

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานในการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.6 นิยามคำศัพท์	3
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 กรรมวิธีการเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค (Gas Metal Arc Welding: GMAW) หรือการเชื่อมมิกแม็ก (MIG/MAG Welding)	5
2.2 การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิม	12
2.3 แผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอน	16
2.4 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม	18
2.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน	19
2.6 รอยเชื่อมเสื่อมลง	20
2.7 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม	22
2.8 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9	อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม 26
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
<b>3.</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย 33</b>
3.1	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล 33
3.2	กำหนดปัจจัยการทดลอง 33
3.3	วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย 33
3.4	การเตรียมชิ้นงานเชื่อม 37
3.5	การทดลองเบื้องต้น 38
3.6	การออกแบบการทดลอง 39
3.7	การดำเนินการทดลอง 40
3.8	การตรวจสอบและเก็บข้อมูล 41
3.9	สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล 43
3.10	การแปรผล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์ 44
<b>4.</b>	<b>ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 45</b>
4.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเบื้องต้น (Pilot study) 45
4.2	การวิเคราะห์ตัวแปรในการเชื่อมต่อสมบัติทางกลด้าน ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 46
4.3	การวิเคราะห์ตัวแปรในการเชื่อมต่อสมบัติทางกลด้าน ความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก (Yield Point) 48
4.4	การวิเคราะห์ปัจจัยในการเชื่อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) และมหภาค (Macrostructure) 51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>60</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	60
5.2 อภิปรายผล	62
5.3 ข้อเสนอแนะ	63
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>64</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ก. ข้อมูลการวิจัย	67
ข. รูปภาพชิ้นงานในการทดลอง	75
ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	78
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>90</b>

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงรหัสกลุ่มของลวดเชื่อมแต่ละประเภท ตามมาตรฐาน AWS	8
2.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม	8
3.1	แสดงแผนผังการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)	38
3.2	แสดงแผนผังการออกแบบการทดลอง	40
4.1	แสดงผลรวมกำลังสององศาอิสระ ค่า F และค่านัยสำคัญของสาเหตุความผันแปรของการทดลอง แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรทั้ง 2 ชนิด ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลด้าน ความเค้น แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) โดยใช้สถิติ One-Way ANOVA	47
4.2	แสดงผลรวมกำลังสององศาอิสระ ค่า F และค่านัยสำคัญของสาเหตุความผันแปรของการทดลอง แสดงผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรทั้ง 2 ชนิด ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกล ด้านความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก(Yield Point) โดยใช้สถิติ One-Way ANOVA	49
ก.1	ผลการทดลองค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	68
ก.2	ผลการทดลองค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก (Yield Point)	69
ก.3	ตารางวิเคราะห์ ANOVA ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	70
ก.4	ตารางวิเคราะห์ ANOVA ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก (Yield Point)	72
ก.5	แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุลวดเชื่อม (Filler metal)	73
ก.6	แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม (Base metal) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	74
ก.7	แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม (Base metal) เหล็กกล้าไร้สนิม 304	74

## รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แสดงหลักการอาร์คของกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค	6
2.2	ตัวอย่างของชนิดสแตนเลสในกลุ่มนี้ ได้แก่ 630 631 และ 17-4PH	15
2.3	โครงสร้างไฮเปอร์ดูเพล็กซ์	16
2.4	แผนภาพสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน	17
2.5	ผลของคุณสมบัติกายภาพต่อการเชื่อม	18
2.6	เปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม	19
2.7	แสดงลักษณะของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน	20
2.8	แสดงรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก A คือ บริเวณคาร์ไบด์ตกผลึก B คือ บริเวณอบละลาย	20
2.9	แสดงการกระจายตัวของโครเมียมที่กระจุกตัวใกล้กับขอบเกรน	21
2.10	การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงลอยตัว	23
2.11	การพาของโลหะหลอมเหลวจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23
2.12	การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงอันเนื่องมาจากความตึงผิว	24
2.13	การเปลี่ยนแปลงทิศทางการพาโลหะหลอมเหลว	25
2.14	แสดงลักษณะเดบิโตของเกรนของโลหะเชื่อม	26
2.15	แสดงลักษณะการแพร่กระจายของวงจรรความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน	27
2.16	แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมในกรณีใช้ความเร็วต่างกัน	28
3.1	เครื่องเชื่อม CIGWELD TRANSMIG 400	34
3.2	เครื่องตัดแก๊สแบบเส้นตรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ประกอบกับหัวเชื่อม	34
3.3	เครื่องกัด LiLian	35
3.4	เครื่องทดสอบแรงดึง Shimadzu Autograf รุ่น AG-25 TB	35
3.5	กล้องจุลทรรศน์	36
3.6	เครื่องขัดผิวมัน	36
3.7	แสดงการบากหน้างานและ แสดงการวางหัว-ท้ายด้วยแผ่นเหล็กกล้า	37
3.8	แสดงวิธีการเชื่อมซ้อนแนว	39
3.9	แสดงการออกแบบชิ้นงานเชื่อม เพื่อตัดทำการทดสอบความแข็งแรงดึงและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	42

