล้าคาร์บอน, เหล็กกล้าไร้สนิม

ABSTRACT

*This paper aims to weld a dissimilar SS400/SUS304 steel T-joint using high chromium electrode and study an effect of welding current on joint properties. T-joints that welded by the designed welding currents were mechanically prepared and systematically investigated for joint properties. The experimental results were summarized as follows. Dissimilar SS400/SUS304 steels T-joint could successfully welded using a gas metal arc welding process with no defect in weld metal. The optimized welding current in this experiment was 160 A that showed a minimized crack in a bending test of 0.247 mm. A different chemical composition of low carbon steel and high chromium weld metal produced a small interface that showed a smaller mixed zone of reinforced elements and base metal, and also affected to decrease the joint strength. However, the increase of the welding current could increase the combination of the reinforced element and the base metal at the interface and affected to increase the joint strength.*

**KEYWORD :** gas metal arc welding , SUS304 stainless steel, SS400 carbon steel

Voraya Wattanajitsiri<sup>1\*</sup> Surat Triwanapong<sup>2</sup> and Kittipong Kimapong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

## 1. บทนำ

สกรูลำเลียงเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนสำคัญที่ถูกใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับการขนถ่ายก้อนวัสดุขนาดเล็กที่ต้องการอัตราการขนถ่ายที่เสถียรและสามารถควบคุมปริมาณการไหลเข้าออกได้ การใช้งานสกรูลำเลียงพบได้ในหลายแขนงงาน เช่น งานเหมืองแร่ งานเกษตร งานก่อสร้าง หรืออุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายพานลำเลียงสกรูลำเลียงมีข้อได้เปรียบในการใช้งานที่มากกว่า เช่น การเกิดแรงเสียดทานระหว่างใบสกรูและก้อนวัสดุน้อยกว่าทำให้ง่ายต่อการเคลื่อนที่ของก้อนวัสดุ ราคาถูกกว่า ง่ายต่อการบำรุงรักษา และมีความสะดวกในการขนถ่ายก้อนวัสดุในระยะสั้นหรือต้นก้อนวัสดุขึ้นสู่ที่สูง [1] ตัวอย่างการใช้งานสกรูลำเลียงในงานเกษตรกรรมไทยเพื่อจุดประสงค์ในการลดเวลาในการทำการเกษตร เช่น สกรูลำเลียงข้าวในรถเกี่ยวและนวดข้าวตั้งรูปที่ 1 ซึ่งมีหน้าที่หลักในการลำเลียงเมล็ดข้าวกลับที่ผ่านการนวดกลับไปนวดซ้ำอีกครั้ง ในการสำรวจความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องเกี่ยวและนวดข้าวในพื้นที่ที่กรณีศึกษาภาคกลาง พบว่าสกรูลำเลียงในเครื่องเกี่ยวและนวดข้าวเป็นสกรูลำเลียงที่มีใบสกรูและเพลาสกรูที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เมื่อถูกนำไปใช้งานแล้วพบว่าการสึกหรอของใบสกรูลำเลียงข้าวกลับที่นวดซ้ำเป็นหนึ่งชิ้นส่วนที่มีการสึกหรอสูง ความเสียหายเกิดจากการสึกหรอจากขัดสี (Abrasive wear) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านของเมล็ดข้าวที่มีความชื้น และทรายหรือดินที่รวมเข้ามาในเมล็ดข้าวที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงขึ้นระหว่างเมล็ดข้าวและใบสกรูลำเลียง เกิดการสึกหรอของใบสกรูลำเลียง และทำให้เมล็ดข้าวไม่สามารถส่งกลับไปหาชุดนวดข้าวซ้ำอีกครั้งได้ [2]



