

การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเชิงกล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORS ANALYSIS IN HOT ROLLING PROCESS AFFECTING THE MECHANICAL
PROPERTIES



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเชิงกล
โดย	นายสัจจะพจน์ คชวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

สัจจะพจน์ คชวัฒน์ : การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ส่งผลต่อค่า
คุณสมบัติเชิงกล. (FACTORS ANALYSIS IN HOT ROLLING PROCESS AFFECTING THE
MECHANICAL PROPERTIES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ส่งผลต่อค่า
คุณสมบัติเชิงกลของโรงงานตัวอย่างดำเนินการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ที่ 830, 850,
870°C ปริมาณธาตุ Boron(B) ที่ 10, 20, 30 ppm และอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่ 10, 20, 30°C จากนั้นนำ
ชิ้นงานไปตรวจวัดค่าคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้นจุดคราก ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละของ
การยืดตัว รวมถึงตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็ก

ผลการทดสอบพบว่า (1) อิทธิพลหลักของทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT), ปริมาณ
ธาตุ Boron (B) และ อุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) มีผลต่อการผันแปรค่าเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน
ขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามไม่มีอิทธิพลทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$ (2) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอุณหภูมิ
หลังรีดละเอียด (FT) มีผลให้ค่าความเค้นจุดคราก (YS) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (TS) เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าร้อยละ
การยืดตัว (EL) ลดลง (3) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) และปริมาณ Boron (B) จะส่งผลให้ค่า
ร้อยละการยืดตัว (EL) เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความเค้นจุดคราก (YS) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (TS) มีค่าลดลง
(4) ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้เหล็กมีคุณสมบัติความแข็งแรงต่ำสุดและมีความยืดสูงสุด ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีด
ละเอียด (FT) 830°C, ปริมาณ Boron (B) 30 ppm และอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) 30°C ให้ผลลัพธ์ค่าความ
เค้นจุดคราก 206 ± 5.0 MPa ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 306 ± 4.0 MPa และค่าร้อยละการยืดตัว $50 \pm 1.0\%$ (5)
ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้เหล็กมีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงสุดและมีความยืดต่ำสุด ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีด
ละเอียด (FT) 870°C, ปริมาณ Boron (B) 10 ppm และอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) 10°C ให้ผลลัพธ์ค่าความ
เค้นจุดคราก 260 ± 5.0 MPa ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 358 ± 2.0 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว $33 \pm 1.0\%$ (6) เมื่อเพิ่ม
อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) และอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กมีเกรนลักษณะ
คล้ายกลม (Equiaxed grains) และมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ขณะที่เกรนลักษณะแนวยาวที่ขอบสองข้างมี
แนวโน้มลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070980121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Hot rolled steel sheet in coil, Hot rolling, Finishing temperature,
Compensation temperature

Sajjapoj Kotchawat : FACTORS ANALYSIS IN HOT ROLLING PROCESS AFFECTING THE
MECHANICAL PROPERTIES . Advisor: Assoc. Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, Ph.D.

The objective of this research was to study the process factors affecting on mechanical properties of hot rolled steel sheet for a case study factory. The experimental procedure was performed by 1) varying the process factors being the finished rolling temperature (FT) at 830, 850, and 870°C; low carbon steel with Boron composition (B) at 10, 20, and 30 ppm; rolled sides compensation temperature (Te) at 10, 20, and 30°C, 2) characterizing the mechanical properties which were yield strength, ultimate tensile strength, percentage of elongation, and microstructure.

The results showed that (1) the main factors that of Finishing temperature, Boron composition and Compensation temperature had significant effect on the mechanical properties of the rolled sheets, while the interaction factors had no influence; (2) increasing of finished rolling temperature (FT) increased the yield strength and tensile strength, whereas elongation was decreased; (3) increasing of rolled sides compensation temperature (Te) and Boron quantity (B) decreased the yield strength and tensile strength, whereas elongation was increased; (4) The Finishing temperature of 830°C, Boron quantity of 30ppm, and Compensation temperature of 30°C provided the minimum yield strength and tensile strength at 206±5.0 MPa and 306±4.0 MPa, respectively and maximum elongation at 50±1.0%; (5) on the other hand, the Finishing temperature of 870 °C, Boron composition of 10ppm and Compensation temperature of 10°C gave the maximum yield strength and tensile strength at 260±5.0 MPa and 358±2.0 MPa, respectively and the minimum elongation at 33±1.0%. (6) the increasing of finishing temperature and compensation temperature could improve the microstructures of the rolled sheet especially at the sides the quantity of elongated grains

Field of Study: Industrial Engineering Student's Signature

Academic Year: 2019 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตติต เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ หลักการทางทฤษฎี ตลอดจนให้คำแนะนำ แนวทางการแก้ไขปัญหาและช่วยเหลือมาตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็น ประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทสหวิริยาстил อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์แก่ ผู้วิจัยได้ศึกษาและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ในระดับบัณฑิตศึกษา ที่ให้การ สนับสนุนและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุก ท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สัจจะพจน์ คชวัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา.....	1
1.2 โครงสร้างองค์กร.....	2
1.3 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน	2
1.3.1 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน หรือเหล็กม้วนดำ	2
1.3.2 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนประเภทล่างผิวและเคลือบน้ำมัน (Hot-rolled coil pickled & oiled).....	8
1.4 ผลิตภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา	8
1.4.1 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil).....	8
1.4.2 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนประเภทล่างผิวและเคลือบน้ำมัน (Pickled and oiled coil)	9
1.5 ที่มาและความสำคัญ.....	9
1.6 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	10
1.7 ขอบเขตของการวิจัย.....	10

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	11
1.9 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	11
1.10 ผลที่จะได้รับ.....	12
1.11 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า	14
2.1.1 การผลิตเหล็กขั้นต้น หรือ การถลุงหรือ การผลิตเหล็ก (Iron Making)	14
2.1.2 การผลิตเหล็กขั้นกลาง-การผลิตเหล็กกล้า (Steel making)และการหล่อ (Casting)..	18
2.1.3 การผลิตเหล็กขั้นปลาย-การขึ้นรูปเหล็กกล้า (Steel forming)	20
2.1.3.1 การขึ้นรูปขั้นปฐมภูมิ (Primary forming).....	20
2.3.1.2 การขึ้นรูปขั้นทุติยภูมิ (Secondary forming).....	22
2.2 ประเภทของเหล็กกล้า.....	22
2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low-carbon steel)	23
2.2.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium-carbon steel)	23
2.2.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High-carbon steel).....	23
2.3 กระบวนการรีดเหล็ก (Steel rolling).....	23
2.3.1 หลักการพื้นฐานของกระบวนการรีดเหล็ก.....	24
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property Testing)	26
2.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	26
2.5 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก.....	29
2.5.1 การวัดขนาดเกรน (Grain size).....	29
2.5.1.1 วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison method).....	30
2.5.1.2 วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric method หรือ Jeffries method).....	30
2.5.1.3 วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept method).....	32

2.5.2 การทดสอบปริมาณเกรนผสม (Mix grain).....	32
2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	33
2.6.1 ความผันแปรของระบบการวัด.....	33
2.6.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	33
2.7 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3.1 สภาพปัญหาในปัจจุบัน.....	40
3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis).....	42
3.2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	42
3.2.1.1 ความสามารถแยกความแตกต่าง (Discrimination หรือ Resolution).....	42
3.2.1.2 ไบอัส (Bias).....	42
3.2.1.3 คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity).....	42
3.2.1.4 ความเสถียร (Stability).....	42
3.2.1.5 ความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability).....	43
3.2.1.6 ความสามารถในการประเมินซ้ำ (Reproducibility).....	43
3.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Gage R&R.....	43
3.2.2.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Yield strength.....	43
3.2.2.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Tensile strength.....	45
3.2.2.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Elongation.....	46
3.3 กรรมวิธีในกระบวนการรีดร้อน (Hot Strip Mill Process).....	48
3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการรีดร้อน.....	49
3.4.1 อุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และอุณหภูมิ Coiling Temperature (CT).....	50
3.4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) เทียบค่า Yield strength (YS) ที่ อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C.....	54

3.4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และเทียบค่า Tensile strength (TS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	55
3.4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และเทียบค่า Elongation (EL) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	56
3.4.2 อุณหภูมิชดเชยที่ขอบ หรือ Compensation temperature	57
3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Compensation temperature (Te) เทียบค่า Yield strength (YS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	57
3.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Compensation temperature เทียบค่า Tensile strength (TS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	58
3.4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชดเชย Strip หรือ Compensation temperature เทียบค่า Elongation ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	59
3.5 ธาตุเจือ (Alloy)	60
3.5.1 ปริมาณ Boron alloys ในเหล็ก	60
3.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron (B) เทียบค่า Yield strength (YS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C	60
3.5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron เทียบค่า Tensile strength ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature คงที่ 610°C	61
3.5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron เทียบค่า Elongation ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature คงที่ 610°C	62
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	65
4.1 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	65
4.1.1 ชิ้นงานวิจัย	65
4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	65

4.1.2.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	65
4.1.2.2 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (Sample)	66
4.1.2.3 กล้องทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	67
4.2 กำหนดวิธีการทดลอง.....	67
4.2.1 กำหนดเงื่อนไขสำหรับกระบวนการรีดร้อนเหล็ก.....	67
4.2.2 กำหนดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	69
4.2.3 ทดสอบค่าเชิงกล	69
4.2.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค.....	69
4.3 วิธีการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าคุณสมบัติเชิงกล	69
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับกรณีเป้าหมายและก่อนการศึกษา	70
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย	71
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค	71
5.2 ผลของอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขีดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)	82
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า YS	82
5.2.2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า YS.....	82
5.2.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model).....	85
5.3 ผลของอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขีดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึง (Tensile strength; TS).....	85
5.3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า TS	85
5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า TS.....	85
5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model).....	88
5.4 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขีดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)	89
5.4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า EL	89

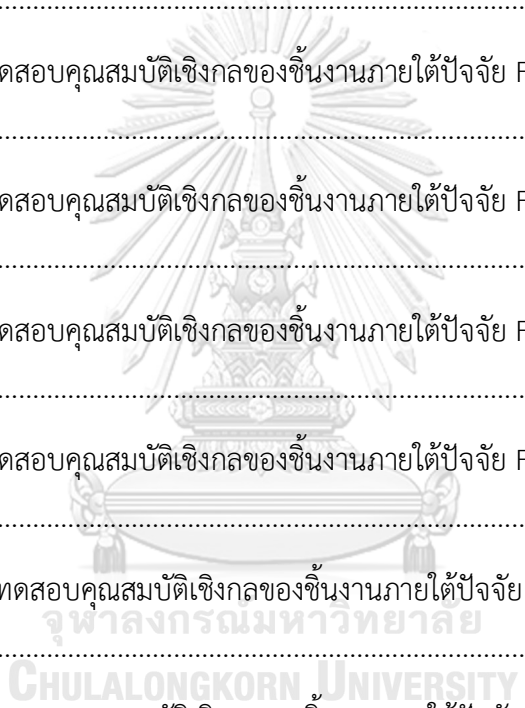
5.4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า EL.....	89
5.4.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model).....	92
5.5 เปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการรีดก่อนและหลังการทดลอง	92
5.6 เปรียบเทียบผลของปัจจัยจากการผลิตจริงเทียบกับค่าจากสมการถดถอย	95
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	96
6.1 บทนำ.....	96
6.2 บทสรุป	96
6.3 ข้อจำกัดในการทดลอง	97
6.4 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัยต่างๆ	101
ประวัติผู้เขียน.....	129



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	13
ตารางที่ 2.1 แร่เหล็กที่สำคัญ	15
ตารางที่ 2.2 Jeffries multipliers ที่ค่ากำลังขยายต่างๆ	31
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลค่าเชิงกลก่อนการทดลองที่จากการเก็บข้อมูลในปี 2019	41
ตารางที่ 3.2 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบปัจจัยนำเข้าที่มีต่อค่าของคุณสมบัติเชิงกล ต่าง ๆ	64
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมหลักทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง	65
ตารางที่ 4.2 แผนการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล	68
ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 830 °C	72
ตารางที่ 5.2 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความ แปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 830 °C	73
ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 850 °C	74
ตารางที่ 5.4 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความ แปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 850 °C	75
ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 870 °C	76
ตารางที่ 5.6 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความ แปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 870 °C	77
ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการรีดก่อนและหลังการทดลอง	94
ตารางที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณความสัมพันธ์จากสมการถดถอย	95
ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C	102

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C.....	103
ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C.....	104
ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C.....	105
ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C.....	106
ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C.....	107
ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C.....	108
ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C.....	109
ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C.....	110
ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C.....	111
ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C.....	112
ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C.....	113
ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C.....	114
ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C.....	115



ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C.....	116
ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C.....	117
ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C.....	118
ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C.....	119
ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C.....	120
ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C.....	121
ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C.....	122
ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C.....	123
ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C.....	124
ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C.....	125
ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C.....	126
ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C.....	127
ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C.....	128

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 องค์กรของบริษัททกรณีศึกษา.....	2
รูปที่ 1.2 แผนผังไลน์การผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน.....	3
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนของกระบวนการรีดร้อนตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ.....	3
รูปที่ 1.4 การทำงานของ Burner (High temperature furnace ,Pfeifer).....	4
รูปที่ 1.5 เครื่อง De-scaling box.....	4
รูปที่ 1.6 เครื่อง Coil box.....	6
รูปที่ 1.7 อุปกรณ์เพิ่มความร้อนที่ขอบเหล็ก (Edge Induction Heater).....	6
รูปที่ 1.8 เครื่อง Thickness gauge และเครื่อง Pyrometer.....	7
รูปที่ 1.9 ชุดแท่นรีด 7 ชุดสำหรับกระบวนการรีดละเอียดที่ Finishing mill.....	7
รูปที่ 1.10 ม่านน้ำตก หรือ Laminar flow.....	7
รูปที่ 1.11 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot Rolled Coil).....	8
รูปที่ 1.12 โครงสร้างห่วงโซ่อุปทานของธุรกิจเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน และการนำไปใช้ประโยชน์. 9	
รูปที่ 1.13 ตัวอย่างปัญหาชิ้นงานจากบริเวณแถบขอบ Strip ที่ฉีกขาดเนื่องจากการยึดตัวไม่เหมาะสม.....	10
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเหล็กตั้งแต่อุตสาหกรรมขั้นต้น จนถึงอุตสาหกรรมขั้นปลาย.....	15
รูปที่ 2.2 กระบวนการถลุงแร่เหล็กด้วยเตาพ่นลมหรือ Blast furnace.....	17
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นในเตาพ่นลม หรือ Blast furnace.....	18
รูปที่ 2.4 เตา Basic oxygen furnace.....	19
รูปที่ 2.5 เตาอาร์คไฟฟ้า.....	19
รูปที่ 2.6 กระบวนการหล่อต่อเนื่อง (Continuous casting) ลักษณะต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าทรงยาว.....	21

รูปที่ 2.8	ผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าทรงแบน.....	21
รูปที่ 2.9	ผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีการแปรรูปขั้นสุดท้าย (การขึ้นรูปขั้นสุดท้าย).....	22
รูปที่ 2.10	ส่วนประกอบและปัจจัยในกระบวนการรีดเหล็ก (Steelmunual ,Stahl Eisen)	25
รูปที่ 2.11	แท่นรีด (Rolling mill) ต่างๆ.....	26
รูปที่ 2.12	Four-strand tandem mill.....	26
รูปที่ 2.13	เครื่องทดสอบแรงดึง	27
รูปที่ 2.14	ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง.....	27
รูปที่ 2.15	กราฟ Stress-Strain curve.....	28
รูปที่ 2.16	องค์ประกอบความผันแปรของระบบการวัด	33
รูปที่ 3.1	ข้อมูลการกระจายตัวค่าเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตก่อนการทดลอง.....	41
รูปที่ 3.2	ผลวิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Yield strength.....	44
รูปที่ 3.3	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Yield strength.....	44
รูปที่ 3.4	วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Tensile strength	45
รูปที่ 3.5	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength	46
รูปที่ 3.6	วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Elongation.....	47
รูปที่ 3.7	วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Elongation.....	47
รูปที่ 3.8	ไลน์การผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot Strip Mill).....	49
รูปที่ 3.9	การเกิด Restoration ในกระบวนการรีดร้อน	50
รูปที่ 3.10	การเปลี่ยนแปลงของ Austenite grain ขณะถูกรีดที่ Finishing mill.....	51
รูปที่ 3.11	เฟสไดอะแกรมของเหล็กกับคาร์บอน	52
รูปที่ 3.12	ตำแหน่งชิ้นงานที่เก็บทดสอบสำหรับวิเคราะห์เชิงสถิติ One way ANOVA	53
รูปที่ 3.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ YS ตลอดความยาว Coil.....	54
รูปที่ 3.14	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ FT ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil.....	54

รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ TS ตลอดความยาว Coil	55
รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ FT ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil.....	55
รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ EL ตลอดความยาว Coil	56
รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA)ของ FT ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil.....	56
รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Te และ YS ตลอดความยาว Coil.....	57
รูปที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA)ของ Te ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil.....	58
รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Te และ TS ตลอดความยาว Coil	58
รูปที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ Te ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil.....	59
รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Te และ EI ตลอดความยาว Coil.....	59
รูปที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ Te ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil.....	60
รูปที่ 3.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ YS ตลอดความยาว Coil.....	61
รูปที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil.....	61
รูปที่ 3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ TS ตลอดความยาว Coil.....	62
รูปที่ 3.28 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil.....	62
รูปที่ 3.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ EL ตลอดความยาว Coil.....	63
รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil.....	63
รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบแรงดึง Instron Model 5585H.....	66
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึง.....	67

รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งชิ้นงานบนเหล็กม้วนตลอดความยาว Coil ที่นำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	69
รูปที่ 5.1 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 830°C และชดเชยอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	79
รูปที่ 5.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 850°C และชดเชยอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	80
รูปที่ 5.3 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 870 °C และชดเชยอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30°C ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	81
รูปที่ 5.4 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)	83
รูปที่ 5.5 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)	84
รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (YS)	85
รูปที่ 5.7 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS)	86
รูปที่ 5.8 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ย	87
รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (TS)	88
รูปที่ 5.10 ผลของปัจจัยทั้งสาม อุณหภูมิรีดสุดท้าย (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)	90
รูปที่ 5.11 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยร้อยละของการยืดตัว (%Elongation; EL) m	91
รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยร้อยละของการยืดตัว (%EL)	92



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

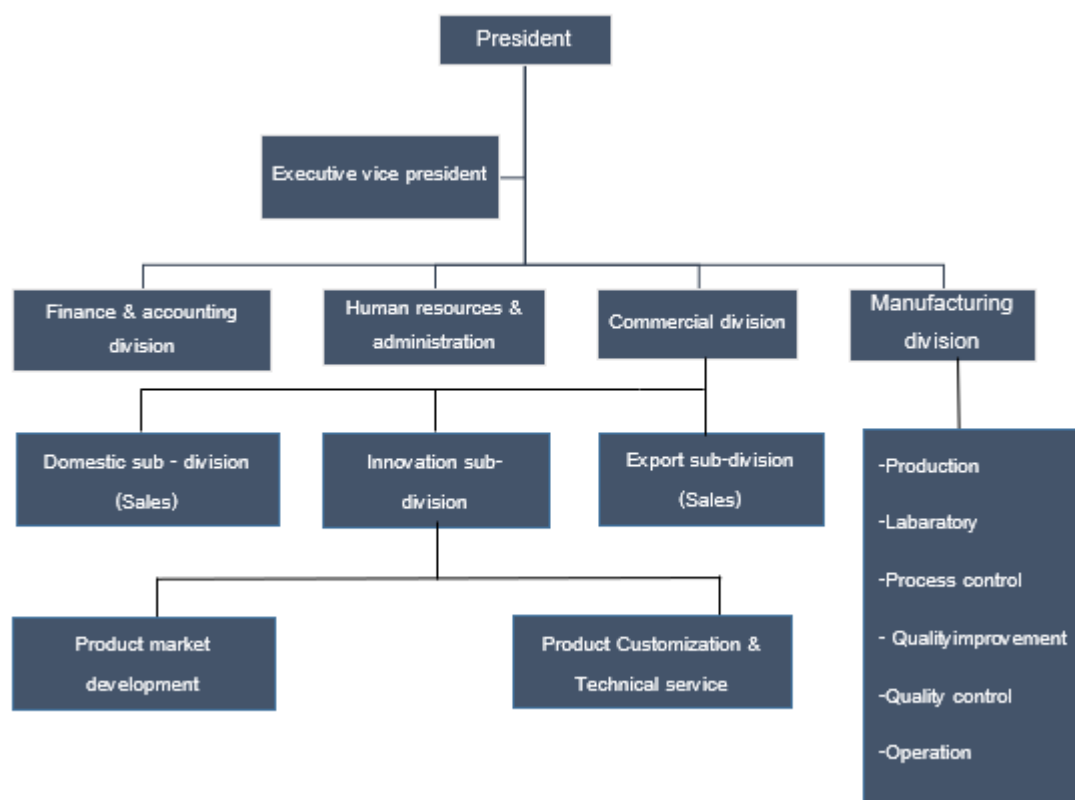
เหล็กจัดเป็นโลหะพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้งานในธุรกิจต่อเนื่องที่หลากหลาย ได้แก่ ก่อสร้าง ยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งล้วนเป็นธุรกิจที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ โดยสำหรับอุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทยจำกัดอยู่เฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางและปลาย กล่าวคือ บริษัทกรณีศึกษาโดยแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กทรงแบน ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น และเหล็กแผ่นเคลือบชนิดต่างๆ อย่างสมบูรณ์แล้ว แต่ก็ยังไม่มีอุตสาหกรรมเหล็กต้นน้ำ (Upstream) โดยมีการผลิตต้นทางที่สุดอยู่ในอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลาง (Midstream) คือ การหลอมเศษเหล็กโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้า ทำให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กจากต่างประเทศเพื่อนำมาทำการแปรรูปเหล็กสำเร็จรูปให้เป็นเหล็กชั้นปลายหรือเหล็กสำเร็จรูป (Finished steel products)

1.1 ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาจัดเป็นบริษัทผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนรายใหญ่ของประเทศ โดยมีทุนจดทะเบียน 13,300 ล้านบาท มีกำลังการผลิตสูงสุดที่ 4 ล้านตันต่อปี โดยมุ่งเน้นการนวัตกรรมผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นชั้นคุณภาพพิเศษเพื่อรองรับความต้องการใช้เหล็กที่เพิ่มขึ้นของภูมิภาค สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ พลังงาน การขนส่ง และการก่อสร้าง นอกจากนี้บริษัทมีการร่วมลงทุนในโครงการต่อเนื่องที่สำคัญ ประกอบด้วย บริษัท เหล็กแผ่นรีดเย็นไทย จำกัด (มหาชน) (TCRSS) ซึ่งเป็นผู้ผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น รายแรกและรายใหญ่ที่สุดของประเทศไทย บริษัท เหล็กแผ่นเคลือบไทย จำกัด ผู้ผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้ารายแรกและรายใหญ่ที่สุดของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โรงงานทั้งหมดในประเทศไทยของบริษัทในเครื่องตั้งอยู่บนชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย ณ อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครเพียง 400 กิโลเมตร และเป็นทำเลยุทธศาสตร์ที่ดีที่สุดในประเทศสำหรับการดำเนินธุรกิจเหล็กแบบครบวงจร บริษัท ท่าเรือประจวบ จำกัด (PPC) ให้บริการท่าเรือพาณิชย์เอกชน ที่มีความลึกที่สุดในประเทศไทย รองรับการขนถ่ายวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์เหล็กได้ในปริมาณมาก นอกจากนี้ บริษัทยังขยายขีดความสามารถในงานวิศวกรรมบริการโดยลงทุนร้อยละ 100 ในบริษัท เวสต์โคสต์ เอ็นจิเนียริง จำกัด (WCE) ให้บริการงานด้านวิศวกรรมและซ่อมบำรุง รวมถึงการออกแบบทางวิศวกรรมที่มีความ

เชี่ยวชาญในธุรกิจเหล็ก สำหรับผลิตภัณฑ์ผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนเพื่อป้อนสู่อุตสาหกรรมในประเทศมีหลากหลาย อาทิเช่น กลุ่มอุตสาหกรรมท่อเหล็ก และท่อโครงสร้าง, กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนยานยนต์ และกลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

1.2 โครงสร้างองค์กร



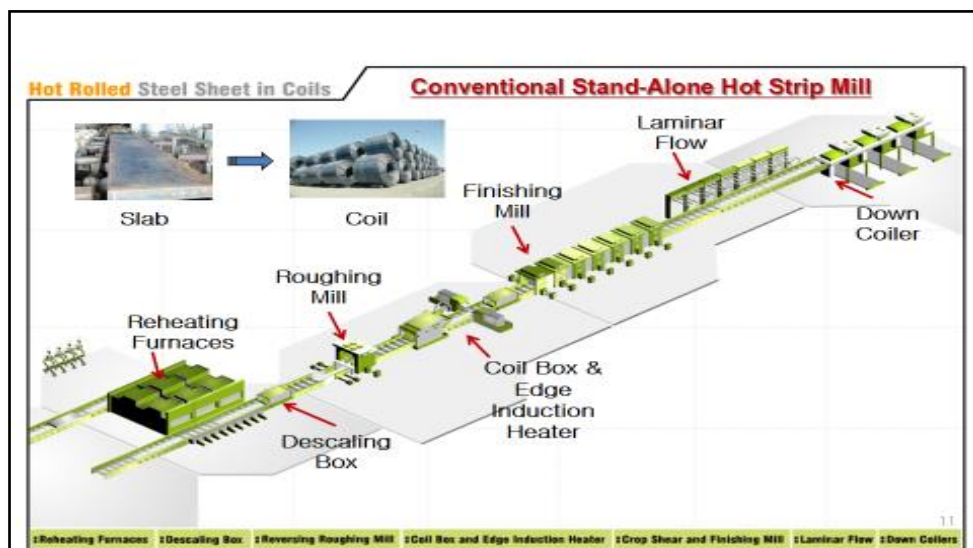
รูปที่ 1.1 องค์กรของบริษัทกรณีศึกษา

1.3 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน

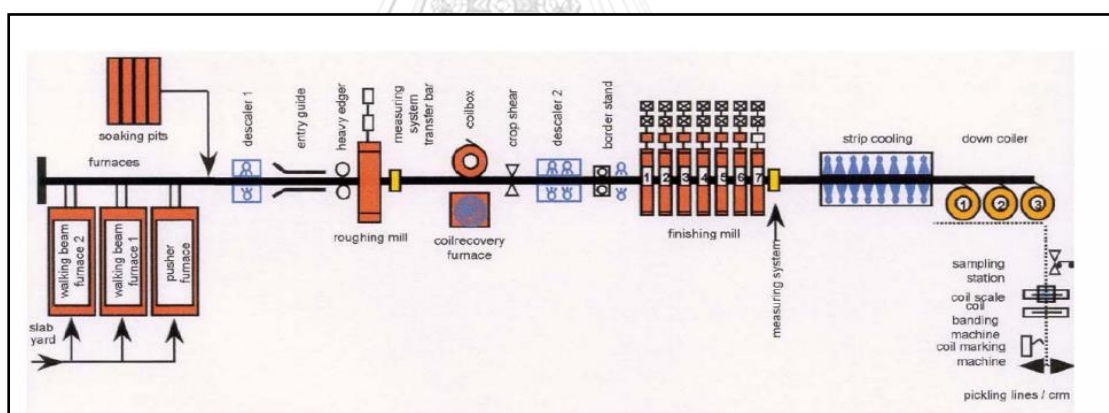
1.3.1 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน หรือเหล็กม้วนดำ

การนำเหล็กกล้าที่มีรูปทรงเป็นแท่งแบน (Slab) มาผ่านกระบวนการรีดร้อน ลดขนาดความหนาและความกว้างที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,250 °C ด้วยแท่นรีดขนาดใหญ่ และรีดลดขนาดให้เป็นแผ่นที่มีความหนาตามที่ต้องการ (ความหนาประมาณ 0.9 มม. ถึง 20 มม.) จากนั้นจึงทำให้เย็นลงโดยการผ่านน้ำหล่อเย็น แล้วเข้าสู่เครื่องม้วน (รูปที่ 1.2) เมื่อผลิตเสร็จเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ได้จะมีผิวสีเทาดำและอยู่ในลักษณะเป็นม้วนเรียกว่า “เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน หรือ เหล็กม้วนดำ” เพื่อสะดวกต่อการเก็บรักษา ขนส่งเคลื่อนย้าย และสะดวกในการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป

และขั้นตอนในกระบวนการรีดร้อน (Hot Strip Mill process) ประกอบด้วยกระบวนการ ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 แผนผังไลน์การผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนของกระบวนการรีดร้อนตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ

ขั้นตอนของกระบวนการรีดร้อน มีดังต่อไปนี้

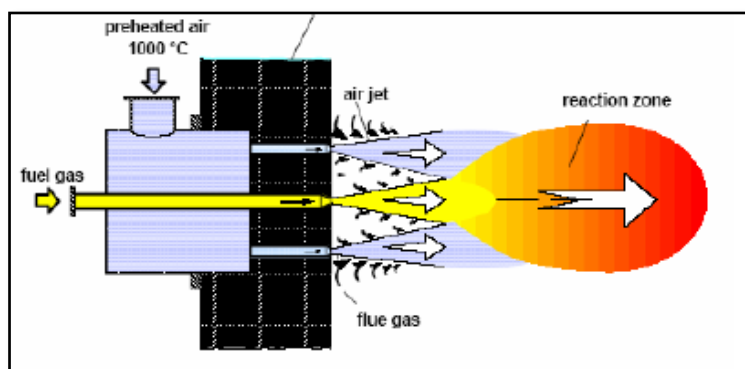
1) นำเหล็กแท่งแบนไปอบในเตา Reheating furnace ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200-1,300 องศาเซลเซียส เพื่อปรับโครงสร้างของเหล็กแท่งแบนให้มีความสม่ำเสมอทั้งก้อน โดยจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

1.1) การอุ่นเหล็กแท่งแบน (Preheating) ที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที

1.2) การให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งแบน (Heating) ที่อุณหภูมิ 1,250 °C ใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที

1.3) การบ่มเหล็กแท่งแบนให้มีอุณหภูมิเท่ากันทั้งก้อน (Soaking) ที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

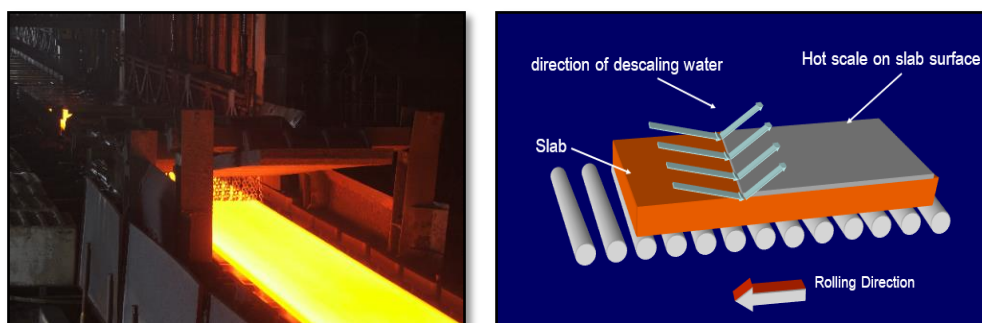
เทคนิคการให้พลังงานความร้อนภายในเตาจะใช้ตัวทำความร้อน (Burner) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลว หรือก๊าซ กับอากาศซึ่งกล่าว คือ ออกซิเจน



รูปที่ 1.4 การทำงานของ Burner (High temperature furnace ,Pfeifer)

2) เมื่อเหล็กแท่งแบน ออกจากเตาเผา อุณหภูมิจะสูงอยู่มาก (1000°C) ส่งผลให้ความต้านทานการแปรรูปของเหล็กลดลง ส่งผลให้รีดลดความหนาของเหล็กได้ง่ายขึ้น

3) เมื่อเหล็กออกจากเตา จะสัมผัสกับอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นสนิม จึงถูกนำเข้าสู่เครื่องที่มีชื่อว่า De-Scaling box คือการฉีดน้ำแรงดันสูง (160 บาร์) ลงบนเหล็กแท่งแบน เพื่อไล่สเกลออกไซด์ หรือ สนิม ที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กแท่งแบนหลังจากออกจากเตา



รูปที่ 1.5 เครื่อง De-scaling box

4) เหล็กแท่งแบนจะถูกนำเข้าสู่เครื่องรีดขอบ (Edger) เพื่อทำการรีดขอบของเหล็กแท่งแบน เพื่อปรับความกว้างตามที่ต้องการ

5) เหล็กแท่งแบน ถูกนำเข้าสู่เครื่องรีดหยาบ (Roughing Mill) เพื่อทำการรีดก้อนเหล็กแท่งแบน ให้มีขนาดบางลง (บางลงเหลือ 28-40 มม.) โดยการรีดกลับไป-กลับมา จำนวน 5-7 ครั้ง โดยแต่ละ ครั้งของการรีดจะทำให้ความหนาของเหล็กถูกรีดลดลงประมาณ 5-13 % (เหลือความหนาประมาณ 100 มม.) จะเรียกว่า บาร์ (Bar) ตัวอย่างการกำหนดขั้นตอนการรีดหยาบ เช่น อุณหภูมิ ก่อนการรีดหยาบ (Reheating temperature) 1200°C ความหนาเริ่มต้นของเหล็กแท่งแบน อยู่ที่ 220 มม. เมื่อรีดกลับไป-กลับมา จำนวน 9 รอบ อุณหภูมิสุดท้ายหลังรีดหยาบคือ 1000 °C ความหนาสุดท้ายของเหล็กแท่งแบน อยู่ที่ 100 มม. เป็นต้น

โดยระหว่างที่เหล็กที่มีอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านแท่นรีดเพื่อลดขนาดนั้น จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Restoration process ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเป็นออสเตไนท์ จะเปลี่ยนแปลงด้วยกลไก 2 แบบตามลำดับ

- การฟื้นตัว (Recovery) เป็นกลไกที่เกิดขึ้น เพื่อลดพลังงานที่สะสมภายในเนื้อเหล็กอันเป็นผลมาจากการแปรรูปขณะรีด โดยดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นจากการรีดจะเคลื่อนที่และเรียงตัวกันเป็นชั้นเกรนภายในเกรนของเหล็กให้ถูกรีดให้ยาวออก
- การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) จะเกิดต่อจากการเกิด Recovery โดยจะเกิด เกรนใหม่ขนาดเล็กซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเกิดขึ้นภายในชั้นเกรนหรือ เกรนของเหล็กที่ถูกรีดให้ยาวออก โดยการเกิดเกรนใหม่ที่ขนาดเล็กเหล่านี้จะทำให้พลังงานที่สะสมภายในเนื้อเหล็กลดลงหรือหมดไป

ในแง่ของคุณสมบัติของวัสดุ การเกิด Restoration process จะทำให้ได้โครงสร้างออสเตไนท์ที่มีขนาดเกรนเล็กลักษณะกลม และปราศจากพลังงานสะสมในเนื้อเหล็ก ส่งผลให้เหล็กถูกแปรรูปได้ง่ายในกระบวนการรีดร้อน โดยการเกิด Restoration process แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ ถ้าเกิดในระหว่างเหล็กถูกรีดใน Roll gap จะเป็นแบบ Dynamic หากเกิดหลังจากเหล็กออกจาก Roll gap จะเป็นแบบ Static

สำหรับขั้นตอนการรีด ลักษณะและอัตราการเกิด Restoration process จะขึ้นกับ

- ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก
- อุณหภูมิของเหล็ก
- ขนาดเกรนและโครงสร้าง ออสเตไนท์ก่อนเข้าถูกรีด
- อัตราการลดลงของความหนาเหล็ก

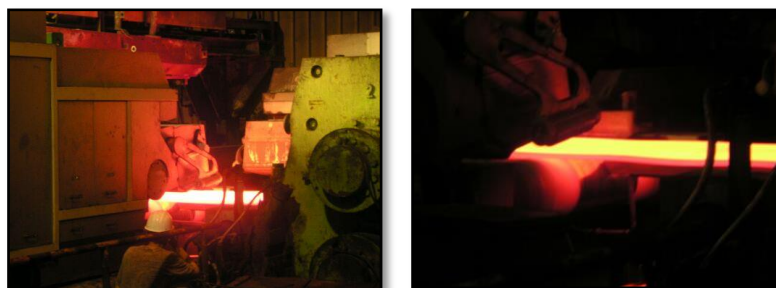
- ความเร็วในการรีด

6) บาร์ (Bar) จะถูกนำเข้าสู่เครื่อง Coil Box ซึ่งมีหน้าที่สำหรับทำการม้วนเหล็ก เพื่อลดการสูญเสียความร้อนในกระบวนการ โดยเป็นลักษณะม้วนเพื่อถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างเหล็กเพื่อรักษาคุณสมบัติของเหล็กในการรีดให้สม่ำเสมอ



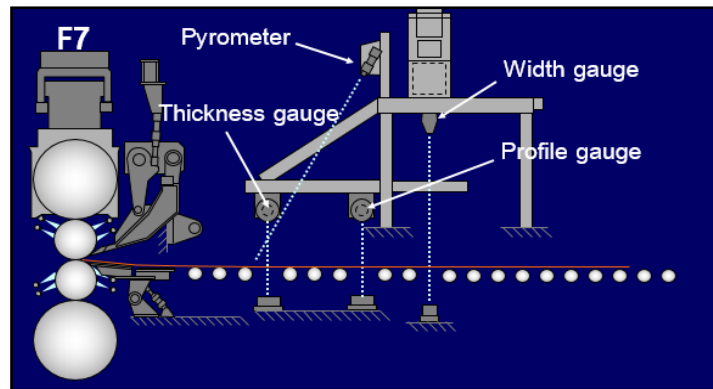
รูปที่ 1.6 เครื่อง Coil box

7) บาร์ (Bar) จะเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความร้อนบริเวณขอบ เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่สูญเสียโดยอุปกรณ์เพิ่มความร้อนที่ขอบเหล็ก (Edge Induction Heater) สำหรับชดเชยความร้อนที่บริเวณขอบชิ้นงานที่สูญเสียไปในกระบวนการ ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการเกิดลักษณะเกรนผสม (Mix Grain) ที่ขอบของเหล็ก เนื่องจากบริเวณขอบจะสูญเสียอุณหภูมิได้ง่ายกว่าตรงกลางของเหล็กในกระบวนการรีดร้อน เนื่องจากการสัมผัสอากาศได้ง่ายกว่า

