



การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มี
ผลกระทบต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง
APPLICATION OF EXPERIMENTAL DESIGN TO STUDY THE INFLUENCE
OF TEMPERATURE AND TIME ON THE HARDNESS OF AISI 4140 STEEL
WITH HARDENING

นายพิชิตพงศ์ ขวัญแย้ม รหัส 49363328
นายเอกชัย คำหล้า รหัส 49363403

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน.....15060205.....
เลขเรียกหนังสือ.....วส.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๖๔๙ ๐
๒๕๕๒

15060205

2/6

15060205

2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มี
ผลกระทบต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง

ผู้ดำเนินโครงการ นายพิชิตพงศ์ ขวัญเข้ม รหัส 49363328
 นายเอกชัย คำหล้า รหัส 49363403

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กานต์ ลีวัฒนาyingxng

ที่ปรึกษาร่วมโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2552

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กานต์ ลีวัฒนาyingxng)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชัย ฤตวิรุฬห์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิษญา สิมารักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์อากาศกรณ์ จันทร์ปรีกษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพิชิตพงศ์ ขวัญแย้ม	รหัส 49363328
	นายเอกชัย คำห่อ	รหัส 49363403
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กานต์ ลีวัฒนาชิงขง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2552	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการอบให้ความร้อนของเหล็ก AISI 4140 ที่มีส่วนผสมของคาร์บอนประมาณร้อยละ 0.4 และผ่านการชุบแข็ง โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบให้ความร้อนที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 หลังผ่านการชุบแข็ง

ผลของการศึกษาพบว่า เหล็กชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที และอุณหภูมิ 850, 950 และ 1,050 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และพบว่าชิ้นงานจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อ เวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปมีผลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 หลังผ่านการชุบแข็ง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงขึ้นได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์
กานต์ ลีพัฒน์ยังยงและอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้ให้
คำแนะนำและความคิดเห็นต่างๆ ในการทำโครงการมาโดยตลอด และยังช่วยให้แนวทางในการทำ
การทดลองที่ถูกต้อง

นอกจากนี้ยังมีศ.ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี ที่คอยให้คำปรึกษาในการทำโครงการ และ
อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน รวมถึงครูช่างในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุก
ท่านที่ช่วยเหลือและอนุเคราะห์วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินโครงการมาโดยตลอด

ทั้งนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจ
ให้แก่ผู้วิจัยในการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายพิชิตพงศ์ ขวัญแย้ม

นายเอกชัย คำห่อ

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาบัตร.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	1
1.5 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart).....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	3
2.2 เหล็ก AISI 4140.....	9
2.3 การชุบแข็ง.....	10
2.4 การวัดค่าความแข็ง.....	14
2.5 การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัย.....	18
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	20
2.7 การวิเคราะห์การถดถอย.....	24
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	28
3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	28
3.2 การออกแบบการทดลอง	28
3.3 การดำเนินการทดลอง	32
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	37
3.5 สรุปผลการทดลอง	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	40
4.1 ผลการทดสอบความแข็ง	40
4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา	41
4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	43
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผล	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI4140	9
2.2 จำนวนการทดลองเท่ากับ ab ในแต่ละครั้ง	18
2.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร	18
2.4 ค่าองศาเสรี	22
2.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	23
3.1 จำนวนชิ้นงานทดสอบ	31
3.2 ตารางบันทึกผลการทดลองของการทดลอง.....	37
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองของการทดลองที่ 1	40
4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองของการทดลองที่ 2	41
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของการทดลองที่ 1 ที่ผ่านการชุบแข็ง	46
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของการทดลองที่ 2 ที่ผ่านการชุบแข็ง	48
4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการ ทดลองที่ 1	49
4.6 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการ ทดลองที่ 2	50

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Unit Cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body Centered Cubic และ Face Centered Cubic ในเหล็ก	4
2.2 แผนภาพสมดุลเหล็ก – คาร์บอน	6
2.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล	15
2.4 สภาพผิวชิ้นทดสอบที่กดด้วยเพชรรูปกรวย (ร็อกเวลสเกล A, C และ D)	16
2.5 ความหนาชิ้นงานสัมพันธ์กับความแข็งเมื่อทดสอบด้วยกรวยรูปเพชร(HRE, HRC, HRD) ตาม ISO 65081986(E).....	17
2.6 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล	21
2.7 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์.....	24
2.8 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{y \cdot x} > 0$	26
3.1 การกำหนดจุดทดสอบความแข็ง	31
3.2 การตัดชิ้นงาน	32
3.3 ชิ้นงานที่ผ่านการตัด	33
3.4 การกลึงปากหน้าและลบมุมชิ้นงาน.....	33
3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปากหน้าและลบมุม	33
3.6 การปัดชิ้นงาน.....	34
3.7 การมัดชิ้นงาน.....	34
3.8 การเรียงชิ้นงาน.....	34
3.9 เตาอบที่ทำการปรับค่าแล้ว	35
3.10 ชิ้นงานที่ทำการชุบเสร็จ	35
3.11 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	36
3.12 การทดสอบค่าความแข็ง.....	36
3.13 เหล็กที่ทดสอบความแข็งแล้ว	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของการทดลองที่ 1 ที่ผ่าน การชุบแข็ง.....	42
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของการทดลองที่ 2 ที่ผ่าน การชุบแข็ง.....	42
4.3 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของการทดลองที่ 1.....	43
4.4 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของการทดลองที่ 2.....	44
4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของการทดลองที่ 1.....	44
4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของการทดลองที่ 2.....	45
4.7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของการทดลองที่ 1.....	45
4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของการทดลองที่ 2.....	46
4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1....	51
4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2....	53

บทนำ

เนื่องจากเหล็ก AISI4140 เป็นเหล็กมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนประมาณ ร้อยละ 0.4 จัดอยู่ในระดับปานกลางและมีธาตุผสมอยู่ในปริมาณต่ำมีความแข็งแรงไม่สูงมาก สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติได้ด้วยการชุบแข็งโดยการชุบแข็งจะได้เหล็กที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ได้เหล็กที่คุณสมบัติเหมาะสมกับงานประเภทสร้างเครื่องมือกลต่างๆ และในการชุบแข็งนั้น จะมีตัวแปรสำคัญๆ อยู่หลายตัวที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก เช่น เวลาในการอบ อุณหภูมิในการอบ ปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็ก และอัตราการความเร็วในการชุบ จากปัจจัยทั้งหมดจะเห็นว่าเวลาในการอบและอุณหภูมิในการอบ เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ คือ การวัดหรือกำหนดค่าที่จะทำการทดลองนั้นเวลาการอบจะสามารถกำหนดได้จะใช้เท่าไรเพียงจับเวลาที่ชิ้นงานอยู่ในเตาอบ ส่วนอุณหภูมิเราสามารถปรับตั้งค่าได้ว่าจะใช้อุณหภูมิเท่าไร โดยจะกดตั้งค่าที่เตาอบได้เลย ด้วยเหตุผลนี้ คณะผู้จัดทำโครงการนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ ว่ามีผลต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งหรือไม่อย่างไร

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการชุบแข็ง กับความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง

ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 หลังผ่านการชุบแข็ง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ที่มีผลต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 หลัง
ผ่านการชุบแข็ง

1.5 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.5.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็ก AISI 4140
- 1.5.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 850 - 1,050 องศาเซลเซียส
- 1.5.3 เวลาที่ใช้ในการอบอยู่ในช่วงเวลา 60 – 120 นาที
- 1.5.4 สารที่ใช้ในการชุบแข็งคือ น้ำ
- 1.5.5 การทดสอบด้านความแข็งใช้เครื่องทดสอบแบบร็อกเวล
- 1.5.6 ใช้การทดลองซ้ำ 1 การทดลอง

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม พ.ศ.2552 – มกราคม พ.ศ.2553

1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ย.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1.	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล							
2.	ออกแบบการทดลอง							
3.	ดำเนินการทดลอง							
4.	วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ							
5.	สรุปผล							

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel) [1]

เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นวัสดุในทางวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติด้าน ความแข็งและความอ่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก ทำให้เหมาะกับการใช้งานหลายลักษณะ เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก – คาร์บอน คือ เหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเทคตอยด์ และเหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮเพอร์ยูเทคตอยด์

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo Eutectoid)

คือ เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเนื้อเหล็กต่ำ คือ ตั้งแต่ ร้อยละ 0.0218 – 0.77 มีคุณสมบัติอ่อนเหนียว มีความแข็งน้อยมาก โครงสร้างภายในเนื้อโลหะ คือ เฟอไรต์และเพิร์ลไลต์ ในเชิงงานทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ เหล็กโครงสร้างในงานก่อสร้างทุกชนิดเหล็กในงานเชื่อมโลหะ

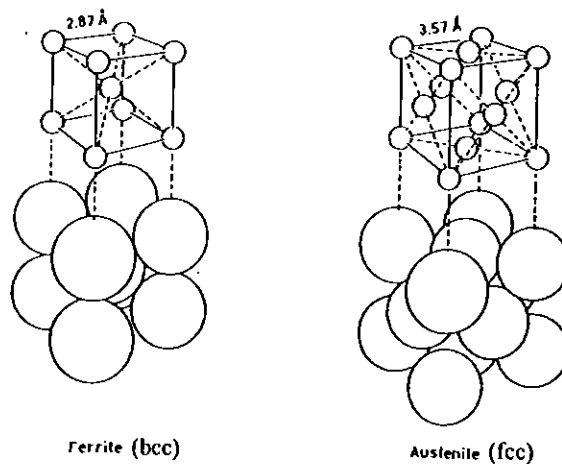
2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮเพอร์ยูเทคตอยด์ (Hyper Eutectoid)

คือ เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 0.77 – 2.11 คาร์บอน และมีโครงสร้างภายในเนื้อเหล็ก คือ เพิร์ลไลต์และซีเมนไทต์ มีคุณสมบัติแข็งแรงเหมาะสมที่จะใช้งานกับงานเครื่องมือต่างๆ เช่น ใช้ทำสากค ไขควง ค้อนสว่าน เป็นต้น

2.1.3 อันตรูปของเหล็ก (Allotropic Forms of Iron)

สภาพอันตรูป (Allotropy) หมายถึง สภาพที่ธาตุหนึ่งสามารถมีโครงสร้างผลึกได้หลายแบบ แต่ละแบบเรียกว่า อันตรูป (Allotrope) คุณสมบัติทางกายภาพของอันตรูปหนึ่งจะแตกต่างจากของอีกอันตรูปหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด แต่ว่าคุณสมบัติทางเคมีจะเหมือนกัน สภาพอันตรูปนั้นจะขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของอะตอม ซึ่งจะมีการเรียงตัวแตกต่างกันไปตามระดับของอุณหภูมิต่างๆ

เหล็กบริสุทธิ์ มีการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์ม 4 ลักษณะที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ทำให้เกิดฟอร์มที่เรียกว่า เหล็กอัลฟา (α), เหล็กเบต้า (β), เหล็กแกมมา (γ), และเหล็กเดลต้า (δ) ใน 4 ฟอร์มนี้ α , β และ δ มีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน คือ Body Centered Cubic (bcc) ส่วนฟอร์ม γ จะมีโครงสร้างผลึกเป็น Face Centered Cubic (fcc) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าเหล็กบริสุทธิ์มีอันตรูปอยู่ 2 แบบ คือ bcc และ fcc ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อนึ่งเหล็กอัลฟานี้บางทีเรียก เหล็กเฟอร์ไรต์ และเหล็กแกมมาบางทีก็เรียกว่าเหล็กออสเทนไนต์



รูปที่ 2.1 Unit Cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body Centered Cubic และ Face Centered Cubic ในเหล็ก

ที่มา : Steel and its heat treatment, Karl-Erik Thelning, Butterworth

2.1.3 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน

การศึกษาแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนมีความสำคัญมาก เพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก และการที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กได้ดีย่อมต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นหลัก ในการศึกษาแผนภูมินี้จะต้องทำความเข้าใจความหมายของศัพท์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

เฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเหล็กอัลฟา (α) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอัสรูป α กับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด ร้อยละ 0.0218 ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส

ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอัสรูป γ กับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กแกมมานี้ได้มากที่สุด ร้อยละ 2.11 ที่อุณหภูมิ 1,148 องศาเซลเซียส

เฟอร์ไรต์เคลด้า (δ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิใกล้จุดหลอมตัวของเหล็ก (1,394 – 1,538 องศาเซลเซียส) คาร์บอนสามารถละลายได้สูงสุดร้อยละ 0.09 ที่อุณหภูมิ 1495 องศาเซลเซียส

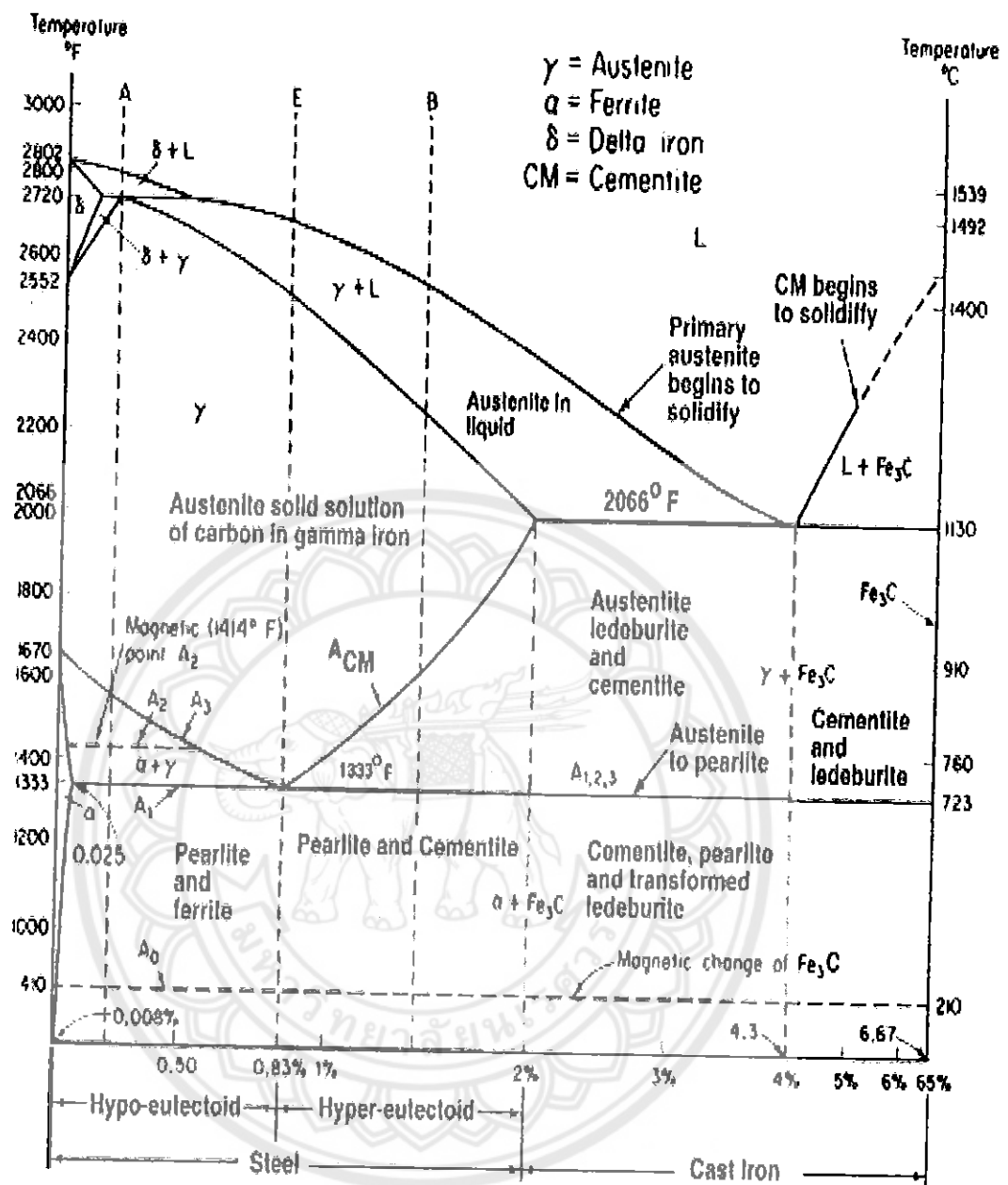
ซีเมนต์ไต์ (Cementite หรือ Iron Carbide) เมื่อปริมาณคาร์บอนในระบบเหล็ก-คาร์บอนมีมากเกินไปมันจะละลายในเฟอร์ไรต์หรือออสเทนไนต์หมด คาร์บอนที่เหลือจับตัวกับเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนโดยมี

คาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 6.67 มีสูตร Fe_3C มีความแข็งสูงแต่จะเปราะแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก

เพิร์ลไลท์ (Pearlite) คือ ผลึกที่เกิดร่วมกันระหว่างเฟอร์ไรต์ (ร้อยละ 0.0218 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) กับซีเมนต์ไต์ (ร้อยละ 6.67 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) เกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นช้าๆ ตรงอุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส การเกิดเฟอร์ไรต์และซีเมนต์ไต์ จะเกิดพร้อมกันที่อุณหภูมิคงที่เกิดผลึกเป็นแถบขาวๆ สลับกันระหว่างเฟอร์ไรต์และซีเมนต์ไต์

แผนภาพสมดุลของเหล็ก – คาร์บอน ในช่วงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาทำความเข้าใจ คือ เส้นอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ซึ่งเป็นเส้นแสดงอาณาเขตของเฟสต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิยูเทคตอยด์

- กำหนดให้เส้น
- A1 คือ อุณหภูมิยูเทคตอยด์
 - A2 คือ เส้นที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็ก
 - A3 คือ เส้นที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ในขณะที่ปล่อยให้เย็นตัวและจากเฟอร์ไรต์สลายตัวเป็นออสเตนไนต์หมดในขณะที่ทำการเผาให้ร้อน
 - A_{cm} คือ เส้นที่เริ่มมีซีเมนต์ไต์แยกตัวจากออสเตนไนต์ขณะเย็นตัวและซีเมนต์ไต์สลายหมดในขณะที่เผาให้ร้อนถึงอุณหภูมินี้
 - A4 คือ เส้นที่มีการเปลี่ยนจากออสเตนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์เคลด้า



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลเหล็ก - คาร์บอน

ที่มา: www.rmutphysics.com/.../metalswu/Picture2-3-.bmp

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงเฟสเฟอร์ไรต์ไปเป็นออสเตนไนท์ในลักษณะสมดุลสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel) แบ่งได้ดังนี้

2.1.4.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่า ร้อยละ 0.0128 โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติจะเป็นเฟอร์ไรต์และมีซีเมนต์ไคต์ ปรากฏอยู่ตามขอบเกรนในช่วงการเผาให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 20 องศาเซลเซียส ถึง 727 องศาเซลเซียส จะปรากฏการสลายตัวของซีเมนต์ไคต์โดยคาร์บอนจะละลายในลักษณะแพร่ซึมเข้าสู่เกรนของเฟอร์ไรต์ ทำให้ปริมาณของคาร์บอนในเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 727 องศาเซลเซียส จะทำให้ปรากฏมีเฟอร์ไรต์เพียงเฟสเดียวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 727 - 912 องศาเซลเซียส จะปรากฏการเปลี่ยนแปลงจากเฟอร์ไรต์ไปเป็นออสเตนไนท์ โดยการเกิดนิวเคลียสของออสเตนไนท์ตามขอบเกรนเฟอร์ไรต์และมีการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของออสเตนไนท์จะเพิ่มมากขึ้น และจะเหลือเฟอร์ไรต์เพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 900 องศาเซลเซียส ในที่สุดเฟอร์ไรต์จะหมดไปเมื่ออุณหภูมิสูงเลยเส้น A_3 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก จะปรากฏออสเตนไนท์ที่มีการขยายขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งจากออสเตนไนท์ไปเป็นเฟอร์ไรต์เคลด้าเมื่ออุณหภูมิใกล้ 1394 องศาเซลเซียส

2.1.4.2 เหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเท็คตอยด์ (ร้อยละ 0.0218 < คาร์บอน < ร้อยละ 0.77) โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ (โปรยูเท็คตอยด์หรือไพร์มมรี) กับเฟลไลต์ ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์กับซีเมนต์ไคต์ ในกรณีนี้จะมีทั้งซีเมนต์ไคต์ยูเท็คตอยด์และซีเมนต์ไคต์เทอร์ทอริซึ่งจะอยู่รอบๆ เฟอร์ไรต์ทั้งโปรยูเท็คตอยด์ และยูเท็คตอยด์เฟอร์ไรต์ระหว่างอุณหภูมิ 20 - 727 องศาเซลเซียส ซีเมนต์ไคต์เทอร์ทอริจะสลายตัวให้อะตอมคาร์บอน และละลายได้หมดในเฟอร์ไรต์ทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจนสูงที่สุด ร้อยละ 0.218 เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 727 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเท็คตอยด์ กล่าวคือเกิดการรวมตัวของเฟอร์ไรต์กับซีเมนต์ไคต์ให้เฟสออสเตนไนท์ ($Fe_3C + \alpha \rightarrow \gamma$) แต่ทั้งนี้เฟอร์ไรต์โปรยูเท็คตอยด์จะไม่เปลี่ยนแปลงอยู่คงที่ การเกิดปฏิกิริยายูเท็คตอยด์เป็นลักษณะแพร่ซึมของคาร์บอนจากซีเมนต์ไคต์เข้าสู่เฟอร์ไรต์ซึ่งจะปรับลักษณะระบบผลึกจาก B.C.C. ไปสู่ระบบ F.C.C. เมื่อปฏิกิริยาลึกลับลงจะได้เฟสออสเตนไนท์ที่มีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 0.77 ที่อุณหภูมินี้โครงสร้างจะประกอบด้วยออสเตนไนท์ (ร้อยละ 0.77 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) กับโปรยูเท็คตอยด์เฟอร์ไรต์ (ร้อยละ 0.0218 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 727 องศาเซลเซียส จะปรากฏปริมาณของออสเตนไนท์เพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณเฟอร์ไรต์จะค่อยๆ ลดลงโดยเปลี่ยนไปเป็นออสเตนไนท์ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือในขณะที่ออสเตนไนท์เพิ่มปริมาณมากขึ้นแต่ปริมาณของคาร์บอนในออสเตนไนท์จะกลับลดลงตามเส้น A_3 ส่วนเฟอร์ไรต์ขณะที่ค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นออสเตนไนท์ปริมาณของคาร์บอนในเฟอร์ไรต์ที่เหลือจะกลับลดลงตามเส้นอัตราการละลายของคาร์บอนในเฟอร์ไรต์เมื่ออุณหภูมิสูงเหนือเส้น A_3 โปรยูเท็คตอยด์เฟอร์ไรต์จะสลายตัว

หมดคงเหลือแต่เฟสออสเทนไนท์ซึ่งจะมีการขยายตัวของเกรนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเปลี่ยนเฟสจาก γ ไปเป็น δ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปอยู่ในช่วง 1394 องศาเซลเซียส ถ้าในเหล็กมีคาร์บอนน้อยกว่า ร้อยละ 0.175 และถ้าคาร์บอนในเหล็กสูงกว่า ร้อยละ 0.17 ออสเทนไนท์จะเริ่มมีการหลอมละลาย

2.1.4.3 เหล็กกล้ายูเทคตอยด์ (คาร์บอนเท่ากับร้อยละ 0.77) โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติประกอบด้วย เฟอร์ไรต์ (α + Fe_3C) ทั้งหมด ระหว่างอุณหภูมิ 20 - 727 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟอร์ไรต์แต่ตามหลักทฤษฎีแล้วปรากฏว่าเฟอร์ไรท์จะมีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนโดยที่ซีเมนต์ไคต์เทอร์ทิวารีตามบริเวณรอบๆ เฟอร์ไรท์จะสลายตัวให้อะตอมของคาร์บอนปริมาณของคาร์บอนในเฟอร์ไรท์จะเพิ่มสูงขึ้นจนถึง ร้อยละ 0.0218

ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวระหว่างเฟอร์ไรท์ (ร้อยละ 0.0218 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) กับยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ (ร้อยละ 6.67 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) ให้เฟสออสเทนไนท์ (ร้อยละ 0.77 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) ดังปฏิกิริยา α (0.0281%C) + Fe_3C (6.67%C) $\longrightarrow$ γ (0.77%C) ที่อุณหภูมิสูงเหนือ 727 องศาเซลเซียส จะปรากฏเฟสออสเทนไนท์ มีการขยายตัวให้เกรนโตขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1,390 องศาเซลเซียส ออสเทนไนท์เริ่มหลอมละลาย

2.1.4.4 เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (ร้อยละ 0.77 < คาร์บอน < ร้อยละ 2.11) โครงสร้างที่อุณหภูมิปกติประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ โดยมีโปรยูเทคตอยด์ ซีเมนต์ไคต์อยู่ตามขอบเกรนเฟอร์ไรต์ระหว่างอุณหภูมิ 20 - 727 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ชัดเจน เพียงแต่เฟอร์ไรท์ยูเทคตอยด์มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นโดยได้รับคาร์บอนมาจากเทอร์ทิวารีซีเมนต์ไคต์เหมือนกับกรณีเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ทุกประการ และเฟอร์ไรท์จะมีคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 0.0218 ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยารวมตัวระหว่างเฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไคต์ให้เฟสออสเทนไนท์ (ร้อยละ 0.77 โดยน้ำหนักของคาร์บอน) ที่อุณหภูมิเหนือ 727 องศาเซลเซียส จะปรากฏมีเฟสออสเทนไนท์กับโปรยูเทคตอยด์ ซีเมนต์ไคต์ซึ่งจะค่อยๆ สลายตัวลดปริมาณลง ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 727 องศาเซลเซียส ในขณะที่ออสเทนไนท์เพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนก็เพิ่มขึ้นด้วยตามเส้น A_{cm} และจะปรากฏมีเพียงเฟสออสเทนไนท์เท่านั้นเมื่ออุณหภูมิสูงเลยเส้น A_{cm} ที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} จะขยายเกรนโตขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงเลย 1,148 องศาเซลเซียสขึ้นไป ถ้าในกรณีที่มีเหล็กมีคาร์บอนร้อยละ 2.11 ออสเทนไนท์จะเริ่มหลอมละลายที่ 1,140 องศาเซลเซียส

2.2 เหล็ก AISI 4140 [10]

2.2.1 ลักษณะของเหล็ก AISI 4140

เหล็ก AISI 4140 เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมในช่วงปานกลางเป็นเหล็กที่นิยมใช้ทั่วไป ราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 18 - 22 HRC ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กความสามารถในงานกลึง ไสขึ้นรูปอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ ข้อเสีย คือ เมื่อทำการเชื่อมจะเกิดรอยแตกร้าว

2.2.2 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI 4140

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI 4140

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์ (%)
คาร์บอน	0.38-0.43
แมกนีเซียม	0.75-1.00
ฟอสฟอรัส	0.035(max)
กำมะถัน	0.04(max)
ซิลิกอน	0.15-0.30
โครเมียม	0.80-1.10
โมลิบดีนัม	0.15-0.25

ที่มา: http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_steels

2.2.3 ลักษณะเฟสของเหล็ก AISI 4140

จากข้อมูลข้างต้น (ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI 4140) เราจะทราบว่าเหล็ก AISI 4140 มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ร้อยละ 0.38 – 0.43 โดยน้ำหนักของคาร์บอน ซึ่งในระดับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนดังกล่าวนี้จะจัดว่าเหล็ก AISI 4140 อยู่ในเหล็กคาร์บอนประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเท็คตอยด์ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลไปเทียบกับแผนภาพสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน พบว่าในช่วงก่อนเผาเหล็ก AISI 4140 นั้นจะมีเฟสเป็นเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไรท์ และการเปลี่ยนเฟสของเหล็ก AISI 4140 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเหมือนเหล็กคาร์บอนประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเท็คตอยด์ (ดูวิธีการเปลี่ยนเฟสของเหล็กคาร์บอนประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเท็คตอยด์ได้ในข้อ 2.1.4)

2.3 การชุบแข็ง (Hardening) [8]

การชุบแข็ง คือ การอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีขณะใช้งานในลักษณะงาน เช่น เหล็กเครื่องมือ การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไนท์หรือเบนไนท์ ซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ต้องมีปัจจัยที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการ คือ

ก. ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ออสเทนไนท์จะเป็นมาร์เทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำ เหล็กต้องมีคาร์บอนมากกว่า ร้อยละ 0.3 ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่นๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัมจะไม่เพียงทำหน้าที่ช่วยให้ชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน

ข. อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ ก่อนการชุบน้ำ หรือน้ำมันอุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์หมด การชุบในน้ำ หรือน้ำเกลือ น้ำค้าง ความแข็งที่จะได้ไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมาร์เทนไซต์ที่จะได้ต้องมาจากออสเทนไนท์เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่นเฟอร์ไรท์หรือซีเมนไตต์

ค. สารชุบ (อัตราการเย็นตัว) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏคำว่า อัตราการเย็นตัววิกฤต หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเทนไนท์จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ แต่จะได้เฟอร์ไรท์แทน

2.3.1 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็งเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.3.1.1 เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ จะให้อุณหภูมิระดับที่สูงเหนือเส้น AC_1 , 30 – 50 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด ถ้าพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และอยู่ในช่วง AC_1 – AC_3 จะปรากฏมีเฟอร์ไรท์เหลืออยู่บางส่วน ถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่เฟอร์ไรท์จะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคงสภาพอยู่อย่างเดิม เหล็กภายหลังการชุบจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควรและบริเวณ โครงสร้างที่เป็นเฟอร์ไรท์จะเป็นบริเวณที่อ่อน (Soft spots) ขาดคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียดสี

ในกรณีถ้าเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น AC_3 ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีเกรนโต ภายหลังการชุบน้ำจะได้มาร์เทนไซต์ที่หยาบ ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่งชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวดังง่าย

2.3.1.2 เหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น AC_1 ประมาณ ร้อยละ 30 – 50 โดยน้ำหนักของคาร์บอนเท่านั้น เห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์เหลืออยู่เพียงบางส่วนเท่านั้น ที่กลายหรือสลายตัวไปเป็นออสเทนไนต์ และซีเมนต์ไคต์เหลืออยู่นี้จะกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของออสเทนไนต์ เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของมาร์เทนไซต์ โดยมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผงคิในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งสูง และทนการเสียดสีในขณะใช้งานได้ดี ทั้งนี้เพราะโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ที่มีความแข็งประมาณ 700 – 800 H_v ซึ่งจะแข็งกว่ามาร์เทนไซต์ (650 – 700 H_v) ประเด็นที่สำคัญ คือ จะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิดโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือเส้น AC_m จะไม่เกิดผลดี นอกจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นแล้ว โครงสร้างออสเทนไนต์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมาก จะให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดี เพราะจะได้มาร์เทนไซต์เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดี และยังอาจเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้โดยง่าย

