

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 หัวข้อโครงการ	1
1.2 หลักการและเหตุผล	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)	1
1.5 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)	2
1.6 ขอบเขต	2
1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานทุก 2 อาทิตย์ (Gantt Chart)	3
บทที่ 2. หลักการและทฤษฎี	4
2.1 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 เหล็ก AISI4140	6
2.3 กระบวนการออสเทนไนท์จิ้ง (Austenitizing)	7
2.4 การชุบแข็ง (Hardening)	8
2.5 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม (Heating rate & Holding time)	15
2.6 การอบคืนตัว (Tempering)	17
2.7 ปฏิบัติการให้ความร้อน (Preheating)	19
2.8 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	21
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	31
2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ	35
บทที่ 3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	47
3.1 การเตรียมชิ้นงาน	47
3.2 การอบชุบชิ้นงานตามอุณหภูมิที่วางแผนไว้	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุดภาค	51
3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	52
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	54
บทที่ 4. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	55
4.1 ผลการทดสอบความแข็ง	55
4.2 ผลการทดสอบแรงกระแทก	61
4.3 ผลการทดสอบแรงดึง	66
4.4 โครงสร้างจุดภาค	82
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	99
4.6 การวิเคราะห์การถดถอย	106
บทที่ 5. วิเคราะห์และสรุปผลโครงการ	112
5.1 คุณสมบัติเชิงกล	112
5.1.1 วิเคราะห์ การทดสอบความแข็ง	112
5.1.2 วิเคราะห์ การทดสอบแรงกระแทก	113
5.1.3 วิเคราะห์ การทดสอบแรงดึง	115
5.1.4 วิเคราะห์ เปอร์เซ็นต์การยึดตัว	115
5.1.5 วิเคราะห์ Modulus of Elasticity	116
5.2 โครงสร้างจุดภาค	116
5.3 วิเคราะห์และสรุปผลจากการรวบรวมโครงการวิจัย	117
5.4 ปัญหาข้อเสนอแนะ	118
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก ก	120
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI 4140	6
2.2 ระยะแสดงเวลาในการเผาเหล็กที่มีความหนาต่างกัน	16
2.3 ค่าโดยประมาณของ Tensile strength , E และ G ของวัสดุต่าง	25
2.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งของ โลหะและ เซรามิกและแร่ต่างๆ	27
2.5 ชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องแบบ Brinell	29
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว	38
2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ	42
2.8 รูปแบบการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ความถดถอย β_i ในขั้นที่ 2	44
4.1 ตารางการทดสอบความแข็งเหล็ก AISI 4140 ตามอุณหภูมิการอบชุบ และสารชุบ	55
4.2 ตารางทดสอบแรงกระแทกเหล็ก AISI 4140 ตามอุณหภูมิการอบชุบ และสารชุบ	61
4.3 ตารางทดสอบแรงดึงเหล็ก AISI 4140 ตามอุณหภูมิการอบชุบ และสารชุบ ค่า Yield	66
4.4 ตารางทดสอบแรงดึงเหล็ก AISI 4140 ตามอุณหภูมิการอบชุบ และสารชุบ ค่า Elongation	67
4.5 ตารางทดสอบแรงดึงเหล็ก AISI 4140 ตามอุณหภูมิการอบชุบ และสารชุบ ค่า Modulus	68
4.6 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , 850 °C Austeniteizing	90
4.7 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , 900 °C Austeniteizing	91
4.8 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140, 950 °C Austeniteizing	92
4.9 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , 400 °C Tempered	93
4.10 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , 500 C °Tempered	94
4.11 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , 600 °C Tempered	95
4.12 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , Oil quenching	96
4.13 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , Water quenching	97
4.14 เปรียบเทียบ Microstructure of steel AISI 4140 , Salt water quenching	98
4.15 ANOVA ที่ใช้วิเคราะห์ความแข็ง (Dependent Variable : HERDDEN)	99
4.16 ANOVA ที่ใช้วิเคราะห์ความทนแรงกระแทก (Dependent Variable : HERDDEN)	98
4.17 ANOVA ที่ใช้วิเคราะห์ความทนแรงดึง (Dependent Variable : HERDDEN)	102
4.18 ความแปรปรวนทดสอบแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation)	103
4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อความสามารถในการคืนตัว (Modulus of Elasticity)	105
4.20 การคำนวณสมการถดถอยของค่าความแข็ง Model Summary	106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.21 การคำนวณสมการถดถอยของค่าความแข็ง Model Summary	106
4.22 Coefficients ^a	107
4.23 การคำนวณถดถอยของค่าความทนต่อแรงกระแทก Model Summary	107
4.24 การคำนวณถดถอยของค่าความทนต่อแรงกระแทก Model Summary	107
4.25 Coefficients ^a	108
4.26 การคำนวณถดถอยของค่าความทนต่อแรงดึง Model Summary	108
4.27 การคำนวณถดถอยของค่าความทนต่อแรงดึง Model Summary	109
4.28 Coefficients ^a	109
4.29 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว Model Summary ^b	109
4.30 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว Model Summary ^b	110
4.31 Coefficients ^a	110
4.32 การคำนวณสมการถดถอยของค่า Modulus of Elasticity Model Summary ^b	110
4.33 การคำนวณสมการถดถอยของค่า Modulus of Elasticity Model Summary ^b	111
4.34 Coefficients ^a	111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟ % คาร์บอน	7
2.2 แผนภูมิ T.T.T.เหล็กกล้าไฮโปยูเทคทรอยด์ และ เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคทรอยด์	10
2.3 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน	10
2.4 อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันของสารชุบชนิดต่างๆ	13
2.5 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิวและภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่างๆ กัน	17
2.6 กราฟแสดงค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการอบคืนตัวของเหล็กยูเทคทรอยด์	19
2.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบด้วยแรงดึง	21
2.8 กราฟของแรงกับขนาดที่ยืดออก	22
2.9 กราฟ stress และ strain	23
2.10 กราฟของแรงกับขนาดที่ยืดออก	24
2.11 ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง	26
2.12 ภาพแสดงการกดบนพื้นผิวชิ้นงาน	28
2.13 แสดงหลักการทำงานของเครื่องทดสอบความแข็ง	29
2.14 เครื่องทดสอบความแข็ง	30
2.15 หลักการทดสอบแรงกระแทก	31
2.16 การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรนและขอบเกรน	32
2.17 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะ	32