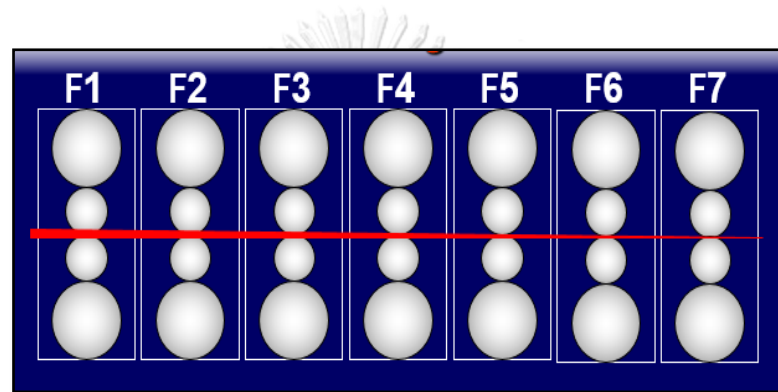


รูปที่ 1.7 อุปกรณ์เพิ่มความร้อนที่ขอบเหล็ก (Edge Induction Heater)

8) บาร์ (Bar) จะถูกนำเข้าสู่เครื่องรีดละเอียด หรือ Finishing mill เพื่อทำการรีดให้บางลงตามความต้องการ เมื่อผ่านกระบวนการนี้โดยบาร์ (Bar) ที่ถูกรีดลดขนาดจะถูกเรียกว่า “Strip” ซึ่งจะรีดจนเหลือความหนาตามที่ลูกค้าต้องการ (1 - 20 มม.) และผ่านระบบเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบความหนาโดย Thickness gauge และวัดอุณหภูมิที่ Strip โดย Pyrometer



รูปที่ 1.8 เครื่อง Thickness gauge และเครื่อง Pyrometer



รูปที่ 1.9 ชุดแท่นรีด 7 ชุดสำหรับกระบวนการรีดละเอียดที่ Finishing mill

9) Strip จะถูกนำไปผ่านม่านน้ำตก หรือ Laminar Flow เพื่อลดอุณหภูมิของ Strip โดยอุณหภูมิของ Strip จะเหลืออยู่ที่ 520-680 °C หลังผ่านม่านน้ำตก โดยเป็นกระบวนการสำคัญในการควบคุมโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก เพื่อกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก



รูปที่ 1.10 ม่านน้ำตก หรือ Laminar flow

10) ทำการม้วน Strip เป็น Coil เพื่อส่งให้ลูกค้า โดยเรียกผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot Rolled Coil)



รูปที่ 1.11 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot Rolled Coil)

1.3.2 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนประเภทล้างผิวและเคลือบน้ำมัน (Hot-rolled coil pickled & oiled)

การนำเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนมาผ่านกระบวนการล้างผิวเพื่อนำเอาเหล็กออกไซด์สีดำที่ผิวออก แล้วเคลือบฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิม ผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนประเภทล้างผิวและเคลือบน้ำมัน จึงมีผิวสีเทาขาว สวยงาม จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการต่อเนื่อง อาทิ การตัดพับขึ้นรูป การชุบสังกะสี และการพ่นสี เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์และเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือ ตัดเป็นม้วนตามความหนาที่ต้องการเพื่อใช้ในการขึ้นรูปและผลิตท่อเหล็ก ตลอดจนสามารถใช้แทนเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีความหนามากกว่า 1.2 มม.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ผลิตภัณฑ์ของบริษัทการศึกษา

1.4.1 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil)

เหล็กแผ่นที่ผลิตโดยการนำเหล็กกล้าที่มีรูปทรงเป็นแท่งแบน หรือ Slab ความหนาประมาณ 200 ถึง 250 มม. มาผ่านกระบวนการรีดร้อน ลดขนาดความหนาและความกว้างที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,250 องศาเซลเซียส ด้วยแท่นรีดขนาดใหญ่ รีดลดขนาดให้เป็นแผ่นที่มีความหนาตามที่ต้องการ (ความหนาประมาณ 0.9 มม. ถึง 20 มม. จากนั้นจึงทำให้เย็นลงโดยการผ่านน้ำหล่อเย็นแล้วเข้าสู่เครื่องม้วน เมื่อผลิตเสร็จเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ได้จะมีผิวสีเทาดำและอยู่ในลักษณะเป็นม้วน (Coil) เรียกว่า เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot-rolled coil) หรือ เหล็กม้วนดำ (Black coil) เพื่อสะดวกต่อการเก็บรักษา ขนส่งเคลื่อนย้าย และสะดวกในการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป โดย

ผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) สำหรับการใช้ในประเทศ และตามมาตรฐานคุณภาพสากลเช่น Japanese Standard ,American Standard ,DIN Standard ,British Standard และอื่นๆ โดยเหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป ขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้าและการนำไปใช้งาน

1.4.2 เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนประเภทล้าผิวและเคลือบน้ำมัน (Pickled and oiled coil)

เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดพิเศษนี้ ถือเป็นประเภทหนึ่งของเหล็กแผ่นรีดร้อน ซึ่งผลิตโดยนำเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนมาผ่านกระบวนการล้าผิวเพื่อนำเอาเหล็กออกไซด์สีดำที่ผิวออก แล้วเคลือบฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิม ผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนประเภทล้าผิวและเคลือบน้ำมัน จึงมีผิวสีเทาขาว สวยงาม จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการต่อเนื่อง อาทิ การตัดพับขึ้นรูป การชุบสังกะสีและการพ่นสีเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์และเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือตัดเป็นม้วนตามความหนาที่ต้องการเพื่อใช้ในการขึ้นรูปและผลิตท่อเหล็ก ตลอดจนสามารถใช้แทนเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีความหนามากกว่า 1.2 มม.

โดยเหล็กแผ่นรีดร้อนสามารถนำไปใช้งาน โดยจำแนกประเภทได้ ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 โครงสร้างห่วงโซ่อุปทานของธุรกิจเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน และการนำไปใช้ประโยชน์

1.5 ที่มาและความสำคัญ

การผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีคุณภาพเป็นสิ่งสำคัญสำหรับภาวการณ์ที่มีการแข่งขันในอัตราสูง เพื่อป้อนสู่อุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้เหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ไม่

ว่าจะเป็นงานก่อสร้าง ชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ ท่อ หรือถังก๊าซ เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์จะถูกควบคุมภายใต้มาตรฐานอุตสาหกรรม ดังนั้น ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพภายใต้มาตรฐานอุตสาหกรรม และตรงตามลักษณะการใช้งานของลูกค้า โดยเฉพาะกลุ่มลูกค้าในอุตสาหกรรมยานยนต์ คือกลุ่มอุตสาหกรรมที่สร้างกำไรสูงสุดแก่บริษัท ซึ่งต้องการคุณภาพของสินค้าที่สูงที่สุด และมีลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย

สำหรับงานวิจัยจากการศึกษาโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนกรณีศึกษานั้น ทางผู้วิจัยทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเชิงกลตลอดความยาว Coil เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกล และนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสม และตรงตามการใช้งานของลูกค้า ยกตัวอย่างผลกระทบของการผลิตชิ้นงานที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานของลูกค้า ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 ตัวอย่างปัญหาชิ้นงานจากบริเวณแถบขอบ Strip ที่มีขีดขาดเนื่องจากการยึดตัวไม่เหมาะสม

1.6 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างจุลภาค

1.7 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในกลุ่มเหล็กแผ่นรีดร้อนประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชั้นคุณภาพ Hr1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือมอก.528-2548 ความหนา 3 มม. ความกว้าง 1219 มม. ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้งานการขึ้นรูปเป็นหลัก
2. ปัจจัยนำเข้าที่ทำการศึกษา มี 3 ปัจจัย ได้แก่
 - 1) อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (Finishing temperature)

- 2) อุณหภูมิชดเชยที่ชอบ (Compensation temperature)
- 3) ปริมาณธาตุ Boron (Boron quantity)
3. ปัจจัยตอบสนองที่นำมาศึกษาได้แก่ ค่าเชิงกล ได้แก่
 - 1) ค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength; YS)
 - 2) ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile strength; TS)
 - 3) ค่าร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กและปริมาณเกรนผสมที่อุณหภูมิต่างๆ

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเหล็กแผ่นรีดร้อน
2. กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยของตัวแปรที่ศึกษา
3. ดำเนินการทดลอง ตามเงื่อนไขการผลิตที่ตั้งซึ่งผันแปรปัจจัยตามระดับของปัจจัยที่ตั้งไว้ และทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานตลอดความยาว Coil เพื่อนำมาทดสอบ
4. วัดผลค่าของสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength; YS) ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile strength; TS) ค่าร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL) รวมถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กและปริมาณเกรนผสมที่อุณหภูมิต่างๆ
5. วิเคราะห์ตามหลักสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิตที่จะต้องนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิต
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆ
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.9 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถยกระดับมาตรฐานคุณภาพของการผลิตให้สูงขึ้น
2. สามารถรับทราบระดับปัจจัยของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อกำหนดเป็นพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิต เพื่อลดปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต
3. สามารถนำไปต่อยอดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆต่อไป และสามารถสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้า

1.10 ผลที่จะได้รับ

สามารถระบุปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าเชิงกล และสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการผลิตได้จริง



1.11 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงาน	ปี พ.ศ. 2562 - 2563									
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค
1. ศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเหล็กแผ่นรีดร้อน	■	■								
2. กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยของตัวแปรที่ศึกษา	■	■								
3. ดำเนินการทดลอง ตามเงื่อนไขการผลิตที่ตั้งซึ่งมีนแปรปัจจัยตามระดับของปัจจัยที่ตั้งไว้ และทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานตลอดความยาว Coil เพื่อนำมาทดสอบ	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4. วัดผลค่าของสมบัติเชิงกล ได้แก่ Yield strength, Tensile strength และ %Elongation รวมถึงลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค										
5. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ตามหลักสถิติเชิงวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบสมมติฐาน การวิเคราะห์ ANOVA เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิต ที่จะต้องนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิต และสรุปผล										
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆ										
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์										

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน ซึ่งจะนำเสนอตั้งแต่กระบวนการผลิตเหล็กแรกเริ่ม จนถึงกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน ประเภทของเหล็กแผ่นรีดร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปของโลหะ รวมไปถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) โดยทางผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำทฤษฎีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยใช้กระบวนการออกแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบดูว่าปัจจัยหรือตัวแปรใดๆ ที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ เพื่อยืนยันและพิสูจน์ข้อเท็จจริงจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ เพื่อนำมาออกแบบกระบวนการทดลอง วิเคราะห์ผลจากการปรับปรุง และสามารถนำมาปรับใช้ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการให้เกิดความสอดคล้อง และเกิดประสิทธิภาพสูงสุดกับงานวิจัยนี้

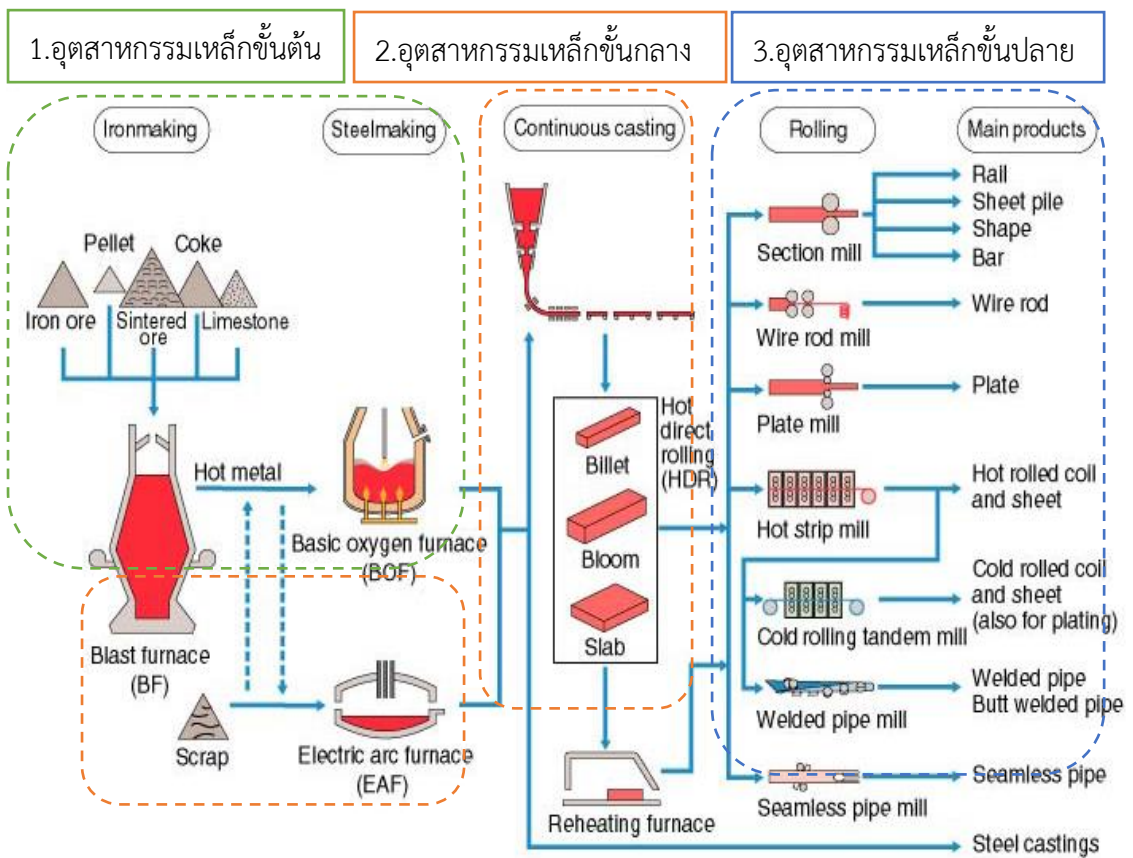
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้ามีหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ การถลุงเหล็ก การผลิตเหล็กกล้า การหล่อ การแปรรูป เช่น การรีด การตีขึ้นรูป และการตกแต่งขั้นสุดท้าย เช่น การเคลือบผิว การอบชุบความร้อน เป็นต้น จนกระทั่งได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้า ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. การผลิตเหล็กขั้นต้น (Iron Making)
2. การผลิตเหล็กขั้นกลาง (Steel making & Casting)
3. การผลิตเหล็กขั้นปลาย (Steel forming)

2.1.1 การผลิตเหล็กขั้นต้น หรือ การถลุงหรือ การผลิตเหล็ก (Iron Making)

เหล็กนับเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดในโลก ในธรรมชาติเหล็กจะอยู่ในรูปของออกไซด์ (Oxide) เป็นส่วนใหญ่ แต่ก็มีอยู่ในรูปของสารประกอบอื่นด้วย เช่น คาร์บอเนต (Carbonate), ซัลไฟด์ (Sulphide) และซิลิเกต (Silicate) การที่เหล็กอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆนี้ก็เนื่องจากว่าที่บรรยากาศและอุณหภูมิกปกติ เหล็กจะมีเสถียรภาพน้อยกว่าสารประกอบของมัน เราเรียกสารประกอบของเหล็กเหล่านี้ว่า แร่เหล็ก (Iron ore) การจะนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ได้จะต้องนำแร่เหล็กไปถลุง แร่เหล็กที่สำคัญได้แสดงในตาราง 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเหล็กตั้งแต่อุตสาหกรรมขั้นต้น จนถึงอุตสาหกรรมขั้นปลาย

ตารางที่ 2.1 แร่เหล็กที่สำคัญ

ชื่อเรียก	สูตรเคมี	สี	ปริมาณเหล็กเจืออยู่
แมกนีไตต์ (Magnetite)	Fe_3O_4	เทา, ดำ	45-70%
เฮมาไตต์ (Hematite)	Fe_2O_3	เทา, ดำ, แดง	40-65%
ลิโมนาइट (Limonite)	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$	น้ำตาล, ดำ, แดง	40-60%
ไซด์โคไรต์ (Siderite)	$FeCO_3$	เหลือง, น้ำตาล, เทา	25-40%
ไพไรต์ (Pyrite)	FeS_2	เหลือง	60-65%

- 1) การเตรียมสินแร่ แบ่งออกเป็นหลายขั้นตอน ดังนี้
 - 1.1) บดแร่ (ore crushing) สินแร่ที่นำมาจากเหมืองอาจจะมียุทธศาสตร์ใหญ่ถึง 1 เมตร ก่อนนำไปถลุงจึงต้องบดหลายขั้นตอน
 - ขั้นตอนแรก บดให้มีขนาด 100-300 มม. โดยใช้ Jaw crusher หรือ gyratory crusher
 - ขั้นตอนที่สอง บดให้มีขนาด 10-50 มม. ใช้ roll crusher
 - ขั้นตอนที่สาม บดให้มีขนาด 2-20 มม. ใช้ ball mills หรือถ้าจำเป็นอาจจะบดให้ละเอียดถึง 0.05 มม.
 - 2) คัดขนาด (sizing) หลังจากผ่านการบดแต่ละขั้นตอน ต้องร่อนด้วยตะแกรงเพื่อคัดขนาด
 - 3) แต่งแร่ (ore dressing) หรือ กำจัดสารมลทินจากแร่เหล็ก เพื่อให้มีปริมาณแร่เหล็กมากขึ้น

กระบวนการขึ้นอยู่กับสถานะทางกายภาพของสินแร่ มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางได้แก่ การแยกสินแร่ด้วยแม่เหล็ก แร่เหล็กจะเหนียวน้ำ ด้วยแม่เหล็กได้ง่าย ถึงแม้จะใช้แม่เหล็กถาวร ที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กน้อยก็เป็นการเพียงพอ โดยจะสามารถแยกเหล็กออกมาได้ระหว่าง 10-20 ตัน/ต่อชั่วโมง แร่เหล็กจะต้องมีการบดเปียกให้เป็นเม็ดละเอียดขนาด 0.01-2 มม.มาก่อน หากต้องการแยกเหล็กให้ได้ปริมาณ 100 ตัน/ต่อชั่วโมง จะต้องใช้แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กมาก และต้องบดให้มีเม็ดละเอียด ขนาด 0.02-1 มม.มาก่อนหลังจากแต่งแร่แล้วต้องนำสินแร่ที่ได้ไปผสมกัน (ore blending) เพื่อให้มีปริมาณเหล็กสม่ำเสมอ (แตกต่างกันไม่เกิน $\pm 1\%$) อย่างไรก็ตาม สินแร่ที่ได้จากการแต่งแร่นั้นเป็นเม็ดละเอียดไม่สามารถใช้กับเตาสูงได้ จึงต้องนำไปอัดให้เป็นก้อนขนาดพอเหมาะซึ่งเรียกว่า ซินเตอร์ (Sintering) ซึ่งเป็นการนำ เอาแร่ที่บดและแยกมาแล้วมาผสมกับผงถ่าน (ประมาณ 5%) และความชื้นแล้วอบเพื่อให้เป็นของแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 900-1200 องศาเซลเซียส เสร็จแล้วจึงทุบให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ สำหรับแร่ที่มีความละเอียดมากที่ยากต่อการซินเตอร์ หรือแร่ที่มีความเข้มข้นของเหล็กสูง จะทำให้เป็นเพลเลท (pelletizing) โดยการนำ แร่มาผสมกับน้ำและสารเกาะตัว (เช่นเบนโทไนท์) แล้วจึงทำให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-30 มม. อบที่อุณหภูมิ ประมาณ 1000-3000 องศาเซลเซียส เพลเลทที่ได้นี้จะมีขนาดพอเหมาะที่จะทำให้อากาศร้อนผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับแร่เป็นไปอย่างทั่วถึง

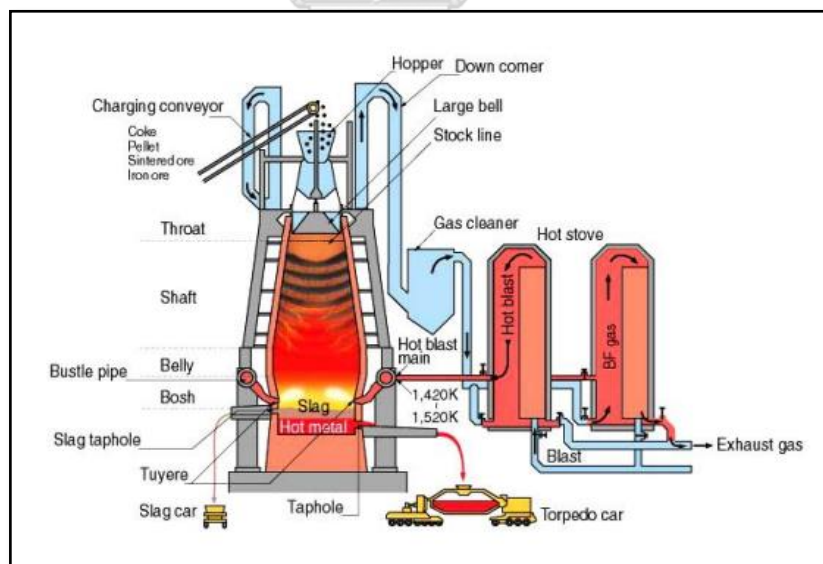
การผลิตเหล็กขั้นต้น เป็นการนำสินแร่เหล็กมาถลุง (Iron Making) เพื่อแยกธาตุเหล็ก (Ferrous; Fe) ออกจากสินแร่ที่อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์โดยมีวัตถุดิบเพิ่มเติม เช่น ถ่านหิน (Coal) ถ่านโค้ก (Coke) ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) เป็นตัวลดออกซิเจนในแร่และเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการถลุง และใช้หินปูน (Limestone) เพื่อจับสิ่งสกปรกออกมาเป็นตะกั่ว (Slag) ผลผลิตที่

ได้อาจอยู่ในรูปของเหลวที่เรียกว่า น้ำเหล็กหลอมเหลว (Hot metal) หรืออยู่ในรูปของแข็งที่เรียกว่า เหล็กถลุง (Pig iron) หรือเหล็กพูน (Sponge iron) ซึ่งเป็นวัตถุดิบพื้นฐานในการผลิตเหล็ก (Iron) และเหล็กกล้า (Steel) เหล็กที่ได้จากการถลุงจะประกอบไปด้วยคาร์บอน (Carbon) ประมาณ 4.5% และ สารมลทิน (Impurities) ต่างๆ ซึ่งทำให้เหล็กมีความเปราะ (Brittleness) มากเกินไป ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จึงจำเป็นต้องมีการปรุงส่วนผสมต่างๆ ในขั้นตอนการผลิตเหล็กชั้นกลาง เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามที่ต้องการ สำหรับขั้นตอนการถลุงเหล็ก (Iron Making) นั้น เป็นการแยกเหล็กออกจากแร่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์เพื่อให้ได้เหล็กที่มีปริมาณของสารมลทินต่างๆ น้อยลง

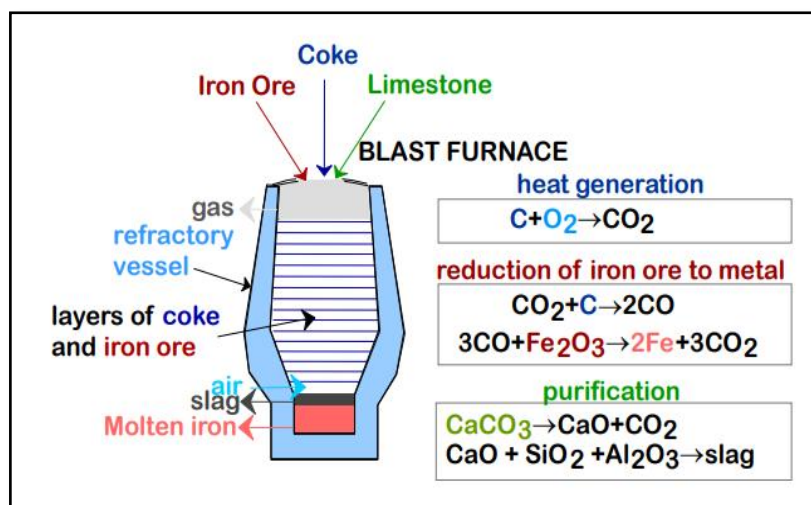
แบ่งลักษณะการถลุงเหล็กได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

1) การใช้เตาถลุงแบบพ่นลม (Blast Furnace)

วิธีดังกล่าว เป็นการใช้อากาศร้อนพ่นเข้าไปในเตาถลุงซึ่งมีแร่เหล็กและโค้กคละกัน อยู่ อุณหภูมิภายในเตาถลุงนี้จะสูงมากประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส เหล็กที่ได้จึงเป็นเหล็กเหลว ซึ่งปกติแล้วจะหล่อออกมาเป็นแท่ง เรียกว่า เหล็กพิก หรือเหล็กถลุง (Pig Iron) การถลุงเหล็กโดยวิธีนี้จะผลิตได้คราวละมากๆ จึงเหมาะสำหรับการผลิตขนาดใหญ่ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนสูง



รูปที่ 2.2 กระบวนการถลุงแร่เหล็กด้วยเตาพ่นลมหรือ Blast furnace



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นในเตาพ่นลม หรือ Blast furnace

2) การใช้เตาถลุงอุณหภูมิต่ำ (Direct Reduction)

วิธีดังกล่าว เป็นการใช้ก๊าซที่เป็นรีดิวซิ่ง (reducing gas) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน เป็นต้น พ่นเข้าไปในเตาถลุงที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 °C สารประกอบของเหล็กจะทำปฏิกิริยากับก๊าซเหล่านี้กลายเป็นเหล็กในสถานะของแข็งเรียกว่า เหล็กฟรูน (Sponge Iron) การผลิตเหล็กฟรูนจะเป็นการผลิตขนาดเล็กเท่านั้น กระบวนการถลุงเหล็กแบบนี้มีหลายลักษณะและมีชื่อเรียกหลายอย่าง ซึ่งจะแตกต่างกันในรายละเอียดแต่จะอาศัยหลักการดังกล่าวข้างต้น ยกตัวอย่างเช่น Coal based reduction ซึ่งเหมาะกับประเทศที่มีสินแร่เกรดดี แต่มีแก๊สธรรมชาติน้อย และมีถ่านหินสำหรับผลิตถ่านโค้ก , Gas based reduction ซึ่งมีชื่อเทคนิคที่ทางการค้าที่หลายหลาย เช่น MIDREX ,HYL ,FIOR และ IRON CARBIDE เป็นต้น

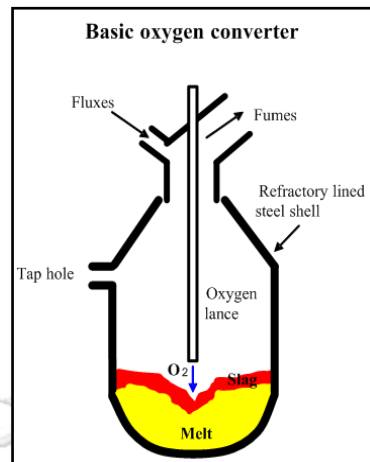
2.1.2 การผลิตเหล็กขั้นกลาง-การผลิตเหล็กกล้า (Steel making) และการหล่อ (Casting)

จากขั้นตอนการผลิตเหล็กขั้นต้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว รวมถึงเศษเหล็กนำมาหลอมรวมกันและจะมีขั้นตอนของการผสมน้ำเหล็กกล้า (Liquid steel) เพื่อปรับ เปลี่ยนคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำเหล็กกล้า ปรับปรุงคุณสมบัติปรับค่าส่วนผสมทางเคมีอุณหภูมิและ ความสะอาดให้เที่ยงตรงและดียิ่งขึ้น

การผลิตเหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1) การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace: BOF)

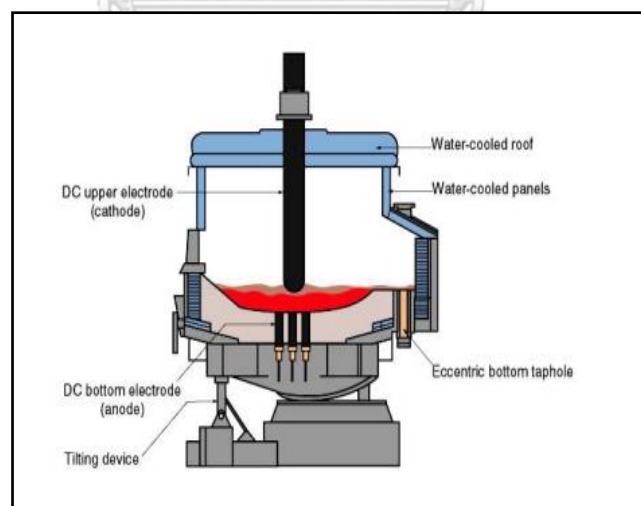
วิธีนี้เป็นกรนำน้ำเหล็กหลอมเหลว หรือเหล็กถลุง มาผสมกับเศษเหล็ก และลดปริมาณคาร์บอนให้เหลือ 0-1.5% โดยการเป่าก๊าซออกซิเจนผ่านโลหะในเตา Converter เพื่อให้กลายเป็นเหล็กกล้าหลอมเหลว



รูปที่ 2.4 เตา Basic oxygen furnace

2) การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

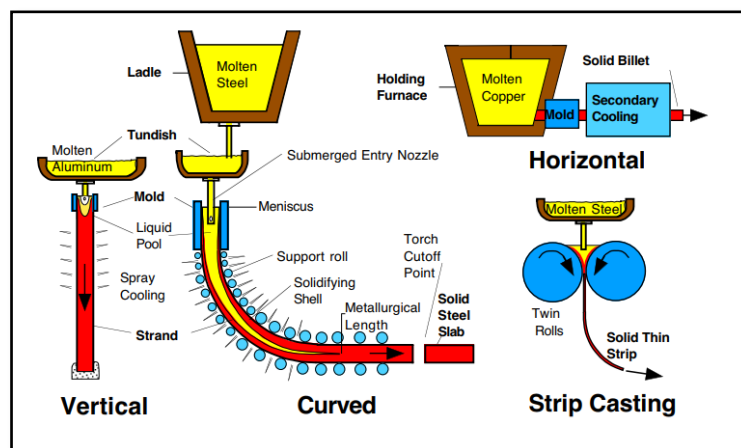
วิธีนี้ถูกเอามา ใช้สำหรับการหลอมเศษเหล็ก โดยเศษเหล็กที่ถูกหมุนเวียนมาใช้ใหม่ จะถูกหลอมด้วยและเปลี่ยนแปลง ไปเป็นเหล็กกล้าคุณภาพด้วยการอาร์คไฟฟ้ากำลังสูง



รูปที่ 2.5 เตาอาร์คไฟฟ้า

เหล็กกล้าหลอมเหลวที่ได้จะถูกนำไปสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะได้เป็น ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้ากึ่งสำเร็จรูป (Semi-finished steel product) จะมีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภท คือ 1) เหล็กแท่ง

เล็ก (Billet) 2) เหล็กแท่งแบน (Slab) 3) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom หรือ Beam blank) และ 4) อินกอต (Ingot) ทั้งนี้ เหล็ก (Iron) และเหล็กกล้า (Steel) มีความแตกต่างกัน โดยเหล็กจะมีส่วนผสมของคาร์บอนมากกว่า 2% ขณะที่เหล็กกล้าจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 2% และผลิตภัณฑ์เหล็กที่ใช้กันส่วนใหญ่เกือบทั้งหมดเป็นเหล็กกล้า ขณะที่เหล็กจะใช้สำหรับงานที่ต้องหล่อมาเป็นผลิตภัณฑ์ หรือเรียกกันว่าเหล็กหล่อ (Cast iron)



รูปที่ 2.6 กระบวนการหล่อต่อเนื่อง (Continuous casting) ลักษณะต่างๆ

2.1.3 การผลิตเหล็กขึ้นปลาย-การขึ้นรูปเหล็กกล้า (Steel forming)

เป็นการนำผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าสำเร็จรูปไปผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งมีหลายกระบวนการทั้งการแปรรูปร้อน (Hot forming) การรีดเย็น (Cold forming) การเคลือบผิว (Coating) อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า การอบชุบความร้อน (Heat treatment) การทุบขึ้นรูป (Hot forging) การทุบขึ้นรูปเย็น (Cold forging) การกลึงไสตัดเจาะ (Machining) การเชื่อม (Welding) การผลิตท่อเหล็ก การตีขึ้นรูปรวมถึงการหล่อ เหล็ก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรก คือ เหล็กทรงยาว ได้แก่ เหล็กเส้น เหล็กหลอดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนประเภทที่สองคือ เหล็กทรงแบน ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น เหล็กขึ้นรูปเย็น โดยทั่วไปการขึ้นรูปเหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ

2.1.3.1 การขึ้นรูปขั้นปฐมภูมิ (Primary forming)

เป็นวิธีที่ถูกประยุกต์ใช้กับเหล็กแท่งแบน (Slab) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแท่งยาว (Billet) ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องมา ซึ่งขั้นตอนนี้จะช่วยทำให้เกิดการลดหรือเปลี่ยนแปลงรูปทรง เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในเนื้อ โลหะ ผลิตภัณฑ์ในขั้นนี้ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อน

เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน เหล็กเส้นสำหรับเสริม คอนกรีต เหล็กลวด เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ เป็นต้น



เหล็กเส้น



เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ



เหล็กลวด



เหล็กเปลวขาว



ท่อไร้ตะเข็บ



ลวดเหล็ก

รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าทรงยาว



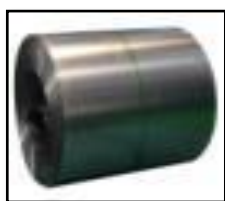
เหล็กแผ่นหนา



เหล็กม้วน/เหล็กแผ่นบาง



เหล็กแผ่นล้างผิวและเคลือบน้ำมัน



เหล็กแผ่นรีดเย็น



เหล็กแผ่นเคลือบ



เหล็กรูปพรรณ



ท่อเชื่อม

รูปที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าทรงแบน

2.3.1.2 การขึ้นรูปขั้นทุติยภูมิ (Secondary forming)

กระบวนการในขั้นตอนนี้ ได้แก่ การผลิตการแปรรูปและการตกแต่งงานขั้นสุดท้าย (Manufacturing, Fabrication & Finishing) เพื่อให้ชิ้นส่วนเหล็กกล้าขั้นสุดท้าย มีรูปทรงและคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการ ซึ่งแบ่งย่อยเป็น กระบวนการต่างๆ ได้แก่ การเปลี่ยนรูปทรง (Shaping) เช่น การรีดเย็น (Cold rolling) การกลึงแปรรูป (Machining) เช่น การเจาะ การต่อประสาน (Joining) เช่น การเชื่อม (Welding) เป็นต้น การเคลือบผิว (Coating) เช่น การชุบสังกะสี (Galvanizing) เป็นต้น การทำกรรมวิธีทาง ความร้อน (Heat treatment) เช่น การเทมเปอร์ริง (Tempering) และการทำกรรมวิธีปรับปรุงผิว (Surface treatment) เช่น การทำคาร์บูไรซิง (Carburizing) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีการแปรรูปขั้นสุดท้าย (การขึ้นรูปขั้นทุติยภูมิ)

2.2 ประเภทของเหล็กกล้า

วัสดุที่ประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก (Iron: Fe (Ferrous)) เป็นสารตั้งต้นพื้นฐาน แล้วก็มีการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเนื้อเหล็ก โดยทั่วไปแล้วในเหล็กกล้าจะมีธาตุเหล็กอยู่มากกว่า 90% ที่เหลือจะเจือผสมกับธาตุอื่น ๆ เช่น โมลิบดีนัม, นิกเกิล, แมงกานีส ฯลฯ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีธาตุเหล็กอยู่สูงถึง 99% ที่เหลือจะเป็น คาร์บอน และอาจมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่เล็กน้อยในเนื้อเหล็กกล้า เหล็กกล้าคาร์บอนนั้นธาตุที่เป็นหลักก็คือเหล็ก และคาร์บอน โดยเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ไปผสม จะมีค่าอยู่ที่ไม่เกิน 2 % ซึ่งพบโดยส่วนใหญ่ในท้องตลาดจะมีคาร์บอนที่ประมาณ 0.15-1.0% สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่น้อยจะมีความยืดหยุ่น (ความเหนียว) มากกว่าเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่มาก แต่ถ้ามีคาร์บอนผสมลงไปในเนื้อเหล็กมากเท่าไร ก็ทำให้เหล็กเกิดความเปราะมากยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้น จะพบว่าเมื่อผสมคาร์บอนเติมเข้าไปในเหล็ก ทำให้เหล็กมีผลต่อความแข็งแรง, ความแข็ง และความเปราะของเหล็ก โดยสามารถแบ่งประเภทของเหล็กกล้าตามส่วนผสมของคาร์บอนได้ ดังนี้

2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low-carbon steel)

เป็นเหล็กกล้าสำหรับนำมาใช้งานทั่ว ๆ ไป จึงมีการนำมาใช้มากที่สุด คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กมีผลสมอยู่ประมาณ 0.05% - 0.35% เมื่อธาตุคาร์บอนมีผลสมอยู่น้อยทำให้มันมีความแข็งและความแข็งแรงแรงไม่มาก ตัวเหล็กกล้าสามารถนำมาแปรรูปด้วยเครื่องมือกล เช่น กลึง, กัด, ใส ได้ง่าย

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีราคาไม่แพง ทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้มาก ตัวอย่างการนำมาใช้งาน เช่น ลวด, ส่วนประกอบยานยนต์, แผ่นเหล็กกล้าวไนซ์ (เหล็กที่เคลือบสังกะสีเพื่อกันสนิม), ถังเก็บน้ำ, ท่อเหล็กขนาดใหญ่, เหล็กโครงสร้างอาคาร และชิ้นส่วนโครงสร้างภายในเรือ หรือยานพาหนะต่าง ๆ ฯลฯ โดยเหล็กกล้าชนิดนี้สามารถนำมาใช้งานได้เป็นอย่างดี การที่ต้องการให้รับภาระได้มากขึ้น ก็ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบทางโครงสร้างก็จะมีส่วนช่วยได้มาก

