

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORS AFFECTING THE MECHANICAL PROPERTIES VARIATION AFTER ANNEALING OF
COLD ROLLED STEEL SHEET



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกล
	หลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น
โดย	นายเรืองยศ วิเชียรรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

	.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
	(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		
	.....	ประธานกรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)	
	.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)	
	.....	กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)	
	.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
	(รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพ็ชร์)	

เรื่องยศ วิเชียรรักษ์ : ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น. (

FACTORS AFFECTING THE MECHANICAL PROPERTIES VARIATION AFTER ANN EALING OF COLD ROLLED STEEL SHEET) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สมชาย พัว จินดาเนตร

เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยกระบวนการอบอ่อนแบบเตาอบ พบว่าค่าสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นจะมีความผันแปรในแต่ละตำแหน่งของความยาวม้วน โดย ปัจจัยสำคัญในกระบวนการอบอ่อนได้แก่ อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ถูก นำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความผันแปรของค่าสมบัติเชิงกล วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทดลองโดยใช้ เหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านกระบวนการรีดในอุตสาหกรรมที่สัดส่วนการรีดที่เท่ากัน และนำมาผ่านกระบวนการอบอ่อนโดยควบคุมอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ในห้องปฏิบัติการ โดยอุณหภูมิการอบอ่อน ได้แก่ 570, 610, 650, 700° C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้แก่ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้นคราก ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็ง รวมถึงตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็ก

ผลการทดสอบพบว่า (1) การเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อการลดลงอย่างของค่าความเค้นคราก ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็ง แต่ในส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว มีค่าสูงขึ้น (2) การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อค่าสมบัติเชิงกลเช่นเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน (3) ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 650° C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 2 ชั่วโมง ให้ผลลัพธ์ค่าสมบัติเชิงกล มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมาย (4) ขนาดของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น (5) ปัจจัยได้แก่อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน นั้นส่งผลกระทบต่อความผันแปรของค่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970953821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Cold rolled steel sheet, Batch annealing furnace, Mechanical properties

Ruangyot Wichienrak :

FACTORS AFFECTING THE MECHANICAL PROPERTIES VARIATION AFTER ANN

EALING OF COLD ROLLED STEEL SHEET. Advisor: Asst. Prof. Dr. Somchai Puajindanetr

Cold rolled steel industry in type of batch annealing furnace, the mechanical properties of steel sheet have variation by each position. The parameters of annealing temperature and time were analyzed to work out the source of mechanical properties variation. This experiment is using low-carbon steel sheet that were cold rolled at the same reduction ratio. Then annealed applying by different annealing temperature and soaking time in laboratory furnace. The mechanical properties which were examined. Yield strength, Tensile strength, %Elongation and Hardness.

The result showed that (1) Increasing the annealing temperature could remarkably decrease the yield strength, tensile strength and hardness, whereas the %Elongation could be increased. (2) Increasing the soaking time could significant effect on mechanical properties as annealing temperature. (3) The annealing temperature of 650° C with soaking time of 2 hr should be applied to provide the mechanical properties close to target value (4) Grain size of the workpieces trended to be grown when the annealing temperature increasing. (5) The factors of annealing temperature and annealing time have significant effect on the mechanical properties variation of steel sample.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดา เนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ หลักการทฤษฎี ตลอดจนให้คำแนะนำแนวทางการแก้ไข ปัญหาและช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านมาตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ ประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, รอง ศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศีก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็น ประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัทเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด (มหาชน) ที่อนุญาตให้ผู้วิจัยได้ศึกษา โดยมี คุณเจริญ แสงแพร ผู้จัดการฝ่ายเทคนิคและควบคุมคุณภาพ คุณจักรพันธ์ ศรีพิชิต ผู้จัดการส่วน ควบคุมคุณภาพ คุณอนุชา ป่านขาว หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดสอบ สำหรับการอำนวยความสะดวกในการ ปฏิบัติการทดสอบภายในบริษัท

ขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการ ทำวิทยานิพนธ์จนลุล่วงไปด้วยดี

เรืองยศ วิเชียรรักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	1
สารบัญตาราง.....	9
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา.....	3
1.2 ขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นของโรงงานกรณีศึกษา	6
1.2.1 กระบวนการทำความสะอาดผิววัตถุด้วยกรด Pickling process	7
1.2.2 กระบวนการรีดเย็น (Cold rolling process)	7
1.2.3 กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic cleaning line)	8
1.2.4 กระบวนการอบอ่อน (Annealing process)	8
1.2.5 กระบวนการรีดซ้ำ (Temper mill process)	12
1.2.6 กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ (Recoiling line)	12
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	14
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	22
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	22
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	22
1.7 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	22

1.8 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	23
บทที่ 2	24
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า (Iron and steel making process).....	24
2.2 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot rolled steel coil process).....	25
2.3 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold rolled steel coil process).....	26
2.4 การตกผลึกใหม่ของเหล็ก (Recrystallization temperature).....	27
2.4.1 การอบคลายตัว (Recovery).....	28
2.4.2 การตกผลึกใหม่ (Recrystallization).....	28
2.4.3. การขยายตัวของเกรน (Grain growth).....	31
2.5 ทฤษฎีเรื่องการทดสอบสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่น	31
2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	34
2.7 ทฤษฎีซิกซ์ ซิกม่า (Six sigma).....	36
2.8 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3	43
วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	43
3.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis).....	43
3.1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบการวัด	43
3.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Gage R&R.....	44
3.2 กรรมวิธีที่ใช้ในการอบอ่อน (เตาอบ Batch annealing furnace)	50
3.2.1 แผนภาพเตาอบ และกระบวนการอบอ่อน	50
3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temperature).....	51
3.3.1 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Yield strength	52
3.3.2 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Tensile strength.....	54

3.3.3	อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล %Elongation.....	56
3.3.4	อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Hardness.....	58
3.4	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time).....	61
3.4.1	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Yield strength.....	62
3.4.2	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Tensile strength.....	65
3.4.3	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล %Elongation	68
3.4.4	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Hardness	71
3.5	ปัจจัยในเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base Number).....	75
3.5.1	วิเคราะห์ปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Yield strength	75
3.5.2	วิเคราะห์ปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Tensile strength	79
3.5.3	วิเคราะห์ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบกับค่า %Elongation.....	83
3.5.4	วิเคราะห์ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบกับค่า Hardness.....	87
3.6	ปัจจัยเรื่องตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack position).....	92
3.7	ปัจจัยเรื่องตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail position of coil)	105
บทที่ 4	จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY	110
	การออกแบบการทดลอง	110
4.1	ชิ้นงานตัวอย่าง (Sample).....	110
4.2	เงื่อนไขกระบวนการอบอ่อน (Annealing condition).....	110
4.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Equipment).....	111
บทที่ 5		114
	ผลการทดลองและอภิปรายผล	114
5.1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Result of mechanical properties).....	114
5.1.1	ผลการทดลองค่า Yield strength.....	115

5.1.2	ค่า Tensile strength	116
5.1.3	ค่า %Elongation	117
5.1.4	ค่า Hardness (HRB).....	118
5.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	119
5.2.1	วิเคราะห์ Two-Way ANOVA ของค่า Yield strength.....	119
5.2.1	วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า Tensile strength	121
5.2.3	วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า %Elongation.....	123
5.2.4	วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า Hardness.....	125
5.3	ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปร	128
5.3.1	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 570°C.....	128
5.3.2	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 610°C.....	129
5.3.3	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 650°C.....	129
5.3.4	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 700°C.....	130
5.3.5	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 0.5 ชั่วโมง	130
5.3.6	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 1 ชั่วโมง	131
5.3.7	วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 2 ชั่วโมง	131
5.3.8	วิเคราะห์ความเชื่อมโยงกันของปัจจัย และค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลอง.....	132
5.4	ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)	146
บทที่ 6	.....	151
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	.....	151
6.1	บทนำ.....	151
6.2	บทสรุป	151
6.3	ข้อจำกัดในการทดลอง	152
6.4	ข้อเสนอแนะ	152

บรรณานุกรม..... 159

ประวัติผู้เขียน..... 161



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	แสดงปริมาณการผลิต นำเข้า ส่งออก บริโภค สินค้าเหล็กของไทยตั้งแต่ปี 1997-2016.....	1
รูปที่ 1.2	ดัชนีการใช้เหล็กแผ่นในประเทศไทยรายเดือน ข้อมูลปี 2016-2017.....	2
รูปที่ 1.3	แผนภาพสัดส่วนของเหล็กแผ่นรีดเย็นแต่ละประเภท ข้อมูลการผลิตปี 2017.....	3
รูปที่ 1.4	ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นแต่ละประเภท ข้อมูล มกราคม-ธันวาคม ปี 2017	4
รูปที่ 1.5	สัดส่วนเหล็กแผ่นรีดเย็น แต่ละเกรดในประเภทคาร์บอนต่ำ ข้อมูลการผลิตปี 2017	4
รูปที่ 1.6	ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น แต่ละเกรดของประเภทคาร์บอนต่ำ ข้อมูล มกราคม-ธันวาคม ปี 2017	5
รูปที่ 1.7	ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น Product A โดยจำแนกตามความหนา ข้อมูลปี 2017... ..	5
รูปที่ 1.8	แผนผังขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น ของโรงงานกรณีศึกษา	6
รูปที่ 1.9	แผนผังแสดงกระบวนการรีดเย็น.....	7
รูปที่ 1.10	แผนผังแสดงกระบวนการทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 1.11	แผนผังแสดงกระบวนการอบอ่อนแบบ Batch annealing furnace (BAF).....	8
รูปที่ 1.12	ลักษณะการวางม้วนเหล็กจำนวน และการครอบด้วยเตาด้านใน (Inner cover)	9
รูปที่ 1.13	แสดงลักษณะการอบอ่อนของเตาอบแบบ Batch annealing process.....	9
รูปที่ 1.14	แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในม้วนเหล็ก จุด Hot point และ Cold point.....	10
รูปที่ 1.15	ลักษณะการครอบเตาด้านนอก (Heating cover) และทำการยก Heating cover ออก10	
รูปที่ 1.16	ขั้นตอนการทำให้เย็นตัวในอากาศในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ	11
รูปที่ 1.17	แผนผังตามทฤษฎีของการอบอ่อนในปัจจุบัน ระหว่างอุณหภูมิการอบ เทียบกับเวลา	11
รูปที่ 1.18	แผนผังแสดงกระบวนการรีดซ้ำ (Temper mill process).....	12
รูปที่ 1.19	แผนผังแสดงกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ (Recoiling line)	12
รูปที่ 1.20	เทคโนโลยีในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น ทั้ง 2 แบบ คือ Batch และ CAL	13
รูปที่ 1.22	สาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพและปัญหาจากกระบวนการผลิต ข้อมูลการผลิตปี 2017	14

รูปที่ 1.23 ประมาณจำนวนเงินที่สูญเสียจากสาเหตุสมบัติเชิงกล ของเหล็กคาร์บอนต่ำ ในปี 2017	16
รูปที่ 1.24 สัดส่วนการสูญเสีย จากปัญหาสมบัติเชิงกล ของโรงงานกรณีศึกษา ในปี 2017	16
รูปที่ 1.25 ค่า Yield strength ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)	18
รูปที่ 1.26 ค่า Tensile strength ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)	19
รูปที่ 1.27 ค่า %Elongation ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)	20
รูปที่ 1.28 ค่า Hardness ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)	21
รูปที่ 1.29 ตัวอย่างปัญหาขึ้นรูปแล้วแตก สาเหตุจาก %Elongation ต่ำ	21
รูปที่ 2.1 เตาถลุงเหล็ก (Blast furnace)	24
รูปที่ 2.2 เตาถลุงโลหะ (Blast furnace) และปฏิกิริยาในกระบวนการถลุง	25
รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน	25
รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน	26
รูปที่ 2.5 ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างในระดับจุลภาค	27
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อนกับเปอร์เซ็นต์ของการตกผลึกใหม่	28
รูปที่ 2.7 ระดับพลังงานที่ใช้เพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่	29
รูปที่ 2.8 อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของแต่ละชนิดของโลหะ และโลหะผสมบางชนิด	30
รูปที่ 2.9 ผลของปริมาณการขึ้นรูปเย็น ต่ออุณหภูมิการตกผลึกใหม่	30
รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิต่อขนาดเกรนที่ตกผลึกใหม่	31
รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงดึงและค่าที่ได้ Stress-Strain Curve	32
รูปที่ 2.12 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง Specimen test	32
รูปที่ 2.13 อธิบายนิยามของ Stress-Strain Curve	33

รูปที่ 2.14	องค์ประกอบความผันแปรของระบบการวัด	34
รูปที่ 2.15	แผนภาพ Histogram ของ ชิกซ์ ชิกม่า	39
รูปที่ 2.16	การเปลี่ยนแปลงของความแข็ง เทียบกับอัตราการรีดขนาด (อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 400-750°C)	40
รูปที่ 3.1	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Yield strength	45
รูปที่ 3.2	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength	46
รูปที่ 3.3	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า %Elongation	48
รูปที่ 3.4	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Hardness HRB	49
รูปที่ 3.5	แผนภาพเตาอบ และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในเตาอบ	50
รูปที่ 3.6	อุณหภูมิการอบอ่อนที่ตำแหน่ง Hot point และ Cold point เทียบกับเวลาในการอบอ่อน	51
รูปที่ 3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	52
รูปที่ 3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Yield strength ที่ตำแหน่งหัวกลางม้วน	53
รูปที่ 3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	54
รูปที่ 3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	55
รูปที่ 3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	56
รูปที่ 3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	57
รูปที่ 3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน	58

รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน	59
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	62
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	63
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	64
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	65
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	66
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	67
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	68
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	69
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	70
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน	71
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน	72
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	73
รูปที่ 3.27 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	76

รูปที่ 3.28	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	77
รูปที่ 3.29	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	78
รูปที่ 3.30	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	80
รูปที่ 3.31	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	81
รูปที่ 3.32	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	82
รูปที่ 3.33	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	84
รูปที่ 3.34	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	85
รูปที่ 3.35	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	86
รูปที่ 3.36	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	88
รูปที่ 3.37	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	89
รูปที่ 3.38	Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	90
รูปที่ 3.39	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	92
รูปที่ 3.40	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	93
รูปที่ 3.41	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	94
รูปที่ 3.42	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน.....	95
รูปที่ 3.43	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน	96
รูปที่ 3.44	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน.....	97
รูปที่ 3.45	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน	98
รูปที่ 3.46	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน	99
รูปที่ 3.47	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน	100
รูปที่ 3.48	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งหัวม้วน.....	101
รูปที่ 3.49	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งกลางม้วน	102
รูปที่ 3.50	Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งท้ายม้วน	103

รูปที่ 3.51 Boxplot ค่า Yield strength ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil).....	105
รูปที่ 3.52 Boxplot ค่า Tensile strength ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil).....	106
รูปที่ 3.53 Boxplot ค่า %Elongation ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil).....	107
รูปที่ 3.54 Boxplot ค่า Hardness ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil).....	108
รูปที่ 4.1 ออกแบบการอบอ่อนเทียบกับเวลาในกระบวนการทดลอง	111
รูปที่ 4.2 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง Nabertherm C30	111
รูปที่ 4.3 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง Nabertherm C30	112
รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบ Tensile test.....	112
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield point กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp).....	115
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield point กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ..	115
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)	116
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)	116
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)...	117
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)117	
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp).....	118
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time).....	118
รูปที่ 5.9 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Yield strength ที่ได้จากการทดลอง	119
รูปที่ 5.10 กราฟ Main effect plot ค่า Yield strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	120

รูปที่ 5.11 กราฟ Interaction plot ค่า Yield strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	120
รูปที่ 5.12 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Tensile strength ที่ได้จากการทดลอง	121
รูปที่ 5.13 กราฟ Main effect plot ค่า Tensile strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	122
รูปที่ 5.14 กราฟ Interaction plot ค่า Tensile strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	122
รูปที่ 5.15 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ %Elongation ที่ได้จากการทดลอง	123
รูปที่ 5.16 กราฟ Main effect plot ค่า %Elongation เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	124
รูปที่ 5.17 กราฟ Interaction plot ค่า %Elongation เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	124
รูปที่ 5.18 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Hardness ที่ได้จากการทดลอง.....	125
รูปที่ 5.19 กราฟ Main effect plot ค่า Hardness เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	126
รูปที่ 5.20 กราฟ Interaction plot ค่า Hardness เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง	126
รูปที่ 5.21 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 570°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	128
รูปที่ 5.22 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	129
รูปที่ 5.23 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	129
รูปที่ 5.24 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	130

รูปที่ 5.25 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 0.5 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C	130
รูปที่ 5.26 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 1 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C	131
รูปที่ 5.27 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 2 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C	131
รูปที่ 5.28 ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณในสมการถดถอย เพื่อหาค่าเป้าหมายของค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 675°C และเวลาอบอ่อนที่ 2.0 ชั่วโมง	145
รูปที่ 5.29 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุดิบเหล็กแผ่นรีดร้อนก่อนเข้ากระบวนการผลิต.....	146
รูปที่ 5.30 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็น ก่อนเข้ากระบวนการอบอ่อน	146
รูปที่ 5.31 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 570°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	147
รูปที่ 5.32 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	148
รูปที่ 5.33 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	149
รูปที่ 5.34 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง	150

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 สมบัติเชิงกลของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 mm ข้อมูลปี 2017 ก่อนการศึกษา	17
ตารางที่ 1.2 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Yield strength ก่อนการศึกษา	17
ตารางที่ 1.3 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Tensile strength ก่อนการศึกษา	18
ตารางที่ 1.4 ระดับคุณภาพและความสามารถของกระบวนการ ของค่า %Elongation ก่อนการศึกษา	19
ตารางที่ 1.5 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Hardness HRB ก่อนการศึกษา	20
ตารางที่ 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	23
ตารางที่ 3.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Yield strength	44
ตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength	46
ตารางที่ 3.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า %Elongation	47
ตารางที่ 3.4 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Hardness HRB	49
ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิ อบอุ่นต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	52
ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิ อบอุ่นต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	53
ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิ อบอุ่นต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน	54
ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิ อบอุ่นต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	55

ตารางที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิ อบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	56
ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัย อุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	57
ตารางที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัย อุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน	58
ตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัย อุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	59
ตารางที่ 3.13 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบอ่อนและสมบัติเชิงกล และประมาณค่า ของอุณหภูมิการอบอ่อน เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามค่าคาดหวังเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามค่าคาดหวัง	60
ตารางที่ 3.14 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนของคุณสมบัติ เชิงกลต่าง ๆ.....	61
ตารางที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	62
ตารางที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	63
ตารางที่ 3.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน.....	64
ตารางที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	65
ตารางที่ 3.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	66
ตารางที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน.....	67
ตารางที่ 3.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	68

ตารางที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	69
ตารางที่ 3.23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน.....	70
ตารางที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน	71
ตารางที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน	72
ตารางที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	73
ตารางที่ 3.27 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ	74
ตารางที่ 3.28 ข้อมูล Yield strength ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน	75
ตารางที่ 3.29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	76
ตารางที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	77
ตารางที่ 3.31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน.....	78
ตารางที่ 3.32 ข้อมูล Tensile strength ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน.....	79
ตารางที่ 3.33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	80
ตารางที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน	81

ตารางที่ 3.35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน.....	82
ตารางที่ 3.36 ข้อมูล %Elongation ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน.....	83
ตารางที่ 3.37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน	84
ตารางที่ 3.38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน	85
ตารางที่ 3.39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	86
ตารางที่ 3.40 ข้อมูล Hardness HRB ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน.....	87
ตารางที่ 3.41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน	88
ตารางที่ 3.42 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน.....	89
ตารางที่ 3.43 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน	90
ตารางที่ 3.44 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบหมายเลขเตา (Stack No.) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ.....	91
ตารางที่ 3.45 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน.....	92
ตารางที่ 3.46 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน..	93
ตารางที่ 3.47 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ..	94
ตารางที่ 3.48 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน...	95
ตารางที่ 3.49 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน	96
ตารางที่ 3.50 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน.	97

ตารางที่ 3.51	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน	98
ตารางที่ 3.52	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน.....	99
ตารางที่ 3.53	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน	100
ตารางที่ 3.54	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งหัวม้วน.....	101
ตารางที่ 3.55	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งกลางม้วน	102
ตารางที่ 3.56	One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งท้ายม้วน ...	103
ตารางที่ 3.57	สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบหมายเลขเตา (Stack No.) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ.....	104
ตารางที่ 3.58	One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Yield strength	105
ตารางที่ 3.59	One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Tensile strength	106
ตารางที่ 3.60	One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า %Elongation.....	107
ตารางที่ 3.61	One-way ANOVA ของตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Hardness.....	108
ตารางที่ 3.62	สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ.....	109
ตารางที่ 4.1	ค่าส่วนผสมทางเคมี ของชิ้นงานตัวอย่าง	110
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อน.....	110
ตารางที่ 4.3	การทดสอบ Tensile test เปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการอื่น ๆ (Interlab) ปี 2017	113
ตารางที่ 5.1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง	114
ตารางที่ 5.2	ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Yield strength เทียบกับ อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน	119

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Tensile strength เทียบกับ อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน	121
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า %Elongation เทียบกับ อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน	123
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Hardness เทียบกับอุณหภูมิ การอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน.....	125
ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบ ANOVA (P-value test) ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล หลังการอบอ่อนของการทดลอง.....	127
ตารางที่ 5.7 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Yield strength	132
ตารางที่ 5.8 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Yield strength.....	133
ตารางที่ 5.9 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Yield strength..	133
ตารางที่ 5.10 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Tensile strength	134
ตารางที่ 5.11 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Tensile strength	135
ตารางที่ 5.12 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Tensile strength	135
ตารางที่ 5.13 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า %Elongation.....	136
ตารางที่ 5.14 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า %Elongation.....	137
ตารางที่ 5.15 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า %Elongation..	137
ตารางที่ 5.16 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Hardness.....	138
ตารางที่ 5.17 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Hardness.....	139
ตารางที่ 5.18 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Hardness.....	139
ตารางที่ 5.19 คำนวณค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่ เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 0.5 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2.....	141
ตารางที่ 5.20 คำนวณค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่ เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 1.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2.....	142

ตารางที่ 5.21	คำนวณค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 1.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2.....	143
ตารางที่ 5.22	คำนวณค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 2.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2.....	144
ตารางที่ 5.23	เปรียบเทียบกับก่อนการศึกษา และผลจากการทดลอง	145

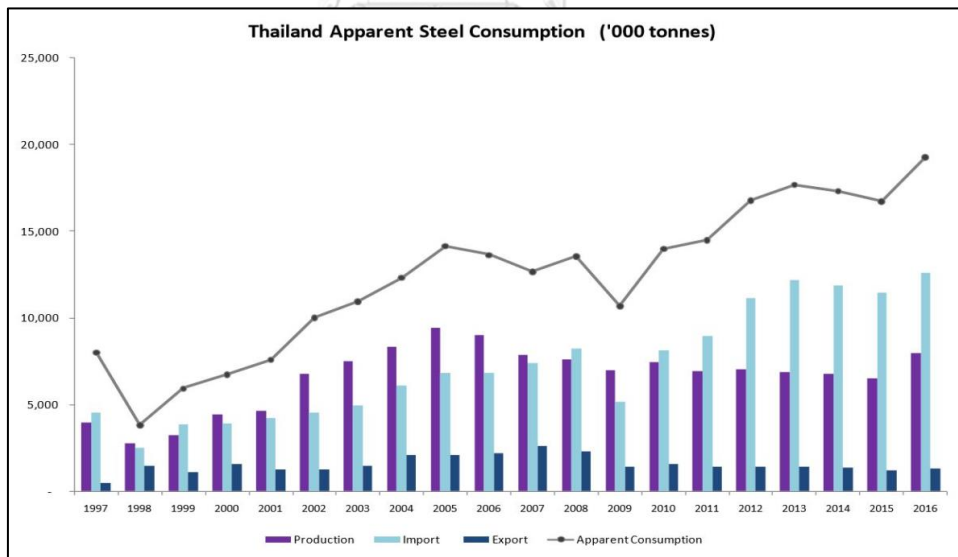


บทที่ 1

บทนำ

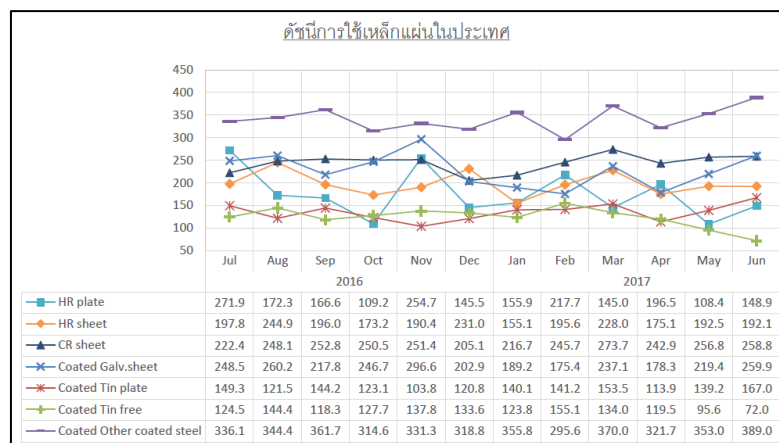
เหล็กแผ่นรีดเย็น เป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่จำเป็นในอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐาน และใช้งานเป็นส่วนประกอบของสิ่งต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วน อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมก่อสร้าง รวมถึงยังเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี อุตสาหกรรมผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสีหรือเคลือบดีบุก เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย

หากพิจารณาถึงแนวโน้มการใช้เหล็กโดยรวมในประเทศไทยนั้น พบว่ามีการเติบโตขึ้นมาก โดยมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และพบว่าปริมาณการผลิตในประเทศยังไม่มีพอกับปริมาณการใช้งาน โดยมีการนำเข้าเหล็กจากต่างประเทศในปริมาณสูง โดยในช่วงปี 2010 จนถึงปัจจุบัน มีปริมาณการนำเข้าเหล็กสูงขึ้นในทุก ๆ ปี ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการผลิต นำเข้า ส่งออก บริโภค สิ้นค้าเหล็กของไทยตั้งแต่ปี 1997-2016

จากดัชนีการใช้เหล็กแผ่นในประเทศ ปี 2017 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น หากแบ่งตามประเภทในส่วนผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นนั้น พบว่าเหล็กแผ่นรีดเย็น (CR Sheet) มีปริมาณการใช้สูงเป็นอันดับที่ 2 โดยมีปริมาณเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 250 กิโลตันต่อเดือน ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ดัชนีการใช้เหล็กแผ่นในประเทศไทยรายเดือน ข้อมูลปี 2016-2017

ดังนั้นหากกล่าวถึงการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นในประเทศไทย ปัจจุบันมีผู้ผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นในประเทศไทยรายใหญ่อยู่ 2 ราย โดยมีกำลังการผลิต รวมกันอยู่ที่ประมาณ 2 ล้านตันต่อปี ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็นนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. เหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูป ซึ่งมีมาตรฐานกลางในการควบคุม ได้แก่ มอก 2012-2558 สำหรับมาตรฐานของประเทศไทย และ JIS G3141-2017 สำหรับมาตรฐานของญี่ปุ่น เหล็กกลุ่มนี้เป็นเหล็กที่มีปริมาณการผลิตประมาณ 50% เนื่องจากมีความต้องการการใช้งานสูง ในงานขึ้นรูปทั่วไป

2. เหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานรถยนต์ ซึ่งมีมาตรฐานกลางในการควบคุม ได้แก่ มอก 2140-2546 สำหรับมาตรฐานของประเทศไทย และ JIS G3135-2006, JFS A2001-2016 สำหรับมาตรฐานของญี่ปุ่น เหล็กกลุ่มนี้เป็นเหล็กที่มีปริมาณการผลิตประมาณ 30% ใช้งานขึ้นรูปสำหรับงานรถยนต์ เหล็กแผ่นในกลุ่มนี้ จะมีการเข้มงวดเรื่องคุณภาพ เช่น มีการควบคุมด้านสมบัติเชิงกลในแต่ละชั้นเกรดของเหล็กอย่างชัดเจน

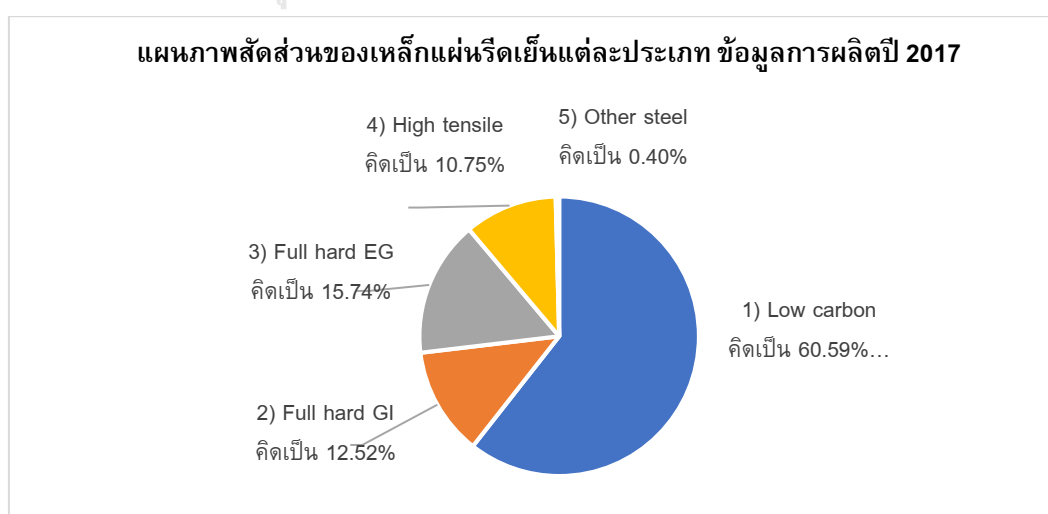
3. เหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานพิเศษ เช่นเหล็กแผ่นรีดเย็นแรงดึงสูง, เหล็กแผ่นรีดเย็นคาร์บอนสูง เหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานเคลือบอีนาเมล เหล็กกลุ่มนี้เป็นเหล็กที่มีปริมาณการผลิตประมาณ 20% สำหรับงานเฉพาะด้าน หรือต้องการความแข็งแรงพิเศษ

จากประเด็นดังกล่าวนี้เอง บริษัทผู้ผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น จึงต้องทำการปรับตัวเพื่อความอยู่รอด โดยการให้ความสำคัญต่อ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนในกระบวนการผลิต การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและความเป็นผู้นำในกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นในภูมิภาค

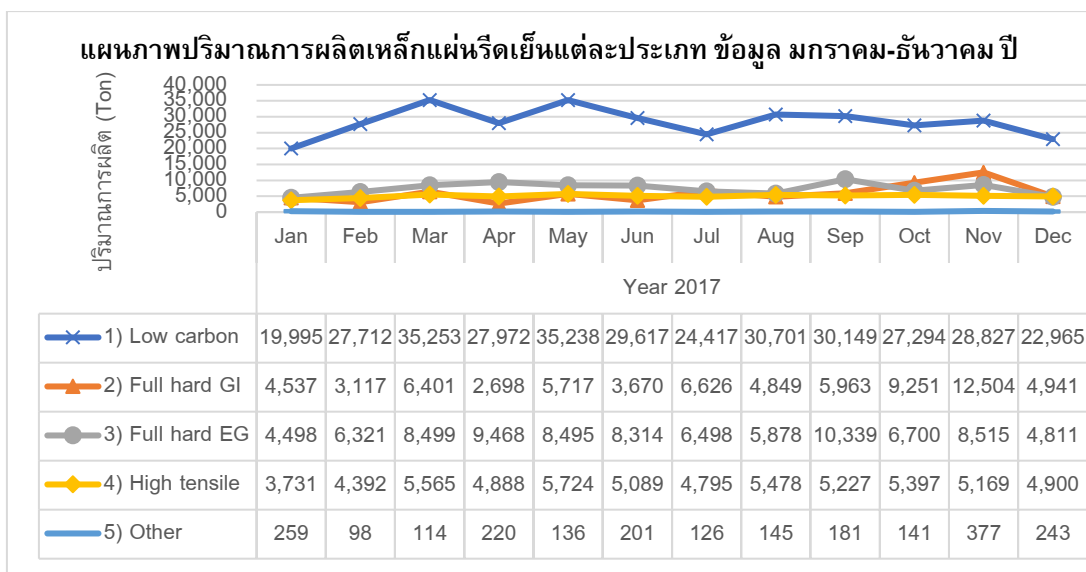
1.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วนแห่งแรกในประเทศไทย ได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ก่อตั้งเมื่อปี 1997 บนพื้นที่ 228 ไร่ ในอำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ด้วยเงินลงทุน 13,500 ล้านบาท มีกำลังการผลิตสูงสุดอยู่ที่ 1 ล้านตันต่อปี โดยเริ่มจากวัตถุดิบในการผลิตคือ เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน ซึ่งนำมาจากต่างประเทศได้แก่ประเทศญี่ปุ่น ประมาณ 70% และอีกส่วนจากโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนในประเทศ ประมาณ 30% จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน โดยมีความสามารถในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีความหนาตั้งแต่ 0.14 ถึง 3.34 มิลลิเมตร ความกว้างที่ 600 ถึง 1,600 มิลลิเมตร ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่โรงงานกรณีศึกษา สามารถผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน ที่มีความหลากหลายชนิด เพื่อตอบสนองของกลุ่มลูกค้าที่ความแตกต่างกัน โดยมีการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นในกลุ่มหลัก ๆ ทั้งหมด 5 ประเภทได้แก่

1. ชนิดคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)
2. ชนิดสำหรับอุตสาหกรรมชุบสังกะสี (Full hard GI)
3. ชนิดสำหรับอุตสาหกรรมเคลือบสังกะสีแบบไฟฟ้า (Full hard EG)
4. ชนิดแรงดึงสูง (High tensile steel)
5. กลุ่มอื่น ๆ (Other steel) เช่น เย็นซิลิกอน (Silicon steel), สำหรับอุตสาหกรรมเคลือบสังกะสีและอบอ่อน (Full hard steel for GA), สำหรับอีนาเมล (Enameling steel), และชนิดคาร์บอนสูง (High carbon steel)



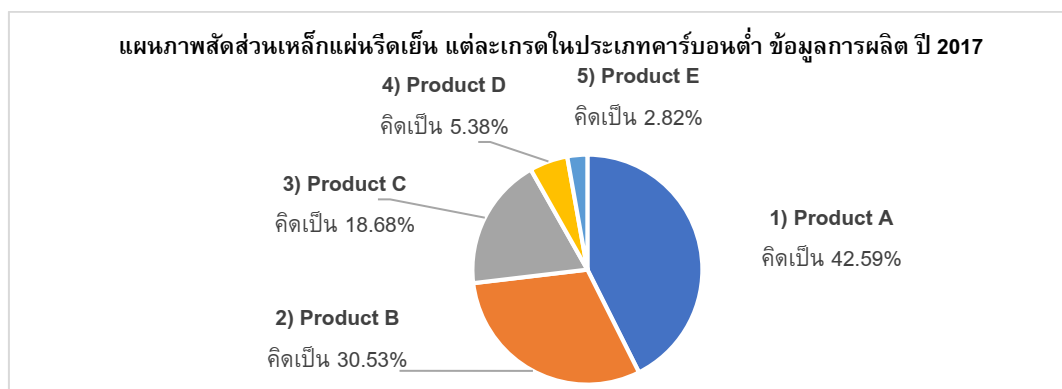
รูปที่ 1.3 แผนภาพสัดส่วนของเหล็กแผ่นรีดเย็นแต่ละประเภท ข้อมูลการผลิตปี 2017



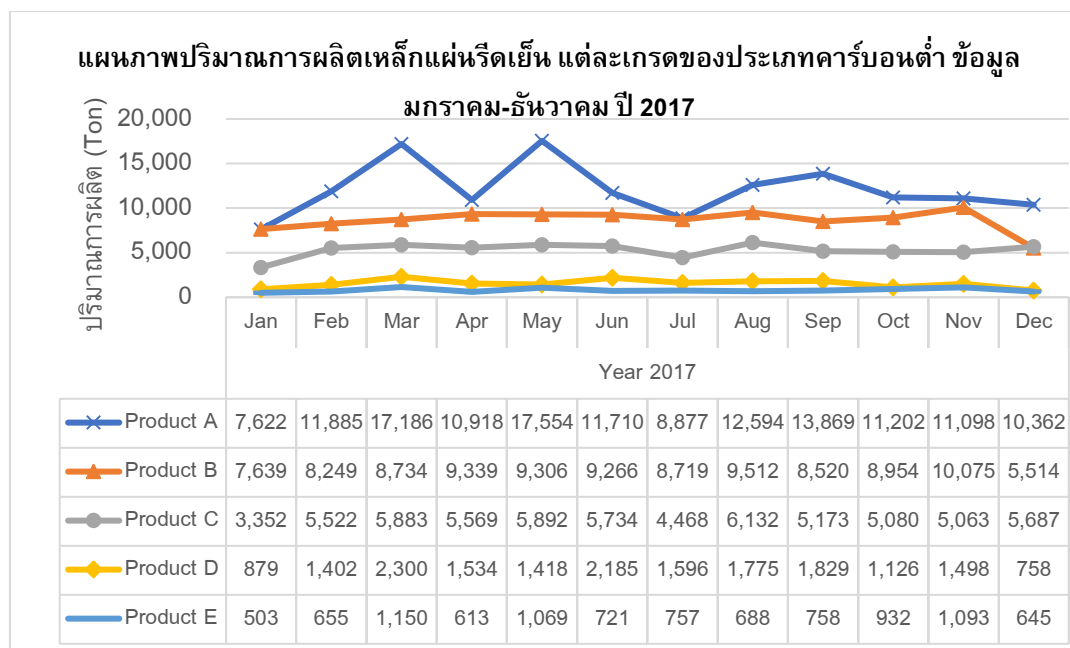
รูปที่ 1.4 ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นแต่ละประเภท ข้อมูล มกราคม-ธันวาคม ปี 2017

เมื่อพิจารณาในกลุ่มเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด อยู่ที่ 61% ของปริมาณการผลิตทั้งหมด ในกลุ่มนี้สามารถจำแนกเป็นเกรดย่อย ๆ (Specification) ได้อีก 5 เกรด ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบ สมบัติเชิงกล รวมถึงกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยแต่ละเกรดจะแบ่งตามความสามารถในการขึ้นรูปจากน้อยไปมาก ได้แก่

1. Product A แทนเหล็กเกรด SPCC (Commercial grade) สำหรับงานขึ้นรูปทั่วไป
2. Product B แทนเหล็กเกรด SPCD (Drawing quality type1) สำหรับงานขึ้นรูปชนิด 1
3. Product C แทนเหล็กเกรด SPCE (Drawing quality type2) สำหรับงานขึ้นรูปชนิด 2
4. Product D แทนเหล็กเกรด SPCF (Extra deep drawing quality) สำหรับขึ้นรูปลึก
5. Product E แทนเหล็กเกรด SPCG (Ultra deep drawing quality) สำหรับขึ้นรูปลึกสูง

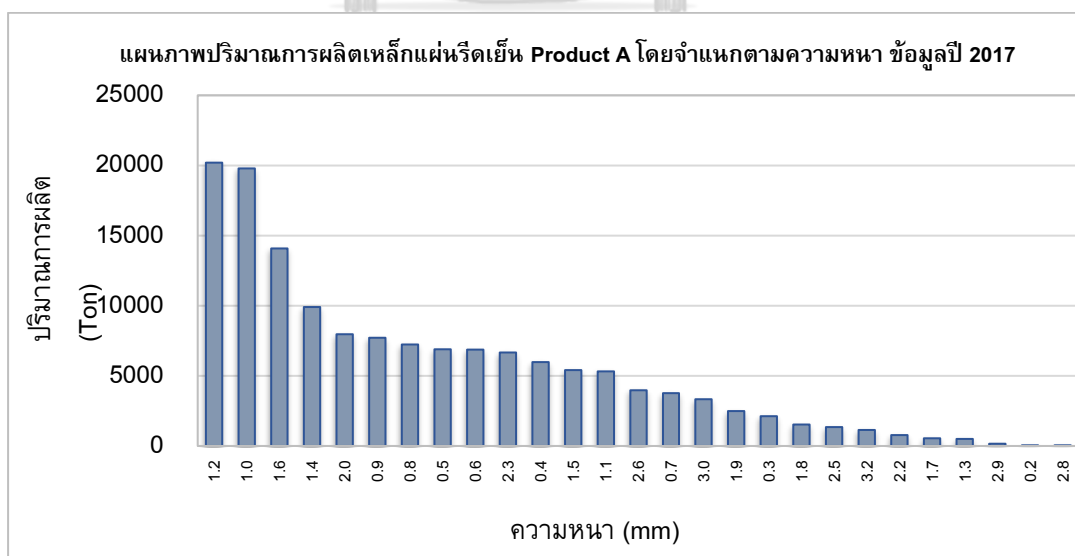


รูปที่ 1.5 สัดส่วนเหล็กแผ่นรีดเย็น แต่ละเกรดในประเภทคาร์บอนต่ำ ข้อมูลการผลิตปี 2017



รูปที่ 1.6 ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น แต่ละเกรดของประเภทคาร์บอนต่ำ ข้อมูล มกราคม-ธันวาคม ปี 2017

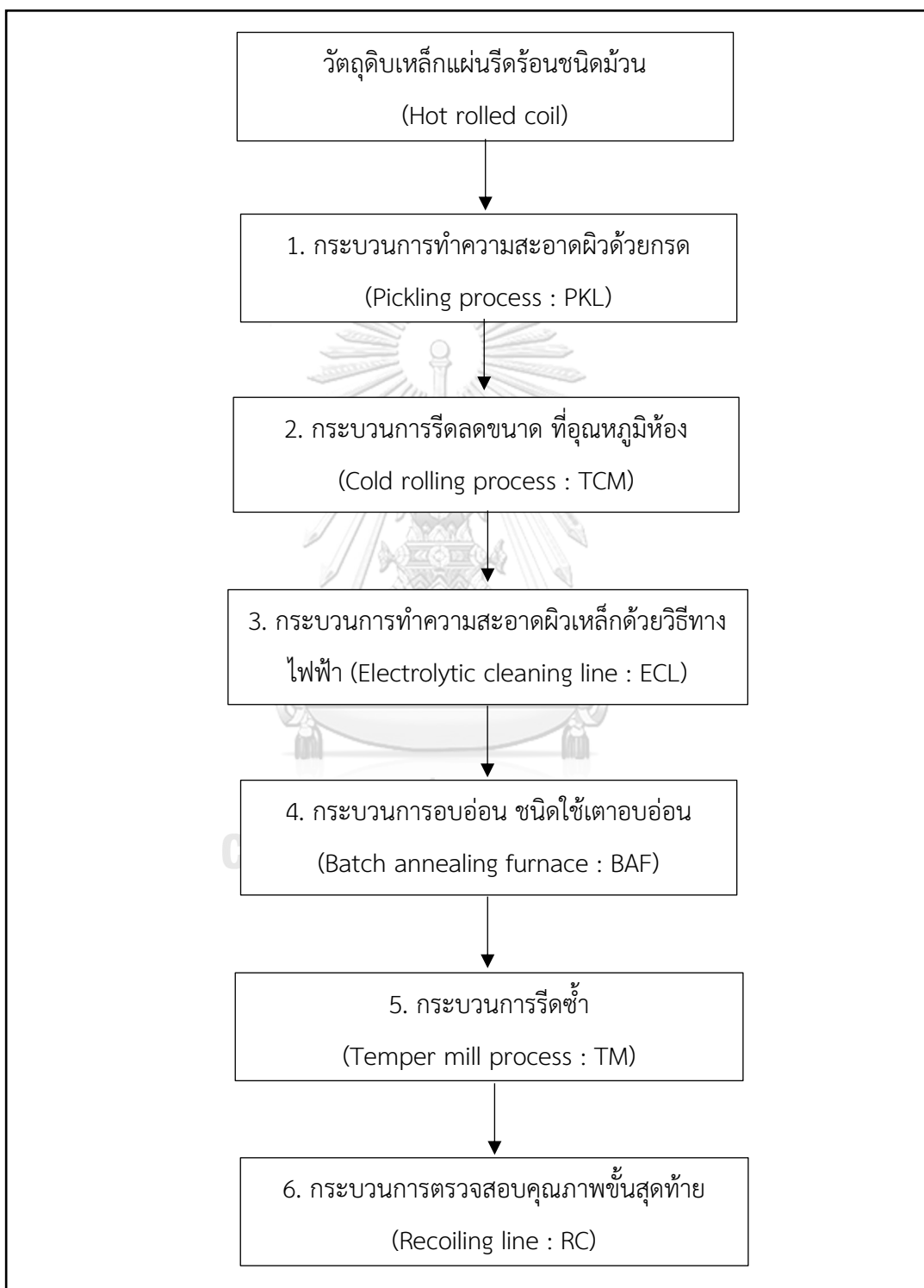
จะเห็นได้ว่าเหล็ก Product A ซึ่งเป็นเหล็กในกลุ่มคาร์บอนต่ำ ที่มีปริมาณการผลิตสูงสุดตลอดทั้งปี โดยคิดเป็น 43% ของปริมาณการผลิตทั้งหมด ซึ่งในเหล็ก Product A นี้ มีการผลิตอยู่หลายความหนาด้วยกัน และได้มีการรวบรวมข้อมูลการผลิต ในแต่ละความหนา ดังรูปที่ 1.7 โดยความหนาที่ 1.2 และ 1.0 มิลลิเมตรเป็นความหนาที่มีการผลิตสูงสุดในปี 2017



รูปที่ 1.7 ปริมาณการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น Product A โดยจำแนกตามความหนา ข้อมูลปี 2017

1.2 ขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นของโรงงานกรณีศึกษา

ขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น ของโรงงานกรณีศึกษา ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แผนผังขั้นตอนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น ของโรงงานกรณีศึกษา

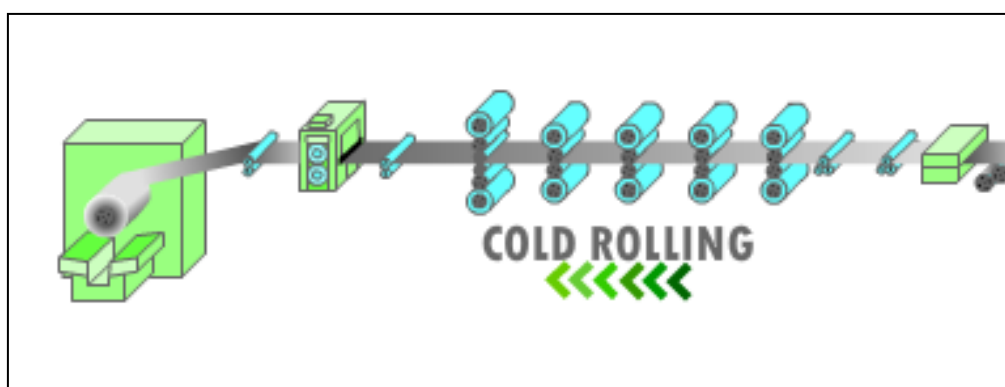
1.2.1 กระบวนการทำความสะอาดผิววัตถุด้วยกรด Pickling process

เริ่มต้นจากวัตถุดิบ คือเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil steel) ความหนาอยู่ที่ประมาณ 3.2-5.8 มิลลิเมตร นำเข้าสู่สายการผลิต ขั้นตอนแรกทำการคลี่แผ่นเหล็กช่วงหัวม้วน ตัดช่วงหัว-ท้ายม้วน เพื่อทำการเชื่อมต่อกันโดยวิธีการเชื่อมแบบต่อชนโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Flash butt welding) เพื่อลำเลียงแผ่นเหล็กเข้าสู่สายการผลิต

ขั้นตอนนี้เหล็กจะถูกทำการกำจัดออกไซด์ หรือสนิมร้อนที่มากับวัตถุดิบเหล็กแผ่นรีดร้อน หรือที่เรียกว่า Scale ในบริเวณพื้นผิวเหล็ก โดยจะผ่านกรรมวิธีล้างโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดเกลือ จากนั้นผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำร้อนและเป่าลมให้แห้ง จากนั้นแผ่นเหล็กจะถูกตัดขอบ (Side trimming) เพื่อเป็นการควบคุมความกว้างของแผ่นเหล็กในคงที่ ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว วัตถุดิบเหล็กแผ่นรีดร้อนนั้นจะมีสภาพผิวเป็นสีขาวหรือเทา ปราศจากออกไซด์ที่มากับผิวเหล็กในขั้นตอนการรีดร้อน ซึ่งพร้อมจะผ่านกระบวนการรีดเย็น ในขั้นตอนถัดไป

1.2.2 กระบวนการรีดเย็น (Cold rolling process)

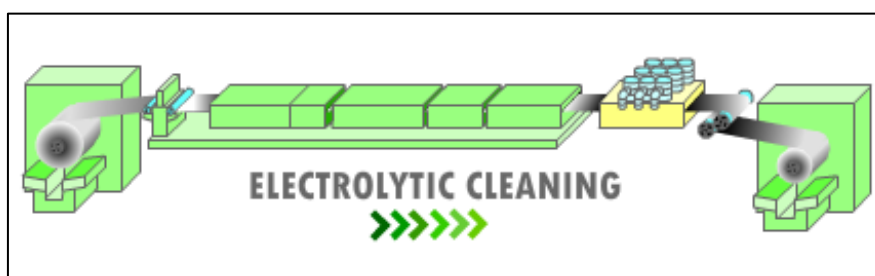
แผ่นเหล็กที่ได้จะถูกส่งมายังแท่นรีด เพื่อลดขนาดความหนาของแผ่นเหล็กที่รีดร้อนลง ให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.2-3.2 มิลลิเมตร การรีดเป็นลักษณะการรีดแบบต่อเนื่อง ผ่านแท่นรีดจำนวน 5 แท่นรีดเรียงติดกัน โดยทำการรีดที่อุณหภูมิห้อง อัตราการรีดเย็นจะอยู่ที่ประมาณ 70% เพื่อให้ได้ค่าความหนาตามที่กำหนด แผ่นเหล็กที่ถูกรีดออกมาจะเรียกว่าเหล็กแผ่นรีดเย็น โดยจะทำการม้วนเก็บเหล็กแผ่นที่ Coiler ให้อยู่ในลักษณะเป็นม้วน (Coil) โดยปกติวัตถุดิบเหล็กแผ่นรีดร้อน 1 ม้วน จะได้เหล็กแผ่นรีดเย็น 1 ม้วน และจะมีน้ำหนักต่อลูกอยู่ที่ประมาณ 20 ตัน ซึ่งในขั้นตอนนี้เหล็กแผ่นจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งมากจากการขึ้นรูปเย็น (Cold work) และจะต้องทำเข้าสู่กระบวนการถัดไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล



รูปที่ 1.9 แผนผังแสดงกระบวนการรีดเย็น

1.2.3 กระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic cleaning line)

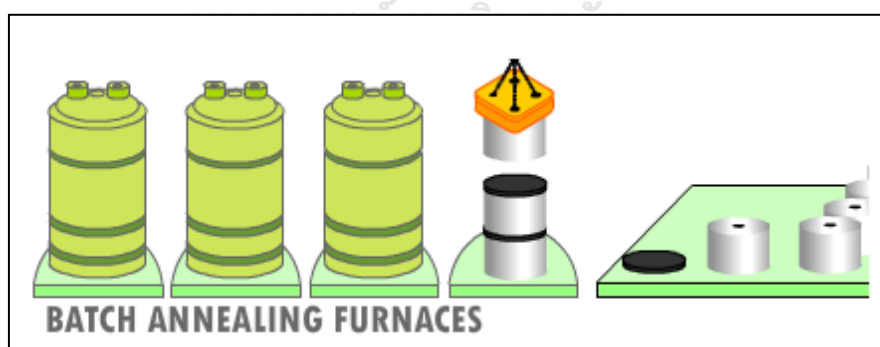
หลังจากผ่านกระบวนการรีดเย็น แผ่นเหล็กจะมีคราบน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการรีดตกค้างอยู่ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่พร้อมจะนำเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการล้างคราบน้ำมันออก โดยการผ่านสารละลายที่เป็นด่าง และผ่านไปในบ่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และจะมีการใช้กระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นที่ผิวเหล็ก นำพาคราบน้ำมันออกจากผิวเหล็ก จากนั้นเหล็กจะผ่านการล้างด้วยน้ำสะอาดและเป่าลมให้แห้ง พร้อมทั้งจะเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน



รูปที่ 1.10 แผนผังแสดงกระบวนการทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้า

1.2.4 กระบวนการอบอ่อน (Annealing process)

กระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการหลัก และเป็นหัวใจในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ทำให้เหล็กที่ผ่านการรีดเย็นนั้นเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่ทั้งหมด ซึ่งทำให้เหล็กอ่อนตัวลง และเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานด้านการขึ้นรูป โดยโรงงานกรณีศึกษานั้น ใช้กระบวนการอบอ่อนแบบ Batch annealing process หรือ BAF คือการอบอ่อนแบบเตาอบ โดยมีขั้นตอนการอบอ่อนดังนี้



รูปที่ 1.11 แผนผังแสดงกระบวนการอบอ่อนแบบ Batch annealing furnace (BAF)

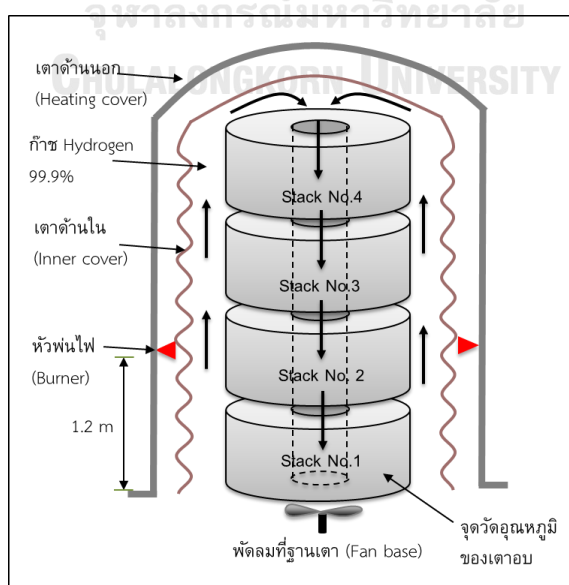
1.2.4.1 ชั้นจัดเตรียม เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน จะถูกพลิกวางในลักษณะแนวนอน (Eye up position) และจะถูกยกลำเลียงด้วยเครนแม่เหล็ก (Magnetic crane) เพื่อวางซ้อนกันเป็นชั้นจำนวน 4 ลูก โดยวางคั่นด้วยแผ่นรองซึ่งทำจากเหล็กหล่อ (Convactor plate) ทำการปิดแต่ละชั้น