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.10	แสดงการออกแบบการทดสอบชิ้นงานเชื่อม	42
4.1	กราฟการทดสอบการแตกแฉกปฏิกิริยาความเค้นแรงดึงสูงสุดของการทดลองเบื้องต้น	45
4.2	กราฟการทดสอบการแตกแฉกปฏิกิริยาความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	46
4.3	แสดงกราฟอิทธิพลร่วม ของตัวแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) <sup>59</sup>	48
4.4	กราฟการทดสอบการแตกแฉกปฏิกิริยาความเค้นแรงดึงสูงสุดที่จุดคราก (Yield Point)	49
4.5	แสดงกราฟอิทธิพลร่วม ของตัวแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อความเค้นแรงดึงสูงสุด ที่จุดคราก (Yield Point)	50
4.6	แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาค บริเวณ Fusion Zone, Heat Affected Zone (HAZ) และ Base Metal	51
4.7	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม ของชิ้นงานทดสอบที่มีค่า ความเค้นแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	52
4.8	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด เหล็กกล้าคาร์บอน กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	54
4.9	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด เหล็กกล้าคาร์บอน กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	54
4.10	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณโลหะงาน ของชิ้นงานทดสอบ ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และเหล็กกล้าไร้สนิม กำลังขยาย 500 เท่า	55
4.11	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณโลหะงาน(Base metal) และบริเวณ ผลกระทบร้อน (HAZ) ด้านเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ชิ้นงานขาด กำลังขยาย 100 เท่า	56
4.12	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม ของชิ้นงานทดสอบ ที่มีค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	57

## รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.13	แสดงลักษณะโครงสร้างจุดภาค บริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	58
4.14	แสดงลักษณะโครงสร้างจุดภาค บริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด เหล็กกล้าไร้สนิม กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า	59
ข.1	เตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม	76
ข.2	ทำการเชื่อมชิ้นงาน	76
ข.3	ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว	76
ข.4	ใช้เครื่อง wire cut ตัดทำชิ้นทดสอบ	76
ข.5	กัดแนวเชื่อมออกทั้งสองด้าน	76
ข.6	ชิ้นงานที่กัดเสร็จแล้วเตรียมทดสอบ	76
ข.7	ชิ้นงานที่ทดสอบแรงดึงมีค่าสูงสุด-ต่ำสุด	77
ข.8	ตัดดูโครงสร้างจุดภาค	77
ข.9	หาปริมาณส่วนผสมทางเคมี	77

## รายการสัญลักษณ์

ER	=	Electrode Rod
M	=	แรงจากแรงดึงผิวของ โลหะเหลว
E	=	แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
B	=	แรงลอยตัว
$\eta$	=	ประสิทธิภาพของการเชื่อม
$\gamma$	=	สัมประสิทธิ์แรงดึงผิว
FN	=	Ferrite Number
r	=	ระยะรัศมีจากจุดอาร์ค
T	=	อุณหภูมิ
$\rho$	=	ความหนาแน่น
q	=	ความหนาแน่นของพลังงาน
CS	=	Low Carbon Steel
SS	=	Stainless Steel
H	=	Heat Affected Zone
W	=	Weld

## ประมวลศัพท์และคำย่อ

Aerodynamic Drag Force	=	แรงดึงจากอากาศพลศาสตร์
Applied stress	=	ความเค้นจากการใช้งาน
Affinity	=	การรวมตัวสัมพันธ
Anodic	=	ขั้วบวก
AISI	=	American Iron and Steel Institute
ASME	=	American Society of Mechanical Engineers
Autogenous Welding	=	การเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม
Base Metal	=	โลหะฐาน
Buoyancy Force	=	แรงลอยตัว
Cathodic	=	ขั้วลบ
Carbide Crystallized	=	การอบคืนตัวของคาร์ไบด์
Depleted Zone	=	บริเวณการตกผลึก
Density	=	ความหนาแน่น
Diffusion	=	กระบวนการแพร่
Electromagnetic Force	=	แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
Electrochemical	=	ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
Elongation	=	การยืดตัว
Electromagnetic Force	=	แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก
FCC	=	Face Centered Cubic
Fluid Flow	=	การไหลของโลหะหลอมเหลว
Fusion Line	=	เส้นแบ่งขอบแนวเชื่อม
GMAW	=	Gas Metal Arc Welding
Grain Boundary	=	ขอบเกรน
Hardness	=	ความแข็ง
Heat Input	=	ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน
Heat Treatment	=	กรรมวิธีทางความร้อน

## ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

Heat Effect Zone	=	บริเวณกระทบทางความร้อน
Inert Gas	=	แก๊สเฉื่อย
Intergranular Corrosion	=	การกัดกร่อนตามขอบเกรน
Melting point	=	จุดหลอมละลาย
Passive State	=	ความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาใด ๆ
Power Density Distribution	=	การกระจายความหนาแน่นของพลังงาน
Physical Properties	=	สมบัติทางกายภาพ
Pushing	=	เทคนิคการเชื่อมแบบเดินไปข้างหน้า
Root	=	แนวเชื่อมราก
Residual	=	ความเค้นตกค้าง
SMAW	=	การเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์
Solution Part	=	บริเวณส่วนที่หลอมละลาย
Spay Arc	=	การฟ่นละอองของหยดน้ำโลหะเติม
Stainless Steel	=	เหล็กกล้าไร้สนิม
Surface Tension Driven Flow	=	แรงจากแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลว
Step Welding	=	การเชื่อมแบบเว้นระยะ
Thermal Expansion	=	การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
Thermal Conductivity	=	การนำความร้อน
Thermal/Welding stress	=	ความเค้นเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม
Unstable	=	ไม่คงตัว
Ultimate Tensile Strength	=	ความเค้นแรงดึงสูงสุด
Weld Pool	=	แอ่งโลหะรอยเชื่อม
Weld Pool Convection	=	การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม
Yield Point	=	ความเค้นแรงดึงจุดคราก