2.2.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium-carbon steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็ง และความแข็งแรงแรงเพิ่มขึ้นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กประมาณ 0.35% ถึง 0.50% เมื่อเหล็กกล้าชนิดนี้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อน (Heat treatment) แล้ว จะมีคุณสมบัติค่อนข้างแข็ง และแรงแรง เหล็กกล้าชนิดนี้มักถูกจะนำไปทำการตีขึ้นรูป (Forgings) ตัวอย่างการนำไปใช้งาน อาทิเช่น ประแจขันสลักเกลียวต่าง ๆ, แกนล้อ, แกนเพลลา, เพลลาข้อเหวี่ยง และเฟือง ฯลฯ

2.2.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High-carbon steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่สูง คือ มีคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กมากกว่า 0.50% หรืออาจมีมากกว่า 1% เลยก็ได้ (แต่ไม่เกิน 2% เพราะเหล็กจะกลายเป็นเหล็กหล่อ) ถ้าเหล็กกล้าชนิดนี้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนจะทำให้มีความแข็ง และความแข็งแรงแรงที่สูงมาก โดยข้อเสียของความแข็งที่มีมากในเหล็กกล้าชนิดนี้ก็คือ เมื่อเหล็กถูกแรงกระทำค่าหนึ่งจนเสียรูปไป การแตกร้าวและการพังเสียหายก็จะเกิดขึ้นในเนื้อเหล็กได้ง่าย หรือกลายเป็นวัสดุที่เปราะไปเลย เหล็กกล้าคาร์บอนสูงนี้ นิยมนำมาใช้งาน เช่น นำมาทำเครื่องมือ, ทำแม่พิมพ์, มีดตัดงานบางอย่างของเครื่องมือกล, ล้อ กับรางรถไฟ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งสูง

2.3 กระบวนการรีดเหล็ก (Steel rolling) [1]

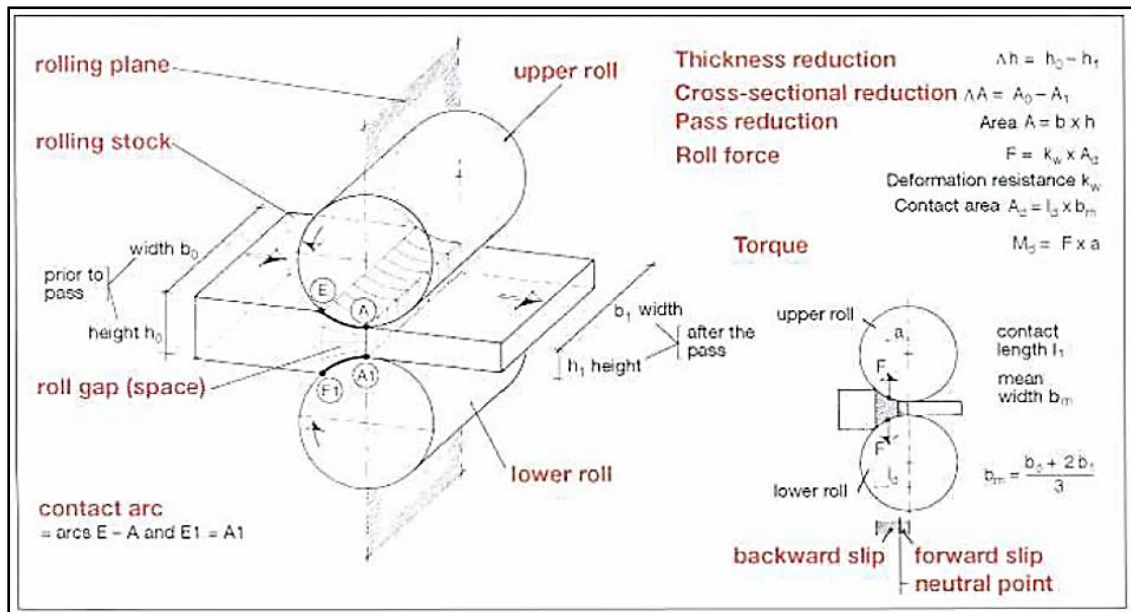
การรีดเหล็กเป็นกระบวนการขึ้นรูปในสภาพของแข็งชนิดหนึ่ง โดยหลักการของกระบวนการขึ้นรูปคือ การทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ด้วยแรงกระทำจากภายนอกที่มากกว่าแรง

ด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ โดยทั่วไปแรงต้านทานการเปลี่ยนแปลงของวัสดุจะมีมากที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้กระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะใช้แรงภายนอกมากกว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังพบว่า การขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในขณะที่การขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Work hardening ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

จากผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อวัสดุ ทำให้สามารถแบ่งกระบวนการขึ้นรูปออกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการขึ้นรูปร้อน และกระบวนการขึ้นรูปเย็นโดยจุดแบ่งระหว่างกระบวนการทั้งสอง คืออุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) สำหรับเหล็กกล้า การขึ้นรูปเย็นจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 800°C และการขึ้นรูปร้อนจะอยู่ในช่วง 800-1150 °C สำหรับอุตสาหกรรม การแบ่งขึ้นรูปร้อนและเย็น จะใช้เกณฑ์ว่า ในกระบวนการให้พลังงานความร้อนเข้าไปเกี่ยวข้องหรือไม่

2.3.1 หลักการพื้นฐานของกระบวนการรีดเหล็ก

กระบวนการรีดเหล็กเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยจะใช้แรงกดและการหมุนของลูกรีด ทำให้เหล็กมีการแปรรูปแบบต่อเนื่อง การแปรรูปด้วยการรีดมักจะเป็นการลดขนาดของ Semi-finish product เช่น Slab ,Billet หรือ Bloom หลักการพื้นฐานของการรีด คือการนำ Semi-finish product ที่มีความหนาขนาด มาผ่านช่องว่างระหว่างลูกรีดทั้ง 2 ตัวเพื่อให้ความหนาของ Semi-finish product ลดลง โดยลูกรีดตัวบน (Upper roll) และลูกรีดตัวล่าง (Lower roll) แกนของลูกรีดทั้งสองจะตั้งฉากกับความยาวแนวความยาวของ Semi-finish product ลูกรีดตัวบนจะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และลูกรีดตัวล่างจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในการรีด ได้แก่ Thickness reduction ,Cross section reduction ,Pass reduction ,Roll force ,Torque ,Roll gap ,Contact arc และ Deformation resistance ดังรูปที่ 2.10

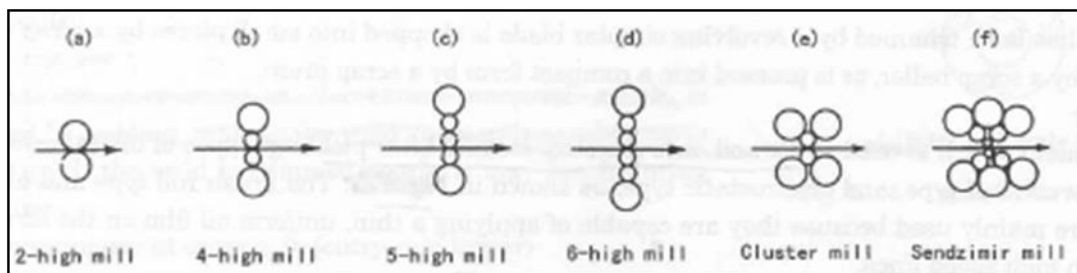


รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบและปัจจัยในกระบวนการรีดเหล็ก (Steelmunual ,Stahl Eisen)

ขั้นตอนในการรีดจะเริ่มจากส่วนปลายของ Semi-finish product ด้านหนึ่งสัมผัสกับลูกรีดทั้งสอง การหมุนของลูกรีดทั้งสองและแรงเสียดทานระหว่างลูกรีด และ ผิวของ Semi-finish product จะมีหน้าที่ดึง Semi-finish product เข้าสู่ระหว่างลูกรีด เนื้อของวัสดุจะเริ่มถูกแปรรูปจากจุดที่ลูกรีดเริ่มสัมผัส Semi-finish product ไปจนกระทั่งจุดที่ Semi-finish product เริ่มออกจากช่องว่างระหว่างลูกรีดทั้งสอง เรียกว่า ระยะ Contact arc

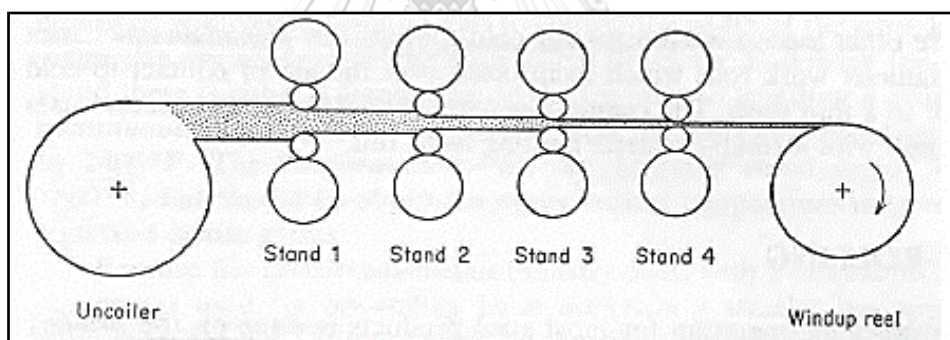
ชนิดของแท่นรีด จะแบ่งตามจำนวนและการเรียงตัวของลูกรีด ดังรูปที่ 2.11 เช่น Two-high mill ซึ่งจะเป็นลูกรีด 2 ตัวประกอบกันบนล่าง และหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน แต่ลูกรีดเล็กจะมีความสามารถในการแปรรูปเพื่อให้เกิดความแข็งแรงน้อยกว่า จึงมีการพัฒนาแท่นรีดชนิด Four high mill ซึ่งแบ่งออกเป็น Work roll หรือ ลูกรีด 2 ตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ส่วนลูกรีดขนาดใหญ่อีก 2 ตัวจะทำหน้าที่เป็นลูกรีดเสริม หรือ Support roll เพื่อเพิ่มความสามารถในการรีดให้กับลูกรีดหลัก

สำหรับแท่นรีดอีกชนิดหนึ่งที่นิยมรีดให้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงให้เป็นแผ่นบาง จะเป็นแท่นรีดกลุ่ม หรือ Cluster ซึ่งหนึ่งลูกรีดหลักจะมีลูกรีดเสริม หรือ Support roll



รูปที่ 2.11 แท่นรีด (Rolling mill) ต่างๆ (Coil Rolled Steel ,The Iron and Steel Institute of Japan , pp.24)

ในกระบวนการรีดเหล็ก เพื่อให้ได้อัตราการผลิตสูง จะนำแท่นรีดหลายๆแท่นมาเรียงกันแบบต่อเนื่อง (Tandem) โดยจะเรียกแต่ละแท่นว่า Strand เช่นดังรูปที่ 2.12 เรียกว่า 4-Strand tandem mill ซึ่งจะมีลูกรีดอยู่ 4 ชุด โดยลูกรีดแต่ละชุดจะมีการลดขนาดผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน ทำให้แต่ละแท่นรีดมีความเร็วไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องกำหนดความเร็วของแต่ละแท่นรีดให้สอดคล้องกัน เช่นความเร็วเข้าของแท่นรีดตัวที่สอง จะต้องเท่ากับความเร็วขาออกของแท่นรีดตัวที่หนึ่ง



รูปที่ 2.12 Four-strand tandem mill (Dieter,G.D.,Mechanical Metallurgy , pp.589)

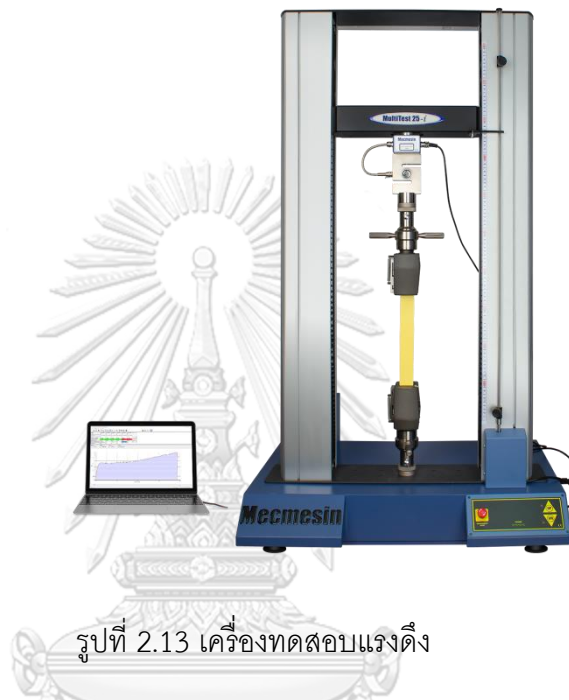
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property Testing)

สมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties) หมายถึงความสามารถในการรับแรง หรือภาระในลักษณะต่างๆ โดยสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญ ได้แก่ ความแข็ง และความแข็งแรง การวัดคุณสมบัติเชิงกลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Hardness Test, Tensile Test, Impact Test เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะการทดสอบแรงดึง หรือ Tensile test

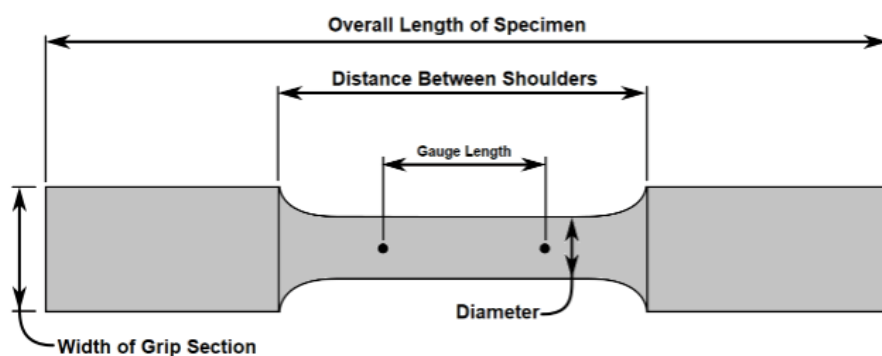
2.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบมาตรฐานเพื่อหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ โดยใช้หลักการทดสอบคือ การดึงชิ้นทดสอบแบบช้าๆ ต่อเนื่องจนจนทดสอบขาดออกจากกัน โดยทำการวัดค่าแรงที่

ใช้ตั้งกับระยะที่ชิ้นทดสอบยึดตัว นำค่าแรงดึงที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียด และหาค่าคุณสมบัติของวัสดุต่อไป ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นกับชนิดของวัสดุนั้น มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials) ,BS (British Standards) ,JIS (Japanese Industrial Standards) รวมทั้ง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.)



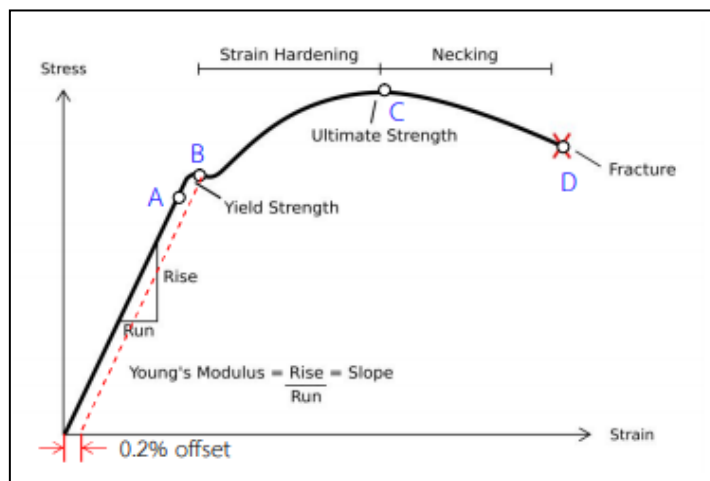
รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2.14 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

กราฟความเค้น - ความเครียดของวัสดุแต่ละชนิด เป็นสิ่งที่แสดงสมบัติของวัสดุนั้นน้อยอย่างว่ามีพฤติกรรมรับแรงและเสียรูปอย่างไร วัสดุต่างชนิดกันจึงมีรูปแบบของกราฟที่ต่างกันไป ค่าสมบัติสำคัญของวัสดุสามารถอ่านได้จากกราฟดังกล่าวนี้ เช่น ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนรับได้

(ความ แข็งแรงแรงดึง) ค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้วัสดุยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (ความแข็งแรงคราก) ค่าโมดูลัส ความยืดหยุ่น เป็นต้น โดยทั่วไปกราฟความเค้น-ความเครียดได้จากการทดสอบแรงดึง ลักษณะของ พฤติกรรมที่ได้สำหรับวัสดุเหนียวทั่วไปเป็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟ Stress-Strain curve

จากรูปที่ 2.15 การทดสอบจะเป็นการดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยึดตัวออกจนถึงจุด A ในขณะนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ จึงได้กราฟเป็นเส้นตรงเรียกจุด A ว่าพิคัดสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิคัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนถึงพิคัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด B ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เรียกว่าจุดคราก (Yield point) และค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับการคงรูปของวัสดุ ค่าความแข็งแรงจุดครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะใช้กำหนดขีดจำกัดค่าความเค้นสูงสุดที่จะเกิดขึ้นบนโครงสร้างหรือชิ้นงานโดยที่ยังไม่เกิดการเสียหาย โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานต้องไม่เกินกว่าค่าความเค้นจุดครากนี้เพื่อ เป็นการป้องกันการเสียหาย ซึ่งนำไปสู่ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) ของชิ้นงานหลังจากจุดครากไปแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวร โดยความเค้นจะเพิ่มอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด C) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะเริ่มขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) จุดสุดท้าย (จุด D) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน

2.5 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก

2.5.1 การวัดขนาดเกรน (Grain size)

ขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ โดยเฉพาะค่าความแข็งแรง (Strength) ของโลหะ กล่าวคือในชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กเป็นจำนวนมากย่อมมีขอบเกรนมากกว่าโลหะ ชนิดเดียวกันที่มีขนาดเกรนโตกว่าบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) หรือขอบเกรนย่อย (Subgrain boundary) ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ซึ่งจะต้องออกแรงกระทำแก่โลหะมากขึ้นเพื่อให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ต่อไปได้ ดังนั้นวัสดุที่มีขนาดเกรนเล็กจึงมีความแข็งแรงสูง ซึ่งเป็นไปตามสมการ Hall-Petch equation (2.1) คือ

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ_i = ความเค้นเสียดทาน (Friction stress)

σ_0 = ความเค้นจุดคราก (Yield stress)

k = Locking parameter

d = ขนาดเกรน (Grain diameter)

จากสมการจะเห็นได้ว่า ยิ่งโลหะมีขนาดเกรนที่เล็กละเอียดมากเท่าใดก็จะทำให้โลหะนั้นมีความเค้นจุดครากสูงขึ้นตามลำดับ ความเค้นจุดคราก คือ ค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเริ่มเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยปกติ Yield strength ใช้เป็นจุดแบ่งพฤติกรรมแบบ Elastic และ Plastic ของวัสดุ เมื่อมีการออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรม ไม่ต้องการให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic or permanent deformation) ในระหว่างใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้วัสดุที่มีค่า Yield strength ที่สูง หรือ ออกแบบให้ชิ้นส่วนนั้นมีขนาดที่ใหญ่พอที่จะรองรับความเค้น (Stress) มากได้ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าขนาดเกรนมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติ ทางกลของโลหะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้วิธีการในการวัดขนาดเกรนของโลหะ ตัวอย่างที่ชัดเจนในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องมีการวัดขนาดเกรนของโครงสร้างเพื่อเป็นการประเมิน ตรวจสอบ และควบคุม คุณภาพของโลหะ คือ การวัดขนาดเกรนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการรีด

การวัดขนาดเกรนตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM standard, American Standard of Testing Materials) มีวิธีในการวัดอยู่ 3 วิธี ดังนี้

2.5.1.1 วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison method)

โดยปกติจะถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายประมาณ 100 เท่า แล้วพิจารณาขนาดเกรนโดย เปรียบเทียบกับภาพโครงสร้างจุลภาคมาตรฐาน แล้วกำหนดเป็นหมายเลขมาตรฐานที่เรียกว่า “ASTM grain size number” โดยหมายเลขยิ่งมีค่ามาก ขนาดเกรนยิ่งละเอียด วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรน แบบ Equiaxed grain (คือเกรนค่อนข้างกลม) อย่างไรก็ตามสามารถคำนวณหา ASTM grain size number โดยการนับจำนวนเกรนในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว ที่กำลังขยาย 100 เท่า แล้วคำนวณตามสมการ (2.2)

$$N = 2^{n-1} \quad (2.2)$$

เมื่อ N = จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า

n = ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM (Grain size number)

2.5.1.2 วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric method หรือ Jeffries method)

สร้างพื้นที่วงกลม หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคให้มีพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคนั้นจะต้องมีจำนวนเกรนไม่น้อยกว่า 50 เกรน และมี จำนวนเกรนไม่เกิน 100 เกรน แล้ว

1) วิธีการหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตร (N_A) ได้จากสมการ (2.3)

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ N_A = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า

f = Jeffries' multiplier

N_{inside} = จำนวนเกรนที่อยู่ภายในพื้นที่

$N_{intercept}$ = จำนวนเกรนที่ถูกตัดผ่าน

ตารางที่ 2.2 Jeffries multipliers ที่ค่ากำลังขยายต่างๆ

กำลังขยาย	Jeffries' multiplier	กำลังขยาย	Jeffries' multiplier
1	0.0002	150	4.5
10	0.02	200	8.0
25	0.125	300	18.0
50	0.5	500	50.0
75	1.125	750	112.5
100	2.0	1000	200.0

ขนาดพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตรในรูปทรงต่าง ๆ เป็นดังนี้

- วงกลมจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 79.8 มิลลิเมตร
- สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาด 70.7×70.7 มิลลิเมตร
- สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 50.0×100.0 มิลลิเมตร

2) วิธีการหาขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ได้จากสมการ (2.4)

$$G = -2.9542 + 3.3219 \log_{10} N_a \quad (2.4)$$

เมื่อ G = ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM

กรณีที่ใช้กำลังขยายอื่นในการถ่ายภาพสามารถคำนวณหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่

กำลังขยาย 1 เท่าได้ จากสมการ (2.5)

$$N_A = N_{A_0} \left(\frac{M}{M_b} \right)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ N_A = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า

N_{A_0} = จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย M_b

M_b = กำลังขยายพื้นฐาน (Basic magnification) ปกติจะมีค่า 100 หรือ 1 เท่า

M = กำลังขยายใดๆ

2.5.1.3 วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept method)

การหาขนาดเกรนด้วยวิธีลากเส้นตัดผ่านมีหลายวิธี เช่น Heyn lineal intercept procedure กระทำ โดยลากเส้นตัดผ่านบนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค แล้วนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงตัดเกรนทำจำนวนหลายๆเส้น และทำการหาค่าเฉลี่ย (Arithmetic average) ในบางครั้งอาจใช้วิธีขีดเส้นลงบนผิวของตัวอย่างโลหะที่จะวัดขนาดเกรนด้วยความยาว 0.005 นิ้ว แล้วขยายดูจากกล้องไมโครสโคป เมื่อขยายที่ 500 เท่า ความยาวของเส้นที่ขีดจะเป็น 2.5 นิ้ว และ 3.75 นิ้วที่กำลังขยาย 750 เท่า ในทางปฏิบัติถ้าเส้นที่ขีดตัดเกรนจำนวน 8-11 เกรน จัดว่ามีลักษณะเกรนหยาบ ถ้านับได้ 12-15 เกรน จัดว่าเป็นเกรนละเอียด (Fine grain) ถ้ามีมากกว่า 15 เกรนจัดว่าเป็นเกรนที่ละเอียดมาก (Very fine grain) - Circular intercept procedure กระทำโดยลากเส้นวงกลม 3 เส้นบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการหาขนาดเกรน โดยวงกลมทั้ง 3 วง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 79.58, 53.05 และ 26.53 ตามลำดับ โดยความ ยาวเส้นรอบวงของทั้ง 3 เส้น รวมกันแล้วมีค่า 500 มิลลิเมตรพอดี จากนั้น นับจำนวนเกรนที่ถูกเส้นตัดผ่าน โดยทุกๆ เกรนที่ถูกเส้นตัดผ่านมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่เส้นตัดผ่านจุดที่เป็นรอยต่อระหว่าง 3 เกรนให้มีค่า 1.5 จากนั้นจึงนำไปแทนค่าในสมการด้านล่าง เพื่อหาค่าจำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านต่อความยาวของเส้นทดสอบ (PL , Number of grain boundary intersections per unit length of test line)

$$\tilde{P}_L = \frac{P_i}{L/M} \quad (2.6)$$

เมื่อ P_i = จำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านด้วยเส้นทดสอบ

\tilde{P}_L = จำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่านต่อความยาวของเส้นทดสอบ

L = ความยาวของเส้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

M = ขนาดกำลังขยาย

2.5.2 การทดสอบปริมาณเกรนผสม (Mix grain)

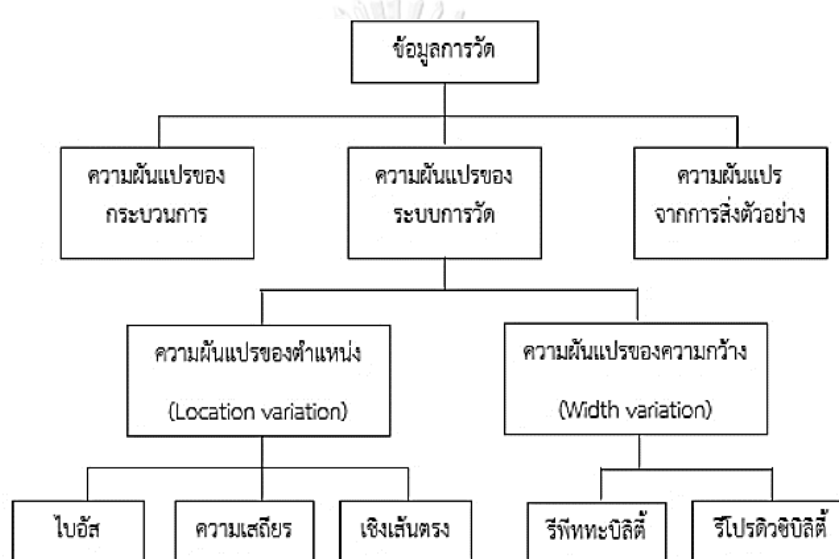
การเกิดลักษณะพื้นที่ 1 หน่วยประกอบด้วยขนาดเกรน (Grain size) หลายขนาดอาจเกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กที่ไม่เหมาะสม หรือ เรียกว่าเกรนผสม (Mix Grain) ซึ่งสามารถคำนวณเป็นร้อยละของปริมาณเกรนที่เล็ก หรือ ใหญ่กว่าพื้นที่เกรน (Matrix) เทียบเท่าปริมาณของขนาดเกรนส่วนใหญ่ในพื้นที่นั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ใน 1 หน่วยพื้นที่วงกลม ประกอบด้วยเกรนทั้งหมด 12 เกรน

ประกอบด้วย Grain size no.1 อยู่ 6 เกรน และ Grain size no.2 และ no.3 อยู่อย่างละ 3 เกรน จะคำนวณปริมาณเกรนผสม หรือ Mix Grain เท่ากับ $((3+3)/12) \times 100 = 50\%$ เป็นต้น

2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัด

2.6.1 ความผันแปรของระบบการวัด [2]

การวิเคราะห์หาเหตุความผันแปรจากระบบการวัดนั้นมี ความสำคัญ (Measurement system analysis, MSA) เพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบการวัดให้ดีขึ้นซึ่ง มีการสรุป องค์ประกอบความผันแปรไว้ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบความผันแปรของระบบการวัด

2.6.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด [2]

มีจุดประสงค์ ในการวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัด ทั้งจากการวัดมีทั้ง ปริมาณที่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนได้ และกำจัดไม่ได้จึงต้องดำเนินการกำจัดปริมาณที่สามารถ ควบคุมได้ เพื่อลดความคลาดเคลื่อน ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อเป็นการจำกัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ โดยการสอบเทียบ นี้ หมายถึง กระบวนการวิธีในการถ่ายค่ามาตรฐานของเครื่องมือวัด ที่มีค่าวัดที่ได้รับมาตรฐานที่สูง กว่า สู่เครื่องมือวัดที่มีค่าวัดมาตรฐานที่ต่ำกว่า ซึ่งต้องสามารถสอบกลับได้ (Traceability) เมื่อกำจัด ความคลาดเคลื่อนของการวัดในเชิงระบบแล้ว จะต้องทำการลดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ด้วยการ

วิเคราะห์ถึงความผันแปร ในแต่ละหน่วย ได้แก่ เครื่องมือวัด พนักงานวัด สภาพแวดล้อมในการวัด เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากการวัด จะได้ว่า

$$\text{ค่าวัด } X_{ij} = \mu + b + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (2.7)$$

โดยกำหนด เป็นค่าวัดในรูปแบบของ ความผันแปร (Measurement variation) (สมการ (2.8)) คือ

$$\sigma_x^2 = \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\alpha\beta}^2 + \sigma^2 \quad (2.8)$$

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 ประเภท ได้แก่

- 1) ไบอัส (Bias) คือ ความแตกต่างจากค่าจริง หรือค่าอ้างอิง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้บนชิ้นงานวัดเดียวกัน
- 2) เสถียรภาพ (Stability) คือ ความผันแปรทั้งหมดที่ได้จากการวัด ระบบใดระบบหนึ่ง โดยคุณสมบัติด้านความมีเสถียรภาพ จะแสดงถึงปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ทั้งภายในและภายนอกระบบ
- 3) คุณสมบัติเชิงเส้น (Linearity) คือ ความผันแปรหรือความแตกต่างกันของค่าไบอัสตลอดช่วงของการวัดหรือใช้งานอุปกรณ์ในการวัด จะพบว่ามีค่าความผันแปรเป็นลักษณะเส้นตรง จะเรียกว่า ความผันแปรด้านกว้าง (Width variation)
- 4) รีพีทเทบิลิตี (Repeatability) คือ ความผันแปรของการวัดรอบค่าที่ควรจะเป็น (Expected value) ของระบบการวัดที่วัดจากเครื่องมือ ชิ้นงาน พนักงานคนเดียวกัน แล้วทำการวัดแบบซ้ำ ๆ
- 5) รีโพรดิวซิบิลิตี (Reproducibility) คือ ความผันแปรของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดและมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการวัด ซึ่งมีการวัดชิ้นงานเดิมอยู่ เช่นการเปลี่ยนพนักงานวัด เครื่องมือที่ใช้ในการวัดในอุตสาหกรรมมีการวัดในช่วงย่านเดียวกัน จึงสามารถประเมิน ความสามารถของกระบวนการวัด อันเนื่องมาจากความผันแปรจาก รีพีทเทบิลิตี และ รีโพรดิวซิบิลิตี ที่เรียกว่า GR & R (Gauge repeatability and reproducibility)

$$\sigma^2_{\text{capability}} = \sigma^2_{\text{GR \& R}} + \sigma^2_{\text{linarity}} \quad (2.9)$$

สำหรับการประเมินผลการวิเคราะห์กระบวนการวัดในระยะยาวนั้น อาจเรียกค่าความผันแปรที่ได้ว่า สมรรถนะ (Performance) คือ ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดทั้งความความเคลื่อนเชิงระบบ และแบบสุ่ม ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ประกอบไปด้วยความผันแปรระยะสั้น ความผันแปรจากคุณสมบัติเสถียรภาพ และความสอดคล้องกัน (Consistency)

$$\sigma^2_{\text{performance}} = \sigma^2_{\text{capability}} + \sigma^2_{\text{stability}} + \sigma^2_{\text{consistency}} \quad (2.10)$$



2.7 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Sorachai , T. Pongsatorn, T. Umeda (2010) [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพล และคุณสมบัติของธาตุ Boron ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปของเหล็กแผ่นรีดร้อนคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิสูง โดยทดสอบคุณสมบัติ เพื่องานที่มีการขึ้นรูปสูง(High formability) โดยทำการศึกษา และทำการทดลองโดยการ Simulate การทดสอบความสามารถในการเปลี่ยนรูปของเหล็กที่เติม Boron 20 ppm (BAS- Boron added steel) เทียบกับที่ไม่เติม Boron (BFS –Boron free steel) พบว่า BAS ไม่มี Yield point elongation ซึ่งทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปดีกว่า BFS แต่ส่งผลให้ Yield strength ลดลงไม่มากนัก แต่เนื่องจากมีปัจจัยด้านการผลิตมาประกอบจึงต้องทำการออกแบบ การทดลองโดยใช้ระดับปัจจัยด้านปริมาณของธาตุ Boron ที่เติมลงในวัสดุดิบ

Sorachai PITAKKORRARAS ,Chatchai HIRUNLABH ,Takateru UMEDA. (2011) [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพล และคุณสมบัติของธาตุ Boron ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคและค่าเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิสูง โดยทดสอบคุณสมบัติ เพื่องานที่มีการขึ้นรูปสูง(High formability) โดยทำการศึกษา และทำการทดลองโดยการ Simulate การทดสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและค่าเชิงกลของเหล็กที่เติม Boron 20 ppm (BAS- Boron added steel) เทียบกับที่ไม่เติม Boron (BFS –Boron free steel) พบว่า BAS มีลักษณะเกรนที่ ขนาดโตกว่าและมีค่า elongation ที่สูงกว่า BFS

H. Monajati a, D. Asefi. (2010) [5] ได้วิเคราะห์ถึงปัจจัยในการผลิตส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นคาร์บอนต่ำ 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

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล (2013) [6] มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขของกระบวนการทางความร้อน (T6) ในการ ปรับปรุงความแข็ง ความทนแรงดึง และความเหนียวของโลหะผสม อะลูมิเนียมเกรด 7075 โดย อะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ใช้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิคการพ่นพองแก๊ส (GISS) ซึ่งปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลเหล่านี้คือ อุณหภูมิ และเวลาในการอบละลาย โดยใช้เงื่อนไขการอบละลายที่

อุณหภูมิ 450 480 และ 510°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากผ่านการอบละลายแล้ว นำชิ้นงานไปบ่มแข็งเทียม สองครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ การอบละลายที่ 450 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยให้ความแข็งมากกว่า 88 HRB ค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกับ 336 MPa ค่าความทนแรงดึงสูงสุด ประมาณ 480 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวประมาณ 7% อย่างไรก็ตามการใช้เวลาอบละลายที่ 8 ชั่วโมง ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติค่าสมบัติ เชิงกลที่ได้จากการอบละลาย ที่เวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน

อุรคินทร์ พลนิกร (2550) [7] มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และลดข้อเสียของกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นในอุตสาหกรรมท่อสแตนเลส เกรด 304L โดยอาศัยการดำเนินงานตามแบบอย่างของซิกซ์ซิกม่า คือ แบ่งเป็นเฟสต่างๆ 5 เฟสด้วยกัน ในการวิเคราะห์จะใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง (Design and analysis of experiment: D.O.E.) มาใช้วิเคราะห์และลดข้อเสียของโรงงานตัวอย่าง จากการศึกษากระบวนการผลิตท่อสแตนเลส และรวบรวมข้อมูลของเสียเพื่อวิเคราะห์พบว่าข้อเสียส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเชื่อมหลังจากที่ท่อเหล็กผ่านการรีดขึ้นรูปด้วยลูกรีดมาแล้ว ซึ่งของเสียส่วนมากที่เกิดจากกระบวนการนี้คือ การเชื่อมแล้วท่อเกิดการทะลุ หรือรอยเชื่อมทะลุเป็นแนวยาว ทำให้ไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดไม่สามารถนำไปแก้ไขได้ ถัดมาเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น คือ เกิดรอยนูนบริเวณรอยต่อ และท่อไม่กลมไม่ตรงตามมาตรฐานงานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตท่อสแตนเลส ตั้งแต่วัตถุดิบที่เป็นเหล็กแผ่นม้วน (Coil) จากนั้นจึงนำเข้าสู่ขั้นตอนของการรีดเย็นด้วยลูกรีดเพื่อให้ได้ความกลมและขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นจึงนำเข้าสู่กระบวนการเชื่อมแบบ Tungsten inert gas: TIG สุดท้ายเป็นกระบวนการขัดเงาด้วยลูกกลิ้งขัดเงา โดยทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการกึ่งอัตโนมัติและเป็นแบบต่อเนื่อง จากนั้นจึงวิเคราะห์หาปัญหาด้วยการระดมสมองและอาศัยแผนภาพแสดงเหตุและผล เพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ใช้เทคนิค FMEA เข้ามาช่วยในการกรองปัจจัยเบื้องต้น จากนั้นจึงใช้การออกแบบการทดลองเข้ามาวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอยเชื่อมทะลุ ในส่วนของทางด้านการรีดขึ้นรูปที่เกิดปัญหาท่อที่ผ่านการรีดไม่กลม เกิดรอยนูนบริเวณรอยต่อ ซึ่งจากการระดมสมองและวิเคราะห์ด้วยแผนภาพเหตุและผลพบว่า เกิดจากการเตรียมรอยต่อของการเชื่อมไม่ต่อชนกันสนิทพอดี ซึ่งเกิดจากตั้งระยะการรีดที่ไม่ถูกต้อง จึงอาศัยเทคนิคเข้ามาช่วยในการปรับตั้ง ปัญหารอยเชื่อมทะลุเกิดจากการปรับตั้งปัจจัยที่ใช้ในการเชื่อมไม่เหมาะสม จึงได้ทดลองหาระดับการปรับตั้งใหม่เป็นดังนี้ (1) การปรับกระแสที่ใช้ในการเชื่อมคือ 80 แอมป์แอมป์ (2) การปรับระยะเวลาในการเชื่อมคือ 170 วินาทีต่อเส้น (6 เมตร) (3) การปรับระยะในการอาร์คคือ 1 มิลลิเมตร ของเสียทั้งหมดจากกระบวนการเดิมอยู่ที่

