

การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่อที่เกิดจากการเชื่อมแม่เหล็ก  
สำหรับเหล็กเกรด S355J2

ANALYSIS OF THE INFLUENTIAL WELDING FACTOR ON THE DEFLECTION  
OF THE S355J2 TUBE



การค้นคว้าวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-BN-M-011-505

การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่อที่เกิดจากการเชื่อมแม่เหล็ก  
สำหรับเหล็กเกรด S355J2

ANALYSIS OF THE INFLUENTIAL WELDING FACTOR ON THE DEFLECTION  
OF THE S355J2 TUBE



การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-011-505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF THE INFLUENTIAL WELDING FACTOR ON THE DEFLECTION  
OF THE S355J2 TUBE



AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN DEFENCE ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

KMITL-2016-EN-M-011-505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

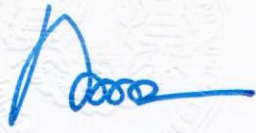
หัวข้อ การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่อที่เกิดจากการเชื่อมแน้ม  
สำหรับเหล็กเกรด S355J2  
Title Analysis of the Influential Welding Factor on the Deflection of the  
S355J2 Tube  
นักศึกษา นายเอกชัย ปุชนียกุล  
รหัสประจำตัว 55614054  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมป้องกันประเทศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย  
หมายเลขการค้นคว้าอิสระ KMITL-2016-EN-M-011-505

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ		ลายมือชื่อ
รศ.ประภาช ไพรสุวรรณา		
ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม		
รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคาร 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งตัวของท่อที่เกิดจากการเชื่อมแม่เหล็กสำหรับเหล็กเกรด S355J2
นักศึกษา	นายเอกชัย ปุชนียกุล
รหัสนักศึกษา	55614054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมป้องกันประเทศ
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาค้นคว้าอิสระ	รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

### บทคัดย่อ

การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งตัวของท่อเหล็กไร้ตะเข็บภายใต้กระบวนการเชื่อมซึ่งเป็นขั้นตอนการผลิตของท่อยิงจรวด โดยปัญหาที่เกิดขึ้นกับท่อยิ่งนั้นพบว่า ภายหลังจากการเชื่อมสันเกลียวกับท่อยิ่งจะมีการโค้งตัวของท่อเกิดขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งตัวของท่อยิ่ง คือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม ส่วนการเชื่อมแบบมีการเว้นระยะห่างของรอยเชื่อมเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิของรอยเชื่อมที่จะเกิดขึ้นกับท่อยิ่ง และการลดขนาดความหนาของสันเกลียวลงเพื่อเป็นการลดเวลาในการเชื่อมท่อยิ่งให้สั้นลงและเป็นการลดความร้อนที่จะเกิดขึ้นกับท่อยิ่งด้วย ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเชื่อมท่อเหล็กไร้ตะเข็บขนาดความยาว 3,000 มม. ความกว้างของท่อวัดใน 127 มม. และความหนา 5 มม. เจาะเจาะร่องตามแบบ เหล็กแผ่นเรียบขนาดความยาว 200 มม. ความกว้าง 57.3 มม. และความหนา 3 มม. บีมขึ้นรูปตามแบบโมลเป็นรูปตัวยูเพื่อนำมาทำเป็นสันเกลียว โดยเหล็กทั้ง 2 ชนิดเป็นเหล็กเกรด (S355J2) ทำการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อทำการเพิ่มกระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม จะทำให้การโค้งตัวของท่อลดลงในระดับที่ยอมรับได้ โดยไม่กระทบต่อความแม่นยำในการยิงจรวด และให้ผลดีกว่าการลดค่าตัวดังกล่าว

<b>Title</b>	Analysis of the Influential Welding Factor on the Deflection of the S355J2 Tube
<b>Student</b>	Mr. Ekachai Puchaneeyakul
<b>Student ID</b>	55614054
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Defence Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi

## ABSTRACT

The aim of this independent study is to analyze the cause of deflection of the S355J2 tube under welding process. The constructed tube is then used as a barrel of the rocket for military use. The problem arisen is the deflection of the tube after welding process along the spiral spine of the tube. According to the study, welding current, arc voltage and welding speed are the causes of deflection. Welding with the spacing of welds can help reduce the temperature of the barrel while reduction of the thickness can reduce both welding speed and temperature of the barrel. The tube used in this research is 3,000 mm. long. The width of the tube is 127 mm. and its thickness is 5 mm. with groove. The flat steel, having length 200 mm., width 57.3 mm. and a thickness of 3 mm. is stamped to be U-shaped ribbed spiral. All are the S355J2 steel. The test results show that increase in the welding current, arc voltage and welding speed results in reduction of deflection to the acceptable level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในงานการค้นคว้าอิสระฉบับนี้ จนทำให้การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผลการสแกนท่อยิงจรวดจากเครื่องสแกนสามมิติ จนทำให้ผลการทดสอบมีความสมบูรณ์ และน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนจนทำให้ข้าพเจ้ามีโอกาสได้ทำการค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกชัย ปุชนียกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการค้นคว้าอิสระ.....	6
1.3 ขอบเขตของการค้นคว้าอิสระ.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 หลักการของล้ากล้องยิงจรวด.....	7
2.2 หลักการทำงานของกระบวนการอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม.....	8
2.2.1 การอาร์ก.....	8
2.2.2 การถ่ายโอนโลหะหลอม.....	9
2.3 เหตุผลในการเลือกการเชื่อมแม่ึก.....	11
2.4 เครื่องเชื่อมแม่ึกและอุปกรณ์.....	11
2.4.1 เครื่องเชื่อม.....	12
2.4.2 เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม.....	12
2.4.3 แก๊สปกป้อง.....	12
2.4.4 ลวดเชื่อม.....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งตัวของชิ้นงานภายใต้การเชื่อม.....	14
3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะภายใต้การเชื่อม.....	14
3.1.1 กระแสเชื่อม.....	14
3.1.2 แรงดันไฟฟ้า.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 ความเร็วเชื่อม.....	15
3.2 เทคนิคการเชื่อมเพื่อลดการบิดและโก่งงอของชิ้นงาน.....	15
3.2.1 การควบคุมความร้อนในการเชื่อม.....	15
3.2.2 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม.....	15
3.2.3 การจำกัดจำนวนแนวเชื่อมบนรอยต่อของชิ้นงาน.....	15
3.2.4 ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่นำมาเชื่อม.....	16
บทที่ 4 การออกแบบการทดสอบ.....	17
4.1 การออกแบบการทดสอบ.....	17
4.2 การกำหนดปัจจัยการทดสอบ การกำหนดเครื่องมือ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเชื่อม.....	19
4.3 การกำหนดเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเชื่อม.....	20
4.3.1 เหล็กทดสอบเกรด S355J2.....	20
4.3.2 เหล็กแผ่นยึดข้างท่อนันทอโก่งตัวขณะทำการเชื่อม.....	21
4.3.3 เครื่องเชื่อม.....	21
4.3.4 ลวดเชื่อม.....	22
4.3.5 แก๊สปกป้อง.....	22
4.3.6 จี๊ปรประกอบงานเชื่อม.....	23
4.3.7 ท่อรองใน.....	23
4.3.8 ลูกจรวดจำลอง.....	24
4.3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	24
4.3.10 เครื่องสแกน 3 มิติ.....	25
4.4 การดำเนินการทดสอบการเชื่อมกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2.....	25
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	32
5.1 ผลการสแกนท่อยิ่ง กลุ่มที่ 1.....	32
5.1.1 ผลการสแกนท่อยิ่งกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1.....	32
5.1.2 ผลการสแกนท่อยิ่งกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2.....	33
5.2 ผลการสแกนท่อยิ่งกลุ่มที่ 2.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลการสแกนต่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1.....	35
5.2.2 ผลการสแกนต่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2.....	36
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา.....	38
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	38
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ประวัติผู้เขียน.....	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าการโก่งตัวของท่อที่ 1 และท่อที่ 2.....	5
2.1 ช่วงกระแสแบบ Short Arc สำหรับลวดเหล็กกล้าขนาดต่างๆ.....	9
2.2 ความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างๆ.....	10
2.3 ข้อดีข้อเสียของการเชื่อมแม่เหล็ก.....	11
4.1 ตารางกำหนดค่าปัจจัยในการเชื่อมทดสอบ.....	19
5.1 ค่าการโก่งตัวของท่อในกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2.....	34
5.2 ค่าการโก่งตัวของท่อในกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2.....	37
5.3 ค่าการโก่งตัวเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุดของท่อ.....	37
6.1 ค่าการโก่งตัวเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุดของท่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	รถยิงจรวดหลายลำกล้อง.....2
1.2	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....2
1.3	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....3
1.4	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....3
1.5	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 2 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....4
1.6	ค่าความโค้งตัวของท่อยิงท่อที่ 1.....4
1.7	ค่าความโค้งตัวของท่อยิงท่อที่ 2.....4
2.1	รถยิงจรวดหลายลำกล้อง BM21.....7
2.2	สันเกลียวลำกล้องยิงจรวด BM21.....8
2.3	เครื่องเชื่อมแม่เหล็กและอุปกรณ์.....12
4.1	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....17
4.2	ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....18
4.3	ค่าความโค้งตัวของท่อยิงท่อที่ 1.....18
4.4	เหล็กท่อเกรด S355J2.....20
4.5	เหล็กแผ่นเกรด S355J2 ที่จะนำไปทำสันเกลียว.....20
4.6	เหล็กแผ่นเกรด S355J2 ที่ป้อนขึ้นรูปตามโมล.....21
4.7	เครื่องเชื่อม.....21
4.8	ลวดเชื่อม.....22
4.9	แก๊สปกป้อง CO <sub>2</sub> .....22
4.10	จิกจับยึดท่อขณะทำการเชื่อม.....23
4.11	ท่อรองในสำหรับใส่ภายในท่อยิงขณะทำการเชื่อม.....23
4.12	ลูกจรวดจำลองสำหรับทดสอบ.....24
4.13	เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟาเรด.....24
4.14	เครื่องสแกนสามมิติ.....25
4.15	เครื่องเชื่อม.....25
4.16	การเชื่อมกระแสน้ำเชื่อมด้วยคลิป์แอมป์.....26
4.17	สันเกลียวขึ้นตรวจสอบบนจิก.....26
4.18	ติดตั้งแผ่นเหล็กกันรอยที่สันเกลียว.....27
4.19	นำสันเกลียวไปติดตั้งบนท่อ.....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VIII อย่างไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ตัดกันเลยสันเกลียวออกและตัดเนื้อเหล็กของท่อที่เหลือไว้ตอน CNC.....	28
4.21 การติดตั้งสันเกลียวจนครบพร้อมติดเหล็กแผ่นเรียบประกบด้านข้างและด้านล่าง.....	28
4.22 นำท่อขึ้นติดตั้งบนจักรอกรการเชื่อม.....	29
4.23 การเชื่อมท่อรอบที่ 1-6.....	29
4.24 การเชื่อมท่อรอบที่ 7-12.....	30
4.25 เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	30
4.26 ถอดอุปกรณ์รองในท่อออก.....	31
4.27 นำลูกจรวดจำลองลากผ่านท่อยิง.....	31
5.1 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....	32
5.2 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....	33
5.3 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1.....	33
5.4 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....	33
5.5 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....	34
5.6 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2.....	34
5.7 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....	35
5.8 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....	35
5.9 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1.....	35
5.10 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y).....	36
5.11 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y).....	36
5.12 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2.....	37
6.1 กราฟแสดงค่าการโก่งตัวสูงสุดต่ำสุดของท่อยิง.....	39

