สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ฌ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฑ

บทที่

1.	**บทนำ**	**1**
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
	1.3 สมมุติฐานในการวิจัย	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
	1.5 ขอบเขตงานวิจัย	3
	1.6 นิยามคำศัพท์	4
2.	**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	**5**
	2.1 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม	5
	2.2 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม	6
	2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค	7
	2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)	9
	2.5 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม	11
	2.6 การควบคุมปริมาณความร้อนในการเชื่อม (Heat input)	13
	2.7 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม	13
	2.8 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ได้หลังการเชื่อม	14
	2.9 รอยเชื่อมเสื่อมลง	16
	2.10 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11 การแตกร้าวร้อน (Hot cracking) 19

2.12 การกัดกร่อนตามขอบเกรน 20

2.13 การเลือกใช้กระบวนการเชื่อม 21

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

3. วิธีดำเนินการวิจัย 23

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล 23

3.2 กำหนดปัจจัยการทดลอง 23

3.3 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย 24

3.4 การทดลองเบื้องต้น (Pilot Study) 27

3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) 28

3.6 การเตรียมชิ้นงานทดลอง 28

3.7 การดำเนินการทดลอง 31

3.8 การตรวจสอบและเก็บข้อมูล 33

3.9 สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล 38

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 40

4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่อความแข็ง 40

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (HAZ) 42

4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติบริเวณแนวเชื่อม (Welded) 44

4.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด 45

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 61

5.1 สรุปผลการทดลอง 61

5.2 อภิปรายผล 63

5.3 ข้อเสนอแนะ 65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	**67**
ภาคผนวก	**70**
ก. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม	71
ข. ข้อมูลการทดลอง	73
ค. รูปโครงสร้างมหภาคและจุลภาค	76
ง. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	85
ประวัติผู้วิจัย	**100**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนนิติค เกรด AISI 304 8

3.1 แสดงตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบหาประสิทธิภาพในการเชื่อม 27

3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมจากการทดลองทดสอบ 28

4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรตอบสนองต่อความแข็ง (Hardness) บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (HAZ) 42

4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรตอบสนองต่อความแข็ง (Hardness) บริเวณแนวเชื่อม (Welded) 44

4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด 47

4.4 แสดงตารางการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรตอบสนองต่อ ความแข็งแรงดึงจุดคราก 53

4.5 แสดงความแตกต่างของระดับของความเร็วในการเชื่อม (Speed) โดยวิธี LSD ต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point) 54

ข.1 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งบริเวณเนื้องาน(Base Metal) 72

ข.2 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (HAZ) 73

ข.3 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม(Welded) 74

ข.4 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 75

ข.5 ข้อมูลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก Yield Point 75

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steels)	10
2.2	ผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม	11
2.3	เปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม กับเหล็กกล้าคาร์บอน	12
2.4	แสดงลักษณะการแผ่กระจายของวงจรความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน	14
2.5	แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมกรณีใช้ความเร็วต่างกัน	14
2.6	แผนภูมิเดอลองแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม	15
2.7	แผนภาพเชฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler Diagram)	16
2.8	แสดงรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค A คือ บริเวณคาร์ไบด์ตกผลึก B คือบริเวณอบละลาย	17
2.9	แสดงการกระจายตัวของโครเมียมที่กระจุตัวใกล้กับขอบเกรน	17
2.10	แสดงลักษณะเติบโตของเกรนของโลหะเชื่อม	19
2.11	แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะรอยเชื่อม 304	20
2.12	แสดงลักษณะของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน	21
3.1	เครื่องเชื่อมทิก Long Well Tig 215 P	23
3.2	เครื่องตัดแก๊สแบบเส้นตรงขับด้วยมอเตอร์TANAKA รุ่น KT 5 NX	24
3.3	แก๊สอาร์กอน 99.99 %	24
3.4	เครื่องขัดชิ้นงาน	24
3.5	เครื่องเลื่อยกล รุ่น CREAT CAPTAIN	25
3.6	เครื่องทดสอบแรงดึง AG – 25 TB	25
3.7	กล้องจุลทรรศน์	25
3.8	เครื่อง Wire Cut	26
3.9	เครื่องกัดบากหน้างาน	26
3.10	เครื่องทดสอบความแข็ง Rockwell Testing Scale A Preload 60 kp Penetrator Diamol Cone 120 ^{o}	27