ประมาณ 8.2% หลังจากปรับปรุงทั้งสองปัญหาดังกล่าวแล้วสามารถลดของเสียลงเหลือ 1.6% สามารถลดต้นทุนลงได้ 108.75 ล้านบาท

เรืองยศ วิเชียรรักษ์ (2018) [8] ได้วิเคราะห์เหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยกระบวนการอบอ่อนแบบเตาอบ พบว่าค่าสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นจะมีความผันแปรในแต่ละตำแหน่งของความยาวม้วน โดยปัจจัยสำคัญในกระบวนการอบอ่อนได้แก่ อุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ถูกนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความผันแปรของค่าสมบัติเชิงกล ทดลองโดยใช้เหล็กแผ่นรีดเย็นที่ผ่านกระบวนการรีดในอุตสาหกรรมที่สัดส่วนการถูกรีดในสัดส่วนการรีดที่เท่ากันและนำมาผ่านกระบวนการอบอ่อนโดยควบคุมอุณหภูมิการอบอ่อน และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนในห้องปฏิบัติการ โดยอุณหภูมิการอบอ่อน ได้แก่ 570, 610, 650, 700°C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ได้แก่ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้นคราก ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็ง รวมถึงตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็กผลการทดสอบพบว่า (1) การเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการลดลงอย่างของค่าความเค้นคราก ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็ง แต่ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว มีค่าสูงขึ้น (2) การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าสมบัติเชิงกลเช่นเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน (3) ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 650°C และเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน 2 ชั่วโมง ให้ผลลัพธ์ค่าสมบัติเชิงกล มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมาย (4) ขนาดของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น (5) ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการอบอ่อนและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนนั้นส่งผลกระทบต่อความผันแปรของค่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

R. Mendoza a, A. Molina. (2013) [9] ได้วิจัยถึงสมบัติเชิงกล และการตกผลึกใหม่ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ, เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมทางเคมีของคาร์บอนที่ 0.035% Cr มีผลดีต่อการอบอ่อน สามารถทำให้อุณหภูมิในการอบอ่อน สูงได้ถึง 700°C โดยทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ (Fully recrystallized grains)

ณัฐพล วัชรประไพพันธ์ (2552) [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองกระบวนการอบอ่อนแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดม้วน ซึ่งได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ และสามารถนำมาทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในม้วนเหล็ก โดยดำเนินการของเตาอบอ่อนแบบกะ ในช่วงการให้ความร้อนได้

อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น และมีการสรุปผล คือจำนวนของม้วนเหล็กที่อยู่ในเตา มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็กกล่าวคือ การอบอ่อนโดยใช้จำนวนม้วนเหล็กที่มาก หรือมีมวลมาก ส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของอุณหภูมิ ในตำแหน่งจุดร้อน (Hot point) และจุดเย็น (Cold point) มีค่ามากขึ้น เมื่อมีการลดจำนวนม้วนเหล็กจาก 4 ม้วนเหลือ 3 ม้วน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลดลงเวลาที่อบอ่อน หรืออบแช่ (Annealing soaking time) มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเหล็ก ในส่วนเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน หากที่มีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ในตำแหน่งจุดร้อน (Hot point) และจุดเย็น (Cold point) มีค่าน้อยลง



บทที่ 3

วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดปัจจัยในการทดลอง เริ่มจากวิเคราะห์สภาพปัญหาเพื่อนำไปสู่การทดลองเพื่อปรับปรุง โดยการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อให้ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และการศึกษากรรมวิธีการผลิตเพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตเพื่อนำไปสู่การทดลองสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก โดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

3.1 สภาพปัญหาในปัจจุบัน

ทางลูกค้ากลุ่มงานชิ้นส่วนอุตสาหกรรมรถยนต์มีความต้องการปรับปรุงชิ้นงานเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป หรือร้อยละการยืดตัวสูงขึ้นโดยอยู่ภายใต้มาตรฐานและเงื่อนไขที่กำหนด โดยต้องการกำหนดให้ค่า Elongation มากกว่า 38% เพื่อลดความเสี่ยงต่อการแตกเนื่องจากการยืดตัวของชิ้นงานหลังขึ้นรูปไม่เพียงพอ โดยมีข้อกำหนดสำหรับค่าเชิงกลอื่นๆประกอบด้วย ค่า Yield strength กำหนดมากกว่า 210 MPa และค่าTensile strength กำหนดมากกว่า 310 MPa

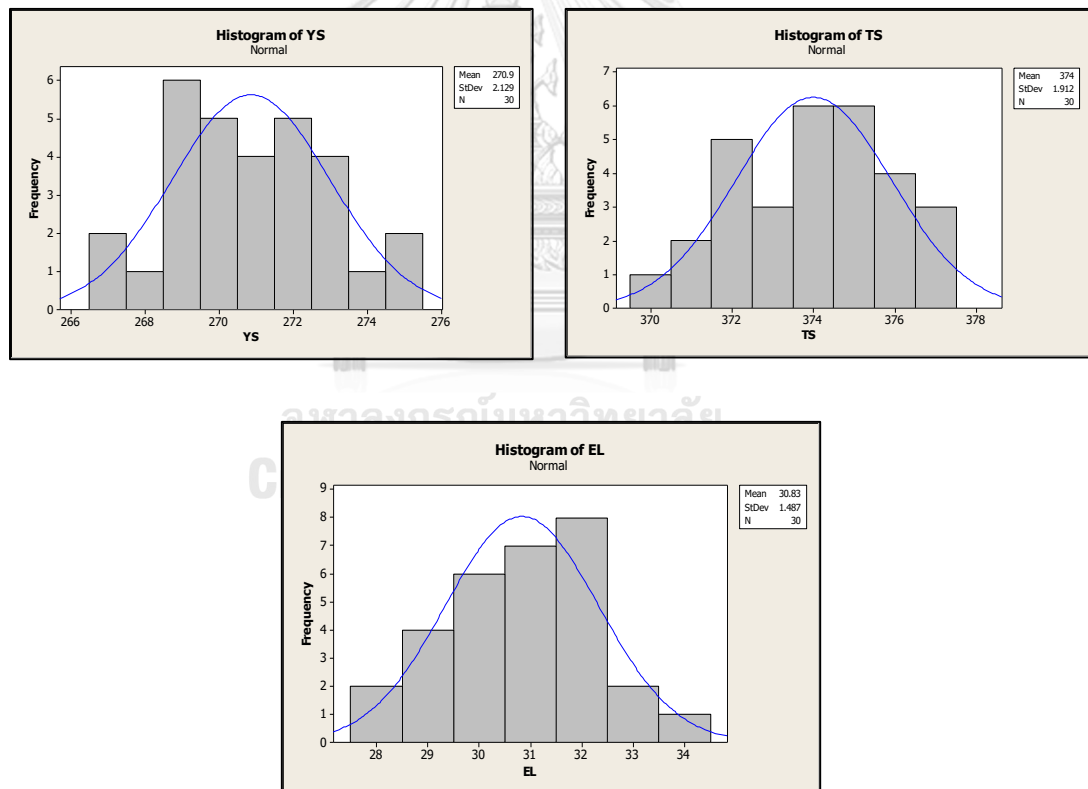
ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ส่งผลกระทบต่อค่าเชิงกลของเหล็ก เพื่อผลิตชิ้นงานที่เหมาะสมกับการใช้งานและตรงตามความต้องการของลูกค้า นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาสำหรับการออกแบบการผลิตเพื่อให้ค่าเชิงกลตามที่ต้องการ โดยทำการเก็บข้อมูลจากชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำความหนา 3.00 มม. ความกว้าง 1219 มม. ชั้นคุณภาพ Hr1

สำหรับข้อมูลค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานก่อนการทดลองจากการเก็บข้อมูลจำนวน 30 ชิ้นงานตลอดปี 2019 สามารถสรุปได้ดังตาราง 3.1 แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติเชิงกล ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเชิงกลที่สูงที่สุด และต่ำที่สุด ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเงื่อนไขเดิมก่อนทดลองมีค่า Elongation ไม่สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลค่าเชิงกลก่อนการทดลองที่จากการเก็บข้อมูลในปี 2019

คุณสมบัติเชิงกล	ค่าตัวแปรควบคุม		ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการผลิต				ค่าคุณสมบัติเชิงกล ที่ลูกค้าต้องการ
	FT(°C)	CT (°C)	Average	S.D	Min	Max	
Yield strength (MPa)	870	610	271	2	267	275	>210
Tensile strength (MPa)			374	2	370	377	>310
Elongation (%)			31	1	28	34	>38

จากข้อมูลการผลิตชิ้นงานก่อนการทดลองจำนวน 30 ชิ้นงาน สามารถแสดงข้อมูลการกระจายตัวของค่าเชิงกลต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของค่าเชิงกลบนกราฟฮิสโทแกรม



รูปที่ 3.1 ข้อมูลการกระจายตัวค่าเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตก่อนการทดลอง

3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

สำหรับกระบวนการนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในระบบการวัดค่าสมบัติเชิงกลของห้องปฏิบัติการของโรงงานกรณีศึกษา แม้ว่ามาตรฐานห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติเชิงกลและห้องปฏิบัติการทดลอง (Lab) ของโรงงานกรณีศึกษาจะได้รับการรับรองจาก ISO/IEC 17025 อยู่แล้วก็ตาม โดยมีหลักการและขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด

3.2.1.1 ความสามารถแยกความแตกต่าง (Discrimination หรือ Resolution) [2]

ความสามารถแยกความแตกต่าง คือ ค่าที่น้อยที่สุดที่เครื่องมือวัดสามารถบอกความแตกต่างได้ในกรณีการวัดค่าสมบัติเชิงกลนั้น ได้แก่ ค่า Yield strength, Tensile strength และ Hardness วัดค่าออกมาได้ทศนิยม 1 หน่วย ส่วน %Elongation วัดค่าออกมาได้ทศนิยม 2 หน่วย โดยทั่วไปจะเลือกเครื่องมือวัด โดยใช้กฎของ 1/10 เท่าของ Tolerance ซึ่งเครื่องมือสามารถยอมรับได้

3.2.1.2 ไบอัส (Bias)

ไบอัส คือ ความแตกต่างระหว่างค่าจริง (ค่าอ้างอิง) เทียบกับเฉลี่ยของการวัดที่ได้ ในกรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการส่งเครื่องมือไปสอบเทียบกับสถาบันที่ได้รับการรับรองเพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่ได้จากการวัดมีค่าความแตกต่างค่าจริงในระดับที่ยอมรับได้

3.2.1.3 คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity)

คุณสมบัติเชิงเส้นตรง คือ การเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสของระบบการวัด เมื่อเปลี่ยนค่ามาตรฐานของงานตามย่านวัดที่กำหนด ในกรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการส่งเครื่องมือไปสอบเทียบเช่นเดียวกับการวัดค่า Bias ดังนั้นเครื่องมือวัดที่นำมาใช้งานมีค่าที่ยอมรับในการวัดค่าในย่านการทดสอบอย่างถูกต้อง

3.2.1.4 ความเสถียร (Stability)

ความเสถียร คือการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสของระบบการวัดที่วัดชิ้นงานเดิม เมื่อเวลาเปลี่ยนไป กรณีนี้ห้องปฏิบัติการมีการจัดเตรียมชิ้นงานมาตรฐานสำหรับการวัดในแต่ละ ครั้งที่มีทดสอบ ก่อนเริ่มปฏิบัติการทดสอบ เพื่อมั่นใจว่าเครื่องวัด ค่าที่วัดได้อยู่ต้องอยู่ใน Control chart

3.2.1.5 ความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability)

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

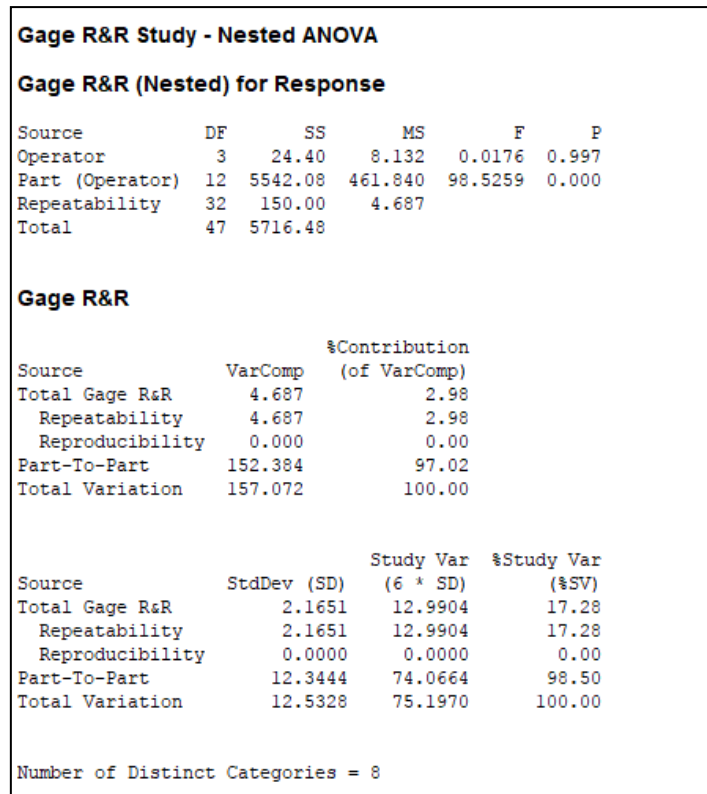
3.2.1.6 ความสามารถในการประเมินซ้ำ (Reproducibility)

ความสามารถในการประเมินซ้ำ คือความผันแปร ระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัดที่แสดงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกัน ในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน ระหว่างระบบการวัด เช่นพนักงานวัดต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดในโรงงานกรณีศึกษา แสดงในหัวข้อที่ 3.1.2

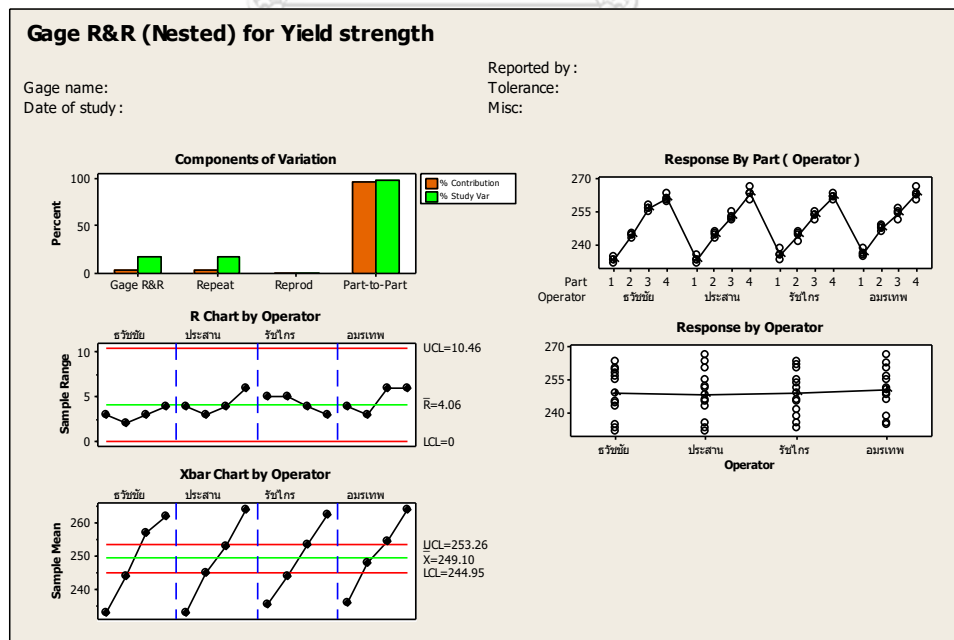
3.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Gage R&R

3.2.2.1 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Yield strength

จำนวนพนักงานทดสอบ (Operator) = 4 , ชิ้นงานจำนวน (Speciment no.) = 4
ตัวอย่าง และการทดสอบซ้ำ (Replicate) = 3



รูปที่ 3.2 ผลวิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Yield strength



รูปที่ 3.3 วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Yield strength

การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Yield strength โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Specimen no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.997 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้น จึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 2.98% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 97.02% แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 2.98% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 12.9904% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 8 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อเสนอแนะของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automobile Industry Action Group : AIAG)

3.2.2.2 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Tensile strength

จำนวนพนักงานทดสอบ (Operator) = 4 , ชิ้นงานจำนวน (Specimen no.) = 4
ตัวอย่าง และการทดสอบซ้ำ (Replicate) = 3

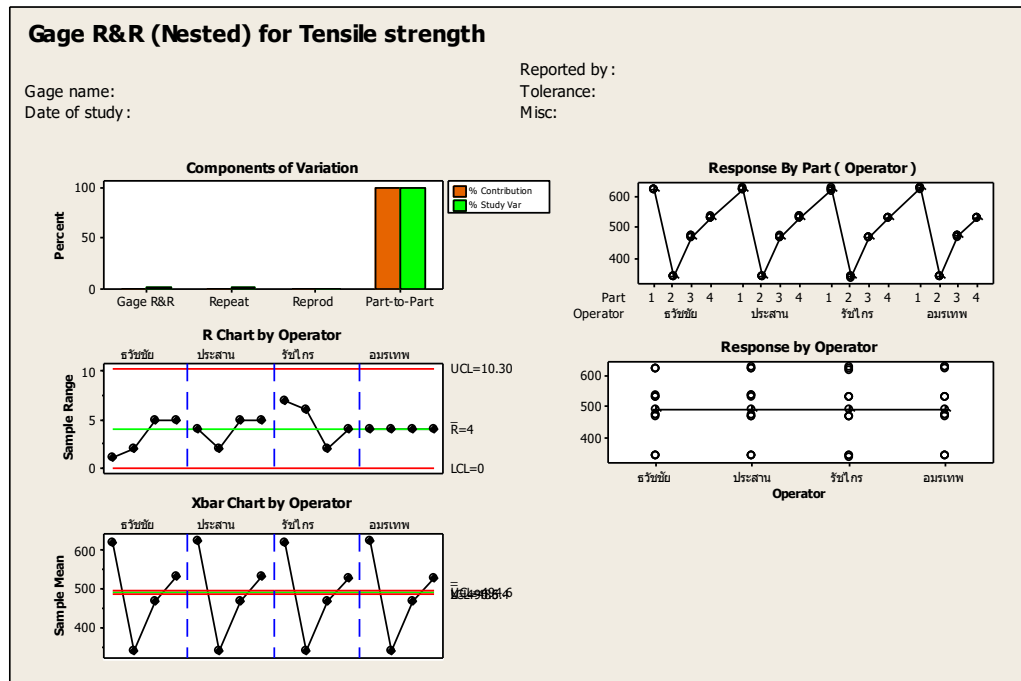
Gage R&R Study - Nested ANOVA					
Gage R&R (Nested) for Response					
Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	3	33	11.1	0.00	1.000
Part (Operator)	12	518345	43195.4	8067.63	0.000
Repeatability	32	171	5.4		
Total	47	518550			

Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	5.4	0.04
Repeatability	5.4	0.04
Reproducibility	0.0	0.00
Part-To-Part	14396.7	99.96
Total Variation	14402.0	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	2.314	13.883	1.93
Repeatability	2.314	13.883	1.93
Reproducibility	0.000	0.000	0.00
Part-To-Part	119.986	719.917	99.98
Total Variation	120.009	720.051	100.00

Number of Distinct Categories = 73

รูปที่ 3.4 วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Tensile strength

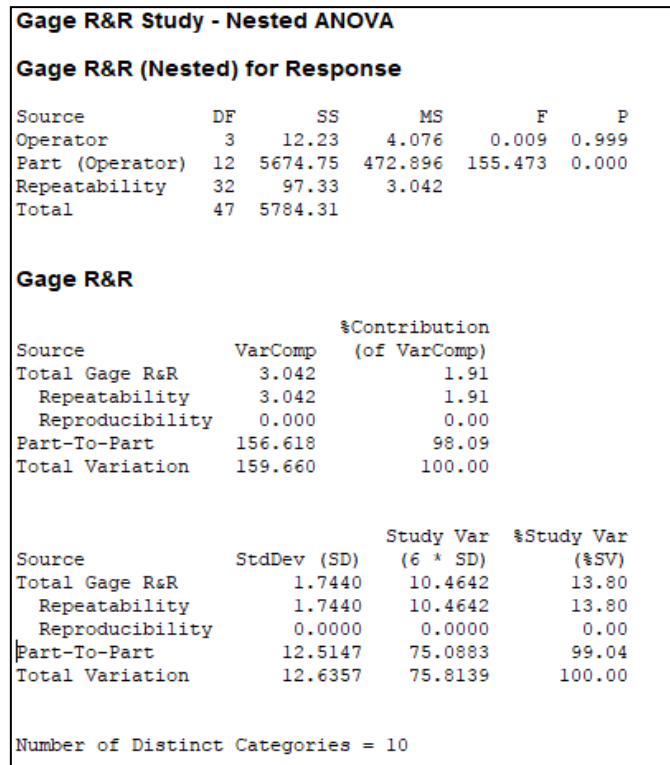


รูปที่ 3.5 วิเคราะห์ Gage R&R ของการวัดค่า Tensile strength

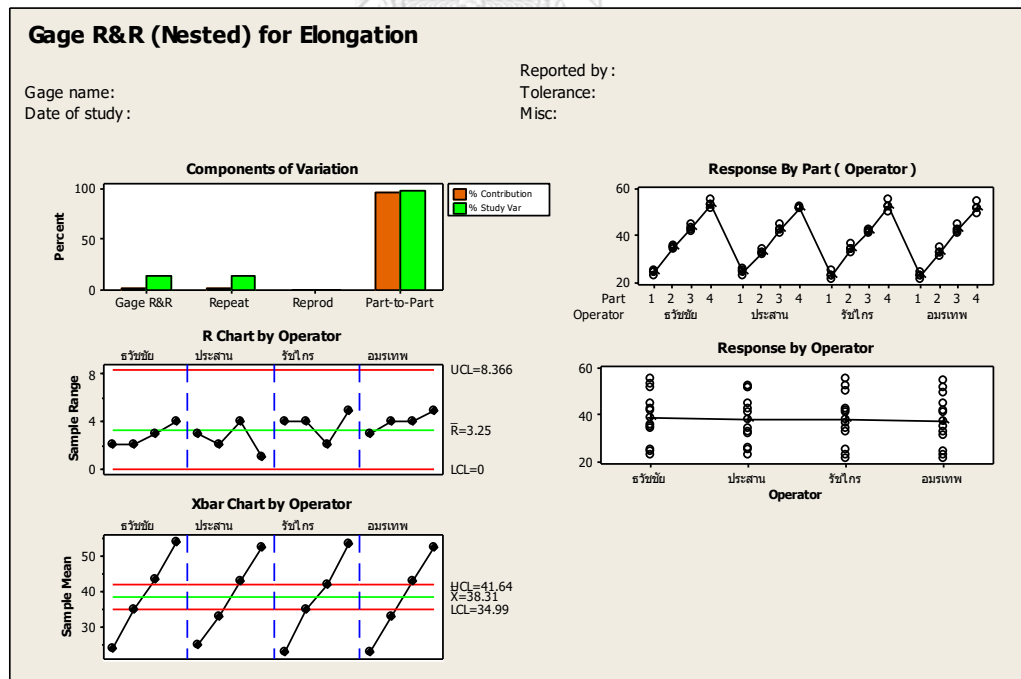
การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Tensile strength โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Specimen no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 0.04% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 99.98% แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 0.04% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 13.883% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 73 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อเสนอแนะของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automobile Industry Action Group : AIAG)

3.2.2.3 วิเคราะห์ Gage R&R ของการทดสอบค่า Elongation

จำนวนพนักงานทดสอบ (Operator) = 4 , ชิ้นงานจำนวน (Specimen no.) = 4 ตัวอย่าง และการทดสอบซ้ำ (Replicate) = 3



รูปที่ 3.6 วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Elongation



รูปที่ 3.7 วิเคราะห์ Gauge R&R ของการวัดค่า Elongation

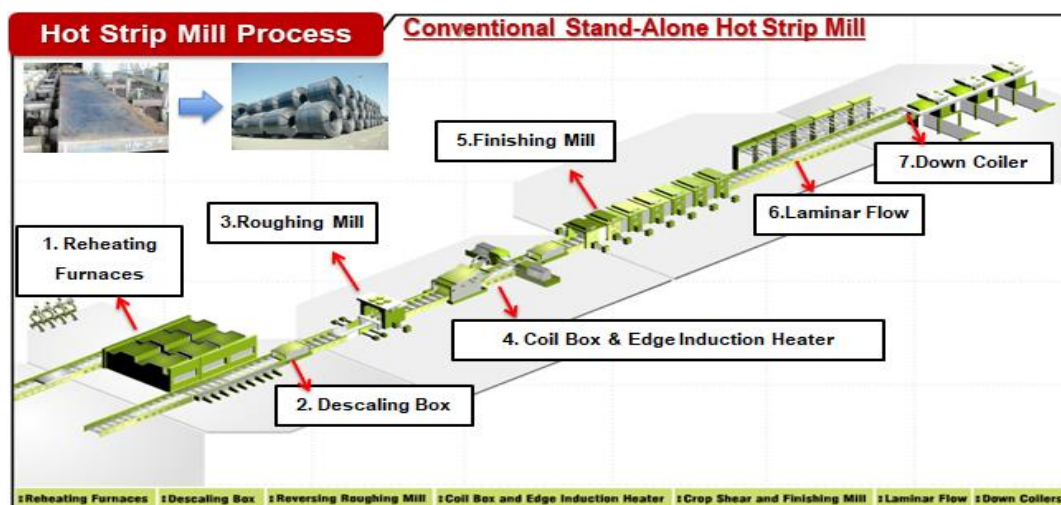
การวิเคราะห์ Gage R&R ของค่าทดสอบสมบัติเชิงกล Elongation โดยพิจารณาความแปรปรวน 2 Ways ANOVA มี 2 Factors คือผู้ทดสอบ (Operator) และหมายเลขชิ้นงานทดสอบ (Specimen no.) พบว่า ผู้ทดสอบมีค่า P-Value = 0.999 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้น จึงไม่มีความแตกต่างในส่วนของผู้ทดสอบ ส่วนหมายเลขชิ้นงานทดสอบ P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงมีความแตกต่างในส่วนของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วน Gage R&R พบว่าค่า Repeatability มีผลกระทบ (%Contribution) = 1.91% ส่วนกรณี Part-to-Part มีกระทบ 98.09%. แสดงว่าระบบการวัดนี้ มีผลกระทบจาก Gage อยู่ที่ 1.91% ซึ่งน้อยกว่า 7.7% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Total Gage R&R ในส่วน %Study Variation = 10.4642% ซึ่งน้อยกว่า 30% ที่เป็นค่ามากที่สุดที่จะยอมรับได้ และค่า Number of Distinct Categories = 10 ซึ่งมากกว่า 4 จึงสรุปว่า เครื่องมือวัดมีความละเอียดพอที่จะสามารถแยกแยะค่าความแตกต่างและยอมรับได้ตามข้อเสนอแนะของ อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automobile Industry Action Group : AIAG)

3.3 กรรมวิธีในกระบวนการรีดร้อน (Hot Strip Mill Process)

การศึกษากรรมวิธีในกระบวนการรีดร้อนเพื่อรับทราบปัจจัยในกระบวนการที่ส่งผลต่อค่าเชิงกลของเหล็ก สำหรับพิจารณากำหนดเป็นปัจจัยในการทดลอง

แผนภาพกระบวนการรีดร้อน และกระบวนการรีดร้อน

กระบวนการรีดร้อนโดยทั่วไป โดยจะเริ่มจากการนำ Semi-finish product หรือ Slab ที่มีความหนาประมาณ 250 มิลลิเมตร มาให้ความร้อนด้วยเตา Reheating furnace จนมีอุณหภูมิพอเหมาะต่อการรีดร้อน ซึ่งสำหรับ Plain carbon steel จะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200-1,320 °C เพื่อและทำให้เกิดการโตอย่างต่อเนื่องของ Grain เรียกว่า Continuous Growth และปรับโครงสร้างจุลภาคก่อนรีดเป็น Austenite ที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 100-1000 ไมโครเมตร เรียกว่า Coarse grain ซึ่งส่งผลให้เหล็กเกิดการอ่อนตัว (Softening) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้สามารถรีดลดขนาดลงมาบางถึง 1 มิลลิเมตรได้ โดยมีลักษณะไลน์การผลิต ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ไหลการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot Strip Mill)

สำหรับก่อนกระบวนการรีดนั้น จำเป็นต้องขจัด Oxide scale บนผิวเหล็กด้วยเครื่อง Descaling box ซึ่งเป็นการใช้น้ำที่แรงดันสูง ฉีดไปที่ผิวหน้าเหล็กเพื่อให้ Oxide scale หลุดร่อนออก จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการรีดหยาบด้วยแท่นรีดที่เรียกว่า Roughing mill จะเป็นการรีดกลับไปมา จำนวน 5-7 รอบ โดยจะทำให้ความหนาลดลง 5-13% และจากนั้นจะทำการม้วน Coil ที่ Coil box เพื่อลดการสูญเสียความร้อน โดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อน และสามารถชดเชยอุณหภูมิที่ ขอบด้วยเครื่อง Edge Induction Heater เพื่อลดการเกิด Mix grain ได้ จากนั้นทำการเข้าสู่เครื่อง รีดละเอียด หรือ Finishing mill เพื่อทำการรีดลดขนาดลงให้ได้ตามที่ต้องการ โดยแท่นรีดจะมี 7 Strand ซึ่งความหนาและอุณหภูมิของเหล็กจะลดลง ก่อนผ่านกระบวนการ Laminar flow เพื่อทำการเทมันน้ำลงมาบนผิวเหล็ก เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคของ เหล็ก ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ

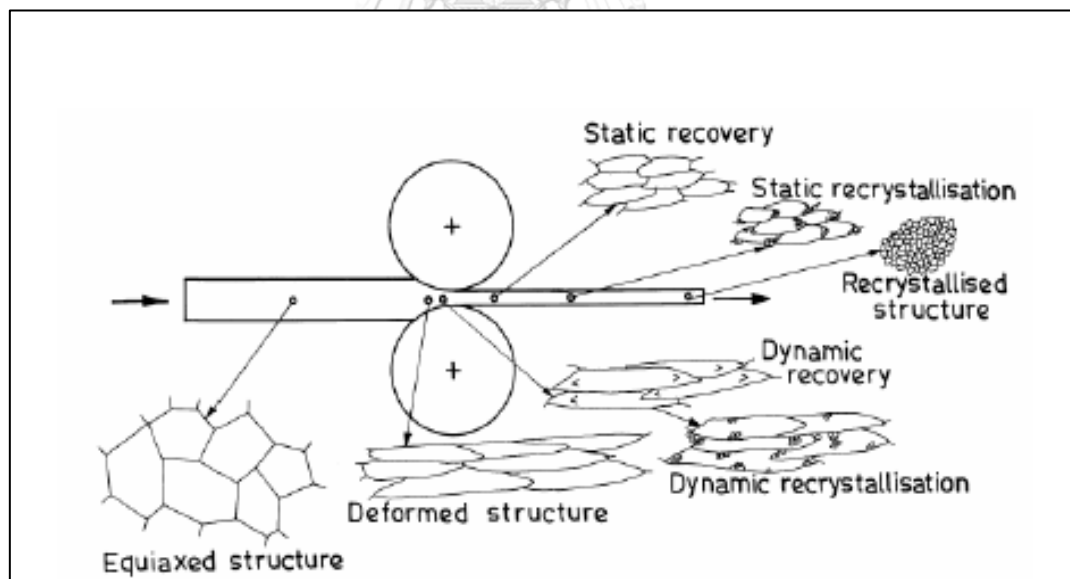
3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการรีดร้อน

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในกระบวนการรีดร้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก โดยในระหว่างรีดร้อนที่เหล็กมีอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านแท่นรีดเพื่อลดขนาด จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Restoration process ดังภาพ 3.9 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กซึ่งเป็น Austenite จะเปลี่ยนแปลงด้วยกลไก 2 แบบ ตามลำดับ

- 1) Recovery เป็นกลไกที่เกิดขึ้นเพื่อลดพลังงานสะสมภายในเนื้อเหล็กอันเป็นผลจากการแปรรูปขณะรีด โดย Dislocation ที่เกิดจากการรีดจะเคลื่อนที่ และเรียงตัวกันเป็น Subgrain ภายใน Grain ของเหล็กที่ถูกรีดให้ยาวออก หรือ Elongate
- 2) Recrystallisation จะเกิดต่อจาก Recovery โดยจะมี Grain ใหม่ที่ขนาดเล็กซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม (Equiaxed) เกิดขึ้นภายใน Subgrain ซึ่งการเกิดจะเริ่มที่ขอบ Grain ของ Subgrain หรือ Grain ของเหล็กที่ถูกรีดให้ยาวออก การเกิด Grain ใหม่ขนาดเล็กเหล่านี้จะทำให้พลังงานที่สะสมภายในเนื้อเหล็กลดลงหรือหมดไป

ลักษณะและอัตราการเกิด Restoration process จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ดังนี้

- 1) ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก
- 2) อุณหภูมิของเหล็ก
- 3) ขนาดเกรนของโครงสร้าง Austenite ก่อนเข้าลูกรีด
- 4) %การลดลงของความหนาเหล็ก
- 5) ความเร็วในการรีด

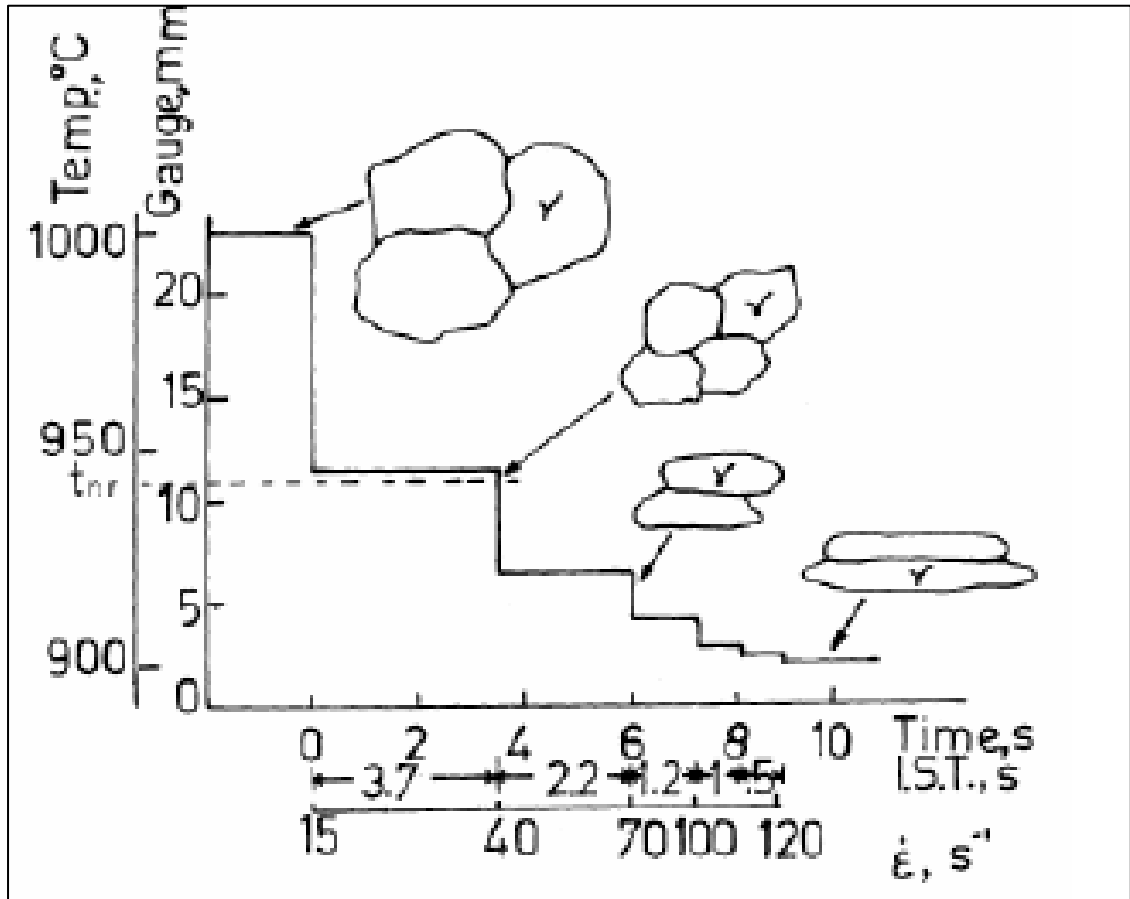


รูปที่ 3.9 การเกิด Restoration ในกระบวนการรีดร้อน

3.4.1 อุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และอุณหภูมิ Coiling Temperature (CT)