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันจรวดและอาวุธนำวิถี เป็นศักยภาพด้านการป้องกันประเทศเชิงรุกที่สำคัญของทุกเหล่าทัพแต่การจัดหารวดเพื่อเข้าประจำการนั้นต้องใช้งบประมาณสูงมาก อีกทั้งการซ่อมบำรุงไม่สามารถทำได้และไม่สามารถนำมาใช้ในการฝึกได้มากนัก เนื่องจากมีราคาแพงและมีอายุการใช้งานจำกัด สภากลาโหมจึงอนุมัติแผนแม่บทการวิจัยและพัฒนาจรวดเพื่อความมั่นคงเมื่อปี 2549 และต่อมาได้มีการจัดตั้ง สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) หรือ สทป. ขึ้นภายใต้การกำกับดูแลของรัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหม เพื่อรองรับภารกิจการวิจัยพัฒนาโครงการจรวดและอาวุธนำวิถี ด้วยการรับถ่ายทอดเทคโนโลยีจากมิตรประเทศ แล้วนำมาพัฒนาต่อยอดความรู้ด้วยการพึ่งพาตนเอง เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงของชาติ ตอบสนองเหล่าทัพในภารกิจป้องกันภัยคุกคามที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง [1]

ในอุตสาหกรรมโลหะทุกวันนี้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะพบว่ากระบวนการเชื่อมจะถูกนำเข้ามาใช้งานร่วมอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งอาจจะใช้ในงานผลิตหลักหรือเป็นตัวเสริมอยู่ก็ตาม สามารถกล่าวได้ว่าไม่มีอุตสาหกรรมใดที่ไม่มีการเชื่อมร่วมอยู่ด้วย กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal-arc Welding : GMAW) เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมชนิดใหม่ที่ถูกนำมาใช้แทนกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจากเทคนิคของกรรมวิธีการเชื่อม GMAW สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องประหยัดเวลาในการทำความสะดวกเนื่องจากไม่มีสแลกปกคลุมแนวเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทั้งระบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้องกับงานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพสูง [2]



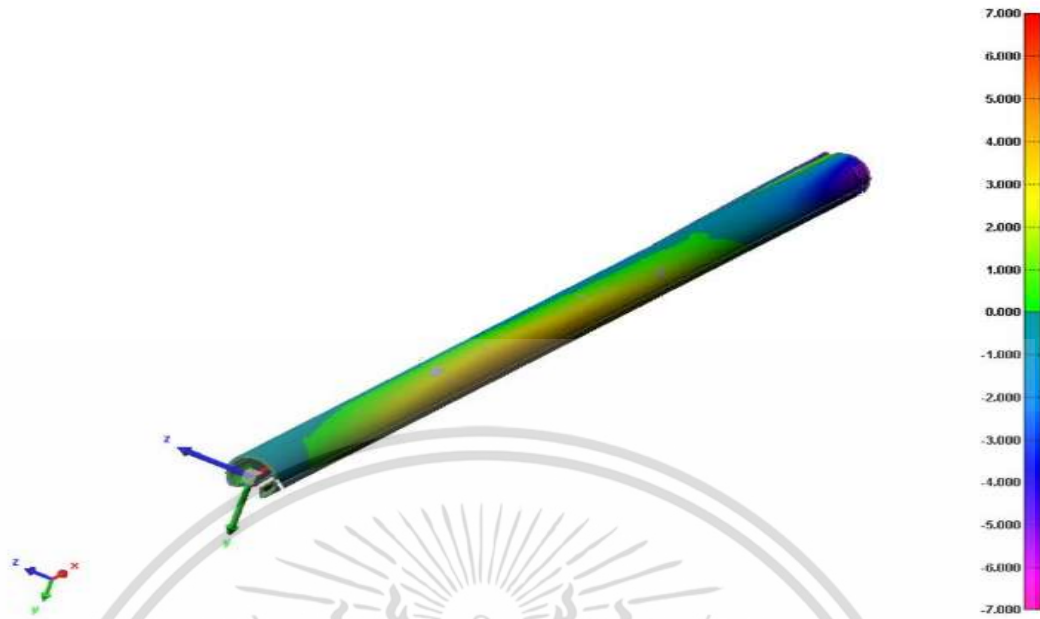
รูปที่ 1.1 รถยิงจรวดหลายลำกล้อง

ผู้จัดทำงานวิจัยฉบับนี้ ได้มีโอกาสทำงานบางโครงการที่เกี่ยวกับการออกแบบ ผลิต ประกอบ ยุทโธปกรณ์ทางทหารเป็นท่อยิงจรวด ในการประกอบอุปกรณ์ส่วนต่างๆ เข้ากับท่อยิงจรวดนั้นจะใช้วิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกคลุม จะเรียกการเชื่อมประเภทนี้ว่า การเชื่อมแม่เหล็ก จากการดำเนินงานประกอบชิ้นเกลียวเข้ากับท่อยิงจรวด พบปัญหาการโก่งตัวของท่อยิงภายหลังกระบวนการเชื่อมซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งและเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ จากการทดสอบการสแกนท่อยิงด้วยเครื่องสแกนสามมิติ พบว่าท่อยิงที่มีการโก่งตัว และไม่สามารถนำลูกจรวดจำลองลากผ่านได้โดยสะดวก



รูปที่ 1.2 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

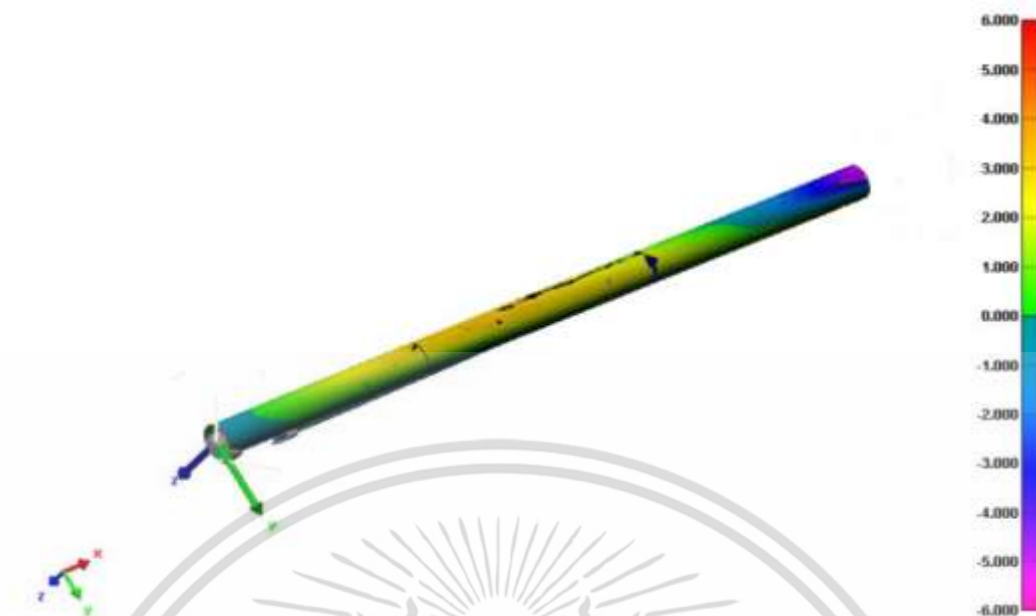


รูปที่ 1.3 ภาพ 3 มิติ ของท่ออิงท่อที่ 1 ในแนวด้านข้างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)



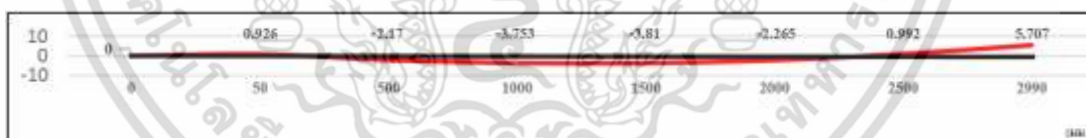
รูปที่ 1.4 ภาพ 3 มิติ ของท่ออิงท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



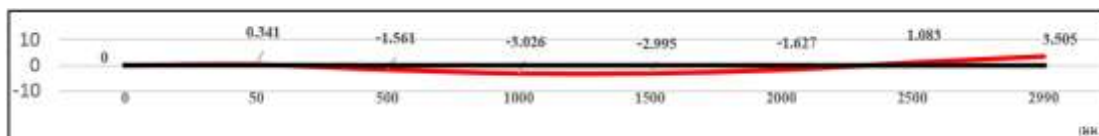
รูปที่ 1.5 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 2 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)

จากรูปที่ 1.2-1.5 สามารถอธิบายการเสียรูปของท่อยิงได้โดยเทียบข้อมูลที่ได้จากการสแกนท่อยิงจรวดด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ กับ แบบที่ได้รับการออกแบบไว้ โดยใช้จุดอ้างอิงที่ปลายท่อยิง (แกน Y) จากการสแกนท่อยิง พบว่าท่อยิงจรวดที่ใช้สันเกลียวหนา 5 มม. หลังทำการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก ท่อยิงจะมีการเสียรูปโดยการโก่งตัวลงด้านล่างในช่วงแรกและหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ โดยพฤติกรรมของการเสียรูปสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 1.6 และ 1.7



รูปที่ 1.6 ค่าความโก่งตัวของท่อยิง ท่อที่ 1

จากรูปที่ 1.6 แสดงให้เห็นว่าท่อยิงเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้ -3.81 มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้ 5.707 มม.



