

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน ( Output )	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ ( Outcome )	1
1.5 ขอบเขต	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน	4
2.2 โครงสร้างจุลภาค	6
2.3 การออกแบบการทดลอง	10
2.4 วิธีการอบชุบ	10
2.5 การชุบแข็ง	10
2.6 เวลาที่รักษาไว้ ณ อุณหภูมิที่ต้องการ	15
2.7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	15
2.8 การทดสอบความแข็ง	21
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	24

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 การเตรียมชิ้นงาน	37
3.2 การอบชุบชิ้นงานตามแผนที่วางไว้	38
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	38
3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	38
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	40
4.2 ผลการทดสอบความแข็ง	46
4.3 ผลการทดสอบแรงดึง	54
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)	70
4.5 การวิเคราะห์การถดถอย	78
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลโครงการ	84
5.1 โครงสร้างจุลภาค	84
5.2 คุณสมบัติเชิงกล	84
5.3 ปัญหาที่พบ ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	90
ประวัติผู้วิจัย	95

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพสมดุลเหล็ก – คาร์บอน	5
2.2 โครงสร้างจุลภาค เฟอไรต์	6
2.3 โครงสร้างเฟอไรต์และเพิร์ลไลต์	7
2.4 โครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์	8
2.5 โครงสร้างมาร์เทนไซต์	9
2.6 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง	15
2.7 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	16
2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	18
2.9 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	19
2.10 ภาพแสดงการกดบนพื้นผิวชิ้นงาน	22
2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง	23
2.12 การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรนและขอบเกรน	24
2.13 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะ	25
3.1 ชิ้นงานทดสอบ	37
4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการอบเตนไนต์ซึ่งด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก) ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	40
4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบเตนไนต์ซึ่ง 750 °C ที่เวลา 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	41
4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบเตนไนต์ซึ่ง 750 °C ที่เวลา 20 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	41
4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบเตนไนต์ซึ่ง 750 °C ที่เวลา 40 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	41
4.5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบเตนไนต์ซึ่ง 800 °C ที่เวลา 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	42
4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบเตนไนต์ซึ่ง 800 °C ที่เวลา 20 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	42

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบสแตนไนตซึ่ง $800^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 40 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	42
4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบสแตนไนตซึ่ง $850^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	43
4.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบสแตนไนตซึ่ง $850^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 20 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	43
4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการอบสแตนไนตซึ่ง $850^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 40 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง(ก)ที่กำลังขยาย 200 เท่า(ข)ที่กำลังขยาย 500 เท่า	43
4.11 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบเป็นเวลา $10$ นาที อุณหภูมิ $750,800$ และ $850^{\circ}\text{C}$	47
4.12 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบเป็นเวลา $20$ นาที อุณหภูมิ $750,800$ และ $850^{\circ}\text{C}$	48
4.13 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบเป็นเวลา $40$ นาที อุณหภูมิ $750,800$ และ $850^{\circ}\text{C}$	49
4.14 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบที่ อุณหภูมิ $750^{\circ}\text{C}$ เวลา $10,20$ และ $40$ นาที	50
4.15 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบที่ อุณหภูมิ $800^{\circ}\text{C}$ เวลา $10,20$ และ $40$ นาที	51
4.16 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและชิ้นงานที่อบชุบ ที่อุณหภูมิ $850^{\circ}\text{C}$ เวลา $10,20$ และ $40$ นาที	52
4.17 กราฟทดสอบแรงดึงที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอบสแตนไนตซึ่ง	54
4.18 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิอบสแตนไนตซึ่ง $750^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 10 นาที	54
4.19 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิอบสแตนไนตซึ่ง $750^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 20 นาที	55
4.20 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิอบสแตนไนตซึ่ง $750^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 40 นาที	55
4.21 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิอบสแตนไนตซึ่ง $800^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 10 นาที	56
4.22 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิอบสแตนไนตซึ่ง $800^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 20 นาที	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิออสเตนไนต์ซึ่ง 800 °C ที่เวลา 40 นาที	57
4.24 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิออสเตนไนต์ซึ่ง 850 °C ที่เวลา 10 นาที	57
4.25 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิออสเตนไนต์ซึ่ง 850 °C ที่เวลา 20 นาที	58
4.26 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิออสเตนไนต์ซึ่ง 850 °C ที่เวลา 40 นาที	58
4.27 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 10 นาที	59
4.28 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 20 นาที	60
4.29 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 40 นาที	60
4.30 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 10,20 และ 40	61
4.31 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 10,20 และ 40 นาที	61
4.32 ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 10,20 และ 40 นาที	62
4.33 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 10 นาที	63
4.34 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 20 นาที	63
4.35 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 40 นาที	64
4.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 10,20,40 นาที	64
4.37 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 10,20,40 นาที	65
4.38 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 10,20,40 นาที	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 10 นาที	66
4.40 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 20 นาที	67
4.41 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่อุณหภูมิ 750,800,850 °C เป็นเวลา 40 นาที	67
4.42 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่เวลา 10,20 และ 40 นาที ใช้อุณหภูมิที่ 750 °C	68
4.43 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่เวลา 10,20 และ 40 นาที ใช้อุณหภูมิที่ 800 °C	68
4.44 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบและอบชุบที่เวลา 10,20 และ 40 นาที ใช้อุณหภูมิที่ 850 °C	69

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ	21
2.2 ชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องแบบ Brinell	22
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (1-WAY ANOVA )	29
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	33
2.5 รูปแบบการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ความถดถอย $\beta_1$ ในขั้นที่ 2	35
4.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าของเหล็ก AISI 1010 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน	44
4.2 ค่าความแข็งของเหล็ก AISI 1010 เฉลี่ยที่ทำการอบชุบตามอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบครั้งนี้	46
4.3 แสดงค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของเหล็ก AISI 1010 ตามอุณหภูมิการอบชุบและสารชุบ	59
4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย(%Elongation) AISI 1010 ตามอุณหภูมิการอบชุบและสารชุบ	62
4.5 แสดงค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก AISI 1010 ตามอุณหภูมิการอบชุบและสารชุบ	66
4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าความแข็ง	67
4.7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)	69
4.8 ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว(Percent Elongation)	70
4.9 ความแปรปรวนโมดูลัสความยืดหยุ่น( Modulus of elasticity)	72
4.10 Model Summaryของค่าความแข็ง	78
4.11 ความแปรปรวนของค่าความแข็ง	78
4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความแข็ง	78
4.13 Model Summaryของค่าความทนต่อแรงดึง	79
4.14 ความแปรปรวนของค่าความทนต่อแรงดึง	79

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.15 ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความทนต่อแรงดึง	80
4.16 Model Summaryของค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว	81
4.17 ความแปรปรวนของค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว	81
4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว	81
4.19 Model Summaryของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	82
4.20 ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	82
4.21 ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	83