2.3.2 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม

การกำหนดอัตราการเผาและช่วงเวลาเหมาะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ส่วนผสมของเหล็ก โครงสร้างเดิม ความเครียดเหลือค้าง รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ทำการชุบแข็ง ปกติเหล็กเมื่อบรรจุเข้าเตาเผา ความร้อนที่เหล็กจะได้รับที่ผิวกับใจกลางจะไม่เท่ากันในตอนแรก เพราะกว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเหล็กเข้ามาถึงใจกลางย่อมต้องใช้เวลา การเผาในอัตราสูง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับใจกลางจะมีค่ามาก การบิดงอมีมากซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย โดยทั่วไปราแบ่งอัตราการเผาไว้ 3 อัตรา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

2.3.2.1 อัตราการเผาช้า เป็นวิธีที่เริ่มต้น โดยบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อมๆ กับการให้ความร้อนแก่เตาเผาพร้อมๆ กัน อุณหภูมิทั้งของเตาและชิ้นงานจะร้อนขึ้นในอัตราใกล้เคียงกันในลักษณะเช่นนี้ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับใจกลางของแท่งเหล็กมีน้อย การเผาในลักษณะเช่นนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูง มีความเครียดเหลือค้างมาจากการขึ้นรูป รูปร่างซับซ้อนและมีส่วนหนาบางต่างกันมาก

2.3.2.2 อัตราการเผาสูง วิธีนี้จะเผาเตาที่มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ จากนั้นจึงจะบรรจุเข้าเตาเผาภายหลังหรือเป็นกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่ เมื่อนำเหล็กออกไปชุบหมดแล้ว ก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไปใหม่ ลักษณะเช่นนี้อัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางขึ้นงานต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่จะไปเท่ากันในระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีแรก การเผาในอัตราสูงเหมาะสำหรับงานชิ้นเล็กๆ รูปร่างไม่ซับซ้อน และถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง จะใช้วิธีเอาเหล็กบรรจุไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิด บรรจุเข้าเตาจะช่วยลดอัตราการเผาลงได้อีกเพราะกว่าความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงใจกลางแท่งเหล็กจะช้าลง

สำหรับช่วงเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ออสเทนไนท์ที่สม่ำเสมอและให้อุณหภูมิทั้งบริเวณผิวและใจกลางเท่ากัน ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัว ขึ้นอยู่กับหลักในการปฏิบัติ ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำซึ่งคาร์ไบด์ละลายได้ง่าย จะใช้เวลาประมาณ 5 – 15 นาที ก็พอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วย แต่ถ้าเป็นเหล็กผสมปานกลาง หรือสูง ซึ่งคาร์ไบด์มีเสถียรภาพ จะต้องใช้เวลานานพอที่คาร์ไบด์จะละลายตัวหมด ซึ่งเวลาที่ใช้ควรจะเพิ่มขึ้นประมาณ 25 – 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลาในเกณฑ์ปกติ แต่โดยทั่วไปถ้าเหล็กมีขนาดความหนา 1 นิ้ว จะใช้เวลาในการอบประมาณ 60 นาที

2.3.2.3 อัตราการเผาที่สูงมาก เป็นวิธีที่ไม่นิยมใช้ เพราะอัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางแห่งเหล็กจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น โดยวิธีการเผาเตาให้อุณหภูมิในเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อบรรจุเหล็กเข้าเตาเผา อุณหภูมิของเตาจะลดลงมาจนเท่ากับที่ต้องการพร้อมๆ กับอุณหภูมิของชิ้นงานร้อนขึ้น เวลาที่ใช้จะสั้นกว่าทุกวิธีที่ผ่านมา แต่อุณหภูมิระหว่างใจกลางกับผิวเหล็กแตกต่างกันมากอาจจะทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานแตกร้าวได้ง่ายวิธีนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็ก และรูปร่างง่ายๆ จำเป็นจะต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่สองเพื่อลดอัตราการเผาให้ช้าลง

2.3.3 การเตรียมและการผูกชิ้นงานสำหรับชุบ

การเตรียมและการผูกชิ้นงานสำหรับชุบเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้กระทำการชุบจะต้องคำนึงถึงและจะต้องใช้ความระมัดระวังในการเตรียมชิ้นงาน เพราะถ้าหากมีการเตรียมและผูกชิ้นงานที่ถูกต้องจะช่วยให้ชิ้นงานชุบที่ออกมามีลักษณะดี คือไม่บิดงอ และ还将ช่วยลดการแตกร้าวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถปฏิบัติได้ดังนี้

2.3.3.1 ถ้าหากชิ้นงานนั้นมีรูปร่างลักษณะสลับซับซ้อน เช่น มีรูซิกขอบของงานหรือมีจำนวนหลายรู เป็นต้น ควรจะใช้ดินทนไฟผสมด้วยน้ำ แล้วทำการอุดรูหรือส่วนที่สลับซับซ้อนนั้นเสีย เพื่อที่จะให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะได้ไม่ต่างกันมากนักอันเป็นเหตุให้ชิ้นงานนั้นเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ เมื่อทำการจุ่มชุบในของเหลว

2.3.3.2 ผิวของชิ้นงานจะต้องสะอาดปราศจากสนิมหรือสิ่งอื่น ซึ่งเป็นตัวกั้นความร้อนที่จะระบายออกจากชิ้นงานไปยังสารที่ใช้จุ่มชุบ เพราะไม่เช่นนั้นแล้วเมื่อกระทำการจุ่มชุบชิ้นงานจะแข็งเป็นจุดๆ หรืออาจจะไม่แข็งเท่าที่ควร

2.3.3.3 ควรจะบันทึกชนิดของเหล็ก รูปร่าง ประเภท และขนาดของชิ้นงานไว้ก่อนที่จะทำการชุบ เพื่อป้องกันการสับสนเปลี่ยนของชิ้นงาน

2.3.3.4 การผูกชิ้นงานจะต้องผูกให้แน่นและแข็งแรงพอที่จะไม่หลุดขณะการชุบ เพราะทำให้เกิดการเสียหายแก่ชิ้นงาน

2.3.3.5 ลวดที่จะทำการผูกต้องแข็งแรงพอ หมายถึง สามารถรับน้ำหนักของชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิซึ่งเป็นอุณหภูมิสูง

2.3.3.6 การผูกหรือการจับชิ้นงานควรจะถูกให้ถูกทิศทาง เพื่อความสะดวกในการนำชิ้นงานที่ได้ออกไปทำการชุบซึ่งจะมีอุณหภูมิสูง

2.3.3.7 การผูกชิ้นงานหลายชิ้นรวมเป็นพวกใหญ่ๆ อาจจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานแต่ละชิ้นไม่เท่ากันอันเกิดจากการยื่นตัวระหว่างชิ้นงานที่อยู่รอบนอกกับชิ้นงานที่อยู่ภายในไม่เท่ากัน

2.3.3.8 ในกรณีเตาที่ใช้ในการเผาชิ้นงานเป็นเตาที่ควบคุมบรรยากาศภายในเตาไม่ได้ ควรจะนำชิ้นงานต้องการอบชุบบรรจุลงในกล่องเพื่อป้องกันผิวของชิ้นงานเสียอันเกิดจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของชิ้นงานการบรรจุชิ้นงานลงในกล่องควรจะคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้ไม่ควรบรรจุชิ้นงานที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันลงในกล่องเดียวกัน เพราะทำให้เกิดความลำบากในการจุ่มชุบและทำให้ผิวของชิ้นงานเสีย เนื่องจากการปิด-เปิดกล่องหลายครั้ง ไม่ควรบรรจุชิ้นงานที่มีขนาดต่างกันมากๆ ลงในกล่องเดียวกัน เพราะจะทำให้การเผาแห้งลำบากและจะทำให้ชิ้นแต่ละชิ้นความแข็งแรงต่างกัน กรณีชิ้นงานที่มีลักษณะที่บิดงอได้ง่าย เช่น ชิ้นงานมีความยาวมากๆ หรือชิ้นงานบางควรจะวางชิ้นงานให้เรียบร้อยหรือให้เป็นระเบียบ ไม่ควรวางระเกะระกะเพราะจะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอขณะเผาได้

2.3.4 ลักษณะของของเหลวสำหรับการชุบแข็ง

2.3.4.1 ต้องมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ

2.3.4.2 มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ไปเป็น มาร์เทนไซต์ (ประมาณ 200 – 400 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกัน ไม่ให้เกิดความเครียดภายในจนเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวเสียหายได้

2.3.4.3 การถ่ายความร้อนที่ของเหลวกลายเป็นไอเมื่อสัมผัสแหล่งเหล็กที่ร้อน แบ่งเป็น 3 ลักษณะ

1) ชั้นแรกของเหลวที่สัมผัสกับแหล่งเหล็กร้อนจะกลายเป็นไอหุ้มแหล่งเหล็กไว้ในลักษณะฟิล์มบางๆ การถ่ายเทความร้อนช่วงนี้จะช้าและจะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ

2) ชั้นที่สองฟิล์มบางๆ ที่หุ้มอยู่แตกออกของเหลวสัมผัสกับแหล่งเหล็กจะเดือดกลายเป็นไอ มีลักษณะเหมือนการกวนขึ้นนี้อัตราการเย็นตัวจะสูงมาก

3) ชั้นที่สาม อัตราเย็นตัวช้าลงเพราะแหล่งเหล็กเย็นน้อยลง ของเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดความร้อนจึงถ่ายเทโดยการพาตัวของเพียงอย่างเดียว อัตราการเย็นตัวจะลดลงจนถึงจุดที่ของเหลวกับแหล่งเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากัน

2.3.5 สารชุบหรือตัวกลาง (Quenching Media)

กรรมวิธีทางความร้อนทุกประเภทจะต้องอาศัยตัวกลางในการทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการอบ เย็นตัวลงในอัตราเย็นตัวต่างๆ กัน ดังนั้น ตัวกลาง ก็คือ สารที่ช่วยให้ชิ้นงานที่ผ่านการอบได้ถ่ายเทความร้อนหรือควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานได้เร็วหรือช้าได้ตามต้องการ ตัวกลางที่นิยมใช้กรรมวิธีทางความร้อนมีดังนี้

2.3.5.1 น้ำ เป็นตัวกลางที่ให้อัตราเย็นตัวที่สูงมาก เป็นของเหลวที่หาได้ง่าย และยังคงควบคุมให้ปราศจากของเสียได้ง่ายอีกด้วย การใช้น้ำเป็นตัวกลางจะให้ผลดีเมื่อน้ำมีอุณหภูมิ 15 - 25 องศาเซลเซียส คือ จะทำให้อัตราการเย็นตัวค่อนข้างคงที่ การชุบต้องมีการกวนอยู่ตลอดเวลา เพราะว่าจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นขณะทำการชุบ และฟองอากาศนี้จะทำให้อัตราการเย็นตัวเปลี่ยนไป

2.3.5.2 น้ำเกลือ ตัวกลางชนิดนี้จะประกอบไปด้วยน้ำผสมกับน้ำเกลือในอัตราส่วนต่างๆ กัน แต่ที่นิยมใช้ คือ ผสมเกลือ ร้อยละ 10 ตัวกลางนี้จะทำให้อัตราการเย็นตัวเร็วกว่าน้ำในช่วงอุณหภูมิ 600 - 400 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นช่วงการเกิดมาร์เทนไซต์ น้ำเกลือให้อัตราเย็นตัวไม่สูงนักจึงทำให้ไม่เกิดความเครียดมากนัก

ส่วนข้อเสียจะกัดกร่อนโลหะ ทั้งในสภาพที่เป็นไอและในสภาพที่เป็นของเหลว นอกจากนั้นจะทำให้เกิดมลภาวะอีกด้วย

2.3.5.3 น้ำมัน ตัวกลางชนิดนี้แบ่งได้หลายประเภทตามส่วนผสม ประสิทธิภาพ และอุณหภูมิที่ใช้ เช่น น้ำมันที่ใช้ในการชุบทั่วไป น้ำมันชุบเร็ว น้ำมันชุบมาร์เทนเปอร์ริง ซึ่งส่วนใหญ่ มักจะเป็นน้ำมันที่เป็นสารประกอบไฮโดคาร์บอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) น้ำมันชุบทั่วไป (Conventional Quenching oil) เป็นน้ำมันจากแร่ บางครั้งอาจจะผสมสารป้องกันการเกิดสนิมด้วยก็ได้

2) น้ำมันชุบเร็ว (Fast Quenching oil) เป็นน้ำมันจากแร่ผสม น้ำมันชนิดนี้มีส่วนผสมพิเศษอื่นๆ ลงไปด้วย เช่น สารกันสนิม ส่วนช่วยลดการดึงผิว เป็นต้น

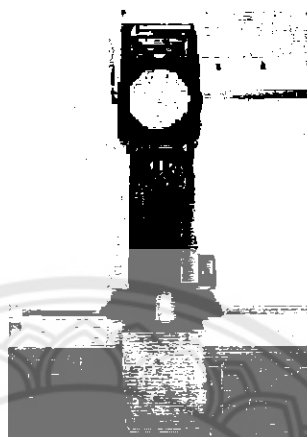
3) น้ำมันชุบมาร์เทนเปอร์ริง (Hot Quenching Oil) เป็นน้ำมันแร่ประเภทพาราฟิน ที่มีสารป้องกันการสนิมและสารที่ช่วยในการชุบเร็ว ตัวกลางชนิดนี้มักจะใช้สำหรับการชุบแข็งแบบมาร์เทนเปอร์ริงของเหล็กเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์

4) เกลือเหลว วิธีการใช้เกลือเหลวในการชุบนั้น เรียกว่า การทำซอลด์บัท (Salt Bath) เกลือสามารถทำให้หลอมละลายได้รวดเร็วและรักษาอุณหภูมิได้ดี

2.4 การทดสอบความแข็งโลหะตามร็อกเวล (Metallic Materials Rockwell Hardness Test) ตาม ISO 6508-1986 (E) [6]

การทดสอบความแข็งตามร็อกเวลนี้ชาวอเมริกันชื่อ ร็อกเวล (Rockwell) ได้พัฒนาวิธีนี้ขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1922 หลักการทั่วไป คือ ให้กดหัวกดทดสอบบนชิ้นทดสอบจนเป็นรอยครากตัว (Plasticity) แต่มีส่วนหนึ่งที่ยืดหยุ่น บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูป (Deformed) ครากตัวจะทำให้เกิดความเครียดเย็น (Strain hardened) ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนจะเกิดมากกว่าชิ้นทดสอบชุบแข็ง

การทดสอบแบบร็อกเวลล์นี้ วัดได้จากความลึกที่ปรากฏบนผิวทดสอบ อันเกิดจากการกดของหัวกด (Indenter) มาตรฐาน และวัดความแข็งของชิ้นงานได้หลายสเกล เช่น สเกล A, B, C, D, E, F, G, H, K, L เป็นต้น แต่มีการวัดบางสเกลเท่านั้นที่นิยมใช้ ซึ่งสเกลเหล่านั้น คือ สเกล C และ B



รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์
ที่มา: www.material.chula.ac.th/.../hardness_small.jpg

2.4.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกล C (HRC)

ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยการใช้หัวกดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรที่มียอดมนเท่ากับ 120 องศา