ของม้วนเหล็กเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวการถ่ายเทความร้อน จากนั้นทำการครอบในส่วนเตาด้านใน (Inner cover) จากนั้นทำการไล่อากาศออกจากเตาด้านใน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนแทนที่อากาศ หลังจากนั้นจึงปล่อยก๊าซ ไฮโดรเจนเข้าไปแทนที่อีกครั้ง และจะทำให้บรรยากาศภายในเตาเป็นไฮโดรเจนทั้งหมด เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่มีการนำความร้อนที่ดีมาก และไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผิวเหล็ก ซึ่งเหมาะสมที่เป็นตัวกลางนำพาความร้อนจากผนังเตาไปสู่ม้วนเหล็ก



รูปที่ 1.12 ลักษณะการวางม้วนเหล็กจำนวน และการครอบด้วยเตาด้านใน (Inner cover)

1.2.4.2 ขั้นตอนการให้ความร้อน (Heating) ทำการครอบเตาอบในส่วนให้ความร้อน (Heating cover) จากนั้นทำการจุดไฟโดยใช้เชื้อเพลิงจาก LPG โดยพ่นไปยังผนังด้านนอกของเตาด้านใน (Inner cover) ซึ่งครอบม้วนเหล็กไว้ ความร้อนจะทำการถ่ายเทใน 2 ลักษณะ คือ โดยการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อน จากผนังเตาด้านใน (Inner cover) ผ่านก๊าซไฮโดรเจนที่มีระบบหมุนเวียนอยู่ภายในเตา ไปยังม้วนเหล็ก ตามแผนผังตามรูปที่ 1.13

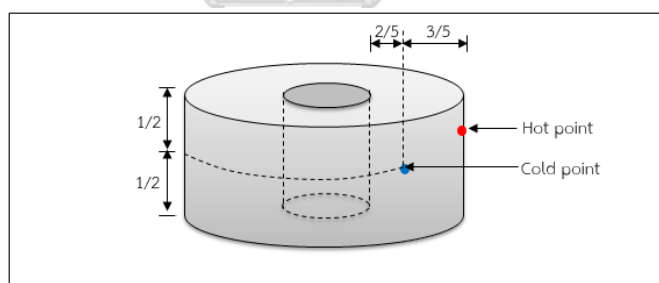


รูปที่ 1.13 แสดงลักษณะการอบอ่อนของเตาอบแบบ Batch annealing process

ในช่วงนี้การเพิ่มอุณหภูมินี้ ภายในเตาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) ซึ่งอุณหภูมิเป้าหมาย ที่ใช้ในการอบนั้นขึ้นอยู่กับ ประเภทและเกรดของ เหล็กนั้น ๆ จะใช้ระยะเวลาในขั้นตอนนี้ ประมาณ 8-10 ชั่วโมง เพื่อให้เหล็กเริ่มเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization)

1.2.4.3 ขั้นตอนการอบแช่ หรืออบเพื่อกระจายความร้อน (Soaking) หลังจากอุณหภูมิของ เตาอบถึงจุดที่กำหนด จะทำการควบคุมอุณหภูมิที่ค่านี้ไว้อีกหนึ่งระยะหนึ่งเพื่อให้มีการกระจายของ ความร้อนไปยังม้วนเหล็กได้อย่างทั่วถึง ทุกส่วนในม้วนเหล็ก ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 6-7 ชั่วโมง เหล็กจะเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ และเกิดการขยายตัวของเกรน (Grain Growth)

เพื่อให้มั่นใจว่าทุกส่วนของม้วนเหล็ก ได้รับอุณหภูมิอย่างทั่วถึงสำหรับการตกผลึกใหม่นั้น จะมีการวัดอุณหภูมิที่บริเวณรอบนอกของม้วนเหล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ร้อนที่สุด (Hot point) และบริเวณ ภายในม้วนเหล็ก ระยะประมาณ 3 ใน 5 ส่วนของความหนาของม้วนเหล็กโดยวัดจากรอบนอกสุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ม้วนเหล็กร้อนน้อยสุด (Cold point) โดยปกติจะทำการวัดในม้วนเหล็กที่วางอยู่ชั้นที่ 1 คือล่างสุดของเตา โดยอุณหภูมิเมื่อจบขั้นตอนการกระจายความร้อน (Soaking) นั้น ทั้ง 2 จุด ดังกล่าวจะต้องมีอุณหภูมิเท่ากัน ดังรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในม้วนเหล็ก จุด Hot point และ Cold point



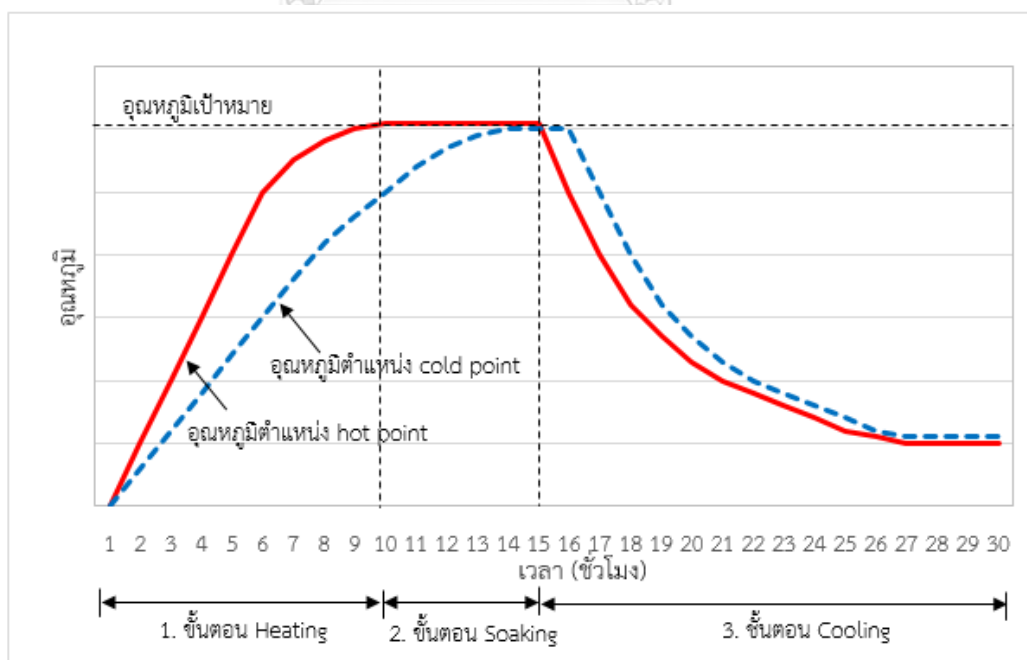
รูปที่ 1.15 ลักษณะการครอบเตาด้านนอก (Heating cover) และทำการยก Heating cover ออก

1.2.4.4. ขั้นตอนทำให้เย็นตัวลง (Cooling) เมื่อทำการอบจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายแล้ว จะเริ่มกระบวนการทำให้เย็นตัวลง โดยทำการเอาเตาอบ (Heating cover) ออกแล้วสวมชุดระบายความร้อน (Cooling cover) ในขั้นตอนนี้จะทำการเป่าลมไปยังเตาด้านใน (Inner cover) เพื่อทำการลดอุณหภูมิของเหล็กลงอย่างช้า ๆ จะใช้เวลาประมาณ 15-20 ชั่วโมง จนอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 70 องศาเซลเซียส จึงทำการนำม้วนเหล็กออกจากเตา นำไปวางให้เย็นตัวในอากาศ ในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ จากนั้นจึงจะนำไปผลิตต่อที่กระบวนการถัดไป



รูปที่ 1.16 ขั้นตอนการทำให้เย็นตัวในอากาศในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

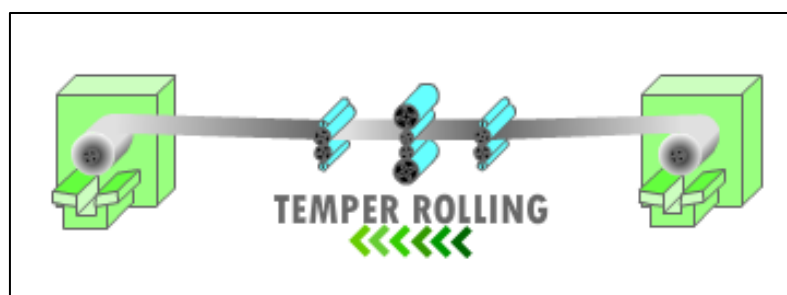
สำหรับกระบวนการอบอ่อนในปัจจุบัน แสดงอุณหภูมิการอบ กับเวลา ได้ตามรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 แผนผังตามทฤษฎีของการอบอ่อนในปัจจุบัน ระหว่างอุณหภูมิการอบ เทียบกับเวลา

1.2.5 กระบวนการรีดซ้ำ (Temper mill process)

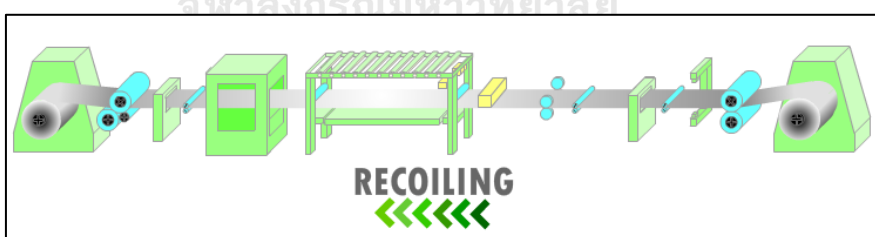
หลังจากผ่านกระบวนการอบอ่อน เหล็กจะคืนตัวสมบูรณ์ หรือตกผลึกใหม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดจุดคราก (Yield point elongation) หากนำเหล็กไปใช้งานจะพบกับปัญหา รอยครากหลังจากการขึ้นรูป Stretcher stain ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการรีดซ้ำเพียงเล็กน้อย เพื่อขจัดจุดครากดังกล่าว รวมถึงการปรับปรุงความหยาบผิว (Roughness) และความเรียบของแผ่นเหล็กด้วย



รูปที่ 1.18 แผนผังแสดงกระบวนการรีดซ้ำ (Temper mill process)

1.2.6 กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ (Recoiling line)

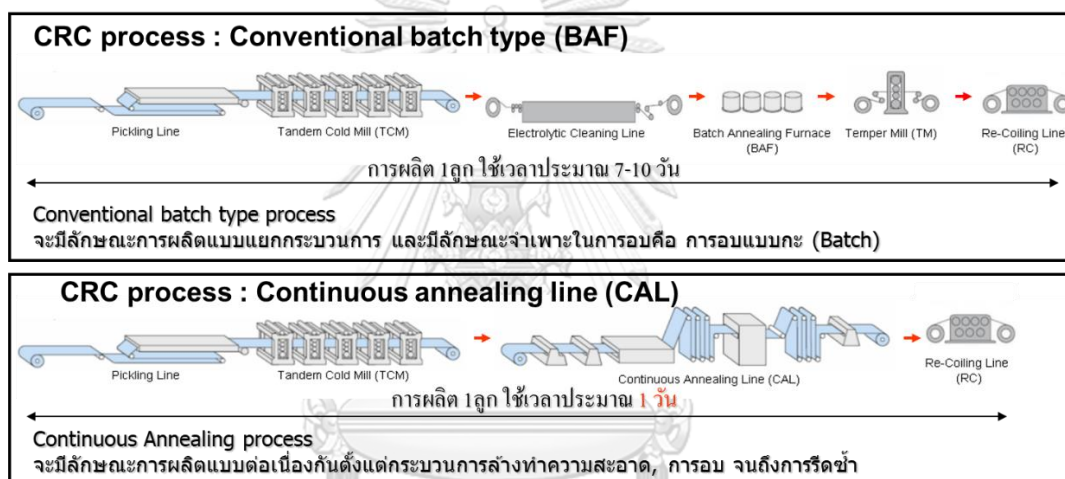
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น จุดประสงค์เพื่อการควบคุมคุณภาพเป็นหลัก ได้แก่ การตรวจสอบสภาพผิวเหล็กตลอดความยาวม้วน, การวัดขนาดความหนาตลอดความยาวม้วนด้วยรังสี X-ray หรือ Y-ray, การส่มวัดความกว้าง, การตัดขอบเพื่อควบคุมความกว้าง, การเคลือบน้ำมันเพื่อป้องกันสนิม, การตัดแบ่งม้วนเหล็กให้ได้น้ำหนักตามที่ลูกค้าต้องการ รวมถึงการตัดชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ส่งไปยังห้องปฏิบัติการทดสอบ



รูปที่ 1.19 แผนผังแสดงกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ (Recoiling line)

หากมองกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นของโรงงานกรณีศึกษา กระบวนการสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กนั้น คือกระบวนการอบอ่อน เนื่องจากเป็นกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ทำให้เหล็กตกผลึกใหม่ และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กเป็นหลัก ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น หรือกระบวนการผลิตมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ

1. การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น แบบ Conventional batch type (BAF) คือหลังผ่านกระบวนการรีดเย็นแล้ว จะทำการอบอ่อนในลักษณะแบบกะ หรือการอบอ่อนเหล็กทั้งม้วน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิม ซึ่งมีข้อเสียในเรื่องของการที่ส่งถ่ายความร้อนไปยังเหล็กแผ่นนั้น อาจไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวม้วน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการผลิต
2. การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น แบบ Continuous annealing line (CAL) วิธีนี้เป็นวิธีสมัยใหม่ คือหลังผ่านกระบวนการรีดเย็นแล้ว จะทำการอบอ่อนในลักษณะเป็นสายพานลำเลียงแผ่นเหล็ก ผ่านอุโมงค์ความร้อน ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดี และสม่ำเสมอตลอดความยาว



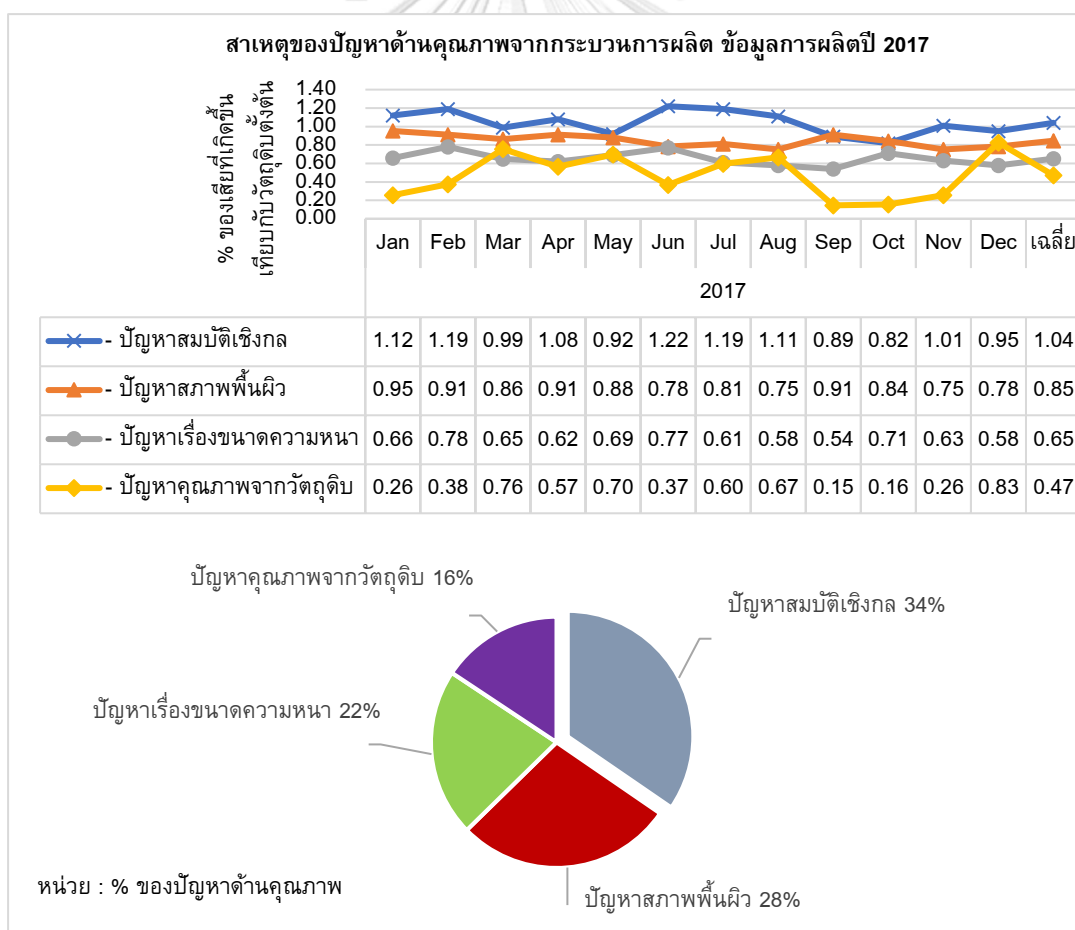
รูปที่ 1.20 เทคโนโลยีในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น ทั้ง 2 แบบ คือ Batch และ CAL

ในกระบวนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษานั้น เป็นกระบวนการผลิตเป็นแบบที่ 1 คือ Conventional batch type annealing (BAF) ซึ่งจากข้อมูลการผลิตและสภาพปัญหาในปัจจุบันพบว่าข้อจำกัดของการอบอ่อนในลักษณะนี้ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมบัติเชิงกลไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของแผ่นเหล็ก ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลในกระบวนการผลิต เพื่อนำมาปรับปรุงหรือลดความคลาดเคลื่อน และทำให้การผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คุณภาพของเหล็กแผ่นรีดเย็นนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ได้แก่ คุณภาพในด้านขนาด (Dimension), คุณภาพด้านสภาพพื้นผิว (Surface appearance), รวมถึงคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) โดยลักษณะการใช้งานเหล็กแผ่นรีดเย็นนั้น ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้งานในลักษณะงานขึ้นรูปเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งเหล็กแผ่นรีดเย็นนั้น เป็นผลิตภัณฑ์ที่ควบคุมจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ดังนั้น โรงงานผู้ผลิต จึงจำเป็นต้องควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

จากการศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นกรณีศึกษา บริษัทให้ความสำคัญถึงปัญหาในด้านคุณภาพ จากการเก็บข้อมูลการผลิตตั้งแต่เดือน มกราคม ปี 2017 ถึงธันวาคม ปี 2017 พบว่าสัดส่วนปัญหาด้านคุณภาพหลัก ที่เกิดขึ้นได้แก่ปัญหาด้านสมบัติเชิงกล คิดเป็น 1.04% ของปริมาณการผลิต



รูปที่ 1.21 สาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพและปัญหาจากกระบวนการผลิต ข้อมูลการผลิตปี 2017

จากการเก็บข้อมูลในส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียขึ้นในด้านคุณภาพ สามารถแยกออกเป็น 4 สาเหตุหลัก ๆ คือ

1) จากปัญหาสมบัติเชิงกลไม่ได้ตามมาตรฐาน (Mechanical properties NG) คิดเป็น 34% ของปัญหาด้านคุณภาพ ได้แก่ การตัดบางส่วนของม้วนเหล็กทิ้ง หรือทั้งม้วนเหล็ก อันเนื่องมาจากค่าสมบัติเชิงกลไม่ได้ตามมาตรฐาน เช่น ค่า Hardness สูงเกินมาตรฐาน, ค่า Yield strength สูงเกินมาตรฐาน, ค่า %Elongation ต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นต้น โดยจะทราบหลังจากนำแผ่นเหล็กมาผ่านการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ

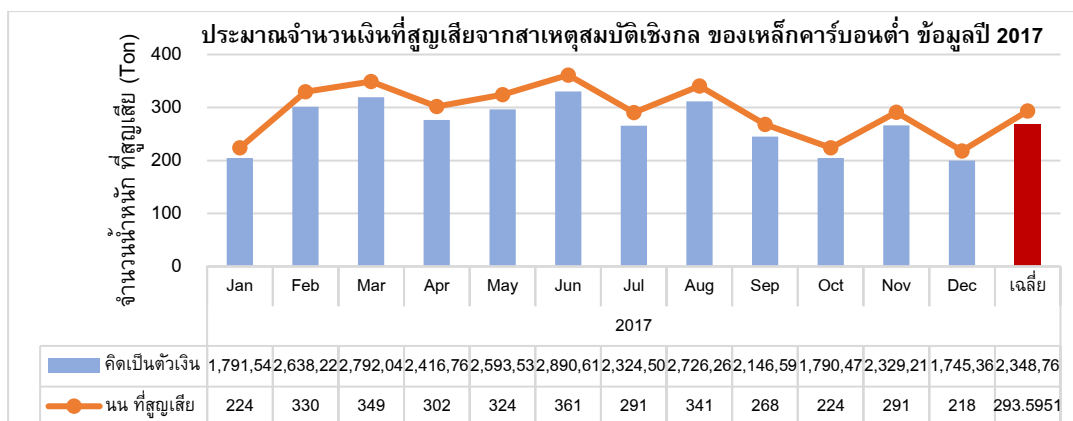
2) จากปัญหาด้านสภาพพื้นผิว (Surface and Flatness NG) คิดเป็น 28% ของปัญหาด้านคุณภาพ ได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากการผลิต เช่น ลูกรีดมีรอยตำหนิ ทำให้เมื่อรีดแล้วเกิดรอยบนผิวเหล็ก หรือความผิดปกติในกระบวนการรีด ทำให้เกิดรอยยับ คลื่นบนผิวเหล็ก จากสาเหตุเหล่านี้ ทำให้สภาพผิวหรือความเรียบไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานไม่สามารถส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้าได้ และต้องนำมาตัดทิ้งในส่วนนี้

3) จากปัญหาเรื่องขนาดความหนา (Thickness out off tolerance) คิดเป็น 22% ของปัญหาด้านคุณภาพ ได้แก่ ความหนาของแผ่นเหล็กหลังจากผ่านการรีดแล้ว ไม่ได้ตามมาตรฐาน คือหนาหรือบางเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องตัดทิ้ง

4) จากปัญหาคุณภาพจากวัตถุดิบ (Defect from raw-material) คิดเป็น 16% ของปัญหาด้านคุณภาพ ได้แก่ ปัญหาสิ่งมลทินในเนื้อเหล็ก Inclusion หรือ Slag อันเนื่องมาจาก กระบวนการหลอมโลหะ ในขั้นตอนการผลิตของวัตถุดิบ จะส่งผลให้เกิดปัญหา เช่น เกิดรูทะลุ หรือผิวหตุร่อน โดยจะตรวจพบหลังจากกระบวนการรีด

จากการจำแนกสาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพที่ทำให้เกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต อันดับแรกด้านสมบัติเชิงกล ซึ่งเป็นปัญหาที่กระทบต่อการสูญเสียในการผลิต

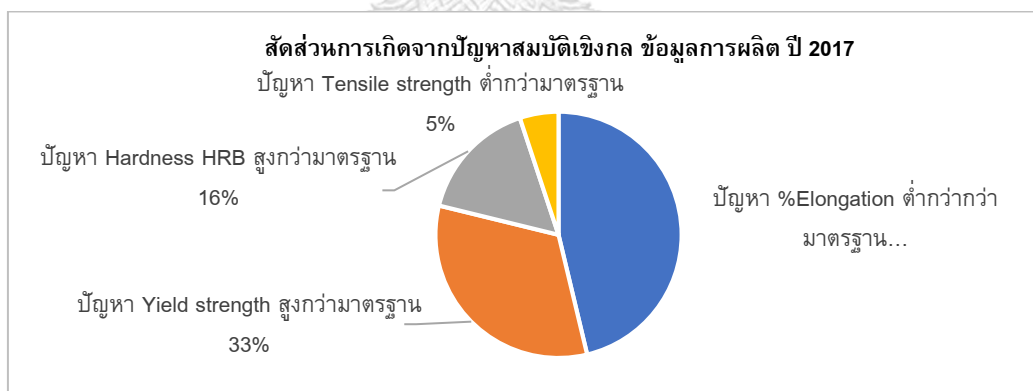
เมื่อพิจารณาปัญหานี้ในประเภทกลุ่มเหล็กคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นประเภทที่ปริมาณการผลิตสูงสุด จากข้อมูลการผลิตปี 2017 หากประมาณจำนวนเงินที่สูญเสียไป อันเนื่องจากสาเหตุของสมบัติเชิงกล นั้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2 ล้าน 3 แสนบาท ต่อเดือน



รูปที่ 1.22 ประมาณจำนวนเงินที่สูญเสียจากสาเหตุสมบัติเชิงกล ของเหล็กคาร์บอนต่ำ ในปี 2017

ได้ทำการจำแนกปัญหาด้านสมบัติเชิงกล ในประเภทเหล็กคาร์บอนต่ำ ข้อมูลการผลิต 2017 โดยพบปัญหาหลัก ๆ อยู่ 4 ประเภทได้แก่

- 1) ปัญหา %Elongation ต่ำกว่ามาตรฐาน คิดเป็น 46% ของปัญหาด้านสมบัติเชิงกล
- 2) ปัญหา Yield strength สูงกว่ามาตรฐาน คิดเป็น 33% ของปัญหาด้านสมบัติเชิงกล
- 3) ปัญหา ความแข็ง HRB สูงกว่ามาตรฐาน คิดเป็น 16% ของปัญหาด้านสมบัติเชิงกล
- 4) ปัญหา Tensile strength ต่ำกว่ามาตรฐาน คิดเป็น 5% ของปัญหาด้านสมบัติเชิงกล



รูปที่ 1.23 สัดส่วนการสูญเสีย จากปัญหาสมบัติเชิงกล ของโรงงานกรณีศึกษา ในปี 2017

ในการควบคุมคุณภาพด้านสมบัติเชิงกลของบริษัทกรณีศึกษานั้น เมื่อทำการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นผ่านกระบวนการสุดท้ายแล้ว ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็นทุกม้วน จะถูกตัดตัวอย่างมาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อแสดงค่าลงในใบรับรองคุณภาพ ก่อนทำการส่งมอบให้กับลูกค้า โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test) เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness test) เป็นต้น เพื่อยืนยันคุณภาพด้านสมบัติเชิงกลได้มาตรฐานตลอดความยาวม้วนเหล็ก โดยจะทำการตัดตัวอย่างมาทดสอบ

ในช่วง หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งที่ผ่านมารวมถึงสภาพปัญหาในปัจจุบัน พบกว่าผลการทดสอบค่าสมบัติเชิงกลที่ได้นั้น มีบางตำแหน่งพบว่ามีความสมบัติเชิงกลไม่ได้ตามมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องตัดในส่วนตำแหน่งดังกล่าวทิ้ง หรือนำผลิตภัณฑ์กลับเข้าผลิตใหม่ ทำให้เกิดการสูญเสียในกระบวนการผลิต

ตัวอย่างข้อมูลค่าสมบัติเชิงกล ในเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ Product A ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ทำการเก็บข้อมูลในช่วง มกราคม-ธันวาคม ในปี 2017 จำนวน 226 Coils แสดงในตารางที่ 1.1

ข้อมูล	มาตรฐาน ค่าควบคุม		สมบัติเชิงกลของเหล็กประเภทคาร์บอนต่ำ ความหนา 1.0 mm ข้อมูลการผลิตปี 2017													
			ตำแหน่งหัวม้วน				ตำแหน่งหัวม้วน				ตำแหน่งหัวม้วน				ทุกตำแหน่ง	
	LCL-UCL	ความเคียว	Min	Max	Ave	SD	Min	Max	Ave	SD	Min	Max	Ave	SD	Ave	SD
Yield strength (MPa)	120-280	200 ± 80	185	284	239.8	19.4	200	282	250.8	12.9	191	283	249.6	19.1	246.7	18.0
Tensile strength (MPa)	270-370	320 ± 50	301	357	333.8	10.1	321	361	343.4	7.7	316	364	343.6	8.6	340.2	10.0
%Elongation	38-50	44 ± 6	37	45	41.0	1.5	36	43	39.6	1.1	37	43	39.7	1.3	40.1	1.5
Hardness (HRB)	20-60	40 ± 20	40	60	52.1	3.2	47	62	54.2	2.4	45	61	54.3	2.9	53.5	3.0

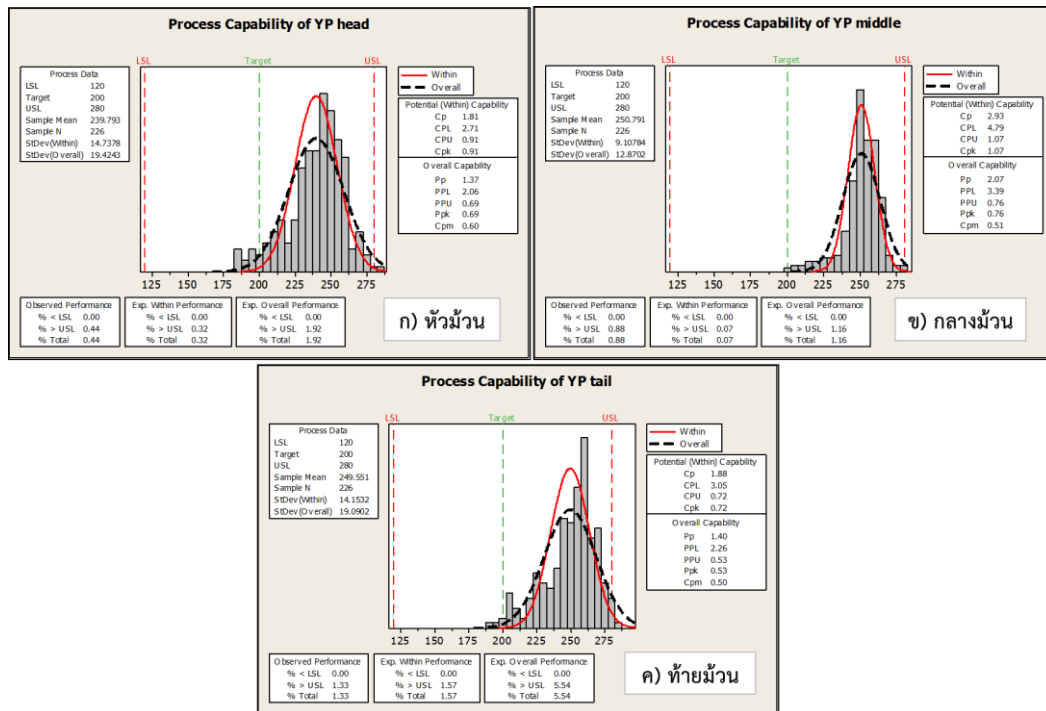
ตารางที่ 1.1 สมบัติเชิงกลของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 mm ข้อมูลปี 2017 ก่อนการศึกษา

1) Yield strength (จุดที่เหล็กเริ่มมีการเสียรูป หน่วยเป็น MPa)

- พบว่ากลุ่มของข้อมูลมีค่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงขอบเขตช่วงควบคุมบน (UCL)
- ค่าเฉลี่ย ทั้ง 3 ตำแหน่งในส่วนหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีค่าแตกต่างกันบ้าง โดยเฉพาะตำแหน่งกลางม้วนจะมีค่า Yield strength สูงกว่าหัวม้วน และท้ายม้วน
 - ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีค่าสูงในตำแหน่งหัวและท้ายม้วน เมื่อเทียบกับกลางม้วน
 - เมื่อนำมาพิจารณาในระดับคุณภาพที่ $\pm 2SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ส่วนระดับคุณภาพที่ $\pm 3SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ ทุกตำแหน่ง
 - ความสามารถของกระบวนการ พบว่ามีค่า Cpk อยู่ที่ 0.72 ดังตารางที่ 1.2

ค่า Yield strength	มาตรฐาน ค่าควบคุม		% Elongation ของเหล็กประเภทคาร์บอนต่ำ ความหนา 1.0 mm ข้อมูลการผลิตปี 2017									
			Ave	SD	ระดับคุณภาพ (SD)				ความสามารถของกระบวนการ			
	LCL-UCL	ความเคียว			-2SD	+2SD	-3SD	+3SD	Cp	CPL	CPU	Cpk
ตำแหน่งหัวม้วน	120-280	200 ± 80	239.8	19.4	200.9	278.6	181.5	298.1	1.81	2.71	0.91	0.91
ตำแหน่งกลางม้วน			250.8	12.9	225.1	276.5	212.2	289.4	2.93	4.79	1.07	1.07
ตำแหน่งท้ายม้วน			249.6	19.1	211.4	287.7	192.3	306.8	1.88	3.05	0.72	0.72

ตารางที่ 1.2 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Yield strength ก่อนการศึกษา



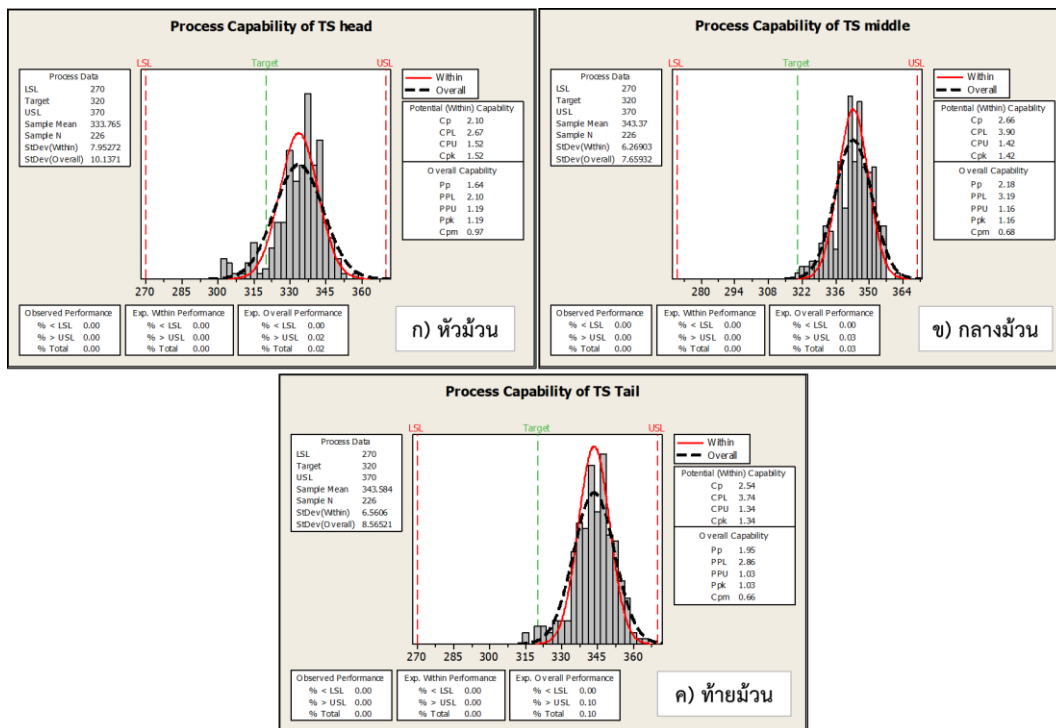
รูปที่ 1.24 ค่า Yield strength ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)

2) Tensile strength (จุดที่รับแรงดึงได้สูงสุด หน่วยเป็น MPa)

- พบว่ากลุ่มของข้อมูลมีค่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงขอบเขตช่วงควบคุมบน (LCL)
- ค่าเฉลี่ย ทั้ง 3 ตำแหน่งในส่วนหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีค่าแตกต่างกันน้อย โดยเฉพาะตำแหน่งกลางม้วนจะมีค่า Tensile strength สูงกว่าหัวม้วน และท้ายม้วน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีค่าสูงในตำแหน่งหัวและท้ายม้วน เมื่อเทียบกับกลางม้วน
- เมื่อนำมาพิจารณาระดับคุณภาพที่ $\pm 2SD$ และระดับคุณภาพที่ $\pm 3SD$ สามารถควบคุมได้ทุกตำแหน่ง (ข้อมูลกลุ่มนี้ไม่พบปัญหาด้านสมบัติเชิงกล Tensile strength)
- ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) พบว่ามีค่า Cpk อยู่ที่ 1.34-1.52 ดังตารางที่ 1.3

ค่า Tensile strength	มาตรฐาน ค่าควบคุม		% Elongation ของเหล็กประเภทคาร์บอนต่ำ ความหนา 1.0 mm ข้อมูลการผลิตปี 2017									
	LCL-UCL	ความเผื่อ	Ave	SD	ระดับคุณภาพ (SD)				ความสามารถของกระบวนการ			
					-2SD	+2SD	-3SD	+3SD	Cp	CPL	CPU	Cpk
ตำแหน่งหัวม้วน	270-370	320 + 50	333.8	10.1	313.6	354.0	303.5	364.1	2.10	2.67	1.52	1.52
ตำแหน่งกลางม้วน			343.4	7.7	328.0	358.8	320.3	366.5	2.66	3.90	1.42	1.42
ตำแหน่งท้ายม้วน			343.6	8.6	326.4	360.8	317.8	369.4	2.54	3.74	1.34	1.34

ตารางที่ 1.3 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Tensile strength ก่อนการศึกษา



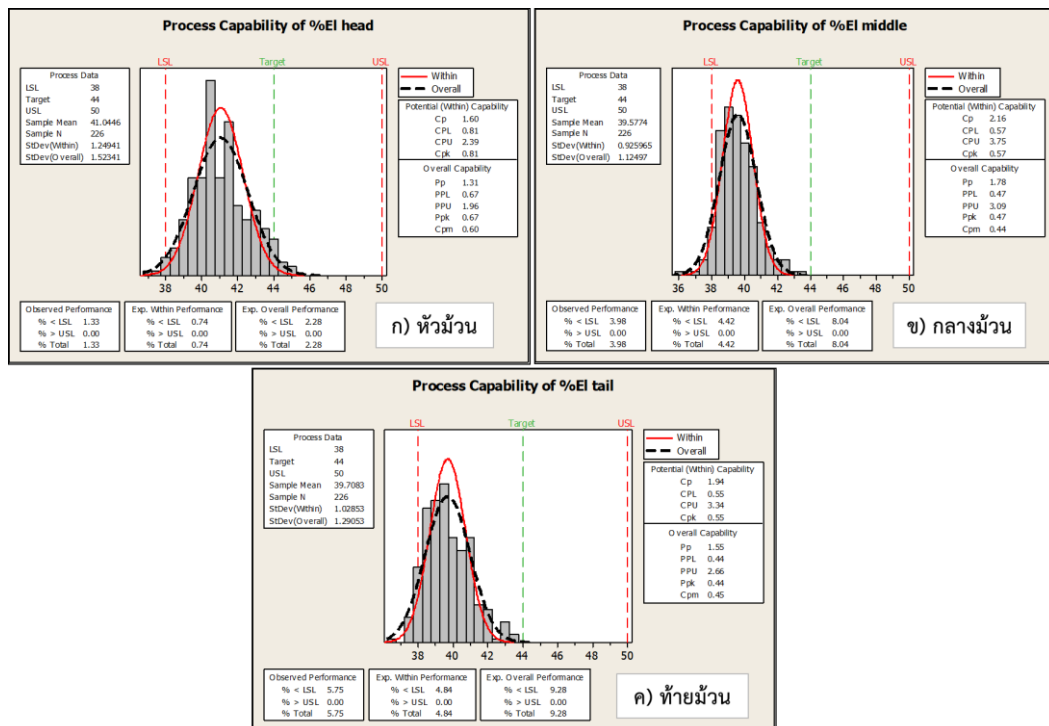
รูปที่ 1.25 ค่า Tensile strength ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)

3) %Elongation (ความสามารถในการยืดตัว หน่วยเป็น %)

- พบว่ากลุ่มของข้อมูลมีค่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงขอบเขตช่วงควบคุมล่าง (LCL)
- ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ตำแหน่งในส่วนหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีค่าแตกต่างกันบ้าง โดยเฉพาะตำแหน่งกลางม้วนจะมีค่า %Elongation ต่ำกว่าตำแหน่งหัวม้วนและท้ายม้วน
 - ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีค่าสูงในตำแหน่งหัวและท้ายม้วน เมื่อเทียบกับกลางม้วน
 - เมื่อนำมาพิจารณาระดับคุณภาพที่ $\pm 2SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ที่ตำแหน่งกลางม้วนและท้ายม้วน ส่วนระดับคุณภาพที่ $\pm 3SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ ทุกตำแหน่ง
 - ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) พบว่ามีค่า Cpk อยู่ที่ 0.55-0.87 ดังตารางที่ 1.4

ค่า %Elogation	มาตรฐาน ค่าควบคุม		% Elongation ของเหล็กประเภทคาร์บอนต่ำ ความหนา 1.0 mm ข้อมูลการผลิตปี 2017									
	LCL-UCL	ความเผื่อ	Ave	SD	ระดับคุณภาพ (SD)				ความสามารถของกระบวนการ			
					-2SD	+2SD	-3SD	+3SD	Cp	CPL	CPU	Cpk
ตำแหน่งหัวม้วน	38-50	44 + 6	41.0	1.5	38.0	44.1	36.5	45.6	1.60	0.81	2.39	0.81
ตำแหน่งกลางม้วน			39.6	1.1	37.3	41.8	36.2	43.0	2.16	0.57	3.75	0.57
ตำแหน่งท้ายม้วน			39.7	1.3	37.1	42.3	35.8	43.6	1.94	0.55	3.34	0.55

ตารางที่ 1.4 ระดับคุณภาพและความสามารถของกระบวนการ ของค่า %Elongation ก่อนการศึกษา



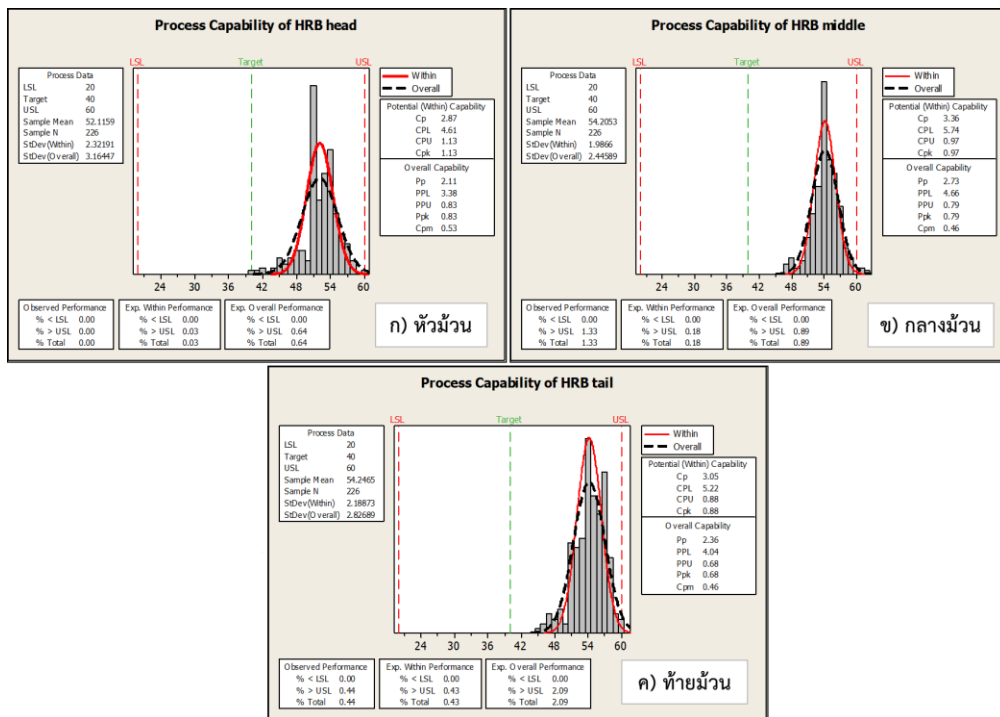
รูปที่ 1.26 ค่า %Elongation ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)

4) Hardness HRB (ความแข็งบนผิวเหล็ก หน่วยเป็น HRB)

- พบว่ากลุ่มของข้อมูลมีค่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงขอบเขตช่วงควบคุมบน (UCL)
- ค่าเฉลี่ย ทั้ง 3 ตำแหน่งในส่วนหัวม้วน กลางท้ายม้วน มีค่าแตกต่างกันบ้างโดยเฉพาะตำแหน่งกลางม้วนจะมีค่า Hardness สูงกว่าตำแหน่งหัวม้วน และท้ายม้วน
 - ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีค่าสูงในตำแหน่งหัวและท้ายม้วน เมื่อเทียบกับกลางม้วน
 - เมื่อนำมาพิจารณาระดับคุณภาพที่ $\pm 2SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ที่ตำแหน่งกลางม้วนและท้ายม้วน ส่วนระดับคุณภาพที่ $\pm 3SD$ ไม่สามารถควบคุมได้ ทุกตำแหน่ง
 - ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) พบว่ามีค่า Cpk อยู่ที่ 0.72-1.07 ดังตารางที่ 1.5

ค่า Hardness	มาตรฐาน ค่าควบคุม		% Elongation ของเหล็กประเภทคาร์บอนต่ำ ความหนา 1.0 mm ข้อมูลการผลิตปี 2017									
	LCL-UCL	ความเผื่อ	Ave	SD	ระดับคุณภาพ (SD)				ความสามารถของกระบวนการ			
					-2SD	+2SD	-3SD	+3SD	Cp	CPL	CPU	Cpk
ตำแหน่งหัวม้วน	120-280	40 + 20	52.1	3.2	45.8	58.4	42.6	61.6	2.87	4.61	1.13	1.13
ตำแหน่งกลางม้วน			54.2	2.4	49.3	59.1	46.9	61.5	3.36	5.47	0.97	0.97
ตำแหน่งท้ายม้วน			54.3	2.9	48.5	60.1	45.5	63.1	3.05	5.22	0.88	0.88

ตารางที่ 1.5 ระดับคุณภาพ และความสามารถของกระบวนการ ของค่า Hardness HRB ก่อนการศึกษา



รูปที่ 1.27 ค่า Hardness ของเหล็ก Product A ความหนา 1.0 มม. ตำแหน่งหัวม้วน (ก), กลางม้วน (ข) และท้ายม้วน (ค)

จากสภาพปัญหาในปัจจุบันนี้ แสดงให้เห็นว่าเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด Product A มีค่าสมบัติเชิงกล ในส่วนค่า %Elongation, Hardness HRB และ Yield strength มีความแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของม้วนเหล็ก แสดงให้เห็นถึงค่าความแปรผันสูง หรือมีค่า Cpk อยู่ในระดับต่ำ หากพิจารณาในระดับคุณภาพ $\pm 3SD$ ยังพบว่าไม่สามารถควบคุมค่าให้อยู่ในระดับดังกล่าวได้

ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสีย ของโรงงานกรณีศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาสมบัติเชิงกล มีแนวความคิดปรับปรุงโดยมุ่งไปที่กระบวนการอบอ่อน ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ และเวลาที่ใช้ในการ Annealing time เพื่อให้สามารถควบคุมค่าสมบัติเชิงกลให้ได้อย่างเหมาะสม ยกตัวอย่างผลกระทบของการนำเหล็กที่มีสมบัติเชิงกลที่มีค่า %Elongation ต่ำ ไปใช้งานขึ้นรูป คือ ชิ้นงานแตก ขาดจากกัน ไม่สามารถใช้งานได้ ดังรูปที่ 1.28



รูปที่ 1.28 ตัวอย่างปัญหาขึ้นรูปแล้วแตก สาเหตุจาก %Elongation ต่ำ

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษา ในกลุ่มเหล็กแผ่นรีดเย็นประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด Product A ที่ความหนา 1.0 มิลลิเมตร. ซึ่งเป็นเหล็กอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณการใช้งานสูงสุดในกลุ่ม
2. ตัวแปรที่สนใจคือค่าสมบัติเชิงกลทั้ง 4 ตัว คือ Yield strength, Tensile strength, %Elongation, Hardness HRB
3. ปัจจัยที่สนใจคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temp) และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต
2. นำข้อมูลที่ได้มา เพิ่มขีดความสามารถในการควบคุมสมบัติเชิงกลให้ ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ หรือในกรณีลูกค้าต้องการ ค่าเผื่อต่ำ (Narrow tolerance) ในด้านสมบัติเชิงกล
3. สามารถเพิ่มมูลค่าของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผลิตขึ้นมาได้
4. นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลตัวอื่นต่อไป

1.7 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัยสามารถกำหนดเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. ศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาอย่างละเอียด ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผลกระทบต่อของอุณหภูมิที่มีต่อเหล็กแผ่นรีดเย็น ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล รวมถึงการวิเคราะห์ระบบการวัด
2. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในอดีต เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบการทดลอง

3. ทำการทดลอง โดยจำลองสภาวะการอบอ่อนในเตาขนาดเล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิอบอ่อน, อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ, เวลาการอบอ่อน Annealing time
4. จากนั้นทำการวัดผลค่า สมบัติเชิงกล %Elongation, Hardness HRB, Yield strength รวมถึง การทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก (Microstructure) ก่อนและหลังการอบอ่อน
5. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ โดยใช้หลักการสถิติทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบสมมติฐาน และการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิต ที่จะต้องนำไปปรับใช้ ในกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และทำการสรุปผลในขั้นการวิเคราะห์
6. หาแนวทางในการนำกระบวนการที่พัฒนาขึ้น ไปประยุกต์จริงในโรงงานกรณีศึกษา
7. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะต่าง ๆ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.8 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัยตั้งแต่ธันวาคม 2560 ถึง มิถุนายน 2561ระยะเวลา 8 เดือน

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2061																											
		ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม				มิถุนายน			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	ศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาอย่างละเอียด ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเหล็กแผ่นรีดเย็น ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล รวมถึงการวิเคราะห์ระบบการวัด																												
2	ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในอดีต เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบการทดลอง																												
3	ทำการทดลอง โดยจำลองสภาวะการอบอ่อนในเตาขนาดเล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิอบอ่อน, อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ, เวลาการอบแช่ soaking time																												
4	จากนั้นทำการวัดผลค่า สมบัติเชิงกล %Elongation, Hardness HRB, Yield point รวมถึง การทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก ก่อนและหลังการอบอ่อน																												
5	นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ โดยใช้หลักการสถิติทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบสมมติฐาน และการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิต ที่จะต้องนำไปปรับใช้ ในกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และทำการสรุปผลในขั้นการวิเคราะห์																												
6	หาแนวทางในการนำกระบวนการที่พัฒนาขึ้น ไปประยุกต์จริงในโรงงานกรณีศึกษา																												
7	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																												

ตารางที่ 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

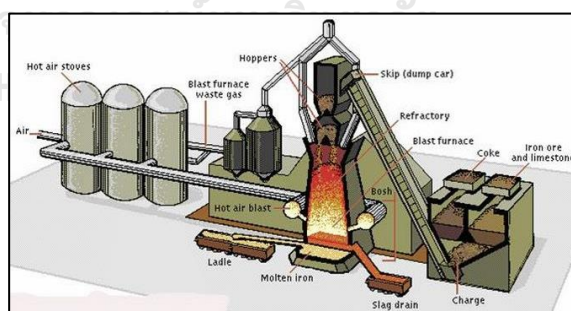
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น สิ่งสำคัญที่จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กก็คือกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้ต้องการที่จะควบคุม และศึกษาพฤติกรรมของสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด หรือเป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกระบวนการผลิตเหล็ก ตั้งแต่เริ่มต้น ไปจนถึงกระบวนการแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อได้ทำการรวบรวมทฤษฎี และเกี่ยวข้อง กับงานวิจัยมีดังนี้

2.1 กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า (Iron and steel making process)

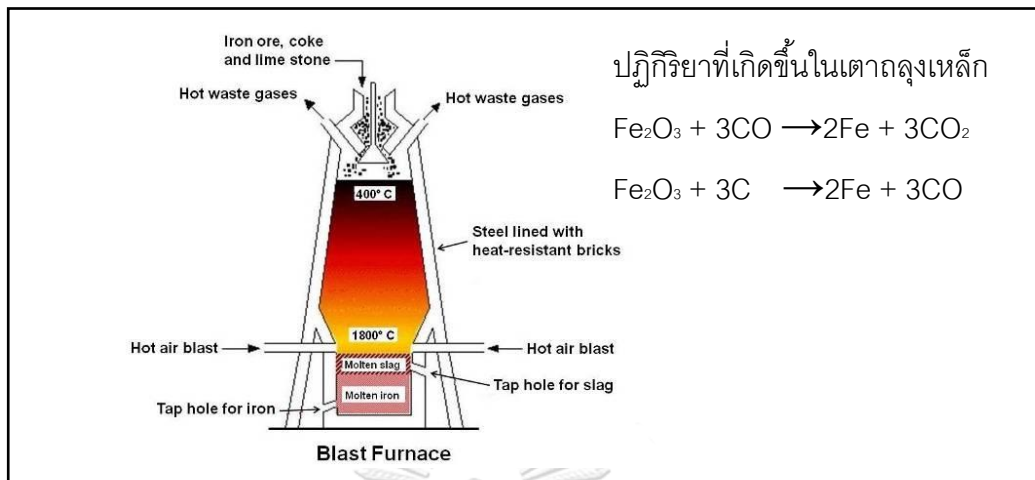
การผลิตเหล็กและเหล็กกล้านั้นมีความสำคัญที่จำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้รู้ถึงที่มาของวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น โดยมีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1.1 ขั้นตอนการถลุงเหล็ก (Iron making) เริ่มต้นจากเตรียมสินแร่เหล็ก (Iron ore) ที่ได้มาจากเหมืองเหล็ก ถ่านหิน (Coal) และหินปูน (Lime stone) ผ่านเข้าสู่กระบวนการถลุงในเตาถลุง (Blast furnace) โดยการเผาด้วยอุณหภูมิสูงให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการหลอมละลาย เพื่อให้ได้มาซึ่งน้ำเหล็กดิบ (Pig iron) น้ำเหล็กที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีธาตุมลทิน หรือธาตุที่ไม่ต้องการปะปนอยู่เยอะ ยกตัวอย่างเช่น น้ำเหล็กดิบจะมีปริมาณธาตุคาร์บอน อยู่ค่อนข้างสูง ประมาณ 4-5% ดังนั้น จากนั้นน้ำเหล็กดิบจะผ่านกระบวนการผลิตเหล็กกล้าถัดไป



รูปที่ 2.1 เตาถลุงเหล็ก (Blast furnace)

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตเหล็กกล้า (Steel making) น้ำเหล็กที่ได้จากการถลุงจะถูกนำมาสู่เตาออกซิเจน BOF (Basic oxygen furnace) ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำการเป่าออกซิเจนผ่านท่อไปยังน้ำเหล็กโดยตรง จุดประสงค์เพื่อทำการลดปริมาณของธาตุคาร์บอนลงให้อยู่ที่ประมาณ 0.01-1.5% รวมถึงลดปริมาณฟอสฟอรัสและซิลเฟอร์ลงด้วย