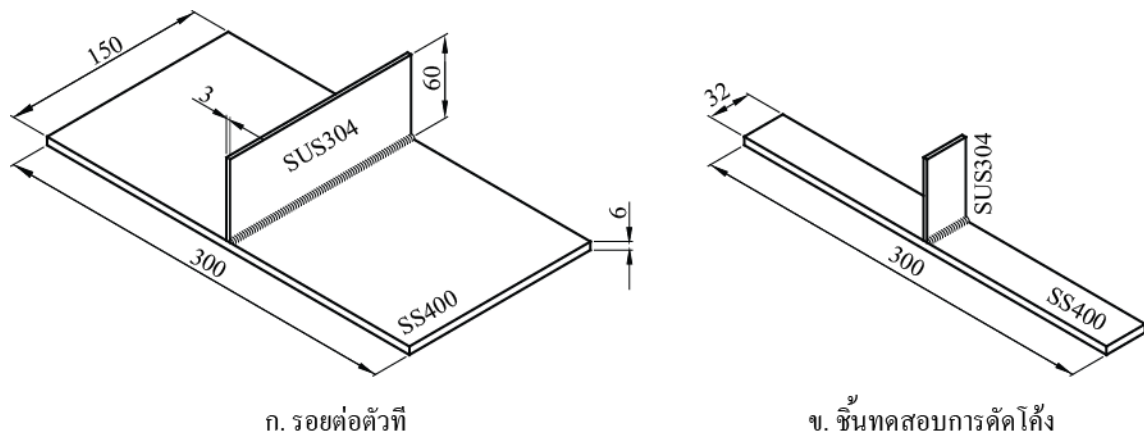
รูปที่ 1 สกรูลำเลียงสำหรับนำเมล็ดข้าวเปลือกกลับไปนวดใหม่ในรถเกี่ยวและนวดข้าว

เมื่อพิจารณาการเกิดการสึกหรอดังกล่าว การเลือกวัสดุทดแทนใบสกรูลำเลียงจากเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยช่างซ่อมบำรุงรถเกี่ยวและนวดข้าว [3] อย่างไรก็ตามเมื่อนำวัสดุใหม่เข้ามาทดแทนปัญหาต่างๆ จากการเชื่อมหลอมละลายกับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติทางกล กายภาพ และเคมีสามารถทำให้เกิดจุดบกพร่อง เช่น การแตกร้าวที่อุณหภูมิสูง การแตกร้าวหลังการเย็นตัว รุพุน การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน เป็นต้น [4] การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) เป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมหลอมละลายที่มีข้อดีในการเติมลวดเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง มีอัตรา

การเติมโลหะเชื่อมสูงและสม่ำเสมอ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการอาร์ระหว่างปลายลวดเชื่อมและชิ้นงาน [5] กระบวนการเชื่อมนี้ ได้ถูกทดลองนำมาใช้ในการเชื่อมรอยต่อของวัสดุต่างชนิดและแสดงรอยต่อที่สมบูรณ์และมีความแข็งแรงในระดับที่น่าพอใจ เช่น การเชื่อมรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 [6] หรือรอยต่อชนเหล็กกล้า AHSS [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปร่างของรอยต่อตัวที่ การเชื่อมอาร์กโลหะแก่สคลุมรอยต่อโลหะต่างชนิดสามารถทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ เช่น การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวและเกิดความเค้นตกค้างในรอยต่อได้ [8, 9] ซึ่งความเค้นตกค้างที่มีค่าสูง เช่นบริเวณฐานของรอยต่อตัวที่ หากถูกนำไปใช้งานที่สัมผัสกับไฮโดรเจนหรือความชื้นมักทำให้เกิดการกัดกร่อนและแตกร้าวมเพิ่มขึ้นได้ และทำให้เกิดการเกิดการรั่วซึมบริเวณ โลหะเชื่อมรอยต่อตัวที่ถึงน้ำมันเหล็กกล้า API650 ได้ [10] อย่างไรก็ตามความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นสามารถลดลงได้เมื่อโลหะเชื่อมที่บริเวณรอยต่อมีความโค้งเว้าสูง [11] หรือทำการเชื่อมรอยต่อตัวที่สองด้านในทิศทางแตกต่างกัน หรือการเพิ่มความหนาของแผ่นโลหะ [12]

ข้อมูลการสำรวจเอกสารวิจัยข้างต้นทำให้เกิดกรอบแนวคิดในการประยุกต์ใช้ไบสกรูเหล็กกล้าไร้สนิมทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอนในสกรูลำเลียง และทำการประยุกต์การเชื่อมแม่กในการเชื่อมไบเข้ากับฐานสกรูลำเลียง ผลการทดลองที่ได้จะสามารถทำให้เกิดสกรูลำเลียงแบบใหม่ที่มีอายุการใช้งานสูงกว่าสกรูลำเลียงแบบเดิม และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

## 2. วิธีการทดลอง



รูปที่ 2 รูปร่างของรอยต่อตัวที่: ก. ขนาดของรอยต่อแกน และ ข. ขนาดของชั้นทดสอบการกัดโค้ง (หน่วย: มม.)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