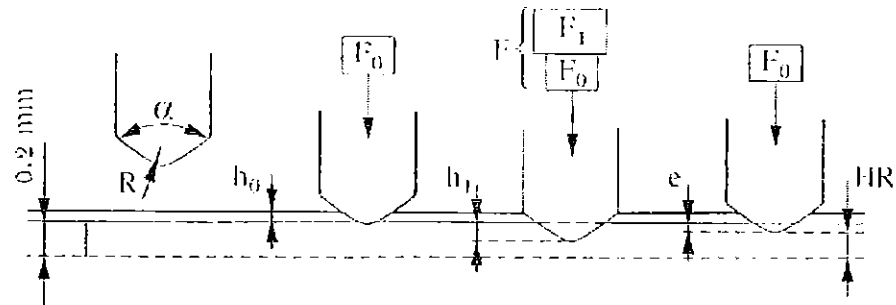
2.4.2 หลักการ (Principle) ทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์

เมื่อใช้แรงกดกดหัวกด (Indenter) ถ้าทดสอบแบบวิธีร็อกเวลล์สเกลสเกล c จะใช้กรวยรูปเพชร กดบนชิ้นทดสอบด้วยแรงกดนำ (Preliminary force) และแรงกดเพิ่มเติม (Additional force) เมื่อนำแรงกดเพิ่มเติมออกจะทำให้เกิดระยะกดลึกถาวร e

หน่วยวัด e แต่ละ 1 สเกล คือ 0.002 มิลลิเมตร ค่า e นี้จะแบ่งเป็น 100 สเกล = 0.2 มิลลิเมตร จำนวนสเกลที่อ่านได้ (e) ก็คือค่าความแข็งร็อกเวลล์ เช่น

58 HRC = ความแข็งร็อกเวลล์ (HR=Rockwell Hardness) วัดด้วยสเกล C ได้ 58

70 HRB = ความแข็งร็อกเวลล์วัดด้วยสเกล B ได้ 70



รูปที่ 2.4 สภาพผิวขึ้นทดสอบที่กดด้วยเพชรรูปกรวย (ร็อกเวลสเกล A, C และ D)

ที่มา : มานพ ต้นตระกูลบัณฑิต, งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม, 2546

- เมื่อ
- α = มุมของกรวยรูปเพชร
 - R = รัศมีของปลายเพชรรูปกรวย = 0.2 มิลลิเมตร
 - D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง
 - F_0 = แรงกด
 - F_1 = แรงกดเพิ่มเติม
 - F = แรงกดรวม
 - h_0 = ความลึกรอยกดจากแรงกดนำ (แต่ยังไม่กดด้วยแรงกดเพิ่มเติม)
 - h_1 = ความลึกรอยกดเมื่อเพิ่มแรงกดเพิ่มเติม
 - e = ระยะลึกถาวรของรอยกดเมื่อนำแรงกดเพิ่มเติมออกเหลือแต่แรงกดนำ (1 หน่วยสเกล = 0.002 มิลลิเมตร)

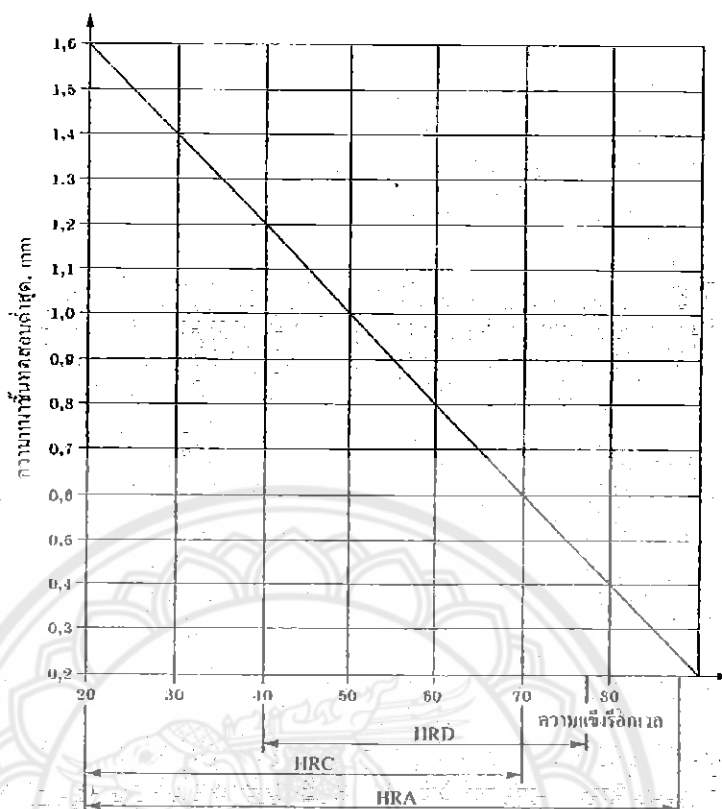
ดังนั้น ความแข็งร็อกเวลสเกล C(HRC) = $100 - e$

ขอบเขตการทดสอบความแข็งร็อกเวล C จะให้ทดสอบความแข็งระหว่าง 20 ถึง 70 HRC ใช้ทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็งและอบคืนตัว

2.4.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ

2.4.3.1 ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเจียรละเอียด ปราศจากออกไซด์ ผิวสะเก็ด (Scale) หรือวัสดุอื่นๆ รวมทั้งสารหล่อลื่น

2.4.3.2 ขนาดความหนาชิ้นทดสอบจะต้องมีขนาด 10 เท่าของระยะกดลึกถาวร e หรือหาจากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นงาน สัมพันธ์กับความแข็งเมื่อทดสอบด้วยกรวยรูปเพชร

(HRE, HRC, HRD) ตาม ISO 6508-1986(E)

ที่มา : มานพ ดันตระบัณฑิตย์, งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม, 2546

2.4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

2.4.4.1 โดยทั่วไปแล้วการทดสอบจะกระทำที่ระหว่าง 10 ถึง 35 องศาเซลเซียส หากต้องการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมจะกระทำที่ 23 ± 5 องศาเซลเซียส

2.4.4.2 นำชิ้นทดสอบมาวางบนแท่นที่มีความแข็งเพียงพอ

2.4.4.3 นำหัวกดคดบนผิวงานด้วยแรงกดนำ $F_0 = 98.07$ N โดยมีให้กระแทกหรือมีการสั่นสะเทือนใดๆ

2.4.4.4 ตั้งหน้าปัดให้สเกลชี้ที่เลข 100 (ขณะนี้ระยะกดลึก 0 มิลลิเมตร กำหนดไว้ที่ความแข็งร็อกเวล 100) จากนั้นเพิ่มแรงกดเพิ่มเติมจาก F_0 ไป F ในเวลา 2 วินาทีแต่ไม่เกิน 8 วินาที แรงกดเพิ่มเติม $F = 1.471$ N สำหรับสเกล C, G และ K

2.4.4.5 เพื่อให้หัวกดแช่ในเนื้อวัสดุจนเกิดสภาพครากตัว (Plasticity) ด้วยแรงกดเพิ่มเติม F จะต้องให้หัวกดแช่ระหว่าง 10 ถึง 15 วินาที

2.4.4.6 ถ้าความแข็งร็อกเวลจะหาได้จากระยะกดลึกถาวร e ซึ่งโดยปกติจะสามารถอ่านค่าที่เครื่องทดสอบได้โดยตรง ระยะห่างระหว่างรอยกด (วัดจากศูนย์กลางรอยกด) จะต้อง

มากกว่า 4 เท่าของรอยกด (แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร) สำหรับรอยกดที่อยู่ห่างจากขอบของชิ้นงานจะต้องมีระยะห่างอย่างต่ำ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (ไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร)

2.5 การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัย [7]

การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ตัวแปรคือ ตัวแปร A ซึ่งมีอยู่ a ระดับ และเช่นเดียวกันกับตัวแปร B ซึ่งมีอยู่ b ระดับ ดังนั้นในแต่ละครั้งของการทดลองจะมีองค์ประกอบของการทดลองหรือวิธีปฏิบัติ (Treatments) อยู่ทั้งสิ้น ab วิธีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.2 จำนวนการทดลองเท่ากับ ab ในแต่ละครั้ง

	B_1	B_2	...	B_b
A_1				
A_2				
$\vdots$				
A_a				

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

โดยปกติจะทำการทดลองทั้งหมด n ครั้ง ดังนั้นจะทำให้ตารางการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล กรณี 2 ตัวแปร สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร

ตัวแปร A	ตัวแปร B			
	1	2	...	b
1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
$\vdots$				
A	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

โดยกำหนดให้

y_{ijk} แทนค่าตอบสนองเมื่อตัวแปร A อยู่ในระดับ i
B อยู่ในระดับ j ในการทดลองครั้งที่ k

และ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง a

j มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง b

k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

และค่าตอบสนองแต่ละตัวได้รับจากการทดลองสุ่ม (Completely Randomised Design, CRD) และสามารถเขียนตัวแบบทางค่านสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ได้คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \ell_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, a \\ j = 1, 2, 3, \dots, b \\ k = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่ μ แทน ผลตอบสนองเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด
 τ_i แทน ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ i ของตัวแปร A
 β_j แทน ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ j ของตัวแปร B
 $\tau\beta_{ij}$ แทน ผลกระทบจากความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ β_j
 ℓ_{ijk} แทน ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง

โดยกำหนดให้ตัวแปร A และ B เป็นตัวแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) ดังนั้นผลกระทบจากการทดลองจึงจะเป็นค่าความแปรเปลี่ยน (Variation) อันจะสืบเนื่องมาจากการที่ค่าผลตอบสนองเฉลี่ยโดยรวม จะได้ว่า $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ทำนองเดียวกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ และมีจำนวนครั้งในแต่ละการทดลอง n ครั้ง ดังนั้นจำนวนส่วนประกอบของการทดลองทั้งหมดจึงเท่ากับ abn ครั้ง

ในการทดลองแบบแฟคทอเรียล ตัวแปรทั้งสอง (A และ B) ถือว่ามีความสำคัญเท่ากันจึงต้องมีการทดสอบสมมติฐานทั้ง 2 ตัวแปร

กรณีผลกระทบเนื่องจากตัวแปรแถว (ตัวแปร A)

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยที่สุดมีค่าใดค่าหนึ่ง } (\tau_i) \neq 0$$

กรณีผลกระทบเนื่องจากตัวแปรคอลัมน์ (ตัวแปร B)

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_b = 0$$

H_1 : อย่างน้อยที่สุดมีค่าใดค่าหนึ่ง $(B_j) \neq 0$

รวมทั้งผลกระทบที่มีความสำคัญอย่างมากอีกอย่างหนึ่งคือ

กรณีผลกระทบเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแถวและตัวแปรคอลัมน์

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกๆ ค่า i, j

H_1 : อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน [4]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางหรือTwo-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่เป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้วยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใดๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งหรือไม่

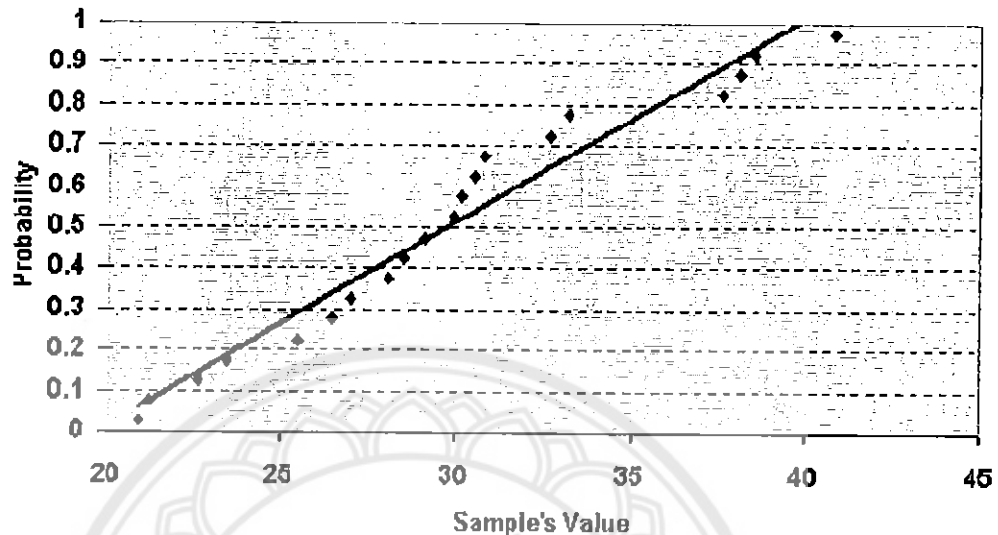
เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของค่าเฉลี่ยของประชากรจะต้องมีเงื่อนไข คือ ประชากรต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

2.6.1 การกระจายแบบปกติ

เมื่อมีการสุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่งออกมาจากประชากรที่มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) โดยปกติกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวก็จะมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติตามประชากรด้วยเช่นกัน แต่นั่นก็ไม่ใช่กฎตายตัว เป็นไปได้ที่ตัวอย่างที่สุ่มออกมาจะมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ (Non-normal distribution) ซึ่งนั่นก็ไม่ใช่ประเด็นปัญหาหากว่าเราไม่ได้นำข้อมูลไปทำการอนุมานกลับไปหาประชากรอีกที เมื่อใดก็ตามที่ต้องการนำข้อมูลของสิ่งตัวอย่างไปทำการอนุมานถึงประชากร เราจะต้องแน่ใจว่าข้อมูลดังกล่าว มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติเสมอ หากไม่เช่นนั้น การทดสอบสมมติฐานหรือการอนุมาน ด้วยเครื่องมือทางสถิติอื่นๆ ก็จะทำให้ผลคลาดเคลื่อนตั้งแต่เล็กน้อยถึงไม่อาจยอมรับได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะความไม่เป็นการกระจายแบบปกติ เมื่อเป็นเช่นนี้การทดสอบว่าข้อมูลของสิ่งตัวอย่างที่ได้มานั้นมีการกระจายแบบปกติหรือไม่

โดยมีหลักว่าถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) แล้วจุดตัดจะเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดจะต้องไม่กระจุกเป็นกลุ่มๆ และความห่างระหว่าง

จุดแต่ละจุดต้องใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ แต่แน่นอนว่าค่ามีการอยู่ห่างจากเส้นมากน้อยแตกต่างกันไปบ้าง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล

ที่มา : http://www.statistics.ob.tc/normal_test.htm

2.6.2 การวิเคราะห์สถิติของตัวแบบผลกระทบที่มีค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

กำหนดให้ $y_{i...}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ i ของตัวแปร A
 $y_{.j.}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ j ของตัวแปร B
 $y_{ij.}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองใน ij ใดๆ
 $y_{...}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

และ

$\bar{y}_{i...}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ i ของตัวแปร A
 $\bar{y}_{.j.}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ j ของตัวแปร B
 $\bar{y}_{ij.}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองใน ij ใดๆ
 $\bar{y}_{...}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

สามารถเขียนแทนได้โดยตัวแบบคณิตศาสตร์คือ

$$y_{i...} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, a \quad (2.2)$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; j = 1, 2, 3, \dots, b \quad (2.3)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, a \quad (2.4)$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad ; j = 1, 2, 3, \dots, b \quad (2.5)$$

$$\bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, a \quad (2.6)$$

$$\bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad ; j = 1, 2, 3, \dots, b \quad (2.7)$$

$$\bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, a \quad (2.8)$$

$$\bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad ; j = 1, 2, 3, \dots, b \quad (2.9)$$