รูปที่ 1.7 ค่าความโก่งตัวของท่อยิง ท่อที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.7 แสดงให้เห็นว่าท่อยิงเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้ -3.026 มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้ 3.505 มม. โดยค่าการโก่งตัวต่ำสุดและสูงสุดของท่อที่ 1 และท่อที่ 2 สรุปได้ในตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** ค่าการโก่งตัวของท่อที่ 1 และท่อที่ 2

	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)
ท่อยิงสั้นเกลียว 5 มม. ท่อที่ 1	-3.810	5.707
ท่อยิงสั้นเกลียว 5 มม. ท่อที่ 2	-3.026	3.505
ค่าเฉลี่ยท่อยิงสั้นเกลียว 5 มม.	-3.418	4.606

การบิดตัวโก่งงอในการเชื่อม โลหะที่นำมาเชื่อมและแนวเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวและเมื่อเย็นตัวลงก็จะเกิดการหดตัวเข้ารูปเดิมอาจทำให้เกิดการบิดตัวและเกิดความเค้นขึ้นภายในชิ้นโลหะได้เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างรอยเชื่อมกับขอบรอยต่อของชิ้นงาน เทคนิคในการควบคุมความร้อนในการเชื่อมที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่นำมาทำการเชื่อมโดยการเชื่อมเว้นระยะ ถ้าทำการเชื่อมชิ้นงานยาวจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงานที่นำเชื่อม ทำให้เกิดการบิดตัว [3]

กิตติ วันดี สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ และ วิบูลย์ ตั้งโรตมณกุล ได้ทำการศึกษาการลดปัจจัยการโก่งตัวของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงานคือ กระแสเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และลำดับทิศทางในการเชื่อม [4]

จากการศึกษาดำรงทางวิชาการและงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ปัญหาการโก่งตัว บิดตัวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สปกคลุม สามารถควบคุมหรือทำให้ลดลงได้โดยการปรับตั้งค่าต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมและการเว้นระยะห่างระหว่างแนวเชื่อมให้มีความเหมาะสม โดยเฉพาะความร้อนที่จะเกิดกับชิ้นงานควรมีอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากเพื่อให้เกิดการขยายตัวและหดตัวใกล้เคียงกัน

การนำปัญหาเรื่องโก่งตัวของท่อยิงจรวดมาศึกษาในครั้งนี้ การปรับตั้งค่าต่างๆ ในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม การเชื่อมแบบเว้นระยะให้มีความเหมาะสมและการลดขนาดความหนาของสันเกลียวลง จึงถูกนำมาเป็นแนวทางในการวิจัย เพื่อจุดมุ่งหมายในการลดการโก่งตัวของท่อยิงจรวดและนำมาเป็นวิธีการปฏิบัติในการเชื่อมท่อลักษณะนี้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการค้นคว้าอิสระ

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการโค้งตัวของท่อเหล็ก S355J2 หลังจากการเชื่อมแม่เหล็ก
2. ศึกษาความเหมาะสมของตัวแปรที่ควรนำมาใช้ในการเชื่อมท่อเหล็ก S355J2
3. แก้ปัญหาการโค้งตัวของท่อที่ยังจรวดภายใต้การเชื่อมแม่เหล็ก

## 1.3 ขอบเขตของการค้นคว้าอิสระ

1. ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการโค้งตัวของท่อเหล็ก S355J2 ภายหลังจากการเชื่อมแม่เหล็ก เพื่อการสร้างท่อที่ยังจรวด
2. ทำการทดสอบนำผลการศึกษาและวิเคราะห์มาแก้ปัญหาการโค้งตัวของท่อเหล็ก S355J2

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อการโค้งตัวของเหล็กภายหลังจากการเชื่อมแม่เหล็ก
2. ผลงานการค้นคว้าอิสระสามารถนำมาใช้เป็นบรรทัดฐานสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างอื่นของกองทัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานการค้นคว้าอิสระฉบับนี้ ผู้จัดทำได้รวบรวมความรู้จากแหล่งข้อมูลต่างๆ ในหลายๆ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมแม่เหล็ก ไม่ว่าจะเป็นหนังสือ เอกสาร วารสาร บทความหรืองานวิจัยต่างๆ ที่มีเนื้อหา ที่สอดคล้องและเกี่ยวข้อง สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ รวมถึงการคัดเลือกตัวแปรต่างๆ ที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อขั้วขดโดยวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ

### 2.1 หลักการของลำกล้องยิงจรวด

ท่อยิง (Launch Tube) เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับระบบรถฐานยิง มีหน้าที่ในการใช้บรรจุจรวดก่อนยิง นอกจากนี้ยังช่วยกำหนดทิศทางขึ้นต้นรวมถึงกำหนดความเร็วทั้งเชิงมุมและความเร็วเชิงเส้นในตอนต้น ระหว่างที่จรวดปล่อยออกจากท่อยิง ดังนั้นท่อยิงจึงเป็นส่วนสำคัญที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการยิง



รูปที่ 2.1 รถยิงจรวดหลายลำกล้อง BM21

สันเกลิยวของท่อยิงจรวดมีความจำเป็นมากในเพิ่มความแม่นยำในการยิงจรวดตรงเป้าหมายที่กำหนดไว้ จรวดต้องมีอัตราการหมุนตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้จรวดมีการหมุนตัวตั้งแต่ภายในท่อยิง นำไปสู่การสร้างท่อยิงให้มีสันเกลิยว มีอัตราการหมุนที่จากปากลำกล้องให้ได้ตามที่กำหนด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมท่อ เนื่องจากท่อยิงและอุปกรณ์เป็นเหล็กเกรดพิเศษ ในการเชื่อมจึงต้องใช้การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) โดยแก๊สที่ใช้ปกคลุมในการเชื่อมเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> 100% เราเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อมแม่็ก



รูปที่ 2.2 สันเกลียวล้ากลองยิงจรวด BM21

## 2.2 หลักการทำงานของกระบวนการอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

กระบวนการเชื่อม GMAW เป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับพลังงานความร้อนสูงจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเปลือยแข็งจะถูกส่งตรงไปยังบริเวณอาร์กและหลอมละลายรวมกับเนื้อโลหะโดยมีแก๊สปกป้องทำหน้าที่ปกป้องกันหลอมละลายไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ จึงไม่มีสแลกปกคลุมภายหลังการเชื่อม แก๊สปกป้องมีหลายชนิดซึ่งอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมก็ได้ แล้วแต่ชนิดของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม [5] [6]

การเชื่อม GMAW เป็นชื่อที่เรียกโดยรวม ชื่อที่ใช้จะแตกต่างกันตามแก๊สปกป้องที่ใช้ ถ้าใช้แก๊สปกป้องเป็นแก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนและฮีเลียม จะเรียกว่าการเชื่อมมิก ส่วนการเชื่อมแม่็กเป็นการพัฒนาโดยนำเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สอื่นๆ มาผสมกับแก๊สอาร์กอน

### 2.2.1 การอาร์ก (Arc)

ในกรณีวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม ความร้อนจากการหลอมละลายลวดเชื่อมและชิ้นงาน ปลายลวดเชื่อมที่ถูกหลอมจะถูกถ่ายโอนไปสู่บ่อหลอมละลาย บริเวณกระทันและลวดเชื่อมจะถูกปกคลุมจากแก๊สปกป้องที่ไหลออกมาจากหัวเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การถ่ายโอนโลหะหลอม (Metal Transfer)

การเชื่อมแม่เหล็ก เป็นกระบวนการเชื่อมแบบสลับเปลืองลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมหลอมละลายเติมลงไปแนวเชื่อม ซึ่งตัวบ่อนลวดจะดึงลวดออกจากม้วนผ่านไปตามท่อนำลวดที่อยู่ภายในสายหัวเชื่อม และจะถึงจุดสุดท้ายที่ปลายหัวเชื่อม

การที่ปลายลวดเชื่อมหลอมและเติมลงไปยังบ่อหลอมละลายนั้นเรียกว่า “การถ่ายโอนโลหะหลอม” (Metal Transfer) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น ลัดวงจร สเปรย์อาร์ก หยด และพัลส์ เป็นต้น ความแตกต่างของการถ่ายโอนโลหะหลอมแต่ละแบบนี้ขึ้นอยู่กับกระแสไฟแรงดันไฟฟ้าในการอาร์ก ชนิดของแก๊สปกป้องและชนิดของเครื่องเชื่อม [5]

- **แบบลัดวงจร (Short Arc Welding)** ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.6 มม. ถึง 1.2 มม. บางครั้งเรียกว่าแบบจุ่ม (Dip Transfer) แบบลวดเชื่อมเส้นเล็ก (Micro-Wire) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสเชื่อมต่ำ แนวเชื่อมที่ได้จากการถ่ายโอนโลหะหลอมแบบลัดวงจรจะเย็นตัวเร็ว แนวเชื่อมเล็ก และความเร็วในการถ่ายโอนประมาณ 20-200 ครั้งต่อวินาที การถ่ายโอนโลหะหลอมจะเกิดขึ้นในช่วงที่ลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลาย

ตารางที่ 2.1 ช่วงกระแสแบบ Short Arc สำหรับลวดเหล็กกล้าขนาดต่างๆ [5]

ที่มา: L-TEC. Mig Welding Handbook

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อม		ช่วงกระแสเชื่อม	
นิ้ว	มม.	ต่ำ	สูง
0.030	0.8	50	150
0.035	0.9	75	175
0.045	1.2	100	225

- **แบบสเปรย์อาร์ก (Spray Arc Welding)** เกิดจากการหลอมละลายของลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็กส่งถ่ายจากปลายลวดเชื่อมสู่ชิ้นงานด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจาก การถ่ายโอนโลหะหลอมนี้ใช้กระแสแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแบบอื่นทั้งหมด ปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานจะไม่มีโอกาสสัมผัสกันเลย เพราะความร้อนที่ได้รับสูงพอที่จะหลอมละลายลวดเชื่อมได้ทันที ขนาดของเม็ดโลหะที่ส่งถ่ายจะมีขนาดความโตใกล้เคียงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อม แนวเชื่อมที่ได้จึงสวย แต่การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบนี้มีข้อจำกัดคือ เชื่อมได้ดีเฉพาะท่าราบเท่านั้น

- **การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบหยด (Globular Transfer)** เริ่มจากปลายลวดเชื่อมหลอมละลายเป็นหยดโลหะขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมและตกลงสู่บ่อหลอมละลายของงานเชื่อมตามแรงโน้มถ่วงของโลก การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบนี้จะได้แนวเชื่อมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาไม่สวยงามและมีสะเก็ดเชื่อมค่อนข้างมากแต่เหมาะกับการเชื่อมงานหนา ส่วนแก๊สปกป้องแนวเชื่อมนิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สชนิดอื่นๆ ก็สามารถใช้ได้เช่นกัน

- **การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบพัลส์ (Pulsed Transfer)** การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบพัลส์ เป็นการพัฒนามาจากสเปร์ยอาร์ก ซึ่งได้รวมเอาข้อดีของแบบลัดวงจรกับสเปร์ยอาร์กเข้าด้วยกัน กระแสระดับสูงที่ได้จะสูงกว่า Transition Current และยังเป็นช่วงเกิดการถ่ายโอนโลหะหลอมจากปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย สำหรับกระแสช่วงต่ำเป็นกระแสที่รักษาการอาร์กให้คงอยู่ จึงทำให้การถ่ายโอนโลหะหลอมแบบพัลส์สม่ำเสมอเหมือนกับสเปร์ยอาร์ก แต่ใช้กระแสต่ำกว่า [5]

## ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างๆ [5]

ที่มา: Howard B.Cary. Modern Welding Technology.