2.18 ชั้นบางเหนียวจากการขัดมันปอกกลุ่มผิวงานแสงจึงสะท้อนตามปกติ	34
2.19 หลังจากกัดกรดผิวงานขรุขระแสงสะท้อนหักเห	34
2.20 ลักษณะโครงสร้างเฟอไรต์ (เฟอร์ไรต์+Fe ₃ C)	34
3.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง	47
3.2 ชิ้นงานทดสอบการกระแทก	48
3.3 กราฟการอบชิ้นงานตามอุณหภูมิ Austenitizing	49
3.4 กราฟการอบชิ้นงานตามอุณหภูมิ Tempering	50
3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง	52
3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง	53
3.7 เครื่องทดสอบแรงกระแทก	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C	56
4.2 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C	57
4.3 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C	57
4.4 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Tempering 400 °C	58
4.5 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Tempering 500 °C	58
4.6 กราฟทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิ Tempering 600 °C	59
4.7 กราฟทดสอบความแข็ง สารชุบ น้ำ	59
4.8 กราฟทดสอบความแข็ง สารชุบ น้ำมัน	60
4.9 กราฟทดสอบความแข็ง สารชุบ น้ำเกลือ	60
4.10 กราฟทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C	62
4.11 กราฟทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C	62
4.12 กราฟทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C	63
4.13 กราฟทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ Tempering 400 °C	63
4.14 กราฟทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ Tempering 500 °C	64
4.15 กราฟทดสอบแรงกระแทก สารชุบ น้ำ	64
4.16 กราฟทดสอบแรงกระแทก สารชุบ น้ำมัน	65
4.17 กราฟทดสอบแรงกระแทก สารชุบ น้ำเกลือ	65
4.18 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C Tempering 400 °C	69
4.19 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C Tempering 500 °C	69
4.20 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C Tempering 600 °C	70
4.21 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C Tempering 400 °C	70
4.22 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C Tempering 500 °C	71
4.23 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C Tempering 600 °C	71
4.24 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C Tempering 400 °C	72
4.25 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C Tempering 500 °C	72
4.26 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C Tempering 600 °C	73
4.27 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 400 °C สารชุบน้ำมัน	73
4.28 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 400 °C สารชุบน้ำ	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 400 °C สารชุบน้ำเกลือ	74
4.30 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 500 °C สารชุบน้ำมัน	75
4.31 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 500 °C สารชุบน้ำ	75
4.32 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 500 °C สารชุบน้ำเกลือ	76
4.33 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 600 °C สารชุบน้ำมัน	76
4.34 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 600 °C สารชุบน้ำ	77
4.35 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Tempering 600 °C สารชุบน้ำเกลือ	77
4.36 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C สารชุบน้ำ	78
4.37 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C สารชุบน้ำ	78
4.38 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C สารชุบน้ำ	79
4.39 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C สารชุบน้ำมัน	79
4.40 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C สารชุบน้ำมัน	80
4.41 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C สารชุบน้ำมัน	80
4.42 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 850 °C สารชุบน้ำเกลือ	81
4.43 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 900 °C สารชุบน้ำเกลือ	81
4.44 กราฟทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ Austenitizing 950 °C สารชุบน้ำเกลือ	82
4.45 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 400	82
4.46 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 500	83
4.47 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 600	83
4.48 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 400	83
4.49 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 500	83
4.50 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 600	84
4.51 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 400	84
4.52 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 500	84
4.53 อุณหภูมิ Austenitizing 850 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 600	84
4.54 อุณหภูมิ Austenitizing 900 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 400	85
4.55 อุณหภูมิ Austenitizing 900 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 500	85
4.56 อุณหภูมิ Austenitizing 900 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 600	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 400	85
4.58 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 500	86
4.59 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 600	86
4.60 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 400	86
4.61 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 500	86
4.62 อุณหภูมิ Austenitezing 900 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 600	87
4.63 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 400	87
4.64 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 500	87
4.65 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำมัน อุณหภูมิ Tempering 600	87
4.66 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 400	88
4.67 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 500	88
4.68 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำ อุณหภูมิ Tempering 600	88
4.69 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 400	88
4.70 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 500	89
4.71 อุณหภูมิ Austenitezing 950 สารชุบน้ำเกลือ อุณหภูมิ Tempering 600	89
5.1 กราฟอ้างอิงจากมาตรฐาน	112
5.2 กราฟเหล็กที่ชุบในน้ำมัน	113
5.3 กราฟความทนต่อแรงกระแทกสูง	114