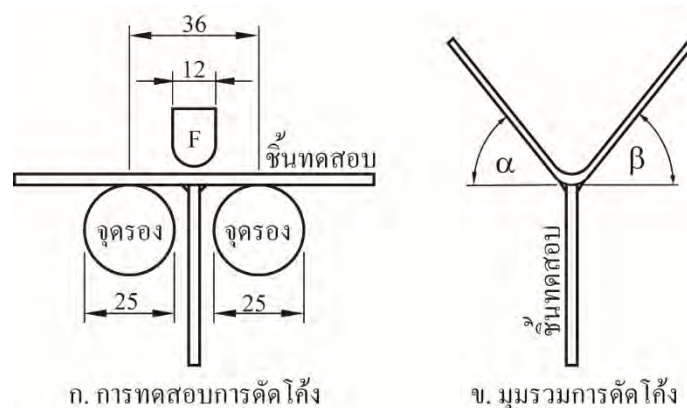
วัสดุ	ธาตุผสม (wt%)						
	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S
เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	18.0	8.0	0.08	2.0	-	-	-
เหล็กกล้าคาร์บอน SS400	-	-	0.001	-	-	0.05	0.05
ลวดเชื่อมตัน ER309LSI	20.56	12.64	0.022	0.98	2.09	0.024	0.011

วัสดุในการทดลองคือ แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 หนา 6 มม. และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 หนา 3 มม. ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 แผ่นเหล็กทั้งสองถูกตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยกำหนดให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีขนาดกว้าง 150 มม. และยาว 300 มม. และเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดกว้าง 60 มม. และยาว 150 มม. แผ่นเหล็กทั้งสองถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อตัวที่ดังรูปที่ 2 ก. โดยกำหนดให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมวางตั้งฉากบนเหล็กกล้าคาร์บอนที่กึ่งกลางด้านความยาวที่ 150 มม. รอยต่อตัวที่ถูกทำการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมโดยใช้แก๊สคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที ด้วยลวดเชื่อม AWS A5.9 ER308LSi ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.26 มม. กระแสเชื่อม 140-170 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 200 มม./นาที

รอยต่อที่ได้จากการเชื่อมตามตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำไปทำการเตรียมเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย การทดสอบการดัดโค้ง (Bending test) การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา (Metallographic examination) และการทดสอบความแข็ง (Hardness test) ในการทดสอบการดัดโค้งกำหนดให้ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3134 (1965) วิธีการทดสอบการดัดโค้งของรอยเชื่อมต่อจาก [13] โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีขนาดดังรูปที่ 2 ข. การทดสอบกำหนดให้มีการทดสอบด้านตรงข้ามของรอยต่อดังรูปที่ 3 ก. จนกระทั่งมุมรวมของการทดสอบมีค่า  $120^\circ$  ( $\alpha + \beta = 120^\circ$ ) ดังรูปที่ 3 ข. ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงเป็นความสามารถในการทนแรงกระทำในรูปแบบการแตกร้าว ซึ่งในการตรวจสอบการแตกร้าวนั้นกำหนดให้ดำเนินการตรวจสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z3153 (1993) วิธีการวัดการแตกร้าวรอยเชื่อมต่อจาก [14]

การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาแบ่งออกเป็น การตรวจสอบโครงสร้างในระดับมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม การตรวจสอบกำหนดให้ทำการศึกษาที่ภาคตัดของชิ้นทดสอบที่ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม ชิ้นงานที่ได้ถูกทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1500 และขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร ก่อนทำการกัดผิวหน้าด้วยสารละลายที่กำหนดในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างสามารถทำได้ด้วยกล้องขยายกำลังต่ำ (Low magnification scope) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light optical microscope: LOM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope: SEM) ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อเปรียบเทียบหาค่าสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด

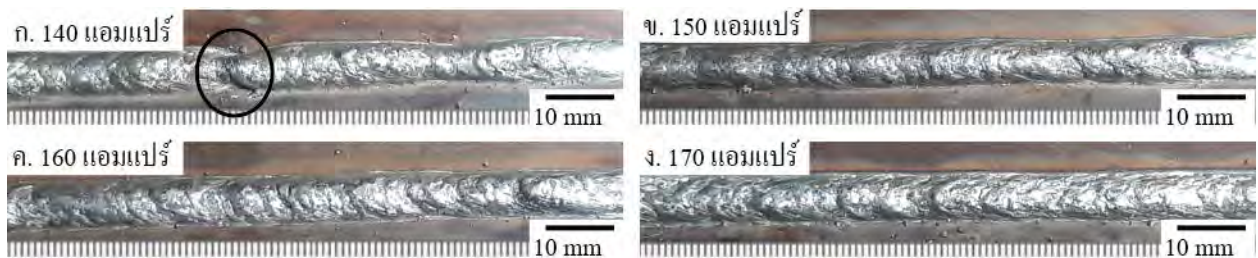
การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z3114 [15] โดยกำหนดให้ใช้แรงกดทดสอบที่ 300 กรัมแรง และเวลากดแช่ 10 วินาที ตำแหน่งระยะห่างการทดสอบในแต่ละแนวเท่ากับ 0.5 มม.



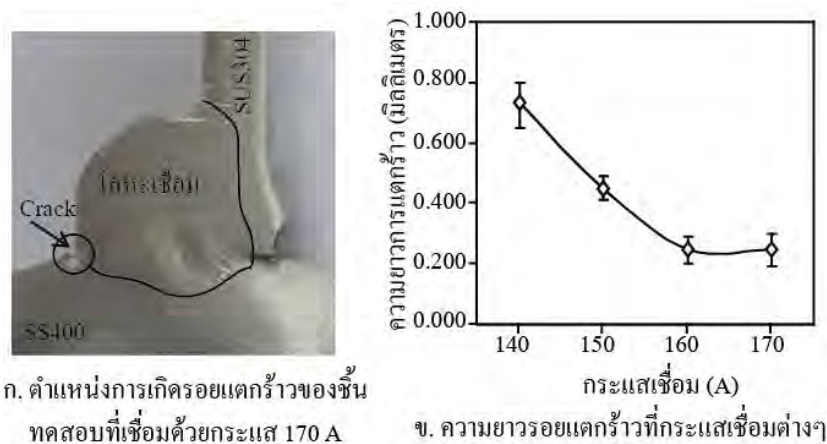
รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบการดัดโค้ง

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมมีความแตกต่างเมื่อเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140-170 แอมแปร์ เมื่อเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่มีค่าต่ำ 140 แอมแปร์พบเม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) ที่ด้านข้างของแนวเชื่อม และพบแนวเชื่อมที่มีความกว้างและแนวเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งแสดงโดยวงกลมในรูปที่ 4 ก. ความไม่ต่อเนื่องของแนวเชื่อมและความกว้างที่เปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของแนวเชื่อมนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการอาร์กที่ไม่สม่ำเสมอในขณะที่ทำการเชื่อม อย่างไรก็ตามความเสถียรของการอาร์กเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแส 150 แอมแปร์ ที่แสดงถึงความกว้างของแนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4 ข. ค่าความกว้างและความสม่ำเสมอของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มเป็น 160 และ 170 แอมแปร์ ตามลำดับดังรูปที่ 4 ค. และ ง. ความกว้างของแนวเชื่อมที่สม่ำเสมอและความราบเรียบที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความร้อนขาเข้า (Heat input) ในบ่อหลอมละลายมีค่าเพิ่มขึ้นและมีเวลาที่พอเพียงทำให้เกิดการหลอมละลายที่สมบูรณ์กว่า ผลการทดลองนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในการเชื่อมเลเซอร์เหล็กกล้าคาร์บอนที่แสดงถึงความสม่ำเสมอและการหลอมละลายที่สูงกว่าเมื่อความร้อนขาเข้าของการเชื่อมเลเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้นที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานเลเซอร์และความเร็วเดินแนวเชื่อมลดลง [16]



รูปที่ 4 ผิวหน้าโลหะเชื่อมที่กระแสเชื่อม 140-170 แอมแปร์



ก. ตำแหน่งการเกิดรอยแตกยาวของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแส 170 A

ข. ความยาวรอยแตกที่กระแสเชื่อมต่างๆ

รูปที่ 5 รอยแตกยาวในชิ้นทดสอบการตัดโค้ง

รอยต่อตัวที่ถูกรับการเชื่อมด้วยกระแสต่างๆ ถูกนำไปทำการทดสอบการตัดโค้งด้วยวิธีการดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า ชิ้นงานสามารถทำการตัดโค้งให้มีมุมรวมมากกว่า 120° เมื่อทำการตรวจสอบรอยต่อด้วยกล้องขยายต่ำและแสดงดังรูปที่ 5 ก. พบว่า เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่บริเวณฐานโลหะเชื่อม (Weld toe) ที่ผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างโลหะแผ่นล่างหรือเหล็กกล้าคาร์บอน และแนวเชื่อม เมื่อทำการวัดความยาวรวมของรอยแตกร้าวในชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 ถึง 170 แอมแปร์ พบความยาวของรอยแตกร้าวมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 140 ถึง 150 แอมแปร์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5 ข.



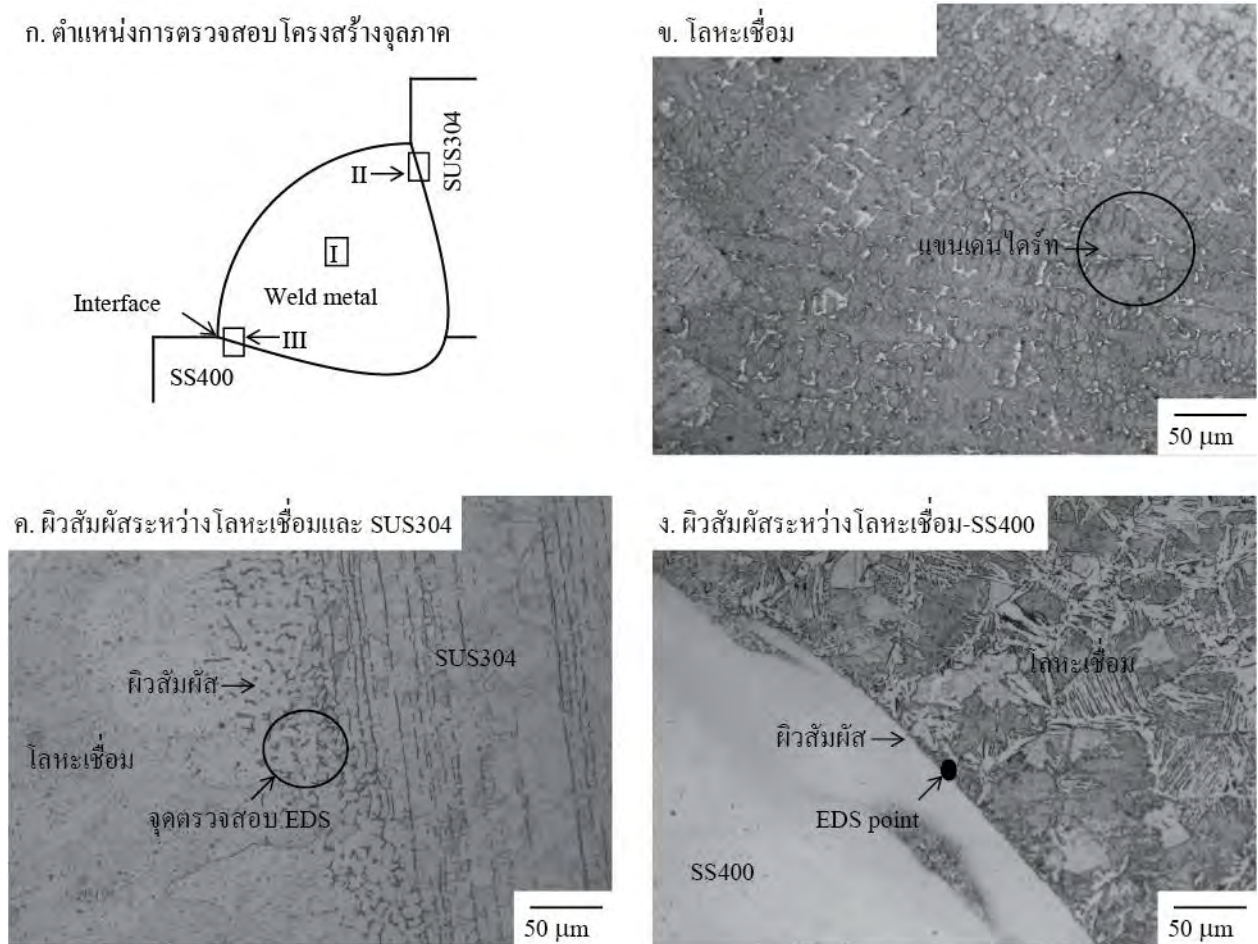
รูปที่ 6 รูปร่างและขนาดของโลหะเชื่อมรอยต่อตัวที่