โลหะงาน	รูปแบบการถ่ายโอนโลหะหลอม			
	แบบลัดวงจร	แบบสเปร์ยอาร์ก	แบบหยุด	แบบพัลส์อาร์ก
อะลูมิเนียม	X	/	X	/
บรอนซ์	X	/	X	/
ทองแดง	X	/	X	/
ทองแดงนิกเกิล	X	/	X	/
เหล็กหล่อ	/	X	X	-
แมกนีเซียม	X	/	X	/
อินโคเนล	X	/	X	/
นิกเกิล	X	/	X	/
โมเนล	X	/	X	/
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	/	/	/	-
เหล็กกล้าผสมต่ำ	/	/	/	-
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	/	/	/	-
เหล็กกล้าไร้สนิม	/	/	X	-
ไทเทเนียม	X	/	X	-

หมายเหตุ / สามารถใช้ได้ X ไม่สามารถใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เหตุผลในการเลือกการเชื่อมแม่เหล็ก

กระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ช่างเชื่อมเป็นผู้ดำเนินการเองได้ทั้งหมดเอง ส่วนการเชื่อมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตที่ปริมาณงานเชื่อมมาก ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เป็นต้น ขนาดลวดเชื่อมที่นิยมใช้มีกันหลายขนาด ส่วนการเลือกใช้จะพิจารณาตามความหนาและชนิดของชิ้นงาน ข้อดีข้อเสียของการเชื่อมแบบแม่เหล็ก ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดีข้อเสียของการเชื่อมแม่เหล็ก [5]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถเชื่อมได้ทุกท่า	1. อุปกรณ์ซับซ้อนและไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย
2. แนวเชื่อมไม่มีสแลกปกคลุมจึงไม่เสียเวลาในการเคาะสแลกออก	2. ไม่สามารถเชื่อมในบริเวณจำกัดได้
3. ไม่มีเขม่าและควันขณะเชื่อม	3. ถ้าเชื่อมเหล็กที่สามารถชุบแข็งได้ (Hardenability) อาจทำให้แนวเชื่อมแตกเนื่องจากไม่มีสแลกปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อช่วยลดอัตราเย็นตัว จึงทำให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็วและมีความแข็ง
4. สามารถมองเห็นบ่อหลอมละลายของการเชื่อมได้อย่างชัดเจน	4. ไม่เหมาะกับงานสนามหรือภายนอกอาคารเนื่องจากลมอาจพัดเอาแก๊สปกป้องหนีจากบริเวณอาร์ก
5. การเชื่อมกระทำได้เร็ว จึงประหยัดเวลาและลดต้นทุนการผลิต	
6. งานเชื่อมมีการเสียรูปน้อย	
7. คุณภาพของแนวเชื่อมสูง	
8. สามารถเชื่อมงานที่มีระยะห่างรอยต่อกว้าง (Gap) ได้อย่างต่อเนื่อง	
9. ลวดเชื่อมเป็นม้วนยาวสามารถเชื่อมได้แนวยาว และไม่มีเศษปลายลวดเชื่อมที่ต้องทิ้งมาก เหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	

## 2.4 เครื่องเชื่อมแม่เหล็กและอุปกรณ์

เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์การเชื่อม จะประกอบด้วยเครื่องเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก/แม่เหล็ก ซึ่งจะรวมด้วยชุดป้อนลวดและระบบควบคุม แก๊สปกป้อง และลวดเชื่อม



รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อมแม่เหล็กและอุปกรณ์

#### 2.4.1 เครื่องเชื่อม (Welding Machine)

เครื่องเชื่อมแม่เหล็ก เป็นเครื่องเชื่อมไฟกระแสตรงต่อกลับขั้ว (DCRP) ชนิดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage) เครื่องเชื่อมแม่เหล็กมีคุณสมบัติช่วยประหยัดไฟและใช้ลวดเชื่อมน้อย เนื่องจากไม่มีการสูญเสียทางลวดเชื่อมเหมือนการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ ไม่เสียเวลาในการเคาะสลักทิ้ง

#### 2.4.2 เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Wire Feeder and Control System)

เครื่องป้อนลวดเชื่อมรวมอยู่ในระบบควบคุมซึ่งต่อตรงกับเครื่องเชื่อม เครื่องป้อนลวดเชื่อมมีอยู่ 2 ชนิด สำหรับการเชื่อมแม่เหล็กใช้เครื่องป้อนลวดเชื่อมชนิดความเร็วคงที่ (Constant Speed) ซึ่งเหมาะกับเครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่ และลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กด้วย เครื่องป้อนลวดชนิดนี้สามารถปรับความเร็วของลวดได้ตามความเหมาะสมกับงานเชื่อม [5]

#### 2.4.3 แก๊สปกป้อง (Shielding Gas)

แก๊สปกป้อง เป็นแก๊สที่ใช้ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สที่นิยมใช้กันมากเพราะมีราคาถูก การเชื่อมโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุมแนวเชื่อม จะมีความกว้างของแนวเชื่อมปานกลาง การซึมลึกดี การหลอมละลายดี ลักษณะแนวเชื่อมดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ลวดเชื่อม (Electrode Wire)

ลวดเชื่อมแม่เหล็ก จะประกอบด้วยแกนเหล็กกรรมธาตุผสมเป็นแท่งตัน และเคลือบผิววนอก โดยรอบด้วยทองแดง จุดประสงค์ในการเคลือบทองแดง คือ ป้องกันไม่ให้ลวดเกิดสนิม และผิวสัมผัสที่เรียบบระหว่างผิวลวดเชื่อมกับผิวรูในของหลอดนำลวด (Contact Tip) ซึ่งเป็นจุดสัมผัสที่มีการไหลของกระแสไฟเชื่อมจากหลอดนำลวดสู่ลวดเชื่อม [5]

#### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติ วันดี สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ และ วิบูลย์ ตั้งวิโรดมณฑกุล [4] ได้ทำการศึกษาการลดปัจจัยการโก่งตัวของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะกึ่งอัตโนมัติ จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงานคือ กระแสเชื่อม แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และลำดับทิศทางในการเชื่อม ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการลดขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานคือ ค่ากระแสเชื่อม 130 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 19 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 50 ซม./นาที ซึ่งให้ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานที่ยึดทุแทนบที่ 0.83 มม. นอกจากนี้ทิศทางการเชื่อมในแต่ละแนวควรสลับกันเพื่อกระจายความร้อนจากการเชื่อมบนชิ้นงานให้ใกล้เคียงกันและลดโอกาสที่ด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป

## บทที่ 3

# ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงานภายใต้การเชื่อม

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงานภายใต้การเชื่อม การลดความบิดเบี้ยวของชิ้นงานขณะทำการเชื่อม และเทคนิคการเชื่อมเพื่อลดการบิดและโก่งของชิ้นงาน เพื่อนำผลการวิเคราะห์ปัจจัยและวิธีการรวมถึงเทคนิคเหล่านั้น ไปใช้ในการแก้ปัญหาการเชื่อมท่อเหล็กเกรด S355J2

### 3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะภายใต้การเชื่อม

เมื่อโลหะได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการหดตัวของโลหะ ผลการขยายตัวและหดตัวของโลหะที่เกิดกับโลหะที่นำมาเชื่อมก็เช่นเดียวกัน เมื่อเย็นตัวลงจะทำให้เกิดแนวเชื่อมและโลหะที่นำมาเชื่อมหดตัว อาจเกิดการบิดตัวและเกิดความเค้นภายในชิ้นงานที่เป็นโลหะได้ การขยายตัวและหดตัวของโลหะที่นำมาเชื่อมไม่เป็นรูปทรงตลอดชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างรอยเชื่อมกับขอบรอยต่อของชิ้นงาน [7] [8]

ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน คือ กระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและลำดับทิศทางในการเชื่อม นอกจากนี้ทิศทางในการเชื่อมในแต่ละแนวการเชื่อม ควรสลับกันเพื่อกระจายความร้อนจากการเชื่อมบนชิ้นงานให้ใกล้เคียงกัน และลดโอกาสที่ด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป [4]

#### 3.1.1 กระแสเชื่อม

กระแสเชื่อมเป็นตัวแปรในการแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมา ซึ่งสามารถอ่านได้โดยตรงจากแอมมิเตอร์ของเครื่องเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแม็ก กระแสเชื่อมจะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feeder) ถ้าป้อนลวดเร็วขึ้นกระแสเชื่อมที่ผลิตออกมาก็มากขึ้นด้วย แต่ถ้าป้อนลวดช้าลงกระแสเชื่อมก็ลดลงเช่นกัน [5]

#### 3.1.2 แรงดันไฟฟ้า

ค่าแรงดันไฟฟ้ามีอยู่ 3 ชนิดคือ แรงดันวงจรปิด โหลดโวลต์ และอาร์กโวลต์

- แรงดันวงจรปิด (Open Circuit Voltage) หาได้จากการวัดในขณะที่เปิดเครื่องแต่ยังไม่ทำการเชื่อม ในขดลวด Secondary ของเครื่องเชื่อมจะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่วนกระแสเชื่อมเป็นศูนย์ เนื่องจากยังไม่ครบวงจรไฟฟ้า

- โหลดโวลต์ (Load Voltage) ทำการวัดที่ขั้วต่อของ Secondary ของเครื่องเชื่อม ในขณะที่ทำการเชื่อม ซึ่งโหลดโวลต์ประกอบด้วยอาร์กโวลต์กับแรงดันไฟฟ้าตกค่อมในสายเชื่อมและขั้วต่อ โหลดโวลต์อ่านได้จากหน้าปัดที่เครื่องเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อาร์กโวลต์ (Arc Voltage) จะวัดระหว่างปลายลวดที่ไม่หลอมละลายกับผิวหน้าของบ่อหลอมละลายชิ้นงาน โวลต์มิเตอร์สามารถต่อเข้ากับหลอดนำลวดของปืนเชื่อมกับชิ้นงาน อาร์กโวลต์ตั้งได้จากโวลต์มิเตอร์หน้าเครื่องเชื่อมในขณะที่ทำการเชื่อม เมื่อระยะอาร์กสั้น แรงดันจะต่ำ ถ้าระยะอาร์กยาว แรงดันไฟฟ้าจะสูงตาม ต้องจำไว้ว่าเมื่อใช้กระแสเชื่อมสูง (ความเร็วบ่อนลวดสูง) อัตราการหลอมละลายและแรงดันไฟฟ้าต้องสูงด้วย จึงจะได้อาร์กที่สม่ำเสมอ [5]

### 3.1.3 ความเร็วเชื่อม

ค่าความเร็วเชื่อมคือความเร็วของการเคลื่อนอาร์กและหัวเชื่อมตามรอยต่อที่ต้องการเชื่อม โดยทั่วไปช่างเชื่อมแม็ก จะทำการหาขนาดความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมจากการดูบ่อหลอมละลาย ความเร็วเชื่อมเป็นตัวแปรที่สำคัญของการเชื่อม การกำหนดความเร็วเชื่อมขึ้นอยู่กับความหนาของงานเชื่อม เช่น งานหนาความเร็วเชื่อมต้องช้าลงและใช้กระแสเชื่อมกับแรงดันไฟฟ้าสูง