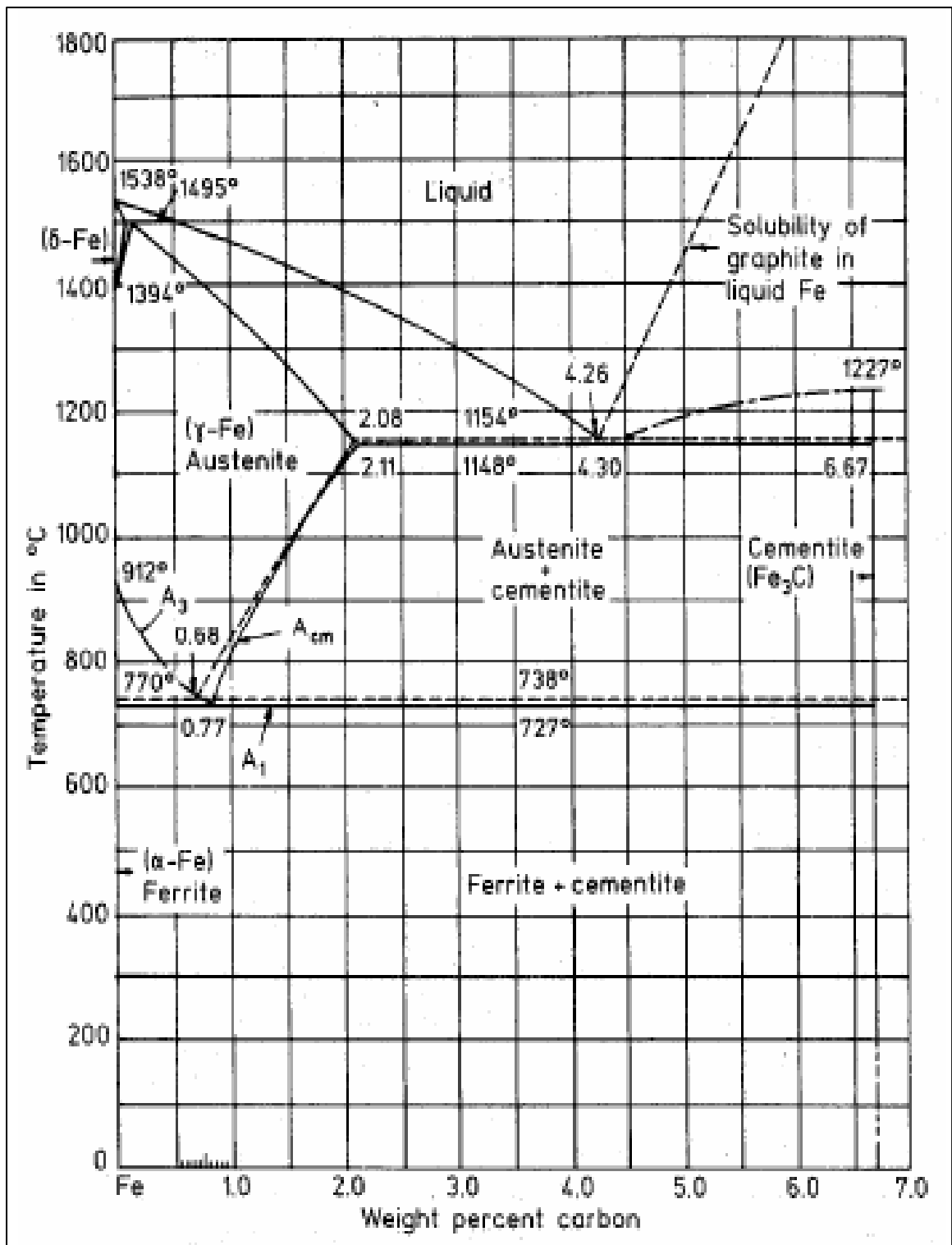
ในกระบวนการรีดละเอียด หากเหล็กยังมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ Recrystallisation จะทำให้เกิด Restoration process กับโครงสร้าง Austenite เช่นเดียวกับที่เกิดในระหว่างการรีดหยาบ

หากอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ Recrystallisation ก่อนเข้าสู่การรีด จะไม่มี Restoration process และทำให้โครงสร้าง Austenite ถูกรีดยาวออก ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงของ Austenite grain ขณะถูกรีดที่ Finishing mill

จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กก่อนการเย็นตัว คืออุณหภูมิที่หลังรีดละเอียด หรือ Finishing temperature สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon steel) นั้นอุณหภูมิ Finishing temperature จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ A3 ในเฟสไดอะแกรมระหว่างเหล็กกับคาร์บอน เมื่อเหล็กเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิ A3 โครงสร้าง Austenite จะเริ่มเปลี่ยนเป็น Ferrite โดยเริ่มจากบริเวณขอบเกรนของ Austenite ดังรูป 3.11



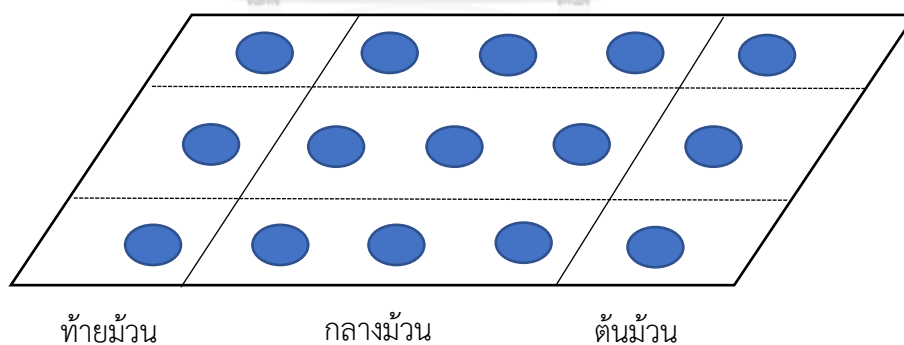
รูปที่ 3.11 เฟสไดอะแกรมของเหล็กกับคาร์บอน

ในขณะที่อุณหภูมิที่เหล็กม้วนเป็น Coil (Coiling Temperature) เป็นอุณหภูมิที่เหล็กถูกฉีดน้ำ หรือผ่านม่านน้ำ (Laminar flow) บนแท่นเพื่อให้อุณหภูมิของเหล็กลดลงก่อนที่จะม้วนเป็น Coil สำหรับ Coiling temperature จะมีบทบาท ดังนี้

- กำหนดขนาดและรูปร่างของโครงสร้าง Ferrite
- กำหนด Lamella thickness และ Interlamella spacing ของโครงสร้าง Pearlite
- กำหนดรูปร่าง และตำแหน่งการเกิด Grain boundary ของ Cementite

สำหรับกระบวนการรีดร้อนนั้น Coiling temperature จะขึ้นกับ Finishing temperature โดยการกำหนดโครงสร้างหลังการเย็นตัว จะต้องพิจารณาจากโครงสร้างก่อนการเย็นตัว ซึ่งกำหนดจาก Finishing temperature และศักยภาพของ Run out table จะทำให้อัตราการเย็นตัวของเหล็กในรูปแบบต่างๆ

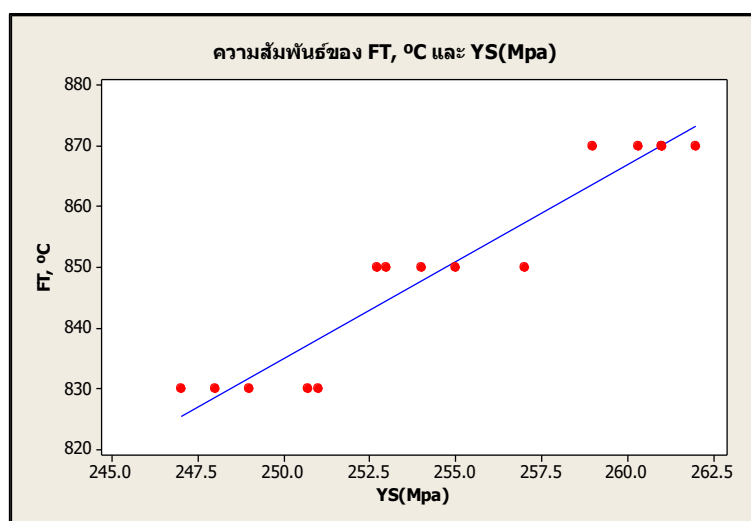
ต่อมาเพื่อให้ทราบผลกระทบของปัจจัยนำเข้า จึงทำการรวบรวมข้อมูลก่อนการผลิตเพื่อศึกษา เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าจำนวน 3 ปัจจัยและมี 3 ระดับ โดยเทียบกับสมบัติเชิงกล ในตำแหน่งที่มีการทดสอบใกล้เคียงกันจำนวน 15 ชิ้นงาน ลักษณะดังรูปที่ 3.12 โดยจำแนกตามคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ Yield strength, Tensile strength และ %Elongation โดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองสำหรับวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ซึ่งกรณีศึกษานี้จะกำหนดอุณหภูมิ Coiling temperature ที่ 610°C เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กมีองค์ประกอบของเฟอร์ไรต์เป็นหลัก



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งชิ้นงานที่เก็บทดสอบสำหรับวิเคราะห์เชิงสถิติ One way ANOVA

3.4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) เทียบค่า Yield strength (YS) ที่ อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.13 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Yield strength มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ YS ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.14 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Finishing Temperature ส่งผลกระทบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น ค่า Yield strength มีค่าสูงขึ้น

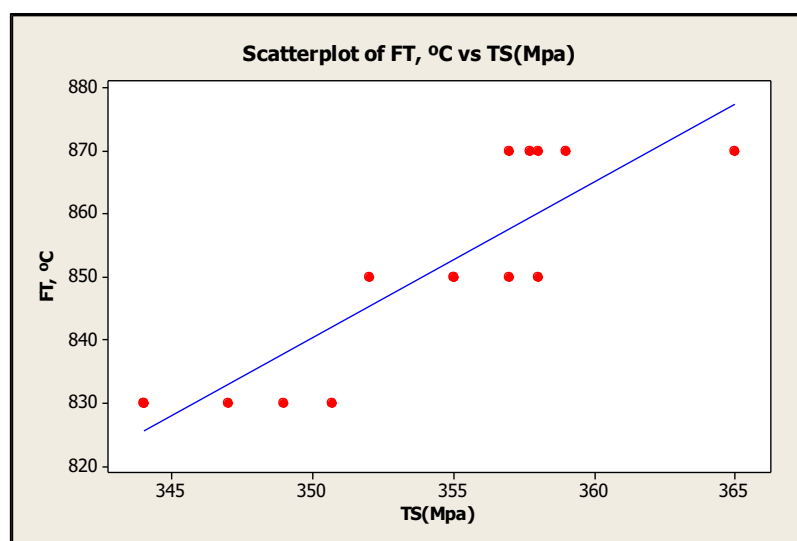
One-way ANOVA: YS(Mpa) versus FT, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
FT, °C	2	332.82	166.41	69.30	0.000
Error	12	28.82	2.40		
Total	14	361.64			

S = 1.550 R-Sq = 92.03% R-Sq(adj) = 90.70%

รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ FT ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil

3.4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และเทียบค่า Tensile strength (TS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.15 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ TS ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.16 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Finishing Temperature ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น ค่า Tensile strength มีค่าสูงขึ้น

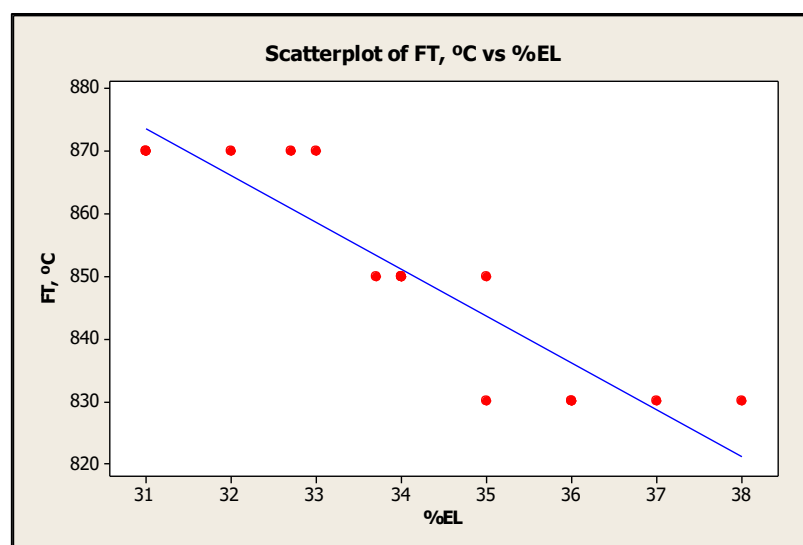
One-way ANOVA: TS(Mpa) versus FT, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
FT, °C	2	401.43	200.71	24.33	0.000
Error	12	98.98	8.25		
Total	14	500.41			

S = 2.872 R-Sq = 80.22% R-Sq(adj) = 76.92%

รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ FT ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil

3.4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Finishing Temperature (FT) และเทียบกับค่า Elongation (EL) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.17 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Elongation มีค่าต่ำลง



รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FT และ EL ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.18 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Finishing Temperature ส่งผลกระทบต่อค่า Elongation กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ Finishing Temperature สูงขึ้น ค่า Elongation มีค่าต่ำลง

One-way ANOVA: %EL versus FT, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
FT, °C	2	49.732	24.866	30.88	0.000
Error	12	9.664	0.805		
Total	14	59.396			

S = 0.8974 R-Sq = 83.73% R-Sq(adj) = 81.02%

รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ FT ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil

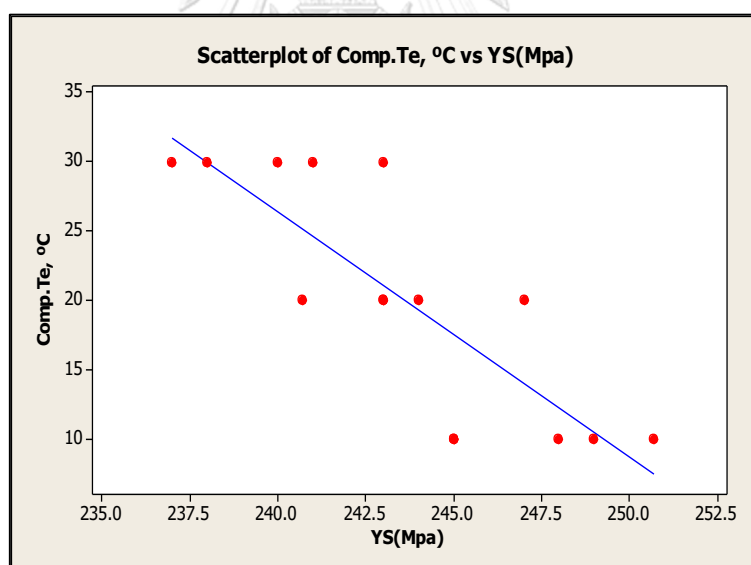
3.4.2 อุณหภูมิขดเชยที่ขอบ หรือ Compensation temperature

โดยปกตินั้น การรีดร้อนเหล็กแผ่นจะควบคุมอุณหภูมิในการรีดให้มีความสม่ำเสมอทั้ง Coil นั้นเป็นเรื่องยาก ซึ่งทำให้ลักษณะโครงสร้าง หรือคุณสมบัติของเหล็กในแต่ละตำแหน่งอาจมีความไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณที่สัมผัสอากาศได้มากกว่าในขณะรีด จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน และอาจเกิดปัญหาเกรนผสม หรือ Mix grain ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก เพื่อพิสูจน์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกลทางสถิติเบื้องต้น โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) จะได้ผลดังนี้

3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Compensation temperature (T_c)

เทียบกับค่า Yield strength (YS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.19 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Yield strength มีค่าต่ำลง



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T_c และ YS ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.001 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.20 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Compensation Temperature ส่งผลกระทบบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น ค่า Yield strength มีค่าต่ำลง

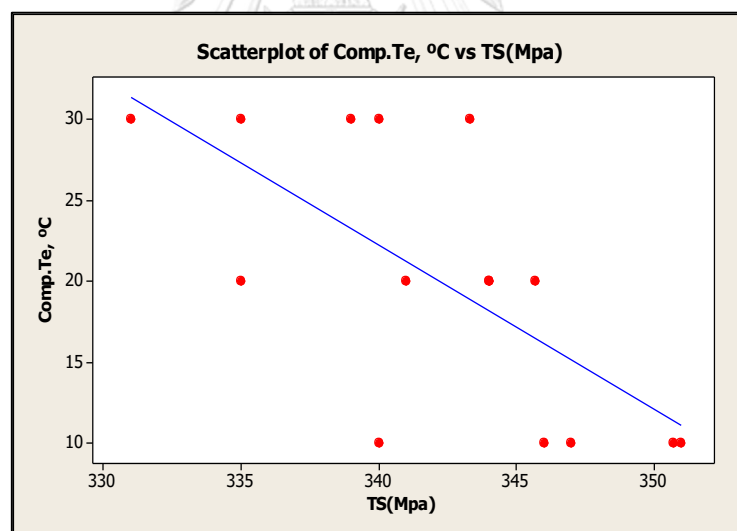
One-way ANOVA: YS(Mpa) versus Comp.Te, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
Comp.Te, °C	2	149.83	74.91	13.05	0.001
Error	12	68.86	5.74		
Total	14	218.69			

S = 2.396 R-Sq = 68.51% R-Sq(adj) = 63.26%

รูปที่ 3.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ Te ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil

3.4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Compensation temperature เทียบค่า Tensile strength (TS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว(One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.21 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าต่ำลง



รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Te และ TS ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.022 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.22 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Compensation Temperature ส่งผลกระทบบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น ค่า Tensile strength มีค่าต่ำลง

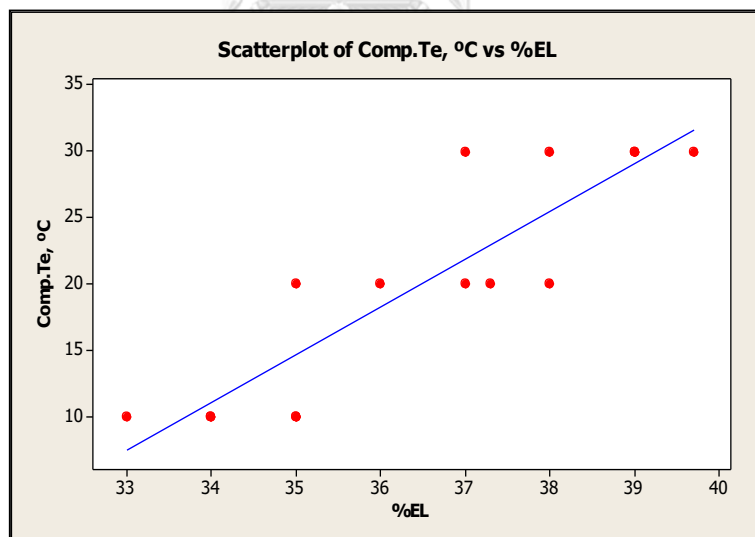
One-way ANOVA: TS(Mpa) versus Comp.Te, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
Comp.Te, °C	2	215.7	107.9	5.35	0.022
Error	12	241.9	20.2		
Total	14	457.6			

S = 4.489 R-Sq = 47.15% R-Sq(adj) = 38.34%

รูปที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ Te ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil

3.4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดเชย Strip หรือ Compensation temperature เทียบค่า Elongation ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชั้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.23 และจากรูปสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Elongation มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Te และ El ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.24 แสดงถึงว่าอุณหภูมิ Compensation Temperature ส่งผลกระทบต่อค่า Elongation กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ Compensation Temperature สูงขึ้น ค่า Elongation มีค่าสูงขึ้น

One-way ANOVA: %EL versus Comp.Te, °C					
Source	DF	SS	MS	F	P
Comp.Te, °C	2	47.37	23.68	22.30	0.000
Error	12	12.74	1.06		
Total	14	60.11			

S = 1.031 R-Sq = 78.80% R-Sq(adj) = 75.27%

รูปที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ Te ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil

3.5 ธาตุเจือ (Alloy)

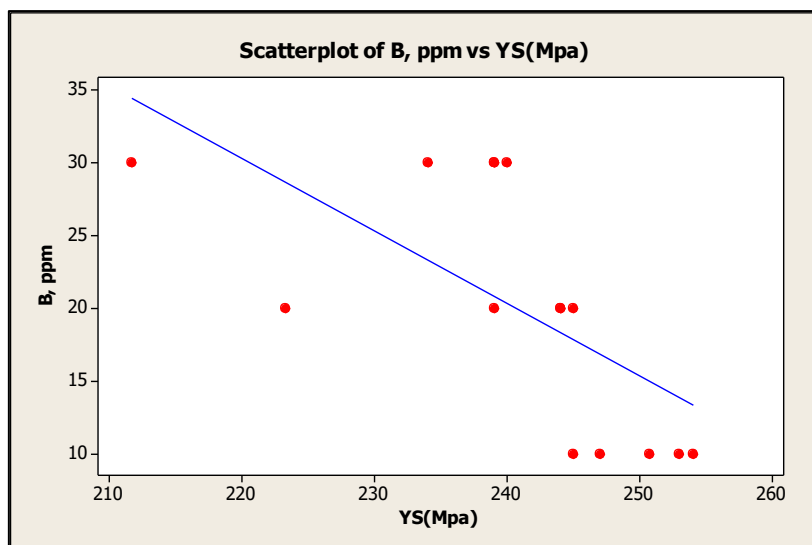
คุณสมบัติของเหล็กสามารถขึ้นอยู่กับธาตุเจือหรือธาตุผสมเช่นกัน โดยปกติแล้วนั้น ธาตุผสมแต่ละชนิดจะส่งผลต่อคุณสมบัติของเหล็กแตกต่างกัน นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมลงไปเช่นกัน

3.5.1 ปริมาณ Boron alloys ในเหล็ก

โดยสำหรับกรณีศึกษานี้จะทำการการศึกษาคุณสมบัติของธาตุ Boron ที่มีต่อค่าเชิงกลของเหล็ก โดยเป็นการศึกษาระดับของปริมาณธาตุ Boron ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก โดยจากทฤษฎีระบุเกี่ยวกับคุณสมบัติการจับตัวกับธาตุ Nitrogen ที่ว่องไวกว่าธาตุ Aluminium ซึ่งทำให้เกิดธาตุ Nitrogen free ในเนื้อเหล็กลดลง ซึ่งหาก Nitrogen free ในเนื้อเหล็กมีปริมาณมาก จะทำให้เหล็กมีคุณสมบัติการขึ้นรูปที่แย่ง ดังนั้นธาตุ Boron จึงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเช่นกัน เพื่อพิสูจน์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกลทางสถิติเบื้องต้น โดยใช้หลัก การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) จะได้ผลดังนี้

3.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron (B) เทียบค่า Yield strength (YS) ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature (CT) คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.25 และจากรูปสรุปได้ว่าปริมาณธาตุ Boron สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Yield strength มีค่าต่ำลง



รูปที่ 3.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ YS ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.031 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.26 แสดงถึงว่าปริมาณ Boron ส่งผลกระทบบต่อค่า Yield strength กล่าวคือเมื่อปริมาณ Boron สูงขึ้น ค่า Yield strength มีค่าลดลง

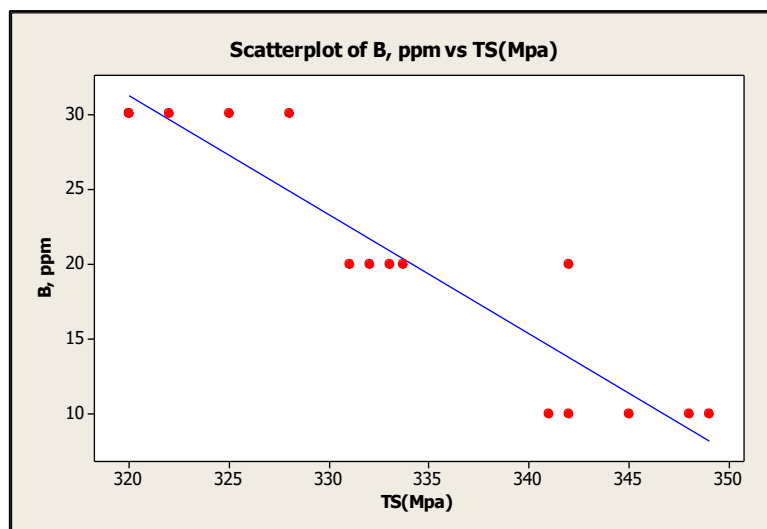
One-way ANOVA: YS(Mpa) versus B, ppm					
Source	DF	SS	MS	F	P
B, ppm	2	756.9	378.5	4.70	0.031
Error	12	967.3	80.6		
Total	14	1724.2			

S = 8.978 R-Sq = 43.90% R-Sq(adj) = 34.55%

รูปที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า YS ตลอดความยาว Coil

3.5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron เทียบค่า Tensile strength ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว(One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.27 และจากรูปสรุปได้ว่าปริมาณธาตุ Boron สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าต่ำลง



รูปที่ 3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ TS ตลอดความยาว Coil

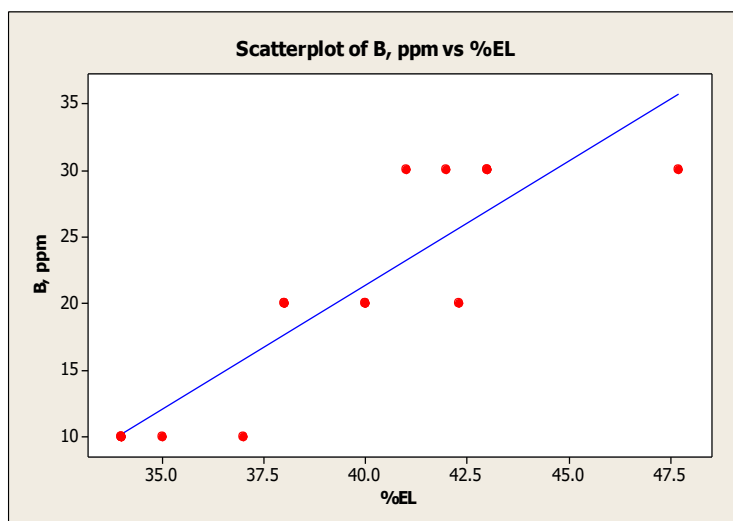
จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.28 แสดงถึงว่าปริมาณ Boron ส่งผลกระทบต่อค่า Tensile strength กล่าวคือเมื่อปริมาณ Boron สูงขึ้น ค่า Tensile strength มีค่าลดลง

One-way ANOVA: TS(Mpa) versus B, ppm						
Source	DF	SS	MS	F	P	
B, ppm	2	1210.4	605.2	41.38	0.000	
Error	12	175.5	14.6			
Total	14	1385.9				
S = 3.824 R-Sq = 87.34% R-Sq(adj) = 85.23%						

รูปที่ 3.28 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า TS ตลอดความยาว Coil

3.5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Boron เทียบค่า Elongation ที่อุณหภูมิ Coiling Temperature คงที่ 610°C

การวิเคราะห์เชิงสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยดังกล่าวจำนวน 15 ตัวอย่าง รวม 15 ชิ้นงานตลอดความยาว Coil ตามรูปที่ 3.12 และนำผลคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 3.29 และจากรูปสรุปได้ว่าปริมาณธาตุ Boron สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Elongation มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ EL ตลอดความยาว Coil

จากการทดสอบพบว่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 3.30 แสดงถึงว่าปริมาณ Boron ส่งผลกระทบบต่อค่า Elongation กล่าวคือเมื่อปริมาณ Boron สูงขึ้น ค่า Elongation มีค่าสูงขึ้น

One-way ANOVA: %EL versus B, ppm					
Source	DF	SS	MS	F	P
B, ppm	2	183.49	91.74	23.92	0.000
Error	12	46.02	3.84		
Total	14	229.51			

S = 1.958 R-Sq = 79.95% R-Sq(adj) = 76.60%

รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทิศทางเดียว (One-way ANOVA) ของ B ต่อค่า EL ตลอดความยาว Coil

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ได้แก่ Fishing temperature, ปริมาณ Boron และ Compensation temperature ที่มีต่อค่าเชิงกล และ ค่าปริมาณเกรนผสม โดยจากผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย สามารถสรุปผลกระทบของปัจจัยได้ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปค่า p-value ที่ได้จากการเปรียบเทียบปัจจัยนำเข้าที่มีต่อค่าของคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

ปัจจัยนำเข้า	ผลตอบสนอง	ค่า P-Value	สรุปผลการวิเคราะห์
Finishing temperature (FT ;°C)	Yield strength	0.000	Finishing temperature มีผลต่อค่า Yield strength
	Tensile strength	0.000	Finishing temperature มีผลต่อค่า Tensile strength
	%Elongation	0.000	Finishing temperature มีผลต่อค่า%Elongation
Compensation temperature (Te; °C)	Yield strength	0.001	Compensation temperature มีผลต่อค่า Yield strength
	Tensile strength	0.022	Compensation temperature มีผลต่อค่า Tensile strength
	%Elongation	0.000	Compensation temperature มีผลต่อค่า%Elongation
ปริมาณ Boron (B; ppm)	Yield strength	0.031	ปริมาณ Boron มีผลต่อค่า Yield strength
	Tensile strength	0.000	ปริมาณ Boron มีผลต่อค่า Tensile strength
	%Elongation	0.000	ปริมาณ Boron มีผลต่อค่า%Elongation

หมายเหตุ z: ค่า P-value < 0.05 หมายความว่ามีความมีนัยสำคัญ หรือ Significant

สรุปจากตารางที่ 3.2 พบว่าผลการทดลองสำหรับการรีดร้อนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยที่สนใจ ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (Finishing temperature) ปริมาณ Boron (Boron quantity) และอุณหภูมิชดเชยขอบ (Compensation temperature) พบว่าทั้ง 3 ปัจจัย มีอิทธิพลต่อค่าสมบัติเชิงทั้ง Yield strength Tensile strength และ %Elongation ทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงนำปัจจัยทั้งสามไปทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์และระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย การจัดเตรียม อุปกรณ์และวัสดุ การกำหนดวิธีการเก็บข้อมูล การกำหนดวิธีการทดลอง และการกำหนดวิธีการ ทดสอบค่าเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค เพื่อทำการเก็บผล และรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลตาม หลักการสถิติวิศวกรรม ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

4.1.1 ชิ้นงานวิจัย

เตรียมชิ้นงานจากเหล็กแผ่นรีดร้อนกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ชั้น คุณภาพ Hr1 ควบคุมคุณภาพตาม มอก.528-2548 ความหนา 3.00 มม. มีส่วนผสมทางเคมีหลักตาม ตารางที่ 4.1 โดยผ่านกระบวนการรีดร้อนที่โรงงานของบริษัทการศึกษา

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมหลักทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Al	N(ppm)	Fe
0.03-0.05	0.20-0.24	<0.02	<0.02	<0.01	0.03-0.05	30	Balance

สำหรับธาตุเจือ Boron (B) ที่เจือเพิ่มเติมแปรผันตามการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพล คุณสมบัติที่มีต่อค่าเชิงกลซึ่งจะระบุเพิ่มเติมในบทที่ 5

4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

4.1.2.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

สำหรับการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าเชิงกลทั้ง 3 ค่าประกอบด้วยค่า การทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength), ค่าทนแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และค่าร้อยละ การยืด (Elongation) โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Instron รุ่น Model 5585H สำหรับทดสอบแรงดึงของ ชิ้นงาน เพื่อวัดคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบแรงดึง Instron Model 5585H

4.1.2.2 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (Sample)

ชิ้นงานตัวอย่างที่ตัดมาทดสอบแรงดึงจะถูกเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยลักษณะการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก.244 เล่ม 4-2525 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมเพื่อทดสอบแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึง

4.1.2.3 กล้องทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของเหล็กและคำนวณปริมาณเกรนผสมในเนื้อเหล็ก เพื่อระบุลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

4.2 กำหนดวิธีการทดลอง

4.2.1 กำหนดเงื่อนไขสำหรับกระบวนการรีดร้อนเหล็ก

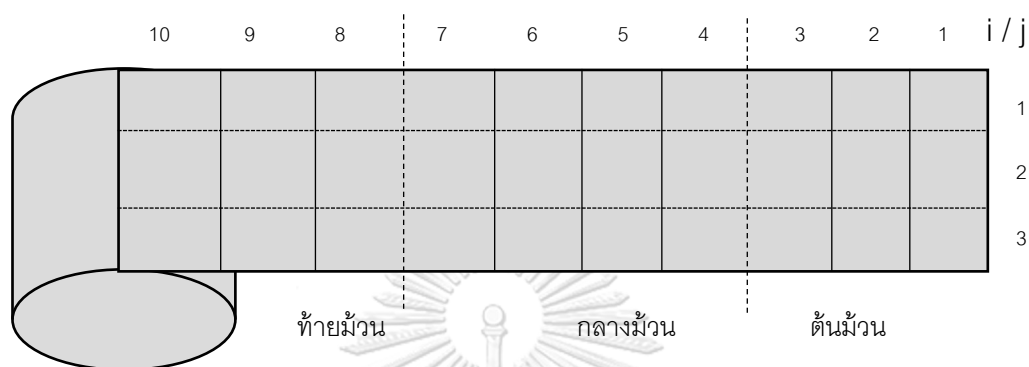
นำเหล็กแท่งแบน (Slab) มาเข้าเตาอบปรับสภาพโครงสร้าง และเข้าสู่กระบวนการรีดร้อนเพื่อปรับสภาพเหล็กด้านมิติขนาด โดยสำหรับงานวิจัยนี้จะทำการรีดลดขนาดลงมาที่ความหนา 3 มม. และปรับอุณหภูมิในการรีดให้ผันแปรไปตามเงื่อนไขของแผนการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แผนการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล

แผนการทดลอง				
วัตถุประสงค์	ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเชิงกลในกระบวนการรีดร้อนเหล็กแผ่น เพื่อกำหนดค่าเชิงกลให้ตรงตามความต้องการของลูกค้าและการใช้งาน (เงื่อนไขที่ลูกค้าต้องการคือ $YS > 210 \text{ MPa}$; $EL > 38\%$)			
ตัวแปรตอบสนองในการทดลอง	1. ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield strength) 2. ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) 3. ค่าความยืด (% Elongation)			
ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	ระดับปัจจัย			
	สัญลักษณ์	(-) ต่ำ	(0) กลาง	(+) สูง
1. อุณหภูมิที่เหล็กออกจากลูกรีดสูงสุดท้ายของชุดแผ่นรีดละเอียด ($^{\circ}\text{C}$, FT)	A	830	850	870
2. ปริมาณธาตุ Boron (ppm, B)	B	10	20	30
3. อุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ ($^{\circ}\text{C}$, Te)	C	10	20	30
ตัวแปรควบคุม	การควบคุม			
1. มาตรฐานเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน	ภายใต้ มอก.528-2548			
2. อุณหภูมิที่เหล็กถูกม้วน , $^{\circ}\text{C}$	610			
3. เกรดของเหล็กที่ผลิต	Hr1			
4. Dimension ,mm	3.00 x 365 mm			
5. เกรดของวัตถุดิบเดียวกัน (Slab grade)	Low carbon ,Low alloys			
6. วิธีการสุ่มตัวอย่างทดสอบ	เก็บชิ้นงานมาทั้งหมด 30 ชิ้นต่อ 1 Coil โดยแบ่งเป็นแถบขอบฝั่งซ้าย กลาง และฝั่งขวา อย่างละ 10 ชิ้น ตลอดความยาว Coil			
7. ค่าเคมีใน Slab	แสดงดังตาราง 4.1			
การออกแบบการทดลอง	3^k Factorial Design ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ทั้งหมด $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$ การทดลอง			

4.2.2 กำหนดกระบวนการเก็บข้อมูล

สำหรับวิธีการเก็บข้อมูลนั้น ผู้วิจัยทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆของ Coil เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติ โดยเก็บชิ้นงานขนาด 500x500 มม. มาทั้งหมด 30 ชิ้น ต่อ 1 Coil ลักษณะดังภาพเพื่อนำมาทดสอบค่าเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค เพื่อทำการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งชิ้นงานบนเหล็กม้วนตลอดความยาว Coil ที่นำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

4.2.3 ทดสอบค่าเชิงกล

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อทดสอบค่าเชิงกล ดังนี้

- 1) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength; YS)
- 2) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength; TS)
- 3) ค่าความยืด (Elongation; EL)

4.2.4 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการทดสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก โดยตัดชิ้นงานแนวขวาง(Cross section) ของความหนา และนำชิ้นงานกัดกรดโดยใช้สารละลายละลาย 2% Nital เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้อง Optical microscope ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า

4.3 วิธีการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าคุณสมบัติเชิงกล

- 1) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกล

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab จากข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าเชิงกลทั้ง 3 ชนิด (YS ,TS ,EL) ที่ได้จากการแปรผันระดับของปัจจัย เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ที่มีต่อค่าเชิงกลที่ระดับ $\alpha=0.05$

2) การวิเคราะห์ค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ

จากวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab จะแสดงสมการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ เพื่อได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกล ซึ่งทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อค่าเชิงกลทั้ง 3 ชนิด

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับกรณีเป้าหมายและก่อนการศึกษา

1) เปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเทียบกรณีค่าเป้าหมายและก่อนการทดลอง โดยผลของปัจจัยที่ทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่า YS สูงสุด

กรณีที่ 2 ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่า TS สูงสุด

กรณีที่ 3 ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่า EL สูงสุด

กรณีที่ 4 ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (YS>210 MP, TS>310 MP, EL>38%)

2) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าผลิตจริง เพื่อเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าที่ผลิตจริงของค่าปัจจัยที่เหมาะสมและตรงตามความต้องการของลูกค้า

บทที่ 5

ผลการทดลองและการอภิปราย

สำหรับในบทนี้ เป็นการแสดงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองจากการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 4 โดยจะประกอบไปด้วยผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Yield strength, Tensile strength และ %Elongation) และโครงสร้างจุลภาค(Microstructure) เพื่อทำการวิเคราะห์และอภิปรายผลโดยใช้หลักการทางสถิติ และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 830 °C แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเชิงกลของชิ้นงานแต่ละตำแหน่งและสรุปข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อตารางที่ 5.2

2. ค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 830°C แสดงดังตารางที่ 5.2 พบว่าข้อมูลค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 830 °C มีค่า %CV ของ YS, TS และ EL ไม่เกินร้อยละ 10 จึงถือว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ โดยค่า %CV ของ YS, TS และ EL สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 3.5, 1.5 และ 3 ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850°C แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งแสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเชิงกลของชิ้นงานแต่ละตำแหน่งเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อตารางที่ 5.4

4. ค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 850°C แสดงดังตารางที่ 5.4 พบว่าข้อมูลค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 850°C พบว่า %CV ของค่า YS, TS และ EL ไม่เกินร้อยละ 10 จึงถือว่าข้อมูล มีความน่าเชื่อถือ โดยค่า %CV ของ YS, TS และ EL สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 2.6, 2.0 และ 6.8 ตามลำดับ

5. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 870 °C แสดงดังตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเชิงกลของชิ้นงานแต่ละตำแหน่ง และสรุปข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อตารางที่ 5.6

6. ค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 870 °C แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 830 °C

ลำดับ	ลำดับ การสุ่ม ทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติเชิงกล											
		FT (°C)	B (ppm)	CT (°C)	แถบซ้าย			แถบกลาง			แถบขวา			รวมทั้งหมด		
					YS(MPa)	TS(Mpa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	4, 51			10	250	350	35	249	350	36	253	352	34	250	351	35
2	19, 53	830	10	20	240	346	37	245	344	38	236	347	36	240	346	37
3	33, 39			30	232	342	40	250	348	38	232	340	41	238	344	40
4	6, 22			10	225	337	42	223	328	43	222	336	42	223	334	42
5	30, 34	830	20	20	221	328	44	222	321	45	218	326	43	220	325	44
6	25, 41			30	221	326	45	223	322	44	217	325	46	220	324	45
7	3, 35			10	212	315	47	210	313	49	213	318	47	212	315	48
8	16, 13	830	30	20	205	312	49	213	314	49	207	310	48	208	312	48
9	19, 23			30	201	303	50	212	312	50	204	303	51	206	306	50