รูปที่ 6 ก. แสดงภาพร่างการวัดส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างมหภาครอยต่อตัวที่ซึ่งประกอบด้วยความกว้างของฐานโลหะเชื่อม (Weld toe) ของด้านรอยต่อตัวที่ (ระยะ X และ Y) และความนูนของแนวเชื่อม (ระยะ Z) การวัดความนูนและความกว้างของโลหะเชื่อมรอยต่อตัวที่นี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการตัดโค้ง เนื่องจากโลหะเชื่อมที่มีความนูนสูงมักทำให้ง่ายต่อการแตกร้าวเมื่อโดนแรงกระทำเนื่องจากมีความเค้นตกค้างสูง [11] เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อตัวที่ของการเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 160 แอมแปร์ ดังรูปที่ 6 ข. พบค่าระยะการวัดเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 140 ถึง 170 แอมแปร์ ดังรูปที่ 6 ค. ความกว้างของฐานโลหะเชื่อมแผ่นล่างและความนูนของโลหะเชื่อม มีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 140-160 แอมแปร์ และเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงเป็น 170 แอมแปร์ นอกจากนั้นความกว้างของฐานโลหะเชื่อมแผ่นบนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการแตกร้าวที่ฐานโลหะเชื่อมด้านล่างของชิ้นทดสอบการตัดโค้งรูปที่ 5 พบว่าเมื่อโลหะมีความนูนของโลหะเชื่อมและความกว้างของฐานโลหะเชื่อมด้านล่างเพิ่มขึ้นสามารถส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้มากกว่าในโลหะเชื่อมรอยต่อตัวที่

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างเดนไดรท์ในโลหะเชื่อม

ตำแหน่งวิเคราะห์	ธาตุผสม (wt%)				
	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
แกนเดนไดรท์	0.37	18.16	1.68	69.7	10.09
ช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรท์	0.41	17.29	1.51	70.79	10.00

รูปที่ 7 ก. แสดงภาพโครงร่างของรอยต่อตัวที่และตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมในตำแหน่งที่ I โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐาน SUS304 และโลหะเชื่อมในตำแหน่งที่ II และโครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐาน SS400 และโลหะเชื่อมในตำแหน่งที่ III โลหะเชื่อมของรอยต่อตัวที่ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309LSi ดังรูปที่ 7 ข. แสดงโครงสร้างเดนไดรท์ของโลหะเชื่อมที่เกิดจากการเย็นตัวไม่สมดุลหรือการเย็นตัวเร็วของโลหะเชื่อมหลอมเหลวที่ได้รับความร้อนจากการอาร์กของลวดเชื่อมกับชิ้นงานจากสภาวะของเหลวสู่สภาวะของแข็งของโลหะ โครงสร้างเดนไดรท์ที่ก่อตัวมีความแข็งสูงและส่งผลทำให้เกิดสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมไม่สมดุล เมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่ตำแหน่งโครงสร้างเดนไดรท์และช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรท์ในพื้นที่วงกลมในรูปที่ 7 ข. ได้ผลการตรวจสอบดังตารางที่ 2 ปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรง คือโครเมียม แมงกานีส นิกเกิล และซิลิกอน มีปริมาณของธาตุเหล่านี้มีค่าสูงกว่าในพื้นที่แกนเดนไดรท์และต่ำกว่าในพื้นที่ระหว่างแกนเดนไดรท์ [17]



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อตัวที่ SS400/SUS304 ที่เชื่อมด้วยกระแส 160 แอมแปร์

รูปที่ 7 ค. แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SUS304 ซึ่งอยู่ด้านบนของรอยต่อตัวที่ตำแหน่งที่ II ในรูปที่ 7 ก. บริเวณโลหะเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรท์ของลวดเชื่อมที่เกิดการหลอมละลายและแข็งตัวใน

บ่อหลอมละลายการเชื่อม โครงสร้างเคนไคร์ที่มีขนาดเล็กลงเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้ผิวสัมผัสของรอยต่อ ลักษณะของผิวสัมผัสที่พบไม่มีการแบ่งแยกเป็นเส้นชัดเจนแต่เป็นผิวสัมผัสที่เป็นพื้นที่การรวมกันระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SUS304 การเกิดการรวมกันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SUS304 เป็นเหล็กกล้าผสมโครเมียมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 3 ผิวสัมผัสของรอยต่อตัวที่ระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SS400 มีความแตกต่างจากผิวสัมผัสของรอยต่อตัวที่ระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SUS304 ดังรูปที่ 7 ง. ซึ่งแสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่เป็นเส้นบางแบ่งแยกเด่นชัดระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้า SS400 การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากส่วนผสมของเหล็กกล้าทั้งสองแตกต่างกัน ธาตุเสริมความแข็งแรงที่มีปริมาณสูงในโลหะเชื่อมไม่สามารถเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ได้น้อยเพื่อเข้าไปรวมตัวกับเหล็กกล้า SS400 ซึ่งมีปริมาณของธาตุเสริมความแข็งแรงต่ำได้ รูปแบบของผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้พบได้เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างเหล็กกล้าต่างชนิด SS400/SUS304 [6] พื้นที่การรวมตัวกันที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่าดังรูปที่ 7 ง. ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของพื้นที่นี้มีค่าต่ำกว่าและส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณผิวสัมผัสได้ง่ายกว่าดังรูปที่ 7 ก. ตำแหน่งผิวสัมผัสที่แบ่งแยกเด่นชัดระหว่างโลหะเชื่อมและเหล็กกล้าคาร์บอนนี้สามารถพบได้เช่นเดียวกันในการเชื่อมรอยต่อตัวที่ทุกกระแสนเชื่อม และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของส่วนผสมทางเคมีของธาตุเสริมความแข็งแรงในพื้นที่ผิวสัมผัสพบว่าธาตุต่างๆ เหล่านี้มีค่าลดลงดังตารางที่ 3 และเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยแตกร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจาก 160 แอมแปร์

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างผิวสัมผัสโลหะเชื่อมและโลหะฐาน

ตำแหน่งวิเคราะห์	ธาตุผสม (wt%)				
	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
ผิวสัมผัสของโลหะเชื่อม/SUS304 ในรูปที่ 7 ก.	0.36	18.01	1.12	71.74	8.77
ผิวสัมผัสของโลหะเชื่อม/SS400 ที่เชื่อมด้วย 140 แอมแปร์	0.05	2.65	0.51	95.13	1.66
ผิวสัมผัสของโลหะเชื่อม/SS400 ที่เชื่อมด้วย 150 แอมแปร์	0.09	3.89	0.70	93.31	2.01
ผิวสัมผัสของโลหะเชื่อม/SS400 ที่เชื่อมด้วย 160 แอมแปร์	0.11	4.27	0.81	92.36	2.45
ผิวสัมผัสของโลหะเชื่อม/SS400 ที่เชื่อมด้วย 170 แอมแปร์	0.05	3.99	0.77	93.18	2.01

การเพิ่มธาตุเสริมความแข็งแรงก่อให้เกิดโลหะคาร์ไบด์ที่มีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในพื้นที่หลักโลหะเชื่อม [18] ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กหล่อโดยใช้ลวดเชื่อมที่มีสารก่อให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ในโลหะเชื่อมเพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อม ลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมสูงส่งผลทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์ เช่น Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>C ขนาดเล็กและละเอียดกระจายตัวสม่ำเสมอในพื้นที่หลักยูเทคติก [19-22] นอกจากนั้นเมื่อปริมาณโครเมียมและคาร์บอนสูงสามารถทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์เชิงซ้อนที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูง คือ (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (Fe,Cr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> Fe-Cr ในพื้นที่หลักยูเทคติกได้ [23, 24] นอกจากนั้นธาตุผสมอื่นๆ ที่สามารถก่อตัวขึ้นในโลหะเชื่อม คือ นีโอเบียม ทังสเตน วานาเดียม และโมลิบดีนัม ธาตุเหล่านี้ทำให้เกิดการก่อตัวของเฟสโลหะคาร์ไบด์ ที่ทำให้สมบัติทางกลดีขึ้นได้ [20, 25] โดยที่ค่าความแข็งและความแข็งแรงของโลหะคาร์ไบด์จากค่าสูงไปต่ำพบได้ว่ามีค่า TiC>VC>CrC>MoC>FeC>NiC [26] ด้วยเหตุนี้การเพิ่มปริมาณธาตุผสมเสริมแรงจึงเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงของรอยต่อเกิดการเปลี่ยนแปลงได้