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.11	แสดงการตัดชิ้นงาน	28
3.12	แสดงการบากหน้างานมุม 15˚	29
3.13	แสดงวิธีการต่อชิ้นงานแบบต่อชนบากหน้างานมุมรวม 30 องศา	29
3.14	แสดงวิธีการเชื่อมยึดหัว-ท้ายชิ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้า	30
3.15	แสดงวิธีการเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และลวดเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด (2205)	31
3.16	แสดงการปรับอัตราการไหลของแก๊สในการเชื่อม	31
3.17	ลักษณะการวางลิ้มและชิ้นงาน	32
3.18	แสดงลักษณะการเชื่อมและทิศทางในการเชื่อม	32
3.19	ลักษณ์งานที่เชื่อมเสร็จและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	33
3.20	การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Wire Cut	34
3.21	รูปชิ้นงานเตรียมทดสอบแรงดึง	34
3.22	รูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ขาดจากกัน	35
3.23	ลักษณ์ภาคตัดของชิ้นงานที่ขาดจากกัน	35
3.24	แสดงการขัดชิ้นงานด้วยการดายทราย	36
3.25	ลักษณ์ชิ้นงานเมื่อกัดด้วยกรด	36
3.26	แสดงกล้องจุลทรรศน์(Microscopy)	37
3.27	ชิ้นงานที่ถ่ายจากกล้องด้วยกำลังขยาย 8 เท่า	37
3.28	แสดงตำแหน่งบริเวณที่ตรวจสอบค่าความแข็ง	38
4.1	การแจกแจงข้อมูลการทดสอบค่าความแข็ง บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน(HAZ)	41
4.2	การแจกแจงข้อมูลการทดสอบค่าความแข็ง บริเวณแนวเชื่อม(Welded)	41
4.3	แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างกระแสเชื่อม (Amp) และความเร็วในการเชื่อม (Speed) ต่อค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน(HAZ)	43

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.4 แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างกระแสเชื่อม (Amp) และความเร็วในการเชื่อม (Speed) ต่อค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม 45

4.5 การทดสอบการแจงแจงข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 46

4.6 แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างกระแสเชื่อม (Amp) และความเร็วในการเชื่อม (Speed) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) 48

4.7 การทดสอบการแจงแจงข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point) 49

4.8 แสดงกราฟอิทธิพลร่วม (Interaction) กระแสเชื่อม (Amp) ความเร็วในการเชื่อม (Speed) ค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point) 52

4.9 ก. แสดงลักษณะของโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม ข.แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะงาน 304 (Baste Metal) ค.แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของรอยเชื่อม ง. แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 22054.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุด ที่ต่ำสุด 54

4.10 แสดงลักษณะของโครงสร้างมหภาค ข.แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะงาน (Baste Metal) ค.แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของรอยเชื่อม ง. แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 56

4.11 ก. แสดงลักษณะของโครงสร้างบริเวณโลหะงาน 304 (Baste Metal) ข.แสดงลักษณะของโครงสร้างบริเวณ HAZ ของรอยเชื่อม ค. แสดงโครงสร้างบริเวณบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 58

4.12 ก. แสดงลักษณะของโครงสร้างบริเวณโลหะงาน (Baste Metal) ข.แสดงลักษณะของโครงสร้างบริเวณ HAZ ของรอยเชื่อม ค. แสดงโครงสร้างบริเวณบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 59

ค.1 รูปชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จ 77

ค.2 รูปชิ้นงานที่เตรียมขัดส่องโครงสร้าง 77

ค.4 รูปชิ้นงานที่ตัดด้วย Wire Cut เพื่อเตรียมทดสอบแรงดึง 77

ค.5 รูปชิ้นงานที่ขาดเนื่องจากการทดสอบแรงดึง 78

ค.6 รูปชิ้นงานที่มี Ultimate Tensile Strength สูงสุด 78

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

ค.7 รูปชิ้นงานที่มี Ultimate Tensile Strength ต่ำสุด 78
ค.8 รูปชิ้นงานที่มีค่า Ultimate Tensile Strength ต่ำสุดกำลังขยาย 8 เท่า 79
ค.9 รูปชิ้นงานที่มีค่า Ultimate Tensile Strength สูงสุดกำลังขยาย 8 เท่า 79
ค.10 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะงาน 304 80
ค.11 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ 80
ค.12 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 80
ค.13 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะงาน 304 81
ค.14 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ 81
ค.15 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 81
ค.16 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะงาน 304 82
ค.17 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณHAZ 82
ค.18 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 82
ค.19 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะงาน 304 83
ค.20 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ 83
ค.21 แสดงลักษณ์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม 2205 84
ง.1 เครื่องเชื่อมทิก Long Well Tig 215 P 86
ง.2 เครื่องตัดแก๊สแบบเส้นตรงขับด้วยมอเตอร์TANAKA รุ่น KT 5 NX 86
ง.3 เครื่องขัดชิ้นงาน 87
ง.4 เครื่องเลื่อยกล รุ่น CREAT CAPTAIN 87
ง.5 เครื่องทดสอบแรงดึง AG – 25 TB 87
ง.6 กล้องจุลทรรศน์ 88
ง.7 เครื่อง Wire Cut 88
ง.8 เครื่องกัดบากหน้างาน 88

ประมวลศัพท์และคำย่อ

AISI	=	American Iron and Steel Institute
ASME	=	American Society of Mechanical Engineers
Autogenenous Welding	=	การเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม
Base Metal	=	โลหะฐาน
Carcide Crystallized	=	การอบคืนตัวของคาร์ไบด์
Depleted Zone	=	บริเวณการตกผลึก
Density	=	ความหนาแน่น
Hot Cracking	=	การแตกร้อน
Diffusion	=	กระบวนการแพร่
Electromagnetic Force	=	แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
Electrochemical	=	ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
Elongation	=	การยืดตัว
Electromagnatic Force	=	แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก
FCC	=	Face Centered Cubic
Fluid Flow	=	การไหลของโลหะหลอมเหลว
Fusion Line	=	เส้นแบ่งขอบแนวเชื่อม
GTAW	=	Gas Tungsten Arc Welding
Grain Boundary	=	ขอบเกรน
Hardness	=	ความแข็ง
Heat Input	=	ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน
Heat Treatment	=	กรรมวิธีทางความร้อน
Heat Effect Zone	=	บริเวณกระทบทางความร้อน
Inert Gas	=	แก๊สเฉื่อย
Intergranular Corrosion	=	การกัดกร่อนตามขอบเกรน
Melting point	=	จุดหลอมละลาย
Passive State	=	ความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาใด ๆ
Power Density Distribution	=	การกระจ่ายความหนาแน่นของพลังงาน
Physical Properties	=	สมบัติทางกายภาพ

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

Pushing	=	เทคนิคการเชื่อมแบบเดินไปข้างหน้า
Root	=	แนวเชื่อมราก
Residual	=	ความเค้นตกค้าง
SMAW	=	การเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์
Solution Part	=	บริเวณส่วนที่หลอมละลาย
Stainless Steel	=	เหล็กกล้าไร้สนิม
Thermal Expansion	=	การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
Thermal Conductivity	=	การนำความร้อน
Thermal/Welding stress	=	ความเค้นเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม
Unstable	=	ไม่คงตัว
Ultimate Tensile Strength	=	ความแข็งแรงดึงสูงสุด
Weld Pool	=	แอ่งโลหะรอยเชื่อม
Weld Pool Convection	=	การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม
Yield Point	=	ความแข็งแรงดึงจุดคราก