ถ้าความเร็วเชื่อมสูงเกินไป จะทำให้ความร้อนไม่เพียงพอที่จะหลอมโลหะชิ้นงานให้ละลายลึกเข้าไปภายในเนื้อ จึงหลอมละลายเฉพาะผิวหน้าเท่านั้น เป็นเหตุให้การซึมลึกน้อย แนวเชื่อมแคบและนูน เนื่องจากความร้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้หน้าโลหะเชื่อมไหลตัวได้ดี ความเร็วเชื่อมที่เหมาะสมจะต้องรักษาตำแหน่งของการอาร์กให้อยู่ที่ขอบด้านหน้าของบ่อหลอมละลายเสมอ ดังนั้นความเร็วเชื่อมที่เหมาะสมจะให้การซึมลึกดี ถ้าความเร็วเชื่อมเร็วไปหรือช้าไปการซึมลึกจะไม่เหมาะสม [5]

## 3.2 เทคนิคการเชื่อมเพื่อลดการบิดและโก่งงอของชิ้นงาน

### 3.2.1 การควบคุมความร้อนในการเชื่อม

เทคนิคในการควบคุมความร้อนในการเชื่อมที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่นำมาทำการเชื่อมโดยการเชื่อมเว้นระยะ ถ้าทำการเชื่อมชิ้นงานยาวจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงานที่นำเชื่อม ทำให้เกิดการบิดตัว

### 3.2.2 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม

เพื่อควบคุมการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน อาจให้เกิดความร้อนโดยใช้แก๊สเป่าหรือเข้าเตาอบความร้อน ซึ่งต้องดูคุณสมบัติของโลหะที่นำมาเชื่อม ควรให้ความร้อนก่อนทำการเชื่อมตามคู่มือของผู้ผลิต

### 3.2.3 การจำกัดจำนวนแนวเชื่อมบนรอยต่อของชิ้นงาน

การเชื่อมเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่นำมาเชื่อม และการเชื่อมหลายๆ แนวเชื่อมบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดการบิดโก่งงอของชิ้นงาน ดังนั้นควรลดจำนวนการเชื่อมบนชิ้นงานให้มากที่สุด

### 3.2.4 ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่นำมาเชื่อม

การใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่นำมาเชื่อมจะช่วยทำให้ชิ้นงานถูกยึด และไม่เกิดการบิดตัวโก่งงอ เพราะอุปกรณ์จับยึดสามารถควบคุมชิ้นงานให้อยู่ในอุปกรณ์จับยึดโดยไม่สามารถขยายตัวและหดตัวได้ [8]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการศึกษาปัจจัยหรือตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการโค้งตัวของชิ้นงานภายใต้การเชื่อมแม่เหล็กแล้วทำการทดสอบการเชื่อมเพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการแก้ปัญหาการเชื่อมท่อ ยิงเหล็กเกรด S355J2

#### 4.1 การออกแบบการทดสอบ

จากปัญหาท่อยิงที่มีเส้นเกลียวหนา 5 มม. เกิดการโค้งตัวจากการเชื่อม มีการกำหนดมาตรฐานในการเชื่อมประกอบดังนี้

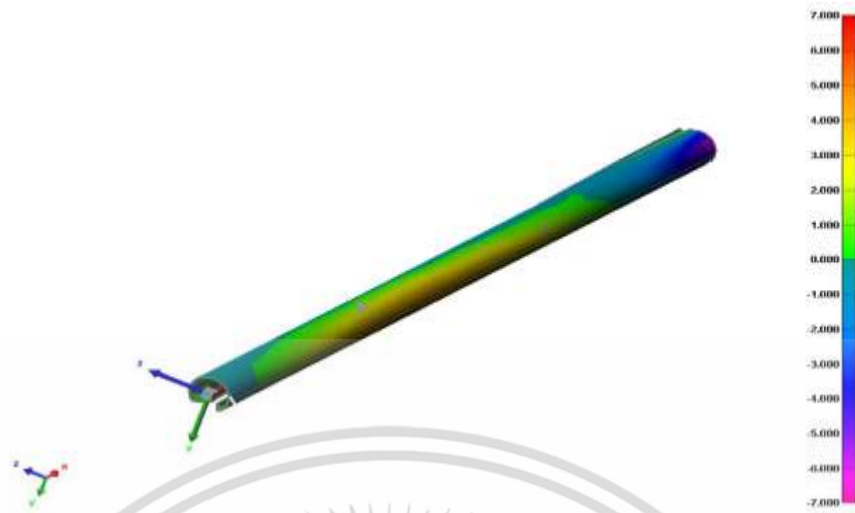
- กระแสเชื่อมที่ 170 แอมแปร์
- แรงดันไฟฟ้าที่ 22 โวลต์
- ความเร็วในการเชื่อมที่ 400 มม./นาที
- การเว้นระยะห่างระหว่างรอยเชื่อมที่ 140 มม.

ภายหลังการเชื่อมพบว่าท่อยิงมีการโค้งตัวเสียรูป เมื่อนำข้อมูลการสแกน 3 มิติ เปรียบเทียบกับข้อมูลในแบบ พบว่าไม่ได้ขนาดตามระยะความคดเคี้ยวทางวิศวกรรมที่กำหนดไว้ โดยลักษณะของท่อภายหลังการเชื่อมมีการเสียรูป มีการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างของท่อและจากนั้นมีการโก่งตัวสูงขึ้น ตามรูปที่ 4.1 และ 4.2



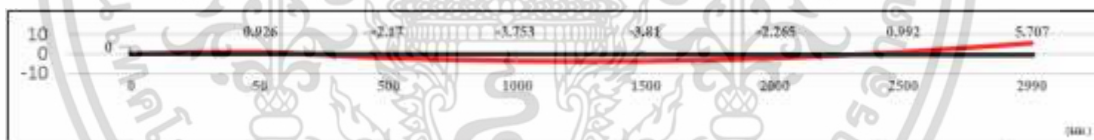
รูปที่ 4.1 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)

จากรูปที่ 4.1 ภาพจากการสแกนท่อยิงด้านบนสันเกลียว โดยใช้จุดอ้างอิงที่ปลายท่อ (แกน Y) ช่วงบริเวณกลางท่อยิงตามความยาวได้ค่าเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นค่าเท่ากับ  $-3.81$  มม. และช่วงปลายท่อยิงได้ค่าเป็นสีเหลืองส้ม จะมีค่าประมาณ  $5.707$  มม. พบว่าท่อยิงภายหลังการเชื่อมมีการเสียรูปโดยมีการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างของท่อ (ตรงข้ามแกน Y) และจากนั้นจะมีการโก่งตัวสูงขึ้น จากพฤติกรรมของการเสียรูปของท่อยิงสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าความโก่งตัวของท่อยิง ท่อที่ 1

ในการออกแบบการทดสอบนี้เราจะทำการพิจารณาปัจจัย 5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการโก่งตัวของท่อยิงที่มาจากกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม จากกรณีศึกษาของ กิตติ วันดี สุจินต์ ธงวารสุวรรณ และวิบูลย์ ตั้งวัชรตมนุกูล [4] ได้ร่วมกันหาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการเชื่อมเพื่อลดการบิดตัวของชิ้นงาน พบว่า ปัจจัยในการเชื่อมที่ส่งผลโดยตรงต่อการบิดตัวของชิ้นงาน 5 ปัจจัย ดังนี้กระแสไฟเชื่อม, แรงดันไฟ, ความเร็วในการเชื่อม [4], การเว้นระยะห่างระหว่างแนวเชื่อมเพื่อให้ความร้อนที่จะเกิดกับชิ้นงานมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ มีอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมาก เพื่อให้เกิดการขยายตัวและหดตัวใกล้เคียงกัน และการลดขนาดความหนาของสันเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเชื่อม แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม การเว้นระยะห่างของแนวเชื่อมและการลดขนาดความหนาของสันเกลียว ที่ส่งผลต่อการโค้งตัวของท่อโดยรวม ไปถึงการหาค่าของปัจจัยในการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อลดขนาดการโค้งตัวของท่อ ยิ่ง ปัจจัยในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 2 ตัวอย่าง เพื่อให้การทดสอบมีจำนวนไม่มากจนเกินไปและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบด้วย เนื่องจากท่อที่นำมาประกอบเป็นท่ออิงต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ

#### 4.2 การกำหนดปัจจัยการทดสอบ การกำหนดเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเชื่อม

จุดประสงค์ในการทดสอบในครั้งนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลต่อการโค้งตัวของชิ้นงานภายใต้การเชื่อมแม่เหล็ก แล้วนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการแก้ปัญหาการเชื่อมท่อเหล็กเกรด S355J2 ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยในการทดสอบดังนี้

- กระแสเชื่อม
- แรงดันไฟฟ้า
- ความเร็วในการเชื่อม
- การเว้นระยะห่างระหว่างรอยเชื่อมที่ 325 มม.
- การลดขนาดความหนาของสันเกลียวลงเหลือ 3 มม.

ในการทดสอบได้แบ่งปัจจัยในการเชื่อมเป็น 2 กลุ่ม ตามตารางที่ 4.1 โดยทำการทดสอบเชื่อมชิ้นงานกลุ่มละ 2 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ตารางกำหนดค่าปัจจัยในการเชื่อมทดสอบ

ตัวแปรในการเชื่อม	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2
กระแสเชื่อม (แอมแปร์)	150	190
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	21	23
ความเร็วในการเชื่อม (มม./นาที)	300	500
การเว้นระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม (มม.)	325	325
การลดขนาดความหนาของสันเกลียว (มม.)	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การกำหนดเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเชื่อม

#### 4.3.1 เหล็กทดสอบเกรด S355J2

- เหล็กท่อเกรด S355J2 มีขนาดความยาว 3,000 มม. ความกว้างวัดใน 127 มม. และความหนา 5 มม. นำไปเจาะเจาะร่องเป็นเกลียวตามแบบโดยใช้เครื่อง CNC ระหว่างร่องสันเกลียวจะเหลือเนื้อเหล็กไว้เป็นช่วงๆ เพื่อป้องกันท่อเหล็กเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เหล็กท่อเกรด S355J2

- เหล็กแผ่นเกรด S355J2 ตัดตามแบบมีความยาว 200 มม. ความกว้าง 57.3 มม. ความหนา 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และผ่านการบ่มขึ้นรูปตามแบบโมลเพื่อนำมาทำเป็นสันเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 เหล็กแผ่นเกรด S355J2 ที่จะนำไปทำสันเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เหล็กแผ่นเกรด S355J2 ที่ป้อนขึ้นรูปตามโมล

#### 4.3.2 เหล็กแผ่นยึดข้างท่อกันท่อโก่งตัวขณะทำการเชื่อม

เหล็กแผ่นเรียบ ขนาดความยาว 3000 มม. ความกว้าง 75 มม. ความหนา 9 มม.