พิจารณาความผิดพลาดในการได้เป็นส่วนต่างๆ ของดังนี้

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad (2.10)$$

กำหนดให้

SS ของตัวแปรแถวหรือตัวแปร A

แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_A

SS ของตัวแปรคอลัมน์หรือตัวแปร B

แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_B

SS ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A และ B

แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_{AB}

SS ของความผิดพลาด (Error or Residuals)

แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_E

จากด้านขวามือของสมการ (2.11) สามารถเขียน

แทนด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2.11)$$

โดยมีค่าองศาเสรี (Degree of Freedom, df) ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ค่าองศาเสรี

ผลกระทบจากตัวแปรหรือความสัมพันธ์ร่วม	องศาเสรี
A	a-1
B	b-1
AB	(a-1)(b-1)
Error	ab(n-1)
Total	Abn-1

ที่มา : พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

และผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.12)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.13)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.14)$$

$$SS_{subtotals} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.15)$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotals} - SS_A - SS_B \quad (2.16)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2.17)$$

และจะทำให้สามารถเขียนตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร และเป็นตัวแบบผลกระทบคงที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

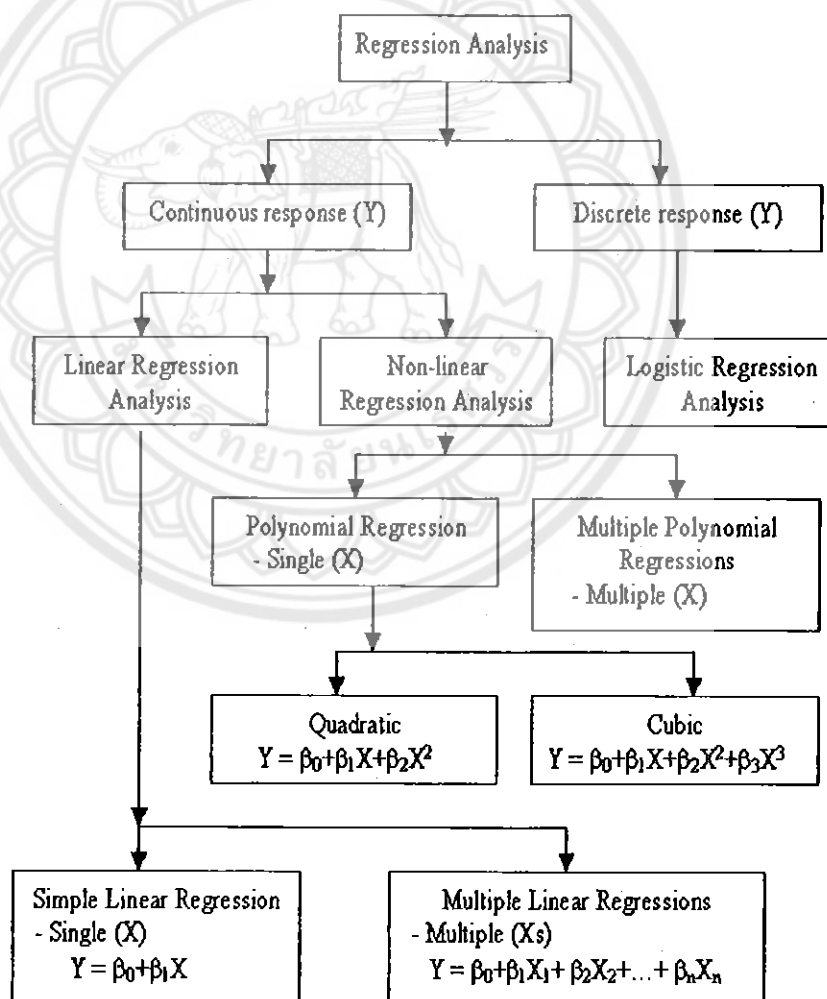
Source of Variation	SS	Degree of Freedom	MS	F_0
A	SS_A	$a-1$	$\frac{SS_A}{a-1}$	$f_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	$\frac{SS_B}{b-1}$	$f_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB-Interaction	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$\frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$f_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n-1)$	$\frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	$abn-1$		

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

2.7 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) [9]

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นตัวเดียวหรือหลายตัวคือ $X_1, X_2, \dots, X_k$ กับตัวแปรตามชนิดต่อเนื่องที่มีตัวเดียว Y ใช่มากทั้งในสถานการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมตัวแปรต้น และในการทดลองที่สามารถควบคุมตัวแปรต้นได้ ถ้าหากมีตัวแปรต้นตัวเดียวจะเรียกการถดถอยอย่างง่าย หากมีตัวแปรต้น 2 ตัวขึ้นไปจะเรียกการถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยใช้สำหรับการหารูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรต้น เพื่อใช้ในการทำนายหรือประมาณค่าตัวแปรตามที่น่าสนใจศึกษา เมื่อกำหนดตัวแปรต้นตัวอื่นมาให้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 2.7 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์

ที่มา : http://www.geocities.com/chalong_sri/reg1.htm

2.7.1 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

ในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายจะเป็นการวิเคราะห์กับตัวแปรตาม (Y) โดยมีตัวแปรต้น (X) เพียงตัวเดียว การใช้ตัวแปรต้นเพียงตัวเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะอธิบายตัวแปรตามได้ ในกรณีที่จะพยายามอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีตัวแปรต้นมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเมื่อมีตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ใช้ในการทำนายตัวแปรตาม ซึ่งโดยปกติตัวแปรต้นจะใช้สัญลักษณ์ X และตัวแปรตามจะใช้สัญลักษณ์ Y

2.7.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

2.7.2.1 ตรวจสอบว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นหรือไม่

2.7.2.2 สร้างสมการการพยากรณ์ เพื่อใช้สำหรับการประมาณค่า Y

2.7.2.3 ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรทั้งสอง โดยทำการตรวจสอบว่าสมการการพยากรณ์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากน้อยเพียงใด ดูจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate) และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการพยากรณ์

2.7.3 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.7.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination)

- เกิดจากการนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง
- ใช้แสดงความแปรผันที่จะเกิดขึ้นกับตัวแปร Y มีผลเนื่องมาจากตัวแปร X คิด

เป็นก็เปอร์เซ็นต์

- ใช้ศึกษาว่าสมการการประมาณค่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากหรือน้อย
- ค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1
- สัญลักษณ์ที่ใช้คือ R square
- ในกรณีที่ค่า R square มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y อย่างมาก หมายความว่า สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก
- ในกรณีที่ค่า R square มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y น้อยมาก หมายความว่า สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้น้อย

2.7.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate)

- เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่า Y ด้วย $\hat{Y}$

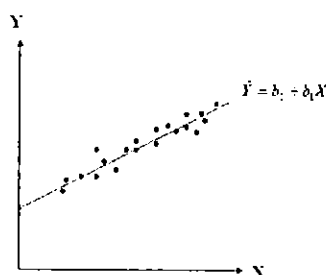
15060205

ร.ร.

พ 6497

2552

- สัญลักษณ์ที่ใช้คือ $S_{Y.X}$



รูปที่ 2.8 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{Y.X} > 0$

2.7.4 การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการพยากรณ์

สถิติ t-test ใช้ทดสอบความแตกต่างหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ใช้สำหรับการทดสอบข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1) ตั้งสมมติฐาน

H_0 : ค่าเฉลี่ยของประชากรของ 2 กลุ่มเท่ากัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของประชากรของ 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3) เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

ความแปรปรวนของประชากรเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

$$\text{ตัวสถิติ : } t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N \sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}} \quad (2.18)$$

เมื่อ t = ความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการคำนวณ

D = ความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการคำนวณของแต่ละค่า

ค่า

$\sum D$ = ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่า

D^2 = ความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการคำนวณของแต่ละค่ายกกำลังสอง

$(\sum D)^2$ = ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งแกร่งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่ายกกำลังสอง

$N \sum D^2$ = จำนวนค่าความแข็ง คูณ ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่ายกกำลังสอง

$N-1$ = จำนวนค่าความแข็ง ลบ 1

4) สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(กลุ่ม)} > t_{(ตาราง)}$ หรือ $t_{(กลุ่ม)} < -t_{(ตาราง)}$

5) กำหนดค่าสถิติ (t) จากกลุ่มตัวอย่าง

6) ตัดสินและตีความ $t_{(กลุ่ม)} > t_{(ตาราง)}$ ดังนั้น เราปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 ให้ผลว่าทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หากผลการทดสอบสมมติฐานได้ผลว่าเราไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันแต่ค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันเป็นความคลาดเคลื่อน

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากเอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 ปี 2547 โดย นายอานัติ หาททรัพย์ และนายมงคล มงคลวงศ์โรจน์ ได้ทำการศึกษาผลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ เอ ไอ เอส ไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมค์ 6 โดยในส่วนหนึ่งของงานวิจัยสรุปไว้ว่า เหล็กอะไหล่ AISI 4140 หรือ SCM440 ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า เหล็กหัวฟ้าซึ่งเป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลาง ร้อยละ 0.38 ถึง 0.43 เหล็กชนิดนี้มีความสามารถที่ดีมากในการชุบแข็ง ความแข็งหลังชุบประมาณ 54 – 59 HRC

จากเอกสารทางวิชาการของบริษัทไทย – เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด เกี่ยวกับเหล็ก AISI 4140 ได้สรุปไว้ว่า การชุบแข็งเหล็ก AISI 4140 ที่อุณหภูมิ 820 – 860 องศาเซลเซียส โดยใช้สารชุบน้ำหรือน้ำมัน จะทำให้ได้ความแข็ง AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งอยู่ที่ 55 – 60 HRC

และจากการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2550 โดย นายสมศักดิ์ แก้วพลอย ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบชุบเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อน เพื่อศึกษาหาค่าเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ที่จะให้ค่าความแข็งและความเหนียวที่ใช้งานได้ดีที่สุด โดยนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งที่ระดับอุณหภูมิ 850°C ชุบแข็งด้วยน้ำมัน มาทำการอบคืนตัว โดยใช้ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 250°C - 650°C ซึ่งเพิ่มระดับอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 100°C ใช้เวลาในการอบคืนตัว 3 ระดับ คือ 30 นาที 60 นาที และ 90 นาที จากนั้นทำการวัดค่าความแข็ง และค่าพลังงานกระแทก จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบคืนตัวมีผลต่อค่าพลังงานกระแทก ส่วนอุณหภูมิมีผลต่อค่าความแข็ง และเวลาในการอบคืนตัวไม่มีผลต่อค่าความแข็ง ดังนั้นจะได้ว่าอุณหภูมิที่ให้ค่าความแข็งและความเหนียวที่ใช้งานได้ดีที่สุดคือที่ระดับ 550°C และเวลาในการอบคืนตัวที่ 60 นาที

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

การศึกษารวบรวมข้อมูลจะเป็นการศึกษาและรวบรวมข้อมูลซึ่งจะเกี่ยวกับงานวิจัยทั้งหมดโดยแหล่งข้อมูลจะได้มาจากสื่อทางอินเทอร์เน็ต และหนังสือเป็นหลัก

3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของเหล็กกล้าคาร์บอน

ศึกษาเกี่ยวกับชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนว่ามีกี่ประเภท แต่ละประเภทแตกต่างกันอย่างไรและเหล็กที่ใช้ในการทดลองอยู่ในประเภทใดเพื่อที่จะเลือกกระดပ်ปัจจัยทำการทดลองได้ถูกต้อง

3.1.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเหล็ก AISI 4140

ศึกษาเกี่ยวกับผสมของธาตุต่างๆ ที่นำมาผลิตเป็นเหล็ก AISI 4140 และคุณสมบัติของเหล็ก รวมถึงการนำไปใช้งานของเหล็กประเภทนี้

3.1.3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการชุบแข็ง

ศึกษาเกี่ยวกับการอบชุบแข็งเพื่อต้องการให้เหล็กหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้นทนทานต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน และโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ของเหล็ก คือ มาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์

3.1.4 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการวัดค่าความแข็ง

ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลสเกล C ซึ่งหัวกดมีรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรที่มีมุมยอดเท่ากับ 120 องศา ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งสำหรับ เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว

3.1.5 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

ศึกษาการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและหาขนาดการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ปัจจัยที่ 2 ระดับ เพื่อคำนวณหาจำนวนจุดในการวัดความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้การทดสอบความแข็งของร็อกเวล

3.2 การออกแบบการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง จึงได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ปัจจัยที่ 2 ระดับ เพราะงานวิจัยนี้เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยโดยมีหลักการเลือกปัจจัย โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการศึกษผลกระทบร่วม และกำหนดระดับของปัจจัยดังนี้

3.2.1 การกำหนดปัจจัย

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง มีดังนี้

3.2.1.1 อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน ถ้าอุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์หมดแล้วความแข็งแรงที่ได้ไม่สูงเท่าที่ควร (มนัส สติรจินดา, 2537)

3.2.1.2 เวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน เพราะถ้าเหล็กอยู่ในเตาที่อุณหภูมิสูงนาน จะทำให้เกรนของออสเตนไนต์จะมีการขยายตัวมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง (มนัส สติรจินดา, 2537)

3.2.1.3 ปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก การที่ออสเตนไนท์จะเป็นมาร์เทนไซต์ ได้ในลักษณะการชุบแข็งธรรมชาติด้วยน้ำ เหล็กต้องมีคาร์บอนมากกว่า ร้อยละ 0.3 (มนัส สติรจินดา, 2537)

3.2.1.4 สารชุบ (อัตราการใช้ตัว) ถ้าจะทำให้ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ จะต้องเป็นอัตราการใช้ตัวที่สูงพอ (มนัส สติรจินดา, 2537)

สำหรับโครงการนี้ปัจจัยที่เลือกใช้ในการทดลองมีสองปัจจัย ดังนี้

1) อุณหภูมิก่อนการชุบ

อุณหภูมิชิ้นงาน (ก่อนทำการชุบ) เหตุผลที่ทำการเลือกอุณหภูมิชิ้นงาน (ก่อนทำการชุบ) มาเป็นปัจจัยในการศึกษาและทดลองเพราะ ปัจจัยอุณหภูมิชิ้นงาน (ก่อนทำการชุบ) สามารถควบคุมระดับของอุณหภูมิที่ทำการทดลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยจะทำการปรับระดับของอุณหภูมิที่เตาอบเหล็กได้ตามต้องการ

2) เวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน

เวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน เหตุผลที่ทำการเลือกเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน มาเป็นปัจจัยในการศึกษาและทดลองเพราะ ปัจจัยเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นงาน สามารถควบคุมระดับของเวลาที่ทำการทดลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยจะทำการจับเวลาได้ตามต้องการ

ส่วนปัจจัยที่ไม่ได้นำมาทำการศึกษาเพราะ ปริมาณคาร์บอนจะผสมอยู่ในเหล็กไม่สามารถเพิ่มหรือลดได้และเหล็ก AISI 4140 จะมีช่วงคาร์บอนที่แน่นอน ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และเราต้องมีการควบคุมปัจจัยโดยการเลือกเหล็ก AISI 4140 ที่มาจากแหล่งผลิตเดียวกัน ส่วนสารชุบ (อัตราการใช้ตัว) เป็นปัจจัยที่บอกความแตกต่างของค่าความแข็งแรงเมื่อเปลี่ยนสารชุบได้ไม่ชัดเจนและสารชุบแต่ละชนิดก็มีข้อจำกัดในการทดลอง และเราต้องมีการควบคุมปัจจัยโดยการนำสารชุบมาใส่ในภาชนะทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อปรับระดับของอุณหภูมิของสารชุบให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง

3.2.2 ระดับของปัจจัย

จากข้อมูลในบทที่ 2 รูปที่ 2.1 แผนภาพสมมูลเหล็ก – คาร์บอน จะเห็นว่าอุณหภูมิที่จะทำให้เหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนร้อยละ 0.38 - 0.43 มีเฟสเดียวกันคือ 800 – 1,394 องศาเซลเซียส ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้มาทำการทดลองกับเหล็ก AISI 4140 ที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนร้อยละ 0.38 จำนวน 3 ระดับอุณหภูมิ คือ 850 องศาเซลเซียส 950 องศาเซลเซียส และ 1,050 องศาเซลเซียส เพื่อทำการทดลองคือศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนร้อยละ 0.38 – 0.43 (มนัส สติรจินดา, 2537)

เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำให้เหล็กมีความร้อนเท่ากันทั้งก่อนต้องใช้เวลา 60 นาทีต่อความหนาของเหล็ก 1 นิ้ว ดังนั้น ในการกำหนดช่วงเวลาในการให้ความร้อนกับเหล็ก AISI 4140 ที่มีความหนา 1 นิ้ว จึงมีการกำหนดเวลาในการให้ความร้อนตั้งแต่ 60 นาที เป็นต้นไป โดยเลือกเวลา 3 ระดับ คือ การให้ความร้อนที่เวลา 60 นาที และเพิ่มระดับขึ้นไปอีก ครั้งละ 30 นาที เท่าๆ กัน เพราะต้องการทราบว่า เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เหล็กที่ผ่านการอบระดับเวลา 60 นาที มาแล้วนั้นค่าความแข็งจะเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด และปัจจัยด้านเวลาจะมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่ (มนัส สติรจินดา, 2537)

สรุปได้ว่า ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง ได้ออกแบบการทดลอง แบบ 2 ปัจจัย คือ

3.2.2.1 อุณหภูมิ ซึ่งมีระดับปัจจัย 3 ระดับ คือ 850 องศาเซลเซียส 950 องศาเซลเซียส และ 1,050 องศาเซลเซียส

3.2.2.2 เวลา ซึ่งมีระดับปัจจัย 3 ระดับ คือ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที

3.2.3 ขนาดการทดลอง

ในการทดสอบความแข็งตามหลัก ASTM E18-03 ขนาดความหนาชิ้นงานทดสอบจะต้องมีขนาด 10 เท่าของความลึกรอยกด ซึ่งการทดสอบความแข็งโลหะตามรีกเวลสเกล C นั้นจะมีรอยลึกไม่เกิน 1 มิลลิเมตร (มานพ ตันตระกูล, 2537) และยังทำให้การมัดลวดหรือการหยิบออกจากเตาเป็นได้อย่างสะดวก

การทดสอบความแข็งโลหะตามรีกเวลสเกล C ซึ่งใช้วัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยหวักดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรที่มียอดมุมเท่ากับ 120 องศา และกำหนดให้

3.2.3.1 ระยะห่างระหว่างรอยกด (วัดจากศูนย์กลางรอยกด) จะต้องมากกว่า 4 เท่าของรอยกด แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร (มานพ ตันตระกูล, 2537)

3.2.3.2 รอยกดที่อยู่ห่างจากขอบชิ้นงานควรจะต้องมีระยะห่างอย่างต่ำ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดแต่ไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร (มานพ ตันตระกูล, 2537)

3.3 การดำเนินการทดลอง

การทดลองจะมีการเตรียมข้อมูลและศึกษาวิธีและเทคนิคต่างๆ ที่จะทำให้การทดลองสำเร็จไปอย่างถูกต้อง โดยจะมีขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงานในการทดลอง เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีดำเนินการทดลอง มีดังนี้

3.3.1 อุปกรณ์ ในการทดลอง

3.3.1.1 เต้าเผา

3.3.1.2 น้ำเปล่าใส่ภาชนะ

3.3.1.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Testing : scale C

3.3.1.4 กระดาษทรายเบอร์ 160, 320, 400, 600 และ 800

3.3.1.5 ลวดนิโครม

3.3.1.6 คีมคีบชิ้นงาน

3.3.1.7 ถุงมือกันความร้อน

3.3.1.8 เครื่องขัดกระดาษทราย

3.3.1.9 ชิ้นงานทดสอบ

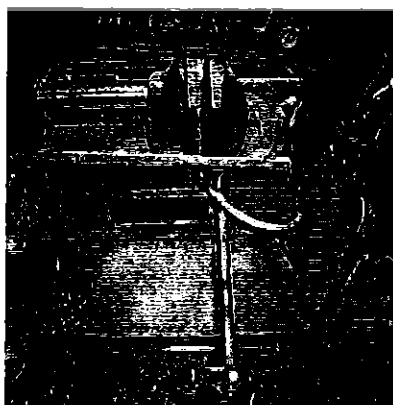
3.3.1.10 เลื่อยตัดเหล็กไฟฟ้า

3.3.1.11 เครื่องกลึง

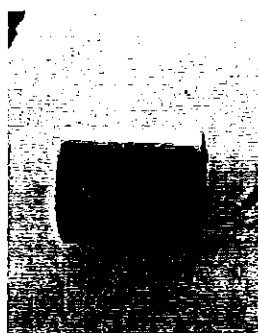
3.3.1.12 เครื่องปัด

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.3.2.1 นำเหล็ก AISI 4140 เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว ตัดด้วยเลื่อยตัดเหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 ให้ได้ขนาดความยาว 1 นิ้ว ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นนำเหล็กที่ได้มาทำการกลึงปาดหน้า แล้วลบมุมด้วยตะไบดังรูปที่ 3.4 จะได้ชิ้นงานสุดท้ายดังรูปที่ 3.5



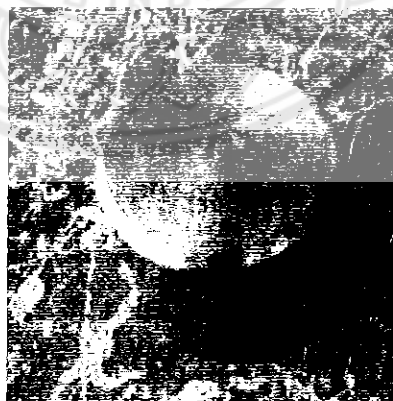
รูปที่ 3.2 การตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ผ่านการตัด

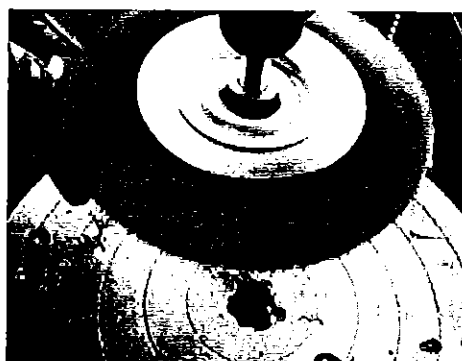


รูปที่ 3.4 การกลึงปาดหน้าและลบมุมชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปาดหน้าและลบมุม

3.3.2.2 นำชิ้นงานจากข้อที่ 3.3.2.1 มาทำการปัดตั้งรูปที่ 3.6 เพื่อจะทำให้การส่งผ่านความร้อนเป็นไปอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.6 การปิดชิ้นงาน

3.3.2.3 มัดลวดที่ตัวชิ้นงานเพื่อที่จะทำการจับชิ้นงานออกหลังการอบให้ความร้อนได้ โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การมัดชิ้นงาน

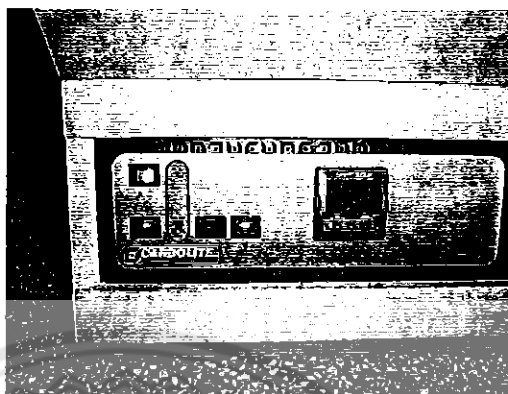
3.3.3 วิธีการทดลอง

3.3.3.1 นำชิ้นงานเหล็ก AISI 4140 จำนวน 3 ชิ้น ที่ได้จากข้อ 3.3.2 มาจัดเรียงเข้าเตาเผาโดยให้มีระยะห่างเท่าๆ กันในลักษณะสามเหลี่ยมเพราะจะทำให้ง่ายต่อการก๊อปปี้ได้ง่าย และรวดเร็วและลดการเสียหายที่จะเกิดกับเตาเผา ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเรียงชิ้นงาน

3.3.3.2 ทำการปิดเตาแล้วปรับอุณหภูมิ ตามระดับอุณหภูมิที่ได้ออกแบบกรทกลงไว้ตามตารางที่ 3.1 แล้วเริ่มจับเวลาทันทีจนครบตามเวลาที่กำหนด ดังรูปที่ 3.9



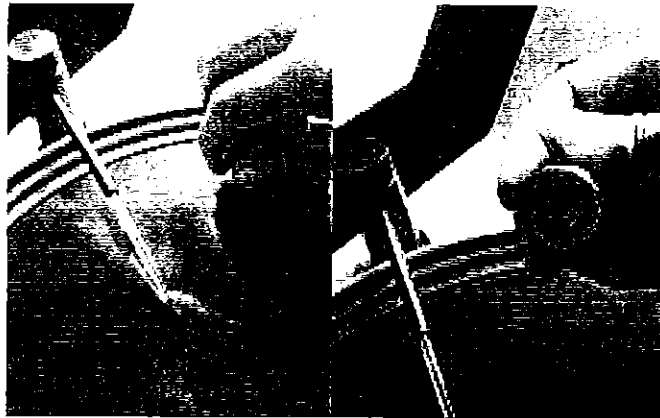
รูปที่ 3.9 เตาอบที่ทำการปรับค่าแล้ว

3.3.3.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการอบจากเตาเผาไปทำการชุบแข็งด้วยน้ำเปล่า ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ทำการชุบเสร็จ

3.3.3.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบในข้อที่ 3.3.3.3 ไปขัดด้วยกระดาษทรายให้ผิวชิ้นงานเรียบโดยไม่มีรอยค้างค่า ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การตัดชิ้นงานด้วยกระดากทราย

3.3.3.5 นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.3.3.4 มาทำการทดสอบค่าความแข็งโดยใช้หลักการตามข้อที่ 3.2.3 ดังรูปที่ 3.12 จะได้เหล็กที่ทดสอบความแข็งแล้ว ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การทดสอบค่าความแข็ง



รูปที่ 3.13 เหล็กที่ทดสอบความแข็งแล้ว

3.3.3.6 บันทึกผลการทดลองลงในตารางบันทึกผลการทดลอง ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการทดลอง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิในการอบ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็ง (HRC)				
		ค่าของ จุดที่ 1	ค่าของ จุดที่ 2	ค่าของ จุดที่ 3	ค่าของ จุดที่ 4	ค่าของ จุดที่ 5
60	850					
	950					
	1,050					
90	850					
	950					
	1,050					
120	850					
	950					
	1,050					

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 ตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล

เมื่อได้ทำการทดลองตามทีออกแบบไว้ก็จะได้ค่าความแข็งทั้งหมด 90 ค่า ซึ่งก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต้องทำการตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์ถึงคุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกันคือ

3.4.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟที่ได้ถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) จุดต่างๆจะเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดจะต้องไม่กระจุกเป็นกลุ่มๆ และความห่างระหว่างจุดแต่ละจุดจะต้องใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ ถ้าจุดต่างๆ ของข้อมูลมีการเรียงตัวตามลักษณะดังกล่าว แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นการกระจายแบบปกติ

3.4.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟของ ส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูล ถ้าค่าแต่ละจุดของส่วนตกค้างมีการกระจายอยู่รอบๆ เส้นศูนย์และส่วนตกค้าง (Residual) ขึ้นๆ ลงๆ รอบเส้นศูนย์อย่างไม่มีแบบแผนที่แน่นอน แสดงว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล

3.4.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ในการวิเคราะห์ผล เพื่อตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน โดยพิจารณาจากส่วนตกค้าง (Residual) อยู่ภายในแถบแนวนอนรอบๆ 0 และเป็นในลักษณะเป็นเส้นตรง จะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเสถียรของความแปรปรวน

3.4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษากราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 โดยเบื้องต้นจะดูแนวโน้มว่าทิศทางของความแข็งในลักษณะที่เป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

3.4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ว่าปัจจัยที่นำมาทำการทดลองนั้นมีผลต่อค่าความแข็งหรือไม่ เพื่อที่จะสรุปได้ตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ และเมื่อสรุปได้ว่าปัจจัยอุณหภูมิและเวลา มีผลต่อค่าความแข็งแล้ว นำข้อมูลชุดเดียวกันไปทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อไป

3.4.4 วิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อสร้างสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอุณหภูมิ โดยจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คือ ค่า R Square หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่า Std. Error of the Estimate หรือค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ โดยทุกพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือได้นั้น ค่า P-value จะต้องน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนด กล่าวคือ ตัวแปรต้นต้องมีผลกระทบกับตัวแปรตาม

3.4.5 เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองกับค่าความแข็งที่ได้จากการพยากรณ์จากสมการการถดถอย

ทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง กับค่าความแข็งที่ได้จากการพยากรณ์ ซึ่งมาจากค่าในสมการถดถอย ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่โดยใช้ค่าสถิติ t-test ซึ่งถ้าพบว่าค่าการทดลองและค่าจากการพยากรณ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แสดงว่าสามารถนำสมการถดถอยไปพยากรณ์ค่าความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้

3.5 สรุปผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาทำการสรุปผลเปรียบเทียบกับทฤษฎีในบทที่ 2 คือ ทฤษฎีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย และทฤษฎีวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของเหล็ก AISI 4140 จำนวนทั้งหมด 19 ชิ้นงานทดลอง ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 850 , 950 และ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 , 90 และ 120 นาที ได้ค่าความแข็ง แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองของการทดลองที่ 1

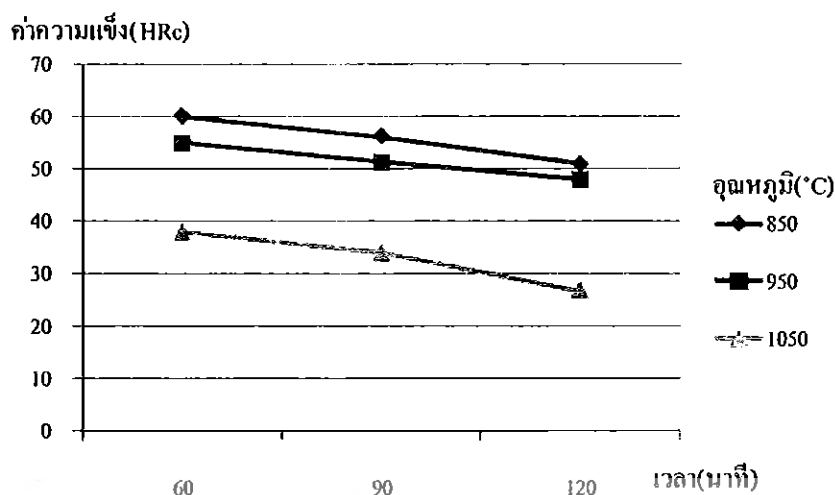
เวลา (นาที)	อุณหภูมิในการอบ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็ง (HRC)				
		ค่าของ จุดที่ 1	ค่าของจุด ที่ 2	ค่าของ จุดที่ 3	ค่าของ จุดที่ 4	ค่าของ จุดที่ 5
60	850	60.1	59.8	60.1	60.3	59.6
	950	54.7	55.2	54.5	55.1	54.9
	1,050	38.1	37.8	37.3	38.2	38.0
90	850	56.1	56.3	55.8	56.0	56.3
	950	51.2	50.7	51.3	51.8	50.7
	1,050	32.9	34	34.4	33.7	34.5
120	850	51.2	50.8	49.9	51.5	50.5
	950	47.5	47.8	48.0	48.1	47.7
	1,050	26.5	26.6	27.1	27.0	26.8