ตารางที่ 5.2 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 830 °C

ลำดับ	ลำดับการ สุ่มทดลอง	ปัจจัย			ค่าคุณสมบัติเชิงกล								
		FT (°C)	B (ppm)	CT (°C)	ค่าเฉลี่ยโดยรวม			Standard Deviation (SD)			% Coefficient of variation (%CV)		
					YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	4, 51			10	250	351	35	2	1	1	0.7	0.3	1.5
2	19, 53	830	10	20	240	346	37	3	1	1	1.4	0.4	2.9
3	33, 39			30	238	344	40	8	4	1	3.5	1.0	3.0
4	6, 22			10	223	334	42	1	4	1	0.6	1.2	1.2
5	30, 34	830	20	20	220	325	44	2	3	1	0.9	1.0	1.5
6	25, 41			30	220	324	45	3	2	1	1.3	0.5	1.4
7	3, 35			10	212	315	48	1	2	1	0.6	0.7	1.3
8	16, 13	830	30	20	208	312	48	3	2	0	1.5	0.6	0.7
9	19, 23			30	206	306	50	5	4	1	2.3	1.5	1.0

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 850 °C

ลำดับ	ลำดับการสุ่มทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติเชิงกล											
		FT (°C)	B (ppm)	CT (°C)	แถบซ้าย			แถบกลาง			แถบขวา			รวมทั้งหมด		
					YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
10	15, 49			10	252	350	34	255	353	34	251	348	33	253	350	34
11	9, 42	850	10	20	244	348	38	256	355	33	242	345	37	247	349	36
12	14, 32			30	245	340	37	253	354	34	242	339	39	247	344	36
13	24, 40			10	228	333	42	224	326	44	225	331	42	225	330	42
14	36, 54	850	20	20	231	325	41	234	332	42	231	327	43	232	328	42
15	17, 46			30	243	340	40	247	347	37	243	343	44	244	343	40
16	18, 21			10	230	329	45	224	326	42	238	328	46	230	327	44
17	43, 48	850	30	20	220	318	47	219	320	47	217	319	47	219	319	47
18	27, 28			30	210	309	49	215	317	49	211	312	49	212	313	49

ตารางที่ 5.4 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 850 °C

ลำดับ	ลำดับการ สุ่มทดลอง	ปัจจัย			ค่าคุณสมบัติเชิงกล								
		FT (°C)	B (ppm)	CT (°C)	ค่าเฉลี่ยโดยรวม			Standard Deviation (SD)			% Coefficient of variation (%CV)		
					YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
10	15, 49			10	253	350	34	2	2	0	0.7	0.5	1.2
11	9, 42	850	10	20	247	349	35	6	4	2	2.6	1.2	6.1
12	14, 32			30	247	344	37	5	7	2	1.9	2.0	6.8
13	24, 40			10	225	330	42	3	3	0	1.2	1.0	1.0
14	36, 54	850	20	20	232	328	42	1	3	1	0.4	1.0	1.8
15	17, 46			30	244	343	40	2	2	3	0.7	0.7	6.7
16	18, 21			10	230	327	44	6	2	2	2.5	0.6	4.3
17	43, 48	850	30	20	218	319	47	1	1	0	0.6	0.5	0.7
18	27, 28			30	212	313	49	2	4	0	0.7	1.2	0.7

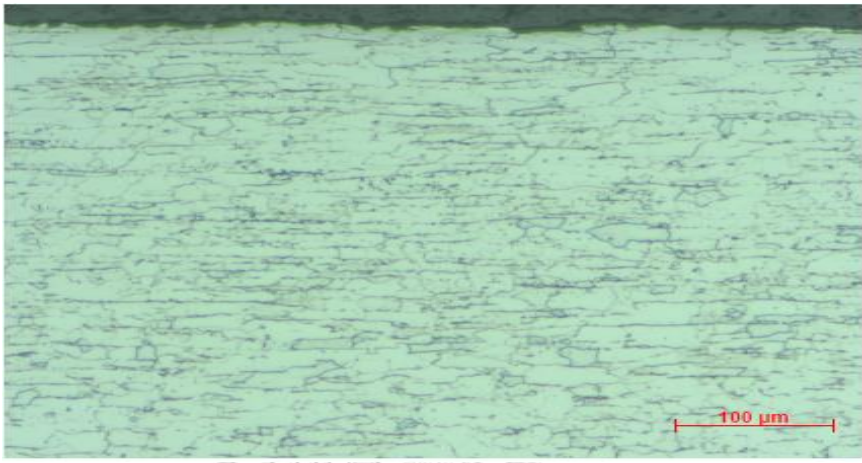
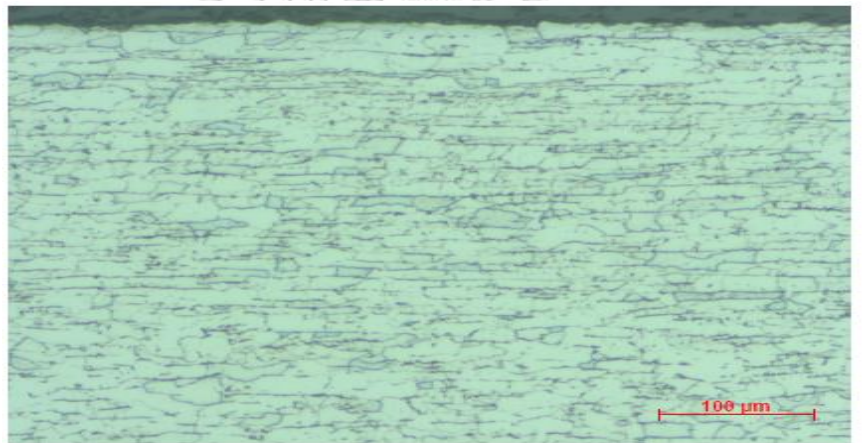
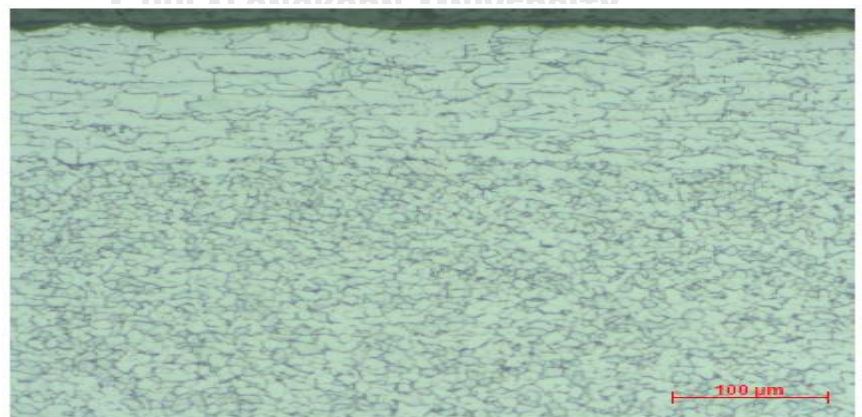
ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT 870 °C

ลำดับ	ลำดับการสุ่มทดลอง	ปัจจัย			ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติเชิงกล											
		FT (°C)	B (ppm)	CT (°C)	แถบซ้าย			แถบกลาง			แถบขวา			รวมทั้งหมด		
					YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
19	2, 52			10	260	358	33	266	360	31	255	355	34	260	358	33
20	7, 20	870	10	20	247	349	39	267	366	30	249	347	39	254	354	36
21	37, 44			30	235	334	38	266	363	31	235	333	39	246	343	36
22	10, 31			10	246	345	35	242	341	41	242	344	37	243	344	38
23	12, 29	870	20	20	238	334	42	243	342	41	239	338	42	240	338	42
24	8, 50			30	238	331	43	242	342	42	240	335	44	240	336	43
25	5, 45			10	232	326	45	225	325	45	230	326	45	229	326	45
26	1, 26	870	30	20	222	321	48	228	327	44	221	319	47	223	323	46
27	38, 47			30	214	315	49	230	330	42	216	314	49	220	320	47

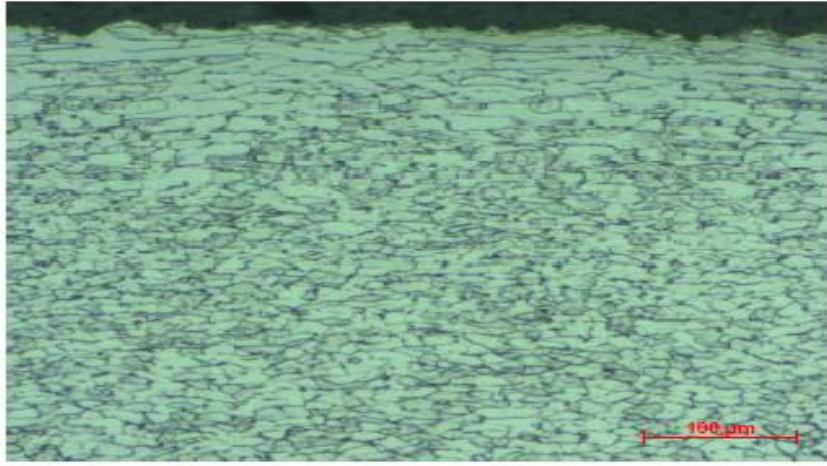
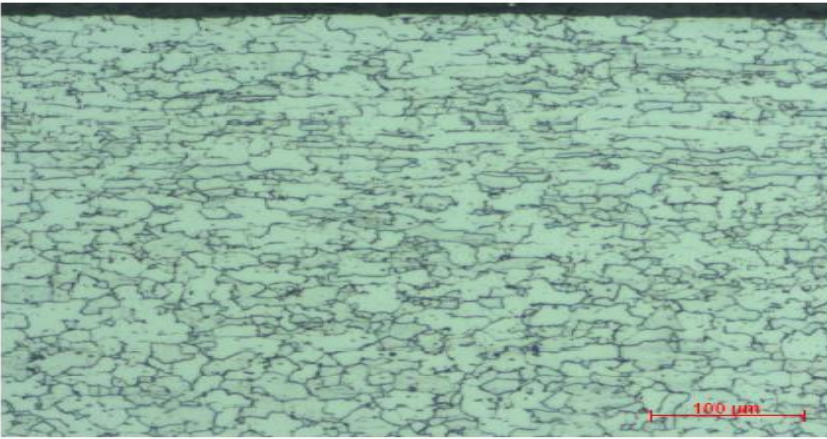
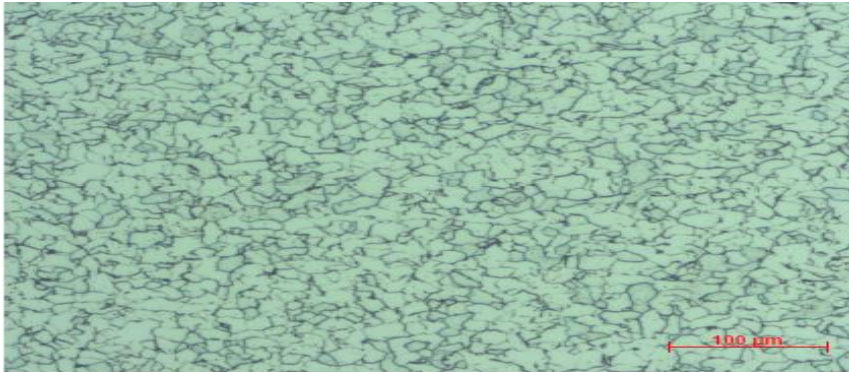
ตารางที่ 5.6 สรุปค่าเฉลี่ยโดยรวม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าร้อยละของสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ของค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ FT 870 °C

ลำดับ	ลำดับการ สุ่มทดลอง	ปัจจัย			ค่าคุณสมบัติเชิงกล								
		FT (C)	B (ppm)	CT (C)	ค่าเฉลี่ยโดยรวม			Standard Deviation (SD)			% Coefficient of variation (%CV)		
					YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
19	2, 52			10	260	358	33	5	2	1	1.8	0.5	3.6
20	7, 20	870	10	20	254	354	36	9	9	4	3.4	2.4	11.8
21	37, 44			30	246	343	36	15	14	4	5.9	4.1	10.7
22	10, 31			10	243	344	38	2	2	2	0.8	0.5	5.8
23	12, 29	870	20	20	240	338	42	2	4	0	1.0	1.0	0.7
24	8, 50			30	240	336	43	1	5	1	0.6	1.4	2.3
25	5, 45			10	229	326	45	3	0	0	1.3	0.1	0.8
26	1, 26	870	30	20	223	323	46	3	4	2	1.4	1.1	3.5
27	38, 47			30	220	320	47	7	7	3	3.4	2.3	6.9

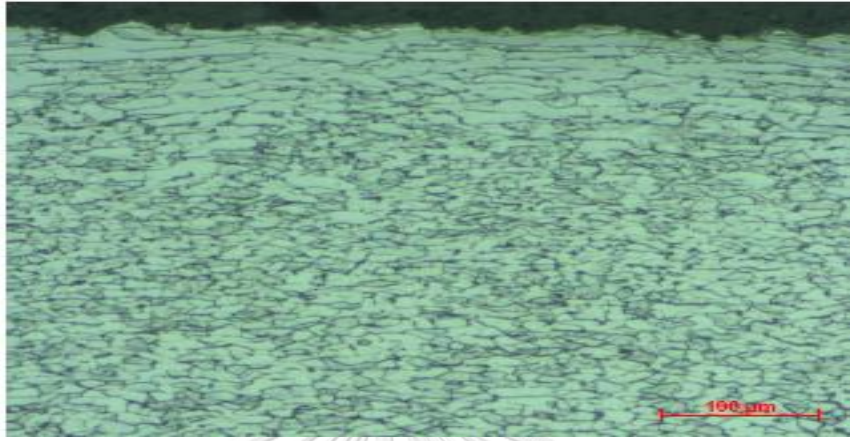
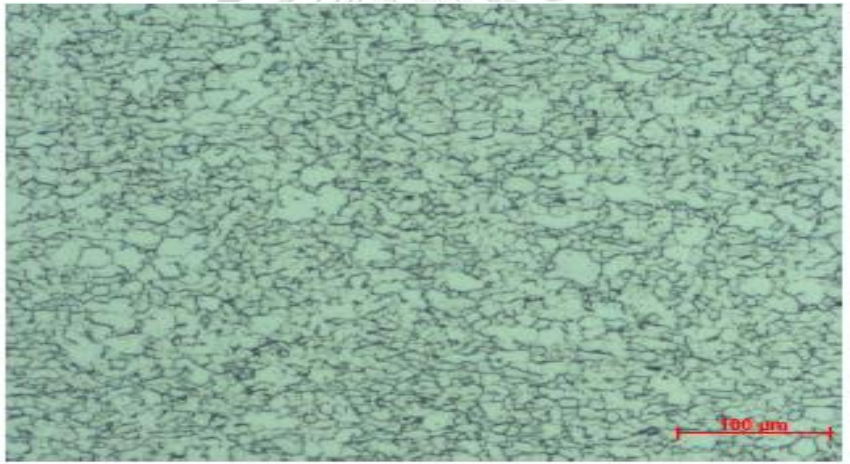
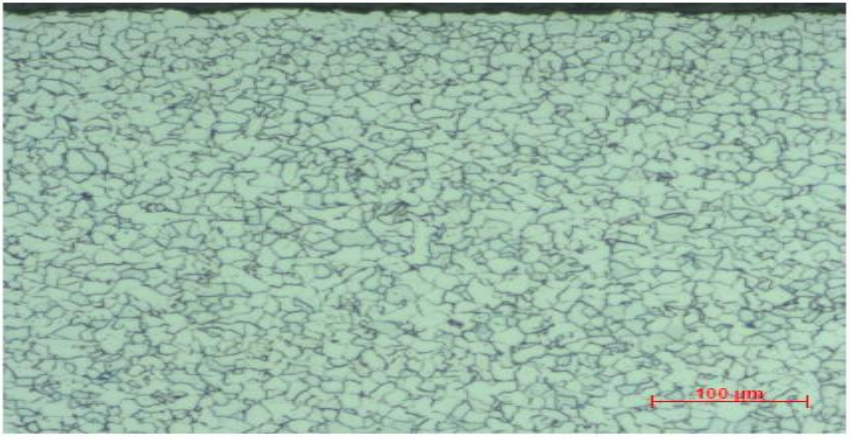
7. จากรูปที่ 5.1 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 830°C โดยใช้อุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าปริมาณเกรนผสมมีปริมาณลดลงและมีลักษณะสม่ำเสมอ (Equiaxed grain) เมื่อเพิ่ม Te โดยโครงสร้างหลักเป็นเฟอร์ไรต์ มีลักษณะแนวยาวตามทิศทางการรีดที่บริเวณใกล้ผิว
8. จากรูปที่ 5.2 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 830°C โดยใช้อุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับ พบว่าที่กำลังขยาย 100 เท่า ปริมาณเกรนผสมมีปริมาณลดลง และเป็นลักษณะ Equiaxed grain มากขึ้น เมื่อเพิ่ม Te โดยลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรต์ มีลักษณะแนวยาวตามทิศทางการรีด และเมื่อเทียบกับ FT 830 °C โครงสร้างเกรนของเหล็กมีความละเอียดมากกว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน
9. จากรูปที่ 5.3 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 870°C และขอบอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับ กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าปริมาณเกรนผสมมีปริมาณลดลง และเป็นลักษณะ Equiaxed grain มากขึ้น เมื่อเพิ่ม Te โดยลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรต์ มีลักษณะแนวยาวตามทิศทางการรีด และเมื่อเทียบกับ FT 850 °C และ 870 °C โครงสร้างเกรนของเหล็กมีความละเอียดมากกว่าที่อุณหภูมิที่ขอบเดียวกัน

โครงสร้างจุลภาค (ขยาย 100 เท่า ตามแนวทิศทางการรีด)		
Te (°C)	FT 830 °C; B 10 ppm	Mix Grain (%)
10		36
20		28
30		9

รูปที่ 5.1 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 830°C และชดเชยอุณหภูมิที่ชอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 100 เท่า

โครงสร้างจุลภาค (ขยาย 100 เท่า ตามทิศทางการรีด)		
Te (°C)	FT 850 °C; B 10 ppm	Mix Grain (%)
10		21
20		13
30		4.2

รูปที่ 5.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 850°C และชดเชยอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30 °C ตามลำดับที่กำลังขยาย 100 เท่า

โครงสร้างจุลภาค (ขยาย 100 เท่า ตามทิศทางการรีด)		
Te (°C)	FT 870 °C; B 10 ppm	Mix Grain (%)
10		18%
20		9%
30		1.36%

รูปที่ 5.3 ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มี Boron (B) 10 ppm ผ่านการรีดร้อนละเอียดสุดท้าย (FT) ที่ 870 °C และชดเชยอุณหภูมิที่ขอบ (Te) 10, 20 และ 30°C ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 100 เท่า

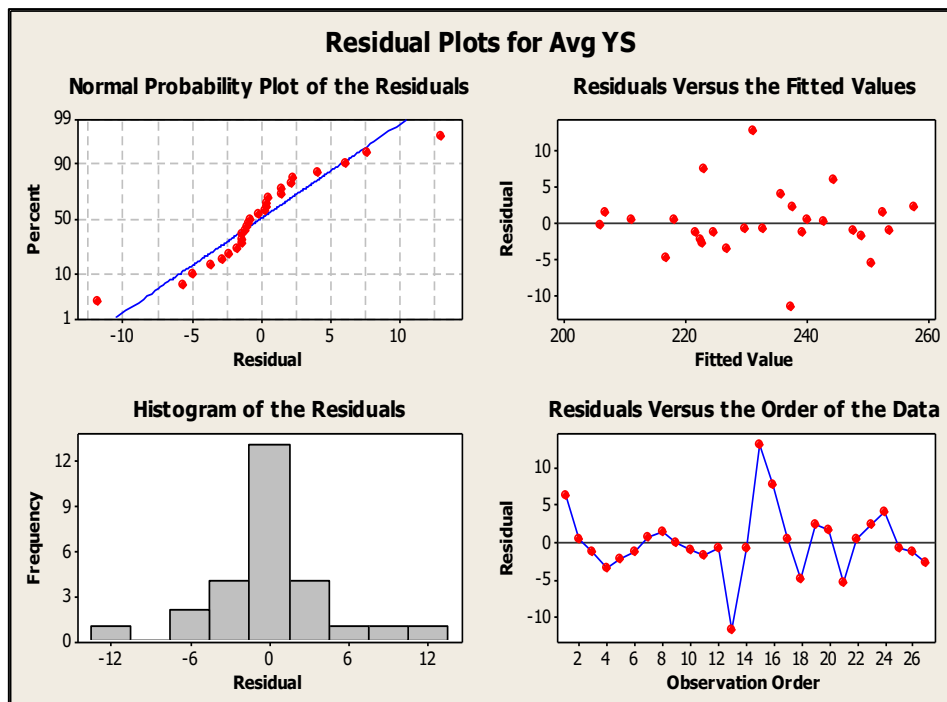
5.2 ผลของอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า YS

โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัว และมีค่า P-Value ของ FT, B และ Te มีค่าต่ำกว่า α ที่ระดับ 0.05 หรือค่าตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่า YS อย่างมีนัยสำคัญ แต่ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามมีค่า P-Value สูงกว่า α ที่ระดับ 0.05 และสรุปว่าไม่มีอิทธิพลต่อค่า YS อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูป 5.4 โดยจากรูป 5.4 (ก) แสดงถึงกราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS) และรูป 5.4 (ข) แสดงผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

5.2.2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า YS

รูปที่ 5.5 แสดงอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) และปัจจัยหลัก (Main effect) จากรูป 5.5 (ก) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดครากซึ่งไม่มีอิทธิพลต่อค่า YS อย่างมีนัยสำคัญ และจากรูป 5.5 (ข) แสดงถึงอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดครากซึ่งอิทธิพลต่อค่า YS อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าเมื่อ FT เพิ่มขึ้นมีผลให้ YS เพิ่มขึ้น และเมื่อ B และ Te เพิ่มขึ้นแต่กลับมีผลให้ค่า YS ลดลง



(ก) กราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Avg YS

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	232.719	2.841	81.912	0.000
FT, °C	7.583	1.315	5.766	0.000
B, ppm	-15.367	1.315	-11.684	0.000
Te, °C	-3.061	1.315	-2.328	0.033
FT, °C*FT, °C	-2.539	2.278	-1.115	0.281
B, ppm*B, ppm	0.944	2.278	0.415	0.684
Te, °C*Te, °C	1.661	2.278	0.729	0.476
FT, °C*B, ppm	1.342	1.611	0.833	0.416
FT, °C*Te, °C	-0.467	1.611	-0.290	0.776
B, ppm*Te, °C	-0.000	1.611	-0.000	1.000

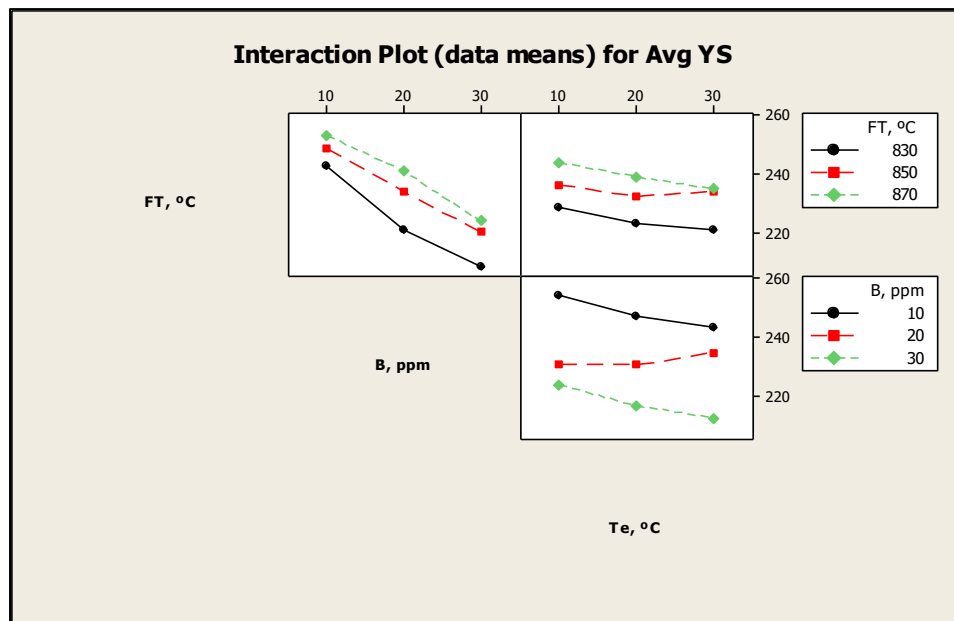
S = 5.580 R-Sq = 91.3% R-Sq(adj) = 86.7%

Analysis of Variance for Avg YS

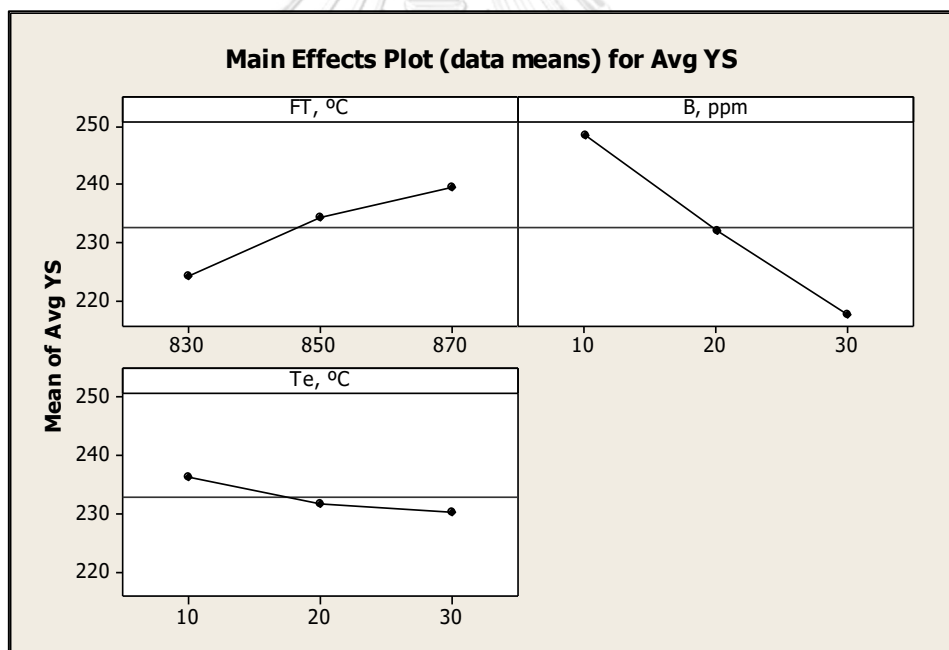
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	5539.01	5539.01	615.45	19.77	0.000
Linear	3	5454.21	5454.21	1818.07	58.40	0.000
Square	3	60.58	60.58	20.19	0.65	0.595
Interaction	3	24.21	24.21	8.07	0.26	0.854
Residual Error	17	529.27	529.27	31.13		

(ข) ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

รูปที่ 5.4 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิ
 ชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)



(ก) กราฟปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)



(ข) กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)

รูปที่ 5.5 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength; YS)

5.2.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model)

เพื่อดูว่าเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 เทอม จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง YS โดยรวมของ Strip กับ Finishing temperature (FT), Boron (B) และ Compensation temperature (Te) ซึ่งสมการถดถอยที่ได้ แสดงดังสมการที่ 5.1 โดยมีค่า $R^2=89.9\%$ และ $R^2_{(adj)} = 88.6\%$ และแสดงวิธีการกำหนดสมการดังรูปที่ 5.6

$$\text{Yield strength (MPa)} = -52.7 + 0.379*FT - 1.54*B - 0.306*Te \quad (5.1)$$

Regression Analysis: Avg YS versus FT, °C, B, ppm, Te, °C				
The regression equation is				
Avg YS = - 52.7 + 0.379 FT, °C - 1.54 B, ppm - 0.306 Te, °C				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-52.67	51.88	-1.02	0.321
FT, °C	0.37917	0.06089	6.23	0.000
B, ppm	-1.5367	0.1218	-12.62	0.000
Te, °C	-0.3061	0.1218	-2.51	0.019
S = 5.16708 R-Sq = 89.9% R-Sq(adj) = 88.6%				

รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขีดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงที่จุดคราก (YS)

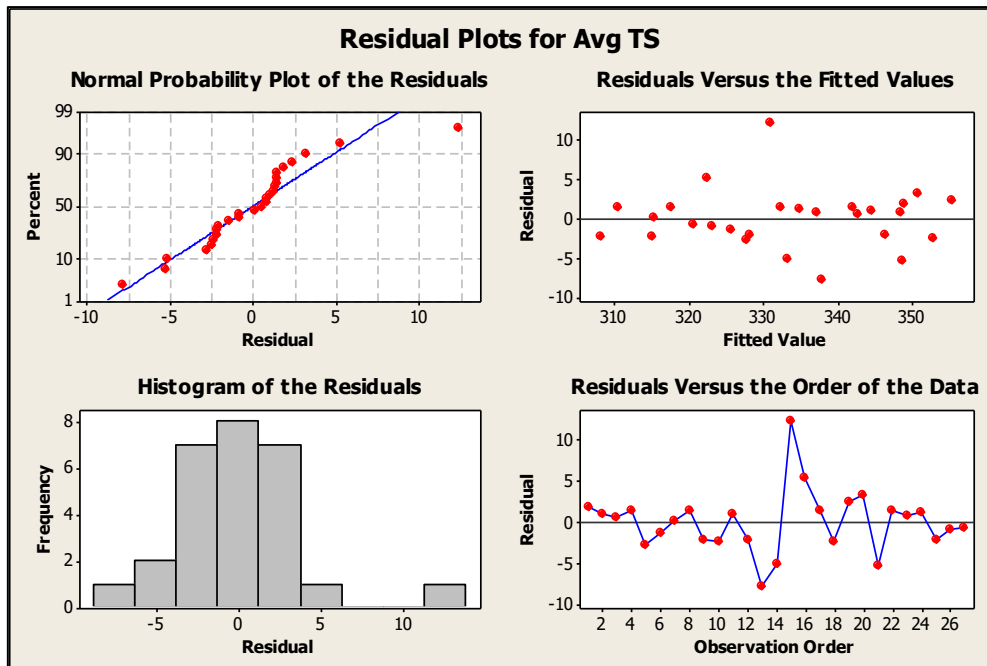
5.3 ผลของอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขีดเซย์ที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึง (Tensile strength; TS)

5.3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า TS

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัว และมีค่า P-Value ของ FT, B และ Te มีค่าต่ำกว่า α ที่ระดับ 0.05 หรือค่าตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่า TS อย่างมีนัยสำคัญ แต่ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามมีค่า P-Value สูงกว่า α ที่ระดับ 0.05 ไม่มีอิทธิพลต่อค่า TS อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 5.7 โดยจากรูป 5.7 (ก) แสดงถึงกราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS) และรูป 5.7 (ข) แสดงผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า TS

รูปที่ 5.8 แสดงอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) และปัจจัยหลัก (Main effect) จากรูป 5.8 (ก) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงซึ่งไม่มีอิทธิพลต่อค่า TS อย่างมีนัยสำคัญ และจากรูป 5.8 (ข) แสดงถึงอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึงซึ่งมีอิทธิพลต่อค่า TS อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าเมื่อ FT เพิ่มขึ้นมีผลให้ TS เพิ่มขึ้น และเมื่อ B และ Te เพิ่มขึ้นแต่กลับมีผลให้ค่า TS ลดลง



(ก) กราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS)

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Avg TS

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	333.211	2.362	141.077	0.000
FT, °C	4.683	1.093	4.283	0.001
B, ppm	-15.439	1.093	-14.121	0.000
Te, °C	-3.433	1.093	-3.140	0.006
FT, °C*FT, °C	-0.717	1.894	-0.378	0.710
B, ppm*B, ppm	-0.217	1.894	-0.114	0.910
Te, °C*Te, °C	1.167	1.894	0.616	0.546
FT, °C*B, ppm	1.617	1.339	1.207	0.244
FT, °C*Te, °C	-0.158	1.339	-0.118	0.907
B, ppm*Te, °C	-0.233	1.339	-0.174	0.864

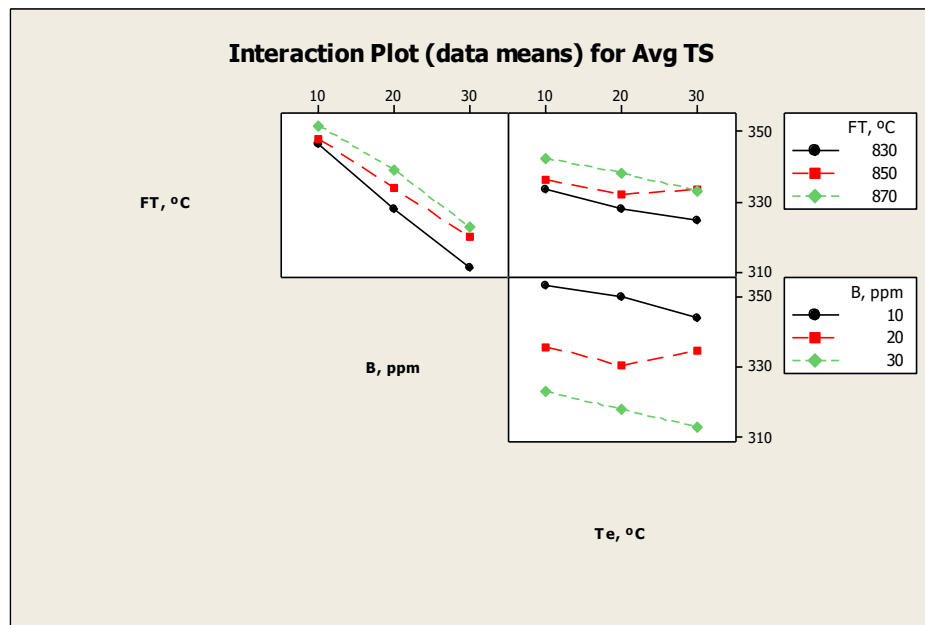
S = 4.639 R-Sq = 93.1% R-Sq(adj) = 89.5%

Analysis of Variance for Avg TS

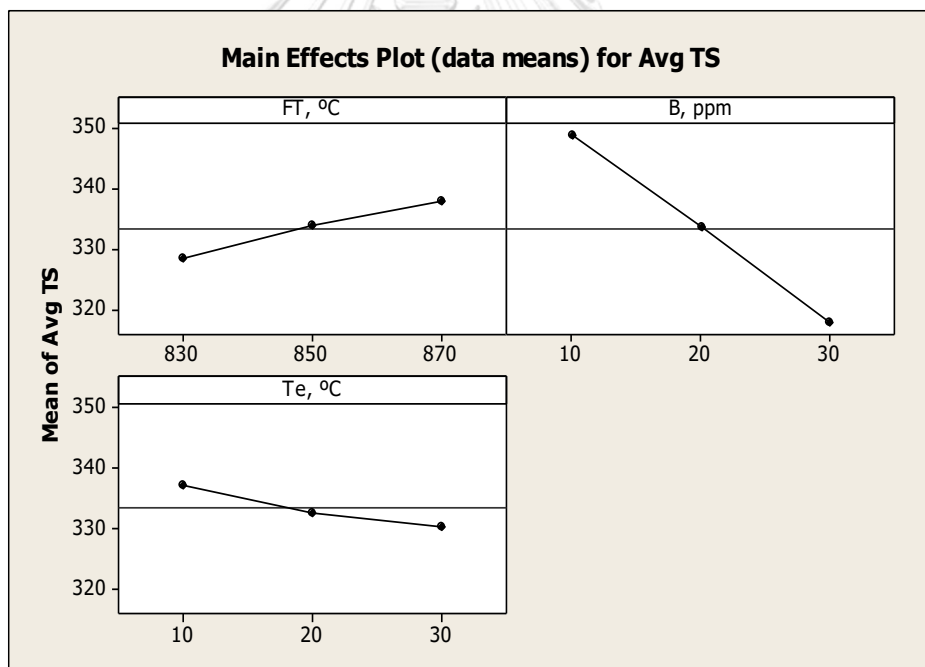
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	4941.30	4941.30	549.03	25.52	0.000
Linear	3	4897.45	4897.45	1632.48	75.87	0.000
Square	3	11.53	11.53	3.84	0.18	0.909
Interaction	3	32.32	32.32	10.77	0.50	0.687
Residual Error	17	365.80	365.80	21.52		
Total	26	5307.10				

(ข) ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

รูปที่ 5.7 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิ
 ชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS)



(ก) กราฟปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS)



(ข) กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (Tensile strength; TS)

รูปที่ 5.8 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงดึง (Tensile strength; TS)

5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model)

เพื่อดูว่าเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 เทอม จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง TS โดยรวมของ Strip กับ Finishing temperature (FT), Boron (B) และ Compensation temperature (Te) ซึ่งสมการถดถอยที่ได้ แสดงดังสมการที่ 5.2 โดยมีค่า $R^2=92.3\%$ และ $R^2_{(adj)} = 91.3\%$ และแสดงวิธีการกำหนดสมการ ดังรูปที่ 5.9

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 172 + 0.234 * \text{FT} - 1.54 * \text{B} - 0.343 * \text{Te} \quad (5.2)$$

Regression Analysis: Avg TS versus FT, °C, B, ppm, Te, °C				
The regression equation is				
Avg TS = 172 + 0.234 FT, °C - 1.54 B, ppm - 0.343 Te, °C				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	172.07	42.38	4.06	0.000
FT, °C	0.23417	0.04974	4.71	0.000
B, ppm	-1.54389	0.09947	-15.52	0.000
Te, °C	-0.34333	0.09947	-3.45	0.002
S = 4.22028 R-Sq = 92.3% R-Sq(adj) = 91.3%				

รูปที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึง (TS)