จำนวน 4 แผ่น

#### 4.3.3 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อม ยี่ห้อ Welpro รุ่น 250 Y1 IGBT ขนาด 250 แอมแปร์ พร้อมอุปกรณ์ในการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เครื่องเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมในกระบวนการเชื่อม แม้ก ในการทดลองนี้ จะใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.18 (American Welding Society) ER70S-6 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มม. ลักษณะลวดเชื่อมจะประกอบด้วยแกนเหล็กผสมธาตุผสมเป็นแท่งตัน และเคลือบผิวนอกด้วยทองแดงในอัตราส่วนผสมกำหนดค่าสูงสุดไม่เกินเอาไว้ ถ้าหากผสมทองแดงมากไปจะทำให้เนื้อแนวเชื่อมเกิดโครงสร้างเปราะได้ [5]



รูปที่ 4.8 ลวดเชื่อม

#### 4.3.5 แก๊สปกป้อง

ในการทดลองนี้ จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{CO}_2$  100% เป็นแก๊สปกป้อง ทำหน้าที่ช่วยปกคลุมเปลวอาร์กและน้ำโลหะหลอม เพื่อป้องกันไม่ให้สารมลทินในอากาศเข้ามาผสมในบ่อหลอมเชื่อม [6]



รูปที่ 4.9 แก๊สปกป้อง  $\text{CO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.6 จิ๊กประกอบงานเชื่อม

จิ๊กในการจับยึดท่อขณะทำการเชื่อม ใช้สำหรับล็อกท่อในส่วนต่างๆ เพื่อป้องกันการโก่งตัวของท่อ



รูปที่ 4.10 จิ๊กจับยึดท่อขณะทำการเชื่อม

#### 4.3.7 ท่อรองใน

ท่อรองในสำหรับสอดเข้าไปภายในท่อขณะทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการโก่งตัวของท่อ ขนาด  $\text{Ø } 125 \text{ มม.} \times \text{ยาว } 3200 \text{ มม.}$



รูปที่ 4.11 ท่อรองในสำหรับใส่ภายในท่ออิงขณะทำการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.8 ลูกจรวดจำลอง

ลูกจรวดจำลองใช้ในการทดสอบการลากผ่านท่อยิงจรวดหลังทำการเชื่อมสันเกลียวเข้ากับท่อจนครบ



รูปที่ 4.12 ลูกจรวดจำลองสำหรับทดสอบ

#### 4.3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดขนาดเล็ก ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิท่อยิงหลังทำการเชื่อมแต่ละรอบ เพื่อตรวจสอบเช็คการคายความร้อนของท่อก่อนการทำการเชื่อมรอบต่อไป



รูปที่ 4.13 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.10 เครื่องสแกน 3 มิติ

เครื่องสแกน 3 มิติ ใช้สำหรับตรวจสอบท่อยิ่งว่ามีการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่



รูปที่ 4.14 เครื่องสแกนสามมิติ

#### 4.4 การดำเนินการทดสอบการเชื่อมกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ทำการปรับตั้งค่าต่างๆ ของเครื่องเชื่อมตามตารางที่ 4.1 ได้ที่หน้าตู้เชื่อม



รูปที่ 4.15 เครื่องเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของวิศวกรรมเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 การเช็คกระแสเชื่อมด้วยคลิปแอมป์

2. นำแผ่นเหล็กที่พับขึ้นรูปเป็นสันเกลียวมาทำการเจียรลบคมด้านนอกและด้านใน แล้วนำมาตรวจสอบบนจิ๊กทดสอบสันเกลียว และนำแผ่นเหล็กกันเลยประกอบเข้ากับสันเกลียวก่อนนำไปติดตั้งบนท่อคอมร่องที่เจาะเอาไว้



รูปที่ 4.17 สันเกลียวขึ้นตรวจสอบบนจิ๊ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ติดตั้งแผ่นเหล็กกันเลียที่สันเกลียว

3. นำเหล็กที่พับเป็นสันเกลียวไปประกอบกับท่อเหล็ก โดยการเชื่อมเป็นจุดเป็นระยะๆ เสร็จแล้วตัดเหล็กกันเลียที่สันเกลียวและเนื้อเหล็กของท่อที่เหลือไว้เป็นช่วงๆ ออกแล้วทำต่อจนครบ เพื่อป้องกันท่อเหล็กเสียรูป หลังจากติดตั้งสันเกลียวจนครบ ให้นำเหล็กแผ่นเรียบขนาดความยาว 3000 มม. ความกว้าง 75 มม. ความหนา 9 มม. จำนวน 4 แผ่น ประกอบด้านข้างซ้าย-ขวาด้านละ 1 แผ่น และด้านล่างของท่อ 2 แผ่น



รูปที่ 4.19 นำสันเกลียวไปติดตั้งบนท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ตัดกันเลยเส้นเกลียวออกและตัดเนื้อเหล็กของท่อที่เหลือไว้ตอน CNC



รูปที่ 4.21 การติดตั้งเส้นเกลียวจนครบพร้อมติดเหล็กแผ่นเรียบประกบด้านข้างและด้านล่าง

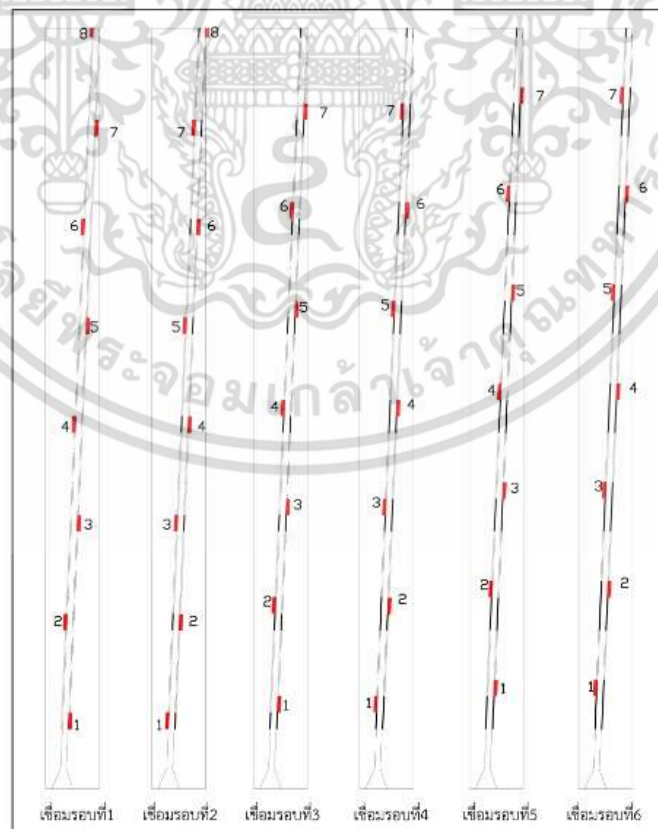
4. นำท่อเหล็กที่ประกอบเส้นเกลียวจนครบขึ้นทำการเชื่อมชิ้นงานบนจิ๊ก พร้อมกับนำอุปกรณ์รองในของท่อใส่เพื่อป้องกันการโก่งตัวของท่อก่อนทำการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



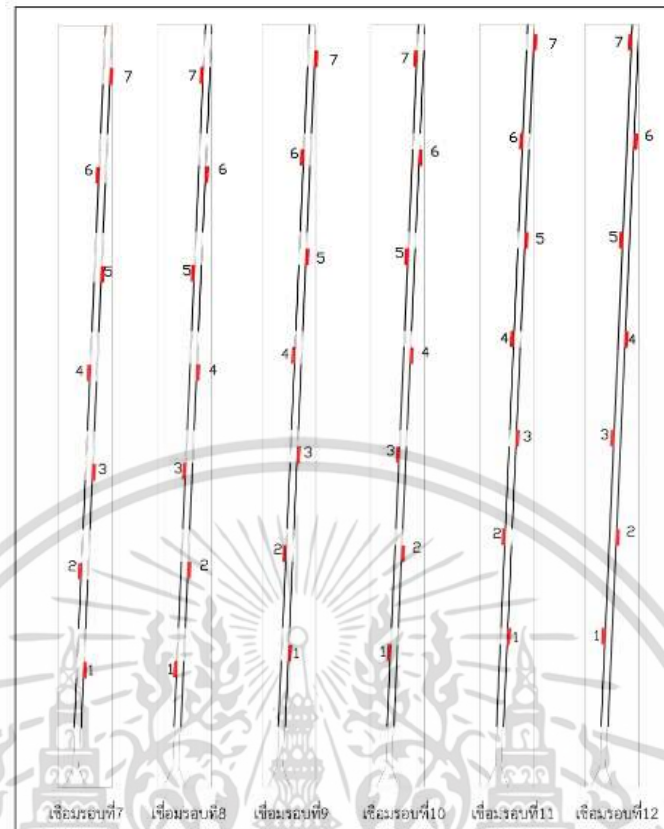
รูปที่ 4.22 นำท่อขึ้นติดตั้งบนจักรการเชื่อม

5. ทำการเชื่อมท่อกลุ่มที่ 1 และท่อกลุ่มที่ 2 ตามปัจจัยในตารางที่ 4.1 แนวเชื่อมต่อแนวยาว 65 มม. เว้นระยะห่างต่อแนวเชื่อม 325 มม. โดยทำการเชื่อมซ้ายขวาสลับกันทั้งหมด 12 รอบ 86 แนวเชื่อมจนเต็มตลอดแนวท่อ ตามรูป 4.23-4.24 ในการเชื่อมแต่ละรอบจะต้องรอให้เหล็กคายความร้อนโดยอุณหภูมิกลับสู่ภาวะปกติที่ประมาณ  $35^{\circ}\text{C}$  จึงจะเชื่อมรอบต่อไปได้



รูปที่ 4.23 การเชื่อมท่อรอบที่ 1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การเชื่อมต่อรอบที่ 7-12

6. หลังจากทำการเชื่อมเสร็จแล้วเกี่ยวกับท่อจนครบ ต้องปล่อยให้ท่อเย็นลงจนอุณหภูมิสู่สภาวะปกติประมาณ  $35^{\circ}\text{C}$  จึงทำการถอดอุปกรณ์รองในท่อและอุปกรณ์อื่นๆ ออก



รูปที่ 4.25 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ถอดอุปกรณ์รองในท่อออก

7. การทดสอบเบื้องต้นหลังการเชื่อมสันเกลียวเสร็จ โดยการนำลูกจรวดจำลองมาทำการลากผ่านท่อเหล็ก เพื่อทดสอบการโค้งตัวของท่อ



รูปที่ 4.27 นำลูกจรวดจำลองลากผ่านท่อยิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่อที่ยังที่เกิดจากการเชื่อม โดยมีปัจจัยในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 5 ปัจจัยดังนี้ กลุ่มที่ 1 กระแสเชื่อมที่ 150 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 21 โวลต์ ความเร็วในการเดินเชื่อม 300 มม./นาที กลุ่มที่ 2 กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 23 โวลต์ ความเร็วในการเดินเชื่อม 500 มม./นาที ส่วนอีก 2 ปัจจัยทั้ง 2 กลุ่มใช้เหมือนกัน คือ การเว้นระยะห่างระหว่างแนวเชื่อมที่ 325 มม. และการลดขนาดความหนาของสันเกลียวลงเหลือ 3 มม. สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดังนี้