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองของการทดลองที่ 2

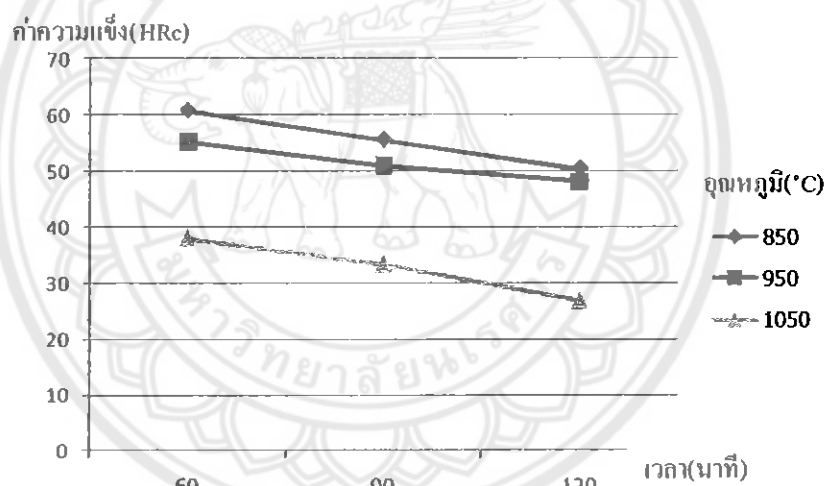
เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิในการอบ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็ง (HRC)				
		ค่าของ จุดที่ 1	ค่าของ จุดที่ 2	ค่าของ จุดที่ 3	ค่าของ จุดที่ 4	ค่าของ จุดที่ 5
60	850	60.5	60.1	61.3	60.8	60.9
	950	55.5	55.6	55.2	54.2	55.4
	1,050	38.1	38.3	38.0	37.8	37.3
90	850	55.3	55.1	55.8	55.4	56.3
	950	51.0	51.9	50.1	50.8	51.0
	1,050	33.8	32.5	32.9	34.0	33.9
120	850	50.0	50.0	51.2	50.5	50.4
	950	48.3	47.8	47.9	48.2	48.3
	1,050	27.1	26.8	27.2	27.0	26.8

4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา

ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 850, 950 และ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งแรงของการทดลองที่ 1 ที่ผ่านการการชุบแข็ง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งแรงของการทดลองที่ 2 ที่ผ่านการการชุบแข็ง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าแนวโน้มของกราฟมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในลักษณะแปรผกผัน คือ เมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงก็จะมีค่าลดลง ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงเหนือเส้น A_1 (850 องศาเซลเซียส) เฟอไรต์จะสลายไปจนตัวหมดคงเหลือแต่เฟส ออสเทนไนต์ซึ่งจะมีการขยายตัวของเกรนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง และการที่ปล่อยให้เหล็กอยู่ในเตาที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 เป็นเวลานาน จะทำให้เกรนออสเทนไนต์ขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง (มนัส สติรจินดา, 2537)

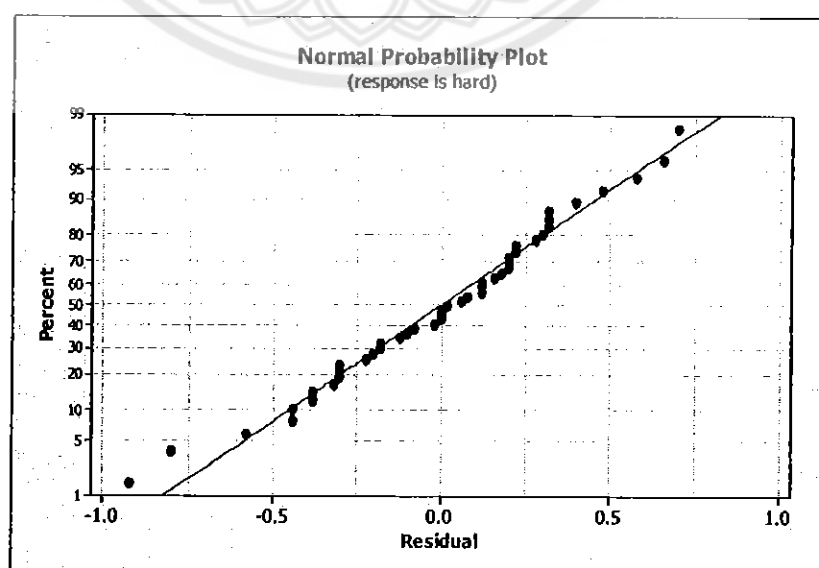
4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

4.3.1 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140

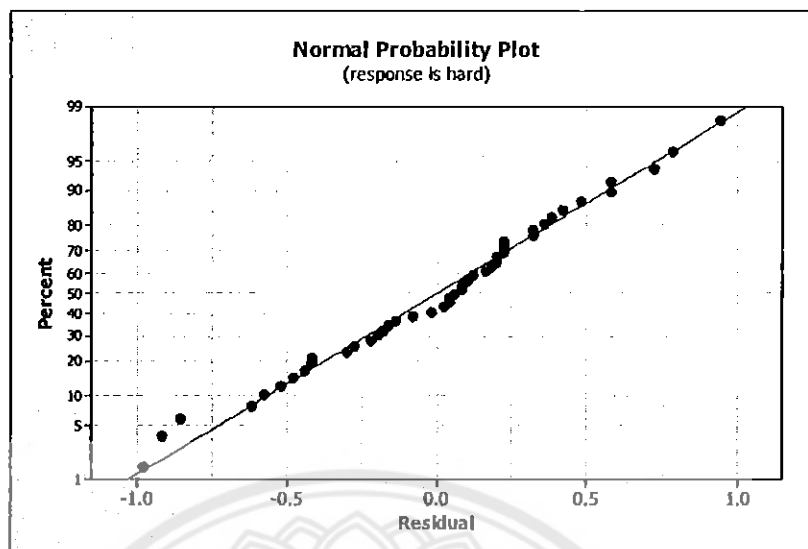
การนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่าได้ทำการเก็บมาจากสภาวะควบคุมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบทดลอง โดยวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ส่วนตกค้างจะเป็นตัวสะท้อนถึงความผันแปรของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยต้องพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความอิสระต่อกันอันเนื่องมาจากการสุ่มหรือไม่ ความเป็นอิสระของข้อมูลได้จากส่วนตกค้างของข้อมูล ถ้ามีรูปแบบการกระจายที่ไม่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน รวมถึงข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองจะต้องเป็นการกระจายแบบปกติ ลักษณะของการกระจายแบบปกติของข้อมูลจะดูจากส่วนตกค้าง เมื่อนำส่วนตกค้างมาทำการพล็อตลงบน Normal Probability Plot แล้วมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นการกระจายแบบปกติ (จิรรัตน์ ธีระวรา พฤกษ์, IE net work 2007)

4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

จากกราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าค่าตกค้าง (Residual) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทำการทดลอง ที่แสดงบน Normal Probability มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นการกระจายแบบปกติ (พงศ์ชนัน เหลืองไพฑูรย์, 2551)



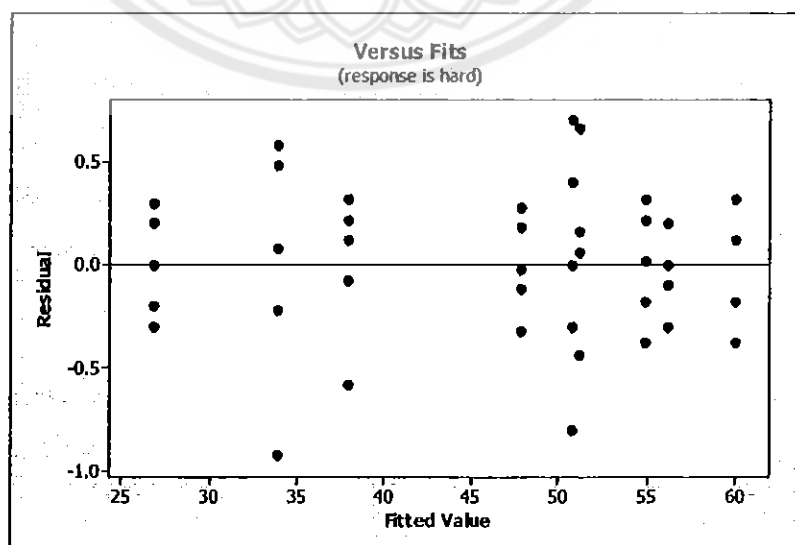
รูปที่ 4.3 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของการทดลองที่ 1



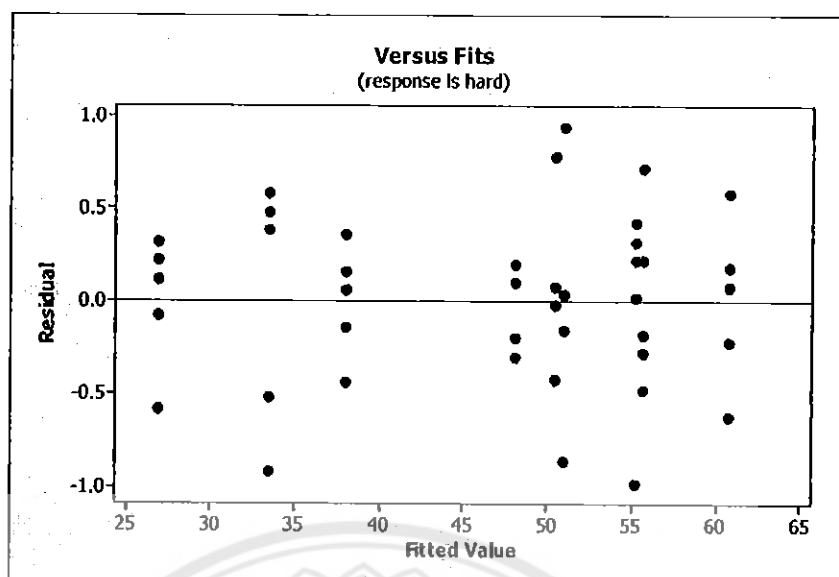
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของการทดลองที่ 2

4.3.1.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

จากกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการกระจายที่ไม่แน่นอน และเรียงตัวกันอยู่ภายในแถบแนวนอนรอบๆ 0 และเป็นในลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่พบว่ามีส่วนตกค้าง (Residual) มีแนวโน้มการกระจายรูปทรงอื่นๆ เช่น ในลักษณะลำโพง จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเสถียรของความแปรปรวน (พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)



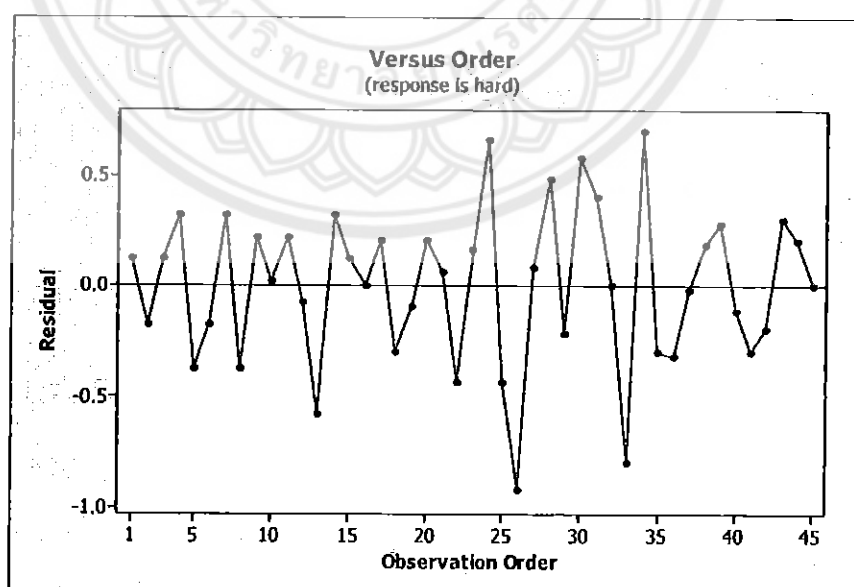
รูปที่ 4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของการทดลองที่ 1



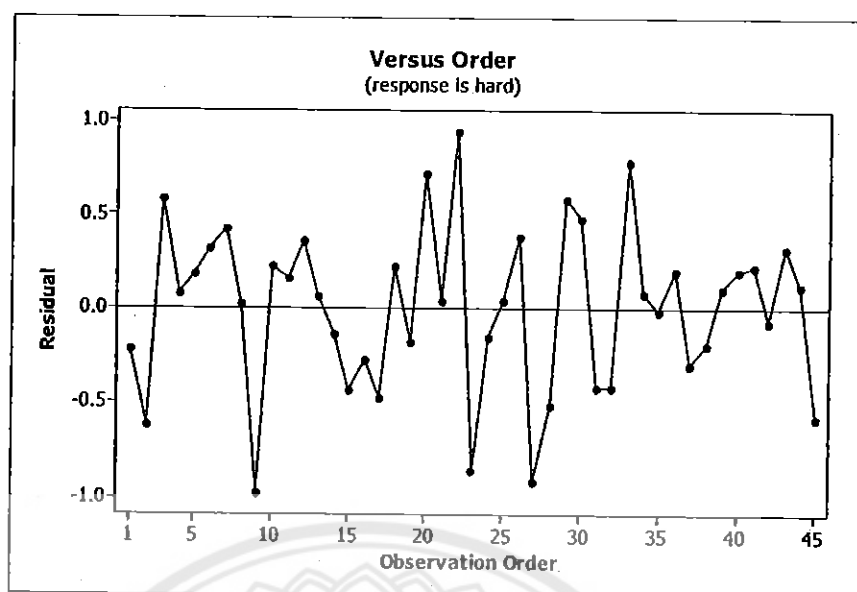
รูปที่ 4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของการทดลองที่ 2

4.3.1.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลการทดลอง มีการกระจายอยู่รอบๆ เส้นศูนย์และส่วนตกค้าง (Residual) มีลักษณะเรียงตัวขึ้นๆ ลงๆ รอบเส้น ศูนย์อย่างไม่มีแบบแผนที่แน่นอน แสดงว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล (วิรัช พานิชวงศ์, 2545)



รูปที่ 4.7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของการทดลองที่ 2

4.3.2 การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล

การทดสอบความแปรปรวนของปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาเพื่อหาข้อสรุปว่ามีผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบหรือไม่ โดยทำการพิจารณาจากค่านัยสำคัญ (p-value) จากการทดลองซึ่ง จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ถ้าค่านัยสำคัญจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha=0.05$) และจะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) ถ้าค่านัยสำคัญจากการทดลองมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของการทดลองที่ 1 ที่ผ่านการชุบแข็ง

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F	P-value
TEMP	4379.81	2	2189.90	14302.72	0.000
TIME	626.79	2	313.40	2046.85	0.000
TEMP * TIME	25.56	4	6.39	41.74	0.000
Error	5.51	36	0.15		
Total	5037.68	44			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่า

สมมติฐานคือ

1) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ เวลา มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

สมมติฐานรอง H_1 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่า เวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่อเวลาในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

สมมติฐานรอง H_1 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 3 คือ อุณหภูมิและเวลา มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

สมมติฐานรอง H_1 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของการทดลองที่ 2 ที่ผ่านการชุบแข็ง

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F	P-value
TEMP	4434.03	2	2217.02	9332.62	0.000
TIME	674.16	2	337.08	1418.94	0.000
TEMP * TIME	27.14	4	6.78	28.56	0.000
Error	8.55	36	0.24		
Total	5143.88	44			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 สรุปได้ว่า

สมมติฐานคือ

1) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ เวลา มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

สมมติฐานรอง H_1 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรง

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่า เวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ความแข็งแรงเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่อเวลาในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

สมมติฐานรอง H_1 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรง

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ต้องปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3) ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 3 คือ อุณหภูมิและเวลา มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือไม่

สมมติฐานหลัก H_0 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

สมมติฐานรอง H_1 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่านัยสำคัญจากการทดลอง (P-value) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ทำให้ต้องปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ซึ่งทำให้ความแข็งของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.3.3 การวิเคราะห์การถดถอย

4.3.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1

เมื่อนำค่าความแข็งวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าความแข็ง จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1

Predictor	Coef.	P - value
Constant	154.82	0.000
temp	-0.09955	0.000
time	-0.0014	0.009
temp*time	-0.0001583	0.005
Std. Error of the Estimate = 3.58196		
R-Sq = 89.6%		

จากตารางวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1 สรุปได้ว่า

ค่า R Square หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 89.6% เข้าใกล้ 100% แสดงว่าอุณหภูมิและเวลามีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง ดังนั้น สมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก

ค่า Std. Error of the Estimate หรือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ มีค่าเท่ากับ 3.58196 หมายความว่า ค่าของความแข็งจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 3.58196 HRc

จากการคำนวณค่าการถดถอยของตัวแปร อุณหภูมิกับเวลา ที่มีผลต่อความแข็ง จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงพหุที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{hardness} = 154.82 - 0.001 \text{ time} - 0.0996 \text{ temp} - 0.000158 \text{ time} * \text{temp}$$

โดยที่ hardness = ค่าความแข็ง (HRc)

temp = ค่าของอุณหภูมิ (°C) สำหรับช่วง 850 – 1,050 °C

time = ค่าของเวลา (นาที) สำหรับช่วง 60 – 120 นาที

4.3.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2

เมื่อนำค่าความแข็งวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าความแข็ง จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2

Predictor	Coef.	P - value
Constant	163.81	0.000
temp	-0.10843	0.000
time	-0.0978	0.012
temp*time	-0.0000633	0.010
Std. Error of the Estimate = 3.69971		
R-Sq = 89.1%		

จากตารางวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2 สรุปได้ว่า

ค่า R Square หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 89.1% เข้าใกล้ 100% แสดงว่าอุณหภูมิและเวลา มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง ดังนั้น สมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก

ค่า Std. Error of the Estimate หรือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ มีค่าเท่ากับ 3.69971 หมายความว่า ค่าของความแข็งจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 3.69971 HRc

จากการคำนวณค่าการถดถอยของตัวแปร อุณหภูมิกับเวลา ที่มีผลต่อความแข็ง จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงพหุที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{hardness} = 163.81 - 0.098 \text{ time} - 0.108 \text{ temp} - 0.000063 \text{ time} * \text{temp}$$

โดยที่

hardness = ค่าความแข็ง (HRc)

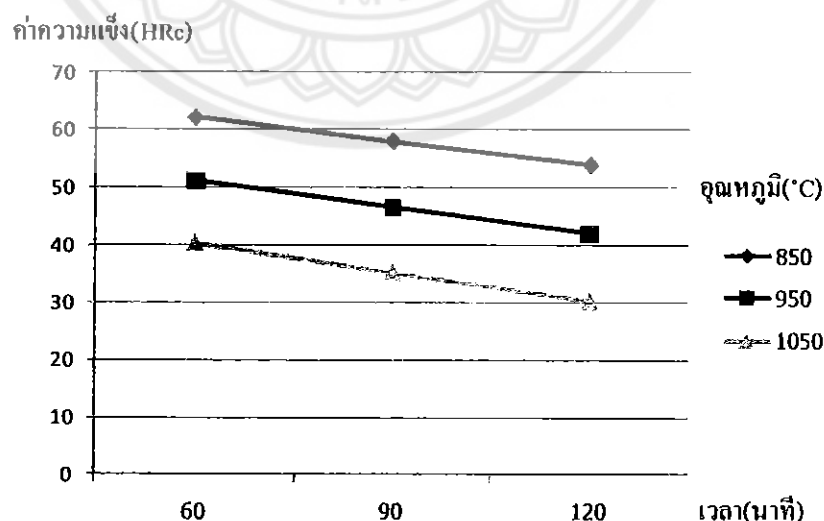
temp = ค่าของอุณหภูมิ (°C) สำหรับช่วง 850 – 1,050 °C

time = ค่าของเวลา (นาทีก) สำหรับช่วง 60 – 120 นาที

4.3.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองกับค่าความแข็งที่ได้จากการพยากรณ์จากสมการการถดถอย ของการทดลองที่ 1

เมื่อได้สมการถดถอยมาแล้ว ทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ใน การทดลอง เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความแข็งจากการทดลองแตกต่างกันหรือไม่กับค่าความแข็งพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) จะได้ค่าความแข็งพยากรณ์จำนวน 45 ค่า

จากสมการถดถอย สามารถนำค่าของความแข็งจากการพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 1

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงจากการทดลองและค่าความแข็งแรงจากการพยากรณ์ ด้วยวิธี t-test

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1) ตั้งสมมติฐาน

H_0 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงทั้ง 2 กลุ่มไม่แตกต่างกัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3) เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

$$\text{ตัวสถิติ : } t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N \sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}}$$

$$t = \frac{-8.545}{\sqrt{\frac{(45)(527.7) - 73.017^2}{45-1}}}$$

$$t = -0.368$$

4) สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(คำนวณ)} > t_{[0.05, 45]} \approx 1.679$

หรือ $t_{(คำนวณ)} < -t_{[0.05, 45]} \approx -1.679$ (ค่าได้จากตาราง t)

5) คำนวณค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง ค่า $t = -0.368$

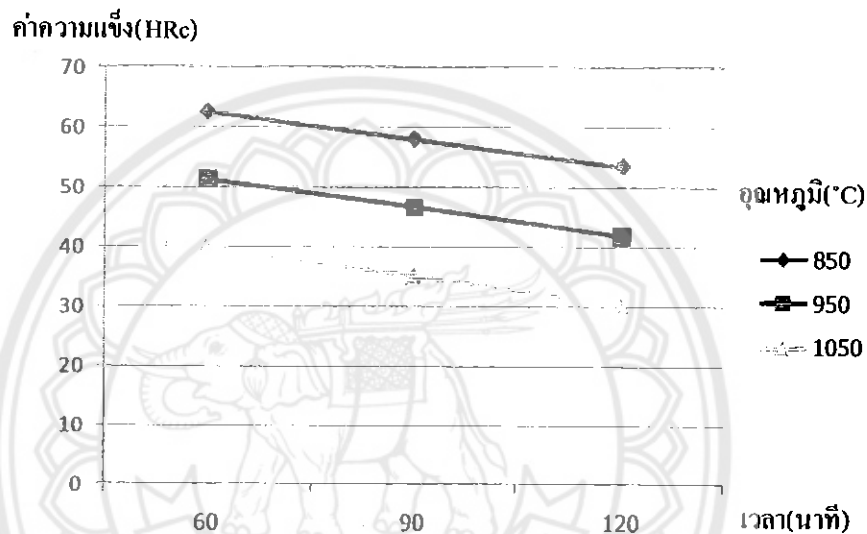
6) ตัดสินและตีความ $t_{(คำนวณ)}$ คือ $-0.368 > t_{(ตาราง)}$ คือ -1.679 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 ให้ผลว่า ค่าความแข็งแรงของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงจากการทดลองและค่าความแข็งแรงจากการพยากรณ์แล้ว จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากการพยากรณ์ซึ่งได้จากสมการถดถอยนั้น สอดคล้องกัน และสามารถนำสมการถดถอยนี้มาคำนวณหาค่าความแข็งแรงพยากรณ์ และนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าความแข็งแรงในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กได้อย่างถูกต้อง

4.3.5 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดลองกับค่าความแข็งแรงที่ได้จากการพยากรณ์จากสมการการถดถอยของการทดลองที่ 2

เมื่อได้สมการถดถอยมาแล้ว ทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ใน การทดลอง เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความแข็งแรงจากการทดลองแตกต่างกันหรือไม่กับค่าความแข็งแรง (คำนวณจากสมการถดถอย) จะได้ค่าความแข็งแรงพยากรณ์จำนวน 45 ค่า

จากสมการถดถอย สามารถนำค่าของความแข็งแรงจากการพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งของการทดลองที่ 2

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงจากการทดลองและค่าความแข็งแรงจากการพยากรณ์ ด้วยวิธี t-test

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1) ตั้งสมมติฐาน

H_0 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงทั้ง 2 กลุ่มเท่ากัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3) เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

$$\text{ตัวสถิติ : } t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N \sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}}$$

$$t = \frac{-9.145}{\sqrt{\frac{(45)(566) - 83.631}{45 - 1}}}$$

$$t = -0.381$$

4) สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(คำนวณ)} > t_{[0.05, 45]} \approx 1.679$
หรือ $t_{(คำนวณ)} < -t_{[0.05, 45]} \approx -1.679$ (ค่าได้จากตาราง t)

5) คำนวณค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง ค่า $t = -0.381$

6) ตัดสินและตีความ $t_{(คำนวณ)}$ คือ $-0.381 > t_{(ตาราง)}$ คือ -1.679 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 และ
ปฏิเสธ H_1 ให้ผลว่าค่าความแข็งแรงของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งแรงจากการทดลองและค่าความแข็งแรงจากการ
พยากรณ์แล้ว จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่ง
หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากการพยากรณ์ซึ่งได้จากสมการถดถอยนั้น
สอดคล้องกัน และสามารถนำสมการถดถอยนี้มาคำนวณหาค่าความแข็งแรงและนำไปใช้ในการ
การพยากรณ์ค่าความแข็งแรงในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กได้อย่างถูกต้อง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนที่มีต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งสรุปผลการศึกษาค้นคว้าได้ดังนี้

5.1.1 เมื่อนำเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 850, 950 และ 1,050 องศาเซลเซียส และที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที นำมาแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลากับค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 จะพบว่าลักษณะกราฟที่ได้มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง

5.1.2 นำข้อมูลค่าความแข็งจากการทดลองมาตรวจสอบเพื่อพิจารณาว่าข้อมูลชุดนี้มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำมาทำการวิเคราะห์เชิงสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ซึ่งผลจากการตรวจสอบให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ข้อมูลชุดนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.1.3 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยกำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 และกำหนดสมมติฐานรอง (H_1) คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนขึ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ผลการทดสอบได้ค่านัยสำคัญจากการทดลองเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก ยอมรับสมมติฐานรอง สรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบขึ้นงานเปลี่ยนไป จะทำให้ความแข็งของเหล็ก AISI 4140 เปลี่ยนไปด้วย

5.1.4 วิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้สมการถดถอย คือ $\text{hardness} = 154.82 - 0.001 \text{ time} - 0.0996 \text{ temp} - 0.000158 \text{ time} * \text{temp}$ มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 89.6% แสดงว่าอุณหภูมิและเวลามีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง ดังนั้น สมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก

5.1.5 เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองกับค่าความแข็งที่ได้จากการพยากรณ์จากสมการการถดถอย โดยทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ในการทดลองลงในสมการ แล้วนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์ด้วยวิธี t-test พบว่าค่าความแข็งทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ

0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้จากโครงการวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำไปใช้งานในการหาความแข็งของเหล็กในด้านอุตสาหกรรมการผลิต

5.1.6 การใช้งานของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง ต้องการเหล็กที่มีคุณสมบัติความแข็งและคุณสมบัติทนการเสียดทาน หลังจากการศึกษากราฟสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลากับค่าความแข็งของเหล็ก AISI 4140 พบว่าช่วงเวลาที่ 60 นาที และอุณหภูมิที่ 850 องศาเซลเซียส จะมีค่าความแข็งที่แข็งที่สุด และความแข็งจะลดลงเมื่อ เวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้การอบในช่วงเวลา 65 – 120 นาที และในช่วงอุณหภูมิ 860 – 1,050 องศาเซลเซียส จะเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานเกินความจำเป็น และไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อค่าความแข็งเพราะ การใช้งานเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง ต้องการเหล็กที่มีความแข็งสูงๆ โดยที่เหล็ก AISI 4140 ก่อนการชุบแข็ง มีค่าความแข็งอยู่ที่ 18 – 22 HRC และเมื่อผ่านการชุบแข็งแล้วจะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 55 – 60 HRC

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ให้ในงานวิจัยฉบับ คือ Mini tab 15 เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ที่มีข้อดี คือ ผลลัพธ์ของ โปรแกรมที่ได้มีลักษณะที่แบ่งสัดส่วนชัดเจนเลือกค่าสถิติมาใช้ได้สะดวก และใช้งานง่าย

5.2.2 ศึกษาเหล็กเกรด S45C, AISI 1045 เพิ่มเติม เพราะเหล็กเกรดเหล่านี้มีคุณสมบัติด้านความแข็งที่สูงและต่างเป็นเหล็กที่นิยมขายในท้องตลาดทั่วไป

5.2.3 งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึง การนำไปใช้งานด้านความแข็งของเหล็ก แต่ถ้าจะมีการนำชิ้นงานไปใช้ในงานที่ต้องการความเหนียวของหรือความทนแรงกระแทกของเหล็ก ก็ต้องมีการทดสอบคุณสมบัติ ด้านความเหนียวและการทนแรงกระแทกก่อน เพื่อให้ทราบว่าคุณสมบัติของเหล็กเหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] William D. Callister, Jr. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- [2] การทดสอบความแข็งแรงแบบร็อคเวล. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม 2552 จาก
http://www.geocities.com/chalong_sri/reg1.htm
- [3] ขวลิศ เชียงภูณ.(2542).โลหะวิทยา. (พิมพ์ครั้งที่ 2).กรุงเทพฯ: บริษัท ส. เอเชียเพรส จำกัด.
- [4] พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2546). เอกสารคำสอนการออกแบบการทดลอง. ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [5] พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด
- [6] แผนภูมิสมมูลเหล็ก-คาร์บอน. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2552 จาก
<http://www.rmutphysics.com/.../metalswu/Picture2-3->
- [7] มานพ ตันตระกูล. (2537). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: บริษัท ประชาชน จำกัด.
- [8] มนัส สติระจินดา. (2537). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] วิรัช พานิชวงค์. (2545). การวิเคราะห์การถดถอย. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำรา เรียบ สดามันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [10] เหล็ก AISI 4140. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2552 จาก
http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_steels