รูปที่ 2.2 เตาถลุงโลหะ (Blast furnace) และปฏิกิริยาในกระบวนการถลุง

2.1.3 ขั้นตอนการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงน้ำเหล็ก (Refining) น้ำเหล็กที่ได้จะผ่านกระบวนการปรับปรุงน้ำเหล็กโดยการเติมธาตุบางชนิด เพื่อทำการขจัดสิ่งมลทิน และปรับปรุงน้ำเหล็กให้มีส่วนผสมตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน ธาตุที่สำคัญได้แก่ C, Si, Mn, P, S, Al เป็นต้น จากนั้นผ่านกระบวนการย่อยได้แก่ การกำจัดออกซิเจน (Deoxidation), การกำจัดก๊าซในน้ำเหล็ก (Degassing) เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดี

2.1.4 ขั้นตอนการเทน้ำเหล็ก (Continuous casting) น้ำเหล็กที่ได้จะผ่านสู่กระบวนการเทน้ำเหล็ก เพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นรูปทรงต่าง ๆ ที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องต่อไป เช่น เหล็กแท่งทรงแบน (Slab) สำหรับนำไปรีดเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน, เหล็กแท่งใหญ่ (Blooms) สำหรับนำไปผลิตเป็นเหล็กโครงสร้างหรือชิ้นส่วนขนาดใหญ่, เหล็กแท่งเหล็ก (Billets) สำหรับนำไปผลิตเป็นเส้นลวดหรือแท่งเหล็กขนาดเล็ก เป็นต้น

2.2 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot rolled steel coil process)



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน

เริ่มต้นจากการนำเหล็กกล้าที่มีรูปทรงเป็นแท่งแบน (Slab) มาผ่านกระบวนการรีดร้อนลดขนาดที่อุณหภูมิประมาณ 1,100-1,250 องศาเซลเซียส ด้วยลูกกลิ้งหรือแท่นรีดขนาดใหญ่รีดให้เป็นแผ่นที่มีความหนาบางลงตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำให้เย็นลงโดยการผ่านน้ำหล่อเย็น แล้วเข้าสู่เครื่องม้วน เมื่อผลิตเสร็จเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ได้จะมีผิวสีเทาดำและอยู่ในลักษณะเป็นม้วน (coil) เรียกว่า “เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (hot-rolled coil)” หรือ “เหล็กม้วนดำ (black coil)”

เหล็กแผ่นรีดร้อน จะมีความหนาตั้งแต่ 1.0 –12 มม.หรือภาษาตลาดเรียกว่าเหล็กแผ่นดำ เพราะมีผิวสีดำเนื่องจากต้องรีดที่อุณหภูมิกว่า 700 องศาเซลเซียส โดยมากมักใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนในงานท่อ งานถังแก๊ส งานโครงสร้าง งานขึ้นรูปทั่วไปที่ไม่เน้นคุณภาพผิวและเป็นการขึ้นรูปไม่ลึกมาก เหล็กแผ่นรีดร้อนยังมีชนิดที่ผ่านการล้างผิวด้วยกรดเพื่อขจัดสนิมที่เกิดในการรีดร้อนออก หรือที่เรียกว่าเหล็กPO (Pickling and oil) เพื่อสามารถทำสีแล้วผิวจะสวยและทนทานกว่า

2.3 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold rolled steel coil process)



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน

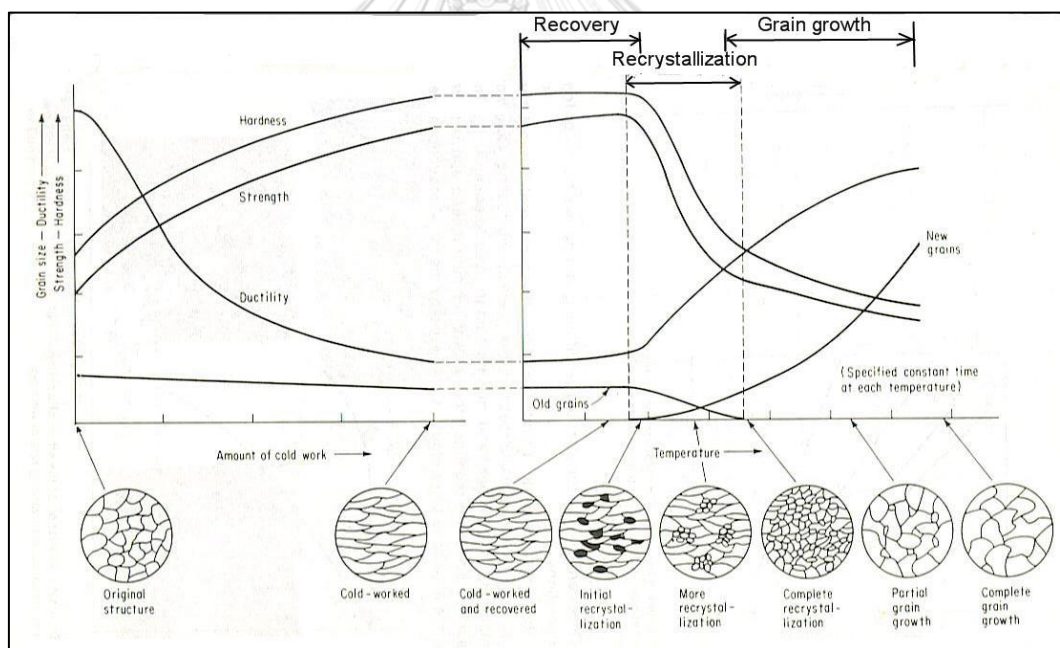
เหล็กแผ่นรีดเย็น คือการนำเหล็กแผ่นรีดร้อน มาผ่านกระบวนการรีดเย็นลดขนาดที่อุณหภูมิปกติ ด้วยลูกกลิ้งหรือแท่นรีดขนาดใหญ่รีดให้เป็นแผ่นที่มีความหนาบางลงตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดผิวอีกครั้งเพื่อทำการอบอ่อน (annealing) และรีดซ้ำเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบเป็นกระบวนการสุดท้าย เมื่อผลิตเสร็จเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ได้จะมีผิวสีเทาขาวและอยู่ในลักษณะเป็นม้วนเรียกว่า “เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน (Cold-rolled coil)”

เหล็กแผ่นรีดเย็น จะมีความหนาตั้งแต่ 0.1 –3.2 มม.หรือเรียกว่าเหล็กแผ่นขาวเพราะเป็นผิวที่ไม่มีสนิมร้อน (Scale) เหมือนเหล็กแผ่นรีดร้อน มีความสามารถในการบ่มขึ้นรูปลึกมากกว่าขึ้นตามลำดับ โดยมากมักใช้กับงานขึ้นรูปที่เน้นคุณภาพผิวและเป็นการขึ้นรูป เช่น ตัวถังรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าเฟอร์นิเจอร์ นำไปเคลือบดีบุกเพื่อผลิตกระป๋อง งานที่บ่มขึ้นรูปลึก งานต้องการความบางของแผ่นเหล็กเป็นพิเศษ

2.4 การตกผลึกใหม่ของเหล็ก (Recrystallization temperature)

เนื่องจากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น จะผ่านกระบวนการอบอ่อน ซึ่งทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเหล็กส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาในเรื่องนี้

การขึ้นรูปเย็น (Cold working) ในโลหะเป็นการขึ้นรูปถาวร (Plastic deformation) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมตัวของโลหะ ผลของการขึ้นรูปเย็น จะทำให้เกิดพลังงานสะสมภายในและเกิดการเหนียวทำให้เกิดลักษณะของ Strain hardening (ทำให้โลหะมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่ความเหนียวลดลง) และให้โครงสร้างเกรนเกิดการบิดเบี้ยว ถ้าเรานำโลหะที่ผ่านการรีดเย็นมาไปอบให้ความร้อน ในรูปแบบของ (Full Annealing) โดยเริ่มต้นอุณหภูมิต่ำไปจนถึงอุณหภูมิสูง เกินกว่าครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวของโลหะ เราจะพบการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 ขั้นตอน คือ Recovery (การคลายตัว), Recrystallization (การตกผลึกใหม่) และ Grain Growth (การโตของเกรน)



รูปที่ 2.5 ผลของการอบอ่อนที่มีต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างในระดับจุลภาค

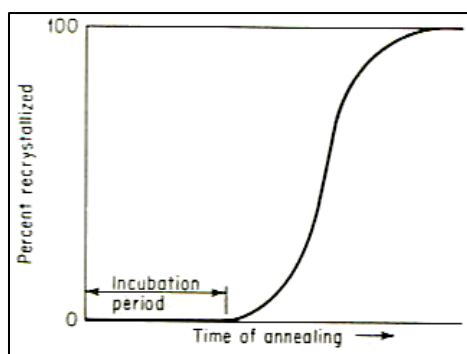
การอบอ่อน Annealing แบ่งเป็นสามลักษณะ คือ Recovery (การคลายตัว), Recrystallization (การตกผลึกใหม่) และ Grain Growth (การโตของเกรน) อธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

2.4.1 การอบคลายตัว (Recovery)

เป็นการอบคลายตัว ซึ่งเป็นกรรมวิธีทางความร้อน กระทำที่อุณหภูมิต่ำ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเกิดขึ้นโดยไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ผลที่เกิดขึ้นที่สำคัญของการอบคลายตัวคือ เป็นลักษณะของการลดหรือผ่อนคลายความเค้นภายในอันเกิดจากการขึ้นรูปเย็น กล่าวโดยสรุป การอบ Recovery ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของโลหะมากนัก การอบความร้อนในลักษณะนี้มีจุดมุ่งหมายเน้นไปที่การอบคลายความเคียด อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปเย็นของโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนที่เกิดบริเวณที่มีความเค้นสูงและอาจมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้นด้วยที่เรียกว่า Stress-Corrosion Cracking หรือ อาจมีจุดประสงค์เพื่อปลดปล่อยความเคียดเหลือค้างให้มากที่สุด ในทางปฏิบัติการอบชุบความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำ ดังที่อธิบายมา จะรู้จักในกรรมวิธีอบความร้อนที่เรียกว่า Stress Relief Annealing

2.4.2 การตกผลึกใหม่ (Recrystallization)

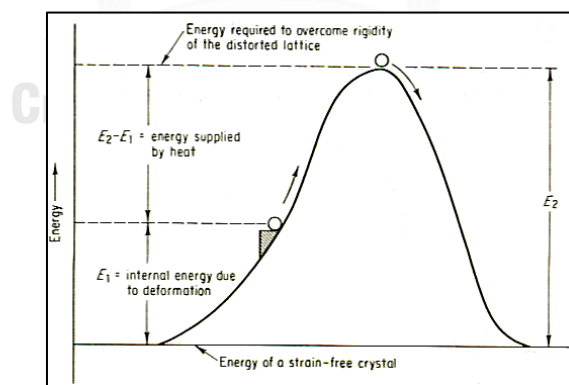
Recrystallization จะหมายถึง เกิดการตกผลึกอีกครั้งหนึ่งหลังจากที่เกิดมาแล้วในช่วงการเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวมาเป็นของแข็ง ดังนั้น Recrystallization จะเป็นปรากฏการณ์เกิดนิวเคลียสและขยายตัวเป็นผลึกใหม่ในสภาพของแข็ง เมื่ออุณหภูมิที่อบความร้อนสูงขึ้นจากช่วงของการอบ Recovery ผลึกขนาดเล็กมาก ๆ จะปรากฏขึ้นในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผลึกที่ปรากฏขึ้นนี้จะมีระบบผลึก และส่วนผสมไม่ต่างไปจากผลึกเดิมที่ถูกทำให้เปลี่ยนรูปไป ผลึกขนาดเล็กที่ปรากฏขึ้นมาใหม่นี้ จะปรากฏตามบริเวณขอบเกรน และตามแนว Slip Plane ก่อนซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปค่อนข้างมาก (Most Drastically Deformed) ดังที่เราทราบมาแล้วการฟอร์มเกรนใหม่จะต้องเริ่มต้นจากการรวมตัวของกลุ่ม อะตอมเป็นนิวเคลียส Recrystallization เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ร่วมกันระหว่างการกำเนิดนิวเคลียสและการขยายตัวให้เกรนใหม่ที่ปราศจากความเคียด (Strain Free)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อนกับเปอร์เซ็นต์ของการตกผลึกใหม่

อย่างไรก็ตามมีแนวคิดที่จะอธิบายถึงกระบวนการนี้โดยอาศัยหลักการของพลังงานภายในของอะตอมที่ปรับเปลี่ยนใน Lattice ในการพิจารณาเรื่องของการขึ้นรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) จะเน้นไปที่บริเวณระนาบที่เลื่อนผ่าน และบริเวณของเกรนจะเป็นจุดที่มีพลังงานภายในสูง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของ Dislocation มารวมกันหนาแน่น (Pile Up) โดยหลักการของ Strain Hardening แล้วการที่ Dislocation หรืออะตอมที่อยู่ใน Lattice ที่บิดเบี้ยวจะเคลื่อนไหวกลับมาอยู่ในสภาพที่ปราศจากความเครียด (Strain Free) ได้เองย่อมเป็นไปได้

พิจารณาอะตอมที่อยู่บริเวณขอบเกรนหรือ Slip Plane ถูกผลักดัน (โดยการถูกขึ้นรูปอย่างถาวร (Plastic deformation)) ให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นไปตำแหน่ง E1 ซึ่งอยู่เหนือระดับพลังงานของอะตอมใน Lattice ที่ยังไม่ถูกเปลี่ยนรูป แต่พลังงานที่ต้องการเพื่อให้อะตอมสามารถเอาชนะเพื่อให้หลุดออกมาจากลักษณะที่มั่นคงของ Lattice ที่บิดเบี้ยว (Rigidity of distorted lattice) คือพลังงานที่ตำแหน่ง E2 เพื่อให้อะตอมมีระดับพลังงานที่ตำแหน่ง E2 ซึ่งจะทำให้อะตอมสามารถคายพลังงานนี้และกลับสู่สภาพปราศจากความเครียดได้ จะต้องเพิ่มพลังงานให้กับอะตอมจำนวน $E_2 - E_1$ โดยใช้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนทำให้อะตอมมาอยู่ที่ตำแหน่ง E2 ซึ่งอะตอมจะสามารถหลุดมาจากสภาพ Lattice ที่บิดเบี้ยวได้ และเมื่อคายพลังงานส่วนนี้ออกไปซึ่งก็คือ Heat of Recrystallization ทำให้อะตอมสามารถให้กำเนิดนิวเคลียส และเกิดเกรนใหม่ที่ปลอดจากความเครียด เกรนใหม่ที่เกิดจะมีการขยายตัว (Grain Growth) ต่อไป จุดที่มีพลังงานสูงชันนี้จะมีพลังงานระดับใดขึ้นอยู่กับปริมาณการขึ้นรูปก่อนการอบความร้อน



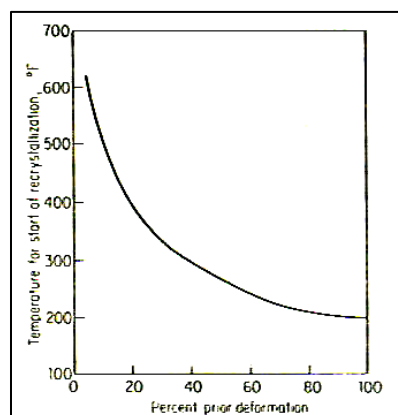
รูปที่ 2.7 ระดับพลังงานที่ใช้เพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่

Recrystallization Temperature อุณหภูมิที่เกิด Recrystallization คือ อุณหภูมิประมาณทำให้เกิด Recrystallization อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยโลหะผ่านการทำ Cold Work ในระดับสูง จากตารางข้างล่างนี้จะบอกอุณหภูมิโดยประมาณของการเกิด Recrystallization ของแต่ละวัสดุ

Material	Recrystallization Temp. Degree Fahrenheit (°F)	Recrystallization Temp. Degree Celsius (°C)
Copper (99.999%)	250	121.11
Copper , 5% Zinc	600	315.56
Copper , 5% Aluminum	550	287.78
Copper , 2% beryllium	700	371.11
Aluminum (99.999%)	175	79.44
Aluminum (99.0% +)	550	287.78
Aluminum alloys	600	315.56
Nickel (99.99%)	700	371.11
Iron (Fe)	750	398.89
Low-carbon steel (Fe)	1000	537.78
Magnesium (99.99%)	150	65.55
Magnesium alloys	450	232.22
Zinc	50	10
Tin	25	-3.89
Lead	25	-3.89

รูปที่ 2.8 อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของแต่ละชนิดของโลหะ และโลหะผสมบางชนิด

ปริมาณของการขึ้นรูปเย็นก่อนการอบความร้อน มีผลเช่นกัน คือถ้ามีปริมาณสูงจะทำให้ อุณหภูมิที่จะเกิด Recrystallization ต่ำลง ดังรูปที่ 45 เพราะจะมีส่วนที่จะเร่งให้เกิดนิวเคลียสได้เร็ว อันเนื่องมาจากมีพลังงานภายในเหลืออยู่มากในโครงสร้าง Lattice ที่บิดเบี้ยว

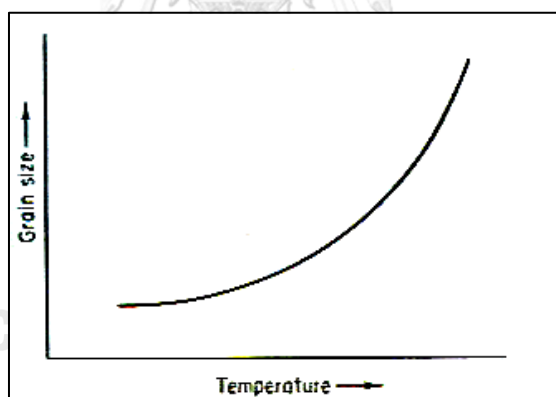


รูปที่ 2.9 ผลของปริมาณการขึ้นรูปเย็น ต่ออุณหภูมิการตกผลึกใหม่

อีกทั้งการเพิ่มระยะเวลาในการทำ Annealing ให้นานจะทำให้อุณหภูมิจึง Recrystallization ลดลง กระบวนการ Recrystallization จะมีความไวที่จะเกิดได้มากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอบความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิจึงมีผลต่อความเค้นแรงดึง (Tensile strength)

2.4.3. การขยายตัวของเกรน (Grain growth)

เกรนขนาดใหญ่จะมีพลังงานภายในต่ำกว่าเกรนขนาดเล็ก ทั้งนี้เพราะเกรนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ตามแนวขอบเกรน น้อยกว่า ดังนั้นภายใต้สภาวะของความเป็นจริง โลหะที่มีเพียงเกรนเดียว (Single Crystal) จะมีสถานะต่ำสุดของพลังงานภายใน หรือพลังงานอิสระ แรงขับเคลื่อนที่จะให้เกิดการขยายตัวของเกรนจะต้องถูกต้านด้วยความมั่นคงแข็งแรงของอะตอมใน Lattice เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความมั่นคงแข็งแรงของ Lattice ที่จะต้านการขยายตัวของเกรนจะลดลง ทำให้การขยายตัวของเกรนเกิดได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 46 ขนาดของเกรน กับอุณหภูมิ ขนาดของเกรนส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลเช่นเดียวกัน เหล็กที่มีเกรนขนาดเล็ก จะมีความแข็งแรงสูงกว่า เหล็กที่มีเกรนขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากขอบเกรนจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าภายในเกรน



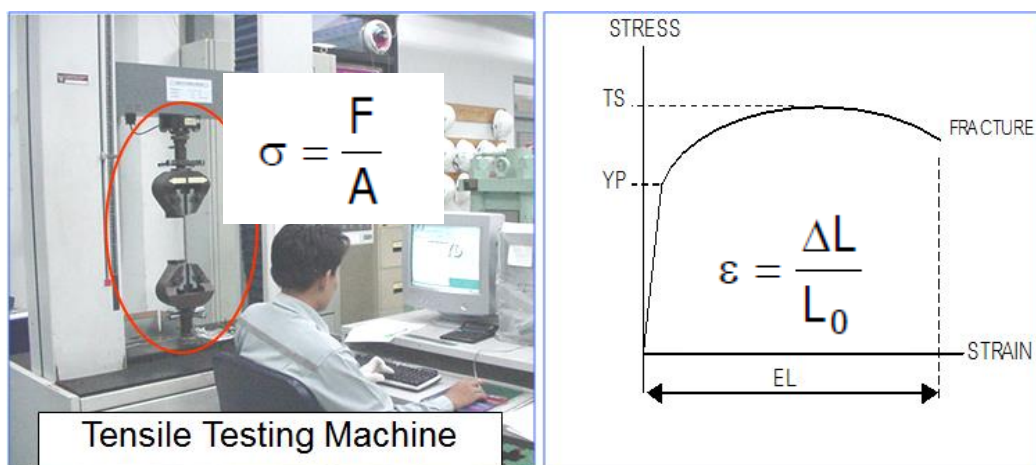
รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิต่อขนาดเกรนที่ตกผลึกใหม่

2.5 ทฤษฎีเรื่องการทดสอบสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่น

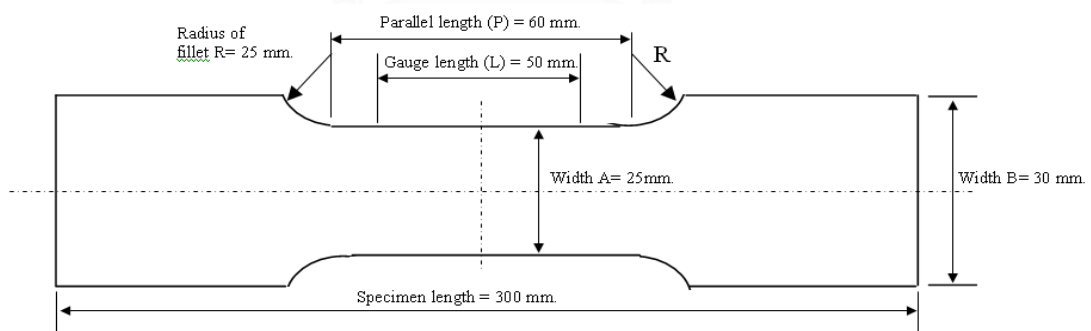
2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบด้วยแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุที่นิยมมาก การทดสอบนี้ช่วยให้ได้ค่าสมบัติด้านความยืดหยุ่น ได้แก่ Yield strength หรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยยังไม่เสียรูป Tensile strength หรือจุดที่วัสดุรับแรงสูงสุด รวมถึง Elongation ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุสามารถยืดตัว

ออกได้สูงสุดก่อนถึงจุดแตกหัก ค่าเหล่านี้เป็นสมบัติที่สำคัญที่จะนำมาใช้งาน การทดสอบด้วยการดึง โดยทั่วไป จะเป็นการให้แรงในแนวแกน (Uniaxial tensile test) แก่ชิ้นทดสอบ โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ และหากนำขนาดของแรงดังกล่าวหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงก็จะได้ค่าที่เรียกว่า “ความเค้น (Stress)” ซึ่งมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa ในขณะที่รับแรงดึงวัสดุจะเกิดการเสียรูปโดยยืดตัวออก สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบเรียกว่า “ความเครียด (Strain)” ซึ่งมีหน่วยเป็น m/m หรือไม่มีหน่วย ความเค้นและความเครียดเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงดึงและค่าที่ได้ Stress-Strain Curve

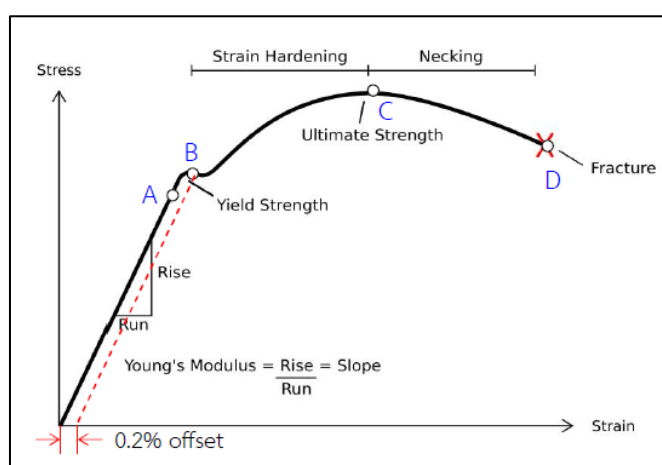


รูปที่ 2.12 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง Specimen test

เมื่อ F คือแรงที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัด A และ ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิม L_0 ในการพิจารณาความเค้นทำได้ 2 แบบ คือ (1) ความเค้นแบบวิศวกรรม (Engineering stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่ และ (2) ความเค้นจริง

(True stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดจริงที่เปลี่ยนขนาดไปในขณะนั้น ดังนั้น ความเค้นจริงมีค่าสูง กว่าความเค้นแบบวิศวกรรม

การหาความแข็งแรงของวัสดุโดยการดึงนั้นกระทำได้โดยค่อยๆ เพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุที่ลดน้อยจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ในระหว่างที่ออกแรงดึงวัสดุจะค่อยๆ ยืดตัวออก ส่งผลให้ขนาดหน้าตัดของวัสดุเล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่สามารถต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นต่อไปได้ วัสดุจึงขาดออกจากกัน นิยมนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ให้ (ในรูปความเค้น) กับระยะยืดตัว (ในรูปความเครียด) มาแสดงผลเทียบกับในลักษณะกราฟ ซึ่งนิยมเรียกว่า Stress-Strain Curve



รูปที่ 2.13 อธิบายนิยามของ Stress-Strain Curve

จากรูปที่ 49 เป็นการดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดตัวออกจนถึงจุด A ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ จึงได้กราฟเป็นเส้นตรง เรียกจุด A ว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด B ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เรียกว่าจุดคราก (Yield point) และค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับการคงรูปของวัสดุ ค่าความแข็งแรงจุดครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะใช้กำหนดขีดจำกัดค่าความเค้นสูงสุดที่จะเกิดขึ้นบนโครงสร้างหรือชิ้นงานโดยที่ยังไม่เกิดการเสียหาย โดยค่าความเค้นที่

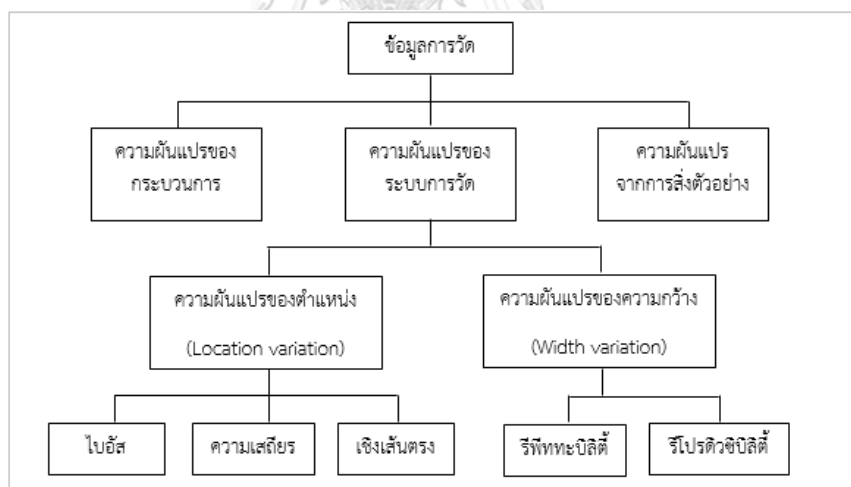
เกิดขึ้นบนชิ้นงานต้องไม่เกินกว่าค่าความเค้นจุดครากนี้เพื่อ เป็นการป้องกันการเสียหาย ซึ่งนำไปสู่ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) ของชิ้นงาน

หลังจากจุดครากไปแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรโดยความเค้นจะเพิ่มอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด C) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะเริ่มขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) จุดสุดท้าย(จุด D) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน

2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัด

2.6.1 ความผันแปรของระบบการวัด

(กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ 2446) การวิเคราะห์หาเหตุความผันแปรจากระบบการวัดนั้นมีความสำคัญ (Measurement system analysis, MSA) เพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบการวัดให้ดีขึ้น ซึ่งมีการสรุป องค์ประกอบความผันแปรไว้ดังรูปที่ 50



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบความผันแปรของระบบการวัด

2.6.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด

(กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ 2449) มีจุดประสงค์ ในการวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัด ทั้งจากการวัดที่มีทั้งปริมาณที่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนได้ และกำจัดไม่ได้ จึงต้องดำเนินการกำจัดปริมาณที่สามารถควบคุมได้ เพื่อลดความคลาดเคลื่อน ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อเป็นการจำกัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ โดยการสอบเทียบนี้ หมายถึง กระบวนการวิธีในการถ่ายค่ามาตรฐานของเครื่องมือวัด ที่มีค่าวัดที่ได้รับมาตรฐานที่สูงกว่า สู่อุปกรณ์ที่มีค่าวัดมาตรฐานที่ต่ำกว่า ซึ่งต้องสามารถสอบกลับได้ (Traceability) เมื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนของการวัดในเชิงระบบแล้ว จะต้องทำการลดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ด้วยการวิเคราะห์ถึงความผันแปร ในแต่ละหน่วย ได้แก่ เครื่องมือวัด พนักงานวัด สภาพแวดล้อมในการวัด เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากการวัด จะได้ว่า

$$\text{ค่าวัด } X_{ij} = \mu + b + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ij}$$

โดยกำหนด เป็นค่าวัดในรูปแบบของ ความผันแปร (Measurement variation) คือ

$$\sigma^2_x = \sigma^2_\alpha + \sigma^2_\beta + \sigma^2_{\alpha\beta} + \sigma^2_\epsilon$$

ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement system analysis) เป็นการวิเคราะห์เชิงสถิติของระบบการวัด เพื่อแยกความผันแปรออกจากชิ้นงาน (PV ; Part to part variation) แยกความผันแปรออกจากพนักงานวัด (AV ; Appraiser Variation) แยกความผันแปรร่วม (IV ; Interaction variation) รวมถึงความผันแปรอื่น ๆ ที่อาจไม่สามารถควบคุมได้ หรือมาจากอุปกรณ์วัด (EV ; Equipment variation)

ในการวิเคราะห์ความผันแปรของระบบการวัด สามารถจำแนกความผันแปรออกเป็น 5 ประเภทได้แก่

1. ไบอัส (Bias) คือ ความแตกต่างจากค่าจริง หรือค่าอ้างอิง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้บนชิ้นงานวัดเดียวกัน
2. เสถียรภาพ (Stability) คือ ความผันแปรทั้งหมดที่ได้จากการวัด ระบบใดระบบหนึ่ง โดยคุณสมบัติด้านความมีเสถียรภาพ จะแสดงถึงปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ทั้งภายในและภายนอกกระบวนการ
3. คุณสมบัติเชิงเส้น (Linearity) คือ ความผันแปรหรือความแตกต่างกันของค่าไบอัสตลอดช่วงของการวัดหรือใช้งานอุปกรณ์ในการวัด จะพบว่ามีค่าความผันแปรเป็นลักษณะเส้นตรง จะเรียกว่า ความผันแปรด้านกว้าง (Width variation)

4. รีพีทหะบิลิตี้ (Repeatability) คือ ความผันแปรของการวัดรอบค่าที่ควรจะเป็น (Expected value) ของระบบการวัดที่วัดจากเครื่องมือ ชั่งงาน พนักงานคนเดียวกัน แล้วทำการวัดแบบซ้ำ ๆ

5. รีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) คือ ความผันแปรของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด และมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการวัด ซึ่งมีการวัดชั่งงานเดิมอยู่ เช่นการเปลี่ยนพนักงานวัด เครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในอุตสาหกรรมมีการวัดในช่วงย่านเดียวกัน จึงสามารถประเมินความสามารถของกระบวนการวัด อันเนื่องมาจากความผันแปรจาก รีพีทหะบิลิตี้ และ รีโพรดิวซิบิลิตี้ ที่เรียกว่า GR & R (Gauge repeatability and reproducibility)

$$\sigma^2_{\text{capability}} = \sigma^2_{\text{GR \& R}} + \sigma^2_{\text{linearity}}$$

และในการประเมินผลการวิเคราะห์กระบวนการวัดในระยะยาวนั้น อาจเรียกค่าความผันแปรที่ได้ว่า สมรรถนะ (Performance) คือ ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดทั้งความคลื่อนเชิงระบบ และแบบสุ่ม ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ประกอบไปด้วยความผันแปรระยะสั้น ความผันแปรจากคุณสมบัติเสถียรภาพ และความสอดคล้องกัน (Consistency)

$$\sigma^2_{\text{performance}} = \sigma^2_{\text{capability}} + \sigma^2_{\text{stability}} + \sigma^2_{\text{consistency}}$$

2.7 ทฤษฎีซิกซ์ ซิกม่า (Six sigma)

2.7.1 ความหมายของซิกซ์ ซิกม่า (Six sigma)

Six sigma เป็นการบริหารที่เกิดขึ้นปี พ.ศ. 2533 โดยกลุ่มบริษัท Motorola ภายใต้การนำของ Dr.Mikel Harry ซึ่งได้เป็นผู้ริเริ่มแนวคิดนี้ และนำมาใช้กับการออกแบบผลิตภัณฑ์ของบริษัทจนประสบความสำเร็จอย่างสูง ต่อมาบริษัทต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกาจึงได้นำแนวคิดการบริหารจัดการแบบ Six sigma เข้ามาใช้ และประสบความสำเร็จสามารถลดค่าใช้จ่ายของบริษัทได้

Six sigma เป็นการบริหารที่มุ่งเน้นในการลดความผิดพลาด ลดความสูญเปล่า และลดการแก้ไขตัวชิ้นงาน และสอนให้พนักงานรู้แนวทางในการทำธุรกิจอย่างมีหลักการ และจะไม่พยายามจัดการกับปัญหาแต่จะพยายามกำจัดปัญหาทิ้ง Six sigma จะดีที่สุดเมื่อทุกคนในองค์กรร่วมมือกัน ตั้งแต่ CEO ไปจนถึงบุคลากรทั่วไปในองค์กร ซึ่ง Six sigma เป็นการรวมกัน ระหว่างคุณภาพแห่ง

คน (Power of people) และอำนาจแห่งกระบวนการ (Process Power) ซึ่งถ้าตัว Six sigma มีค่าสูงหรือมีความผันแปรมากขึ้นเท่าไร ก็เปรียบเสมือนมีการทำข้อผิดพลาดมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งโอกาสที่จะเกิดข้อผิดพลาดตัวนี้เรียกว่า DPMO (Defects Per Million Opportunities)

Six sigma หมายถึง โอกาสของการเกิดข้อผิดพลาดเพียง 3.4 ครั้งต่อล้านครั้ง ข้อผิดพลาดในที่นี้ คือ สิ่งใดก็ตามที่ไม่เป็นไปตามเป้าหมายของขบวนการผลิตและบริการ ซึ่งมุ่งเน้นให้เกิดความพึงพอใจของลูกค้าเป็นหลัก Six sigma จึงถูกนำมาใช้เป็นชื่อเรียกของวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในขบวนการใด ๆ โดยมุ่งเน้นการลดความไม่แน่นอน หรือ Variation และการปรับปรุงขีดความสามารถในการทำงานให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด เพื่อนำมาซึ่งความพอใจของลูกค้า และผลที่ได้รับสามารถวัดเป็นจำนวนเงินได้อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มรายได้ หรือลดรายจ่ายก็ตาม

2.7.2 แนวคิดพื้นฐานของ Six sigma

การพัฒนาองค์การแบบ six sigma เป็นการพัฒนาที่มุ่งเน้นความเป็นเลิศ ซึ่งได้มีการกำหนดแนวทางในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านการสื่อสาร การสร้างกลยุทธ์ และนโยบาย การกระจายนโยบาย การจูงใจ และการจัดสรรทรัพยากรในองค์การให้เหมาะสม เพื่อให้การปรับปรุงองค์การเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ โดยเน้นการมีส่วนร่วมของพนักงานที่มีความสามารถ มีความตั้งใจที่จะปรับปรุง ต้องได้รับความรู้ที่เพียงพอต่อการปรับปรุง รวมทั้งมีทีมที่มีความสามารถและมีความตั้งใจที่จะปรับปรุง มีทีมที่ปรึกษาที่มีความเชี่ยวชาญและมีประสบการณ์สูงคอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน เพื่อให้ความผิดพลาดในการผลิตและการบริการมีน้อยที่สุด แนวความคิดการบริหารปรับปรุงองค์การแบบ six sigma มีความแตกต่างจากแนวความคิดในการบริหารแบบเดิม ที่เน้นการปรับปรุงการทำงานโดยเริ่มจากผู้บริหาร แล้วจึงกระจายให้หน่วยงานต่าง ๆ ในองค์การปรับปรุง โดยขาดระบบการให้คำปรึกษาแนะนำและการช่วยเหลือที่เหมาะสม แนวคิดแบบ six sigma เน้นให้พนักงานแต่ละคนสร้างผลงานขึ้นมาโดย

1. การตั้งทีมที่ปรึกษา (Counselling groups) เพื่อให้คำแนะนำพนักงานในการกำหนดแผนปรับปรุงการทำงาน
2. การให้ทรัพยากรที่จำเป็นต่อการปรับปรุง (Providing resource)
3. การสนับสนุนแนวความคิดใหม่ ๆ (Encouraging Ideas) เพื่อให้โอกาสพนักงานในการเสนอแนวความคิดเห็นใหม่ ๆ

4. การเน้นให้พนักงานสามารถคิดได้ด้วยตัวเอง (Thinking) เพื่อให้พนักงานสามารถกำหนดหัวข้อการปรับปรุงขึ้นเอง ภายใต้ข้อกำหนดของผู้บริหารองค์การ

2.7.3 หลักการสำคัญของกลยุทธ์ Six sigma

การบรรลุกลยุทธ์ที่สำคัญของ six sigma ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอน 4 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย Measure, Analyze, Improve, Control

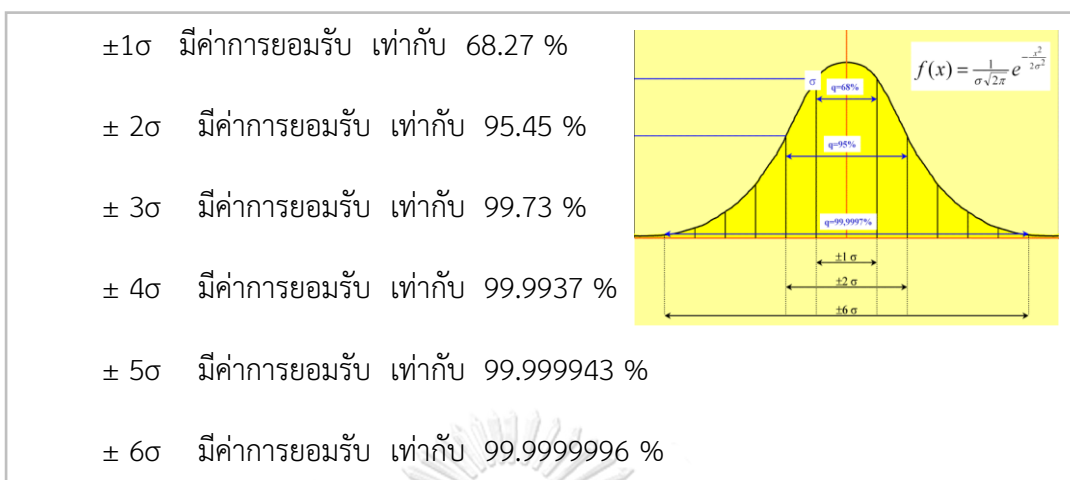
1. Measurement ในขั้นนี้เป็นการขั้นตอนการวัด วัดว่าองค์กรอยู่ที่ใด black belt จะกระทำเพื่อวัดจุดวิกฤตต่อคุณภาพ (Critical to Quality: CTQ) หรือการวัดสิ่งที่มีผลกระทบต่อลักษณะคุณภาพหรือผลการปฏิบัติงานมากที่สุด วางแผนกำลังคนทำการวัดในสิ่งที่จำเป็น ซึ่งเป็นการประเมินปัญหาและระบุปัญหา บันทึกผลลัพธ์ที่ได้และประมาณการศักยภาพขององค์กรและกระบวนการต่าง ๆ ในองค์กรในระยะยาว

2. Analyze เป็นการวิเคราะห์ว่าปัญหาต่าง ๆ เริ่มมาจากที่ใด เพื่อหาทางแก้ไข โดยการเปรียบเทียบศักยภาพขององค์กรและคู่แข่ง วิเคราะห์ช่องว่างของกระบวนการทำงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในองค์กร เพื่อระบุปัจจัยที่นำไปสู่ผลสำเร็จในกระบวนการปฏิบัติงาน ในบางกรณีจะพบว่าองค์กรมีความจำเป็นต้องออกแบบผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการใหม่ ๆ เพื่อเป็นการลดช่องว่าง และปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการให้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น

3. Improvement การแก้ไขกระบวนการ ในขั้นนี้ black belt จะเป็นผู้ระบุลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องปรับปรุง เพื่อให้บรรลุผลในการปฏิบัติงานและบรรลุวัตถุประสงค์ทางการเงิน การปรับปรุงที่ CTQ จะช่วยในการปรับปรุงเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งกระบวนการ

4. Control การควบคุม ในขั้นนี้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อช่วยให้ black belt กำหนดมาตรการต่าง ๆ เพื่อเป็นตัวควบคุมตัวแปรที่สำคัญ ให้อยู่ในช่วงมาตรฐานใหม่ที่ระดับการทำงานที่ได้รับการปรับปรุงแล้วในขั้นตอนของการปรับปรุง จนมั่นใจว่าความสำเร็จต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการปรับปรุงกระบวนการจริง ๆ (Mikel J. Harry, 1998:62).เมื่อได้มีการปรับปรุงกระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนทีกล่าวนมา ประกอบด้วย การวัด (Measurement) การวิเคราะห์ (Analyze) การปรับปรุง (Improvement) การควบคุม (Control) จะทำให้องค์กรสามารถปรับปรุงผลสำเร็จทางเศรษฐกิจ และสร้างความพึงพอใจแก่ลูกค้าได้

Michael Harley ผู้คิดค้นวิธีการซิกซ์ ซิกม่า กล่าวว่า “6σ คือ เป้าหมายขั้นที่สุดของการจัดการเพื่อบรรลุเป้าหมายคุณภาพ”



รูปที่ 2.15 แผนภาพ Histogram ของ ซิกซ์ ซิกม่า

2.8 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

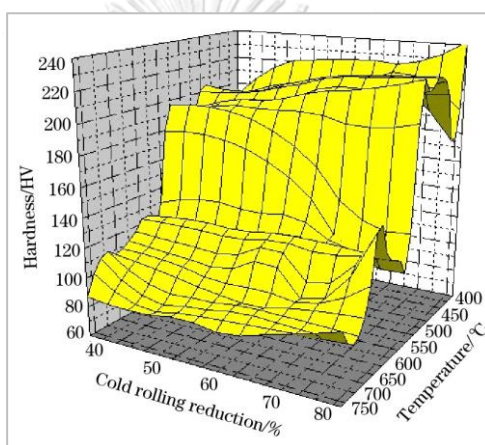
Dong-doung Zhuang (2017), มีการศึกษาถึง เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิด Aluminum-killed low-carbon steel sheet ซึ่งเป็นเหล็กชนิดเดียวกับที่ใช้ในบริษัทการศึกษา ดังนั้นจึงเลือกงานวิจัยนี้มาศึกษา ผู้วิจัยทำการศึกษาโดยการทดลองนำเหล็กผ่านกระบวนการรีดเย็นที่มีอัตราการรีดลดขนาดที่แตกต่างกัน (Reduction ratios) และอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันรวมถึงเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temperature and holding time) โดยมีการวัดค่าความแข็งในหน่วย Vickers จากการทดลองโดยเหล็กแผ่นที่ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่มีอัตราการรีดลดขนาด จำนวน 6 ตัวอย่างที่มีความหนาในการรีดสุดท้ายแตกต่างกัน เช่น 1.81, 1.43, 1.22, 1.07, 0.84, และ 0.56 มิลลิเมตร ทำให้ได้อัตราการรีดลดขนาดที่แตกต่างกันคือ 40%, 52%, 59%, 64%, 72%, 81% ชิ้นงานถูกตัดเป็นขนาด 40x50 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการอบอ่อนโดยให้อุณหภูมิจาก 400°C ไปยัง 760°C ที่ความเร็วในการให้ความร้อนคือ 30°C ต่อวินาที และให้อุณหภูมิคงที่จาก 10 วินาทีไปจนถึง 4 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวลงโดยใช้อากาศในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเหล็กแผ่นที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลองมีค่าสมบัติทางเคมีดังนี้ (%wt)

C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	Fe
0.02	0.02	0.18	0.011	0.004	0.048	Balance

แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) การทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นใช้เครื่องทดสอบความแข็ง Vickers hardness เท่านั้น มีการทดสอบความแข็งขนาดเล็กโดยใช้เครื่อง DHV-1000 (Micro hardness tester) ที่ Load = 0.98 N และให้แรงคงที่เป็นเวลา 10 วินาที ทดสอบทั้งหมด 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
- 2) การทดสอบโครงสร้างการตกผลึกใหม่ (Recrystallization texture) นั้นทำการทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยใช้เครื่อง SEM, Hitachi S-4800 ร่วมด้วยกับเครื่องมือ EBSD

ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ Recrystallization temperature มีค่าจาก 602 องศา ไปจนถึง 572 องศา โดยใช้เวลาในการอบอ่อน 4 ชม โดยได้แสดงให้เห็นเป็นแผนภาพตามรูปที่ 52



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของความแข็ง เทียบกับอัตราการรีดลดขนาด (อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 400-750°C)

Y. Liu, C.D. Yang, M. Liu. (2018) มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โครงสร้างจุลภาค และ โครงสร้างผลึก ต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งได้สรุปว่าการที่จะทำให้เหล็กรีดเย็นมีสมบัติเชิงกลในด้าน Tensile strength ที่ดีขึ้นหรือแข็งแรงขึ้น จำเป็นต้องทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่เรียกว่า Perlitic Steel ก่อน ซึ่งการที่จะทำให้ได้โครงสร้างนี้ต้องทำการ รีดลดขนาดที่กระบวนการรีดเย็นด้วยอัตราการรีดลดขนาดถึง 90% เป็นอย่างน้อย ถึงจะส่งผลทำให้เกิดการตกผลึกของแข็งในโครงสร้างเหล็ก Solid Solution hardening effect.

Rajan Kr Singh, Sudharshan R (2018) ทำการทดลองนำเสนอผลด้านปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การอบอ่อน แบบ Batch type annealing furnace ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิบนแผ่นเหล็กขณะทำการอบอ่อนขึ้นขึ้นอยู่กับ ความหนาของแผ่นเหล็ก ความกว้างของแผ่นเหล็ก น้ำหนักของม้วนเหล็ก และตำแหน่งการวางของชั้นเหล็กในเตา (Stack) ซึ่งความกว้างของแผ่นเหล็ก และน้ำหนักของม้วน

เหล็ก ส่งผลบางส่วนกับการผันแปรของสมบัติเชิงกล การลดลงของความกว้างของแผ่นเหล็ก ทำให้ค่า Yield strength ลดลง

H. Monajati a, D. Asefi. (2010) ได้วิเคราะห์ถึงปัจจัยในการผลิตส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นคาร์บอนต่ำ ในกระบวนการอบอ่อน ขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิในการอบในช่วงแรก (Annealing stage) อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และเวลาที่ใช้ในการอบ หรือการอบแช่ (Annealing soaking time) ส่งผลกระทบอย่างสูงกับความสามารถในการขึ้นรูป (Formability properties) ส่วนตำแหน่งของ การวางของชั้นเหล็กในเตา (Stack) ส่งผลเพียงเล็กน้อยกับสมบัติเชิงกล โดยส่งผลกับค่า n-value และ r-value เป็นต้น

R. Mendoza a, A. Molina. (2013) ได้วิจัยถึงสมบัติเชิงกล และการตกผลึกใหม่ของ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ, เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมทางเคมี ของคาร์บอนที่ 0.035% Cr มีผลดีต่อการอบอ่อน สามารถทำให้อุณหภูมิในการอบอ่อน สูงได้ถึง 700 °C โดยทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ (Fully recrystallized grains)

F.A.N.G. Chun-Jen, W.U. Li-Wen. (2015) ได้วิจัยถึงการจำลองการอบอ่อนแบบ Batch Annealing Furnace สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็น และสำหรับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการอบก่อนเหล็กแผ่น สรุปว่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการอบอ่อนขั้นต่ำที่สุดได้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงเป้าหมายคืออุณหภูมิการอบที่ 654-678 °C และพบว่ามี ความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิในจุดร้อน (Hot point) และจุดเย็น (Cold point) ในม้วนเหล็ก อยู่ที่ 17-46 °C

ณัฐพล วัชรประไพพันธ์ (2552) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองกระบวนการอบอ่อน แบบกะ ในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน ซึ่งได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ และสามารถนำมาทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในม้วนเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองจากงานวิจัยก่อนหน้า และสามารถนำมาออกแบบค่าอุณหภูมิในการดำเนินการของเตาอบอ่อนแบบกะ ในช่วงการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น และมีการสรุปผล คือ

จำนวนของม้วนเหล็กที่อยู่ในเตา มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก กล่าวคือ การอบอ่อนโดยใช้จำนวนม้วนเหล็กที่มาก หรือมีมวลมาก ส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยของความ

แตกต่างของอุณหภูมิ ในตำแหน่งจุดร้อน (Hot point) และจุดเย็น (Cold point) มีค่ามากขึ้น เมื่อมีการลดจำนวนม้วนเหล็กจาก 4 ม้วนเหลือ 3 ม้วน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลดลง

เวลาที่อบอ่อน หรืออบแช่ (Annealing soaking time) มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก ในส่วนเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน หากที่มีค่ามากจะส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ในตำแหน่งจุดร้อน (Hot point) และจุดเย็น (Cold point) มีค่าน้อยลง

อัจฉราภรณ์ ดำรงค์ฉวีชัย (2555) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพ ของกระบวนการอ่าน และเขียนของหัวอ่านในอุตสาหกรรม ประกอบขึ้นส่วน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยศึกษาเรื่อง อัตราการบิดผิดพลาด หรือการเคลื่อนตัวของหัวอ่านผิดพลาด ซึ่งข้อมูลที่ผู้วิจัยศึกษา พบว่ามีค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ของอัตราบิดผิดพลาดมีค่าอยู่ที่ 0.72 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน หรือเป้าหมายที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา มาปรับปรุงค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ของอัตราการบิดผิดพลาด ผลจากการปรับปรุงกระบวนการ หลังจากการทำวิจัยนี้ พบว่าค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 2.38 ทำให้สามารถลดปริมาณของเสียลงได้

ภัศรา บรรจงเกษม (2559) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมความหนาของทองแดงเคลือบผิวบนแผ่นพิมพ์ลายวงจร เพื่อลดค่าเฉลี่ยความหนาของทองแดงที่เคลือบบนผิวแผ่นวงจร ลดความผันแปรความหนาทองแดงเคลือบผิวในรู ของกระบวนการชุบแผ่นวงจร โดยใช้หลักการ ซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตเพื่อให้มีค่า ความหนาทองแดงเคลือบผิว อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือน้อยกว่า 21 ไมครอน จากข้อมูลการจากผลิตเดิม พบว่ามีค่าความหนาอยู่ที่ 27 ± 2.0 ไมครอน และมีค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) อยู่ที่ 0.92 และมีโอกาสเกิดของเสียอยู่ที่ 2890 ppm หลังจากการทำการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าค่าควบคุมความเข้มข้นของน้ำยา ส่งผลกระทบต่อความหนา พบว่าสามารถลดค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนา อยู่ที่ $25 + 1.0$ ไมครอน และเพิ่มความสามารถของกระบวนการ (Cpk) อยู่ที่ 1.31 และทำให้ลดปริมาณของเสียที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เหลือเพียง 42 ppm.