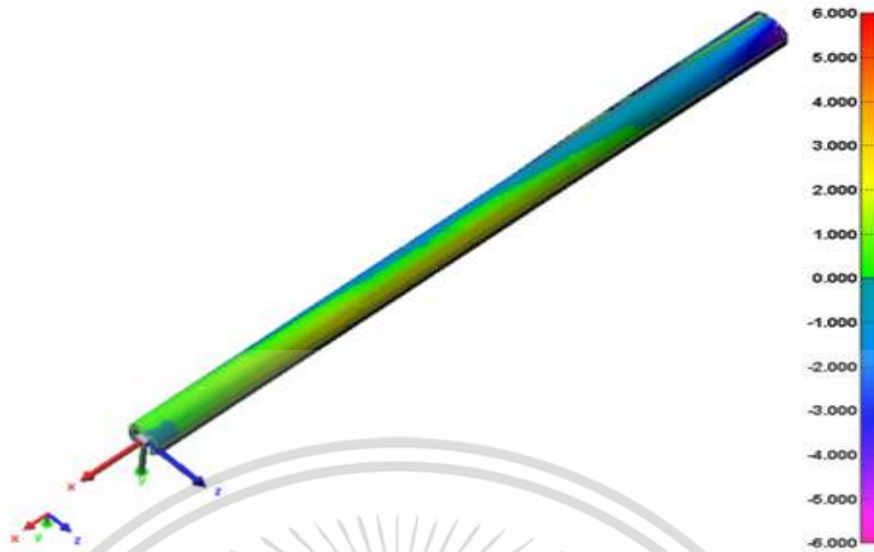
#### 5.1 ผลการสแกนท่อยิง กลุ่มที่ 1

##### 5.1.1 ผลการสแกนท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1



รูปที่ 5.1 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)



รูปที่ 5.3 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1

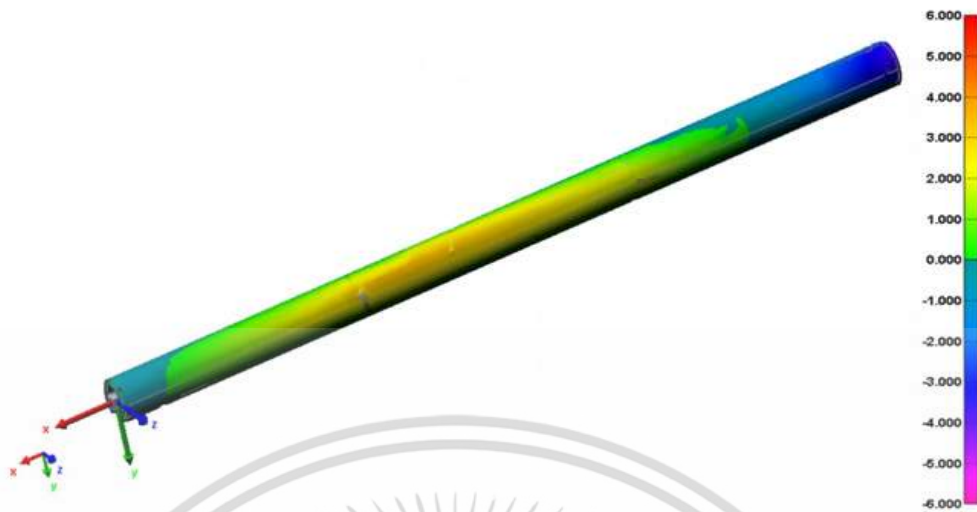
จากรูปที่ 5.1-5.3 แสดงให้เห็นผลการสแกนท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าท่อยิงเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้ -2.731 มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้ 2.933 มม.

#### 5.1.2 ผลการสแกนท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2

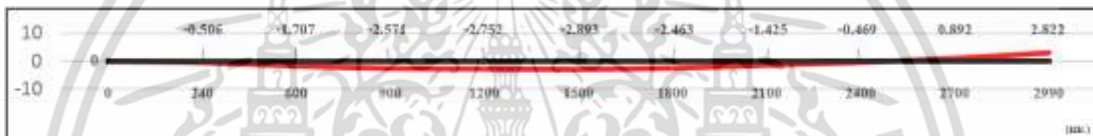


รูปที่ 5.4 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2 ในแนวด้านข้างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)



รูปที่ 5.6 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2

จากรูปที่ 5.4-5.6 แสดงให้เห็นผลการสแกนท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าท่อยิงเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านกลางช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้ -2.893 มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้ 2.822 มม.

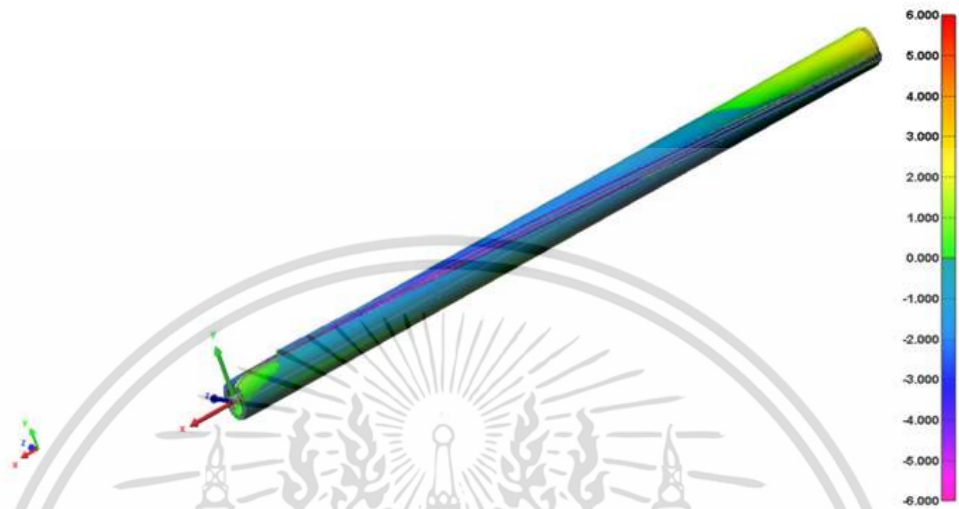
โดยค่าการโก่งตัวต่ำสุดและสูงสุดของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2 สรุปได้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าการโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2

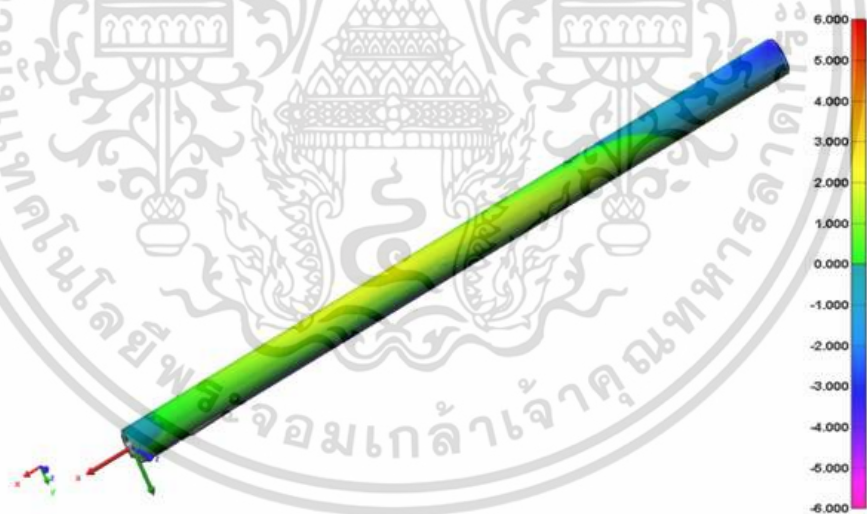
	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)
ท่อยิงสันเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 1 ท่อที่ 1	-2.731	2.933
ท่อยิงสันเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 1 ท่อที่ 2	-2.893	2.822
ค่าเฉลี่ยท่อยิงสันเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 1	-2.812	2.877

## 5.2 ผลการสแกนท่อยิง กลุ่มที่ 2

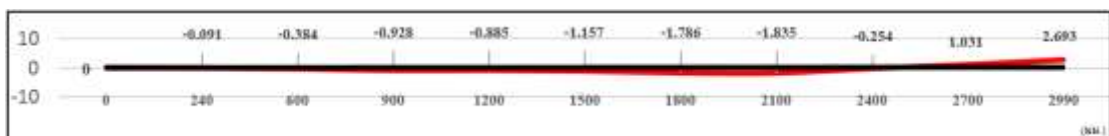
### 5.2.1 ผลการสแกนท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1



รูปที่ 5.7 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)



รูปที่ 5.8 ภาพ 3 มิติ ของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)

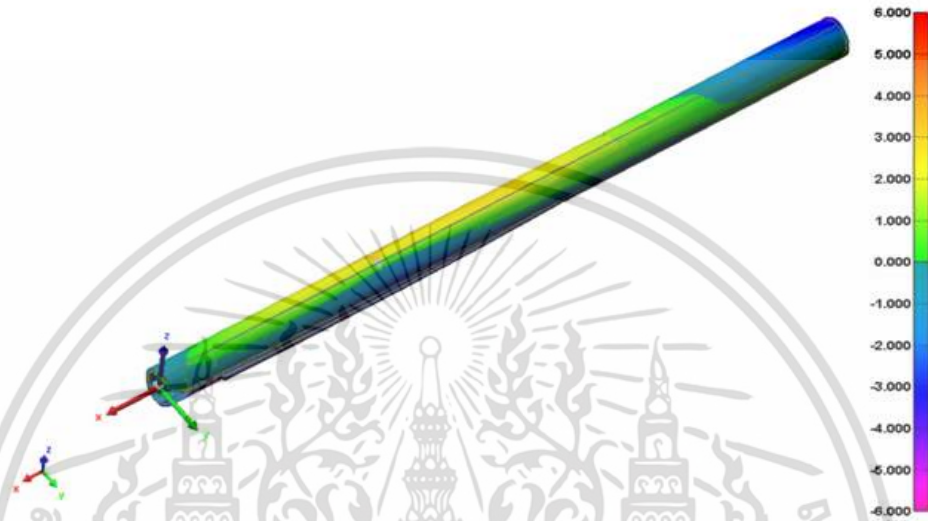


รูปที่ 5.9 ค่าความโก่งตัวของท่อยิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1

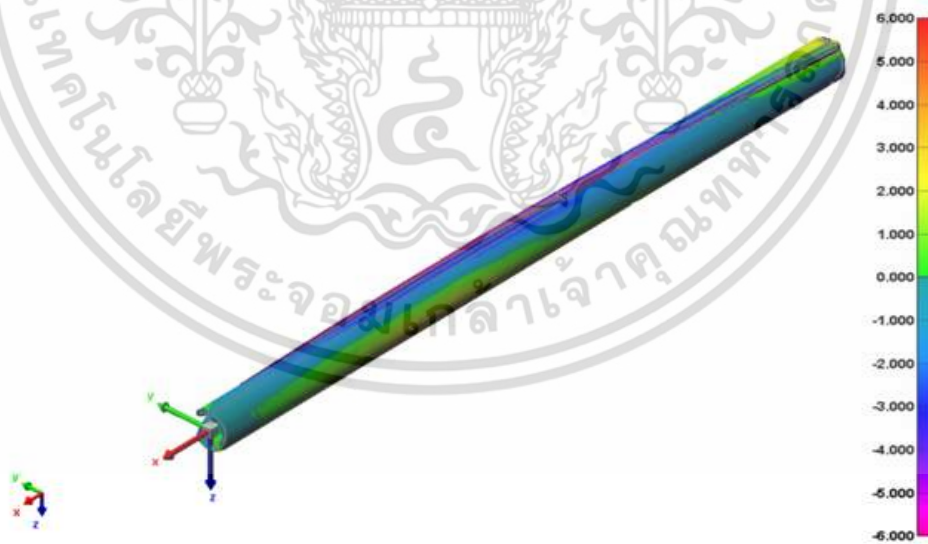
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.7-5.9 แสดงให้เห็นผลการสแกนท่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าท่ออิงเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้  $-1.835$  มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้  $2.693$  มม.

### 5.2.2 ผลการสแกนท่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2

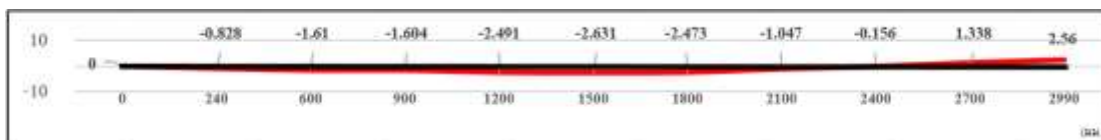


รูปที่ 5.10 ภาพ 3 มิติ ของท่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2 ในแนวด้านบนสันเกลียว (แกน Y)



รูปที่ 5.11 ภาพ 3 มิติ ของท่ออิงกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2 ในแนวด้านล่างสันเกลียว (ตรงข้ามแกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ค่าความโก่งตัวของท่อในกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2

จากรูปที่ 5.10-5.12 แสดงให้เห็นผลการสแกนท่อในกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าท่อเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่ด้านล่างช่วงกลางท่อตามความยาวของท่อ วัดค่าได้ -2.631 มม. และหลังจากนั้นมีการโก่งตัวขึ้นสูงสุดในช่วงปลายท่อ วัดค่าได้ 2.560 มม.

โดยค่าการโก่งตัวต่ำสุดและสูงสุดของท่อในกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2 สรุปลงได้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าการโก่งตัวของท่อในกลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1 และท่อที่ 2

	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)
ท่อยิงเส้นเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 2 ท่อที่ 1	-1.835	2.693
ท่อยิงเส้นเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 2 ท่อที่ 2	-2.631	2.560
ค่าเฉลี่ยท่อยิงเส้นเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 2	-2.233	2.626

เมื่อนำผลการสแกน 3 มิติ ของท่อยิงแบบเดิมที่มีเส้นเกลียว 5 มม. จำนวน 2 ท่อ จากตารางที่ 1.1 (บทที่ 1) ที่เกิดปัญหาการโก่งตัวของท่อยิงมาเปรียบเทียบกับผลการสแกน 3 มิติ ของท่อยิงที่ออกแบบการทดลองและทำการทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าการโก่งตัว และเพื่อเป็นการทดสอบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อมของการทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม สามารถลดการโก่งตัวของท่อยิงได้หรือไม่ ดังสรุปลงได้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าการโก่งตัวเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุดของท่อยิง

	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)
ค่าเฉลี่ยท่อยิงเส้นเกลียว 5 มม.	-3.418	4.606
ค่าเฉลี่ยท่อยิงเส้นเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 1	-2.812	2.877
ค่าเฉลี่ยท่อยิงเส้นเกลียว 3 มม. กลุ่มที่ 2	-2.233	2.626

## บทที่ 6

# สรุปผลการศึกษา

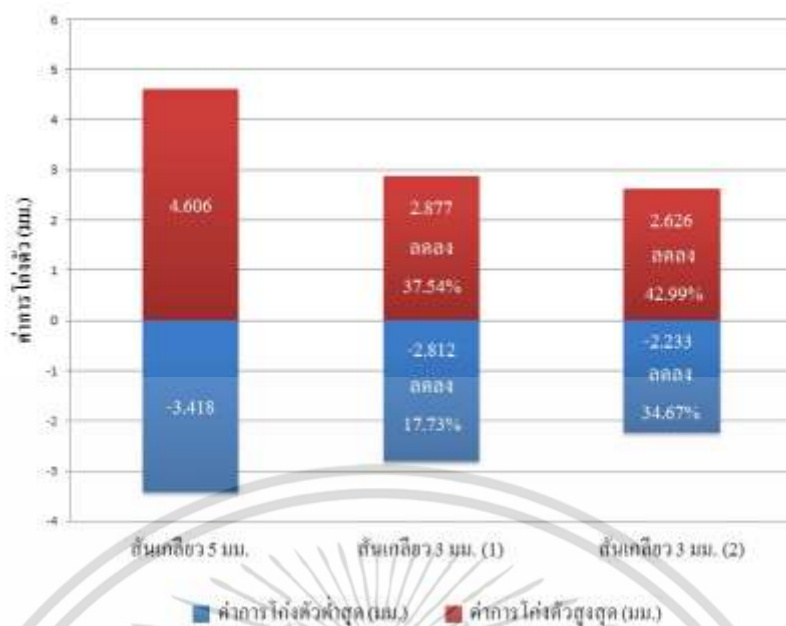
### 6.1 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่ออิงจรวดจากระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก พบว่าวิธีการเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อมเพื่อเป็นการลดความร้อนที่จะเกิดกับท่ออิงขณะทำการเชื่อมมีผลทำให้ท่ออิงลดการโก่งตัวลงได้

ในขั้นตอนการทดสอบได้ทำการเชื่อมท่ออิงด้วยกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก โดยมีการกำหนดขนาดหลอดเชื่อมไว้ที่ 0.8 มม. จัดตัวแปรในการเชื่อมไว้เป็น 2 กลุ่ม ภายหลังจากการเชื่อมเสร็จนำท่ออิงทั้งหมดมาทำการทดสอบความโก่งตัวของท่ออิง โดยใช้เครื่องสแกน 3 มิติ เปรียบเทียบกับท่ออิงแบบเดิมที่มีสันเกลียว 5 มม. ที่เกิดปัญหาการโก่งตัว จากผลการสแกนพบว่า ท่ออิงในการทดสอบกลุ่มที่ 2 ที่ใช้กระแสเชื่อม 190 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าที่ 23 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อมที่ 500 มม./นาที การเว้นระยะห่างระหว่างรอยเชื่อมที่ 325 มม. และการลดขนาดความหนาสันเกลียวลงเหลือ 3 มม. มีความโก่งตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับท่ออิงกลุ่มที่ 1 และท่ออิงแบบเดิมสันเกลียว 5 มม. โดยมีผลดังแสดงตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าการโก่งตัวเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุดของท่ออิงเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวต่ำสุด (%)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (%)
ค่าเฉลี่ยท่ออิงสันเกลียว 5 มม.	-3.418	100.00	4.606	100.00
ค่าเฉลี่ยท่ออิงสันเกลียว 3 มม.กลุ่มที่ 1	-2.812	82.27	2.877	62.46
ค่าเฉลี่ยท่ออิงสันเกลียว 3 มม.กลุ่มที่ 2	-2.233	65.33	2.626	57.01



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าการโก่งตัวสูงสุดต่ำสุดของท่อยิง

จากรูปที่ 6.1 พบว่าค่าการโก่งตัวต่ำสุดของท่อยิงมีค่าลดลงจาก -3.418 มม. ในท่อยิงที่มีเส้นเกลียว 5 มม. เหลือ -2.812 มม. หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การโก่งตัวลดลงได้ 17.73% ในกลุ่มที่ 1 และเหลือ -2.233 มม. หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การโก่งตัวลดลงได้ 34.67% ในกลุ่มที่ 2 และค่าการโก่งตัวสูงสุดของท่อยิง มีค่าลดลงจาก 4.606 มม. ในท่อยิงที่มีเส้นเกลียว 5 มม. เหลือ 2.877 มม. หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การโก่งตัวลดลงได้ 37.54% ในกลุ่มที่ 1 และเหลือ 2.626 มม. หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การโก่งตัวลดลงได้ 42.99% ในกลุ่มที่ 2

สรุปได้ว่าท่อยิงในกลุ่มที่ 2 มีค่าการโก่งตัวต่ำสุดและสูงสุดน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอีก 2 กลุ่ม

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา สามารถพบปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของท่อยิงจรวดที่เกิดจากการเชื่อมแม่เหล็กได้ แต่ท่อยิงจรวดที่ปรับเปลี่ยนปัจจัยในการเชื่อมแล้วก็ยังมีค่าการโก่งตัวอยู่ ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรในการเชื่อมก็ตาม ในอนาคตถ้ามีการผลิตเป็นจำนวนมาก ควรปรับปรุงอุปกรณ์จับยึดท่อยิงจรวดขณะทำการเชื่อมที่มีความแข็งแรงมากกว่านี้เพื่อลดการบิดตัวโก่งงอของท่อยิงจรวด เพราะอุปกรณ์จับยึดสามารถควบคุมท่อยิงจรวดให้อยู่ในอุปกรณ์จับยึดโดยไม่สามารถขยายตัวและหดตัวได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญญาภรณ์ วาณิชยชาติและอนาลโย กอสกุล. 2014. วารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ Volume 3 Issue 16 : Oct.-Dec. 2014. กรุงเทพฯ : กรังด์ปรีซ์ อินเตอร์ เนชั่นแนล.
- [2] คະเนย์ วรณโท. 2534. คู่มือการเชื่อมโลหะในระบบ GMAW. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สวัสดิการสถาบันพัฒนาเครื่องจักรกลและโลหะการ.
- [3] อนุศักดิ์ ฉิ้นไพศาล. 2555. งานเชื่อมและโลหะแผ่นเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [4] กิตติ วันดี สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ และวิบูลย์ ตั้งวโรตมณกุล. 2559. “การลดปัญหาการโก่งตัวของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 12 (1) : 1-7
- [5] กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน. 2545. ทฤษฎีการเชื่อมมิก/แม็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : เลิศวิไล แอนด์ซินส์.
- [6] ยุคล จุลอุทัย. เทคโนโลยีการเชื่อมมิก/แม็ก&ฟลักซ์คอร์ เล่ม 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] มงคล เพิ่มฉลาด. 2556. วิศวกรรมเชื่อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- [8] กฤษณ์ อินทรนนท์. 2558. พื้นฐานช่างโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี : คอร์ฟังก์ชั่น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายเอกชัย ปุชนียกุล
เกิดวันที่	วันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2512
ที่อยู่	เลขที่ 26/188 หมู่ที่ 3 ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบริหารธุรกิจบัณฑิต คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกัน ประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ที่ทำงาน	บริษัท บริษัทอวอร์ดสาทรกรรม จำกัด ตำแหน่งกรรมการผู้จัดการ เลขที่ 28/4 หมู่ที่ 4 ถนนเอกชัย ตำบลนาดี อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000 034-424741, 081-8417577

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้