#### 4. สรุปผลการทดลอง

4.1 รอยต่อตัวที่ระหว่างเหล็กกล้า SS400 และ SUS304 สามารถทำการเชื่อมได้ด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมโดยไม่พบจุดบกพร่องในโลหะเชื่อม และมีความต้านทานการเกิดแตกร้าวในการทดสอบการดัดโค้งสูงสุดเมื่อเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 160 แอมแปร์

4.2 ส่วนผสมที่ต่างกันระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และโลหะเชื่อมโครเมียมสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสที่มีพื้นที่การรวมตัวกันน้อยของธาตุเสริมความแข็งแรง และส่งผลทำให้มีความต้านทานการเกิดแตกร้าวสูงกว่าผิวสัมผัสที่ด้านเหล็กกล้า SUS304 และโลหะเชื่อมที่มีพื้นที่การรวมตัวกันมากกว่า

4.3 การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้รอยต่อมีความต้านทานการเกิดแตกร้าวสูงขึ้นเนื่องจากความสามารถในการรวมตัวของธาตุเสริมความแข็งแรงในตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะฐานกับโลหะเชื่อม

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณ คุณวีรช ณ์่งประเสริฐ สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเทคนิค

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Pezo, L. *et al.* Modified screw conveyor-mixers – Discrete element modeling approach. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26, pp. 1391-1399.
- [2] Sawai-amorn, A. Risk Analysis of a Combine Harvester with the Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Technique. M. Eng. Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2016.
- [3] Sawai-amorn, A., Kanjana, R., Kimapong, K. Risk Analysis of a Combine Harvester with the Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Technique. In: 1<sup>st</sup> National Conference of Rajamanagala University of Technology Suvarnabhumi, Pranakornsriyutthaya, 22 June 2016, In CD-Rom.
- [4] Sun, Z. and Karppi, R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 59, pp. 257-267.
- [5] Dos Santos, E. B. F. *et al.* High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P) : The metal beam process. *Manufacturing Letters*, 2017, 11, pp. 1-4.
- [6] Poonnayom, P. *et al.* Microstructure and Tensile Properties of SS400 Carbon Steel and SUS430 Stainless Steel Butt Joint by Gas Metal Arc Welding. *International Journal of Advanced Culture Technology*, 2015, 3, pp.61-67.
- [7] Májlinger, K. *et al.* Gas metal arc welding of dissimilar AHSS sheets. *Materials & Design*, 2016, 109, pp. 615-621.
- [8] Yi, J. *et al.* Effect of welding current on morphology and microstructure of Al alloy T-joint in double-pulsed MIG welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25, pp.3204-3211.

- [9] Fu, G. *et al.* Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. *Marine Structures*, 2016, 46, pp. 30-55.
- [10] Kim, J.S. *et al.* A failure analysis of fillet joint cracking in an oil storage tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22, pp. 845-849.
- [11] Cerit, M. *et al.* Fracture mechanics-based design and reliability assessment of fillet welded cylindrical joints under tension and torsion loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 116, pp.69-79.
- [12] Deng, D. *et al.* Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183, pp.219-225.
- [13] Japanese Industrial Standard, JIS Z3114, 1990. *Method of Hardness Test for Deposited Metal*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1997.
- [14] Japanese Industrial Standard, JIS Z3153, 1993. *Method of T-joint Weld Cracking Test*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1997.
- [15] Japanese Industrial Standard, JIS Z3114, 1996. *Method of hardness test for deposited metal*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1996.
- [16] Liu, S. *et al.* Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94, pp.59-67.
- [17] Askeland, D.R. and Phule, P.P. *The Science and Engineering of Materials*. Toronto: Thompson Canada Limited, 2006.
- [18] Wu, Y. *et al.* Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire. *Materials & Design*, 2015, 87, pp.567-578.
- [19] Jeshvaghani, R.A. *et al.* Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding. *Materials & Design*, 2011, 32, pp.1531-1536.
- [20] Buchely, M.F. *et al.* The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 2005, 259, pp.52-61.
- [21] Zahiri, R. *et al.* Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 260, pp.220-229.
- [22] Mendez, P.F. *et al.* Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16, pp.4-25.
- [23] Fan, C. *et al.* Microstructure change caused by (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201, pp.908-912.
- [24] Chang, C.M. *et al.* Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy. *Tribology International*, 2010, 43, pp.929-934.
- [25] Wang, X.H. *et al.* Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 489, pp.193-200.
- [26] Lin, C.M. *et al.* The effects of additive elements on the microstructure characteristics and mechanical properties of Cr–Fe–C hard-facing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 498, pp.30-36.