งานวิจัยที่ผ่านมาจะมีความแตกต่างกันกับงานวิจัยนี้ในส่วนของ ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อเหล็ก (Chemical composition), อัตราการรีดลดขนาด (Cold reduction) และอุปกรณ์ในเตาอบ (Annealing furnace facility) ซึ่งอาจส่งผลต่อปัจจัยที่ส่งผลกระทบ ที่แตกต่างกันออกไป

บทที่ 3

วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

แม้ว่าห้องปฏิบัติการของโรงงานกรณีศึกษาจะได้มาตรฐานห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติเชิงกล ISO/IEC 17025 แล้วก็ตาม จึงการวิเคราะห์ระบบการวัด ในส่วนของค่าสมบัติเชิงกล ของห้องปฏิบัติการของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อให้ทราบว่าระบบการวัดนั้นถูกต้องและยอมรับได้

3.1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบการวัด

3.1.1.1 ความสามารถแยกความแตกต่าง (Discrimination หรือ Resolution)

ความสามารถแยกความแตกต่าง คือค่าที่น้อยที่สุดที่เครื่องมือวัดสามารถบอกความแตกต่างได้ ในกรณีการวัดค่าสมบัติเชิงกลนั้น ได้แก่ ค่า Yield strength, Tensile strength และ Hardness วัดค่าออกมาได้ทศนิยม 1 หน่วย ส่วน %Elongation วัดค่าออกมาได้ทศนิยม 2 หน่วย โดยทั่วไปจะเลือกเครื่องมือมาวัด โดยใช้กฎของ 1/10 เท่าของ Tolerance ซึ่งเครื่องมือสามารถยอมรับได้

3.1.1.2 ไบอัส (Bias)

ไบอัส คือ ความแตกต่างระหว่างค่าจริง (ค่าอ้างอิง) เทียบกับเฉลี่ยของการวัดที่ได้ ในกรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการส่งเครื่องมือไปสอบเทียบกับสถาบันที่ได้รับการรับรองเพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่ได้จากการวัดมีค่าความแตกต่างค่าจริงในระดับที่ยอมรับได้

3.1.1.3 คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity)

คุณสมบัติเชิงเส้นตรง คือ การเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสของระบบการวัด เมื่อเปลี่ยนค่ามาตรฐานของงานตามย่านวัดที่กำหนด ในกรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการส่งเครื่องมือไปสอบเทียบเช่นเดียวกับการวัดค่า Bias ดังนั้นเครื่องมือวัดที่นำมาใช้งานมีค่าที่ยอมรับในการวัดค่าในย่านการทดสอบอย่างถูกต้อง

3.1.1.4 ความเสถียร (Stability)

ความเสถียร คือการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสของระบบการวัดที่วัดชิ้นงานเดิม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป กรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการจัดเตรียมชิ้นงานมาตรฐานสำหรับใช้ในการวัดในแต่ละครั้งที่มีทดสอบ ก่อนเริ่มปฏิบัติการทดสอบ เพื่อมั่นใจว่าเครื่องวัด ค่าที่วัดได้อยู่ต้องอยู่ใน Control chart

3.1.1.5 ความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability)

ความสามารถในการวัดซ้ำ หรือความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด หมายถึง ความผันแปรที่แสดงค่าเฉลี่ยของค่าที่ควรจะเป็นค่าคาดหวังของระบบการวัด ที่ทำการวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกัน ในการวัดชิ้นงานเดียวกัน พนักงานวัดเดียวกัน ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดในโรงงานกรณีศึกษา แสดงหัวข้อที่ 3.1.2 เรื่องการวิเคราะห์ Gage R&R

3.1.1.6 ความสามารถในการประเมินซ้ำ (Reproducibility)

ความสามารถในการประเมินซ้ำ คือความผันแปร ระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัดที่แสดงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกัน ในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน ระหว่างระบบการวัด เช่นพนักงานวัดต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดในโรงงานกรณีศึกษา แสดงในหัวข้อที่ 3.1.2 เรื่องการวิเคราะห์ Gage R&R

3.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Gage R&R

3.1.2.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Yield strength (จำนวนพนักงานทดสอบ Operator=4, ชิ้นงานจำนวน Specimen no. 4 ตัวอย่าง, การทดสอบซ้ำ Replicate = 3)

Gage R&R (Nested) for Yield strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	3	1.6267	0.54222	0.0851	0.967
Specimen No (Operator)	12	76.4267	6.36889	87.3448	0.000
Repeatability	32	2.3333	0.07292		
Total	47	80.3867			

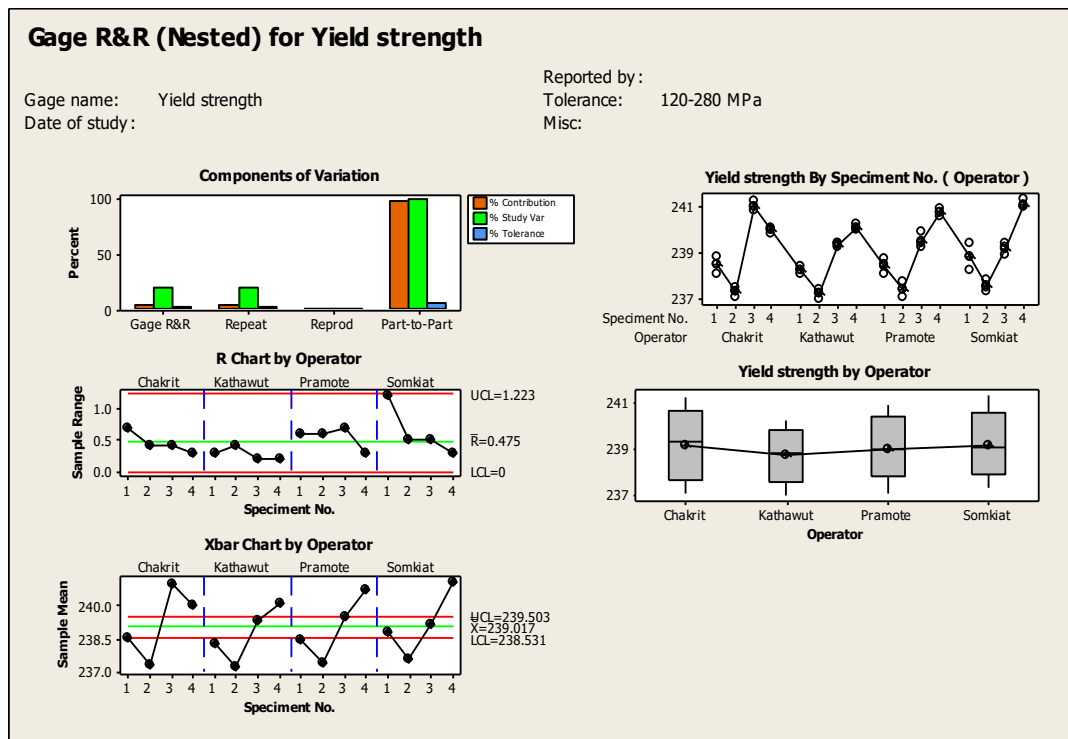
Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.07292	3.36
Repeatability	0.07292	3.36
Reproducibility	0.00000	0.00
Part-To-Part	2.09866	96.64
Total Variation	2.17157	100.00

Process tolerance = 160

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.27003	1.62019	18.32	1.01
Repeatability	0.27003	1.62019	18.32	1.01
Reproducibility	0.00000	0.00000	0.00	0.00
Part-To-Part	1.44867	8.69205	98.31	5.43
Total Variation	1.47363	8.84176	100.00	5.53

Number of Distinct Categories = 7

ตารางที่ 3.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Yield strength



รูปที่ 3.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Yield strength

การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Yield strength โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Speciment no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.967 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 3.36% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 96.64%. แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 3.36% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 18.32% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า %Tolerance = 1.01% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 7 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อแนะนำของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (Antomobile Industry Action Group : AIAG)

3.1.2.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Tensile strength (จำนวนพนักงานทดสอบ Operator=4, ชิ้นงานจำนวน Specimen no. 4 ตัวอย่าง, การทดสอบซ้ำ Replicate = 3)

Gage R&R (Nested) for Tensile strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	3	2.949	0.9831	0.019	0.996
Specimen No (Operator)	12	616.217	51.3514	139.416	0.000
Repeatability	32	11.787	0.3683		
Total	47	630.952			

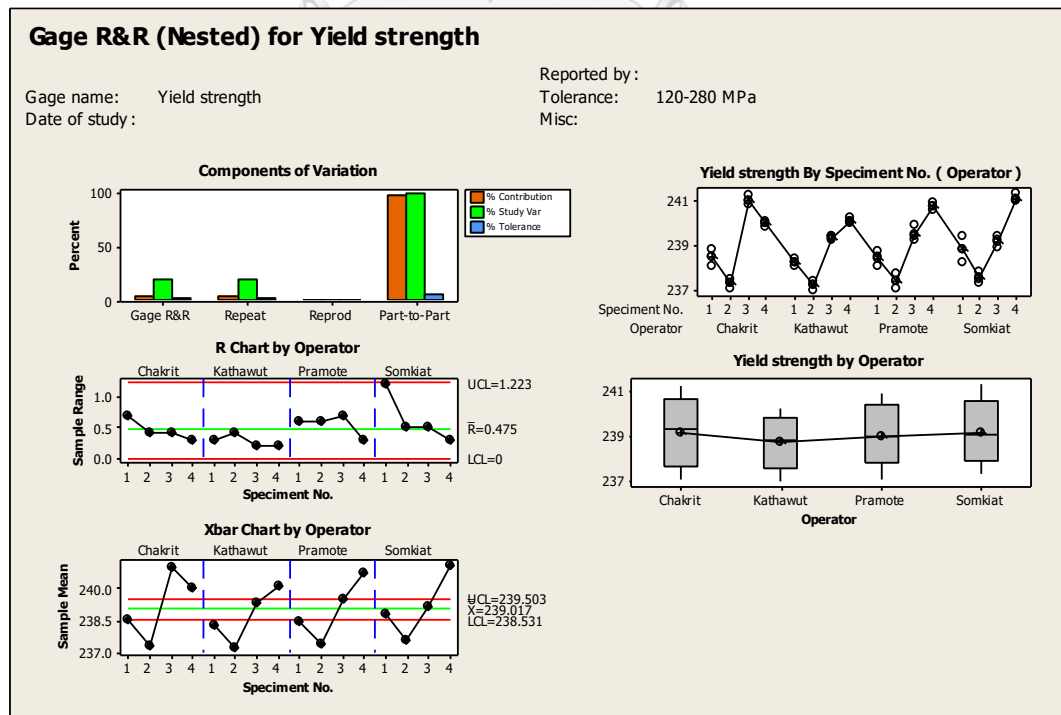
Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.3683	2.12
Repeatability	0.3683	2.12
Reproducibility	0.0000	0.00
Part-To-Part	16.9944	97.88
Total Variation	17.3627	100.00

Process tolerance = 100

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.60690	3.6414	14.57	3.64
Repeatability	0.60690	3.6414	14.57	3.64
Reproducibility	0.00000	0.0000	0.00	0.00
Part-To-Part	4.12242	24.7345	98.93	24.73
Total Variation	4.16686	25.0011	100.00	25.00

Number of Distinct Categories = 9

ตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength



รูปที่ 3.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength

การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Tensile strength โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Speciment no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.996 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 2.12% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 97.88%. แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 2.12% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 14.57% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า %Tolerance = 3.64% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 9 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อกำหนดของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (AIAG)

3.1.2.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า %Elongation (จำนวนพนักงานทดสอบ Operator=4, ชิ้นงานจำนวน Speciment no. 4 ตัวอย่าง, การทดสอบซ้ำ Replicate = 3)

Gage R&R (Nested) for %Elongation					
Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	3	3.3506	1.11686	0.2516	0.859
Speciment No (Operator)	12	53.2732	4.43944	43.4431	0.000
Repeatability	32	3.2701	0.10219		
Total	47	59.8939			

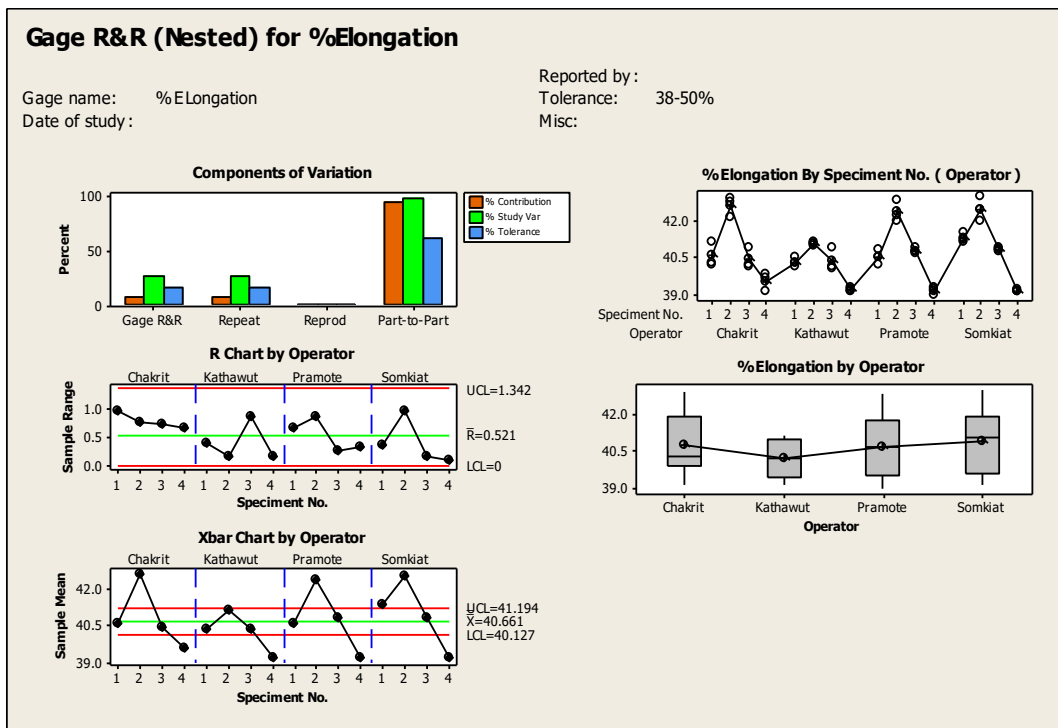
Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.10219	6.60
Repeatability	0.10219	6.60
Reproducibility	0.00000	0.00
Part-To-Part	1.44575	93.40
Total Variation	1.54794	100.00

Process tolerance = 12

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.31967	1.91803	25.69	15.98
Repeatability	0.31967	1.91803	25.69	15.98
Reproducibility	0.00000	0.00000	0.00	0.00
Part-To-Part	1.20239	7.21436	96.64	60.12
Total Variation	1.24416	7.46497	100.00	62.21

Number of Distinct Categories = 5

ตารางที่ 3.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า %Elongation



รูปที่ 3.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า %Elongation

การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล %Elongation โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Speciment no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.859 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 6.60% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 93.4%. แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 6.60% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 25.69% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า %Tolerance = 15.98% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 5 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อกำหนดของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (AIAG)

3.1.2.4 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Hardness (จำนวนพนักงานทดสอบ Operator=4, ชิ้นงานจำนวน Specimen no. 4 ตัวอย่าง, การทดสอบซ้ำ Replicate = 3)

Gage R&R (Nested) for Hardness HRB					
Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	3	1.6406	0.54688	0.172	0.913
Specimen No (Operator)	12	38.2225	3.18521	144.236	0.000
Repeatability	32	0.7067	0.02208		
Total	47	40.5698			

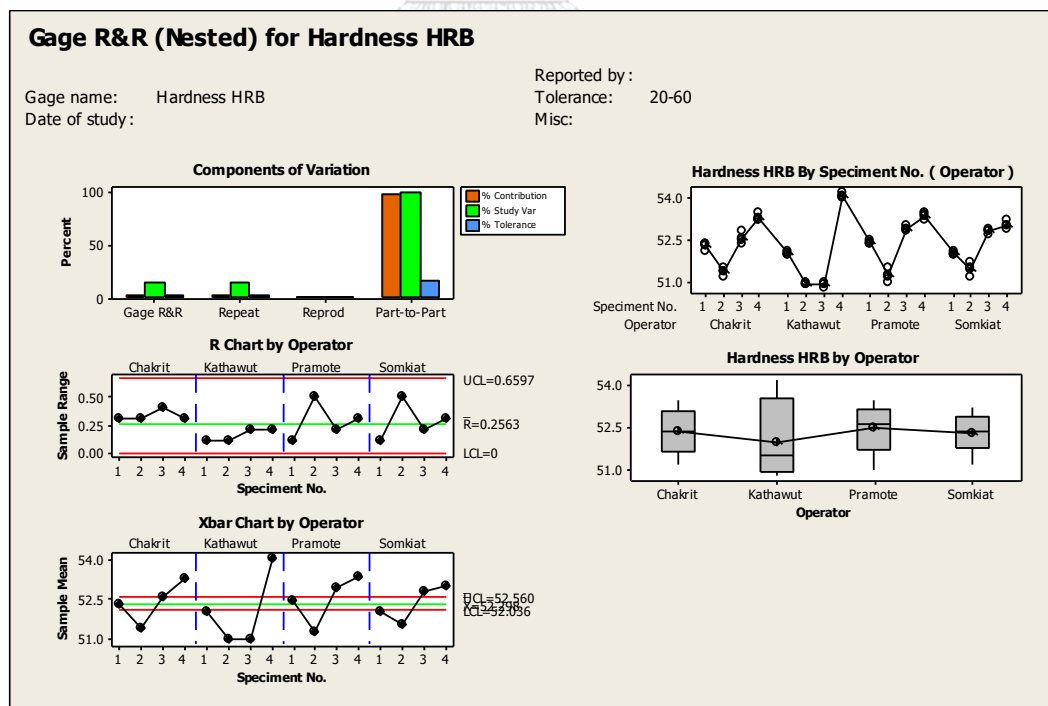
Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.02208	2.05
Repeatability	0.02208	2.05
Reproducibility	0.00000	0.00
Part-To-Part	1.05437	97.95
Total Variation	1.07646	100.00

Process tolerance = 40

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.14860	0.89163	14.32	2.23
Repeatability	0.14860	0.89163	14.32	2.23
Reproducibility	0.00000	0.00000	0.00	0.00
Part-To-Part	1.02683	6.16097	98.97	15.40
Total Variation	1.03753	6.22515	100.00	15.56

Number of Distinct Categories = 9

ตารางที่ 3.4 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Hardness HRB



รูปที่ 3.4 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Hardness HRB

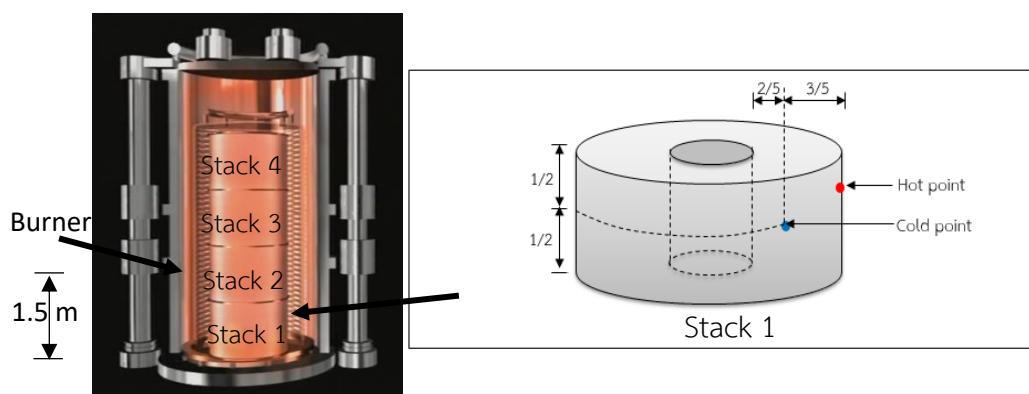
การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Hardness HRB โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Specimen no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.913 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 2.05% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 97.95%. แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 2.05% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 14.32% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า %Tolerance = 2.23% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 9 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อกำหนดของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (AIAG)

3.2 กรรมวิธีที่ใช้ในการอบอ่อน (เตาอบ Batch annealing furnace)

3.2.1 แผนภาพเตาอบ และกระบวนการอบอ่อน

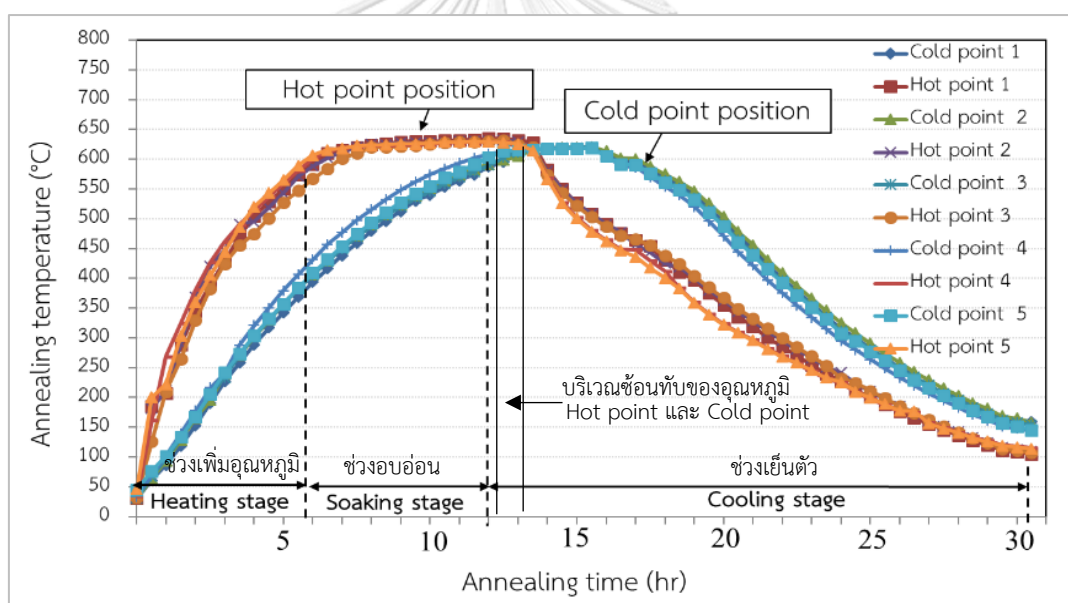
ม้วนเหล็กจะถูกจัดวางในเตาตามรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเรียกตำแหน่งชั้นวางจากล่างสุด คือ Stack ที่ 1 ไปจนถึง Stack ที่ 4 และจะมีการวัดอุณหภูมิโดยใช้ Thermocouple ที่บริเวณรอบนอกของม้วนเหล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ร้อนที่สุด (Hot point) และบริเวณภายในม้วนเหล็ก ตรงตำแหน่งระยะประมาณ 3 ใน 5 ส่วนของความหนาของม้วนเหล็กโดยวัดจากรอบนอกสุด ซึ่งจะเป็นจุดที่ม้วนเหล็กร้อนน้อยสุด (Cold point) โดยจะวัดเพียง 1 ม้วนเหล็กใน 1 เตาโดยอยู่ที่ม้วนเหล็ก Stack ที่ 1



รูปที่ 3.5 แผนภาพเตาอบ และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในเตาอบ

3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temperature)

การวัดอุณหภูมิภายในเตาอบนั้นจะทำการวัด โดย 2 ตำแหน่ง ได้แก่ อุณหภูมิในส่วนรอบนอกสุดของม้วนเหล็ก (Hot point) และประมาณกึ่งกลางภายในม้วนเหล็ก (cold point) เพื่อให้มั่นใจว่าม้วนเหล็กนั้นได้รับอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึง ในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษานั้น จะมีการควบคุมและบันทึกค่าอุณหภูมิตลอดระยะเวลาในการอบอ่อนในรูปแบบ Annealing profile ที่แสดงอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งเทียบกับเวลา โดยได้มีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ในกลุ่ม Product A จำนวน 5 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.6 โดยจะเห็นว่าอุณหภูมิ Hot point จึงถึงเป้าหมายก่อน Cold point ประมาณ 4-5 ชั่วโมง และเมื่ออุณหภูมิ Hot point ถึงเป้าหมายที่ 610°C ก็เริ่มกระบวนการ Soaking stage เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง จากนั้นก็หยุดการจ่ายความร้อน จะสังเกตได้ว่าบริเวณที่ซ้อนทับกันของอุณหภูมิระหว่าง Hot point กับ Cold point อยู่ประมาณ 1 ชั่วโมง

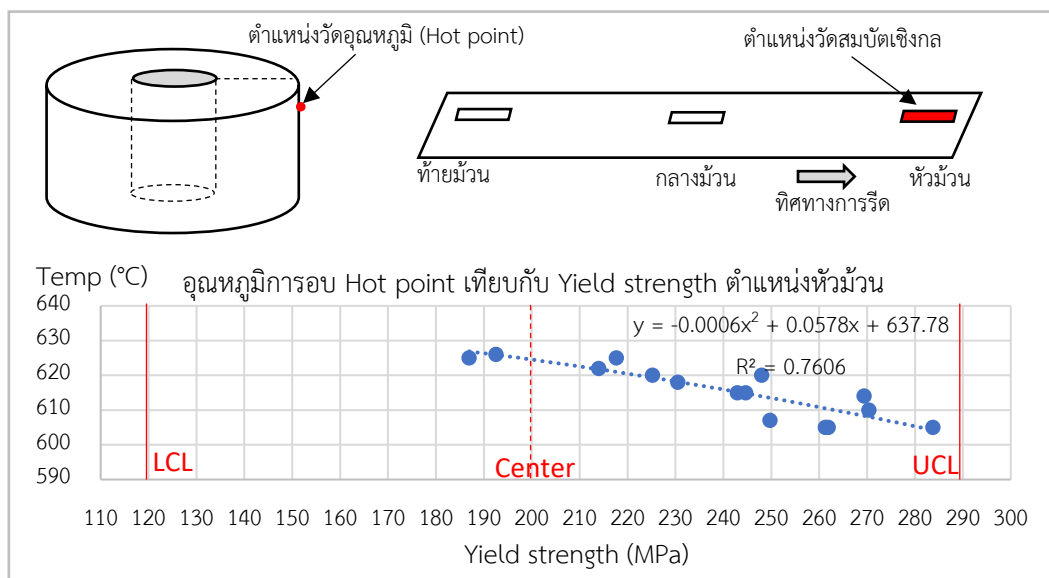


รูปที่ 3.6 อุณหภูมิการอบอ่อนที่ตำแหน่ง Hot point และ Cold point เทียบกับเวลาในการอบอ่อน

เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกล จึงทำการรวบรวมข้อมูลการผลิตก่อนการศึกษา เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับ ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ Hot point และ ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ Cold point โดยเทียบกับสมบัติเชิงกลในตำแหน่งที่มีการทดสอบใกล้เคียงกันคือ หัวม้วน และกลางม้วน โดยผลลัพธ์ได้จำแนกตามสมบัติเชิงกลได้แก่ Yield strength, Tensile strength, %Elongation และ Hardness ได้ดังนี้

3.3.1 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Yield strength

1) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนรอบนอกสุดของม้วนเหล็ก (Hot point) เทียบกับค่า Yield strength ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

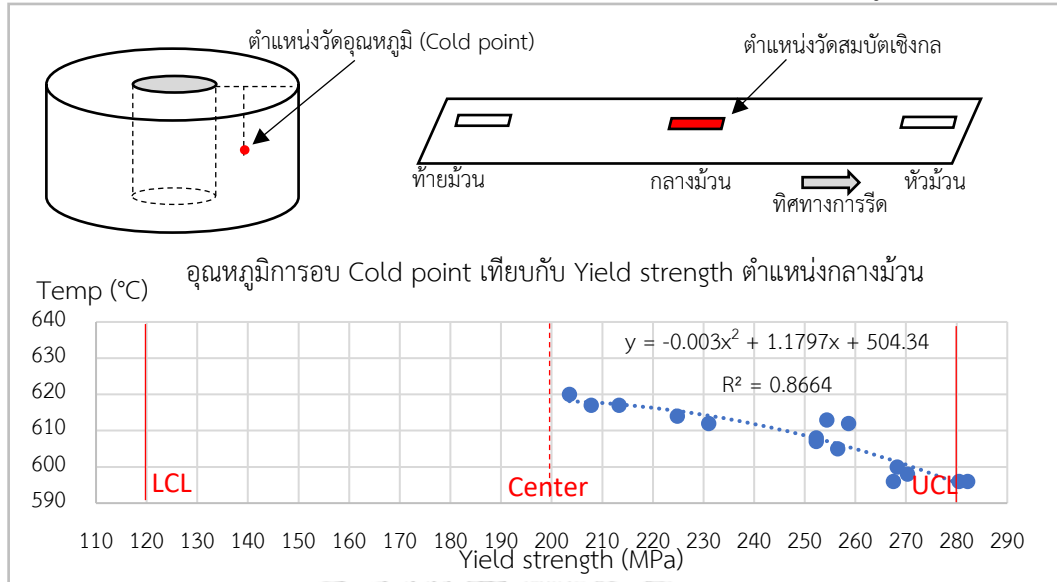
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วนของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.039 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.5

One-way ANOVA: Yield strength-Head versus Temp-Hot point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Hot point	9	10314	1146	5.41	0.039
Error	5	1059	212		
Total	14	11373			

S = 14.56 R-Sq = 90.69% R-Sq(adj) = 73.92%

ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนกลางของม้วนเหล็ก (Cold point) เทียบกับค่า Yield strength ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Yield strength ที่ตำแหน่งหัวกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วนของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.040 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.6

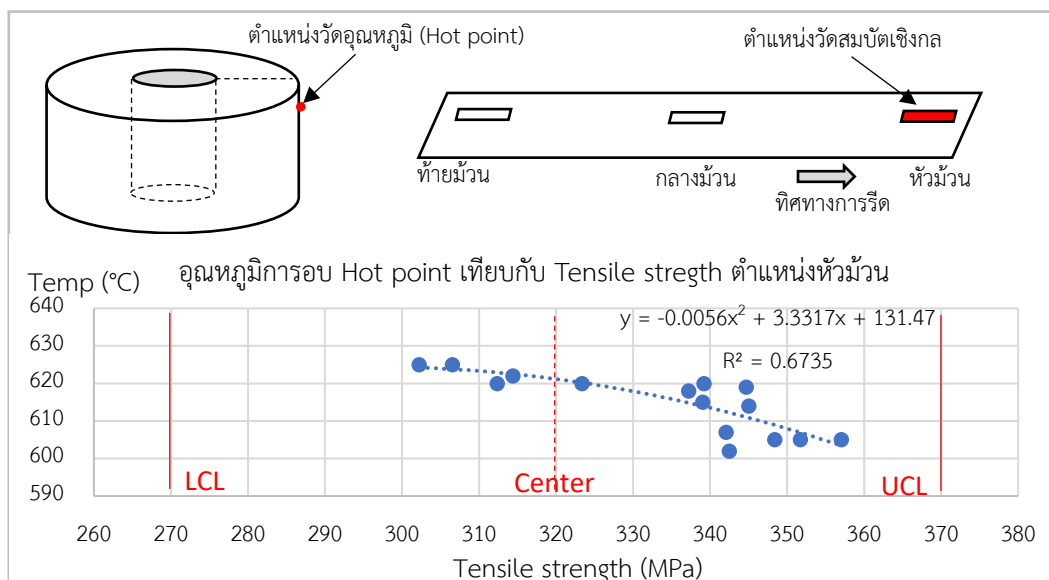
One-way ANOVA: Yield strength-Middle versus Temp-Cold point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Cold point	10	8873	887	6.76	0.040
Error	4	525	131		
Total	14	9398			

S = 11.46 R-Sq = 94.41% R-Sq(adj) = 80.45%

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.3.2 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Tensile strength

1) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนรอบนอกสุดของม้วนเหล็ก (Hot point) เทียบกับค่า Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

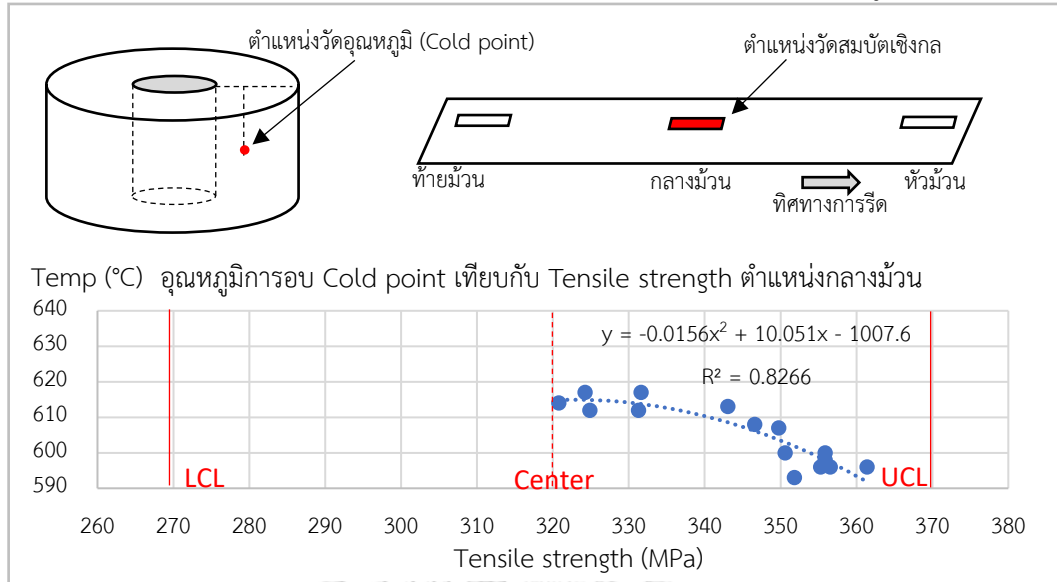
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่างจากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.043 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบทต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.7

One-way ANOVA: Tensile strength-Head versus Temp-Hot point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Hot point	9	3803.6	422.6	5.14	0.043
Error	5	410.8	82.2		
Total	14	4214.4			

S = 9.064 R-Sq = 90.25% R-Sq(adj) = 72.71%

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนกลางของม้วนเหล็ก (Cold point) เทียบกับค่า Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.003 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.8

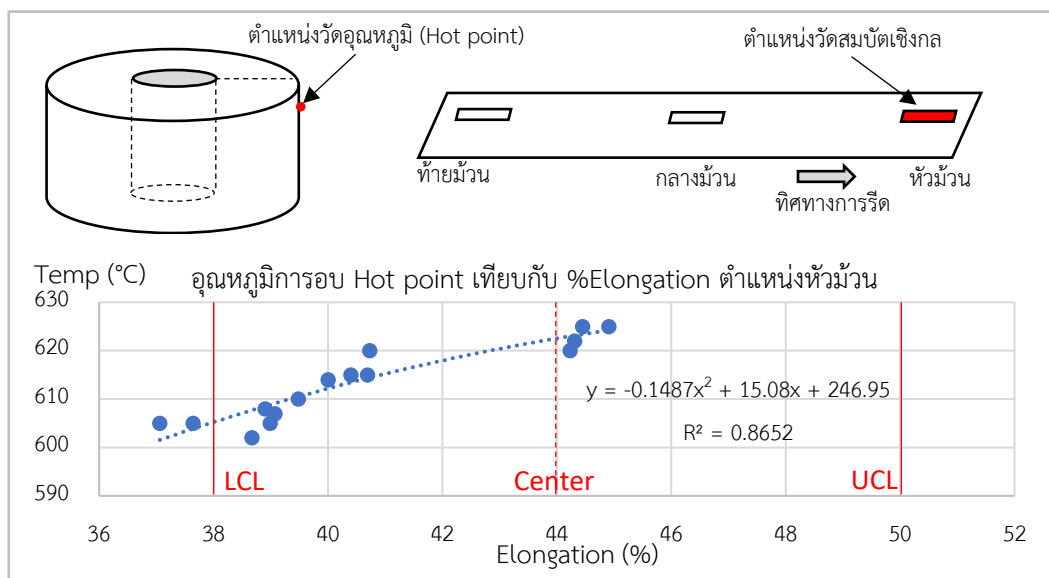
One-way ANOVA: Tensile strength-Middle versus Temp-Cold point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Cold point	9	2540.4	282.3	17.13	0.003
Error	5	82.4	16.5		
Total	14	2622.8			

S = 4.060 R-Sq = 96.86% R-Sq(adj) = 91.20%

ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.3.3 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล %Elongation

1) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนรอบนอกสุดของม้วนเหล็ก (Hot point) เทียบกับค่า %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

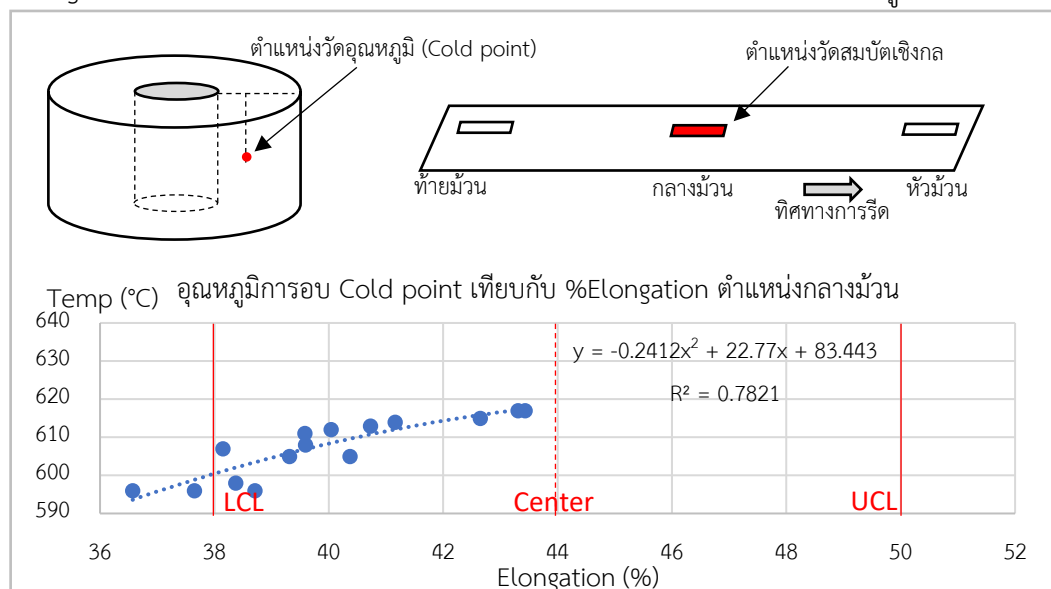
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.033 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วนมีค่าสูงขึ้น แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.9

One-way ANOVA: %Elongation-Head versus Temp-Hot point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Hot point	9	86.61	9.62	5.84	0.033
Error	5	8.23	1.65		
Total	14	94.84			

S = 1.283 R-Sq = 91.32% R-Sq(adj) = 75.69%

ตารางที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนกลางของม้วนเหล็ก (Cold point) เทียบกับค่า %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ม้วน แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

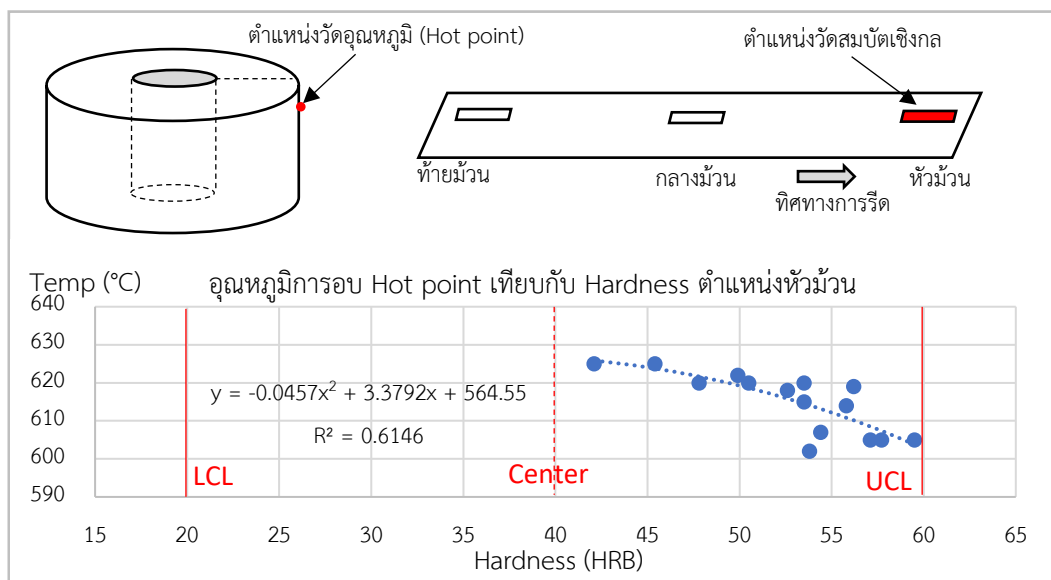
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.032 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วนมีค่าสูงขึ้น แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.10

One-way ANOVA: %Elongation-Middle versus Temp-Cold point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Cold point	10	54.744	5.474	7.66	0.032
Error	4	2.859	0.715		
Total	14	57.602			
S = 0.8454 R-Sq = 95.04% R-Sq(adj) = 82.63%					

ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.3.4 อุณหภูมิการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Hardness

1) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนรอบนอกสุดของม้วนเหล็ก (Hot point) เทียบกับค่า Hardness ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Hot point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

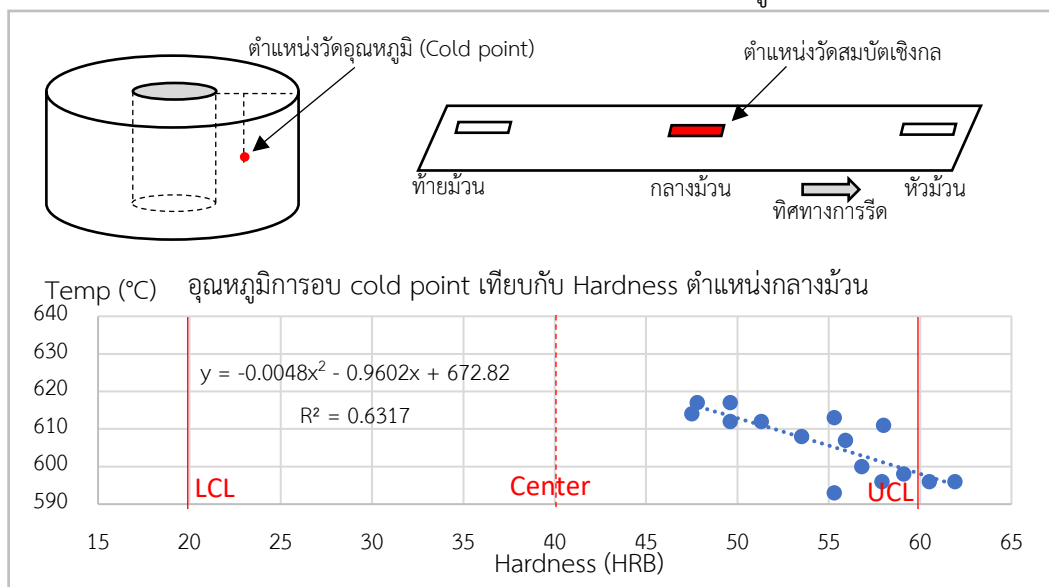
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.026 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบต่อค่า Hardness กล่าวคือคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.11

One-way ANOVA: Hardness-Head versus Temp-Hot point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Hot point	9	295.33	32.81	6.61	0.026
Error	5	24.82	4.96		
Total	14	320.16			

S = 2.228 R-Sq = 92.25% R-Sq(adj) = 78.29%

ตารางที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งส่วนกลางของม้วนเหล็ก (Cold point) เทียบกับค่า Hardness ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงตำแหน่งและผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบที่ตำแหน่ง Cold point เทียบกับตำแหน่งการวัดสมบัติเชิงกล Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.020 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนส่งผลกระทบบต่อค่า Hardness กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วนมีค่าลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.12

One-way ANOVA: Hardness-Middle versus Temp-Cold point					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp-Cold point	10	285.69	28.57	10.11	0.020
Error	4	11.30	2.83		
Total	14	296.99			
S = 1.681 R-Sq = 96.19% R-Sq(adj) = 86.68%					

ตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อนต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temp) กับสมบัติเชิงกลในแต่ละตำแหน่งนั้น สามารถหาค่าความสัมพันธ์กันในลักษณะสมการเชิงเส้น คือ อุณหภูมิการอบอ่อน (y) กับสมบัติเชิงกล (x) ซึ่งสามารถนำมาประมาณค่าของอุณหภูมิการอบอ่อน เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามค่าคาดหวัง สรุปได้ตามตารางที่ 3.13

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้น ระหว่างอุณหภูมิการอบอ่อน (y) กับสมบัติเชิงกล (x)	ค่า คาดหวัง (เป้าหมาย)	ประมาณอุณหภูมิ การอบอ่อน (°C) ที่ค่าคาดหวัง
Yield strength	Hot point	$y = 0.0003x^2 - 0.3065x + 673.5$	200 MPa	624
	Cold point	$y = -0.003x^2 + 1.1797x + 504.34$		620
แนวโน้มพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้น จะมีค่า Yield strength ลดลง				
Tensile strength	Hot point	$y = -0.0056x^2 + 3.3317x + 131.47$	320 MPa	624
	Cold point	$y = -0.0156x^2 + 10.051x - 1007.6$		619
แนวโน้มพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้น จะมีค่า Tensile strength ลดลง				
%Elongation	Hot point	$y = -0.1487x^2 + 15.08x + 246.95$	44 %	623
	Cold point	$y = -0.2412x^2 + 22.77x + 83.443$		618
แนวโน้มพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้น จะมีค่า %Elongation สูงขึ้น				
Hardness HRB	Hot point	$y = -0.0457x^2 + 3.3792x + 564.55$	40 HRB	627
	Cold point	$y = -0.0048x^2 - 0.9602x + 672.82$		627
แนวโน้มพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้น จะมีค่า Hardness HRB ลดลง				

ตารางที่ 3.13 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบอ่อนและสมบัติเชิงกล และประมาณค่าของอุณหภูมิการอบอ่อน เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามค่าคาดหวังเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามค่าคาดหวัง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยอุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temp) กับสมบัติเชิงกลในแต่ละตำแหน่ง นั้นสามารถสรุปผลกระทบของปัจจัย ได้ตามตารางที่ 3.14

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ค่า P-value	สรุปผลการวิเคราะห์
Yield strength	Hot point	0.039	Annealing temp มีผลต่อค่า Yield strength
	Cold point	0.040	Annealing temp มีผลต่อค่า Yield strength
Tensile strength	Hot point	0.043	Annealing temp มีผลต่อค่า Tensile strength
	Cold point	0.003	Annealing temp มีผลต่อค่า Tensile strength
%Elongation	Hot point	0.033	Annealing temp มีผลต่อค่า %Elongation
	Cold point	0.032	Annealing temp มีผลต่อค่า %Elongation
Hardness HRB	Hot point	0.026	Annealing temp มีผลต่อค่า Hardness
	Cold point	0.020	Annealing temp มีผลต่อค่า Hardness

หมายเหตุ : P value < 0.05 = Significant

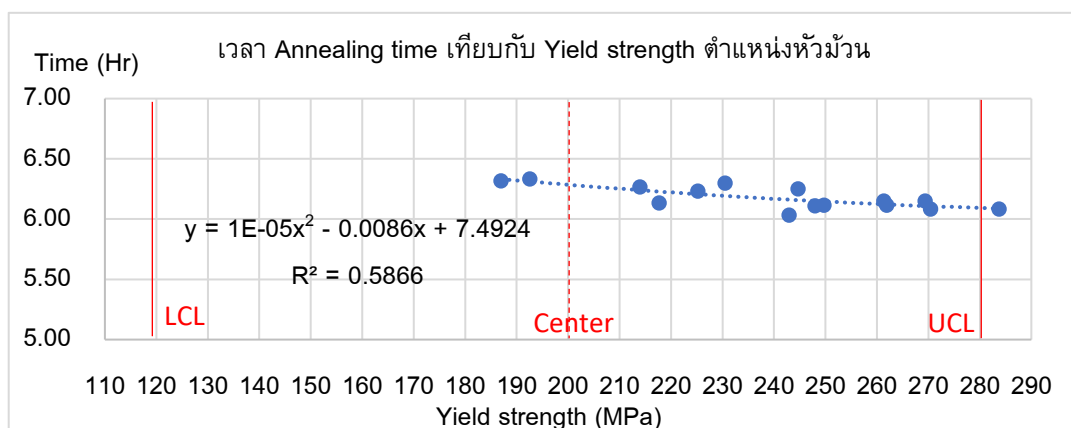
ตารางที่ 3.14 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

3.4 เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเวลาที่นับเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนได้ถึงอุณหภูมิเป้าหมาย และยังคงอบอ่อนต่อเนื่องในและคงไว้ที่อุณหภูมินี้อีกระยะเวลาหนึ่ง หรือเรียกว่า เวลาการอบแช่ (Annealing soaking time) โดยการเพิ่มของอุณหภูมิจะเห็นได้จาก Annealing profile คือ อุณหภูมิบริเวณ Hot point จะเข้าใกล้อุณหภูมิเป้าหมายก่อน Cold point ดังนั้นการอบแช่จะจุดประสงค์เพื่อให้มีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอในมวลเหล็ก ดังนั้นจึงวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับ สมบัติเชิงกลในตำแหน่งที่มีการทดสอบคือ หัวม้วน กลางม้วน หรือท้ายม้วน ตามสมบัติเชิงกลได้แก่ %Elongation, Yield point, Hardness ดังนี้

3.4.1 เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Yield strength

1) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Yield strength ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

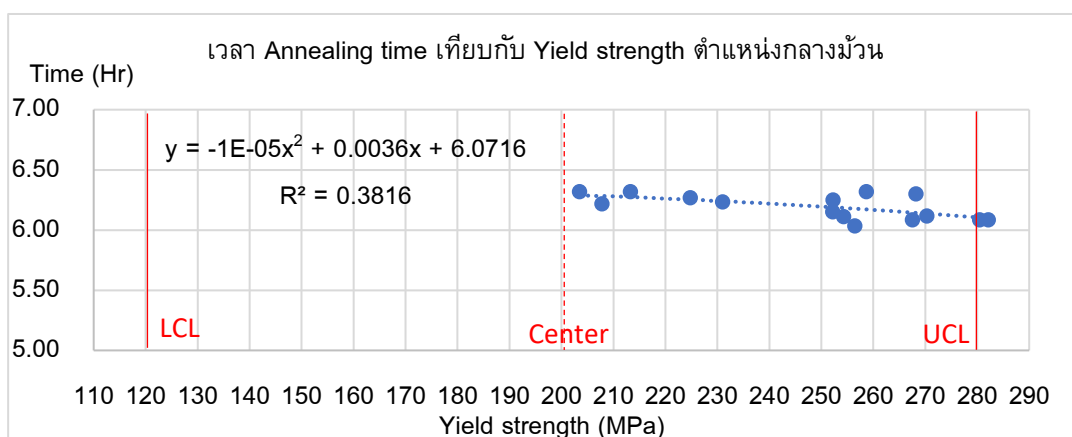
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.022 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.15

One-way ANOVA: Yield strength-Head versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	11	11178.4	1016.2	15.64	0.022
Error	3	195.0	65.0		
Total	14	11373.4			

S = 8.062 R-Sq = 98.29% R-Sq(adj) = 92.00%

ตารางที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Yield strength ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.025 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.16

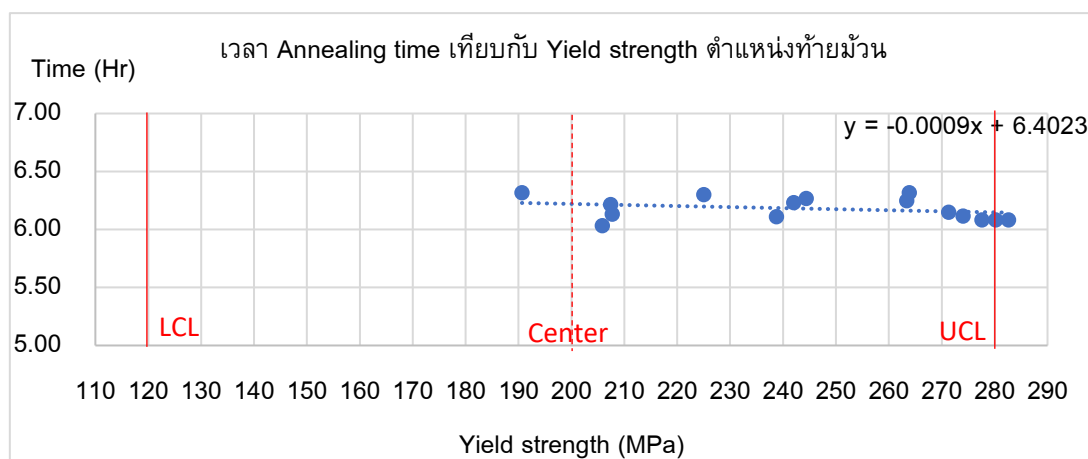
CHULALONGKORN UNIVERSITY

One-way ANOVA: Yield strength-Middle versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	11	9222.4	838.4	14.29	0.025
Error	3	176.0	58.7		
Total	14	9398.4			

S = 7.660 R-Sq = 98.13% R-Sq(adj) = 91.26%

ตารางที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Yield strength ตำแหน่งท้ายม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.005 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.17

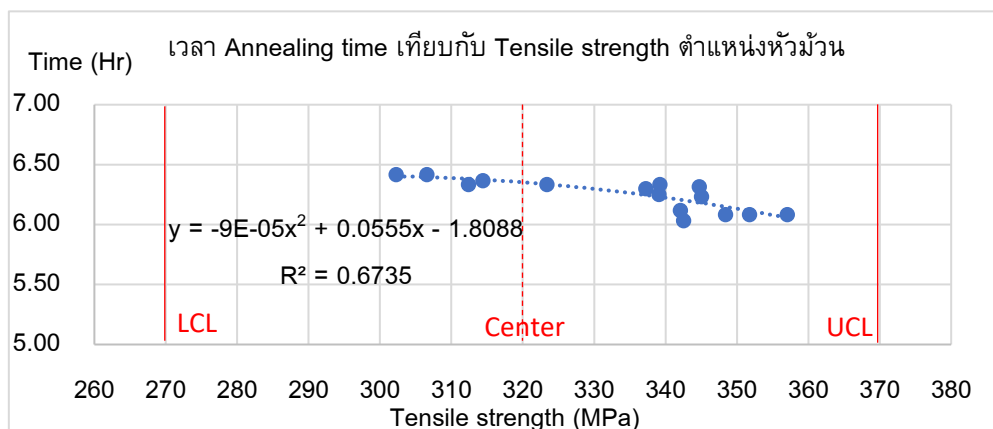
One-way ANOVA: Yield strength-Tail versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	12	13673.36	1139.45	181.56	0.005
Error	2	12.55	6.28		
Total	14	13685.91			

S = 2.505 R-Sq = 99.91% R-Sq(adj) = 99.36%

ตารางที่ 3.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.4.2 เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Tensile strength

1) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.18



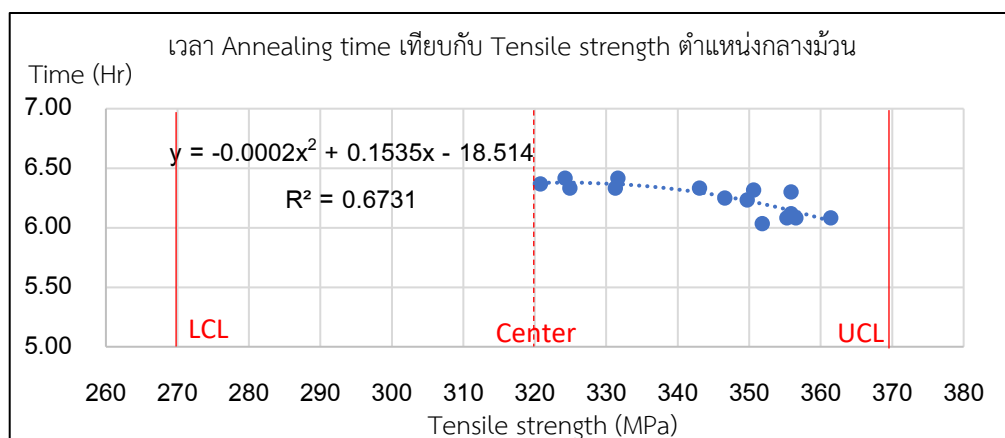
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.043 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.18

One-way ANOVA: Tensile strength-Head versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	9	3803.6	422.6	5.14	0.043
Error	5	410.8	82.2		
Total	14	4214.4			
S = 9.064 R-Sq = 90.25% R-Sq(adj) = 72.71%					

ตารางที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.19



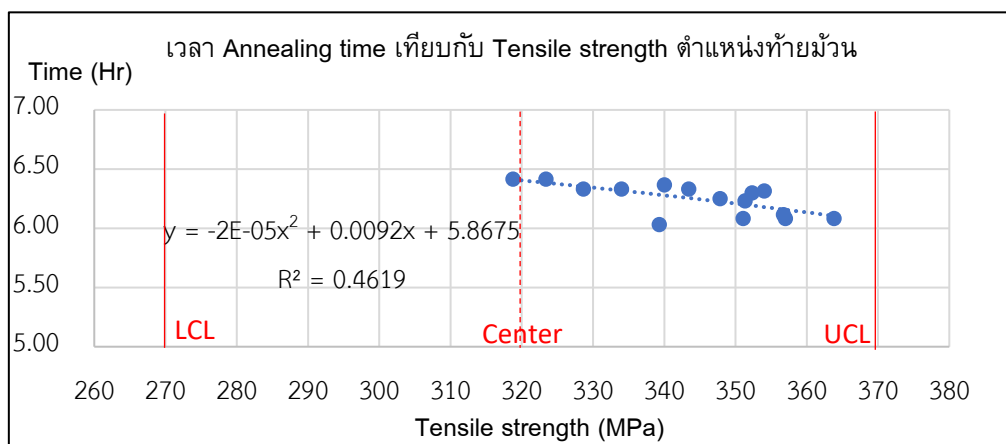
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.030 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.19

One-way ANOVA: Tensile strength-Middle versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	9	2405.4	267.3	6.15	0.030
Error	5	217.4	43.5		
Total	14	2622.8			
S = 6.594 R-Sq = 91.71% R-Sq(adj) = 76.79%					

ตารางที่ 3.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.030 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.20

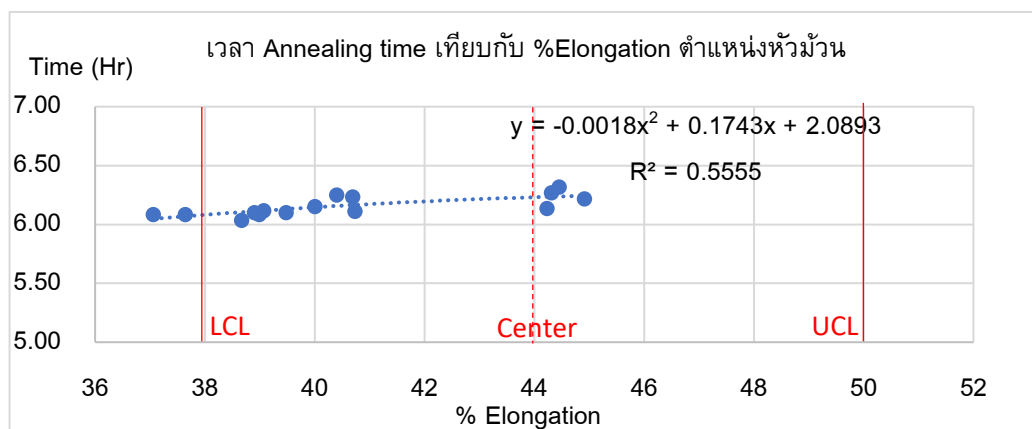
One-way ANOVA: Tensile strength-Tail versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	9	2242.2	249.1	6.10	0.030
Error	5	204.3	40.9		
Total	14	2446.6			

S = 6.393 R-Sq = 91.65% R-Sq(adj) = 76.61%

ตารางที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.4.3 เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล %Elongation

1) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

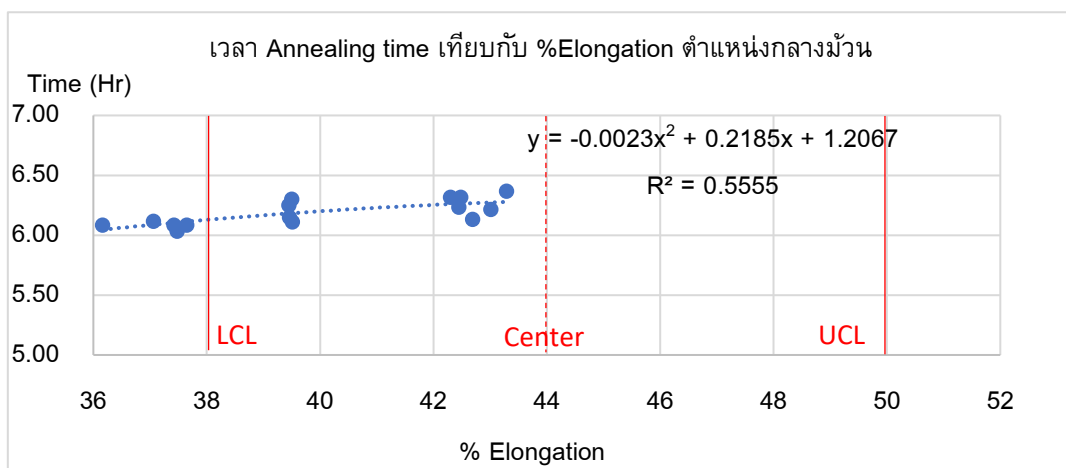
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.033 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.21

One-way ANOVA: %Elongation-Head versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	11	92.712	8.428	11.87	0.033
Error	3	2.129	0.710		
Total	14	94.841			

S = 0.8425 R-Sq = 97.75% R-Sq(adj) = 89.52%

ตารางที่ 3.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

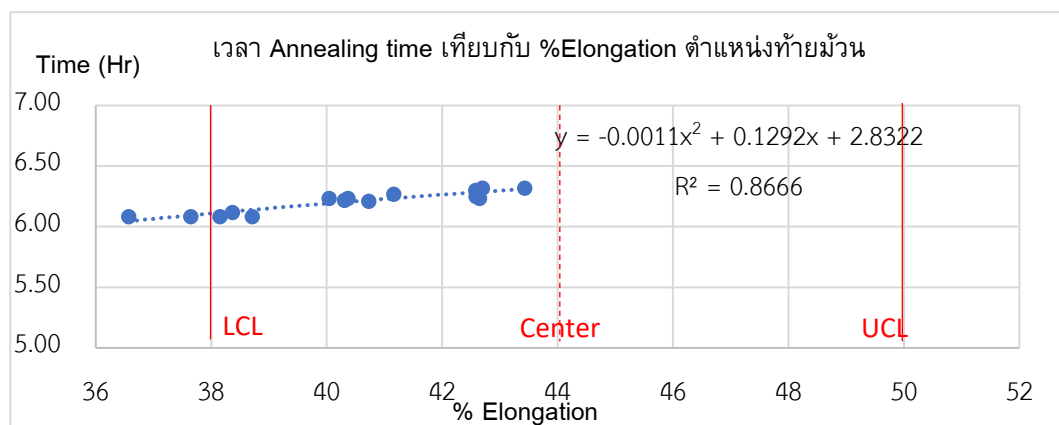
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.085 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

One-way ANOVA: Elongation-Middle versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	12	86.278	7.190	11.17	0.085
Error	2	1.287	0.643		
Total	14	87.565			
S = 0.8021 R-Sq = 98.53% R-Sq(adj) = 89.71%					

ตารางที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

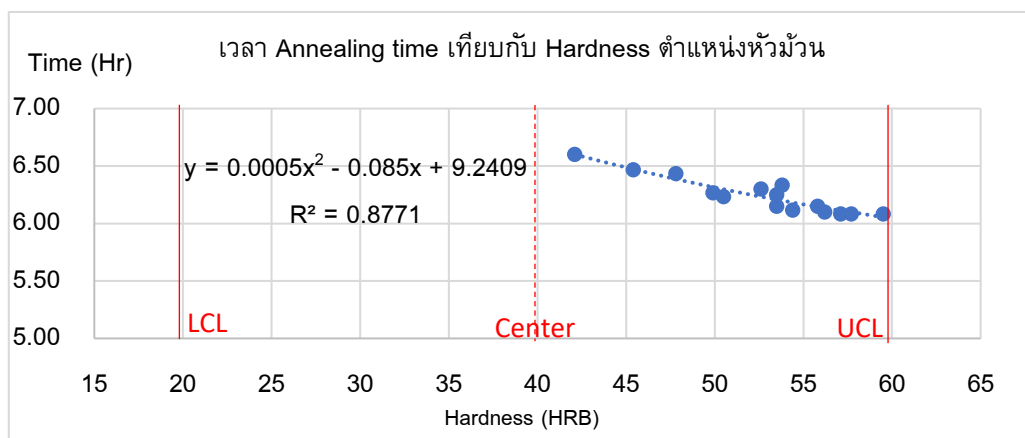
การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.177 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.23

One-way ANOVA: %Elongation-Tail versus Annealing time						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Annealing time	11	59.29	5.39	3.31	0.177	
Error	3	4.89	1.63			
Total	14	64.18				
S = 1.277 R-Sq = 92.38% R-Sq(adj) = 64.45%						

ตารางที่ 3.23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.4.4 เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเทียบกับสมบัติเชิงกล Hardness

1) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Hardness ตำแหน่งหัวม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.24



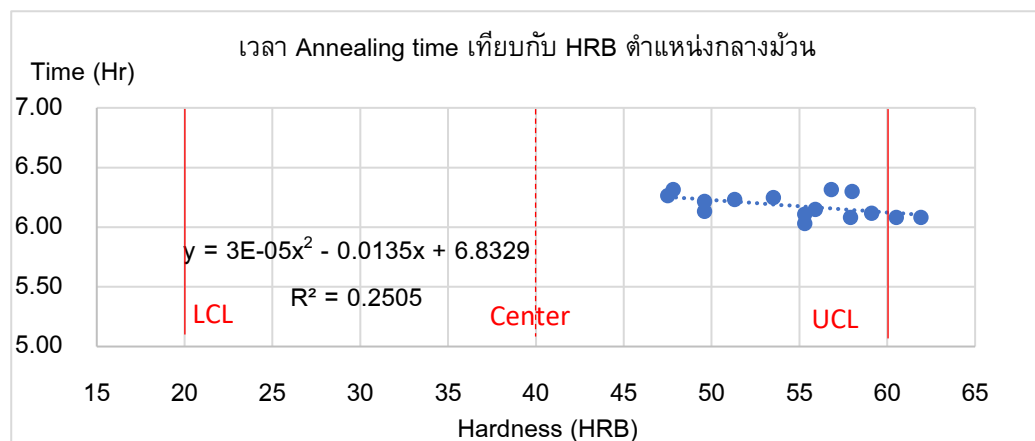
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.024 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วนลดลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.24

One-way ANOVA: Hardness-Head versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	11	314.39	28.58	14.87	0.024
Error	3	5.76	1.92		
Total	14	320.16			
S = 1.386 R-Sq = 98.20% R-Sq(adj) = 91.60%					

ตารางที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Hardness ตำแหน่งกลางม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.155 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.25

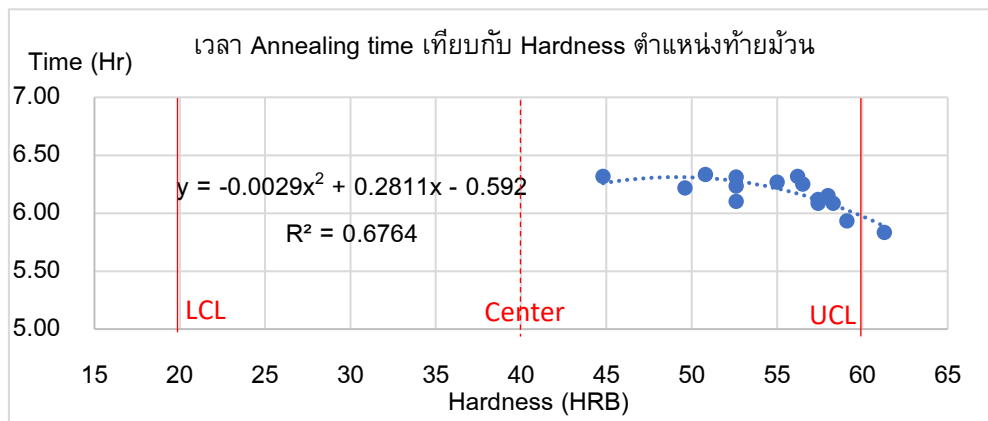
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

One-way ANOVA: Hardness-Middle versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	12	288.75	24.06	5.84	0.155
Error	2	8.24	4.12		
Total	14	296.99			

S = 2.030 R-Sq = 97.23% R-Sq(adj) = 80.58%

ตารางที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับค่า Hardness ตำแหน่งท้ายม้วน จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เทียบกับ Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 ตัวอย่างจากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.110 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

One-way ANOVA: Hardness-Tail versus Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing time	13	258.792	19.907	49.15	0.111
Error	1	0.405	0.405		
Total	14	259.197			

S = 0.6364 R-Sq = 99.84% R-Sq(adj) = 97.81%

ตารางที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) กับสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง สามารถสรุปผลกระทบของปัจจัย ได้ตามตารางที่ 3.27

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ค่า P-value	สรุปผลการวิเคราะห์
Yield strength	หัวม้วน	0.005	Annealing time มีผลต่อค่า Yield strength
	กลางม้วน	0.025	Annealing time มีผลต่อค่า Yield strength
	ท้ายม้วน	0.022	Annealing time มีผลต่อค่า Yield strength
Tensile strength	หัวม้วน	0.043	Annealing time มีผลต่อค่า Tensile strength
	กลางม้วน	0.030	Annealing time มีผลต่อค่า Tensile strength
	ท้ายม้วน	0.030	Annealing time มีผลต่อค่า Tensile strength
%Elongation	หัวม้วน	0.033	Annealing time มีผลต่อค่า %Elongation
	กลางม้วน	0.085	Annealing time ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
	ท้ายม้วน	0.177	Annealing time ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
Hardness HRB	หัวม้วน	0.024	Annealing time มีผลต่อค่า Hardness
	กลางม้วน	0.155	Annealing time ไม่มีผลต่อค่า Hardness
	ท้ายม้วน	0.110	Annealing time ไม่มีผลต่อค่า Hardness

หมายเหตุ : P value < 0.05 = Significant

ตารางที่ 3.27 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

3.5 ปัจจัยในเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base Number)

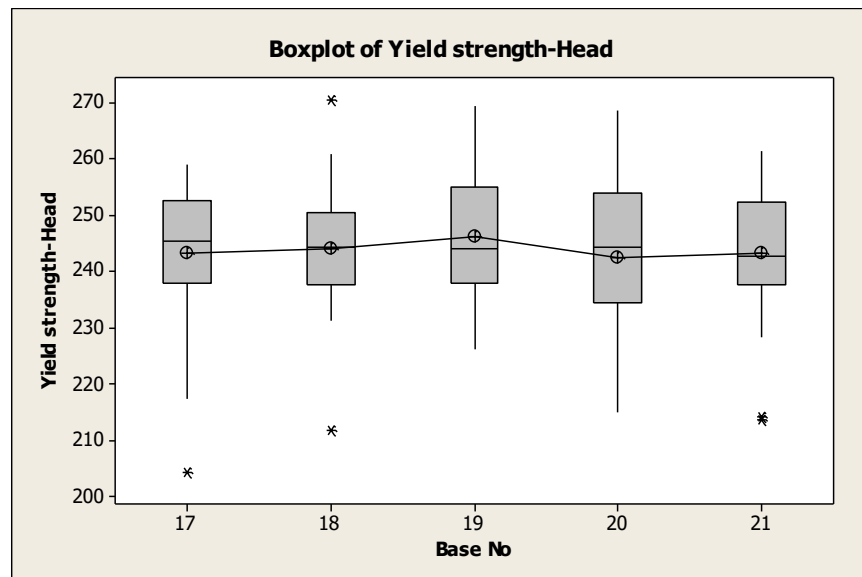
เตาอบ (Batch annealing furnace) ในใช้ในการอบอ่อนม้วนเหล็กของโรงงานกรณีศึกษา นั้น ในแต่ละเตามีขนาด วัสดุ ระบบการให้ความร้อน รวมถึงกระบวนการควบคุมการผลิตที่เหมือนกัน ซึ่งในกลุ่มผลิตภัณฑ์ Product A มีการใช้งานเตาอบหลัก ๆ อยู่จำนวน 5 เตา ได้แก่เตาหมายเลข 17-21 เพื่อให้แน่ใจว่าเตาอบแต่ละเตานั้นคือปัจจัยของการผันแปรของสมบัติเชิงกลหรือไม่จึงนำข้อมูลก่อนการศึกษามาวิเคราะห์ กับสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ Yield strength, Tensile strength, %Elongation และ Hardness จำนวน 120 ตัวอย่าง ได้ดังนี้

3.5.1 วิเคราะห์ปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Yield strength

หมายเลขเตา (Base No.)	ตำแหน่งชั้น (Stack)	จำนวน (ม้วน)	Yield strength (MPa)					
			หัวม้วน		กลางม้วน		ท้ายม้วน	
			Ave	± SD	Ave	± SD	Ave	± SD
17	1	6	238	± 20	252	± 3	250	± 13
	2	6	241	± 14	254	± 7	251	± 10
	3	6	243	± 10	251	± 3	252	± 14
	4	6	251	± 7	255	± 4	257	± 11
18	1	6	244	± 10	251	± 9	248	± 20
	2	6	244	± 19	254	± 5	250	± 15
	3	6	243	± 11	255	± 5	256	± 15
	4	6	245	± 6	251	± 7	242	± 12
19	1	6	250	± 16	250	± 7	252	± 27
	2	6	244	± 7	252	± 9	243	± 18
	3	6	250	± 12	257	± 5	261	± 16
	4	6	239	± 8	254	± 7	264	± 7
20	1	6	250	± 13	252	± 5	248	± 21
	2	6	248	± 10	252	± 7	251	± 22
	3	6	229	± 16	255	± 9	254	± 16
	4	6	243	± 7	255	± 6	256	± 10
21	1	6	244	± 18	251	± 6	245	± 18
	2	6	245	± 5	252	± 5	249	± 17
	3	6	240	± 15	251	± 5	252	± 10
	4	6	244	± 10	248	± 10	248	± 13
Grand Total		120	244	± 13	253	± 6	251	± 16

ตารางที่ 3.28 ข้อมูล Yield strength ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน

1) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.27 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่างจาก 5 เตาอบ

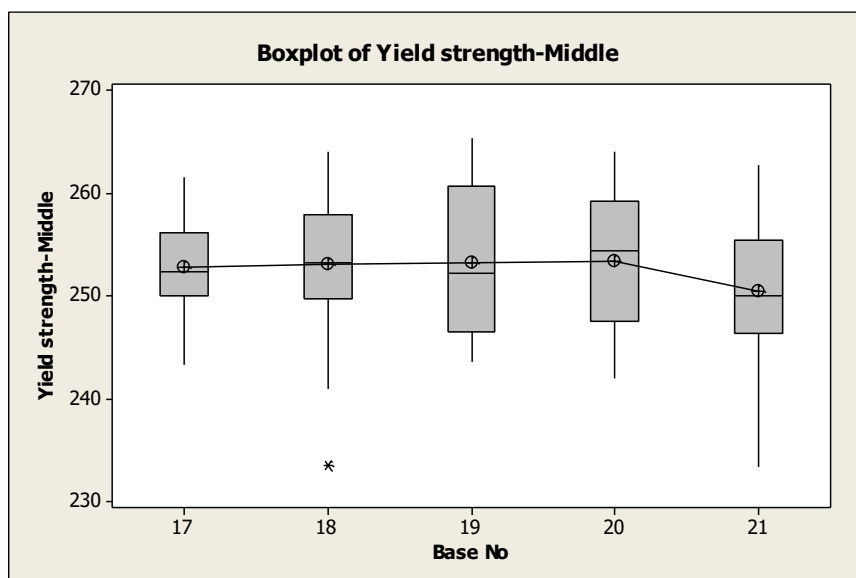
One-way ANOVA: Yield strength-Head versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	177	44	0.28	0.893
Error	115	18429	160		
Total	119	18606			

S = 12.66 R-Sq = 0.95% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.893 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตา (Base No.) นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

- 2) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.28 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

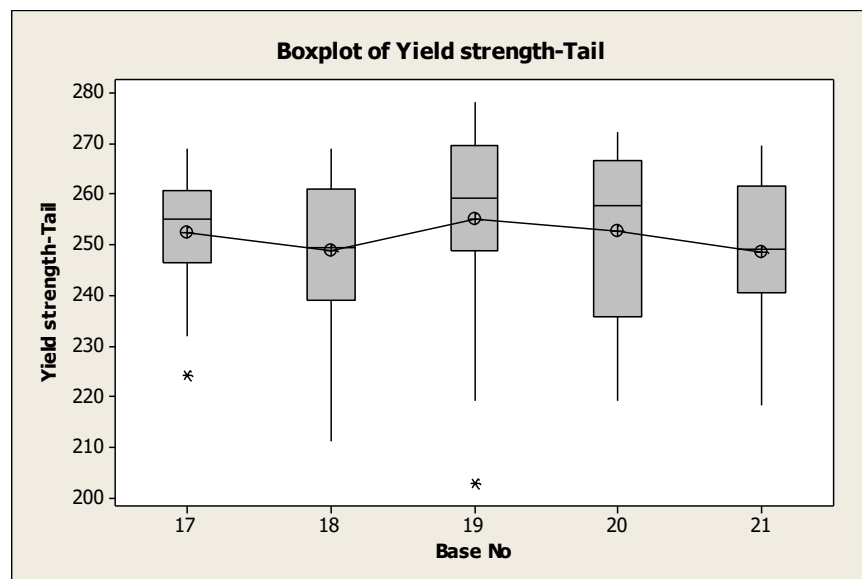
One-way ANOVA: Yield strength-Middle versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	134.2	33.6	0.81	0.521
Error	115	4756.8	41.4		
Total	119	4891.1			

S = 6.431 R-Sq = 2.74% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.521 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.29 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

One-way ANOVA: Yield strength-Tail versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	713	178	0.72	0.578
Error	115	28379	247		
Total	119	29092			

S = 15.71 R-Sq = 2.45% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

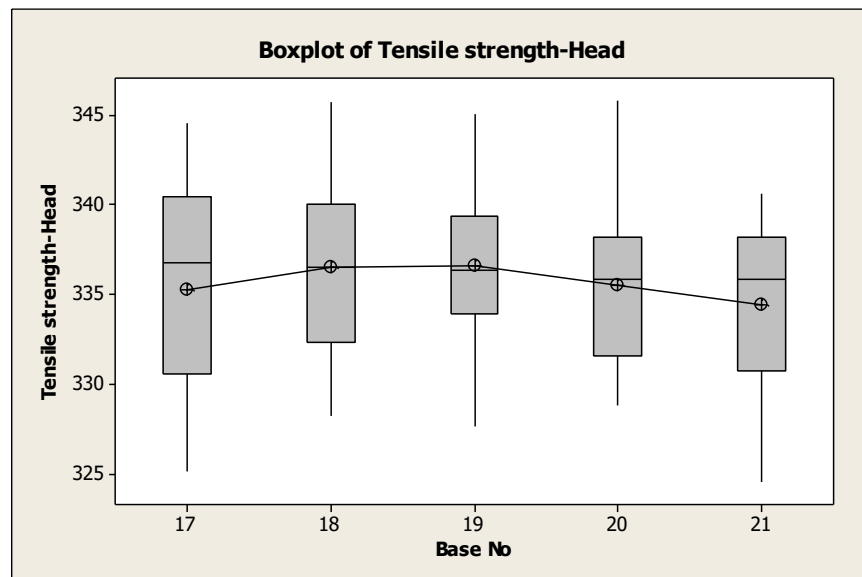
จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.578 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.5.2 วิเคราะห์ปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Tensile strength

หมายเลขเตา (Base No.)	ตำแหน่งชั้น (Stack)	จำนวน (ม้วน)	Tensile strength (MPa)					
			หัวม้วน		กลางม้วน		ท้ายม้วน	
			Ave	± SD	Ave	± SD	Ave	± SD
17	1	6	333	± 6	343	± 3	342	± 4
	2	6	333	± 3	341	± 6	341	± 6
	3	6	334	± 8	345	± 4	348	± 5
	4	6	340	± 3	346	± 4	345	± 5
18	1	6	336	± 6	344	± 6	343	± 7
	2	6	334	± 6	344	± 5	344	± 7
	3	6	338	± 3	347	± 4	348	± 3
	4	6	338	± 5	344	± 4	343	± 3
19	1	6	336	± 7	343	± 8	342	± 10
	2	6	335	± 4	343	± 7	344	± 8
	3	6	337	± 3	346	± 4	346	± 4
	4	6	338	± 3	345	± 10	350	± 4
20	1	6	337	± 6	345	± 6	345	± 5
	2	6	334	± 5	345	± 4	347	± 3
	3	6	334	± 6	344	± 8	346	± 8
	4	6	337	± 4	344	± 5	344	± 4
21	1	6	336	± 5	343	± 3	342	± 5
	2	6	333	± 3	343	± 4	344	± 4
	3	6	334	± 6	342	± 6	344	± 5
	4	6	335	± 5	342	± 7	345	± 8
Grand Total		120	336	± 5	344	± 5	345	± 6

ตารางที่ 3.32 ข้อมูล Tensile strength ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน

- 1) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.30 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่างจาก 5 เตาอบ

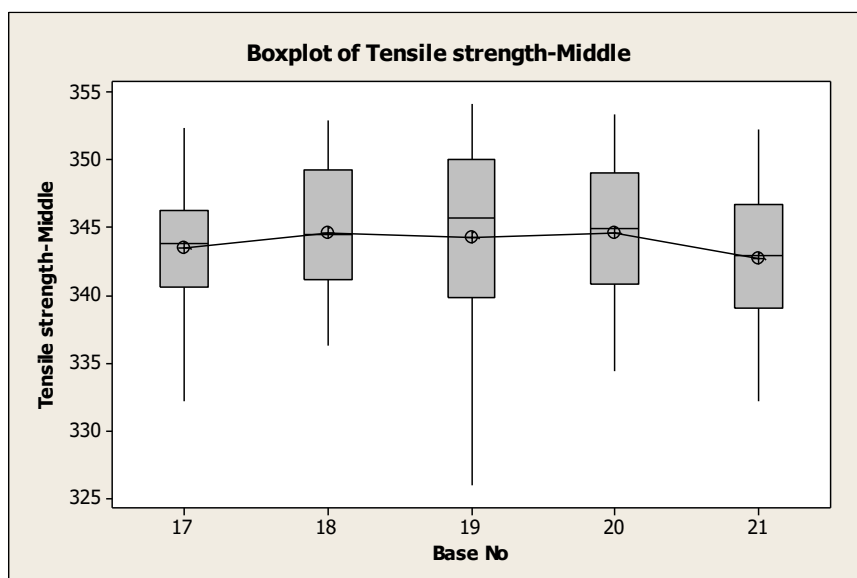
One-way ANOVA: Tensile strength-Head versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	77.9	19.5	0.78	0.542
Error	115	2878.3	25.0		
Total	119	2956.1			

S = 5.003 R-Sq = 2.63% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.542 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตา (Base No.) นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

- 2) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.31 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

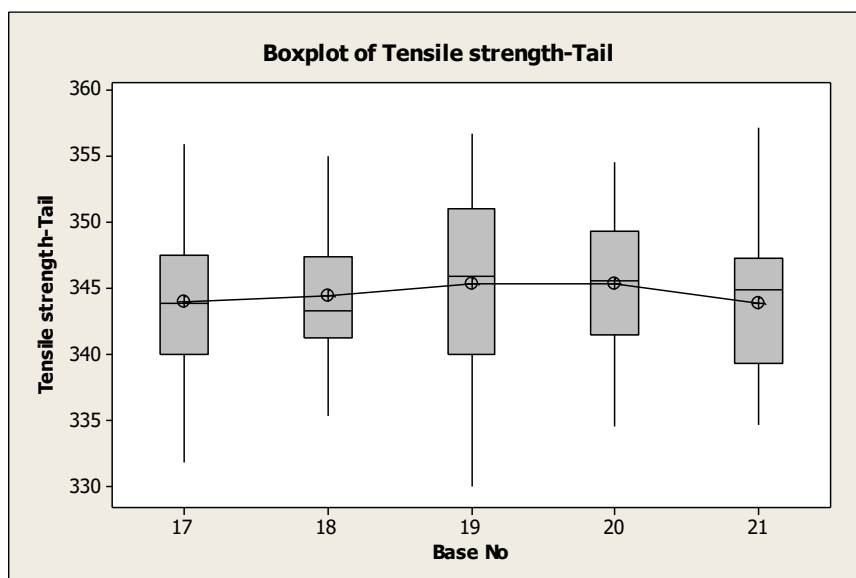
One-way ANOVA: Tensile strength-Middle versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	65.6	16.4	0.55	0.697
Error	115	3412.8	29.7		
Total	119	3478.4			

S = 5.448 R-Sq = 1.89% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.697 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

- 3) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.32 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

One-way ANOVA: Tensile strength-Tail versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	44.4	11.1	0.33	0.857
Error	115	3858.3	33.6		
Total	119	3902.7			

S = 5.792 R-Sq = 1.14% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

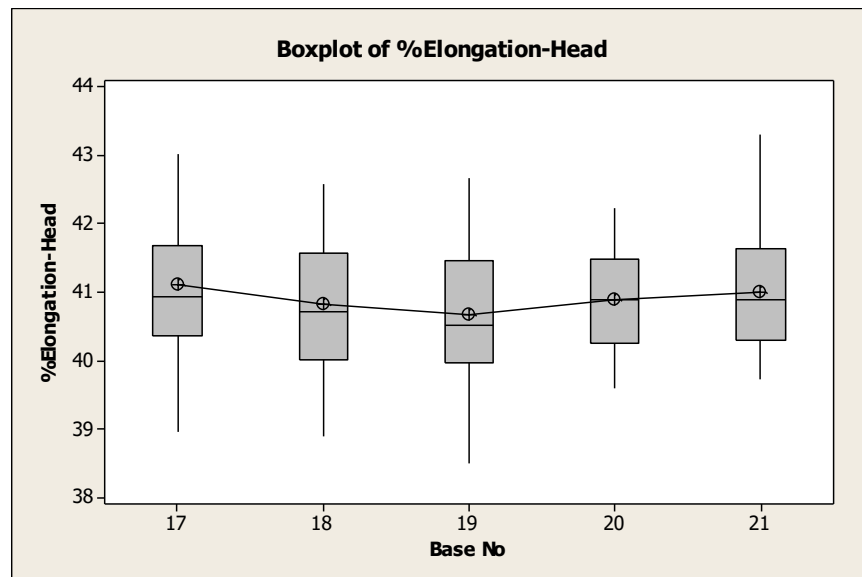
จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.578 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.5.3 วิเคราะห์ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบกับค่า %Elongation

หมายเลขเตา (Base No.)	ตำแหน่งชั้น (Stack)	จำนวน (ม้วน)	Elongation (%)					
			หัวม้วน		กลางม้วน		ท้ายม้วน	
			Ave	± SD	Ave	± SD	Ave	± SD
17	1	6	41.5	± 1.2	39.7	± 0.9	40.0	± 0.6
	2	6	41.5	± 0.7	39.8	± 1.0	39.7	± 1.0
	3	6	41.0	± 1.3	39.7	± 0.5	40.0	± 0.7
	4	6	40.3	± 0.9	39.0	± 0.4	39.1	± 0.5
18	1	6	40.8	± 1.1	39.6	± 0.8	40.0	± 0.9
	2	6	41.1	± 1.3	39.9	± 0.9	39.8	± 1.3
	3	6	40.7	± 1.2	39.0	± 0.6	39.1	± 0.9
	4	6	40.6	± 1.1	39.2	± 0.9	40.0	± 1.2
19	1	6	40.8	± 1.1	39.9	± 0.8	39.5	± 1.6
	2	6	41.2	± 1.2	39.7	± 0.8	39.9	± 1.3
	3	6	40.5	± 1.2	39.1	± 0.7	38.9	± 1.2
	4	6	40.2	± 0.6	39.1	± 0.6	39.0	± 0.6
20	1	6	40.8	± 1.0	39.4	± 0.5	39.9	± 0.7
	2	6	41.0	± 0.9	39.4	± 0.5	39.4	± 1.3
	3	6	41.2	± 0.8	39.7	± 0.9	39.2	± 0.7
	4	6	40.5	± 0.6	39.6	± 1.0	39.4	± 0.9
21	1	6	40.9	± 1.0	39.5	± 0.5	40.0	± 1.0
	2	6	41.0	± 0.8	39.8	± 1.0	39.5	± 1.2
	3	6	41.2	± 0.8	39.6	± 0.6	39.4	± 1.0
	4	6	40.9	± 1.2	39.7	± 0.9	39.2	± 1.0
Grand Total		120	40.9	± 1.0	39.5	± 0.8	39.6	± 1.0

ตารางที่ 3.36 ข้อมูล %Elongation ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน

1) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.33 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่างจาก 5 เตาอบ

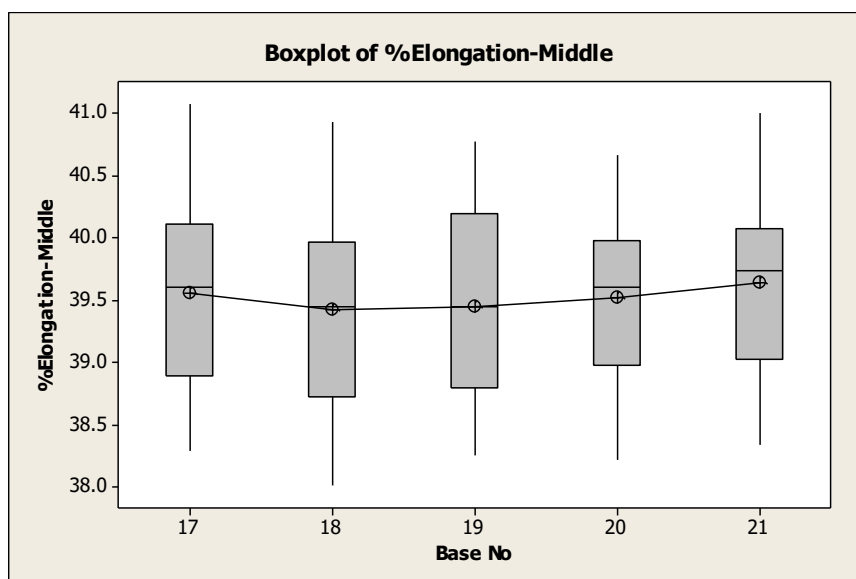
One-way ANOVA: %Elongation-Head versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	2.655	0.664	0.66	0.618
Error	115	114.927	0.999		
Total	119	117.582			

S = 0.9997 R-Sq = 2.26% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.618 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตา (Base No.) นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.34 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

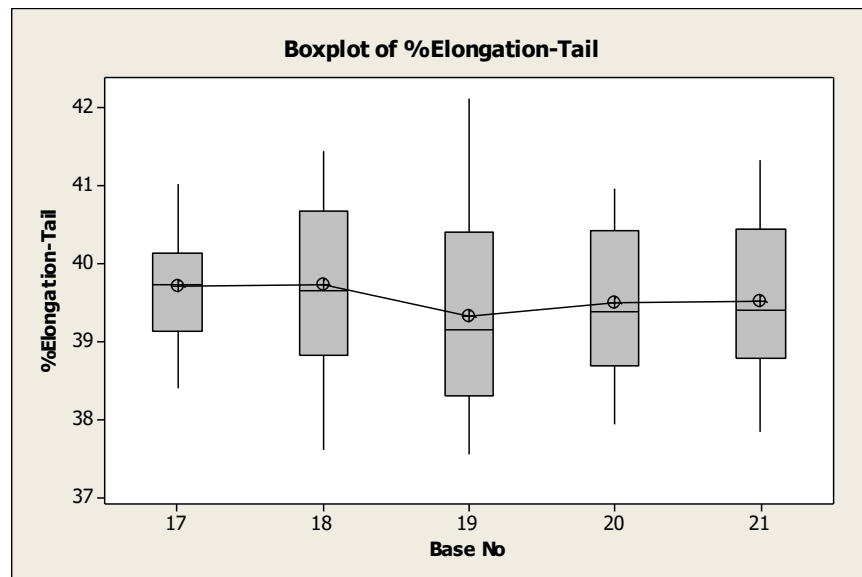
One-way ANOVA: %Elongation-Middle versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	0.702	0.175	0.30	0.881
Error	115	68.373	0.595		
Total	119	69.074			

S = 0.7711 R-Sq = 1.02% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.881 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.35 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

One-way ANOVA: %Elongation-Tail versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	2.82	0.71	0.69	0.598
Error	115	117.00	1.02		
Total	119	119.82			

S = 1.009 R-Sq = 2.35% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

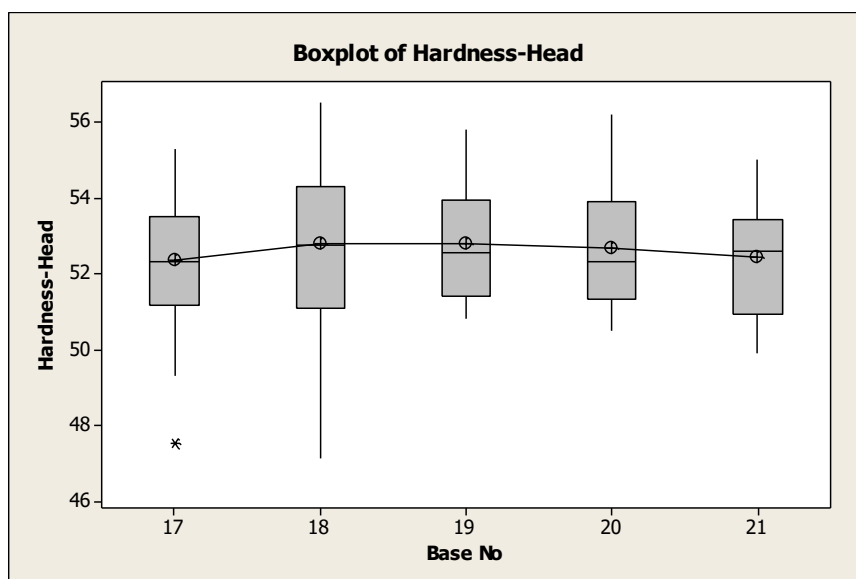
จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.598 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.5.4 วิเคราะห์ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบกับค่า Hardness

หมายเลขเตา (Base No.)	ตำแหน่งชั้น (Stack)	จำนวน (ม้วน)	Hardness (HRB)					
			หัวม้วน		กลางม้วน		ท้ายม้วน	
			Ave	± SD	Ave	± SD	Ave	± SD
17	1	6	52	± 2.8	54	± 1.2	54	± 1.8
	2	6	52	± 1.2	54	± 1.6	55	± 2.9
	3	6	52	± 1.6	54	± 0.8	55	± 2.3
	4	6	53	± 1.6	55	± 0.5	55	± 1.3
18	1	6	53	± 2.1	54	± 1.9	54	± 2.8
	2	6	52	± 3.1	54	± 2.1	55	± 3.3
	3	6	53	± 1.6	56	± 1.0	55	± 2.1
	4	6	54	± 1.8	55	± 1.1	54	± 1.5
19	1	6	54	± 1.7	54	± 1.6	55	± 3.5
	2	6	52	± 0.8	54	± 1.5	54	± 2.4
	3	6	54	± 1.3	55	± 1.6	56	± 2.3
	4	6	52	± 0.9	55	± 0.9	56	± 1.1
20	1	6	53	± 1.3	54	± 0.8	53	± 2.2
	2	6	54	± 1.5	55	± 1.9	55	± 2.5
	3	6	52	± 1.4	54	± 2.2	55	± 2.6
	4	6	52	± 1.1	55	± 1.5	55	± 1.4
21	1	6	53	± 2.0	54	± 1.5	54	± 2.2
	2	6	53	± 1.5	55	± 1.0	54	± 2.1
	3	6	52	± 1.1	54	± 1.4	54	± 1.1
	4	6	53	± 1.4	54	± 1.7	54	± 1.7
Grand Total		120	53	± 1.7	54	± 1.4	55	± 2.2

ตารางที่ 3.40 ข้อมูล Hardness HRB ในแต่ละหมายเลขเตาอบ (Base No.) และตำแหน่งชั้นในการอบ (Stack No.) ที่หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน

1) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.36 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่างจาก 5 เตาอบ

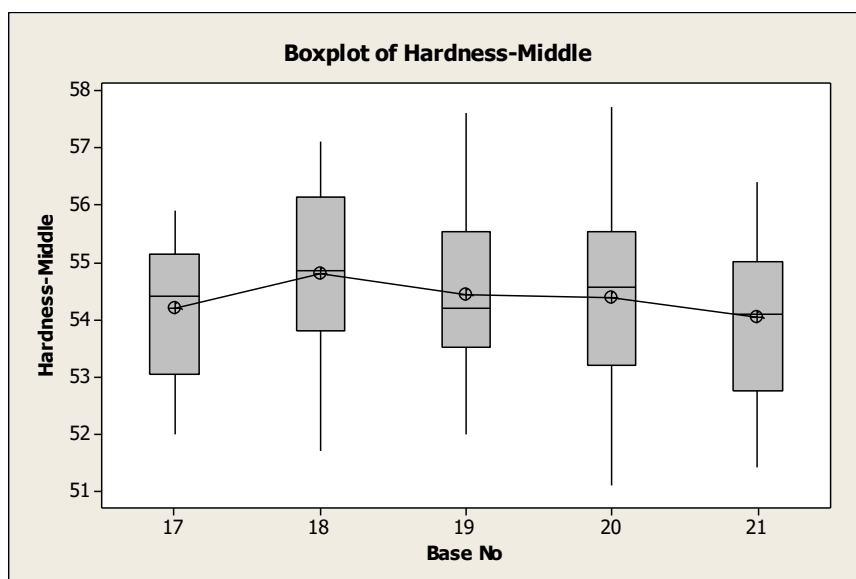
One-way ANOVA: Hardness-Head versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	3.85	0.96	0.32	0.861
Error	115	341.93	2.97		
Total	119	345.78			

S = 1.724 R-Sq = 1.11% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.861 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตา (Base No.) นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

2) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.37 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

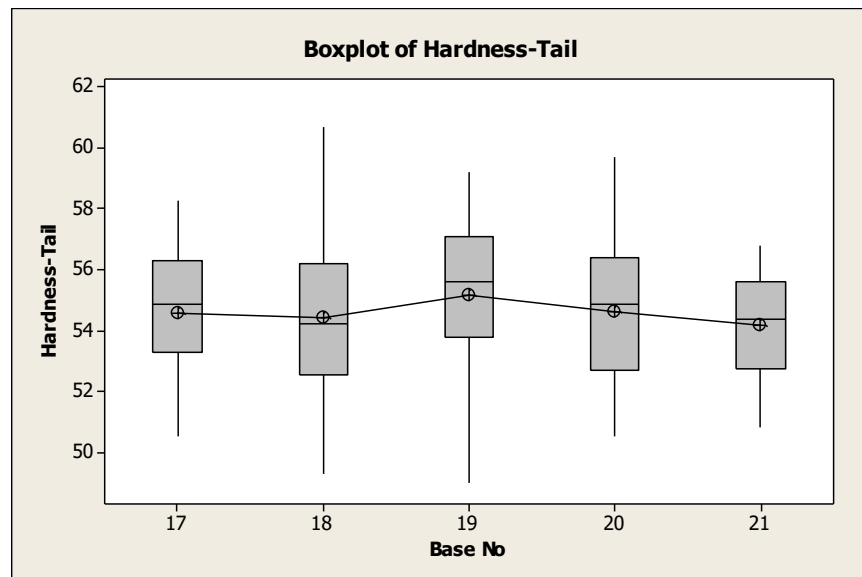
One-way ANOVA: Hardness-Middle versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	7.66	1.92	0.93	0.451
Error	115	237.86	2.07		
Total	119	245.52			

S = 1.438 R-Sq = 3.12% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.42 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.451 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3) ปัจจัยเรื่องของหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.38 Boxplot ระหว่าง Base no. กับ Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No.) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 120 ตัวอย่าง จาก 5 เตาอบ

One-way ANOVA: Hardness-Tail versus Base No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Base No	4	12.63	3.16	0.64	0.632
Error	115	563.45	4.90		
Total	119	576.08			

S = 2.213 R-Sq = 2.19% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.43 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตา (Base No) กับค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.632 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าหมายเลขเตาอบ (Base No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือหมายเลขเตาไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัยหมายเลขเตาอบ (Base No.) กับสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง นั้นสามารถสรุปผลกระทบของปัจจัย ได้ตามตารางที่ 3.44

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ค่า P-value	สรุปผลการวิเคราะห์
Yield strength	หัวม้วน	0.893	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
	กลางม้วน	0.521	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
	ท้ายม้วน	0.578	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
Tensile strength	หัวม้วน	0.542	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
	กลางม้วน	0.697	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
	ท้ายม้วน	0.857	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
%Elongation	หัวม้วน	0.618	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
	กลางม้วน	0.881	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
	ท้ายม้วน	0.598	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
Hardness HRB	หัวม้วน	0.681	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness
	กลางม้วน	0.540	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness
	ท้ายม้วน	0.632	หมายเลขเตา (Base No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness

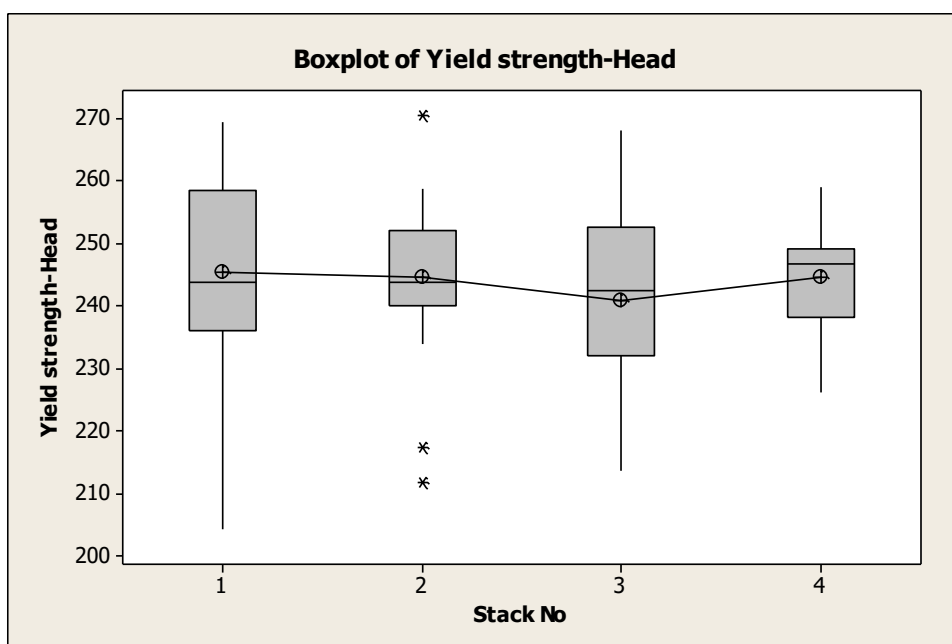
หมายเหตุ : P value < 0.05 = Significant

ตารางที่ 3.44 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบหมายเลขเตา (Stack No.) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

3.6 ปัจจัยเรื่องตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack position)

ในแต่ละเตาจะมีจำนวนชั้นของม้วนเหล็ก จำนวน 4 ชั้น (Stack No.1-4) รวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ Yield strength, Tensile strength, %Elongation และ Hardness ได้ดังนี้

3.6.1 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.39 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

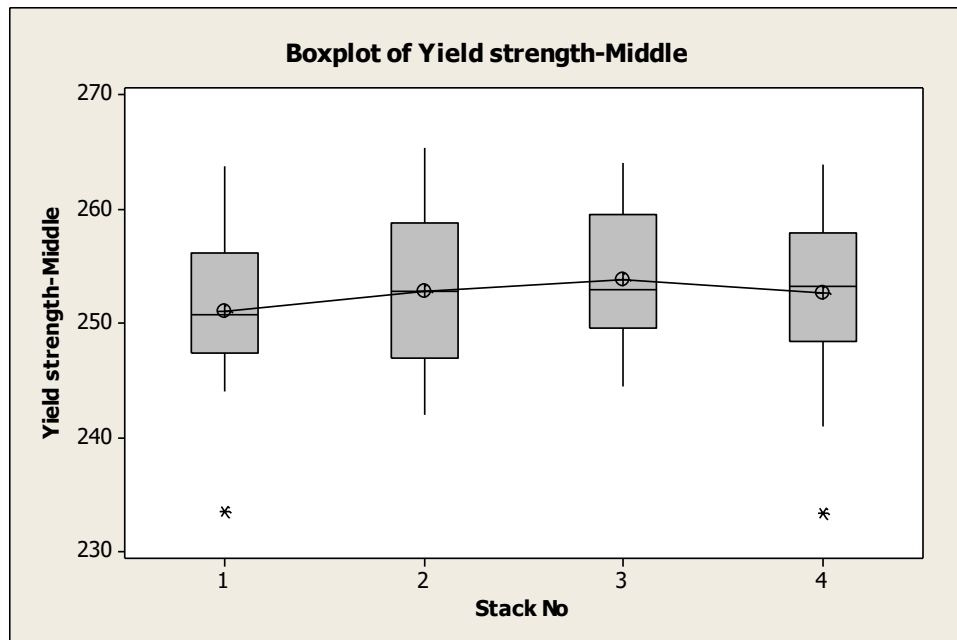
CHULALONGKORN UNIVERSITY

One-way ANOVA: Yield strength-Head versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	354	118	0.75	0.525
Error	116	18253	157		
Total	119	18606			
S = 12.54 R-Sq = 1.90% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ 3.45 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.525 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

3.6.2 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Yield strength ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.40 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

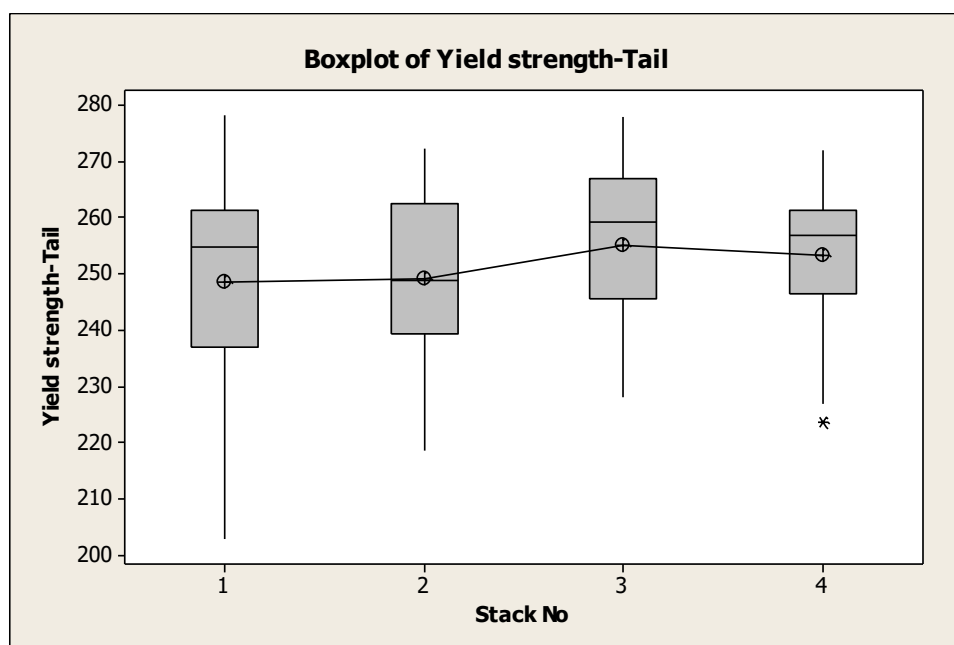
One-way ANOVA: Yield strength-Middle versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	113.8	37.9	0.92	0.433
Error	116	4777.3	41.2		
Total	119	4891.1			

S = 6.417 R-Sq = 2.33% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.46 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.433 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.6.3 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Yield strength ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.41 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

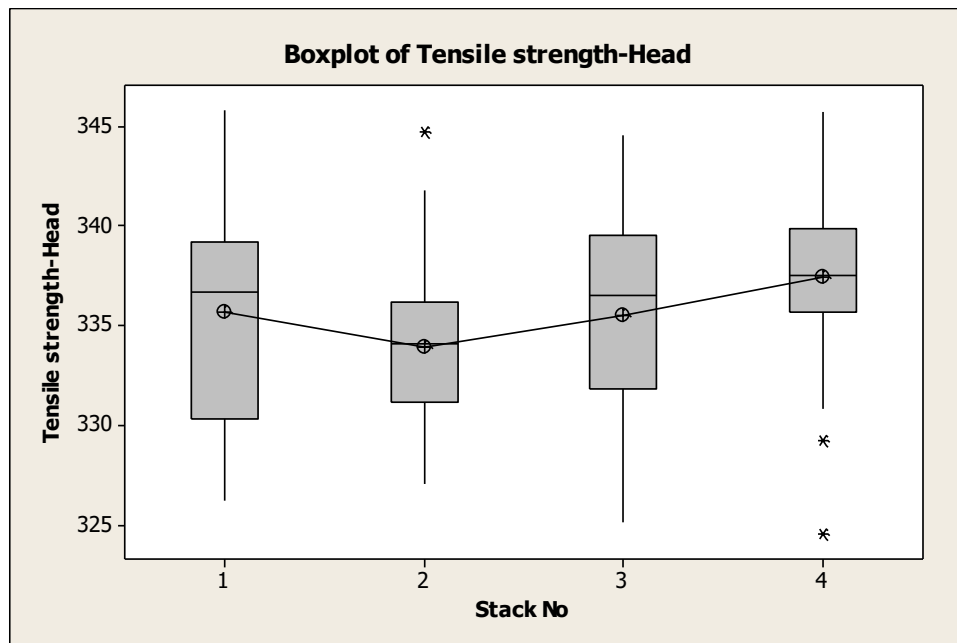
One-way ANOVA: Yield strength-Tail versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	920	307	1.26	0.290
Error	116	28172	243		
Total	119	29092			

S = 15.58 R-Sq = 3.16% R-Sq(adj) = 0.66%

ตารางที่ 3.47 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.290 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.6.4 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.42 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน

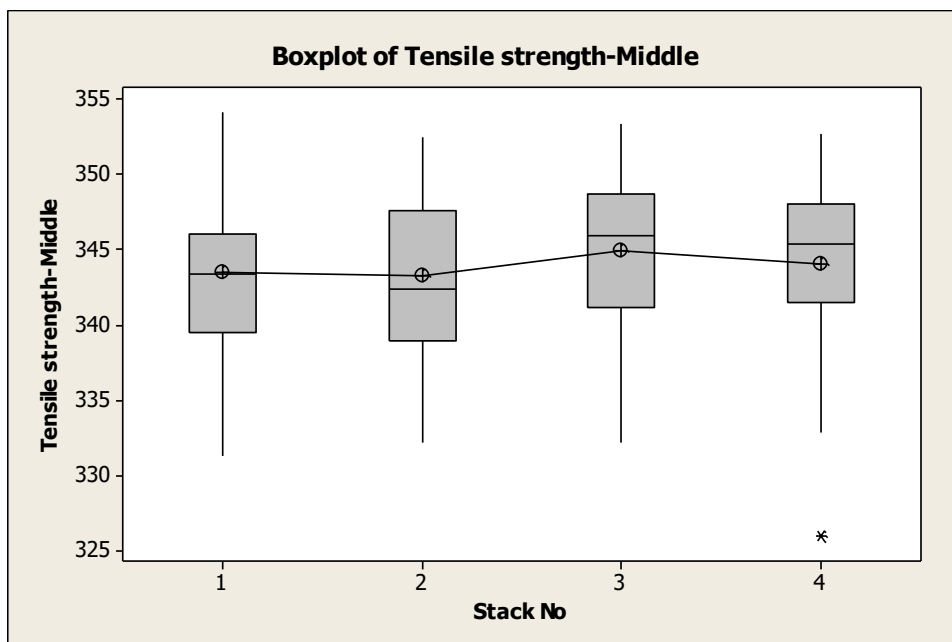
One-way ANOVA: Tensile strength-Head versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	183.6	61.2	2.56	0.058
Error	116	2772.6	23.9		
Total	119	2956.1			

S = 4.889 R-Sq = 6.21% R-Sq(adj) = 3.78%

ตารางที่ 3.48 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.058 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งหัวม้วน

3.6.5 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน



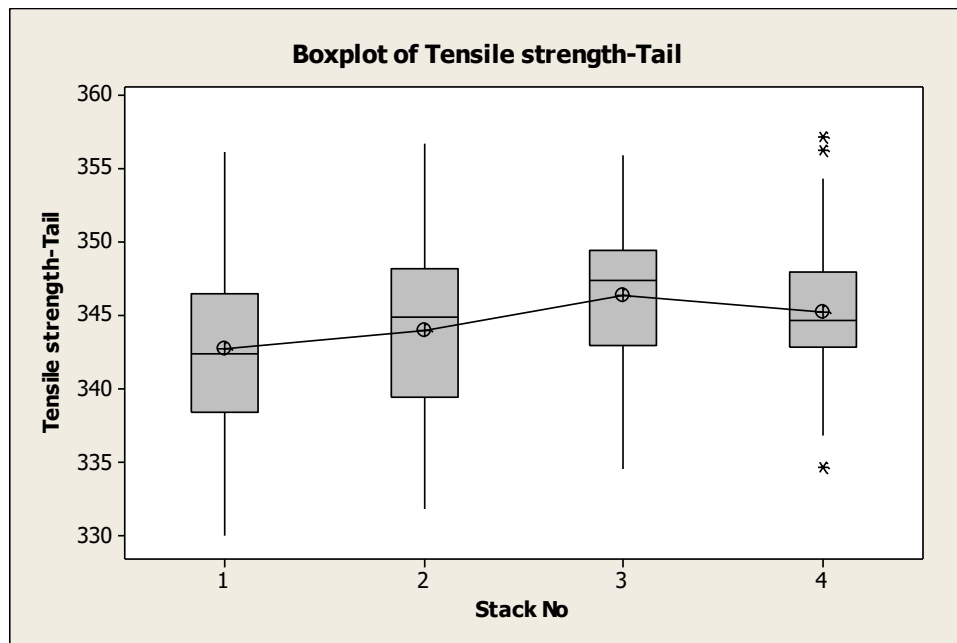
รูปที่ 3.43 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน

One-way ANOVA: Tensile strength-Middle versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	49.2	16.4	0.56	0.646
Error	116	3429.2	29.6		
Total	119	3478.4			
S = 5.437 R-Sq = 1.42% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ 3.49 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.646 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.6.6 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.44 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน

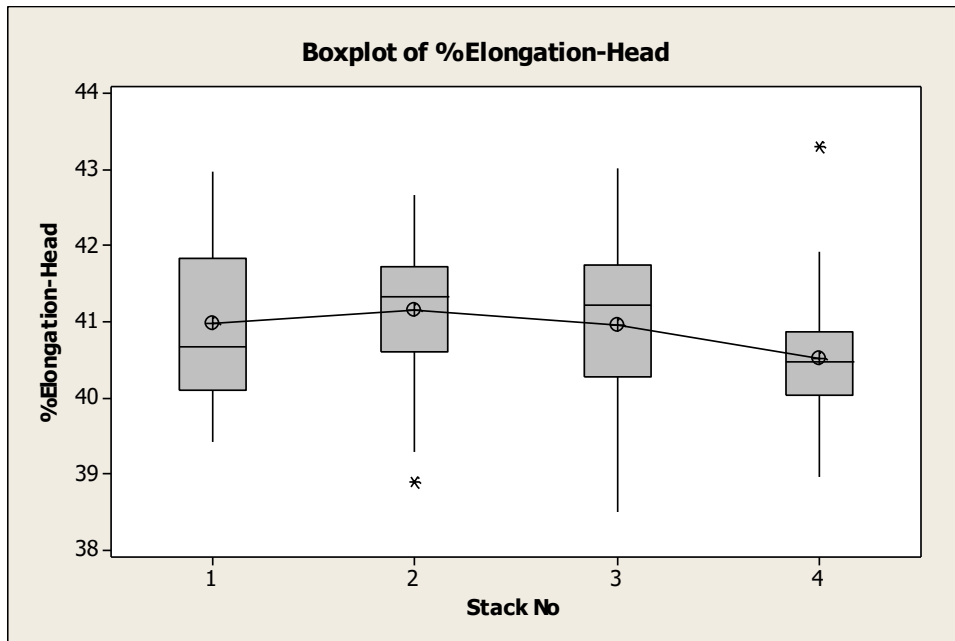
One-way ANOVA: Tensile strength-Tail versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	219.8	73.3	2.31	0.080
Error	116	3683.0	31.7		
Total	119	3902.7			

S = 5.635 R-Sq = 5.63% R-Sq(adj) = 3.19%

ตารางที่ 3.50 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Tensile strength ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.080 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.6.7 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.45 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน

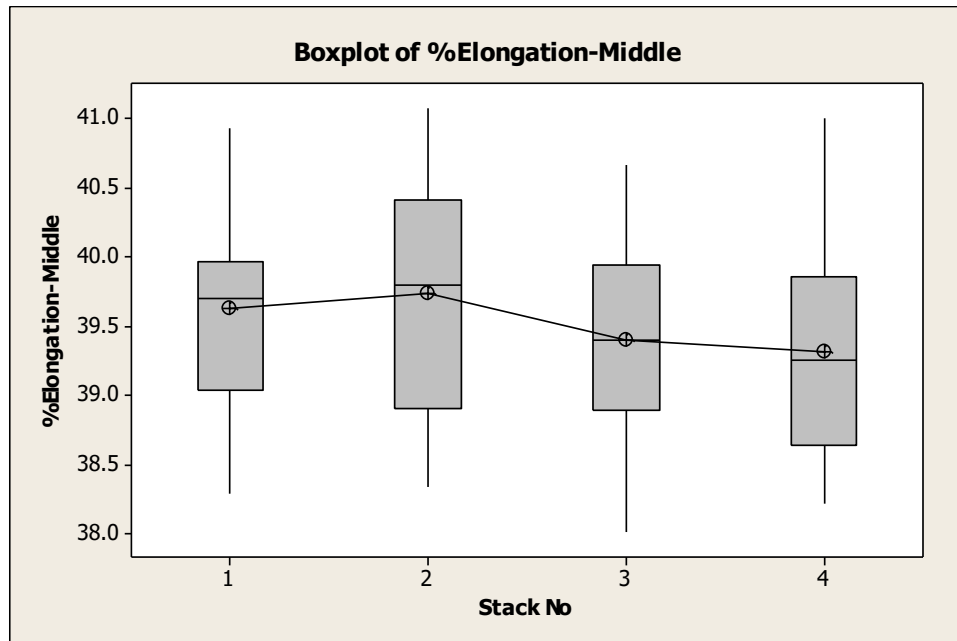
One-way ANOVA: %Elongation-Head versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	6.551	2.184	2.28	0.083
Error	116	111.031	0.957		
Total	119	117.582			

S = 0.9783 R-Sq = 5.57% R-Sq(adj) = 3.13%

ตารางที่ 3.51 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.083 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งหัวม้วน

3.6.8 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.46 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน

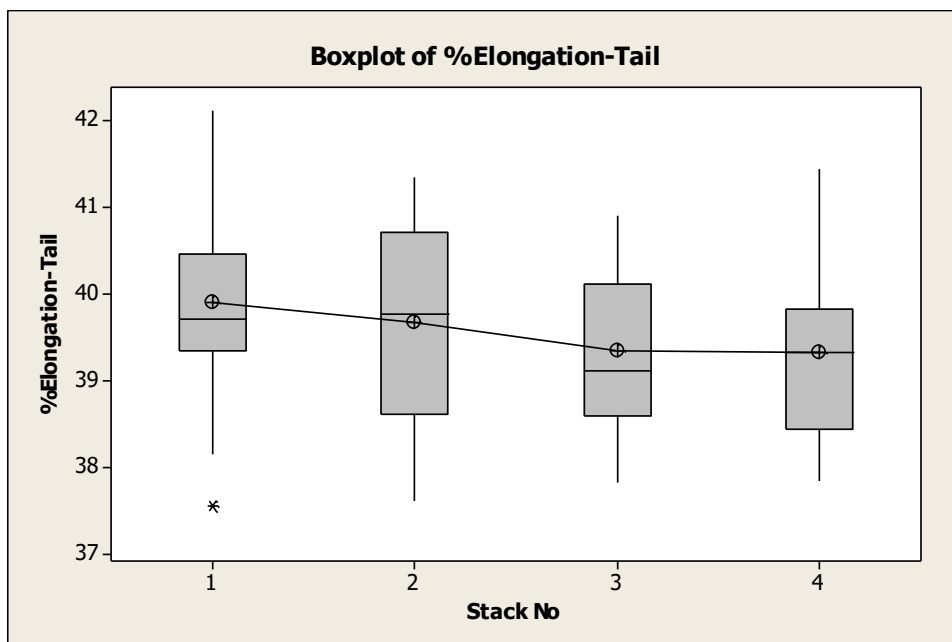
One-way ANOVA: %Elongation-Middle versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	3.437	1.146	2.02	0.114
Error	116	65.638	0.566		
Total	119	69.074			

S = 0.7522 R-Sq = 4.98% R-Sq(adj) = 2.52%

ตารางที่ 3.52 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.114 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.6.9 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.47 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน

One-way ANOVA: %Elongation-Tail versus Stack No

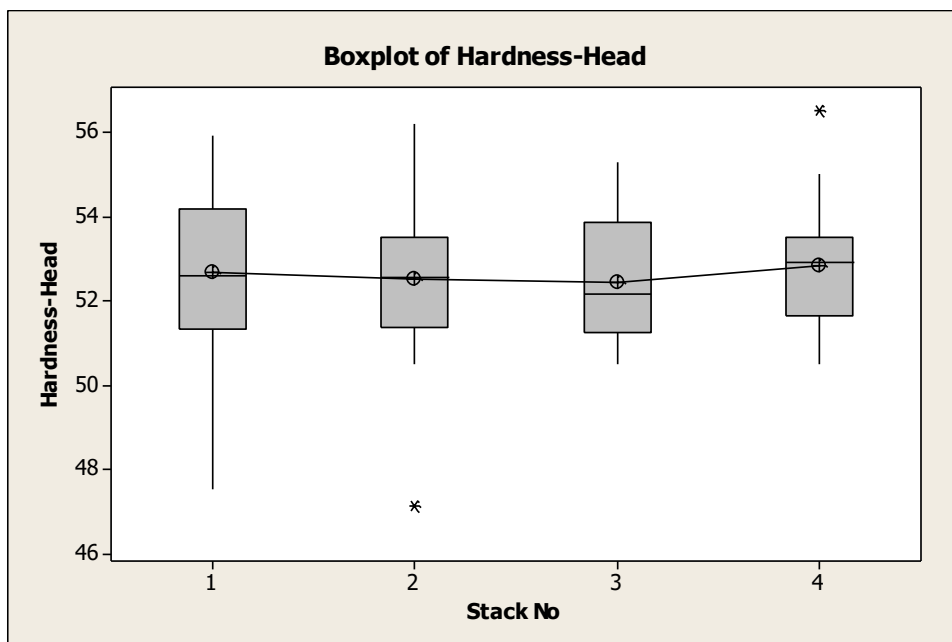
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	7.006	2.335	2.40	0.071
Error	116	112.816	0.973		
Total	119	119.822			

S = 0.9862 R-Sq = 5.85% R-Sq(adj) = 3.41%

ตารางที่ 3.53 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ %Elongation ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.071 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

3.6.10 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Hardness HRB ตำแหน่งหัวม้วน



รูปที่ 3.48 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งหัวม้วน

One-way ANOVA: Hardness-Head versus Stack No

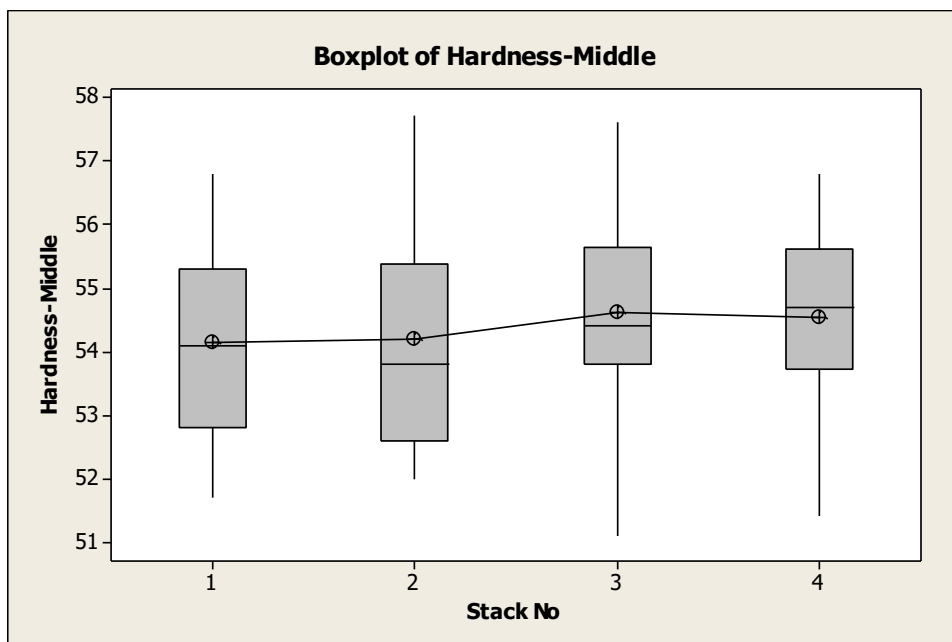
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	2.73	0.91	0.31	0.819
Error	116	343.05	2.96		
Total	119	345.78			

S = 1.720 R-Sq = 0.79% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.54 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งหัวม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.819 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งหัวม้วน

3.6.11 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Hardness HRB ตำแหน่งกลางม้วน



รูปที่ 3.49 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งกลางม้วน

One-way ANOVA: Hardness-Middle versus Stack No

Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	5.19	1.73	0.83	0.477
Error	116	240.33	2.07		
Total	119	245.52			

S = 1.439 R-Sq = 2.11% R-Sq(adj) = 0.00%

ตารางที่ 3.55 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งกลางม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.477 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งกลางม้วน

3.6.12 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับค่า Hardness HRB ตำแหน่งท้ายม้วน



รูปที่ 3.50 Boxplot ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งท้ายม้วน

One-way ANOVA: Hardness-Tail versus Stack No					
Source	DF	SS	MS	F	P
Stack No	3	22.87	7.62	1.60	0.194
Error	116	553.21	4.77		
Total	119	576.08			

S = 2.184 R-Sq = 3.97% R-Sq(adj) = 1.49%

ตารางที่ 3.56 One-way ANOVA ระหว่าง Stack no. กับ Hardness HRB ตำแหน่งท้ายม้วน

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.194 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่าตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Hardness ที่ตำแหน่งท้ายม้วน

สรุปผลการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของปัจจัย ตำแหน่งชั้นวางม้วนเหล็กในเตา (Stack No.) กับสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง สามารถสรุปผลกระทบของปัจจัย ได้ตามตารางที่ 3.57

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ค่า P-value	สรุปผลการวิเคราะห์
Yield strength	หัวม้วน	0.528	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
	กลางม้วน	0.433	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
	ท้ายม้วน	0.290	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Yield strength
Tensile strength	หัวม้วน	0.058	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
	กลางม้วน	0.646	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
	ท้ายม้วน	0.080	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Tensile strength
%Elongation	หัวม้วน	0.083	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
	กลางม้วน	0.114	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
	ท้ายม้วน	0.071	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า %Elongation
Hardness HRB	หัวม้วน	0.819	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness
	กลางม้วน	0.477	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness
	ท้ายม้วน	0.194	ตำแหน่งชั้น (Stack No.) ไม่มีผลต่อค่า Hardness

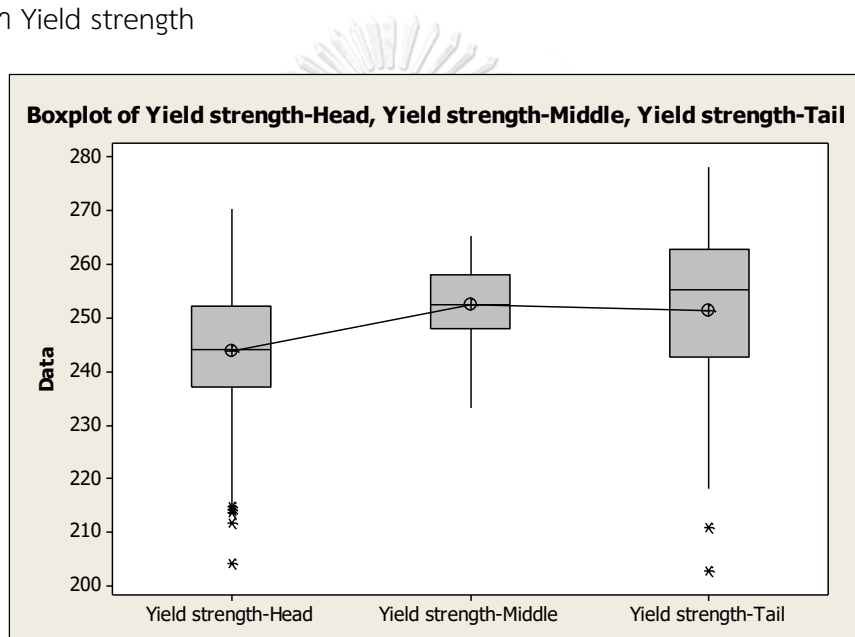
หมายเหตุ : P value < 0.05 = Significant

ตารางที่ 3.57 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบหมายเลขเตา (Stack No.) ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

3.7 ปัจจัยเรื่องตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail position of coil)

ในแต่ละม้วนจะมีค่าสมบัติเชิงกลที่ได้ทดสอบไว้ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ หัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และผลกระทบของตำแหน่งม้วน ต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ Yield strength, Tensile strength, %Elongation และ Hardness ได้ดังนี้

3.7.1 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) เทียบกับค่า Yield strength



รูปที่ 3.51 Boxplot ค่า Yield strength ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil)

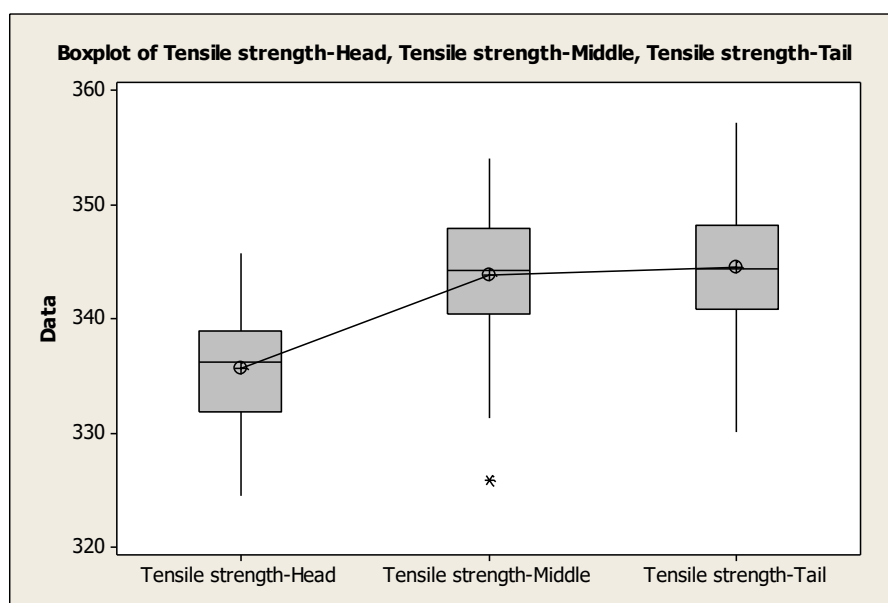
One-way ANOVA: Yield strength-Head, Yield strength-Middle, Yield strength-Tail					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	5430	2715	18.43	0.000
Error	357	52590	147		
Total	359	58020			

S = 12.14 R-Sq = 9.36% R-Sq(adj) = 8.85%

ตารางที่ 3.58 One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Yield strength

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงว่า ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือพบว่าบริเวณหัวม้วนมีค่า Yield strength ต่ำกว่ากลางม้วนและท้ายม้วน

3.7.2 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) เทียบกับค่า Tensile strength



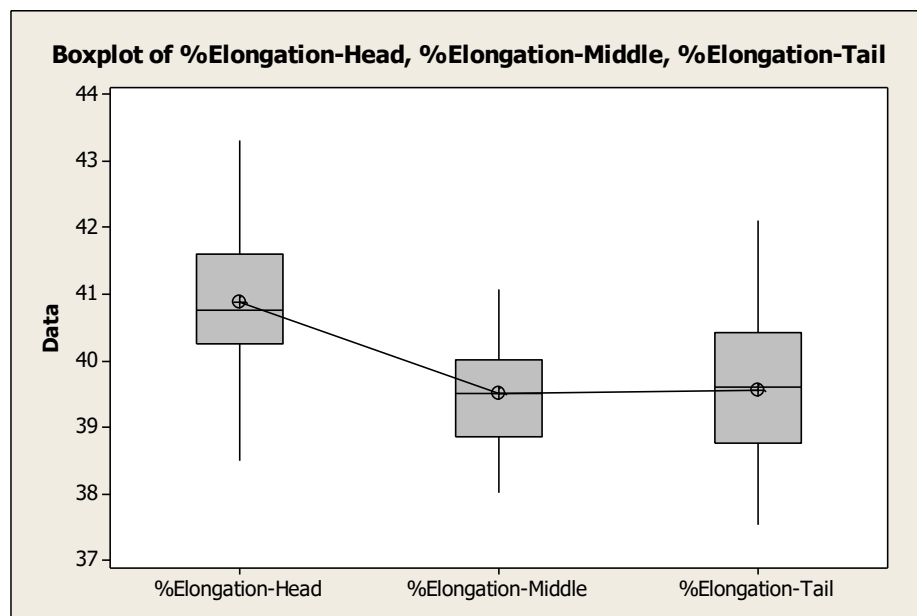
รูปที่ 3.52 Boxplot ค่า Tensile strength ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil)

One-way ANOVA: Tensile strength, Tensile strength, Tensile strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	5985.3	2992.7	103.35	0.000
Error	357	10337.3	29.0		
Total	359	16322.6			
S = 5.381 R-Sq = 36.67% R-Sq(adj) = 36.31%					

ตารางที่ 3.59 One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Tensile strength

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงค่า Tensile strength แต่ละตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือพบว่าบริเวณหัวม้วนมีค่า Tensile strength ต่ำกว่ากลางม้วน และท้ายม้วน

3.7.3 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) เทียบกับค่า %Elongation



รูปที่ 3.53 Boxplot ค่า %Elongation ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil)

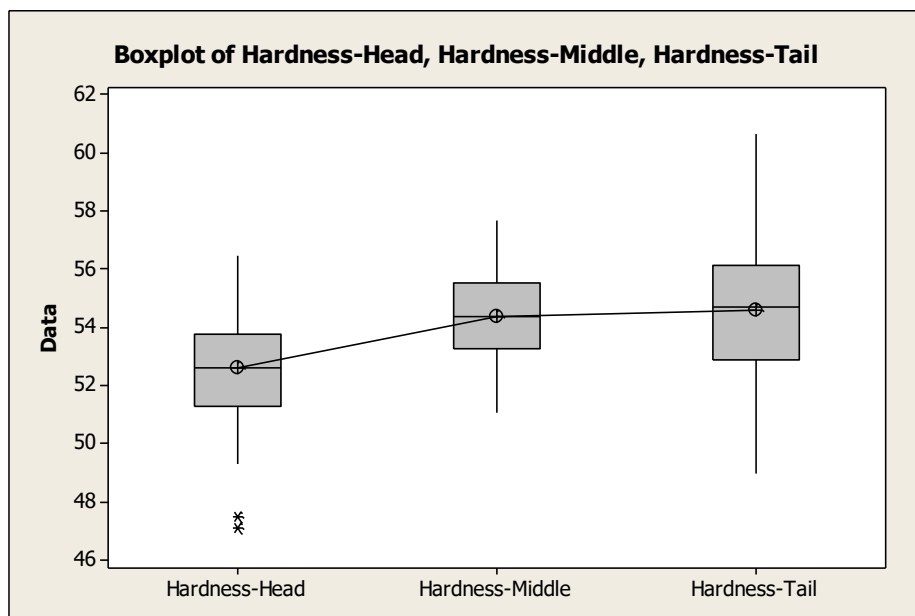
One-way ANOVA: %Elongation-Head, %Elongation-Middle, %Elongation-Tail					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	148.276	74.138	86.36	0.000
Error	357	306.479	0.858		
Total	359	454.755			

S = 0.9265 R-Sq = 32.61% R-Sq(adj) = 32.23%

ตารางที่ 3.60 One-way ANOVA ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า %Elongation

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงค่า %Elongation แต่ละตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือพบว่าบริเวณหัวม้วนมีค่า %Elongation สูงกว่ากลางม้วนและท้ายม้วน

3.7.4 วิเคราะห์ปัจจัยตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) เทียบกับค่า Hardness



รูปที่ 3.54 Boxplot ค่า Hardness ระหว่างตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil)

One-way ANOVA: Hardness-Head, Hardness-Middle, Hardness-Tail					
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	284.44	142.22	43.49	0.000
Error	357	1167.38	3.27		
Total	359	1451.82			

S = 1.808 R-Sq = 19.59% R-Sq(adj) = 19.14%

ตารางที่ 3.61 One-way ANOVA ของตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับค่า Hardness

จากการทดสอบพบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงถึงค่า Hardness แต่ละตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือพบว่าบริเวณหัวม้วนมีค่า Hardness ต่ำกว่ากลางม้วนและท้ายม้วน

สรุปผลการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head Middle Tail of coil) กับสมบัติเชิงกลต่าง สามารถสรุปผลกระทบของปัจจัย ได้ตามตารางที่ 3.62

สมบัติเชิงกล	ตำแหน่ง	ค่า P-value	สรุปผลการวิเคราะห์
Yield strength	หัวม้วน, กลางม้วน, ท้ายม้วน	0.000	ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีผลต่อค่า Yield strength
Tensile strength	หัวม้วน, กลางม้วน, ท้ายม้วน	0.000	ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีผลต่อค่า Tensile strength
%Elongation	หัวม้วน, กลางม้วน, ท้ายม้วน	0.000	ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีผลต่อค่า %Elongation
Hardness HRB	หัวม้วน, กลางม้วน, ท้ายม้วน	0.000	ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน มีผลต่อค่า Hardness

หมายเหตุ : P value < 0.05 = Significant

ตารางที่ 3.62 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน ของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ผ่านมา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกับสมบัติเชิงกลทั้ง Yield strength, Tensile strength, % Elongation และ Hardness ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ตำแหน่งหัวม้วน กลางม้วน และท้ายม้วน (Head middle Tail of coil) ส่วนหมายเลขเตา (Base No.) และตำแหน่งชั้นในเตาอบ (Stack no.) ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าสมบัติเชิงกลทุกตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ทางผู้วิจัยจึงได้ออบแบบการทดลองโดยพิจารณาปัจจัย คืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) นำมาทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น

บทที่ 4

การออกแบบการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ที่จะส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงเทคนิคเพื่อนำมาปรับปรุงค่าสมบัติเชิงกล จึงได้ออกแบบและควบคุมการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ชิ้นงานตัวอย่าง (Sample)

เหล็กแผ่นรีดเย็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ชนิด Product A โดยมีความหนาหลังผ่านการรีดเท่ากับ 1.0 mm และมีส่วนค่าส่วนผสมทางเคมี ตามตารางที่ 4.1 โดยเหล็กแผ่นนี้ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่โรงงานกรณีศึกษา โดยมีสัดส่วนการรีดลดขนาดอยู่ที่ 65% จากนั้นทำการตัดชิ้นงานที่ตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ ของความกว้างของแผ่นเหล็ก ขนาด $200^W \times 300^L$ mm.

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.04	0.01	0.24	0.014	0.007	0.044	Balance

ตารางที่ 4.1 ค่าส่วนผสมทางเคมี ของชิ้นงานตัวอย่าง

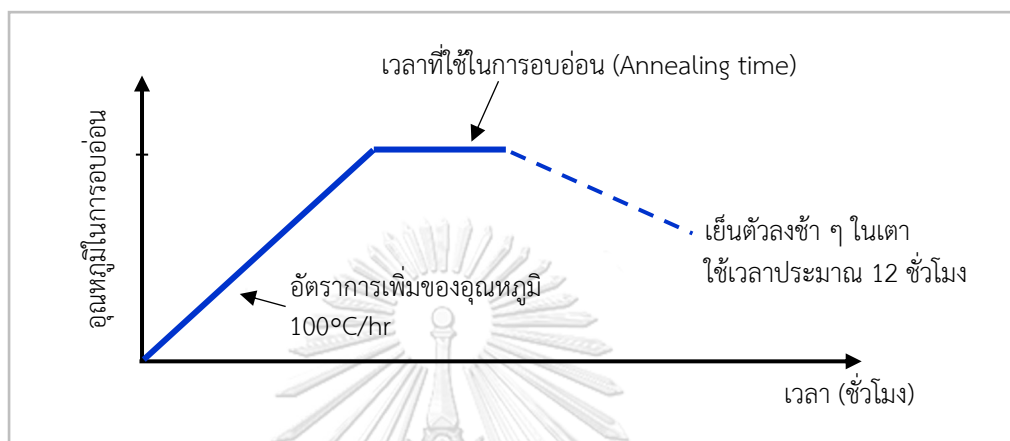
4.2 เงื่อนไขกระบวนการอบอ่อน (Annealing condition)

โดยปกติในกระบวนการผลิตนั้นเหล็กแผ่นรีดเย็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ชนิด Product A จะมีอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temp) อยู่ที่ 610°C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) อยู่ที่ประมาณ 1 Hr เพื่อที่จะสามารถศึกษาถึงพฤติกรรมของปัจจัยที่สนใจจึงได้ออกแบบให้ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temp) เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ที่มีค่าแตกต่างกันเพื่อนำมาศึกษา ดังตารางที่ 4.2

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน Annealing temperature ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน Annealing time (hr)	จำนวนการทดลอง ทั้งหมด
570, 610, 650, 700	0.5, 1, 2	12

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อน

การทดลองจะทำการอบอ่อนเหล็กแผ่นตัวอย่าง ในเตาอบของห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้มีการกำหนดให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ Heating rate = $100^{\circ}\text{C}/\text{Hr}$ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการให้อุณหภูมิในกระบวนการอบอ่อนในกระบวนการผลิตจริงของโรงงานกรณีศึกษา โดยการทดลองกำหนดการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเทียบกับเวลา ในลักษณะ Temperature profile ได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ออกแบบการอบอ่อนเทียบกับเวลาในกระบวนการทดลอง

4.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Equipment)

4.3.1. เตาอบในห้องปฏิบัติการ ชื่อรุ่น Nabertherm C30 เป็นเตาอบชนิดไฟฟ้าแบบขดลวด ขนาดภายนอกประมาณภายในเตา $350 \times 350 \times 400$ mm. บรรยากาศในเตาเป็นอากาศ สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ที่ 1100°C ดังรูปที่ 4.2 มหาวิทยาลัย



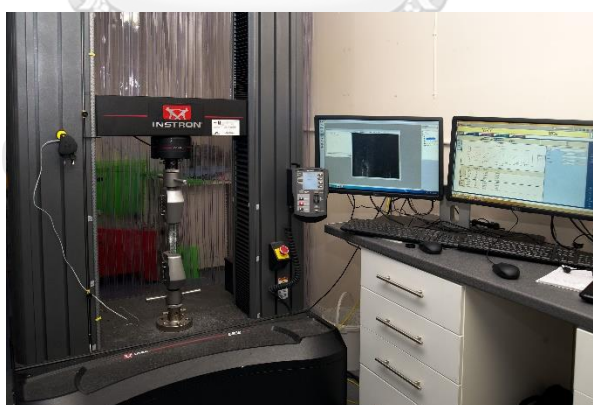
รูปที่ 4.2 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง Nabertherm C30

ชิ้นงานทดสอบจำนวน 2 ชิ้นงาน วางซ้อนกันอยู่ในเตาโดยรองฐานวัสดุกันไฟ เพื่อถ่ายเทความร้อนได้อย่างทั่วถึง รูปแบบการจัดวางชิ้นงานทดสอบ ตามรูป ที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เตาอบที่ใช้ในการทดลอง Nabertherm C30

4.3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test) ยี่ห้อ Instron รุ่น model 5982. ความสามารถในการดึงทดสอบคือ 100kN โดยทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นทำตามมาตรฐาน JIS Z2241:2011 โดยการทดสอบนั้นจะหาค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ Yield point, Tensile strength และ %Elongation เครื่องทดสอบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบ Tensile test

เนื่องจากห้องปฏิบัติการทดสอบ ได้มาตรฐาน ISO/IEC 17025 สำหรับการทดสอบ Tensile test แล้ว จึงมั่นใจได้ว่าค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือของข้อมูล ซึ่งโดยสามารถตรวจสอบได้จาก การทำ Interlab เพื่อสอบเปรียบเทียบค่ากับห้องปฏิบัติการอื่น ๆ โดยใช้ชิ้นงานมาตรฐานจากแหล่งเดียวกัน และทดสอบกับห้องปฏิบัติการของหน่วยงานรัฐบาล คือสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

(ISIT) รวมเป็น 4 แห่ง โดยผลจากการ Interlab ประจำปี 2017 โดยสรุปเป็นค่า Z-Score แสดงดังตารางที่ 4.3

สมบัติเชิงกล	ลำดับ	Min	Max	Average	X	SD	Z-Score
Yield point	1 โรงงานกรณีศึกษา	141.3	142.4	141.7	141.6	2.55	0.02
	2 ห้องปฏิบัติการ A	138.0	139.0	138.6			-1.17
	3 ห้องปฏิบัติการ B	143.0	147.0	145.0			1.31
	4 สถาบันเหล็ก ISIT	140.3	141.9	141.2			-0.16
Tensile strength	1 โรงงานกรณีศึกษา	297.7	299.7	298.9	298.5	2.77	0.16
	2 ห้องปฏิบัติการ A	302.0	303.0	302.3			1.40
	3 ห้องปฏิบัติการ B	294.0	297.0	295.6			-1.01
	4 สถาบันเหล็ก ISIT	296.5	297.7	296.9			-0.55
%Elongation	1 โรงงานกรณีศึกษา	49.5	49.9	49.8	50.19	0.73	-0.52
	2 ห้องปฏิบัติการ A	51.0	51.0	51.0			1.11
	3 ห้องปฏิบัติการ B	49.0	50.0	49.6			-0.71
	4 สถาบันเหล็ก ISIT	49.6	51.4	50.2			0.11

ตารางที่ 4.3 การทดสอบ Tensile test เปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการอื่น ๆ (Interlab) ปี 2017

โดยการหา Z-Score เพื่อเปรียบเทียบ โดยคำนวณจาก $Z\text{-Score} = (\text{Average}-X)/SD$ ซึ่งผลของ Z-Score อยู่ที่ค่าที่ต่ำและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.3.3 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness test) Rockwell scale B (HRB) โดยทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z2245:2016

4.3.4 กล้องทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยชิ้นงานจะถูกตัด และถ่ายภาพตัดขวางในด้านความหนา ทั้งในทิศทางการรีด (Rolling direction) และขวางทิศทางการรีด (Transverse direction) โดยใช้กรด 2% Nital ในการกัดกรดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค และถ่ายภาพโดยใช้กล้อง Optical microscope ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า

บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Result of mechanical properties)

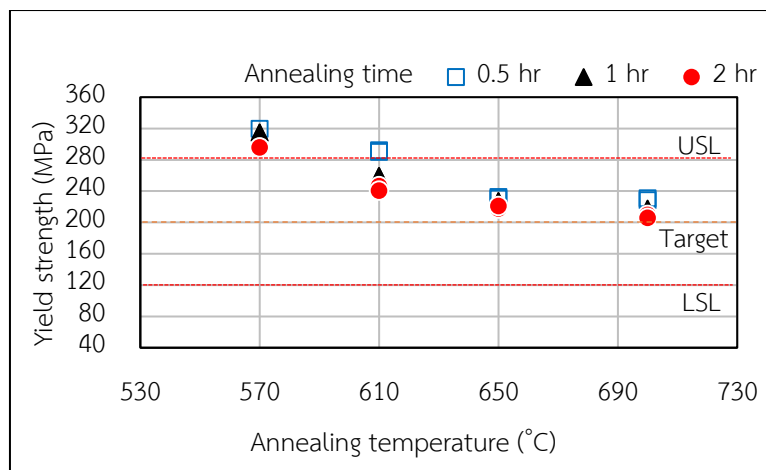
หลังจากทำการทดลองอบอ่อนชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไข จากนั้นได้นำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึง และความแข็ง ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.1

Sample No.	Annealing Temp (°C)	Annealing Time (Hr)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	Hardness HRB	Average by each condition			
							Ave YS	Ave TS	Ave EL	Ave HRB
1	Before annealing	Before annealing	680.93	725.82	0.76	96.3	685.6	728.0	0.8	96.8
2	Before annealing	Before annealing	690.20	730.10	0.80	97.2				
3	570	0.5	316.45	355.08	37.97	66.5	318.0	355.1	37.6	66.4
4	570	0.5	319.50	355.02	37.20	66.2				
5	570	1	315.09	341.38	38.90	60.2	314.6	340.8	38.7	59.6
6	570	1	314.10	340.20	38.52	59.0				
7	570	2	294.86	339.75	40.33	57.9	295.3	339.3	40.2	58.6
8	570	2	295.80	338.75	40.10	59.2				
9	610	0.5	292.00	333.80	39.25	60.4	291.0	334.8	39.0	60.0
10	610	0.5	290.00	335.70	38.70	59.5				
11	610	1	258.81	323.74	38.68	55.0	259.1	324.0	39.3	54.8
12	610	1	259.30	324.26	39.82	54.5				
13	610	2	246.13	321.41	40.44	49.9	243.3	322.4	40.7	49.3
14	610	2	240.46	323.30	40.96	48.7				
15	650	0.5	232.56	307.60	40.83	50.1	231.5	309.0	40.8	50.3
16	650	0.5	230.45	310.30	40.70	50.5				
17	650	1	226.88	306.34	41.11	48.1	226.9	307.0	41.2	47.1
18	650	1	226.93	307.75	41.32	46.0				
19	650	2	217.51	305.49	42.89	47.0	219.3	304.4	42.4	46.1
20	650	2	221.13	303.40	42.00	45.2				
21	700	0.5	230.68	292.01	44.14	41.7	229.6	291.4	43.9	41.5
22	700	0.5	228.50	290.70	43.70	41.2				
23	700	1	217.64	288.59	44.23	41.9	215.9	290.2	44.6	41.5
24	700	1	214.17	291.82	44.96	41.0				
25	700	2	209.46	283.32	44.04	39.6	207.6	285.7	44.3	39.7
26	700	2	205.64	288.00	44.57	39.8				

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง

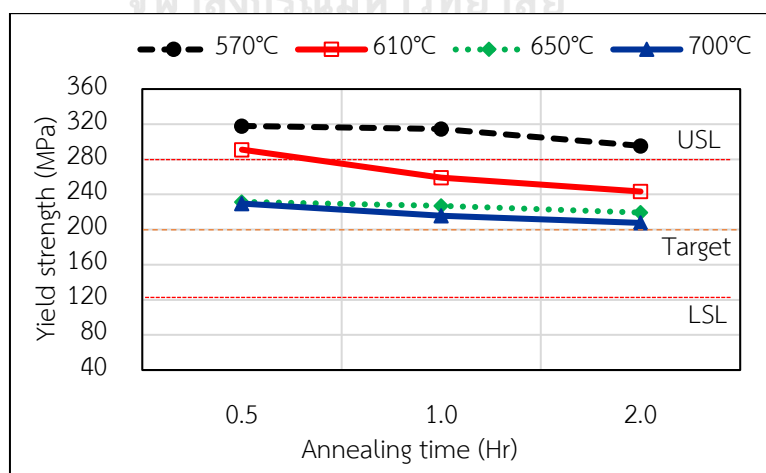
5.1.1 ผลการทดลองค่า Yield strength

ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของค่า Yield strength เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่า Yield strength ลดลง ตามรูป 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield point กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)

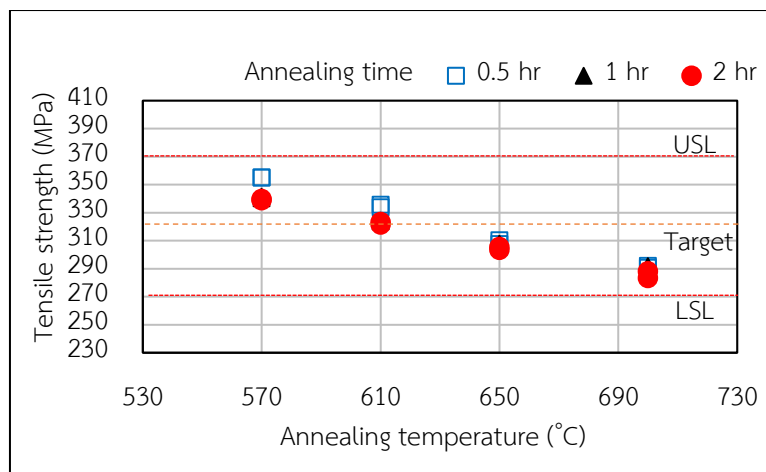
ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของค่า Yield point เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้การอบอ่อน (Annealing time) พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนมากขึ้นส่งผลให้ค่า Yield strength ลดลง ตามรูป 5.2



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield point กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

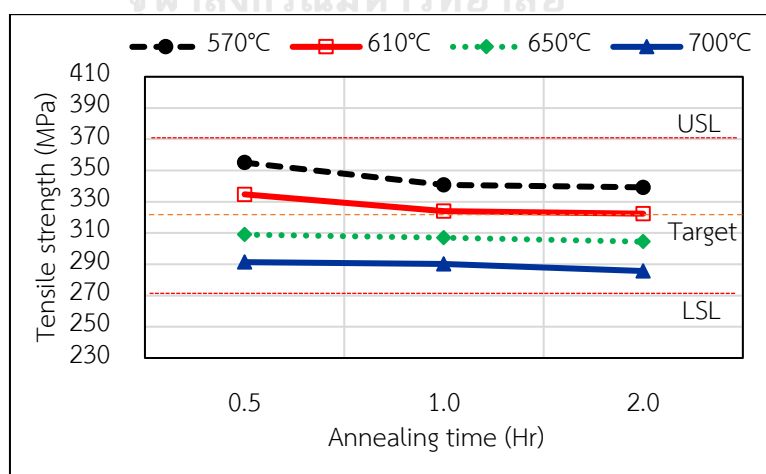
5.1.2 ค่า Tensile strength

ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของคุณค่า Tensile strength เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง ตามรูป 5.3



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)

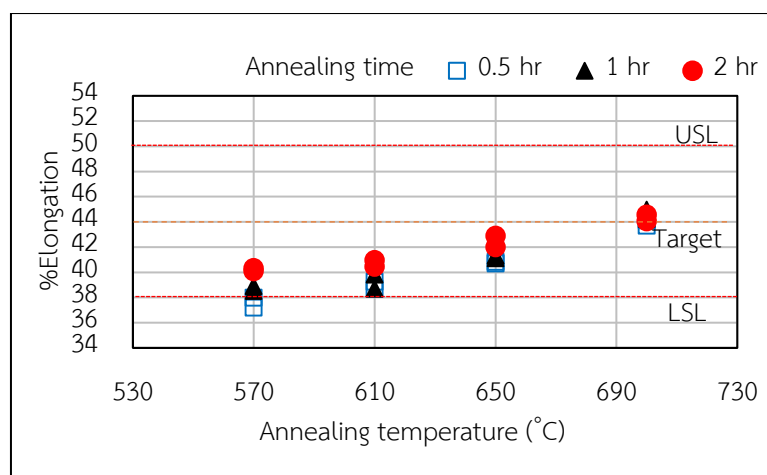
ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของคุณค่า Tensile strength เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้การอบอ่อน (Annealing time) พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนมากขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง ตามรูป 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

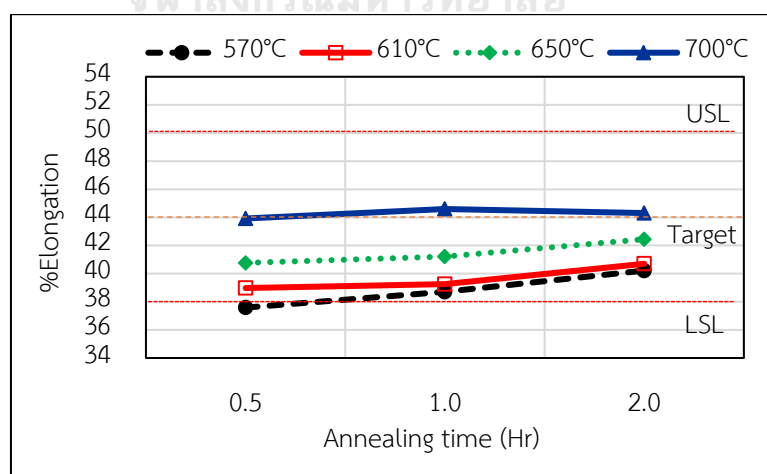
5.1.3 ค่า %Elongation

ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของค่า %Elongation เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่า %Elongation เพิ่มขึ้น ตามรูป 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)

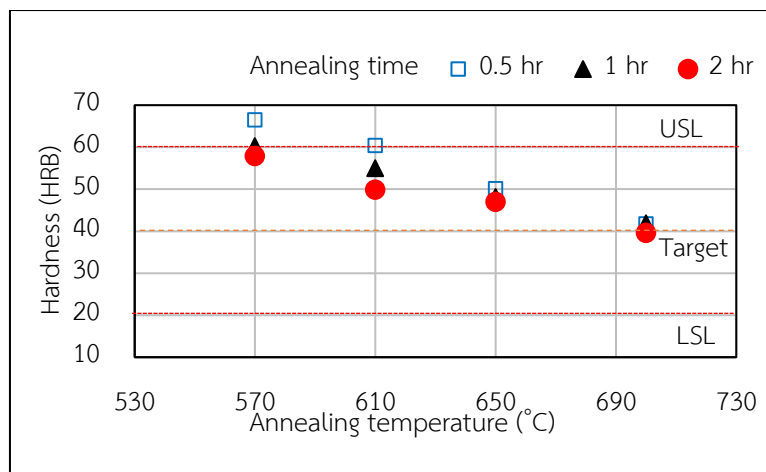
ผลการทดลองแรงดึงในส่วนของค่า %Elongation เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้การอบอ่อน (Annealing time) พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนมากขึ้นส่งผลให้ค่า %Elongation เพิ่มขึ้น ตามรูป 5.6



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

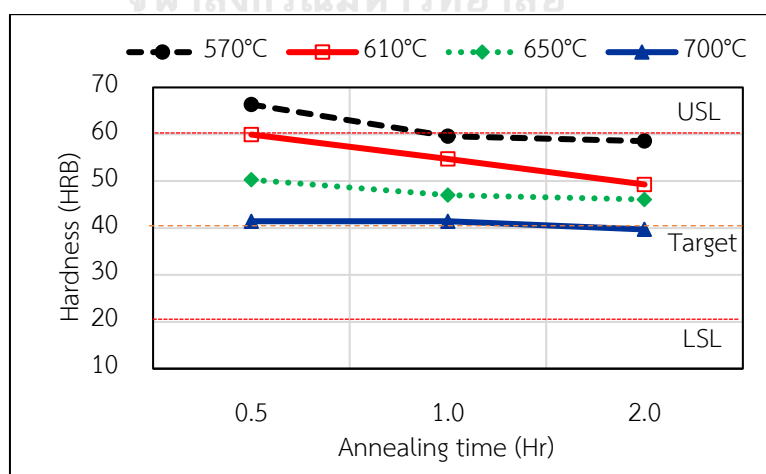
5.1.4 ค่า Hardness (HRB)

ทำการทดสอบค่าความแข็ง Hardness บนชิ้นงานทดสอบและนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง Hardness ลดลงตามรูป 5.7



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness กับอุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp)

ค่าทดสอบ Hardness ที่ได้เมื่อนำผลมาแสดงในกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้การอบอ่อน (Annealing time) พบว่าพบว่ามีอุณหภูมิการอบอ่อนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง Hardness ลดลง ตามรูป 5.8

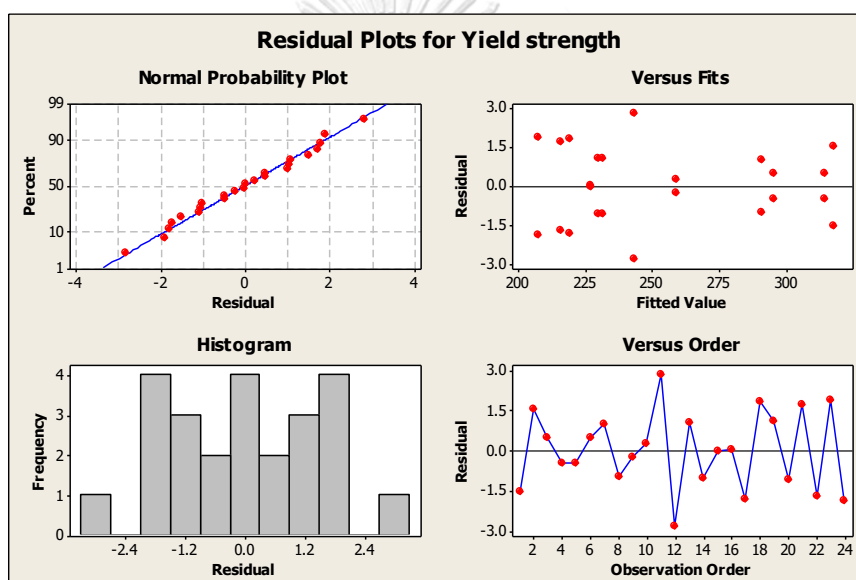


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time)

5.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

5.2.1 วิเคราะห์ Two-Way ANOVA ของค่า Yield strength

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และเมื่อทำการทดสอบ P-Value test ค่า Yield strength เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้ผลลัพธ์คือ ค่า P-Value ของอุณหภูมิการอบอ่อน, เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปร มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงถึงตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่า Yield strength ดังรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.9 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Yield strength ที่ได้จากการทดลอง

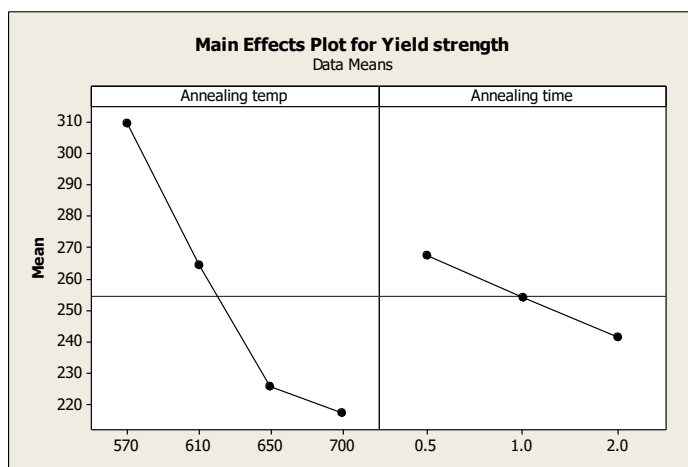
Two-way ANOVA: Yield strength versus Annealing temp, Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing temp	3	31649.5	10549.8	2623.79	0.000
Annealing time	2	2734.6	1367.3	340.05	0.000
Interaction	6	872.1	145.4	36.15	0.000
Error	12	48.2	4.0		
Total	23	35304.4			

S = 2.005 R-Sq = 99.86% R-Sq(adj) = 99.74%

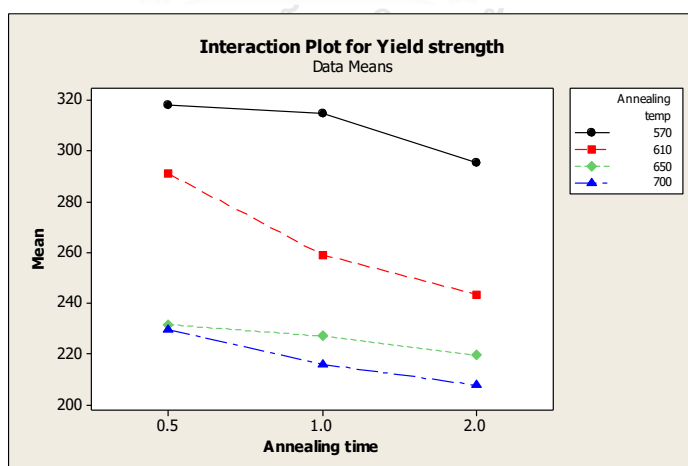
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Yield strength เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า Yield strength แสดงถึง Main effect และ Interaction ตามรูปที่ 5.10 และ 5.11

พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temp) เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ลดลง และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ลดลง เช่นเดียวกัน



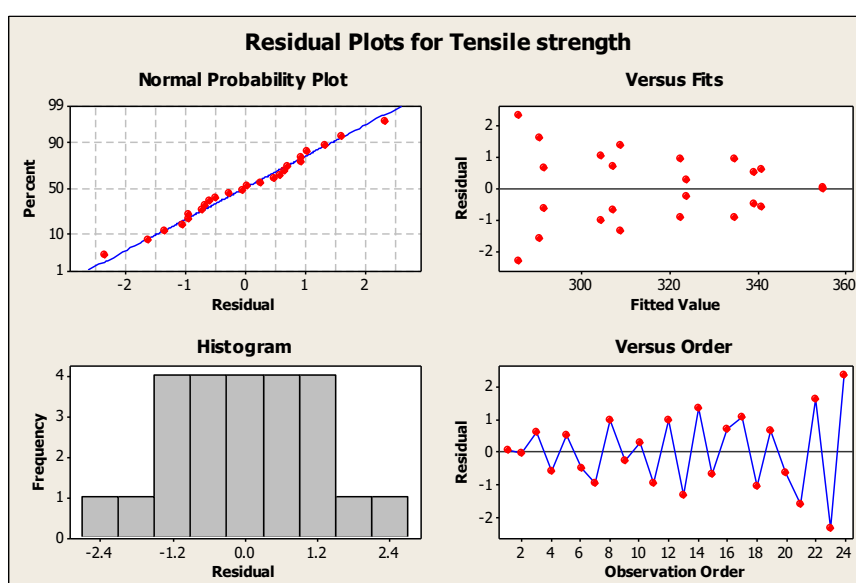
รูปที่ 5.10 กราฟ Main effect plot ค่า Yield strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง



รูปที่ 5.11 กราฟ Interaction plot ค่า Yield strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง

5.2.1 วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า Tensile strength

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และเมื่อทำการทดสอบ P-Value test ค่า Tensile strength เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้ผลลัพธ์คือ ค่า P-Value ของอุณหภูมิการอบอ่อน, เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปร มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงถึงตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่า Tensile strength ดังรูปที่ 5.12 และตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.12 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Tensile strength ที่ได้จากการทดลอง

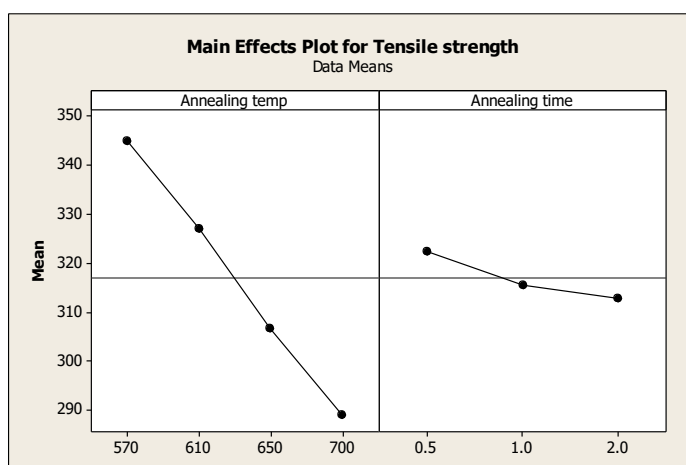
Two-way ANOVA: Tensile strength versus Annealing temp, Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing temp	3	10620.3	3540.10	1476.42	0.000
Annealing time	2	394.8	197.38	82.32	0.000
Interaction	6	146.8	24.47	10.21	0.000
Error	12	28.8	2.40		
Total	23	11190.6			

S = 1.548 R-Sq = 99.74% R-Sq(adj) = 99.51%

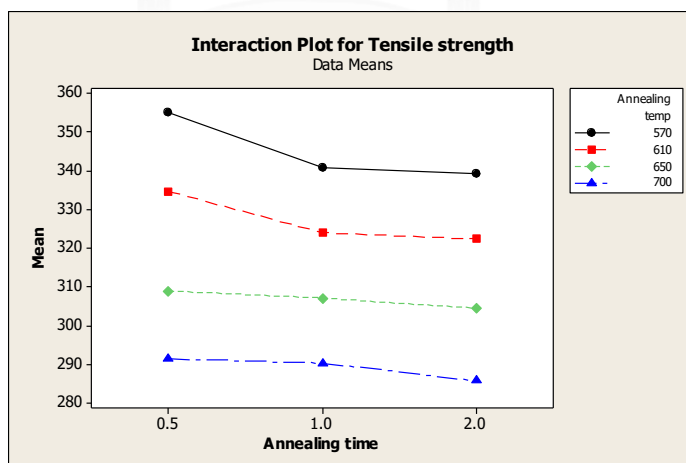
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Tensile strength เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า Tensile strength แสดงถึง Main effect และ Interaction ตามรูปที่ 5.13 และ 5.14

พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temp) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength ลดลง และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength ลดลง เช่นเดียวกัน



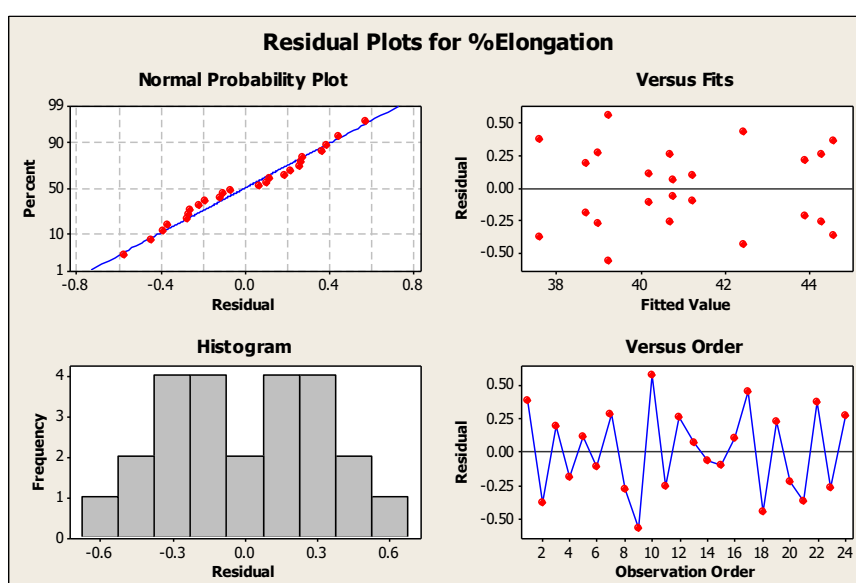
รูปที่ 5.13 กราฟ Main effect plot ค่า Tensile strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง



รูปที่ 5.14 กราฟ Interaction plot ค่า Tensile strength เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง

5.2.3 วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า %Elongation

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และเมื่อทำการทดสอบ P-Value test ค่า %Elongation เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้ผลลัพธ์คือ ค่า P-Value ของอุณหภูมิการอบอ่อน, เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปร มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงถึงตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่า %Elongation ดังรูปที่ 5.15 และตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.15 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ %Elongation ที่ได้จากการทดลอง

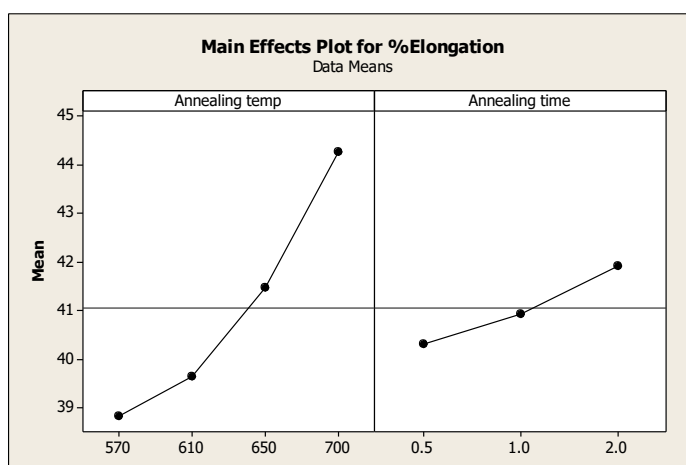
Two-way ANOVA: %Elongation versus Annealing temp, Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing temp	3	104.715	34.9051	185.21	0.000
Annealing time	2	10.461	5.2303	27.75	0.000
Interaction	6	3.424	0.5707	3.03	0.048
Error	12	2.262	0.1885		
Total	23	120.862			

S = 0.4341 R-Sq = 98.13% R-Sq(adj) = 96.41%

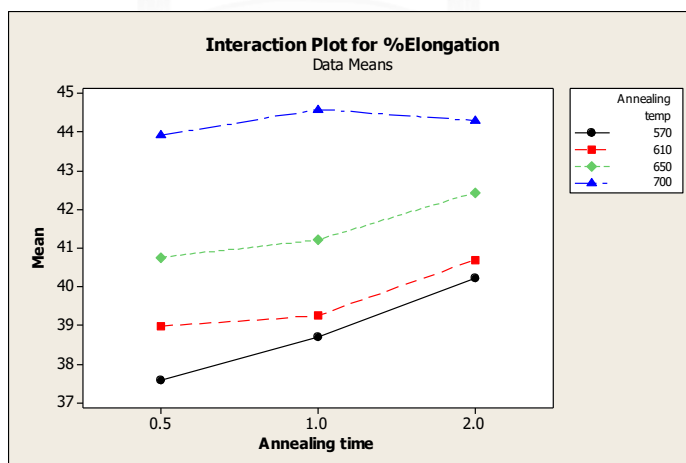
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า %Elongation เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า %Elongation แสดงถึง Main effect และ Interaction ตามรูปที่ 5.16 และ 5.17

พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temp) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า %Elongation เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



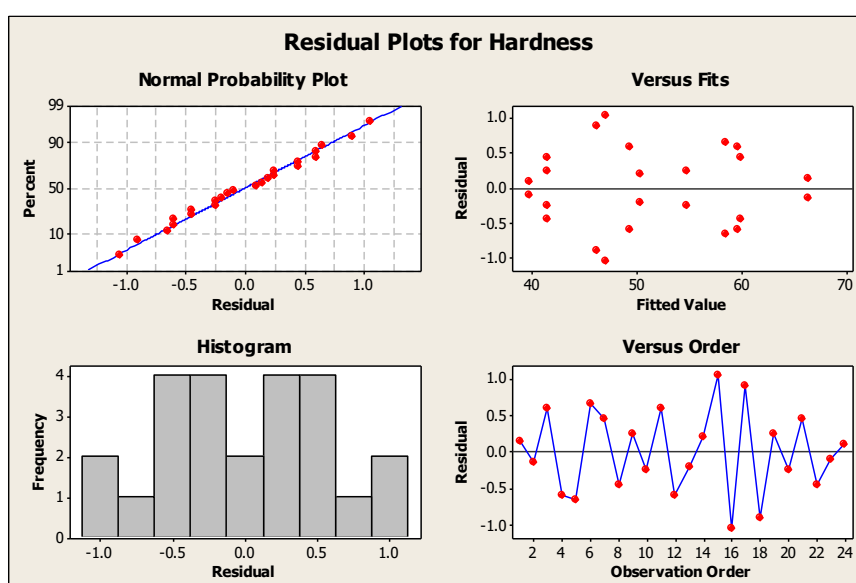
รูปที่ 5.16 กราฟ Main effect plot ค่า %Elongation เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง



รูปที่ 5.17 กราฟ Interaction plot ค่า %Elongation เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง

5.2.4 วิเคราะห์ Two-way ANOVA ของค่า Hardness

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และเมื่อทำการทดสอบ P-Value test ค่า Hardness เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้ผลลัพธ์คือ ค่า P-Value ของอุณหภูมิการอบอ่อน, เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปร มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงถึงตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่า Hardness ดังรูปที่ 5.18 และตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.18 กราฟ Normality plot และ Residual plot ของ Hardness ที่ได้จากการทดลอง

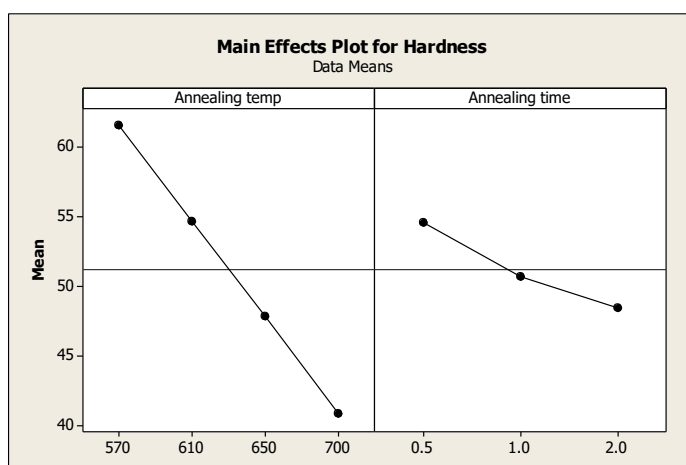
Two-way ANOVA: Hardness versus Annealing temp, Annealing time					
Source	DF	SS	MS	F	P
Annealing temp	3	1417.99	472.664	775.39	0.000
Annealing time	2	151.84	75.920	124.54	0.000
Interaction	6	56.76	9.460	15.52	0.000
Error	12	7.32	0.610		
Total	23	1633.91			

S = 0.7808 R-Sq = 99.55% R-Sq(adj) = 99.14%

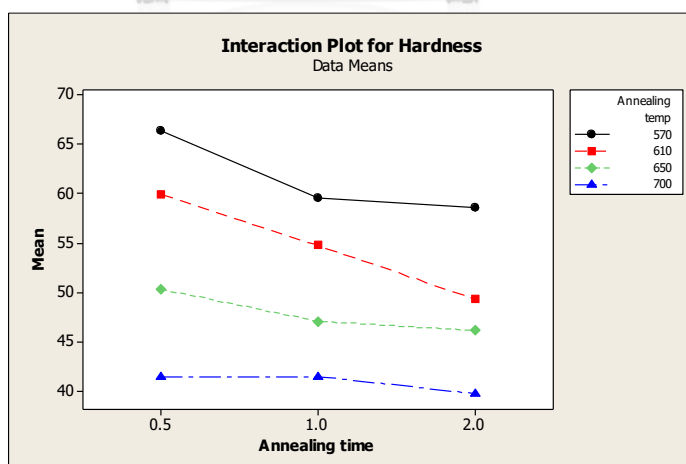
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบ Two-way ANOVA (P-Value test) ค่า Hardness เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า Hardness แสดงถึง Main effect และ Interaction ตามรูปที่ 5.16 และ 5.17

พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temp) เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลกระทบบต่อค่า Hardness มีค่าลดลง และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบบต่อค่า Hardness มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.19 กราฟ Main effect plot ค่า Hardness เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง



รูปที่ 5.20 กราฟ Interaction plot ค่า Hardness เทียบกับ Annealing temp และ Annealing time ของผลการทดลอง

สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของตัวอย่างในการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงดังตารางที่ 5.2

สมบัติเชิงกล	ปัจจัย	P-Value	สรุปผลการทดลอง
Yield point	Annealing temp (T)	0.000	มีผลต่อค่า Yield point อย่างมีนัยสำคัญ
	Annealing time (t)	0.000	มีผลต่อค่า Yield point อย่างมีนัยสำคัญ
	Interaction (T)*(t)	0.000	มีผลต่อค่า Yield point อย่างมีนัยสำคัญ
	R ²	99.74	-
Tensile Strength	Annealing temp (T)	0.000	มีผลต่อค่า Tensile strength อย่างมีนัยสำคัญ
	Annealing time (t)	0.000	มีผลต่อค่า Tensile strength อย่างมีนัยสำคัญ
	Interaction (T)*(t)	0.000	มีผลต่อค่า Tensile strength อย่างมีนัยสำคัญ
	R ²	99.51	-
%Elongation	Annealing temp (T)	0.000	มีผลต่อค่า %Elongation อย่างมีนัยสำคัญ
	Annealing time (t)	0.000	มีผลต่อค่า %Elongation อย่างมีนัยสำคัญ
	Interaction (T)*(t)	0.048	มีผลต่อค่า %Elongation อย่างมีนัยสำคัญ
	R ²	96.41	-
Hardness	Annealing temp (T)	0.000	มีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ
	Annealing time (t)	0.000	มีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ
	Interaction (T)*(t)	0.000	มีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ
	R ²	99.14	-

หมายเหตุ: P-Value < 0.05 มีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบ ANOVA (P-value test) ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อนของการทดลอง

จากผลการทดลองในการอบอ่อนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยที่สนใจได้แก่ อุณหภูมิการอบอ่อน (Annealing temp) และ เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) พบว่าทั้ง 2 ปัจจัย มีอิทธิพลต่อค่าสมบัติเชิงกลทั้ง Yield point, Tensile strength, %Elongation, Hardness ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปร

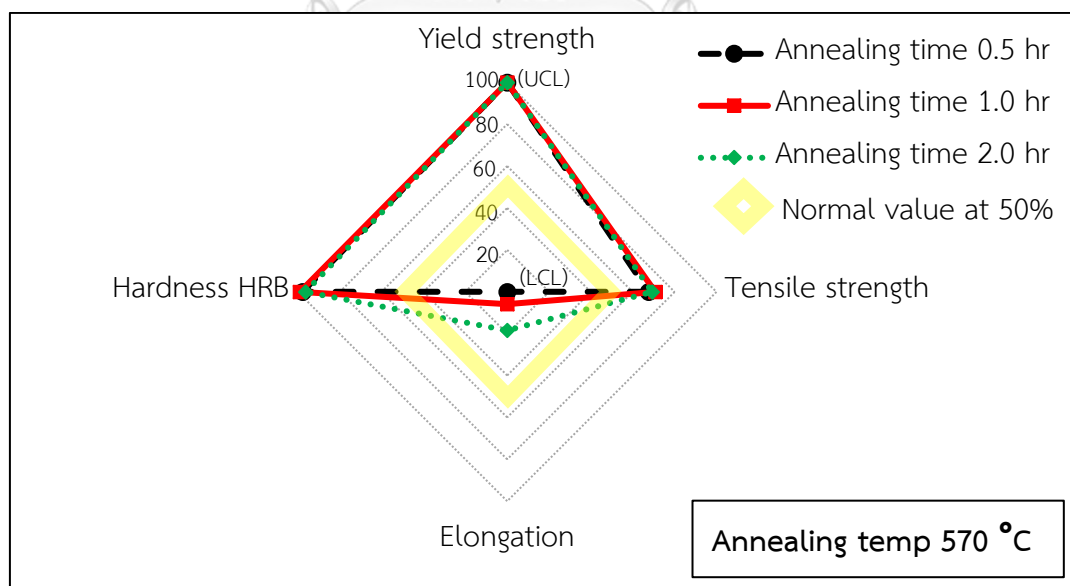
สมบัติเชิงกลในแต่ละตัวแปรนั้นมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการที่จะหาเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ให้เหมาะสมกับเป้าหมายของสมบัติเชิงกล จึงได้นำข้อมูลสมบัติเชิงกลทั้ง 4 ตัวคือ Yield point, Tensile strength, %Elongation และ Hardness มาแสดงในแผนภาพเดียวกัน เพื่อที่สามารถวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ และสังเกตค่าที่เหมาะสม ในการควบคุมสมบัติเชิงกลให้ได้ค่าตามเป้าหมายที่ต้องการ

โดยทำแสดงในแผนภาพโดยแสดงเงื่อนไขดังนี้

- กำหนดค่าควบคุมค่าต่ำ Lower limit control (LCL) ให้มีค่าเท่ากับ 0%
- กำหนดค่าควบคุมค่าสูง Upper limit control (UCL) ให้มีค่าเท่ากับ 100%
- นำค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองมาหาค่า % โดยเทียบกับ LCL และ UCL
- ค่ากึ่งกลางควบคุม (Normal value) ที่ 50%

5.3.1 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 570°C

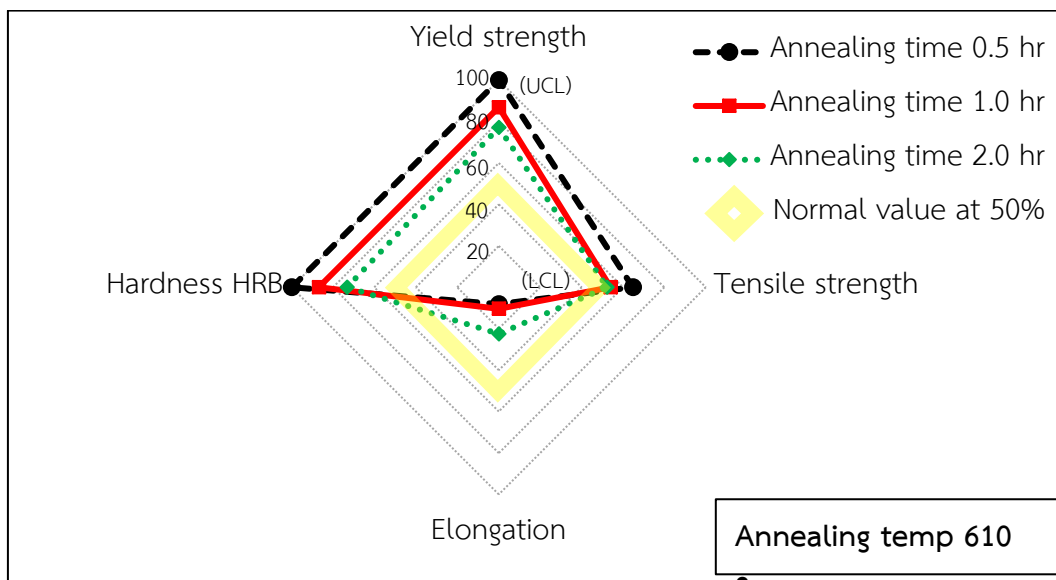
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอบอ่อน 570°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.21 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 570°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

5.3.2 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 610°C

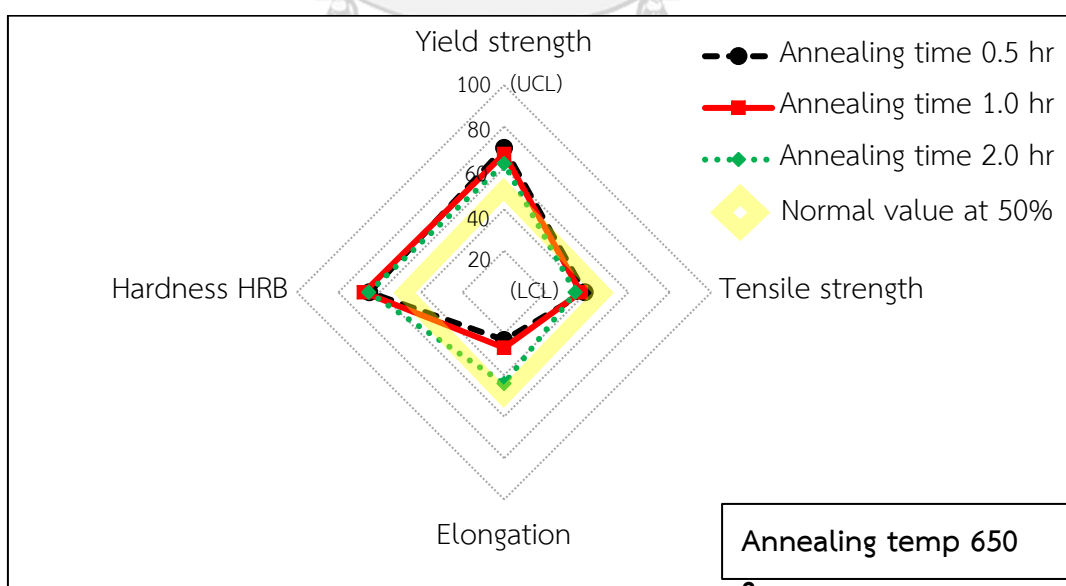
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอบอ่อน 610°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.22 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

5.3.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 650°C

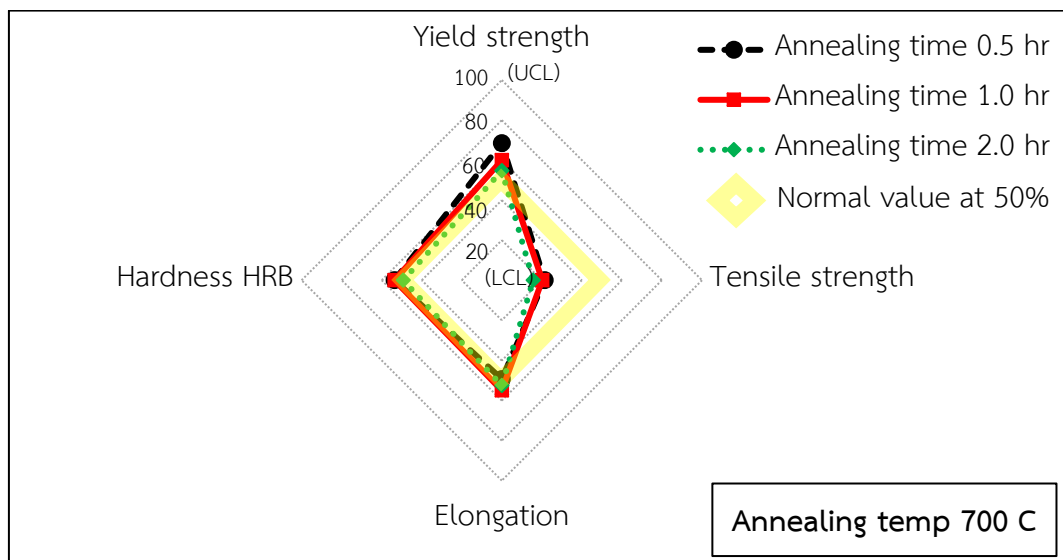
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอบอ่อน 650°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.23 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

5.3.4 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 700°C

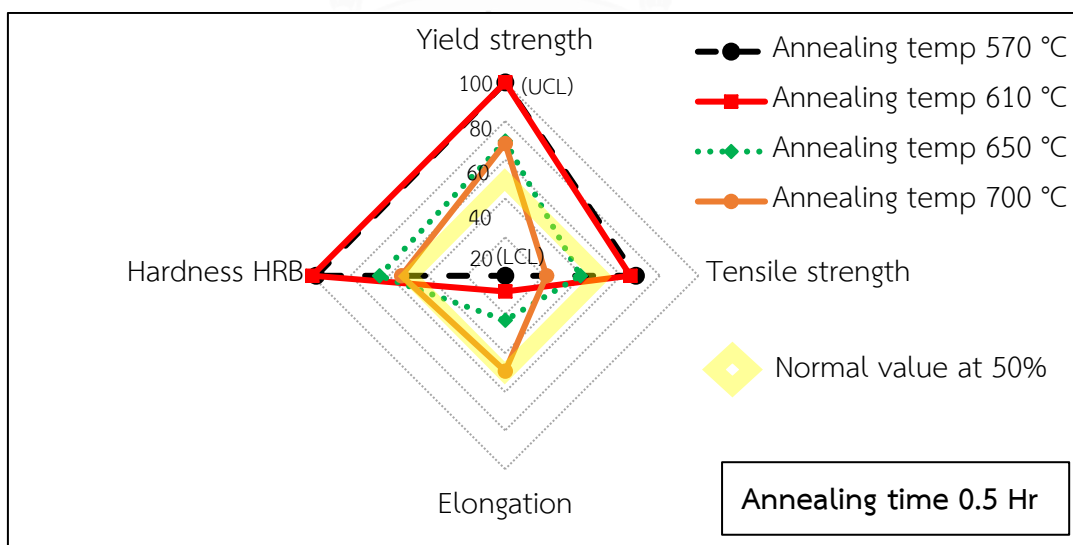
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิอบอ่อน 700°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.24 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

5.3.5 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 0.5 ชั่วโมง

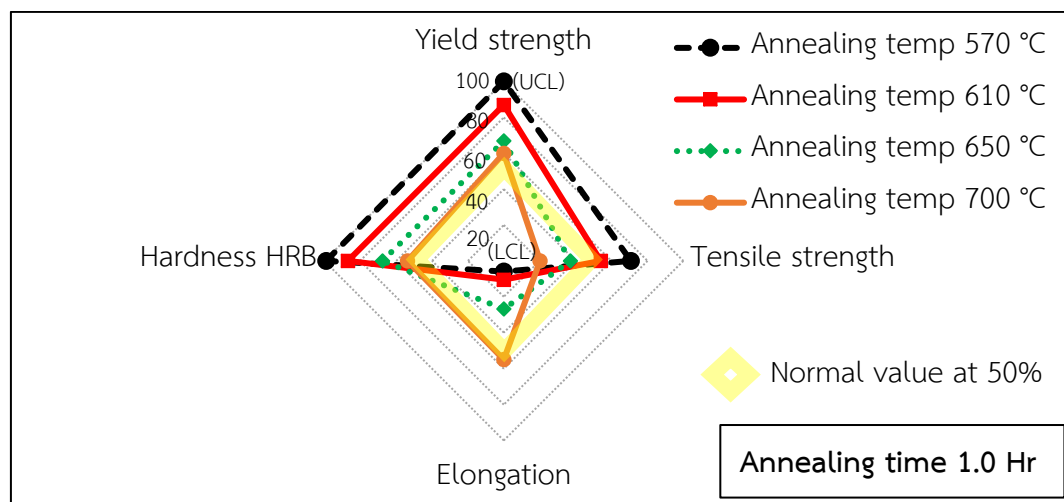
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่เวลาอบอ่อน 0.5 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C



รูปที่ 5.25 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 0.5 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C

5.3.6 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 1 ชั่วโมง

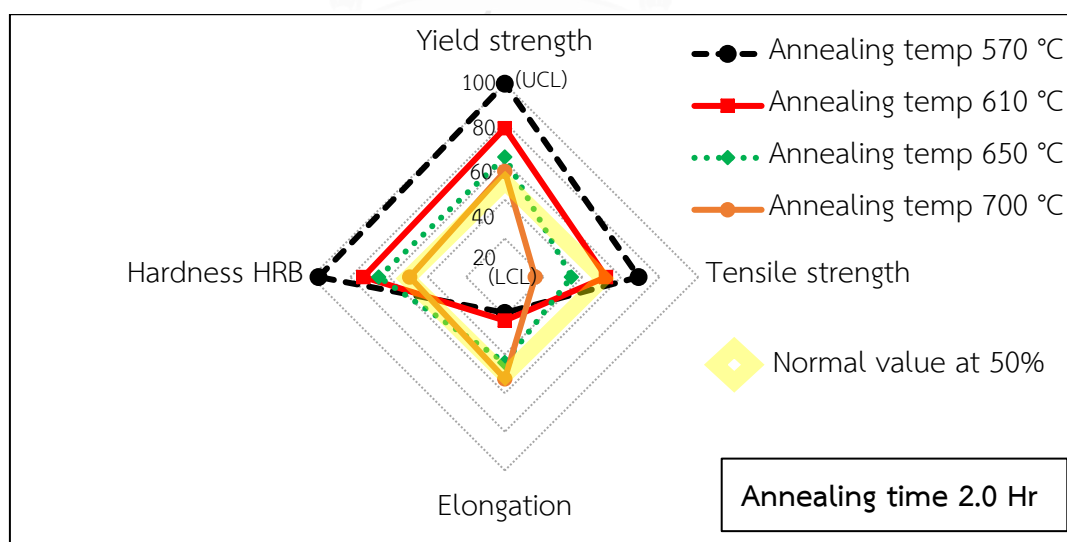
ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่เวลาอบอ่อน 1 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C



รูปที่ 5.26 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 1 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C

5.3.7 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบรวมตัวแปรสำหรับเวลาอบอ่อนที่ 2 ชั่วโมง

ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่เวลาอบอ่อน 2.0 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C



รูปที่ 5.27 ผลทดสอบค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลา 2 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 570, 610, 650, 700°C

5.3.8 วิเคราะห์ความเชื่อมโยงกันของปัจจัย และค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลอง

เนื่องจากสมบัติเชิงกลในแต่ละตัวนั้นมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงกันของปัจจัย และค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงในลักษณะสมการถดถอย (Regression) เพื่อให้ $T = \text{Annealing temperature } (^{\circ}\text{C})$ และ $t = \text{Annealing time (Minute)}$ ได้ดังนี้

5.3.8.1 การหาสมการถดถอยของค่า Yield strength

ทดสอบหาค่าสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full model) เพื่อที่จะดูว่ามีเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 เทอม และจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ซึ่งสมการถดถอยดังแสดงในสมการที่ 5.1 และแสดงวิธีการหาสมการดังตารางที่ 5.7

$$\text{Yield strength (MPa)} = 3141.38 - 8.2494T - 1.3327t + 0.006T^2 + 0.0010t^2 + 0.0026T*t \quad (5.1)$$

General Regression Analysis: Yield streng versus Annealing te, Annealing ti					
Regression Equation					
Yield strength = 3141.38 - 8.24942 Annealing temp - 1.33271 Annealing time + 0.00587012 Annealing temp*Annealing temp + 0.00103014 Annealing temp*Annealing time + 0.0026044 Annealing time*Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	3141.38	326.056	9.63447	0.000	
Annealing temp	-8.25	1.025	-8.04905	0.000	
Annealing time	-1.33	0.609	-2.18675	0.042	
Annealing temp*Annealing temp	0.01	0.001	7.29660	0.000	
Annealing time*Annealing time	0.00	0.002	1.41642	0.174	
Annealing temp*Annealing time	0.00	0.001	1.21144	0.241	
Summary of Model					
S = 7.50567	R-Sq = 97.13%	R-Sq(adj) = 96.33%			
PRESS = 1639.28	R-Sq(pred) = 95.36%				

ตารางที่ 5.7 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Yield strength

จากการพิจารณาสมการถดถอยลดรูป แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน พบว่ามีเทอมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเหลือ 3 เทอม ได้แก่ค่า T , t และ T^2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว $R\text{-sq}(\text{adj}) = 96.36$ และค่าความคลาดเคลื่อน $S = 7.49$ ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้วของสมการถดถอยลดรูปมีค่ามากกว่าสมการการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ และค่าความคลาดเคลื่อน S

มีค่าน้อยกว่าสมการเต็มรูปแบบ ซึ่งสมการถดถอยลดรูปแสดงดังสมการที่ 5.2 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.8

$$\text{Yield strength (MPa)} = 3084.05 - 8.1773T - 0.2793t + 0.0058T^2 \quad (5.2)$$

General Regression Analysis: Yield streng versus Annealing te, Annealing ti				
Regression Equation				
Yield strength = 3084.05 - 8.17731 Annealing temp - 0.279324 Annealing time + 0.00587012 Annealing temp*Annealing temp				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3084.05	335.487	9.19275	0.000
Annealing temp	-8.18	1.060	-7.71304	0.000
Annealing time	-0.28	0.042	-6.58338	0.000
Annealing temp*Annealing temp	0.01	0.001	7.04175	0.000
Summary of Model				
S = 7.49731	R-Sq = 96.57%	R-Sq(adj) = 96.36%		
PRESS = 1644.61	R-Sq(pred) = 95.36%			

ตารางที่ 5.8 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Yield strength

หากพิจารณาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 (Frist order) โดยให้เทอมของปัจจัยนำเข้าที่เหลือเพียง 2 เทอม ได้แก่ค่า T, t เพื่อให้สะดวกในการนำสมการไปใช้งาน นั้นจะพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 86.94 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 14.15 ซึ่งสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 แสดงดังสมการที่ 5.3 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.9

$$\text{Yield strength (MPa)} = 726.317 - 0.7153T - 0.2793t \quad (5.3)$$

General Regression Analysis: Yield streng versus Annealing te, Annealing ti				
Regression Equation				
Yield strength = 726.317 - 0.715303 Annealing temp - 0.279324 Annealing time				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	726.317	38.4504	18.8897	0.000
Annealing temp	-0.715	0.0600	-11.9190	0.000
Annealing time	-0.279	0.0772	-3.6166	0.002
Summary of Model				
S = 14.1573	R-Sq = 88.08%	R-Sq(adj) = 86.94%		
PRESS = 5417.35	R-Sq(pred) = 84.66%			

ตารางที่ 5.9 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Yield strength

5.3.8.2 การหาสมการถดถอยของค่า Tensile strength

ทดสอบหาค่าสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full model) เพื่อที่จะดูว่ามีเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 เทอม และจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ซึ่งสมการถดถอยดังแสดงในสมการที่ 5.4 และแสดงวิธีการหาสมการดังตารางที่ 5.10

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 901.03 - 1.3062T - 0.9107t + 0.0006T^2 + 0.0007t^2 + 0.0021T*t \quad (5.4)$$

General Regression Analysis: Tensile stre versus Annealing te, Annealing ti				
Regression Equation				
Tensile strength = 901.032 - 1.30627 Annealing temp - 0.910758 Annealing time + 0.000642545 Annealing temp*Annealing temp + 0.000768457 Annealing temp*Annealing time + 0.00212037 Annealing time*Annealing time				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	901.032	125.560	7.17612	0.000
Annealing temp	-1.306	0.395	-3.30976	0.004
Annealing time	-0.911	0.235	-3.89068	0.001
Annealing temp*Annealing temp	0.001	0.000	2.07405	0.053
Annealing time*Annealing time	0.002	0.001	2.99460	0.008
Annealing temp*Annealing time	0.001	0.000	2.34676	0.031
Summary of Model				
S = 2.89033	R-Sq = 98.66%	R-Sq(adj) = 98.28%		
PRESS = 268.827	R-Sq(pred) = 97.60%			

ตารางที่ 5.10 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Tensile strength

จากการพิจารณาสมการถดถอยลดรูป แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน พบว่ามีเทอมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเหลือ 4 เทอม ได้แก่ค่า T, t, t² และ T*t โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 98.32 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 2.87 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้วของสมการถดถอยลดรูปมีค่ามากกว่าสมการการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ และค่าความคลาดเคลื่อน S มีค่าน้อยกว่าสมการเต็มรูปแบบ ซึ่งสมการถดถอยลดรูปแสดงดังสมการที่ 5.5 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.11

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 642.95 - 0.4895T - 0.9108t + 0.0021t^2 + 0.0007T*t \quad (5.5)$$

General Regression Analysis: Tensile stre versus Annealing te, Annealing ti				
Regression Equation				
Tensile strength = 642.953 - 0.489477 Annealing temp - 0.910758 Annealing time + 0.000768457 Annealing temp*Annealing time + 0.00212037 Annealing time*Annealing time				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	642.953	18.1925	35.3418	0.000
Annealing temp	-0.489	0.0282	-17.3828	0.000
Annealing time	-0.911	0.2543	-3.5819	0.002
Annealing time*Annealing time	0.002	0.0008	2.7641	0.012
Annealing temp*Annealing time	0.001	0.0004	2.1661	0.043
Summary of Model				
S = 3.13141	R-Sq = 98.67%	R-Sq(adj) = 98.32%		
PRESS = 295.636	R-Sq(pred) = 97.62%			

ตารางที่ 5.11 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Tensile strength

หากพิจารณาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 (Frist order) โดยให้เทอมของปัจจัยนำเข้าที่เหลือเพียง 2 เทอม ได้แก่ค่า T, t เพื่อให้สะดวกในการนำเสนอการใช้งาน นั้นจะพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 86.94 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 14.15 ซึ่งสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 แสดงดังสมการที่ 5.6 และวิธีหาสมการ แสดงในตารางที่ 5.11

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 599.388 - 0.4357T - 0.0976t \quad (5.6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

General Regression Analysis: Tensile stre versus Annealing te, Annealing ti				
Regression Equation				
Tensile strength = 599.388 - 0.435685 Annealing temp - 0.0975655 Annealing time				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	599.388	10.3883	57.6987	0.000
Annealing temp	-0.436	0.0162	-26.8709	0.000
Annealing time	-0.098	0.0209	-4.6757	0.000
Summary of Model				
S = 3.82493	R-Sq = 97.25%	R-Sq(adj) = 96.99%		
PRESS = 401.912	R-Sq(pred) = 96.41%			

ตารางที่ 5.12 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Tensile strength

5.3.8.3 การหาสมการถดถอยของค่า %Elongation

ทดสอบหาค่าสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full model) เพื่อที่จะดูว่ามีเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 เทอม และจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ซึ่งสมการถดถอยดังแสดงในสมการที่ 5.7 และแสดงวิธีการหาสมการดังตารางที่ 5.13

$$\%Elongation (\%) = 86.243 - 0.2032T + 0.1421t + 0.0002T^2 + 0.0002t^2 + 0.00005T*t \quad (5.7)$$

General Regression Analysis: %Elongation versus Annealing temp, Annealing time					
Regression Equation					
%Elongation = 86.2435 - 0.20323 Annealing temp + 0.142099 Annealing time + 0.0002035 Annealing temp*Annealing temp - 0.000183786 Annealing temp*Annealing time - 5.34722e-005 Annealing time*Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	86.2435	18.3605	4.69723	0.000	
Annealing temp	-0.2032	0.0577	-3.52142	0.002	
Annealing time	0.1421	0.0343	4.14058	0.001	
Annealing temp*Annealing temp	0.0002	0.0000	4.49207	0.000	
Annealing time*Annealing time	-0.0001	0.0001	-0.51644	0.612	
Annealing temp*Annealing time	-0.0002	0.0000	-3.83820	0.001	
Summary of Model					
S = 0.422651	R-Sq = 97.34%	R-Sq(adj) = 96.60%			
PRESS = 5.56402	R-Sq(pred) = 95.40%				

ตารางที่ 5.13 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า %Elongation

จากการพิจารณาสมการถดถอยลดรูป แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน พบว่ามีเทอมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเหลือ 4 เทอม ได้แก่ค่า T, t, T² และ T*t โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 96.73 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 0.41 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้วของสมการถดถอยลดรูปมีค่ามากกว่าสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ และค่าความคลาดเคลื่อน S มีค่าน้อยกว่าสมการเต็มรูปแบบ ซึ่งสมการถดถอยลดรูปแสดงดังสมการที่ 5.8 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.14

$$\%Elongation (\%) = 86.484 - 0.2032T - 0.1338t + 0.0002T^2 - 0.0002T*t \quad (5.8)$$

General Regression Analysis: %Elongation versus Annealing temp, Annealing time					
Regression Equation					
%Elongation = 86.4841 - 0.20323 Annealing temp + 0.133849 Annealing time + 0.0002035 Annealing temp*Annealing temp - 0.000183786 Annealing temp*Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	86.4841	17.9969	4.80550	0.000	
Annealing temp	-0.2032	0.0566	-3.59140	0.002	
Annealing time	0.1338	0.0298	4.49428	0.000	
Annealing temp*Annealing temp	0.0002	0.0000	4.58135	0.000	
Annealing temp*Annealing time	-0.0002	0.0000	-3.91448	0.001	
Summary of Model					
S = 0.414414	R-Sq = 97.30%	R-Sq(adj) = 96.73%			
PRESS = 5.13103	R-Sq(pred) = 95.75%				

ตารางที่ 5.14 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า %Elongation

หากพิจารณาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 (Frist order) โดยให้เทอมของปัจจัยนำเข้าที่เหลือเพียง 2 เทอม ได้แก่ค่า T, t เพื่อให้สะดวกในการนำสมการไปใช้งาน นั้นจะพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 91.39 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 0.67 ซึ่งสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 แสดงดังสมการที่ 5.9 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.15

$$\%Elongation (\%) = 12.885 + 0.0426T + 0.0176t \quad (5.9)$$

General Regression Analysis: %Elongation versus Annealing temp, Annealing time					
Regression Equation					
%Elongation = 12.8854 + 0.0425912 Annealing temp + 0.0176042 Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	12.8854	1.82664	7.0542	0.000	
Annealing temp	0.0426	0.00285	14.9389	0.000	
Annealing time	0.0176	0.00367	4.7979	0.000	
Summary of Model					
S = 0.672565	R-Sq = 92.14%	R-Sq(adj) = 91.39%			
PRESS = 12.6913	R-Sq(pred) = 89.50%				

ตารางที่ 5.15 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า %Elongation

5.3.8.4 การหาสมการถดถอยของค่า Hardness

ทดสอบหาค่าสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full model) เพื่อที่จะดูว่ามีเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 เทอม และจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ซึ่งสมการถดถอยดังแสดงในสมการที่ 5.10 และแสดงวิธีการหาสมการดังตารางที่ 5.16

$$\text{Hardness (HRB)} = 266.195 - 0.4531T - 0.5715t + 0.0002T^2 + 0.0009t^2 + 0.0005T*t \quad (5.10)$$

General Regression Analysis: Hardness versus Annealing temp, Annealing time				
Regression Equation				
Hardness = 266.195 - 0.453124 Annealing temp - 0.571476 Annealing time + 0.000200026 Annealing temp*Annealing temp + 0.000563599 Annealing temp*Annealing time + 0.000981481 Annealing time*Annealing time				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	266.195	64.6095	4.12005	0.001
Annealing temp	-0.453	0.2031	-2.23118	0.039
Annealing time	-0.571	0.1208	-4.73213	0.000
Annealing temp*Annealing temp	0.000	0.0002	1.25475	0.226
Annealing time*Annealing time	0.001	0.0004	2.69379	0.015
Annealing temp*Annealing time	0.001	0.0002	3.34482	0.004
Summary of Model				
S = 1.48728	R-Sq = 97.56%	R-Sq(adj) = 96.89%		
PRESS = 70.6651	R-Sq(pred) = 95.68%			

ตารางที่ 5.16 ผลการหาสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ ของค่า Hardness

จากการพิจารณาสมการถดถอยลดรูป แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับอุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน พบว่ามีเทอมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเหลือ 4 เทอม ได้แก่ค่า T, t, t² และ T*t โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 96.91 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 1.48 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้วของสมการถดถอยลดรูปมีค่ามากกว่าสมการการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ และค่าความคลาดเคลื่อน S มีค่าน้อยกว่าสมการเต็มรูปแบบ ซึ่งสมการถดถอยลดรูปแสดงดังสมการที่ 5.11 และวิธีการหาสมการแสดงในตารางที่ 5.17

$$\text{Hardness (HRB)} = 185.855 - 0.1988T - 0.5714t + 0.0009t^2 - 0.0006T*t \quad (5.11)$$

General Regression Analysis: Hardness versus Annealing temp, Annealing time					
Regression Equation					
Hardness = 185.855 - 0.198854 Annealing temp - 0.571476 Annealing time + 0.000563599 Annealing temp*Annealing time + 0.000981481 Annealing time*Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	185.855	8.77027	21.1914	0.000	
Annealing temp	-0.199	0.01357	-14.6488	0.000	
Annealing time	-0.571	0.12258	-4.6622	0.000	
Annealing time*Annealing time	0.001	0.00037	2.6540	0.016	
Annealing temp*Annealing time	0.001	0.00017	3.2954	0.004	
Summary of Model					
S = 1.48290	R-Sq = 97.59%	R-Sq(adj) = 96.91%			
PRESS = 69.7955	R-Sq(pred) = 95.73%				

ตารางที่ 5.17 ผลการหาสมการถดถอยลดรูป ของค่า Hardness

หากพิจารณาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 (Frist order) โดยให้เทอมของปัจจัยนำเข้าที่เหลือเพียง 2 เทอม ได้แก่ค่า T, t เพื่อให้สะดวกในการนำสมการไปใช้งาน นั้นจะพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงผลการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) = 91.39 และค่าความคลาดเคลื่อน S = 0.67 ซึ่งสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 แสดงดังสมการที่ 5.12 และวิธีหาสมการแสดงในตารางที่ 5.18

$$\text{Hardness (HRB)} = 156.485 - 0.1594T - 0.0636t \quad (5.12)$$

General Regression Analysis: Hardness versus Annealing temp, Annealing time					
Regression Equation					
Hardness = 156.485 - 0.159403 Annealing temp - 0.0635714 Annealing time					
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	156.485	5.43503	28.7919	0.000	
Annealing temp	-0.159	0.00848	-18.7908	0.000	
Annealing time	-0.064	0.01092	-5.8230	0.000	
Summary of Model					
S = 2.00116	R-Sq = 94.85%	R-Sq(adj) = 94.36%			
PRESS = 111.605	R-Sq(pred) = 93.17%				

ตารางที่ 5.18 ผลการหาสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 ของค่า Hardness

สรุปสมการถดถอยแบบลดรูป ของสมการอันดับ 2 ของค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Yield strength (MPa)} &= 3084.05 - 8.1773T - 0.2793t + 0.0058T^2 \\ \text{Tensile strength (MPa)} &= 642.95 - 0.4895T - 0.9108t + 0.0021t^2 + 0.0007T*t \\ \% \text{Elongation (\%)} &= 86.484 - 0.2032T - 0.1338t + 0.0002T^2 - 0.0002T*t \\ \text{Hardness (HRB)} &= 185.855 - 0.1988T - 0.5714t + 0.0009t^2 - 0.0006T*t \end{aligned}$$

สรุปสมการถดถอยแบบลดรูป ของสมการอันดับ 1 ของค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Yield strength (MPa)} &= 726.317 - 0.7153T - 0.2793t \\ \text{Tensile strength (MPa)} &= 599.388 - 0.4357T - 0.0976t \\ \% \text{Elongation (\%)} &= 12.885 + 0.0426T + 0.0176t \\ \text{Hardness (HRB)} &= 156.485 - 0.1594T - 0.0636t \end{aligned}$$

ซึ่งสมการทั้งสองรูปแบบ สามารถนำไปใช้คาดการณ์ค่าสมบัติเชิงกลหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนได้ โดยสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับที่ 2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R-sq(adj) และค่าความคลาดเคลื่อน S ที่ดีกว่าสมการอันดับที่ 1 ส่วนสมการถดถอยลดรูปในลักษณะสมการอันดับ 1 นั้นให้เทอมของปัจจัยนำเข้าที่เหลือเพียง 2 เทอม ได้แก่ค่า T, t เพื่อให้สะดวกในการนำสมการไปใช้งาน โดยทำการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างกัน ที่ได้จากสมการอันดับ 1 และสมการอันดับ 2 ซึ่งพบว่า มีความแตกต่างกัน Yield strength มีความแตกต่างกันเฉลี่ยน้อยกว่า 5%, Tensile strength มีความแตกต่างกันเฉลี่ยน้อยกว่า 2.2%, %Elongation มีความแตกต่างกันเฉลี่ยน้อยกว่า 2% และ ค่า Hardness มีความแตกต่างกันเฉลี่ยน้อยกว่า 3% ดังแสดงตารางที่ 5.7-5.10

Annealing time (Hr)	Annealing temp (°C)	สมการถดถอยของสมการอันดับ 1 (A)				สมการถดถอยของสมการอันดับ 2 (B)				ความแตกต่างระหว่าง A-B (%)			
		YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB
0.5	550	324.5	356.8	36.8	66.9	346.9	359.8	37.2	69.5	6.9	0.8	1.1	3.9
0.5	555	320.9	354.6	37.1	66.1	338.3	357.5	37.3	68.6	5.4	0.8	0.7	3.8
0.5	560	317.4	352.5	37.3	65.3	330.0	355.2	37.4	67.7	4.0	0.8	0.4	3.7
0.5	565	313.8	350.3	37.5	64.5	322.0	352.8	37.5	66.8	2.6	0.7	0.1	3.5
0.5	570	310.2	348.1	37.7	63.7	314.3	350.5	37.6	65.9	1.3	0.7	0.2	3.4
0.5	575	306.6	345.9	37.9	62.9	306.9	348.1	37.8	65.0	0.1	0.6	0.4	3.3
0.5	580	303.1	343.8	38.1	62.1	299.8	345.8	37.9	64.1	1.1	0.6	0.6	3.1
0.5	585	299.5	341.6	38.3	61.3	292.9	343.4	38.0	63.2	2.2	0.5	0.8	3.0
0.5	590	295.9	339.4	38.5	60.5	286.4	341.1	38.2	62.2	3.2	0.5	1.0	2.8
0.5	595	292.3	337.2	38.8	59.7	280.2	338.8	38.3	61.3	4.2	0.5	1.1	2.7
0.5	600	288.8	335.0	39.0	58.9	274.2	336.4	38.5	60.4	5.0	0.4	1.2	2.5
0.5	605	285.2	332.9	39.2	58.1	268.5	334.1	38.7	59.5	5.8	0.4	1.3	2.4
0.5	610	281.6	330.7	39.4	57.3	263.2	331.7	38.9	58.6	6.5	0.3	1.3	2.2
0.5	615	278.0	328.5	39.6	56.5	258.1	329.4	39.1	57.7	7.2	0.3	1.3	2.0
0.5	620	274.4	326.3	39.8	55.7	253.3	327.0	39.3	56.8	7.7	0.2	1.3	1.9
0.5	625	270.9	324.1	40.0	55.0	248.8	324.7	39.5	55.9	8.1	0.2	1.3	1.7
0.5	630	267.3	322.0	40.3	54.2	244.6	322.4	39.8	55.0	8.5	0.1	1.2	1.5
0.5	635	263.7	319.8	40.5	53.4	240.7	320.0	40.0	54.1	8.7	0.1	1.1	1.3
0.5	640	260.1	317.6	40.7	52.6	237.1	317.7	40.3	53.1	8.8	0.0	1.0	1.1
0.5	645	256.6	315.4	40.9	51.8	233.8	315.3	40.5	52.2	8.9	0.0	0.9	0.9
0.5	650	253.0	313.3	41.1	51.0	230.8	313.0	40.8	51.3	8.8	0.1	0.7	0.7
0.5	655	249.4	311.1	41.3	50.2	228.0	310.6	41.1	50.4	8.6	0.1	0.6	0.5
0.5	660	245.8	308.9	41.5	49.4	225.6	308.3	41.4	49.5	8.2	0.2	0.4	0.3
0.5	665	242.3	306.7	41.7	48.6	223.4	306.0	41.7	48.6	7.8	0.2	0.2	0.0
0.5	670	238.7	304.5	42.0	47.8	221.6	303.6	42.0	47.7	7.2	0.3	0.1	0.2
0.5	675	235.1	302.4	42.2	47.0	220.0	301.3	42.3	46.8	6.4	0.4	0.4	0.4
0.5	680	231.5	300.2	42.4	46.2	218.8	298.9	42.7	45.9	5.5	0.4	0.6	0.7
0.5	685	228.0	298.0	42.6	45.4	217.8	296.6	43.0	45.0	4.5	0.5	0.9	0.9
0.5	690	224.4	295.8	42.8	44.6	214.4	294.3	43.4	44.1	4.4	0.5	1.3	1.2
0.5	695	220.8	293.6	43.0	43.8	212.4	291.9	43.7	43.1	3.8	0.6	1.6	1.5
0.5	700	217.2	291.5	43.2	43.0	210.4	289.6	44.1	42.2	3.1	0.7	2.0	1.8
0.5	705	213.6	289.3	43.4	42.2	208.4	287.2	44.5	41.3	2.5	0.7	2.4	2.1
0.5	710	210.1	287.1	43.7	41.4	206.4	284.9	44.9	40.4	1.8	0.8	2.8	2.4
0.5	715	206.5	284.9	43.9	40.6	204.4	282.5	45.3	39.5	1.0	0.8	3.2	2.7
0.5	720	202.9	282.8	44.1	39.8	202.4	280.2	45.7	38.8	0.3	0.9	3.7	2.6
0.5	725	199.3	280.6	44.3	39.0	200.4	277.9	46.1	38.0	0.5	1.0	4.1	2.6
0.5	730	195.8	278.4	44.5	38.2	198.4	275.5	46.6	37.2	1.3	1.0	4.6	2.7
0.5	735	192.2	276.2	44.7	37.4	196.4	273.2	47.0	36.5	2.2	1.1	5.1	2.6
0.5	740	188.6	274.0	44.9	36.6	194.4	270.8	47.5	35.7	3.0	1.2	5.6	2.6
0.5	745	185.0	271.9	45.2	35.8	192.4	268.5	47.9	34.9	4.0	1.2	6.2	2.5
0.5	750	181.5	269.7	45.4	35.0	190.4	266.1	48.4	34.1	4.9	1.3	6.7	2.5
ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่าง สมการถดถอยอันดับ 1 และ 2										4.8	0.6	1.7	2.1

ตารางที่ 5.19 คำนวนค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 0.5 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2

Annealing time (Hr)	Annealing temp (°C)	สมการถดถอยของสมการอันดับ 1 (A)				สมการถดถอยของสมการอันดับ 2 (B)				ความแตกต่างระหว่าง A-B (%)			
		YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB
1.0	550	316.1	353.9	37.4	65.0	330.1	349.7	38.2	64.3	4.4	1.2	2.3	1.0
1.0	555	312.6	351.7	37.6	64.2	324.6	347.5	38.3	63.5	3.9	1.2	1.9	1.1
1.0	560	309.0	349.5	37.8	63.4	319.3	345.3	38.3	62.7	3.3	1.2	1.5	1.1
1.0	565	305.4	347.4	38.0	62.6	312.3	343.0	38.4	61.9	2.3	1.2	1.1	1.2
1.0	570	301.8	345.2	38.2	61.8	305.5	340.8	38.5	61.0	1.2	1.3	0.7	1.3
1.0	575	298.3	343.0	38.4	61.0	299.1	338.5	38.6	60.2	0.3	1.3	0.4	1.3
1.0	580	294.7	340.8	38.6	60.2	292.8	336.3	38.7	59.4	0.6	1.3	0.1	1.4
1.0	585	291.1	338.6	38.9	59.4	286.8	334.1	38.8	58.6	1.5	1.4	0.1	1.5
1.0	590	287.5	336.5	39.1	58.6	281.1	331.8	38.9	57.7	2.2	1.4	0.3	1.5
1.0	595	284.0	334.3	39.3	57.8	275.7	329.6	39.1	56.9	2.9	1.4	0.5	1.6
1.0	600	280.4	332.1	39.5	57.0	270.5	327.4	39.2	56.1	3.5	1.4	0.7	1.7
1.0	605	276.8	329.9	39.7	56.2	265.5	325.1	39.4	55.3	4.1	1.5	0.9	1.7
1.0	610	273.2	327.8	39.9	55.4	260.8	322.9	39.5	54.4	4.5	1.5	1.0	1.8
1.0	615	269.6	325.6	40.1	54.6	256.4	320.6	39.7	53.6	4.9	1.5	1.1	1.9
1.0	620	266.1	323.4	40.4	53.8	252.3	318.4	39.9	52.8	5.2	1.5	1.1	2.0
1.0	625	262.5	321.2	40.6	53.0	248.4	316.2	40.1	52.0	5.4	1.6	1.2	2.1
1.0	630	258.9	319.0	40.8	52.2	244.7	313.9	40.3	51.1	5.5	1.6	1.2	2.1
1.0	635	255.3	316.9	41.0	51.5	241.3	311.7	40.5	50.3	5.5	1.6	1.2	2.2
1.0	640	251.8	314.7	41.2	50.7	238.2	309.5	40.7	49.5	5.4	1.7	1.1	2.3
1.0	645	248.2	312.5	41.4	49.9	235.4	307.2	41.0	48.7	5.2	1.7	1.1	2.4
1.0	650	244.6	310.3	41.6	49.1	232.8	305.0	41.2	47.8	4.8	1.7	1.0	2.5
1.0	655	241.0	308.1	41.8	48.3	230.4	302.7	41.5	47.0	4.4	1.8	0.9	2.6
1.0	660	237.5	306.0	42.1	47.5	228.4	300.5	41.7	46.2	3.8	1.8	0.7	2.7
1.0	665	233.9	303.8	42.3	46.7	226.5	298.3	42.0	45.3	3.1	1.8	0.6	2.8
1.0	670	230.3	301.6	42.5	45.9	225.0	296.0	42.3	44.5	2.3	1.8	0.4	2.9
1.0	675	226.7	299.4	42.7	45.1	220.8	293.8	42.6	43.7	2.6	1.9	0.2	3.1
1.0	680	223.2	297.3	42.9	44.3	218.2	291.6	42.9	42.9	2.2	1.9	0.0	3.2
1.0	685	219.6	295.1	43.1	43.5	215.6	289.3	43.2	42.0	1.8	1.9	0.3	3.3
1.0	690	216.0	292.9	43.3	42.7	213.0	287.1	43.6	41.2	1.4	2.0	0.5	3.4
1.0	695	212.4	290.7	43.5	41.9	210.4	284.8	43.9	40.4	0.9	2.0	0.8	3.6
1.0	700	208.8	288.5	43.8	41.1	207.8	282.6	44.2	39.6	0.5	2.1	1.1	3.7
1.0	705	205.3	286.4	44.0	40.3	205.2	280.4	44.6	38.7	0.0	2.1	1.4	3.8
1.0	710	201.7	284.2	44.2	39.5	202.6	278.1	45.0	37.9	0.5	2.1	1.8	4.0
1.0	715	198.1	282.0	44.4	38.7	200.0	275.9	45.4	37.1	1.0	2.2	2.2	4.1
1.0	720	194.5	279.8	44.6	37.9	197.4	273.7	45.7	36.3	1.5	2.2	2.5	4.3
1.0	725	191.0	277.6	44.8	37.1	194.8	271.4	46.1	35.6	2.0	2.2	2.9	3.9
1.0	730	187.4	275.5	45.0	36.3	192.2	269.2	46.6	35.1	2.6	2.3	3.4	3.3
1.0	735	183.8	273.3	45.3	35.5	189.6	266.9	47.0	34.5	3.2	2.3	3.8	2.9
1.0	740	180.2	271.1	45.5	34.7	187.0	264.7	47.4	33.8	3.8	2.4	4.3	2.7
1.0	745	176.7	268.9	45.7	33.9	184.4	262.5	47.8	33.0	4.4	2.4	4.7	2.6
1.0	750	173.1	266.8	45.9	33.1	180.8	260.2	48.3	32.3	4.5	2.4	5.2	2.4
ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยอันดับ 1 และ 2										3.0	1.8	1.4	2.5

ตารางที่ 5.20 คำนวนค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 1.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2

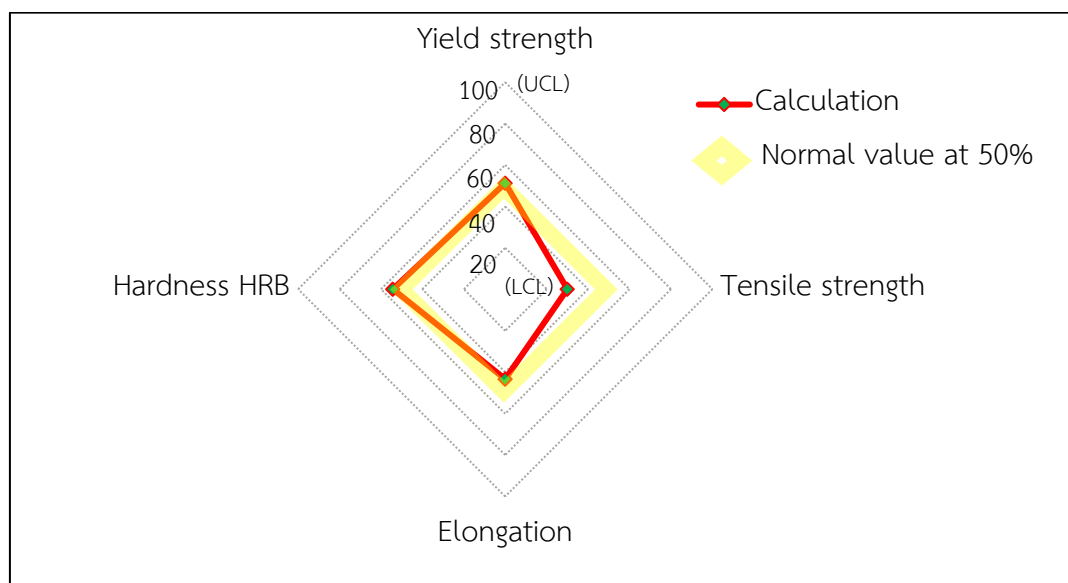
Annealing time (Hr)	Annealing temp (°C)	สมการถดถอยของสมการอันดับ 1 (A)				สมการถดถอยของสมการอันดับ 2 (B)				ความแตกต่างระหว่าง A-B (%)			
		YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB
1.5	550	307.8	351.0	37.9	63.1	325.2	343.4	39.2	60.9	5.7	2.2	3.5	3.5
1.5	555	304.2	348.8	38.1	62.3	317.7	341.3	39.2	60.2	4.4	2.2	3.0	3.4
1.5	560	300.6	346.6	38.3	61.5	310.4	339.1	39.3	59.4	3.3	2.2	2.5	3.4
1.5	565	297.0	344.4	38.5	60.7	303.4	337.0	39.3	58.7	2.1	2.2	2.0	3.3
1.5	570	293.5	342.3	38.8	59.9	296.6	334.9	39.4	57.9	1.1	2.2	1.6	3.3
1.5	575	289.9	340.1	39.0	59.1	290.1	332.8	39.4	57.2	0.1	2.2	1.2	3.2
1.5	580	286.3	337.9	39.2	58.3	283.9	330.6	39.5	56.5	0.8	2.2	0.9	3.2
1.5	585	282.7	335.7	39.4	57.5	277.9	328.5	39.6	55.7	1.7	2.2	0.6	3.1
1.5	590	279.1	333.5	39.6	56.7	272.2	326.4	39.7	55.0	2.5	2.2	0.3	3.1
1.5	595	275.6	331.4	39.8	55.9	266.8	324.2	39.8	54.2	3.2	2.2	0.0	3.0
1.5	600	272.0	329.2	40.0	55.1	261.6	322.1	39.9	53.5	3.8	2.2	0.3	3.0
1.5	605	268.4	327.0	40.2	54.3	256.6	320.0	40.1	52.8	4.4	2.2	0.5	2.9
1.5	610	264.8	324.8	40.5	53.5	251.9	317.8	40.2	52.0	4.9	2.2	0.6	2.8
1.5	615	261.3	322.6	40.7	52.7	247.5	315.7	40.3	51.3	5.3	2.2	0.8	2.8
1.5	620	257.7	320.5	40.9	51.9	243.4	313.6	40.5	50.5	5.6	2.2	0.9	2.7
1.5	625	254.1	318.3	41.1	51.1	239.5	311.4	40.7	49.8	5.8	2.2	1.0	2.6
1.5	630	250.5	316.1	41.3	50.3	235.8	309.3	40.8	49.1	5.9	2.2	1.1	2.6
1.5	635	247.0	313.9	41.5	49.5	232.4	307.2	41.0	48.3	5.9	2.2	1.2	2.5
1.5	640	243.4	311.8	41.7	48.7	229.3	305.0	41.2	47.6	5.8	2.2	1.2	2.4
1.5	645	239.8	309.6	41.9	47.9	226.5	302.9	41.4	46.8	5.6	2.2	1.2	2.3
1.5	650	236.2	307.4	42.2	47.2	223.9	300.8	41.7	46.1	5.2	2.2	1.2	2.3
1.5	655	232.7	305.2	42.4	46.4	221.5	298.6	41.9	45.3	4.8	2.2	1.1	2.2
1.5	660	229.1	303.0	42.6	45.6	219.4	296.5	42.1	44.6	4.2	2.2	1.1	2.1
1.5	665	225.5	300.9	42.8	44.8	217.6	294.4	42.4	43.9	3.5	2.2	1.0	2.0
1.5	670	221.9	298.7	43.0	44.0	216.1	292.2	42.6	43.1	2.6	2.2	0.9	1.9
1.5	675	218.3	296.5	43.2	43.2	214.8	290.1	42.9	42.4	1.6	2.2	0.7	1.8
1.5	680	214.8	294.3	43.4	42.4	209.8	288.0	43.2	41.6	2.3	2.2	0.6	1.7
1.5	685	211.2	292.1	43.7	41.6	207.2	285.8	43.5	40.9	1.9	2.2	0.4	1.6
1.5	690	207.6	290.0	43.9	40.8	204.6	283.7	43.8	40.2	1.5	2.2	0.2	1.5
1.5	695	204.0	287.8	44.1	40.0	202.0	281.6	44.1	39.4	1.0	2.2	0.0	1.4
1.5	700	200.5	285.6	44.3	39.2	199.4	279.4	44.4	38.7	0.5	2.2	0.3	1.3
1.5	705	196.9	283.4	44.5	38.4	196.8	277.3	44.7	37.9	0.0	2.2	0.5	1.2
1.5	710	193.3	281.3	44.7	37.6	194.2	275.2	45.1	37.2	0.5	2.2	0.8	1.0
1.5	715	189.7	279.1	44.9	36.8	191.6	273.0	45.4	36.5	1.0	2.2	1.1	0.9
1.5	720	186.2	276.9	45.1	36.0	189.0	270.9	45.8	35.7	1.5	2.2	1.4	0.8
1.5	725	182.6	274.7	45.4	35.2	186.4	268.8	46.2	35.0	2.1	2.2	1.8	0.6
1.5	730	179.0	272.5	45.6	34.4	183.8	266.6	46.5	34.2	2.7	2.2	2.1	0.5
1.5	735	175.4	270.4	45.8	33.6	181.2	264.5	46.9	33.5	3.3	2.2	2.5	0.3
1.5	740	171.9	268.2	46.0	32.8	178.6	262.4	47.3	32.8	3.9	2.2	2.9	0.1
1.5	745	168.3	266.0	46.2	32.0	176.0	260.2	47.7	32.0	4.6	2.2	3.3	0.0
1.5	750	164.7	263.8	46.4	31.2	173.4	258.1	48.2	31.3	5.3	2.2	3.8	0.2
ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยอันดับ 1 และ 2										3.2	2.2	1.3	2.1

ตารางที่ 5.21 คำนวนค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 1.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2

Annealing time (Hr)	Annealing temp (°C)	สมการถดถอยของสมการอันดับ 1 (A)				สมการถดถอยของสมการอันดับ 2 (B)				ความแตกต่างระหว่าง A-B (%)			
		YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	HRB
2.0	550	299.4	348.0	38.4	61.2	316.3	340.9	40.2	58.1	5.7	2.1	4.6	5.1
2.0	555	295.8	345.9	38.6	60.4	308.8	338.8	40.2	57.4	4.4	2.0	4.0	4.9
2.0	560	292.2	343.7	38.9	59.6	301.5	336.8	40.2	56.8	3.2	2.0	3.5	4.8
2.0	565	288.7	341.5	39.1	58.8	294.5	334.8	40.2	56.1	2.0	2.0	3.0	4.6
2.0	570	285.1	339.3	39.3	58.0	287.7	332.8	40.3	55.4	0.9	1.9	2.5	4.4
2.0	575	281.5	337.1	39.5	57.2	281.2	330.7	40.3	54.8	0.1	1.9	2.0	4.2
2.0	580	277.9	335.0	39.7	56.4	275.0	328.7	40.3	54.1	1.1	1.9	1.6	4.0
2.0	585	274.3	332.8	39.9	55.6	269.0	326.7	40.4	53.5	1.9	1.8	1.2	3.8
2.0	590	270.8	330.6	40.1	54.8	263.3	324.6	40.5	52.8	2.8	1.8	0.8	3.6
2.0	595	267.2	328.4	40.3	54.0	257.8	322.6	40.5	52.2	3.5	1.8	0.5	3.4
2.0	600	263.6	326.3	40.6	53.2	252.6	320.6	40.6	51.5	4.2	1.7	0.2	3.2
2.0	605	260.0	324.1	40.8	52.4	247.7	318.6	40.7	50.8	4.7	1.7	0.1	3.0
2.0	610	256.5	321.9	41.0	51.6	243.0	316.5	40.8	50.2	5.2	1.7	0.3	2.8
2.0	615	252.9	319.7	41.2	50.8	238.6	314.5	41.0	49.5	5.6	1.6	0.6	2.5
2.0	620	249.3	317.5	41.4	50.0	234.5	312.5	41.1	48.9	6.0	1.6	0.8	2.3
2.0	625	245.7	315.4	41.6	49.2	230.6	310.5	41.2	48.2	6.2	1.6	0.9	2.0
2.0	630	242.2	313.2	41.8	48.4	226.9	308.4	41.4	47.6	6.3	1.5	1.1	1.8
2.0	635	238.6	311.0	42.0	47.6	223.5	306.4	41.5	46.9	6.3	1.5	1.2	1.5
2.0	640	235.0	308.8	42.3	46.8	220.4	304.4	41.7	46.3	6.2	1.4	1.3	1.2
2.0	645	231.4	306.6	42.5	46.0	217.6	302.3	41.9	45.6	6.0	1.4	1.4	1.0
2.0	650	227.9	304.5	42.7	45.2	215.0	300.3	42.1	44.9	5.7	1.4	1.4	0.7
2.0	655	224.3	302.3	42.9	44.4	212.6	298.3	42.3	44.3	5.2	1.3	1.4	0.4
2.0	660	220.7	300.1	43.1	43.6	210.5	296.3	42.5	43.6	4.6	1.3	1.4	0.0
2.0	665	217.1	297.9	43.3	42.9	207.5	294.2	42.7	43.0	4.4	1.2	1.4	0.3
2.0	670	213.5	295.8	43.5	42.1	204.9	292.2	43.0	42.3	4.0	1.2	1.3	0.6
2.0	675	210.0	293.6	43.8	41.3	202.3	290.2	43.2	41.7	3.6	1.2	1.3	1.0
2.0	680	206.4	291.4	44.0	40.5	199.7	288.2	43.5	41.0	3.2	1.1	1.2	1.3
2.0	685	202.8	289.2	44.2	39.7	197.1	286.1	43.7	40.4	2.8	1.1	1.1	1.7
2.0	690	199.2	287.0	44.4	38.9	194.5	284.1	44.0	39.7	2.4	1.0	0.9	2.1
2.0	695	195.7	284.9	44.6	38.1	191.9	282.1	44.3	39.0	1.9	1.0	0.8	2.5
2.0	700	192.1	282.7	44.8	37.3	189.3	280.0	44.6	38.4	1.4	0.9	0.6	3.0
2.0	705	188.5	280.5	45.0	36.5	186.7	278.0	44.9	37.7	0.9	0.9	0.4	3.4
2.0	710	184.9	278.3	45.2	35.7	184.1	276.0	45.2	37.1	0.4	0.8	0.1	3.9
2.0	715	181.4	276.2	45.5	34.9	181.5	274.0	45.5	36.2	0.1	0.8	0.1	3.8
2.0	720	177.8	274.0	45.7	34.1	178.9	271.9	45.8	35.4	0.6	0.7	0.4	3.7
2.0	725	174.2	271.8	45.9	33.3	176.3	269.9	46.2	34.5	1.2	0.7	0.6	3.6
2.0	730	170.6	269.6	46.1	32.5	173.7	267.9	46.5	33.7	1.8	0.6	1.0	3.9
2.0	735	167.1	267.4	46.3	31.7	171.1	265.9	46.9	32.9	2.4	0.6	1.3	3.8
2.0	740	163.5	265.3	46.5	30.9	168.5	263.8	47.3	32.0	3.1	0.5	1.6	3.7
2.0	745	159.9	263.1	46.7	30.1	165.9	261.8	47.7	31.2	3.8	0.5	2.0	3.6
2.0	750	156.3	260.9	46.9	29.3	163.3	259.8	48.1	30.3	4.5	0.4	2.4	3.5
ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยอันดับ 1 และ 2										3.4	1.3	1.3	2.8

ตารางที่ 5.22 คำนวนค่าเป้าหมาย (สีเข้ม) ของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน ที่เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 2.0 ชั่วโมง จากสมการความสัมพันธ์ของสมการอันดับ 1 และ 2

หากพิจารณาค่าเป้าหมายของค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ เพื่อให้ค่าสมบัติเชิงกลได้ใกล้เคียงเป้าหมายในทุกตัวแปร โดยให้ความสำคัญกับตัวแปรคือ %Elongation เนื่องจากเป็นค่าสมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็น ดังนั้นจากการคำนวณในสมการถดถอย จะได้ค่าอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 675 °C และใช้เวลาในการอบอ่อน 2.0 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่า Yield strength = 202 MPa, Tensile strength = 290 MPa, %Elongation = 43.2 % และ Hardness = 41.7 HRB โดยแสดงค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณในสมการถดถอย เพื่อหาค่าเป้าหมายของค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 675 °C และเวลาอบอ่อนที่ 2.0 ชั่วโมง

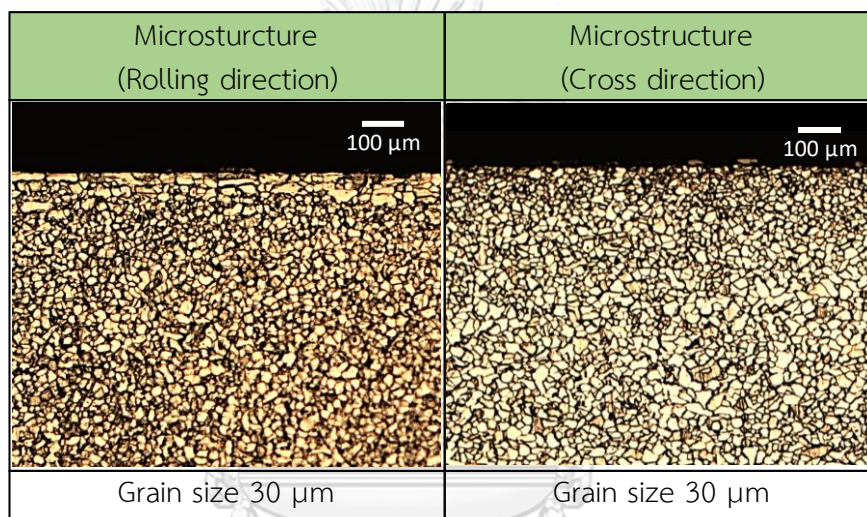
หากสรุปค่าสมบัติเชิงกลก่อนการศึกษา เทียบกับค่าจากการทดลอง ในเงื่อนไขที่ใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่สุด คือ Annealing temp = 650 °C และ Annealing time = 2 ชั่วโมง จะสามารถสรุปได้ตามตารางที่ ซึ่งจะเห็นถึงค่าความผันแปรที่ลดลง และมีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากขึ้น

ข้อมูล	เงื่อนไขการอบก่อนในกระบวนการผลิต		Yield point		Tensile strength		Elongation		Hardness	
			Spec	Result	Spec	Result	Spec	Result	Spec	Result
ก่อนการศึกษา	Annealing temp	610 °C	200	250	320	319	44	39	40	54
	Annealing time	1 hr	± 80	± 20	± 50	± 10	± 6	± 2	± 20	± 3
ผลการทดลอง	Annealing temp	650 °C	200	219.3	320	304.4	44	42.4	40	46.1
	Annealing time	2 hr	± 80	± 2.5	± 50	± 1.4	± 6	± 0.6	± 20	± 1.2

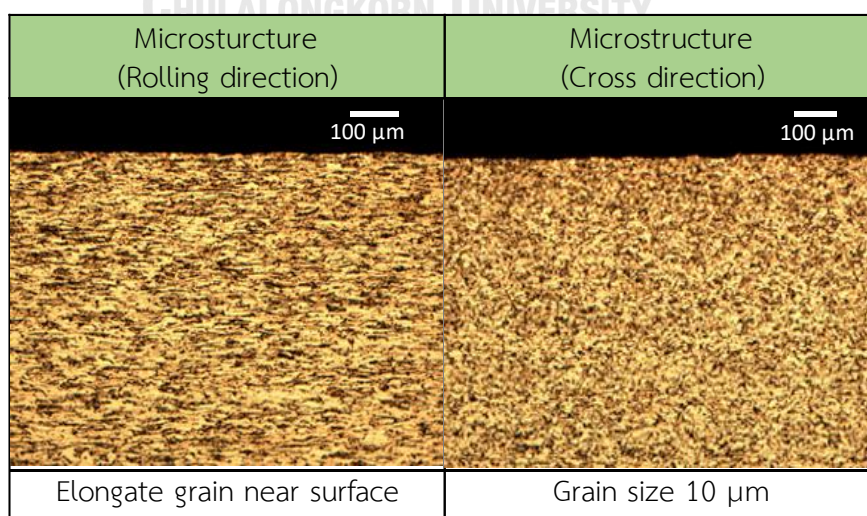
ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบกับก่อนการศึกษา และผลจากการทดลอง

5.4 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบนั้นเพื่อที่จะศึกษาถึงโครงสร้างเหล็กภายในที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน เนื่องจากเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนในแต่ละอุณหภูมิ และเวลาจะมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันออกไป โดยเริ่มทดสอบในส่วนของวัสดุบดตั้งต้น คือเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนก่อนเข้ากระบวนการรีดเย็น พบว่าเกรนมีการตกผลึกใหม่สมบูรณ์โดยมีความสม่ำเสมอตั้งแต่ผิวบนของความหนา และมีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $30\ \mu\text{m}$ ทั้งในแนวทิศทางการรีด และขวางทิศทางการรีด แสดงในรูปที่ 5.29 จากนั้นผ่านกระบวนการรีดเย็น ซึ่งโครงสร้างจุลภาคก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเกรนแบน ตามทิศทางการรีด แสดงในรูปที่ 5.30

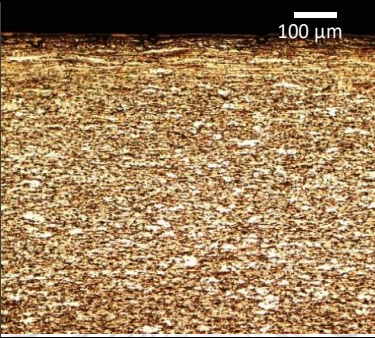
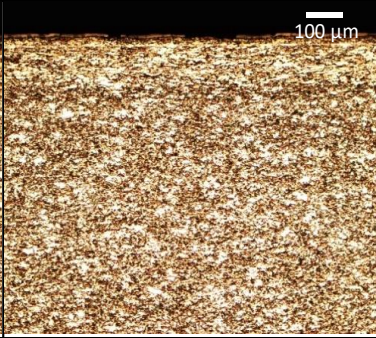
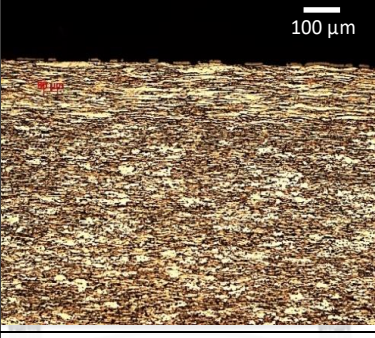
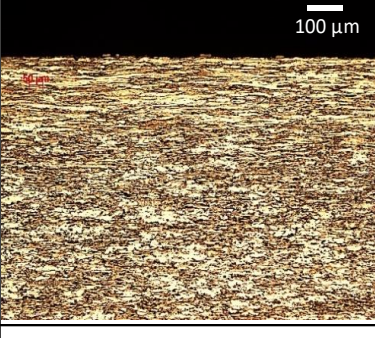
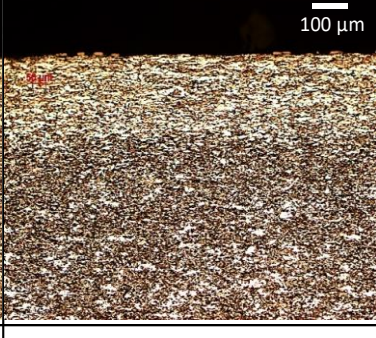


รูปที่ 5.29 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุบดตั้งต้นเหล็กแผ่นรีดร้อนก่อนเข้ากระบวนการผลิต



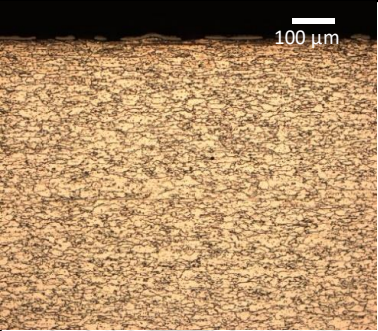
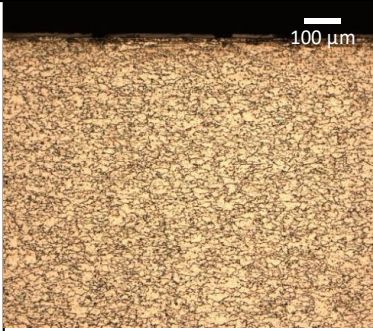
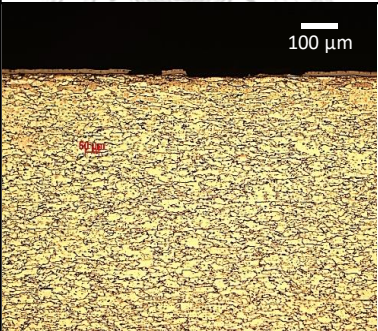
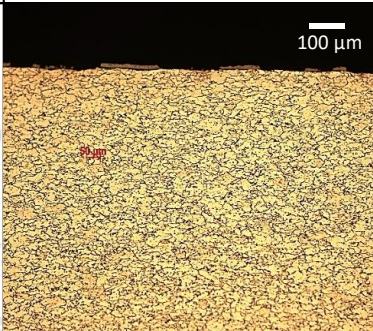
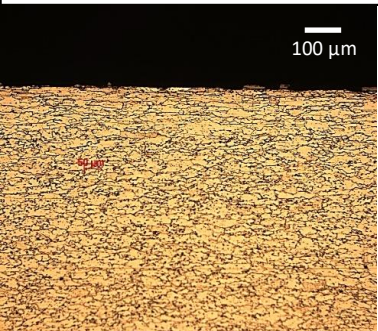
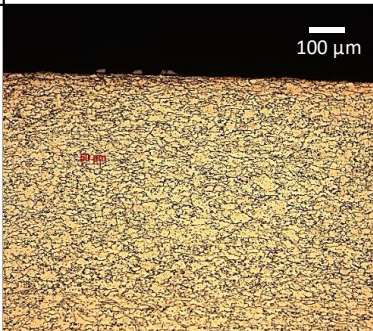
รูปที่ 5.30 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็น ก่อนเข้ากระบวนการอบอ่อน

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 570°C โดยใช้เวลา 0.5, 1, 2 ชั่วโมง ตามลำดับซึ่งพบว่าเกรนตกลึกเพียงบางส่วน โดยจะมองเห็นเกรนที่เป็นลักษณะแนวยาว ในแนวทิศทางการรีด โดยมีลักษณะผสมกันกับเกรนที่ตกลึกสมบูรณ์ แสดงในรูปที่ 5.31

Annealing Temp (°C)	Annealing Time (Hr)	Microstructure (Rolling direction)	Microstructure (Cross direction)
570	0.5 hr	 Elongate grain near surface	 Grain size 10 μm
570	1 hr	 Elongate grain near surface	 Grain size 10 μm
570	2hr	 Elongate grain near surface	 Grain size 10 μm

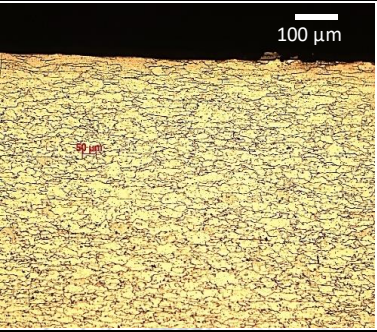
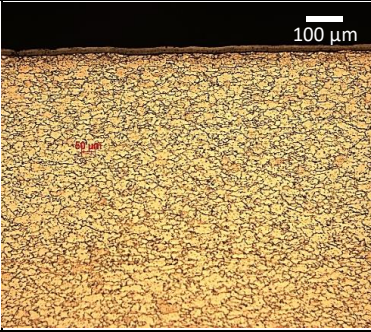
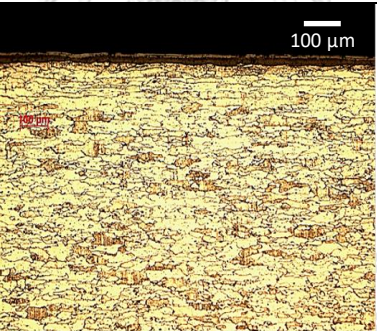
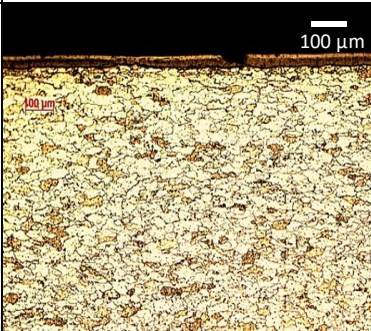
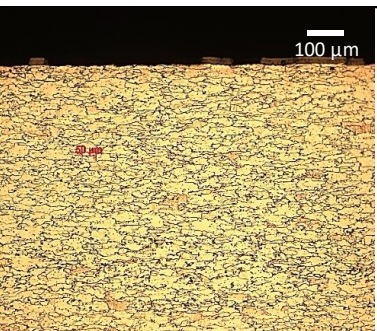
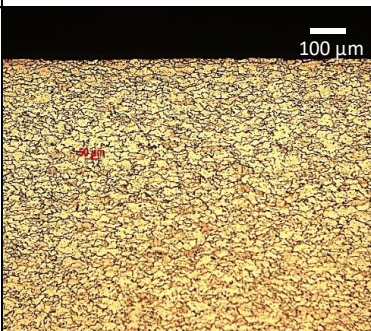
รูปที่ 5.31 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 570°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C โดยใช้เวลา 0.5, 1, 2 ชั่วโมง ตามลำดับซึ่งพบว่าเกรนตกผลึกสมบูรณ์ โดยจะไม่หลงเหลือเกรนในลักษณะแบนยาวเหมือนก่อนการอบอ่อน โดยโครงสร้างในด้านทิศทางการรีด จะมีรูปร่างของเกรนเป็นลักษณะทรงรี ส่วนด้านขวางทิศทางการรีดจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งขนาดของเกรนมีแนวโน้มโตขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนนานขึ้น แสดงในรูปที่ 5.32

Annealing Temp (°C)	Annealing Time (Hr)	Microstructure (Rolling direction)	Microstructure (Cross direction)
610	0.5 hr	 Grain size 30 μm	 Grain size 30 μm
610	1.0 hr	 Grain size 30 μm	 Grain size 30 μm
610	2.0 hr	 Grain size 40 μm	 Grain size 30 μm

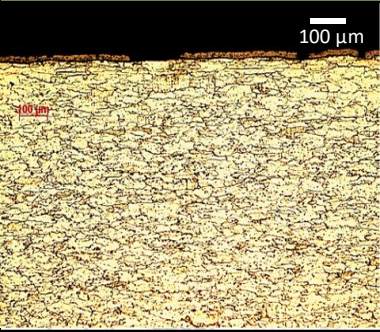
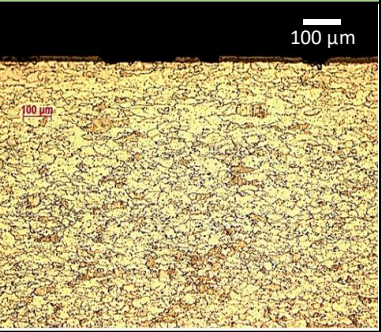
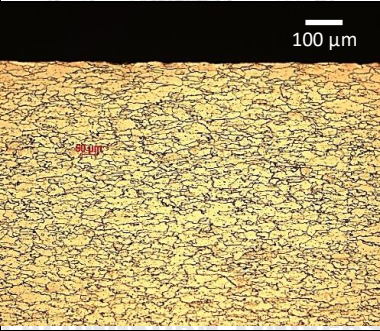
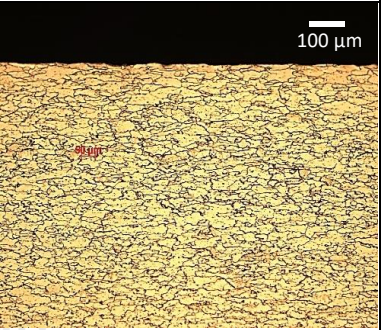
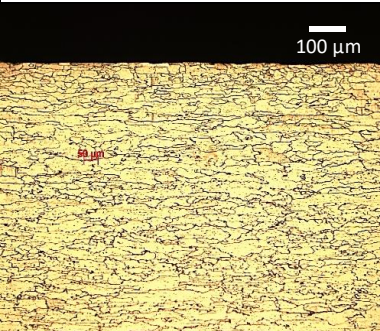
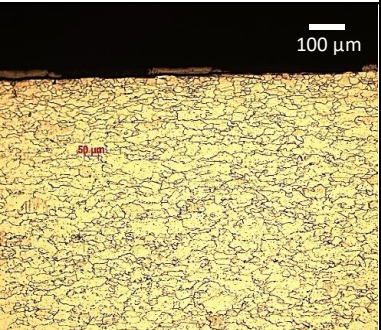
รูปที่ 5.32 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C โดยใช้เวลา 0.5, 1, 2 ชั่วโมง ตามลำดับซึ่งพบว่าเกรนตกผลึกสมบูรณ์เช่นเดียวกันกับการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 610°C โดยจะไม่หลงเหลือเกรนในลักษณะแบนยาวเหมือนก่อนการอบอ่อน โดยโครงสร้างในด้านทิศทางการรีด จะมีรูปร่างของเกรนเป็นลักษณะทรงรี ส่วนด้านขวางทิศทางการรีดจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งขนาดของเกรนมีแนวโน้มโตขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนนานขึ้น แสดงในรูปที่ 5.33

Annealing Temp (°C)	Annealing Time (Hr)	Microstructure (Rolling direction)	Microstructure (Cross direction)
650	0.5 hr	 Grain size 50 μm	 Grain size 40 μm
650	1.0 hr	 Grain size 70 μm	 Grain size 50 μm
650	2.0 hr	 Grain size 70 μm	 Grain size 50 μm

รูปที่ 5.33 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700°C โดยใช้เวลา 0.5, 1, 2 ชั่วโมง ตามลำดับซึ่งพบว่าเกรนตกผลึกสมบูรณ์ โดยโครงสร้างในด้านทิศทางการรีด จะมีรูปร่างของเกรนเป็นลักษณะทรงรี ส่วนด้านขวางทิศทางการรีดจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งขนาดของเกรนมีแนวโน้มโตขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนนานขึ้น โดยเฉพาะการอบอ่อนที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่า เกรนมีความโตขึ้นอย่างชัดเจน แสดงในรูปที่ 5.34

Annealing Temp (°C)	Annealing Time (Hr)	Microstructure (Rolling direction)	Microstructure (Cross direction)
700	0.5 hr	 Grain size 70 μm	 Grain size 60 μm
700	1.0 hr	 Grain size 80 μm	 Grain size 80 μm
700	2.0 hr	 Grain size 150 μm	 Grain size 120 μm

รูปที่ 5.34 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กำลังขยาย 100X ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700°C และใช้เวลาในการอบอ่อน 0.5, 1, 2 ชั่วโมง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบอ่อน ของเหล็กแผ่นรีดเย็น ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing temp) และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (Annealing time) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.2 บทสรุป

- 1) การเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อการลดลงของค่า Yield strength ค่า Tensile strength และค่า Hardness แต่ในส่วนของค่า %Elongation มีค่าสูงขึ้น
- 2) การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อค่าสมบัติเชิงกล เช่นเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน
- 3) ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 650°C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 2 ชั่วโมง ให้ผลลัพธ์ค่าสมบัติเชิงกล มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมาย จากทดลอง สามารถหาความสัมพันธ์ของปัจจัยด้านอุณหภูมิการอบอ่อนและ เวลาที่ใช้กับการอบอ่อนกับค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบได้ดังนี้

เมื่อให้ (T) = Annealing temperature (°C) และ (t) = Annealing time (Minute)

$$\text{Yield strength (MPa)} = 3084.05 - 8.1773T - 0.2793t + 0.0058T^2$$

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 642.95 - 0.4895T - 0.9108t + 0.0021t^2 + 0.0007T*t$$

$$\text{%Elongation (\%)} = 86.484 - 0.2032T - 0.1338t + 0.0002T^2 - 0.0002T*t$$

$$\text{Hardness (HRB)} = 185.855 - 0.1988T - 0.5714t + 0.0009t^2 - 0.0006T*t$$

- 4) ขนาดของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น

- 5) ปัจจัยได้แก่อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน นั้นส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

6.3 ข้อจำกัดในการทดลอง

1) ในกระบวนการอบอ่อนของการทดลองนั้น ทำในเตาอบของห้องปฏิบัติการ บรรยากาศภายในเตานั้น จะไม่เหมือนบรรยากาศของการอบจริงในการผลิต ทำให้เหล็กที่อบอ่อนเสร็จแล้วมีสภาพสีคล้ำกว่าเล็กน้อย อันเนื่องจากการเกิดการ Oxidation

2) การเย็นตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบห้องปฏิบัติการ เมื่อครบกำหนดเวลา หากทำการปิดเตา เช่นเดียวกับการผลิตจริง จะพบว่าเตาอบของห้องปฏิบัติการจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัวของการอบจริงในกระบวนการผลิต อันเนื่องจากปริมาตรของเตา มวลของเหล็กที่น้อยกว่า จึงจำเป็นต้องเปิดเครื่องเตาอบไว้ โดยกำหนดอัตราการเย็นตัวไว้ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวลงให้เท่ากันกับกระบวนการผลิตจริง

3) เตาอบห้องปฏิบัติการใช้ Thermocouple type R ในการวัดอุณหภูมิและแสดงผลบนแผงควบคุมซึ่งมีช่วงการใช้งานที่ 0-1450°C และมีค่าควบคุมความแม่นยำที่ 0.25% หรือ +/- 1.5°C ส่วนของโรงงานกรณีศึกษาใช้ Thermocouple type K ในการวัดอุณหภูมิซึ่งมีช่วงการใช้งานที่ 0-1250°C และมีค่าควบคุมความแม่นยำที่ 2% หรือ +/- 2.2°C ซึ่งแตกต่างกัน โดยของเตาอบห้องปฏิบัติการจะมีความแม่นยำสูงกว่าเล็กน้อย

6.4 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของสมบัติเชิงกลหลังการอบ ในกลุ่ม Product A และ ความหนาที่ 1.0 mm เท่านั้น ซึ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตจริง หรือขยายผลกับเหล็กเกรดอื่นในกลุ่มผลิตภัณฑ์หรือความหนาอื่น ๆ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายด้านประสิทธิภาพในการผลิตของทางโรงงานกรณีศึกษา




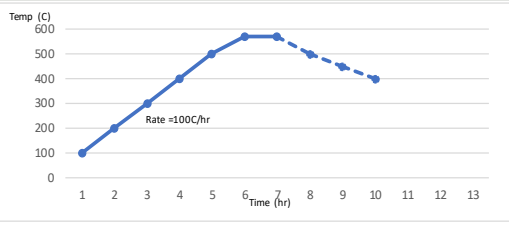

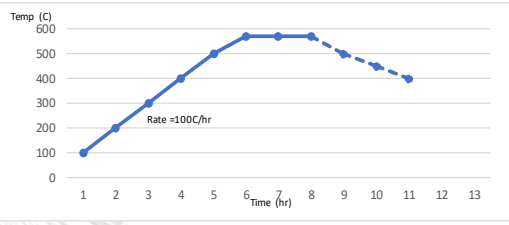

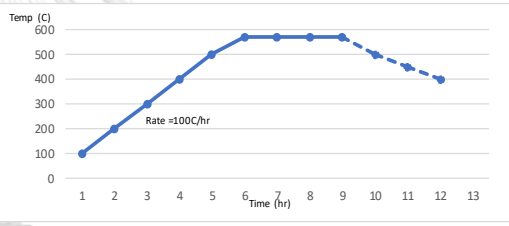

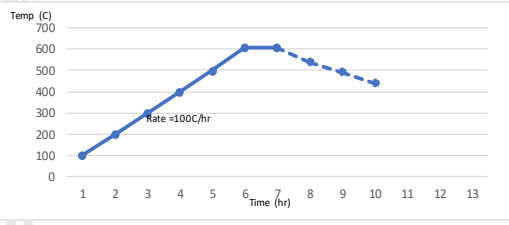

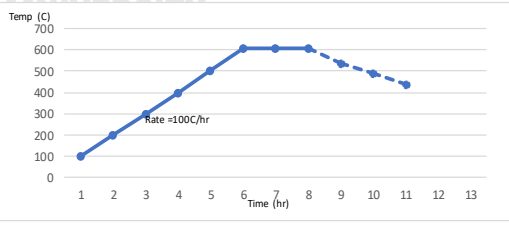

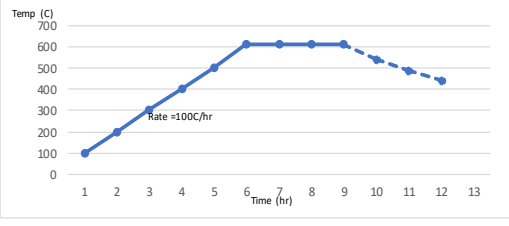
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY


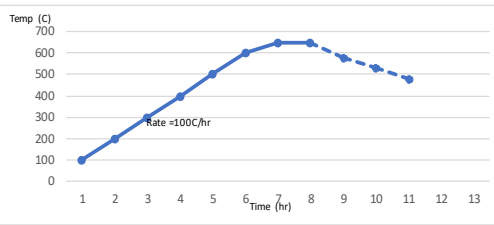

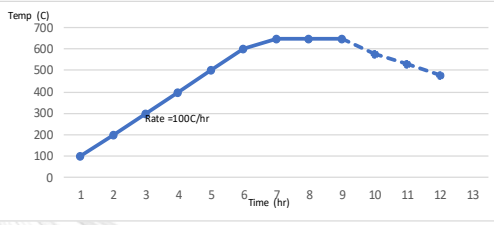

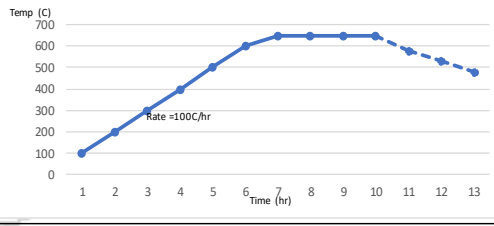

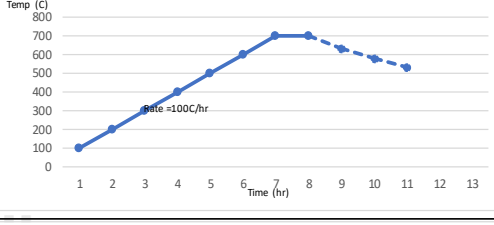

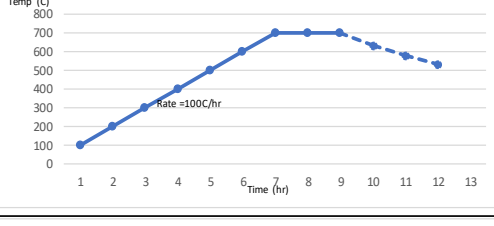

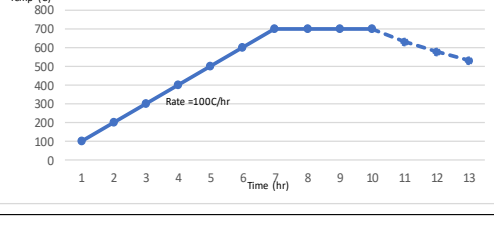
ตารางข้อมูลสมบัติเชิงกลต่าง ๆ โดยแยกตามหมายเลขเตาอบ, ตำแหน่งชั้นในการอบ และตำแหน่งหัวม้วนกลางม้วนและท้ายม้วน (จำนวน 120 ตัวอย่างจาก 5 เตาอบ)

หมายเลขเตา (Base No.)	ตำแหน่งชั้น (Stack)	จำนวน (ม้วน)	ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของข้อมูลก่อนการศึกษา																	
			Yield strength (MPa)			Tensile strength (MPa)			Elongation (%)			Hardness (HRB)								
			หัวม้วน	กลางม้วน	ท้ายม้วน	หัวม้วน	กลางม้วน	ท้ายม้วน	หัวม้วน	กลางม้วน	ท้ายม้วน	หัวม้วน	กลางม้วน	ท้ายม้วน	หัวม้วน	กลางม้วน	ท้ายม้วน			
17	1	6	Ave	252	250	250	Ave	343	342	342	Ave	41.5	39.7	39.7	Ave	52	54	54		
			SD	3	13	13	SD	6	3	3	SD	1.2	0.9	0.6	SD	2.8	1.2	1.2		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			238	254	251	333	343	341	41.5	39.8	40.0	52	54	55	52	54	55	54	54	
18	2	6	Ave	251	251	251	Ave	341	341	341	Ave	41.5	39.8	39.7	Ave	52	54	55		
			SD	3	10	10	SD	3	6	6	SD	0.7	1.0	1.0	SD	1.6	1.6	1.6		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			243	254	251	333	341	341	41.5	39.8	40.0	52	54	55	52	54	55	54	54	
19	3	6	Ave	255	255	255	Ave	345	345	345	Ave	41.0	39.7	39.7	Ave	53	55	55		
			SD	4	11	11	SD	4	4	4	SD	0.5	0.5	0.5	SD	1.6	1.6	1.6		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	336	344	344	40.8	39.6	40.0	53	54	55	53	54	55	54	54	
20	4	6	Ave	251	251	251	Ave	344	344	344	Ave	40.8	39.6	39.6	Ave	53	55	55		
			SD	7	12	12	SD	5	5	5	SD	1.1	0.9	0.9	SD	1.8	1.1	1.1		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			245	254	251	338	344	344	40.6	39.2	40.0	54	54	55	54	54	55	54	54	
21	1	6	Ave	252	252	252	Ave	345	345	345	Ave	40.8	39.4	39.4	Ave	53	54	54		
			SD	5	13	13	SD	6	6	6	SD	0.5	0.5	0.5	SD	1.3	0.8	0.8		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			250	254	251	336	343	343	40.8	39.5	39.5	54	54	55	54	54	55	54	54	
21	2	6	Ave	252	252	252	Ave	345	345	345	Ave	41.2	39.7	39.7	Ave	52	54	54		
			SD	7	12	12	SD	4	4	4	SD	0.8	0.8	0.8	SD	0.9	0.9	0.9		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	337	344	344	41.2	39.7	39.9	52	54	55	52	54	55	54	54	
21	3	6	Ave	255	255	255	Ave	344	344	344	Ave	41.2	39.7	39.7	Ave	52	54	54		
			SD	9	16	16	SD	6	6	6	SD	0.9	0.9	0.9	SD	1.4	1.4	1.4		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			229	254	251	334	344	344	41.2	39.7	39.9	52	54	55	52	54	55	54	54	
21	4	6	Ave	255	255	255	Ave	344	344	344	Ave	40.5	39.6	39.6	Ave	52	55	55		
			SD	6	10	10	SD	5	5	5	SD	1.0	0.9	0.9	SD	1.1	1.5	1.5		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			243	254	251	337	344	344	40.5	39.6	40.0	52	54	55	52	54	55	54	54	
21	1	6	Ave	251	251	251	Ave	343	343	343	Ave	40.9	39.5	39.5	Ave	53	54	54		
			SD	6	18	18	SD	3	3	3	SD	0.5	0.5	0.5	SD	2.0	1.5	1.5		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	336	343	343	40.9	39.5	40.0	53	54	55	53	54	55	54	54	
21	2	6	Ave	252	252	252	Ave	344	344	344	Ave	41.0	39.8	39.8	Ave	53	55	55		
			SD	5	17	17	SD	4	4	4	SD	1.0	1.0	1.0	SD	1.5	1.0	1.0		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			240	254	251	333	344	344	41.0	39.8	39.9	53	54	55	53	54	55	54	54	
21	3	6	Ave	251	251	251	Ave	342	342	342	Ave	41.2	39.6	39.6	Ave	52	54	54		
			SD	5	15	15	SD	6	6	6	SD	0.6	0.6	0.6	SD	1.1	1.1	1.1		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	334	342	342	41.2	39.6	40.0	52	54	55	52	54	55	54	54	
21	4	6	Ave	248	248	248	Ave	342	342	342	Ave	40.9	39.7	39.7	Ave	53	54	54		
			SD	10	10	10	SD	7	7	7	SD	1.2	1.0	1.0	SD	1.4	1.4	1.4		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	335	342	342	40.9	39.7	40.0	53	54	55	53	54	55	54	54	
21	Grand Total	120	Ave	253	251	251	Ave	344	345	345	Ave	40.9	39.5	39.5	Ave	53	54	54		
			SD	6	6	6	SD	5	5	5	SD	0.8	0.8	0.8	SD	1.7	1.4	1.4		
			±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
			244	254	251	336	344	344	40.9	39.5	40.0	53	54	55	53	54	55	54	54	

การอบอ่อนในห้องปฏิบัติการและแสดงแผนภาพอุณหภูมิในการอบอ่อน (Annealing pattern) ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 570, 610 °C เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 0.5, 1.0, 2.0 Hr.

Item	Annealing Temp	Annealing Time	Furnace display at max temp	Test date	Annealing pattern
1	570	0.5 hr		23-Jun-18	
2	570	1 hr		7-Jun-18	
3	570	2hr		8-Jun-18	
4	610	0.5 hr		24-Jun-18	
5	610	1.0 hr		14-Jul-18	
6	610	2.0 hr		15-Jul-18	

การอบอ่อนในห้องปฏิบัติการและแสดงแผนภาพอุณหภูมิในการอบอ่อน (Annealing pattern) ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 650, 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 0.5, 1.0, 2.0 Hr.

Item	Annealing Temp	Annealing Time	Furnace display at max temp	Test date	Annealing pattern
7	650	0.5 hr		30-Jun-18	
8	650	1.0 hr		21-Jul-18	
9	650	2.0 hr		22-Jul-18	
10	700	0.5 hr		1-Jul-18	
11	700	1.0 hr		28-Jul-18	
12	700	2.0 hr		29-Jul-18	

บรรณานุกรม

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ 2549 การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) พิมพ์ครั้งที่ 5

กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ 2545 Introduction to Six Sigma เอกสารประกอบการบรรยาย

กรุงเทพมหานคร :

ณัฐพล วิชรประไพพันธ์ การจำลองกระบวนการอบอุ่นแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็น

วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย, 2552

อัจฉราภรณ์ ดำรงวณิชย์ การปรับปรุงอัตราบิดผัดพลาสติกดีดิสก์ไดร์ฟ วิทยานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555

ภัสรา บรรจงเกษม การควบคุมความหนาของทองแดงเคลือบผิวบนแผ่นพิมพ์ลายวงจร วิทยานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559

Dong-dong Zhuang, Lei-gang Wang, Yao Huang. Microstructure and texture evolution during recrystallization of low-carbon steel sheet, Journal of Iron and Steel

Research, International 24, 84-90 (2017)

Y. Liu, C.D. Yang, M. Liu. Effects of microstructure and crystallography on mechanical properties of cold-rolled SAE1078 pearlitic steel, Materials Science &

Engineering A 709, 115–124 (2018)

Rajan Kr Singh, Sudharshan R. Optimization of annealing stack using design of experiment method in Batch Annealed HSLA Steel, Materials Today:

Proceedings 5, 7055–7060 (2018)

H. Monajati a, D. Asefi. Analysis of the effects of processing parameters on mechanical properties and formability of cold rolled low carbon steel sheets using neural networks, Computational Materials Science 49, 876–881 (2010)

R. Mendoza a, A. Molina. Mechanical properties of a recrystallized low carbon steel, Scripta Materialia 48, 391–395 (2003)

F.A.N.G. Chun-Jen, W.U. Li-Wen. Batch Annealing Model for Cold rolled Coils and Its Application, China Steel Technical Report 28, 13-20 (2015)



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเรืองยศ วิเชียรรักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	7 พฤศจิกายน 2528
วุฒิการศึกษา	การศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2551 และได้ศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	33 ม.1 ซ.จันทคาร 5 ถ.เพชรเกษม27 ต.ควนลิ่ง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
ผลงานตีพิมพ์	Factors affecting the mechanical properties variation after annealing of cold rolled steel sheet (IEMT 2018 Phuket : Proceeding index by Ei, and Scopus)