5.4 ผลของปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขาดเซยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)

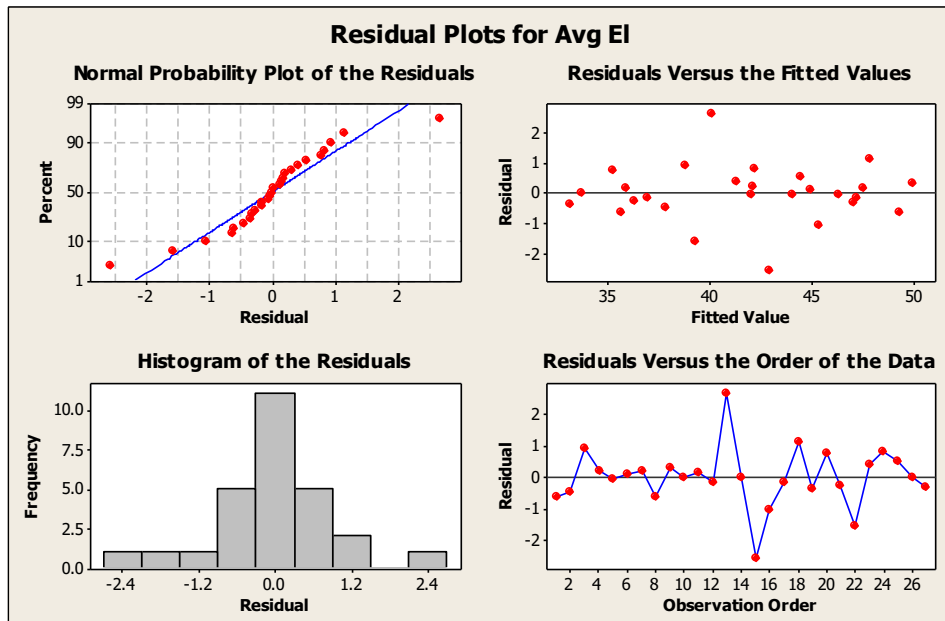
ทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า EL โดยวิเคราะห์ Two-Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab โดยรายละเอียด ดังนี้

5.4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีต่อค่า EL

โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวและมีค่า P-Value ของอุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิขาดเซยที่ขอบ (Te) มีค่าต่ำกว่า α ที่ระดับ 0.05 หรือค่าตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่า EL อย่างมีนัยสำคัญ แต่ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามมีค่า P-Value สูงกว่า α ที่ระดับ 0.05 ไม่มีอิทธิพลต่อค่า EL อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูป 5.10 โดยจากรูป 5.10 (ก) แสดงถึงกราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL) และรูป 5.10 (ข) แสดงผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

5.4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของค่า EL

รูปที่ 5.11 แสดงอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) จากรูป 5.8 (ก) แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัวซึ่งไม่มีอิทธิพลต่อค่า EL อย่างมีนัยสำคัญ และจากรูป 5.8 (ข) แสดงถึงอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัวซึ่งอิทธิพลต่อค่า EL อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า EL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ B และ Te เพิ่มขึ้น ขณะที่ FT มีค่าลดลง



(ก) กราฟ Residual สำหรับค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Avg El

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	42.0222	0.5901	71.215	0.000
FT, °C	-1.3833	0.2732	-5.064	0.000
B, ppm	5.6611	0.2732	20.725	0.000
Te, °C	1.4222	0.2732	5.207	0.000
FT, °C*FT, °C	0.6500	0.4731	1.374	0.187
B, ppm*B, ppm	-0.5167	0.4731	-1.092	0.290
Te, °C*Te, °C	-0.5667	0.4731	-1.198	0.247
FT, °C*B, ppm	-0.1167	0.3345	-0.349	0.732
FT, °C*Te, °C	0.0250	0.3345	0.075	0.941
B, ppm*Te, °C	-0.1667	0.3345	-0.498	0.625

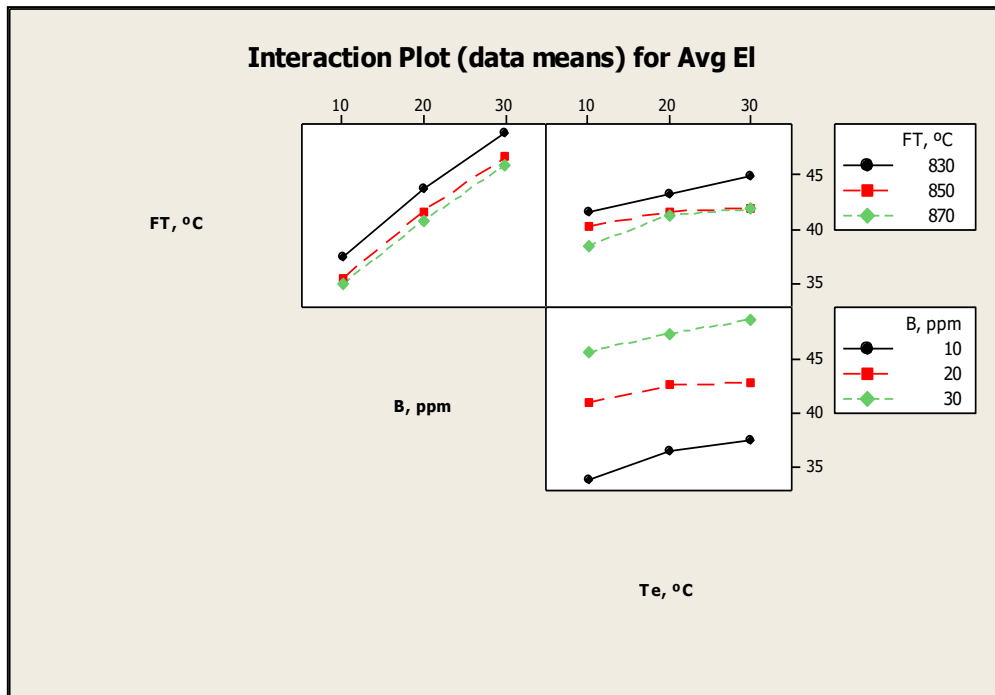
S = 1.159 R-Sq = 96.6% R-Sq(adj) = 94.8%

Analysis of Variance for Avg El

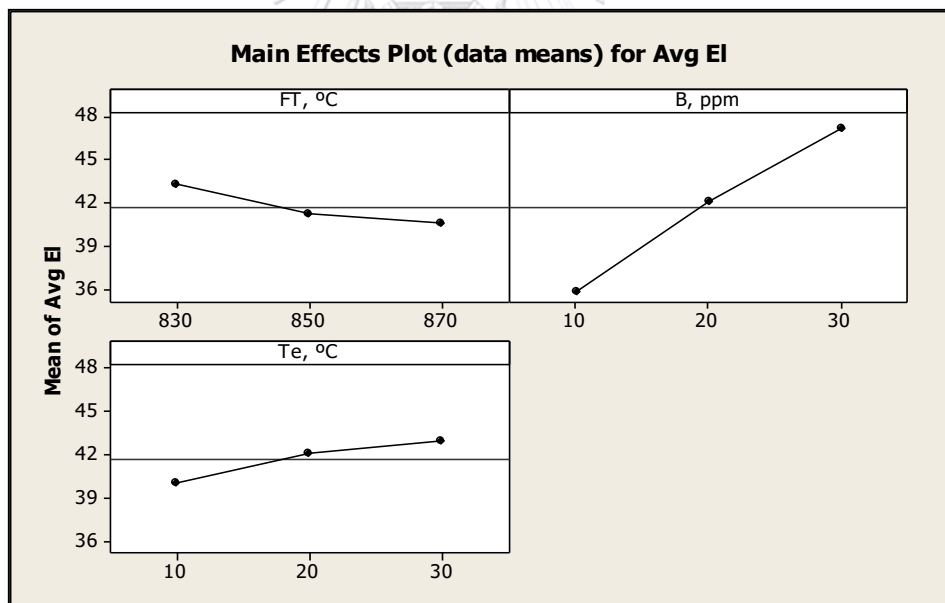
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	654.289	654.289	72.699	54.13	0.000
Linear	3	647.721	647.721	215.907	160.76	0.000
Square	3	6.063	6.063	2.021	1.50	0.249
Interaction	3	0.504	0.504	0.168	0.13	0.944
Residual Error	17	22.831	22.831	1.343		
Total	26	677.120				

(ข) ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

รูปที่ 5.10 ผลของปัจจัยทั้งสาม อุณหภูมิรีดสุดท้าย (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิซดเซย
 ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)



(ก) กราฟปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)



(ข) กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการยืดตัว (%Elongation; EL)

รูปที่ 5.11 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและอิทธิพลหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยร้อยละของการยืดตัว (%Elongation; EL) m

5.4.3 ผลการทดสอบหาค่าสมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model)

เพื่อดูว่าเทอมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 เทอม จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง EL โดยรวมของStripกับFinishing temperature (FT), Boron(B) และ Compensation temperature (Te) ซึ่งสมการถดถอยที่ได้ แสดงดังสมการ 5.3 โดยมีค่า $R^2=95.7\%$ และ $R^2_{(adj)} = 95.1\%$ และแสดงวิธีการกำหนดสมการ ดังรูปที่ 5.12

$$\text{Elongation (\%)} = 86.4 - 0.0692 * \text{FT} + 0.142 * \text{B} + 0.566 * \text{Te} \quad (5.3)$$

Regression Analysis: Avg El versus FT, °C, B, ppm, Te, °C				
The regression equation is				
Avg El = 86.4 - 0.0692 FT, °C + 0.566 B, ppm + 0.142 Te, °C				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	86.36	11.35	7.61	0.000
FT, °C	-0.06917	0.01332	-5.19	0.000
B, ppm	0.56611	0.02665	21.24	0.000
Te, °C	0.14222	0.02665	5.34	0.000
S = 1.13058 R-Sq = 95.7% R-Sq(adj) = 95.1%				

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของปัจจัย อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT) ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Te) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยร้อยละของการยืดตัว (%EL)

5.5 เปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการรีดก่อนและหลังการทดลอง

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการรีดก่อนและหลังการทดลอง โดยหลังการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 และ 2 เมื่อพิจารณาเลือกเงื่อนไขปัจจัยที่ทำให้ชิ้นงานมีค่า YS และค่า TS สูงสุด ตามลำดับ และกรณีที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่ต้องการ โดยจะพิจารณาเลือกปัจจัยที่ทำให้ %EL, YS และ TS มากกว่า 38%, 210 และ 310 MPa ตามลำดับ และได้ผลดังนี้

1) โรงงานตัวอย่างได้ใช้เงื่อนไขก่อนการทดลอง คือ FT 870 °C, B 10 ppm, Te 0 °C และ CT 610 °C จะได้ค่าเฉลี่ย YS 271 Mpa (Max 275 MPa, Min 267 MPa, SD=2) TS 374 MPa (Max 377 MPa, Min 370 MPa, SD=1.8) และ EL 31% (Max 34 MPa, Min 28 MPa, SD=1.4)

2) โรงงานตัวอย่างได้ใช้เงื่อนไขหลังการทดลองกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 จะได้เงื่อนไขของปัจจัยเดียวกันที่ทำให้ทั้งค่า YS และ TS สูงสุด แต่จะได้ค่า %EL ต่ำที่สุดคือ FT 870 °C, B 10 ppm, Te 10 °C และ CT 610 °C จะได้ค่าเฉลี่ย YS 260 MPa (Max 267 MPa, Min 254 MPa

,SD=5) TS 358 MPa (Max 361 MPa, Min 354 MPa, SD=2) และ EL 33 % (Max 36 MPa, Min 28 MPa, SD=1)

3) โรงงานตัวอย่างได้ใช้เงื่อนไขหลังการทดลองกรณีที่ 3 จะได้เงื่อนไขของปัจจัยเดียวกันที่ทำให้ทั้งค่า YS และ TS ต่ำที่สุด แต่จะได้ค่า %EL สูงที่สุดคือ FT 830 °C, B 30 ppm, Te 30 °C และ CT 610 °C จะได้ค่าเฉลี่ย YS 206 MPa (Max 214 MPa, Min 197 MPa ,SD=5) TS 306 MPa (Max 315 MPa, Min 300 MPa, SD=4) และ EL 50 % (Max 53 MPa, Min 49 MPa, SD=1)

4) เงื่อนไขหลังการทดลองกรณีที่ 3 หรือ ค่า YS > 210 MPa TS >310 MPa และ EL>38% คือ FT 830 °C, B 20 ppm, Te 20 °C และ CT 610 °C จะได้ค่าเฉลี่ย YS 220 MPa (Max 224 MPa, Min 216 MPa, SD=2) TS 325 MPa (Max 331 MPa, Min 318 MPa, SD=3) และ EL 44 % (Max 47 MPa, Min 41 MPa, SD=1) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าเฉลี่ย YS และ EL ตามเงื่อนไขดังกล่าวจะอยู่ใน $\pm 3SD$ ทั้งหมด และตรงตามความต้องการของลูกค้า



ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบผลของปัจจัยที่ใช้ในการรื้อก่อนและหลังการทดลอง

ปัจจัย	หลังทดลอง																				
	ก่อนทดลอง				กรณี 1 (YS สูงสุด)				กรณี 2 (TS สูงสุด)				กรณี 3 (EL สูงสุด)				กรณี 4 (YS > 210 Mpa; TS>310 MPa; EL > 38%)				
	ระดับปัจจัย	YS	TS	EL	ระดับปัจจัย	YS	TS	YS	ระดับปัจจัย	YS	TS	EL	ระดับปัจจัย	YS	TS	EL	ระดับปัจจัย	YS	TS	EL	
FT(°C)	870				870				870				830				830				
B(ppm)	0	271	374	31	10	260	358	33	10	260	358	33	30	206	306	50	20	220	325	44	
Te(°C)	0				10				10				30				20				
CT(°C)	610				610				610				610				610				
SD		2	2	1	SD	5	2	1	SD	5	2	1	SD	5	4	1	SD	2	3	1	
MIN		267	370	28	MIN	254	354	28	MIN	254	354	28	MIN	197	300	49	MIN	216	318	41	
MAX		275	377	34	MAX	267	361	36	MAX	267	361	36	MAX	214	315	53	MAX	224	331	47	

5.6 เปรียบเทียบผลของปัจจัยจากการผลิตจริงเทียบกับค่าจากสมการถดถอย

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการรีดร้อนกับสมบัติเชิงกล สามารถหาค่าความสัมพันธ์กันในลักษณะสมการเชิงเส้น คืออุณหภูมิหลังรีดละเอียด (FT), ปริมาณ Boron(B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ(Compensation temperature, Te) กับสมบัติเชิงกล (Y) โดยพิจารณาจากกรณีที่ 3 ดังตาราง 5.7 (FT 830 °C B 20 ppm Te 20 °C) ซึ่งเหมาะสมต่อความต้องการของลูกค้าและการใช้งาน สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.8 ซึ่งค่าจากสมการสรุปได้ว่า YS= 225 MPa, TS= 329 MPa, EL 43 % และสำหรับค่าเฉลี่ยจากการผลิตจริงสรุปได้ว่า YS= 220 MPa, TS= 325 MPa, EL 44 % จะพบว่าค่าทำนายจากสมการมีความใกล้เคียงกับค่าที่ผลิตได้จริง

ตารางที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณความสัมพันธ์จากสมการถดถอย

สมบัติเชิงกล	ความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นระหว่างปัจจัยนำเข้า (FT, B ,Te) และสมบัติเชิงกล (Y)	ค่าจากสมการถดถอย (เมื่อ FT=830 °C, B= 20ppm,Te= 20°C)	ค่าเฉลี่ยจากการทดลองผลิตจริง
Yield strength (MPa)	$Y = -52.7 + 0.379*FT - 1.54*B - 0.306*Te$	225	220
Tensile strength (MPa)	$Y = 172 + 0.234 *FT - 1.54*B - 0.343 *Te$	329	325
Elongation (%)	$Y = 86.4 - 0.0692 *FT + 0.142*B + 0.566*Te$	43	44

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกล รวมถึงลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคในรูปแบบของปริมาณเกรนผสม (Mix Grain) ของแต่ละเงื่อนไขการผลิต โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิหลังรีดละเอียด (Finishing temperature, FT), ปริมาณ Boron (B) และอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Compensation temperature, Te) ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

6.2 บทสรุป

1. อิทธิพลหลักของทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ Finishing temperature (FT) ปริมาณ Boron (B) และ Compensation temperature (Te) มีผลต่อการผันแปรค่าเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า $\alpha = 0.05$
2. ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสาม ได้แก่ Finishing temperature (FT) ปริมาณ Boron (B) และ Compensation temperature (Te) ไม่มีอิทธิพลต่อการผันแปรของค่าเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า $\alpha = 0.05$
3. ระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้เหล็กมีคุณสมบัติเชิงกลความต้านทานแรงดึงต่ำสุด และมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นสูงสุด คือ FT 830 °C B 30 ppm และ Te 30 °C โดยค่าเชิงกลเฉลี่ยคือ ค่า Yield strength 206 MPa ค่า Tensile strength 306 MPa และค่า Elongation 50 %
4. ระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้เหล็กมีคุณสมบัติเชิงกลความต้านทานแรงดึงสูงสุด และมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นต่ำสุด คือ FT 870 °C B 10 ppm และ Te 10 °C โดยค่าเชิงกลเฉลี่ยคือ ค่า Yield strength 260 MPa ค่า Tensile strength 358 MPa และค่า Elongation 33%
5. สมการถดถอยเต็มรูปแบบ (Full model) เมื่อกำหนดให้ FT = Finishing temperature (°C), B = ปริมาณ Boron (ppm) และ Te (°C) = Compensation temperature สามารถสรุปได้ ดังนี้

$$\text{Yield strength (MPa)} = -52.7 + 0.379*FT - 1.54*B - 0.306*Te \quad (6.1)$$

$$\text{Tensile strength (MPa)} = 172 + 0.234 *FT - 1.54*B - 0.343 *Te \quad (6.2)$$

$$\text{Elongation (\%)} = 86.4 - 0.0692 *FT + 0.142*B + 0.566*Te \quad (6.3)$$

6. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิชดเชยที่ขอบ (Compensation temperature, Te) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กมีความสม่ำเสมอ (Equiaxed grain) มากขึ้น และมีปริมาณเกรนผสม (Mix Grain) ลดลง

7. จากเงื่อนไขค่าควบคุม YS > 210 MPa TS>310 MPa และ EL>38% จึงพิจารณาเลือกเงื่อนไขหลังการทดลอง คือ FT 830 °C, B 20 ppm, Te 20 °C และ CT 610 °C จะได้ค่าเฉลี่ย YS 220 MPa (Max 224 MPa, Min 216 MPa, SD=2) TS 325 MPa (Max 331 MPa, Min 318 MPa, SD=3) และ EL 44 % (Max 47 MPa, Min 41 MPa,SD=1) ซึ่งค่าเฉลี่ย YS และ EL ตามเงื่อนไขจะอยู่ใน $\pm 3SD$ ทั้งหมด และตรงตามที่ลูกค้าต้องการ

8. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณความสัมพันธ์จากสมการถดถอยที่ FT 830 °C B 20 ppm และ Te 20 °C ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ตรงตามความต้องการของลูกค้าจะได้ค่า YS จากสมการคือ 225 MPa ในขณะที่ค่าที่ได้จากการผลิตจริงคือ 220 MPa จะได้ค่า TS จากสมการคือ 329 MPa ในขณะที่ค่าที่ได้จากการผลิตจริงคือ 325 MPa และจะได้ค่า EL จากสมการคือ 43% ในขณะที่ค่าที่ได้จากการผลิตจริงคือ 44% ซึ่งค่าจากสมการมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ผลิตได้จริงทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 ข้อจำกัดในการทดลอง

1. กระบวนการทดสอบจำเป็นต้องเก็บชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบจำนวนมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง ทำให้ใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสูง
2. กระบวนการผลิตต้องมีความต่อเนื่องในแต่ละเงื่อนไขการผลิต เพื่อให้ได้คุณสมบัติของเหล็กที่คงที่มากที่สุดในแต่ละเงื่อนไข ทำให้ต้องหาลูกค้าเพื่อมารองรับเหล็กที่ผลิตเพื่อทดสอบ
3. การเก็บตัวอย่างชิ้นงาน จำเป็นต้องขอความร่วมมือจากลูกค้าสำหรับกระบวนการตัดชอยชิ้นงาน ทำให้เกิดการหยุดชะงักในกระบวนการผลิตของลูกค้า

6.4 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก ซึ่งผู้วิจัยมีความคาดหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตได้จริง และรวมถึงนำไปประยุกต์เพื่อเป็นแนวทางสำหรับต่อยอดไปยังการพัฒนาอื่นๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด



บรรณานุกรม

- [1] ไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์, หลักพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า. 2555, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) พิมพ์ครั้งที่ 5 ed. 2549, กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [3] P. Sorachai, T.P., T. Umeda., *Effect of Boron Addition on High Temperature Deformation of Boron-added Low Carbon Steel* 2010, Sahaviriya Steel Industries Public Co., Ltd., Prachuabkirikhan 77140, Thailand.
- [4] Sorachai PITAKKORRARAS , C.H., Takateru UMEDA,, *MICROSTRUCTURE OBSERVATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF HOT ROLLED LOW CARBON STEEL STRIP WITH BORON ADDITION*. 2011, Sahaviriya Steel Industries Public Co., Ltd., Prachuabkirikhan 77140, Thailand.
- [5] Monajati, H., et al., *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, 2010. **49**(4): p. 876-881.
- [6] นภิสพร มีมงคล, การวิเคราะห์สมบัติทางกลและต้นทุนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน. 2556, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
- [7] อรุณินทร์ พลนิกร, การลดของเสียจากกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็นในอุตสาหกรรมท่อสแตนเลสเกรด 304. 2550, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
- [8] เรืองยศ วิเชียรรักษ์, ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของคุณสมบัติเชิงกลหลังการอบ อ่อนของเหล็กแผ่นรีดเย็น. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
- [9] Mendoza, R., et al., *Mechanical properties of a recrystallized low carbon steel*. Scripta materialia, 2003. **48**(4): p. 391-395.
- [10] ญัฐพล วัชรประไพพันธ์, การจำลองกระบวนการอบอ่อนแบบกะในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดเย็น. 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C

ปัจจัยที่ทดลอง		Finished Temperature (FT) = 830 °C			Boron (B) = 10 ppm			Comp. Temperature (Te) = 10 °C			Coiling Temperature (CT) = 610C		
การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)									รวมทั้งหมด		
		แถบซ้าย (j=1)			แถบกลาง (j=2)			แถบขวา (j=3)			YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)			
1	1	251	348	33	249	354	34	252	355	35			
	2	252	350	34	251	338	35	254	354	36			
	3	255	347	35	248	337	35	253	356	36			
	4	249	345	36	245	358	36	251	354	37			
	5	251	346	37	249	354	36	255	354	34			
	6	248	344	36	251	355	37	256	352	33			
	7	244	355	35	248	356	34	253	351	35			
	8	251	352	36	249	352	35	252	354	36			
	9	255	350	37	251	352	36	254	352	35			
	10	249	355	36	248	355	37	253	355	34			
รวม 1													
X-bar1	251	349	36	249	351	36	253	354	35	251	351	35	
SD1	3.11	4	1	2	7	1	1	1	1	2	4	1	
2	1	255	348	34	244	349	34	253	354	33			
	2	249	350	35	245	344	36	254	351	34			
	3	249	355	35	249	355	37	256	346	33			
	4	251	345	34	253	354	38	255	348	34			
	5	248	346	36	245	350	36	251	347	35			
	6	249	345	36	244	347	37	250	349	34			
	7	249	355	33	247	352	36	251	350	33			
	8	244	352	35	252	355	34	254	350	35			
	9	245	354	35	255	337	35	251	352	33			
	10	250	349	36	254	349	36	250	353	34			
รวม 2													
X-bar2	249	350	35	249	349	36	253	350	34	250	350	35	
SD2	2.88	4	1	4	5	1	2	2	1	3	4	1	
Grand Average (X-bar bar)	250	350	35	249	350	36	253	352	34	250	351	35	
ค่าเฉลี่ย SD	2.99	3.73	1.07	2.95	6.15	1.12	1.74	1.97	0.94	3	4	1	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C

ปัจจัยที่ทดลอง		Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature(CT) = 610C			
การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)															
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	242	345	38	241	346	38	239	345	38	239	345	38				
	2	241	346	35	243	347	39	238	344	38	238	344	38				
	3	241	346	38	240	345	37	239	346	38	239	346	38				
	4	243	347	39	246	346	38	234	345	38	234	345	38				
	5	240	348	37	247	344	39	235	347	37	235	347	37				
	6	239	345	38	246	343	38	236	349	35	236	349	35				
	7	237	344	38	245	343	39	236	348	35	236	348	35				
	8	240	346	38	245	345	37	235	349	36	235	349	36				
	9	241	346	37	246	344	38	235	350	35	235	350	35				
	10	237	347	36	246	344	39	235	345	35	235	345	35				
รวม 1																	
X-bar1		240	346	37	245	345	38	236	347	37	236	347	37	240	346	37	
SD1		1.87	1	1	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	
2	1	239	346	38	241	344	39	236	347	35	236	347	35				
	2	238	347	38	240	344	38	236	349	36	236	349	36				
	3	237	348	38	247	345	38	237	348	35	237	348	35				
	4	240	345	37	245	343	38	238	349	35	238	349	35				
	5	241	344	38	246	344	39	235	349	34	235	349	34				
	6	241	345	38	246	343	38	234	348	35	234	348	35				
	7	243	347	38	247	345	39	239	349	35	239	349	35				
	8	240	345	37	248	342	39	235	348	36	235	348	36				
	9	241	346	34	245	345	40	240	346	36	240	346	36				
	10	243	344	37	245	345	39	237	348	35	237	348	35				
รวม 2		240	345	38	245	344	39	240	347	34	240	347	34				
X-bar2		240	346	37	245	344	39	237	348	35	237	348	35	241	346	37	
SD2		1.85	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	
Grand Average (X-bar bar)		240	346	37	245	344	39	237	347	36	237	347	36	241	346	37	
ค่าเฉลี่ย SD		1.86	1.18	1.15	2.35	1.13	0.69	1.76	1.47	0.98	1.76	1.47	0.98	2	1	1	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C

การทดลองครั้งที่	ค่าแรงดึงที่ทดลอง	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30 °C				Coiling Temperature(CT) = 610C			
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				รวมทั้งหมด			
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		YS(MPa)	EL(%)
1	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	228	343	39	249	347	40	234	339	43						
		TS(MPa)	228	339	39	251	352	41	235	343	43						
		YS(MPa)	234	345	40	251	346	39	231	337	39						
		TS(MPa)	235	345	41	247	352	39	232	341	43						
		YS(MPa)	229	339	42	251	348	38	233	341	43						
		TS(MPa)	229	339	39	253	349	37	232	343	41						
		YS(MPa)	235	343	38	250	349	38	234	337	43						
		TS(MPa)	232	344	39	253	348	39	232	343	43						
		YS(MPa)	233	343	40	253	347	38	233	339	41						
		TS(MPa)	234	343	41	252	348	38	233	338	43						
รวม 1																	
2	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	232	342	40	251	349	39	233	340	42				239	344	40
		TS(MPa)	2.76	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1
		YS(MPa)	233	343	39	251	347	38	233	341	41						
		TS(MPa)	234	342	38	251	346	37	231	342	41						
		YS(MPa)	232	342	39	248	348	37	229	343	39						
		TS(MPa)	231	344	39	248	349	37	232	343	40						
		YS(MPa)	233	345	38	247	348	38	233	337	43						
		TS(MPa)	235	339	39	249	349	39	232	338	40						
		YS(MPa)	234	342	39	249	349	40	233	339	40						
		TS(MPa)	235	345	40	250	348	39	231	339	40						
รวม 2	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	232	342	41	249	349	38	231	338	41						
		TS(MPa)	233	341	41	251	348	39	232	339	39						
		YS(MPa)	233	343	39	249	348	38	232	340	40				238	344	39
		TS(MPa)	1.25	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
		YS(MPa)	232	342	40	250	348	38	232	340	41				238	344	40
		TS(MPa)	2.00	2.01	1.09	1.59	1.43	1.04	1.16	2.19	1.22				2	2	1
		YS(MPa)															
		TS(MPa)															
		YS(MPa)															
		TS(MPa)															
รวม Grand Average (X-bar bar)																	
ค่าเฉลี่ย SD																	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	จำนวนที่ทดลอง	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Baron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10 °C				Cooling Temperature(CT) = 610C			
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)															
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		YS(MPa)		EL(%)			TS(MPa)		EL(%)
1	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	224	338	41	222	325	42	221	335	44						
		TS(MPa)	228	337	41	222	325	42	219	336	42						
		YS(MPa)	228	339	44	224	325	41	222	339	42						
		TS(MPa)	228	339	42	223	330	43	222	337	41						
		YS(MPa)	222	339	42	224	330	43	224	336	43						
		TS(MPa)	222	337	41	223	326	44	220	337	43						
		YS(MPa)	224	335	43	222	328	43	223	336	44						
		TS(MPa)	223	336	43	222	328	44	224	336	42						
		YS(MPa)	224	337	41	224	331	43	225	335	42						
		TS(MPa)	225	335	40	223	328	44	222	337	41						
รวม 1																	
2	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	225	337	42	223	328	43	222	336	42						
		TS(MPa)	2.27	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1
		YS(MPa)	226	336	42	222	325	43	224	336	41						
		TS(MPa)	222	339	42	224	330	43	219	336	42						
		YS(MPa)	225	337	42	224	328	43	224	335	42						
		TS(MPa)	225	338	41	222	331	44	223	336	41						
		YS(MPa)	229	339	41	224	328	43	219	336	43						
		TS(MPa)	229	339	41	223	325	43	219	334	41						
		YS(MPa)	226	338	43	221	330	43	224	335	42						
		TS(MPa)	224	337	42	224	328	44	222	334	42						
รวม 2	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	YS(MPa)	224	337	43	223	331	42	224	334	41						
		TS(MPa)	225	337	41	223	328	42	223	333	41						
		YS(MPa)															
		TS(MPa)															
		YS(MPa)	226	338	42	223	328	43	222	335	42	224	224	334	334	42	
		TS(MPa)	2.06	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	
		YS(MPa)	225	337	42	223	328	43	222	336	42	223	223	223	334	42	
		TS(MPa)	2.17	1.24	0.96	0.92	2.11	0.79	1.95	1.08	0.84	2	2	2	1	1	
		YS(MPa)															
		TS(MPa)															
Grand Average (X-bar bar)																	
ค่าเฉลี่ย SD																	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C

การทดสอบครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20 °C				Coiling Temperature (CT) = 610C	
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)								รวมทั้งหมด					
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)				YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	222	325	46	221	320	45	218	323	41					
	2	223	325	44	222	322	46	216	325	44					
	3	222	325	45	222	321	47	216	325	45					
	4	222	330	46	224	321	44	217	323	44					
	5	222	330	44	220	319	44	217	325	44					
	6	220	326	44	223	322	47	221	326	43					
	7	220	328	43	224	321	43	219	328	43					
	8	220	328	43	222	319	43	220	328	45					
	9	222	331	45	224	322	47	216	325	45					
	10	221	331	45	224	321	47	216	326	43					
รวม 1															
X-bar1	221	328	45	223	321	45	218	325	44		221	325	45		
SD1	1.02	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1		
2	1	223	330	45	223	321	45	217	325	43					
	2	219	326	43	221	319	45	217	323	43					
	3	220	328	43	222	322	47	217	325	41					
	4	219	328	43	222	321	47	219	326	43					
	5	220	328	43	224	318	43	216	328	44					
	6	221	330	43	221	321	43	219	325	43					
	7	222	326	44	222	320	43	219	326	41					
	8	221	328	43	222	321	43	218	328	41					
	9	222	328	45	222	318	43	216	326	45					
	10	221	329	44	222	321	46	218	328	45					
รวม 2															
X-bar2	221	328	44	222	320	45	218	326	43		220	325	44		
SD2	1.25	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1		
Grand Average (X-bar bar)	221	328	44	222	321	45	218	326	43		220	325	44		
ค่าเฉลี่ย SD	1.13	1.84	0.91	1.09	1.20	1.62	1.43	1.59	1.32		1	2	1		

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Coiling Temperature (CT) = 610°C			
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	221	323	46	222	323	44	215	325	46							
	2	219	325	44	222	323	45	217	325	44							
	3	222	325	45	224	323	44	217	323	46							
	4	222	323	46	223	320	44	216	325	46							
	5	224	325	44	224	320	43	216	325	46							
	6	220	325	44	225	322	43	217	323	45							
	7	223	323	43	226	321	43	217	325	45							
	8	224	325	43	222	322	46	218	325	46							
	9	222	328	45	225	324	46	217	324	46							
	10	224	328	45	225	323	44	219	325	44							
รวม 1																	
X-bar1	222	325	45	224	322	44	217	325	45				221	324	45		
SD1	1.64	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	219	325	43	221	323	44	216	325	44							
	2	222	325	43	222	321	43	216	325	46							
	3	222	326	43	222	322	43	218	326	46							
	4	219	328	46	224	324	43	219	325	46							
	5	220	328	44	223	323	44	213	325	47							
	6	221	326	46	224	321	45	214	326	46							
	7	222	325	46	225	323	45	218	328	46							
	8	220	326	46	222	321	45	217	325	47							
	9	221	328	43	222	322	45	217	326	45							
	10	221	328	45	223	324	44	216	324	45							
รวม 2																	
X-bar2	221	327	45	223	322	44	216	326	46				220	325	45		
SD2	1.10	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1		
Grand Average (X-bar bar)	221	326	45	223	322	44	217	325	46				220	324	45		
ค่าเฉลี่ย SD	1.37	1.51	1.19	1.28	1.21	0.95	1.39	0.92	0.84				1	1	1		

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10°C				Coiling Temperature (CT) = 610°C				
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		
YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	211	314	45	211	314	47	214	320	48								
	2	212	314	46	212	314	49	213	319	48								
	3	213	313	48	213	313	47	212	321	47								
	4	212	315	48	212	315	50	213	319	48								
	5	213	316	47	209	316	47	212	318	48								
	6	211	316	48	208	316	48	211	319	48								
	7	214	314	49	207	312	48	213	318	47								
	8	209	315	47	210	313	47	212	319	48								
	9	213	316	47	212	314	47	211	317	49								
	10	213	314	48	211	313	48	213	317	47								
รวม 1																		
2	X-bar1	212	315	47	211	314	48	212	319	48					212	316	48	
	SD1	1.37	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	213	314	49	209	310	49	214	318	47								
	2	212	313	47	208	311	50	213	317	48								
	3	213	315	47	209	312	49	212	317	48								
	4	212	316	48	208	313	48	213	318	48								
	5	211	314	47	207	311	51	214	319	47								
	6	209	313	45	210	314	48	213	317	46								
	7	212	315	45	211	312	49	214	319	45								
	8	213	316	49	210	313	49	215	317	46								
9	212	315	47	209	314	49	216	318	46									
10	212	316	49	210	312	50	213	319	44									
รวม 2																		
รวม 2	X-bar2	212	315	47	209	312	49	214	318	47				212	315	48		
	SD2	1.14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Grand Average (X-bar bar)	212	315	47	210	313	49	213	318	47				212	315	48		
ค่าเฉลี่ย SD	1.26	1.05	1.26	1.50	1.26	0.93	1.01	1.01	0.94				1	1	1	1	1	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature (CT) = 610°C			
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)			
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		YS(MPa)	TS(MPa)	YS(MPa)	TS(MPa)
1	1	203	314	48	212	313	48	208	312	49	208	312	49				
	2	204	313	48	213	310	49	207	313	49	207	313	49				
	3	208	310	47	212	313	51	205	310	47	205	310	47				
	4	207	309	48	212	315	47	208	313	48	208	313	48				
	5	206	312	49	213	314	48	208	309	49	208	309	49				
	6	205	312	49	212	317	49	207	311	47	207	311	47				
	7	204	311	50	213	315	51	205	310	47	205	310	47				
	8	208	311	50	214	314	47	208	309	48	208	309	48				
	9	207	313	47	213	314	47	207	311	49	207	311	49				
	10	205	312	51	213	316	48	205	310	51	205	310	51				
รวม 1																	
2	X-bar1	206	312	49	213	314	49	207	311	48	207	311	48	208	312	49	
	SD1	1.68	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	
	1	204	310	50	210	316	47	204	308	49	204	308	49				
	2	208	309	51	212	314	48	208	307	49	208	307	49				
	3	207	312	48	213	315	49	207	312	47	207	312	47				
	4	205	313	49	212	314	50	206	311	46	206	311	46				
	5	204	310	51	212	316	47	205	310	46	205	310	46				
	6	205	313	47	213	314	48	207	311	45	207	311	45				
	7	203	313	49	214	313	49	207	310	48	207	310	48				
	8	204	313	47	213	314	50	206	307	48	206	307	48				
9	205	312	48	212	317	47	207	311	47	207	311	47					
10	205	314	48	215	315	51	209	310	49	209	310	49					
รวม 2																	
รวม Grand Average (X-bar bar)	X-bar2	205	312	49	213	315	49	207	310	47	207	310	47	208	312	48	
	SD2	1.41	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
	ค่าเฉลี่ย SD	205	312	49	213	314	49	207	310	48	207	310	48	208	312	48	
		1.55	1.50	1.33	0.96	1.49	1.39	1.30	1.54	1.28	1.30	1.54	1.28	1	2	1	

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT830 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C

การทดสอบ ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 830 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Coiling Temperature (CT) = 610°C			
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	197	302	49	212	311	50	208	302	50	208	302	50				
	2	198	304	50	213	312	49	204	302	49	204	302	52				
	3	199	302	49	212	314	49	205	304	49	205	304	52				
	4	198	305	49	212	314	50	203	301	50	203	301	50				
	5	200	301	50	213	315	49	205	302	49	205	302	52				
	6	201	300	52	212	314	49	205	302	49	205	302	52				
	7	201	304	52	212	312	50	206	304	49	206	304	49				
	8	203	304	49	213	315	52	205	301	51	205	301	51				
	9	198	302	50	214	314	49	205	304	50	205	304	50				
	10	200	302	50	213	312	50	205	301	53	205	301	53				
รวม 1																	
X-bar1	200	303	50	213	313	50	205	302	51	205	302	51	206	306	50		
SD1	1.75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	204	301	52	213	309	52	203	302	50	203	302	50				
	2	201	305	52	212	310	50	204	305	50	204	305	52				
	3	200	304	49	212	313	50	201	302	50	201	302	52				
	4	202	301	50	213	312	49	203	305	49	203	305	49				
	5	204	304	50	209	312	49	206	302	51	206	302	51				
	6	201	305	52	210	314	50	205	305	50	205	305	50				
	7	200	304	49	211	310	49	205	302	52	205	302	52				
	8	203	301	52	212	312	50	204	305	52	204	305	52				
	9	203	302	49	211	314	49	203	304	49	203	304	49				
	10	203	304	49	210	310	49	203	305	51	203	305	51				
รวม 2																	
X-bar2	202	303	50	211	312	50	204	304	51	204	304	51	206	306	50		
SD2	1.45	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
Grand Average (X-bar bar)	201	303	50	212	312	50	204	303	51	204	303	51	206	306	50		
ค่าเฉลี่ย SD	1.60	1.54	1.23	0.97	1.52	0.90	1.28	1.30	1.19	1.28	1.30	1.19	1	1	1	1	

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te)= 10°C				Coiling Temperature (CT) = 610C		
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด		
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	254	352	32	257	355	33	252	349	31						
	2	254	352	33	254	354	31	251	347	34						
	3	254	352	33	254	354	34	251	348	31						
	4	251	348	31	254	354	34	250	349	34						
	5	251	349	35	256	354	36	251	349	34						
	6	251	351	34	256	354	33	251	347	34						
	7	253	351	34	255	352	31	251	347	34						
	8	253	349	36	253	352	34	252	348	32						
	9	252	348	35	257	355	34	254	347	31						
	10	251	350	35	256	355	36	251	350	33						
รวม 1																
X-bar1	252	350	34	255	354	34	251	348	33				253	351	33	
SD1	1.28	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	253	349	33	255	352	31	254	347	31						
	2	253	348	31	253	352	31	250	348	34						
	3	252	350	34	257	353	34	251	347	32						
	4	251	352	36	256	352	34	255	350	31						
	5	251	348	35	253	353	35	249	347	35						
	6	252	349	33	255	351	36	254	348	34						
	7	254	351	34	257	351	36	250	349	33						
	8	251	350	35	256	354	36	249	347	35						
	9	253	350	33	257	352	35	252	350	34						
	10	254	350	34	254	353	36	250	350	35						
รวม 2																
X-bar2	252	350	34	255	352	34	251	348	33				253	350	34	
SD2	1.11	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	
Grand Average (X-bar bar)	252	350	34	255	353	34	251	348	33				253	350	34	
ค่าเฉลี่ย SD	1.20	1.36	1.40	1.41	0.97	1.74	1.56	1.16	1.41	1.41	1.41	1	1	1	2	

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature (CT) = 610C					
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)																	
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด											
1	1	YS(MPa)	245	TS(MPa)	346	EL(%)	39	YS(MPa)	257	TS(MPa)	358	EL(%)	33	YS(MPa)	242	TS(MPa)	345	EL(%)	38
	2	YS(MPa)	245	TS(MPa)	348	EL(%)	36	YS(MPa)	254	TS(MPa)	355	EL(%)	32	YS(MPa)	243	TS(MPa)	343	EL(%)	37
	3	YS(MPa)	243	TS(MPa)	349	EL(%)	38	YS(MPa)	254	TS(MPa)	354	EL(%)	32	YS(MPa)	243	TS(MPa)	343	EL(%)	38
	4	YS(MPa)	244	TS(MPa)	349	EL(%)	37	YS(MPa)	254	TS(MPa)	356	EL(%)	34	YS(MPa)	242	TS(MPa)	347	EL(%)	37
	5	YS(MPa)	246	TS(MPa)	345	EL(%)	38	YS(MPa)	256	TS(MPa)	354	EL(%)	33	YS(MPa)	243	TS(MPa)	349	EL(%)	36
	6	YS(MPa)	244	TS(MPa)	345	EL(%)	36	YS(MPa)	256	TS(MPa)	357	EL(%)	35	YS(MPa)	243	TS(MPa)	345	EL(%)	37
	7	YS(MPa)	242	TS(MPa)	347	EL(%)	39	YS(MPa)	255	TS(MPa)	354	EL(%)	36	YS(MPa)	243	TS(MPa)	344	EL(%)	35
	8	YS(MPa)	243	TS(MPa)	347	EL(%)	40	YS(MPa)	257	TS(MPa)	354	EL(%)	36	YS(MPa)	243	TS(MPa)	347	EL(%)	36
	9	YS(MPa)	243	TS(MPa)	348	EL(%)	37	YS(MPa)	258	TS(MPa)	357	EL(%)	34	YS(MPa)	245	TS(MPa)	347	EL(%)	35
	10	YS(MPa)	244	TS(MPa)	347	EL(%)	38	YS(MPa)	256	TS(MPa)	356	EL(%)	34	YS(MPa)	241	TS(MPa)	346	EL(%)	37
รวม 1																			
X-bar1		244	347		38	256	356	34	243	346	37	247	349	36					
SD1		1.14	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1
2	1	YS(MPa)	242	TS(MPa)	347	EL(%)	39	YS(MPa)	255	TS(MPa)	353	EL(%)	33	YS(MPa)	239	TS(MPa)	346	EL(%)	36
	2	YS(MPa)	243	TS(MPa)	351	EL(%)	37	YS(MPa)	257	TS(MPa)	355	EL(%)	32	YS(MPa)	240	TS(MPa)	345	EL(%)	35
	3	YS(MPa)	243	TS(MPa)	349	EL(%)	38	YS(MPa)	258	TS(MPa)	358	EL(%)	34	YS(MPa)	238	TS(MPa)	344	EL(%)	37
	4	YS(MPa)	243	TS(MPa)	347	EL(%)	36	YS(MPa)	256	TS(MPa)	354	EL(%)	34	YS(MPa)	244	TS(MPa)	343	EL(%)	39
	5	YS(MPa)	244	TS(MPa)	349	EL(%)	38	YS(MPa)	255	TS(MPa)	354	EL(%)	32	YS(MPa)	243	TS(MPa)	343	EL(%)	36
	6	YS(MPa)	245	TS(MPa)	349	EL(%)	37	YS(MPa)	257	TS(MPa)	354	EL(%)	32	YS(MPa)	240	TS(MPa)	345	EL(%)	37
	7	YS(MPa)	245	TS(MPa)	350	EL(%)	38	YS(MPa)	256	TS(MPa)	355	EL(%)	30	YS(MPa)	245	TS(MPa)	343	EL(%)	38
	8	YS(MPa)	245	TS(MPa)	349	EL(%)	36	YS(MPa)	257	TS(MPa)	355	EL(%)	31	YS(MPa)	243	TS(MPa)	343	EL(%)	35
	9	YS(MPa)	245	TS(MPa)	344	EL(%)	37	YS(MPa)	257	TS(MPa)	355	EL(%)	32	YS(MPa)	243	TS(MPa)	347	EL(%)	36
	10	YS(MPa)	245	TS(MPa)	347	EL(%)	37	YS(MPa)	255	TS(MPa)	353	EL(%)	34	YS(MPa)	242	TS(MPa)	348	EL(%)	37
รวม 2																			
X-bar2		244	348		37	256	355	32	242	345	37	247	349	35					
SD2		1.10	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1
Grand Average (X-bar bar)		244	348		38	256	355	33	242	345	37	247	349	36					
ค่าเฉลี่ย SD		1.12	1.63	1.07	1.18	1.39	1.33	1.59	1.79	1.11	1.11	1	2	1	2	1	2	1	1

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Coiling Temperature (CT) = 610C		
		แถบซ้าย (j=1)		แถบขวา (j=2)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		รวมทั้งหมด				
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	YS(MPa)	TS(MPa)	YS(MPa)	TS(MPa)
1	1	242	339	37	254	354	33	244	342	40						
	2	247	339	37	254	354	33	244	338	39						
	3	245	341	37	251	357	34	246	339	30						
	4	245	341	37	251	354	32	244	339	38						
	5	245	339	37	251	356	33	242	338	39						
	6	243	338	37	255	352	35	243	341	37						
	7	247	339	36	253	352	34	238	340	38						
	8	244	341	35	253	355	35	239	340	38						
	9	246	342	34	255	355	35	239	338	41						
	10	244	338	35	252	355	33	245	337	42						
รวม 1																
X-bar1	245	340	36	253	354	34	242	339	38			247	344	36		
SD1	1.54	1	1	2	1	1	3	1	3	3	2	2	1	2		
2	1	247	341	37	253	356	32	243	339	39						
	2	244	342	37	255	352	33	238	339	37						
	3	246	338	36	252	352	31	239	338	40						
	4	244	339	38	251	355	32	245	340	39						
	5	247	339	39	251	355	34	244	337	39						
	6	242	338	39	252	355	35	241	336	41						
	7	243	341	38	255	352	35	243	337	42						
	8	243	341	37	254	353	36	245	340	42						
	9	243	340	36	255	355	36	243	341	41						
	10	244	340	35	255	356	33	244	338	38						
รวม 2																
X-bar2	244	340	37	253	354	34	243	339	40			247	344	37		
SD2	1.68	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2		
Grand Average (X-bar bar)	245	340	37	253	354	34	242	339	39			247	344	36		
ค่าเฉลี่ย SD	1.61	1.32	1.16	1.56	1.54	1.34	2.47	1.48	2.35			2	1	2		

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10 °C				Coiling Temperature (CT) = 610C		
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด		
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	229	335	44	222	325	46	226	324	39						
	2	226	335	44	224	325	44	226	325	40						
	3	226	330	43	223	325	45	228	328	43						
	4	228	330	43	224	328	46	226	328	39						
	5	227	334	45	225	328	44	226	333	41						
	6	228	334	45	226	326	44	228	332	43						
	7	231	335	39	222	328	43	227	331	44						
	8	227	331	43	225	328	43	228	331	41						
	9	226	332	43	225	325	45	225	333	42						
	10	230	334	41	226	326	45	223	334	40						
รวม 1																
X-bar1	228	333	43	224	326	45	226	330	41				226	330	43	
SD1	1.66	2	2	1	1	1	1	3	2				2	2	1	
2	1	226	330	41	222	326	42	224	333	42						
	2	229	330	39	226	324	43	224	334	41						
	3	231	334	41	222	322	42	224	335	40						
	4	228	334	43	226	323	44	225	331	44						
	5	229	331	41	222	325	41	223	329	42						
	6	226	332	43	225	329	40	222	330	43						
	7	229	334	44	224	328	43	221	331	42						
	8	228	333	43	221	325	42	219	334	41						
	9	230	334	41	221	325	44	222	333	40						
	10	228	332	41	222	329	45	223	332	43						
รวม 2																
X-bar2	228	332	42	223	326	43	223	332	42				225	330	42	
SD2	1.50	2	1	2	2	1	2	2	1				2	2	1	
Grand Average (X-bar bar)	228	333	42	224	326	44	225	331	42				225	330	42	
ค่าเฉลี่ย SD	1.58	1.76	1.57	1.63	1.82	1.23	1.58	2.57	1.46				2	2	1	

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Cooling Temperature (CT) = 610C		
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด		
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	231	323	40	232	330	42	231	325	44						
	2	229	325	42	236	330	40	230	326	43						
	3	229	325	42	236	334	42	230	325	43						
	4	230	323	43	235	334	41	231	326	43						
	5	232	325	41	236	335	42	231	328	43						
	6	231	326	43	235	331	40	229	329	41						
	7	229	328	39	235	331	42	229	327	43						
	8	234	328	42	236	333	41	230	324	43						
	9	231	325	43	235	331	43	234	325	41						
	10	229	326	43	237	332	43	235	326	43						
รวม 1																
X-bar1	231	325	42	235	332	42	231	326	43	232	328	42				
SD1	1.57	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	
2	1	232	324	38	232	330	42	233	327	43						
	2	231	325	39	231	335	43	229	328	43						
	3	230	326	40	236	331	39	230	327	41						
	4	230	322	39	236	331	38	232	327	43						
	5	231	325	42	232	332	40	231	326	44						
	6	232	325	41	231	334	42	229	329	43						
	7	231	326	40	235	331	43	230	326	41						
	8	229	324	43	235	335	41	233	325	41						
	9	234	327	43	231	333	44	232	327	44						
	10	230	326	43	232	334	44	232	330	43						
รวม 2																
X-bar2	231	325	41	233	333	42	231	327	43	232	328	42				
SD2	1.34	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	
Grand Average (X-bar bar)	231	325	41	234	332	42	231	327	43	232	328	42				
ค่าเฉลี่ย SD	1.45	1.48	1.55	1.65	1.72	1.49	1.67	1.42	1.01	2	2	2	2	2	1	

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature (CT) = 610 °C			
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)															
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด									
YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	
1	1	246	343	41	245	347	35	243	345	43							
	2	246	343	39	248	347	36	245	345	42							
	3	244	339	41	248	348	35	245	344	45							
	4	242	339	41	247	347	37	245	342	44							
	5	243	339	41	249	350	37	243	341	45							
	6	245	343	41	249	347	36	245	338	45							
	7	245	341	40	244	348	38	243	342	46							
	8	245	337	40	246	349	38	245	343	43							
	9	243	341	42	249	347	37	243	342	43							
	10	245	338	42	244	350	35	245	345	43							
รวม 1	X-bar1	244	340	41	247	348	36	244	343	44					245	344	40
	SD1	1.28	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1
	1	244	339	39	246	345	38	242	345	43							
	2	242	338	38	249	345	38	243	346	45							
	3	241	343	39	244	347	38	244	344	44							
	4	242	339	40	248	347	36	244	344	42							
	5	240	341	40	249	348	37	241	342	42							
	6	244	342	41	247	347	35	243	341	44							
	7	245	339	42	244	345	38	245	340	45							
	8	243	341	39	245	346	39	239	346	46							
9	241	338	42	245	345	37	243	345	44								
10	242	339	41	245	344	36	242	344	43								
รวม 2	X-bar2	242	340	40	246	346	37	243	344	44					244	343	40
	SD2	1.50	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1
	Grand Average (X-bar bar)	243	340	40	247	347	37	243	343	44					244	343	40
ค่าเฉลี่ย SD	1.39	1.87	1.09	1.88	1.20	1.14	1.30	2.03	1.23					2	2	1	

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10 °C				Cooling Temperature (CT) = 610 °C								
		แกนซ้าย (j=1)		แกนกลาง (j=2)		แกนขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แกนซ้าย (j=1)		แกนกลาง (j=2)		แกนขวา (j=3)		รวมทั้งหมด						
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)			
1	1	233	328	44	224	325	43	236	327	45	230	328	44	223	327	43	238	329	45	230	328	44
	2	228	327	45	221	325	42	238	328	47	230	327	45	221	325	41	239	331	46	230	327	45
	3	228	328	45	220	325	41	236	329	46	230	328	45	223	328	44	239	329	45	230	328	44
	4	229	329	45	224	330	43	239	327	45	230	327	45	223	325	43	239	330	45	230	329	45
	5	229	330	43	225	330	44	239	331	46	230	331	46	224	324	44	239	331	44	230	331	44
	6	232	327	45	226	326	43	239	327	45	230	327	45	224	328	45	236	328	45	230	328	45
	7	228	329	46	224	328	45	236	328	45	230	328	45	223	328	44	239	329	44	230	329	44
	8	232	331	42	223	328	44	239	329	44	230	329	44	223	325	43	239	330	45	230	330	45
	9	228	328	43	223	325	43	239	330	45	230	330	45	224	324	44	239	331	44	230	331	44
	10	231	326	44	224	324	44	239	331	44	230	331	44	224	324	44	239	331	44	230	331	44
รวม 1	230	328	44	223	327	43	238	329	45	230	328	44	223	327	43	238	329	45	230	328	44	
X-bar1	1.89	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1
SD1	229	330	45	221	325	41	238	327	45	230	327	45	221	325	41	239	331	46	230	327	45	
2	1	231	329	46	222	324	42	238	325	46	230	325	46	222	324	42	238	325	46	230	325	46
	2	228	330	45	224	325	42	238	326	45	230	326	45	224	325	42	238	326	45	230	326	45
	3	229	331	46	225	326	41	239	323	46	230	323	46	225	326	41	239	323	46	230	323	46
	4	229	328	44	224	322	40	240	330	44	230	330	44	224	322	40	240	330	44	230	330	44
	5	228	331	47	223	326	39	236	329	47	230	329	47	223	326	39	236	329	47	230	329	47
	6	230	329	43	225	327	42	236	328	48	230	328	48	225	327	42	236	328	48	230	328	48
	7	232	330	45	225	324	43	238	330	45	230	330	45	225	324	43	238	330	45	230	330	45
	8	228	329	44	223	323	43	236	325	45	230	325	45	223	323	43	236	325	45	230	325	45
	9	231	330	44	224	325	41	239	326	47	230	326	47	224	325	41	239	326	47	230	326	47
	10	231	330	44	224	325	41	239	326	47	230	326	47	224	325	41	239	326	47	230	326	47
รวม 2	230	330	45	224	325	41	238	327	46	230	327	46	224	325	41	238	327	46	230	327	46	
X-bar2	1.36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SD2	230	329	45	224	326	42	238	328	46	230	328	46	224	326	42	238	328	46	230	328	46	
Grand Average (X-bar bar)	1.62	1.16	1.15	1.48	1.76	1.14	1.33	1.85	1.02	1.33	1.85	1.02	1.48	1.76	1.14	1.33	1.85	1.02	1.33	1.85	1.02	
ค่าเฉลี่ย SD																						

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C

การทดลอง ครั้งที่	ปริซึมที่ทดลอง	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature (CT) = 610 °C				
		ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		
YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1		1	218	316	47	219	322	46	220	321	47	218	320	46	219	320	47	
		2	219	317	46	222	320	47	219	324	46	219	324	46	219	324	46	
		3	220	318	45	218	322	49	220	321	45	220	321	45	220	321	45	
		4	223	319	46	223	320	48	222	324	47	222	324	47	222	324	47	
		5	222	321	48	220	318	47	217	320	47	217	320	47	217	320	47	
		6	219	322	47	221	319	45	218	317	46	218	317	46	218	317	46	
		7	218	320	45	218	320	46	219	318	45	219	318	45	219	318	45	
		8	220	318	44	217	322	47	215	317	47	215	317	47	215	317	47	
		9	223	319	46	218	321	48	216	320	46	216	320	46	216	320	46	
		10	222	320	47	216	316	46	216	321	47	216	321	47	216	321	47	
รวม 1																		
X-bar1	220	319	46	219	320	47	218	320	46	218	320	46	218	320	46	219	320	46
SD1	1.85	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1
2		1	219	316	47	220	320	45	217	318	47	217	318	47	217	318	47	
		2	217	315	48	220	321	46	216	317	48	216	317	48	216	317	48	
		3	221	316	47	221	322	47	218	317	49	218	317	49	218	317	49	
		4	222	317	46	215	324	46	219	316	45	219	316	45	219	316	45	
		5	221	320	45	216	323	45	216	318	46	216	318	46	216	318	46	
		6	222	319	44	217	323	44	215	321	43	215	321	43	215	321	43	
		7	223	320	49	216	319	47	214	320	45	214	320	45	214	320	45	
		8	220	317	49	217	317	49	217	319	46	217	319	46	217	319	46	
		9	218	317	50	219	319	48	216	317	50	216	317	50	216	317	50	
		10	217	318	47	218	320	47	218	318	49	218	318	49	218	318	49	
รวม 2																		
X-bar2	220	318	47	218	321	46	217	318	47	217	318	47	217	318	47	218	319	47
SD2	2.05	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
Grand Average (X-bar bar)	220	318	47	219	320	47	219	320	47	219	320	47	219	320	47	219	320	47
ค่าเฉลี่ย SD	1.95	1.68	1.46	2.03	1.97	1.28	1.76	1.91	1.43	1.76	1.91	1.43	1.76	1.91	1.43	1.76	1.91	1.43

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT850 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 850 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Colling Temperature (CT) = 610 °C					
		แถบซ้าย (j=1)		แถบขวา (j=2)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		YS(MPa)		TS(MPa)		EL(%)		รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	211	309	47	216	318	49	209	311	50	212	313	49	212	313	49			
	2	210	309	48	217	319	51	214	310	49	212	310	49	212	310	49			
	3	209	310	49	214	315	50	212	314	50	212	314	50	212	314	50			
	4	208	312	49	218	316	50	210	313	48	210	313	48	210	313	48			
	5	207	313	50	216	317	47	209	314	49	209	314	49	209	314	49			
	6	210	309	48	217	317	45	210	312	52	210	312	52	210	312	52			
	7	210	312	47	214	316	46	211	309	51	211	309	51	211	309	51			
	8	209	310	49	215	318	51	211	311	50	211	311	50	211	311	50			
	9	213	308	47	216	318	49	212	314	48	212	314	48	212	314	48			
	10	211	309	48	217	316	45	213	315	49	213	315	49	213	315	49			
รวม 1																			
X-bar1	210	310	48	216	317	48	211	312	49	211	312	49	211	312	49	212	313	49	
SD1	1.60	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	
2	1	211	309	50	214	317	49	210	312	48	210	312	48	210	312	48			
	2	214	308	49	215	317	50	211	313	49	211	313	49	211	313	49			
	3	213	307	51	216	320	51	210	312	50	210	312	50	210	312	50			
	4	212	310	49	214	321	49	213	312	50	213	312	50	213	312	50			
	5	212	311	46	213	315	49	212	311	48	212	311	48	212	311	48			
	6	210	307	50	211	316	51	214	309	47	214	309	47	214	309	47			
	7	209	309	49	217	318	50	215	314	49	215	314	49	215	314	49			
	8	209	308	48	214	317	51	212	309	51	212	309	51	212	309	51			
	9	208	307	49	216	315	47	210	312	50	210	312	50	210	312	50			
	10	210	309	47	215	317	49	210	313	48	210	313	48	210	313	48			
รวม 2																			
X-bar2	211	309	49	215	317	50	212	312	49	212	312	49	212	312	49	212	313	49	
SD2	1.83	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	
Grand Average (X-bar bar)	210	309	49	215	317	49	211	312	49	211	312	49	211	312	49	212	313	49	
ค่าเฉลี่ย SD	1.72	1.43	1.19	1.45	1.51	1.72	1.66	1.73	1.19	1.66	1.73	1.19	1.66	1.73	1.19	2	2	2	1

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10°C				Colling Temperature (CT) = 610 °C				
		แถบซ้าย (j=1)		แถบขวา (j=2)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		รวมทั้งหมด						
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	259	357	33	265	359	29	254	354	34								
	2	260	358	34	267	358	31	254	357	35								
	3	260	359	32	265	359	31	256	354	36								
	4	260	358	34	268	360	30	255	354	34								
	5	261	359	35	264	359	32	255	357	33								
	6	259	360	35	266	358	29	257	354	35								
	7	259	359	34	267	361	28	258	356	34								
	8	259	359	35	267	359	29	254	355	36								
	9	258	358	32	266	362	33	256	355	35								
	10	259	357	32	267	361	31	256	355	35								
รวม 1																		
X-bar1	259	358	34	266	360	30	256	355	35						260	358	33	
SD1	0.80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	259	357	32	267	357	32	254	356	33								
	2	259	357	32	266	361	33	253	355	34								
	3	259	358	33	265	360	34	255	355	34								
	4	260	358	31	265	356	31	255	355	34								
	5	261	358	32	264	357	30	254	353	35								
	6	261	360	32	267	359	29	252	355	35								
	7	261	359	31	267	361	34	254	356	34								
	8	261	357	33	265	358	34	253	357	33								
	9	261	360	35	266	363	35	256	357	32								
	10	260	357	34	266	362	33	255	357	34								
รวม 2																		
X-bar2	260	358	33	266	359	33	254	356	34						260	358	33	
SD2	0.87	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	
Grand Average (X-bar bar)	260	358	33	266	360	31	255	355	34						260	358	33	
ค่าเฉลี่ย SD	0.84	1.03	1.20	1.07	1.76	1.67	1.21	1.17	0.89						1	1	1	

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 20 °C

การทดลอง ครั้งที่	ค่าแรง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Coiling Temperature (CT) = 610 °C		
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด		
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	244	352	38	265	368	28	247	347	39						
	2	245	348	39	268	368	29	247	348	41						
	3	247	349	40	266	368	29	248	347	38						
	4	247	351	41	267	366	31	249	347	38						
	5	248	351	39	267	365	32	246	348	40						
	6	245	349	38	266	365	31	251	347	41						
	7	246	347	39	267	367	30	252	347	41						
	8	245	347	38	265	367	32	251	352	40						
	9	244	348	41	267	366	33	250	349	38						
	10	246	347	40	267	364	31	251	347	39						
รวม 1																
X-bar1	246	349	39	267	366	31	249	348	40				254	354	36	
SD1	1.27	2	1	1	1	1	2	2	1				1	2	1	
2	1	247	347	40	267	367	29	249	347	37						
	2	247	348	41	265	366	28	249	345	38						
	3	248	347	39	267	364	29	248	345	40						
	4	249	350	37	267	364	30	251	346	42						
	5	250	347	36	266	365	32	251	345	40						
	6	249	352	39	268	365	31	250	348	38						
	7	246	348	38	265	365	31	252	349	39						
	8	247	349	39	268	368	30	247	346	38						
	9	248	347	40	267	366	29	249	347	39						
	10	247	351	41	265	366	28	249	348	41						
รวม 2																
X-bar2	248	349	39	267	366	30	250	347	39				255	354	36	
SD2	1.17	2	2	1	1	1	1	1	1				1	1	1	
Grand Average (X-bar bar)	247	349	39	267	366	30	249	347	39				254	354	36	
ค่าเฉลี่ย SD	1.22	1.75	1.32	1.02	1.28	1.38	1.71	1.43	1.34				1	1	1	

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B10 ppm, และ Te 30 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 10 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Coiling Temperature (CT) = 610 °C				
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)																
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด										
YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	238	337	37	268	362	30	235	331	40								
	2	234	337	38	264	363	30	236	330	41								
	3	235	337	37	266	363	29	236	329	42								
	4	236	334	39	267	362	28	235	331	39								
	5	236	334	38	267	362	33	232	334	38								
	6	235	335	36	266	362	32	235	332	39								
	7	235	331	38	267	362	32	235	333	40								
	8	235	337	40	265	366	31	234	334	42								
	9	234	331	36	267	361	32	235	334	41								
	10	235	336	35	267	361	33	237	335	40								
รวม 1																		
X-bar1	235	335	37	266	362	31	235	332	40			246	343	36				
SD1	1.10	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1
2	1	233	333	39	265	361	31	232	334	37								
	2	238	334	40	264	361	31	238	334	38								
	3	235	334	40	267	365	30	238	335	39								
	4	236	332	39	267	365	32	238	336	40								
	5	235	331	38	265	366	28	236	333	37								
	6	234	335	39	266	364	29	234	332	38								
	7	235	334	41	266	364	30	235	332	39								
	8	237	334	40	269	363	29	234	330	41								
	9	238	336	39	264	365	33	236	328	39								
	10	235	334	40	266	365	32	235	333	38								
รวม 2																		
X-bar2	236	334	40	266	364	31	236	333	39			246	343	36				
SD2	1.56	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	1
Grand Average (X-bar bar)	235	334	38	266	363	31	235	333	39			246	343	36				
ค่าเฉลี่ย SD	1.33	1.80	1.12	1.28	1.50	1.56	1.59	2.07	1.22	1	2	1	2	1	2	1	1	1

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 10 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 10 °C				Colling Temperature (CT) = 610 °C			
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	245	346	35	240	339	40	243	347	38							
	2	245	348	34	240	343	41	243	343	39							
	3	248	343	36	244	339	42	244	346	39							
	4	248	343	35	242	342	43	240	346	39							
	5	247	345	34	243	341	42	243	346	38							
	6	244	345	33	243	344	41	244	346	37							
	7	246	347	34	243	342	40	242	347	36							
	8	244	347	32	244	340	39	243	344	38							
	9	248	348	34	240	343	39	241	343	40							
	10	247	347	35	243	341	40	243	344	39							
รวม 1																	
X-bar1	246	346	34	242	341	41	243	345	38				244	344	38		
SD1	1.54	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1		
2	1	245	343	36	240	339	42	241	343	37							
	2	245	347	37	242	340	43	240	345	36							
	3	245	347	36	243	341	41	239	342	37							
	4	245	344	36	243	343	40	240	343	35							
	5	245	343	35	241	342	42	244	342	36							
	6	248	346	36	242	341	41	243	343	37							
	7	248	346	37	240	340	39	242	344	36							
	8	246	344	38	242	343	40	242	343	36							
	9	246	343	36	241	342	40	241	344	38							
	10	248	344	37	239	342	37	243	345	37							
รวม 2																	
X-bar2	246	345	36	241	341	41	242	343	37				243	343	38		
SD2	1.30	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1		
Grand Average (X-bar bar)	246	345	35	242	341	41	242	344	37				243	344	38		
ค่าเฉลี่ย SD	1.42	1.66	0.94	1.40	1.45	1.45	1.38	1.24	0.95				1	1	1		

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 20 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Colling Temperature (CT) = 610 °C					
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	237	336	41	244	345	43	238	339	41									
	2	240	335	42	246	344	43	239	339	42									
	3	238	336	44	245	344	41	238	339	43									
	4	238	330	44	243	342	40	239	337	44									
	5	238	330	43	239	341	42	240	336	42									
	6	238	334	44	240	343	44	241	337	43									
	7	239	334	42	244	343	43	237	339	44									
	8	240	335	43	244	345	43	238	338	42									
	9	238	331	41	245	344	42	239	336	43									
	10	239	331	40	246	343	41	241	339	41									
รวม 1																			
X-bar1	239	333	42	244	343	42	239	338	43										
SD1	0.92	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	
2	1	237	335	42	244	342	40	237	339	40									
	2	236	334	43	246	342	40	236	337	41									
	3	238	336	42	245	341	42	238	338	42									
	4	240	333	41	243	340	41	239	339	41									
	5	239	334	39	245	339	42	241	339	40									
	6	240	335	43	244	339	43	242	338	42									
	7	237	332	42	245	342	41	240	337	43									
	8	236	334	43	238	343	40	239	337	44									
	9	236	333	42	241	343	38	238	337	42									
	10	235	336	40	242	341	39	240	337	41									
รวม 2																			
X-bar2	237	334	42	243	341	41	239	338	42										
SD2	1.69	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	
Grand Average (X-bar bar)	238	334	42	243	342	41	239	338	42										
ค่าเฉลี่ย SD	1.30	1.78	1.31	2.26	1.30	1.30	1.43	1.05	1.11	1.05	1.11	2	1	2	1	1	1	1	

ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B20 ppm, และ Te 30 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 20 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Cooling Temperature (CT) = 610 °C		
		แถบซ้าย (j=1)		แถบขวา (j=2)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด						
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	237	330	43	239	344	42	239	338	44						
	2	238	330	44	239	341	40	238	338	45						
	3	240	328	42	240	341	39	239	337	46						
	4	237	334	43	244	343	40	243	337	45						
	5	236	334	45	242	344	43	239	337	46						
	6	238	328	44	243	343	45	240	337	46						
	7	239	331	43	243	344	42	237	334	47						
	8	239	331	44	243	343	39	240	334	45						
	9	240	330	46	244	342	43	238	335	43						
	10	241	332	45	239	342	43	242	331	43						
รวม 1																
X-bar1	239	331	44	242	343	42	240	336	45				240	336	44	
SD1	1.50	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
2	1	237	331	42	239	341	41	237	335	44						
	2	236	334	43	240	343	38	240	336	43						
	3	237	332	42	243	342	41	238	334	43						
	4	238	329	41	244	344	42	238	335	44						
	5	240	333	43	242	342	39	238	333	45						
	6	241	330	45	243	341	41	243	334	42						
	7	239	334	44	243	340	44	243	335	45						
	8	238	331	43	241	341	45	240	337	43						
	9	237	331	42	244	344	46	239	336	42						
	10	239	333	41	239	343	42	240	335	41						
รวม 2																
X-bar2	238	332	43	242	342	42	240	335	43				240	336	43	
SD2	1.47	2	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	
Grand Average (X-bar bar)	238	331	43	242	342	42	240	335	44				240	336	43	
ค่าเฉลี่ย SD	1.48	1.79	1.17	1.92	1.20	2.15	1.79	1.62	1.26				2	2	2	

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 10 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C			Boron (B) = 30 ppm			Comp. Temperature (Te) = 10°C			Cooling Temperature (CT) = 610 °C		
		แถบซ้าย (j=1)			แถบกลาง (j=2)			แถบขวา (j=3)			รวมทั้งหมด		
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
1	1	233	324	43	223	325	46	232	328	44			
	2	233	324	45	224	325	47	230	327	44			
	3	234	325	44	226	323	46	229	324	45			
	4	231	327	44	227	325	46	234	325	46			
	5	234	327	46	228	326	47	233	326	45			
	6	235	326	46	226	328	46	232	328	43			
	7	231	325	45	225	328	45	231	327	44			
	8	230	327	47	228	325	47	229	326	42			
	9	232	325	45	227	325	46	228	325	44			
	10	233	326	46	226	326	47	229	325	43			
รวม 1													
2	X-bar1	233	326	45	226	326	46	231	326	44	230	326	
	SD1	1.50	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	
	1	231	325	43	224	324	44	230	326	44			
	2	230	327	46	225	325	45	228	325	45			
	3	229	325	45	224	327	45	233	327	45			
	4	234	325	43	226	325	45	232	325	47			
	5	233	323	44	222	324	43	231	327	46			
	6	233	324	46	223	326	44	230	328	46			
	7	232	324	47	226	327	46	230	326	44			
	8	234	329	48	227	325	44	228	328	43			
9	231	326	45	224	324	43	231	328	44				
10	230	327	48	226	325	42	229	325	46				
รวม 2													
X-bar2	232	326	46	225	325	44	230	327	45	229	326		
SD2	1.68	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1		
Grand Average (X-bar bar)	232	326	45	225	325	45	230	326	45	229	326		
ค่าเฉลี่ย SD	1.59	1.40	1.44	1.52	1.25	0.89	1.72	1.25	1.14	2	1		

ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 20 °C

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 20°C				Colling Temperature (CT) = 610 °C				
		Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				Mechanical Properties ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง (i, j)				
		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		แถบซ้าย (j=1)		แถบกลาง (j=2)		แถบขวา (j=3)		รวมทั้งหมด		
YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	T.S(MPa)	EL(%)	
1	1	219	322	47	228	326	44	220	318	46								
	2	218	324	47	228	328	43	221	318	45								
	3	222	323	48	228	329	43	223	320	47								
	4	220	323	47	226	327	45	223	319	45								
	5	221	321	49	229	327	42	224	319	44								
	6	223	320	47	229	328	42	219	317	45								
	7	221	324	49	226	330	46	220	318	45								
	8	220	319	47	226	331	40	221	316	47								
	9	223	321	48	228	329	42	219	320	48								
	10	221	322	48	227	327	45	222	321	49								
รวม 1																		
X-bar1	221	322	48	228	328	43	221	319	46			223	323	46				
SD1	1.54	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	
2	1	222	321	47	227	326	44	220	321	48								
	2	223	320	46	226	326	46	220	318	49								
	3	223	320	46	230	327	43	219	322	47								
	4	223	318	46	226	325	45	223	319	47								
	5	221	319	48	226	327	42	221	318	46								
	6	223	320	48	227	326	46	220	321	48								
	7	224	321	48	230	328	45	218	320	45								
	8	221	322	49	227	329	44	219	318	47								
	9	222	322	49	226	326	45	222	323	46								
	10	220	319	46	231	327	42	219	319	48								
รวม 2																		
X-bar2	222	320	47	228	327	44	220	320	47			223	322	46				
SD2	1.17	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	
Grand Average (X-bar bar)	222	321	48	228	327	44	220	319	47			223	323	46				
ค่าเฉลี่ย SD	1.35	1.41	0.98	1.49	1.28	1.56	1.59	1.56	1.32	1	1	1	1	1	1	1	1	

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายใต้ปัจจัย FT870 °C, B30 ppm, และ Te 30 °C

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ (i)	Finished Temperature (FT) = 870 °C				Boron (B) = 30 ppm				Comp. Temperature (Te) = 30°C				Cooling Temperature (CT) = 610 °C			
		แถบซ้าย (j=1)				แถบกลาง (j=2)				แถบขวา (j=3)				รวมทั้งหมด			
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
1	1	211	311	50	233	329	42	214	315	51							
	2	213	312	52	234	328	41	215	315	52							
	3	214	312	51	231	330	43	215	313	49							
	4	215	314	49	229	331	44	215	316	50							
	5	213	315	48	231	332	43	218	315	50							
	6	214	314	49	230	329	43	217	314	50							
	7	215	316	51	230	330	42	216	315	48							
	8	215	315	50	229	331	42	218	317	51							
	9	213	316	49	235	332	42	217	316	49							
	10	212	313	50	232	333	40	216	315	51							
รวม 1																	
X-bar1	214	314	50	231	331	42	216	315	50				220	320	47		
SD1	1.28	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1		
2	1	214	316	47	229	330	40	214	314	49							
	2	215	317	48	230	329	42	215	314	48							
	3	216	316	49	228	328	43	216	313	49							
	4	214	319	48	227	329	41	215	315	49							
	5	214	316	49	232	330	43	216	314	48							
	6	212	315	50	228	331	44	214	312	50							
	7	214	317	51	230	332	44	216	311	51							
	8	213	318	47	232	331	43	217	314	46							
	9	215	316	48	230	330	43	218	312	48							
	10	216	319	47	229	328	42	215	313	47							
รวม 2																	
X-bar2	214	317	48	230	330	43	216	313	49				220	320	46		
SD2	1.19	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Grand Average (X-bar bar)	214	315	49	230	330	42	216	314	49				220	320	47		
ค่าเฉลี่ย SD	1.24	1.48	1.21	1.76	1.37	1.14	1.28	1.11	1.25				1	1	1		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สัจจะพจน์ คชวัฒน์
วัน เดือน ปี เกิด	6 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ,ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริญญาโท กำลังศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	151/4 หมู่ 3 หมู่บ้านสัมมากร ซอย 19 ถนน รามคำแหง แขวง/เขต สะพานสูง กรุงเทพมหานคร 10240



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY