



ปัจจัยในการชุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็ก  
เพลลาฟ้า และเพลลาดง หลังการอบชุบในน้ำ น้ำมัน และอากาศ

THE EFFECT OF HARDENING FACTOR ON MICROSTRUCTURE  
AND HARDNESS IN WATER, OIL AND AIR  
QUENCHED AISI 4140 AND AISI 1045

นายเสริมศักดิ์ พลคร รหัส 49362345  
นายปิยพงษ์ กังเส็ง รหัส 49364684

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
ได้รับ..... 10.00.45
ลงทะเบียน.....
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัยอานเรศวร

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอานเรศวร

ปีการศึกษา 2552

15881274

น.ร.

๘๙๙๖

๒๕๕๒



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ     ปัจจัยในการขลุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็ก  
เพลลาฟ้า และเพลลาดง หลังการอบขลุบในน้ำ น้ำมัน และอากาศ

ผู้ดำเนินโครงการ     นายเสริมศักดิ์    พลคร                         รหัส 49362345  
   นายปิยพงษ์      กังเส็ง                         รหัส 49364684

ที่ปรึกษาโครงการ     อาจารย์ชลุสิทรัพย์ ปาไร่

สาขาวิชา                 วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา                    วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา               2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์ชลุสิทรัพย์ ปาไร่)

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์นพวรรณ โม่ทอง)

.....กรรมการ  
(อาจารย์กฤษณา พุฒสวัสดิ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมพันธ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ปัจจัยในการชุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็ก เพลาท้า และเพลาดง หลังการอบชุบในน้ำ น้ำมัน และอากาศ	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายเสริมศักดิ์ พลคร	รหัส 49362345
	นายปิยพงษ์ กังเส็ง	รหัส 49364684
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชูลีพรีย์ ปาไร่	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2552	

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยโครงสร้าง และความแข็งของเหล็ก AISI 1045 และ AISI 4140 ภายหลังจากการชุบแข็งและอบคืนตัว โดยทำการชุบแข็งที่ใช้ตัวกลางในการทำให้เย็นตัวต่างกันซึ่งตัวกลางที่ทำการศึกษามี 3 ชนิด คือน้ำ น้ำมัน และอากาศ แล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) แล้วนำมาทดสอบความแข็งแบบ Rockwell โดยพบว่าหลังจากการชุบแข็งโดยใช้ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดทำให้มีโครงสร้าง และค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หลังจากทำการชุบแข็งได้นำชิ้นงานมาทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยการอบคืนตัวของทั้ง 3 อุณหภูมิใช้เวลาในการอบคืนตัว 3 ระยะเวลาคือที่ระยะเวลา 60, 90 และ 120 นาที แล้วนำโครงสร้าง และค่าความแข็งที่ได้ภายหลังจากการอบคืนตัวมาเปรียบเทียบกับลักษณะของโครงสร้างที่ได้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีโครงสร้างที่ละเอียดขึ้น และมีค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งเพียงขั้นตอนเดียว โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีความละเอียดของโครงสร้างมากกว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส และความแข็งมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่อบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาที่อบคืนตัวนั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อโครงสร้าง และค่าความแข็งของชิ้นงานคือมีลักษณะโครงสร้าง และค่าความแข็งใกล้เคียงกันแม้ว่าระยะเวลาจะเพิ่มขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในตัวกลางที่ต่างกัน คือน้ำ น้ำมัน และอากาศ และที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก อาจารย์ชวลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ในการให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยม และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์นพวรรณ ไม้ทอง อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ และอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันส์มฤทธิ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างรัชชัย ชุลบุตร และครูช่างรณกฤต แสงผ่อง ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำโครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกต้องอีกด้วย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้คณะผู้จัดทำเป็นคนดีของสังคม

ขอขอบพระคุณเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงการนี้ จะสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้กำเนิด และทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ดำเนินโครงการ

นายเสริมศักดิ์ พลคร

นายปิยพงษ์ กังเส็ง

เมษายน 2554

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 หลักการ และเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	4
<b>บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....</b>	<b>5</b>
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	7
2.2 อิทธิพลของธาตุในเหล็กกล้า.....	8
2.3 การอบชุบ.....	8
2.4 โครงสร้างจุลภาค.....	13
2.5 การทดสอบความแข็ง.....	18
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ.....</b>	<b>24</b>
3.1 ศึกษาโครงการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	24
3.2 เตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาด และจำนวนที่ต้องการ.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 นำชิ้นงานไปอบชุบแข็ง.....	24
3.4 นำชิ้นงานไปอบคืนตัว.....	25
3.4 นำชิ้นงานไปอบคืนตัว.....	26
3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	26
3.6 การทดสอบความแข็ง.....	27
3.7 นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD).....	27
3.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลที่ได้.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....	28
4.1 ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็ง.....	28
4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง.....	29
4.3 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว.....	40
บทที่ 5 บทสรุป.....	110
5.1 บทสรุป.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
5.3 ปัญหา และแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	112
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 4140.....	2
1.2 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 1045.....	3
1.3 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	4
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045.....	6
2.2 การเปรียบเทียบการแบ่งตามปริมาณคาร์บอน และแบ่งตามแผนภูมิสมมูล เหล็ก และคาร์บอนของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045.....	6
2.3 การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกด และโลหะที่ต้องการทดสอบ.....	21
3.1 การชุบแข็งชิ้นงาน.....	24
3.2 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 4145.....	25
3.3 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 1045 .....	26
4.1 ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็ก AISI 4140 และเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งโดยผ่าน ตัวกลางที่ต่างกัน.....	39
4.2 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	50
4.3 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน .....	51
4.4 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	61
4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	62
4.6 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	73
4.7 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	74
4.8 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที .....	85
4.9 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที.....	86
4.10 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 90 นาที.....	96

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 90 นาที.....	97
4.12 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 120 นาที.....	107
4.13 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 120 นาที .....	108





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็ก-ไฮโปยูเทคตอยด์ ไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ และเหล็กยูเทคตอยด์.....	7
2.2	โครงสร้างจุลภาค เฟอร์ไรต์.....	14
2.3	โครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์.....	14
2.4	โครงสร้างจุลภาคเฟิร์ลไลต์ .....	15
2.5	โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์.....	16
2.6	โครงสร้างจุลภาคซอร์ไบท์.....	17
2.7	โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ หรือทรูสไตต์.....	18
2.8	เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล .....	19
2.9	ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ.....	20
2.10	ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ.....	22
2.11	ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะ.....	22
4.1	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบแข็งด้วยกล้อง จุลทรรศน์แสง.....	28
4.2	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบแข็งด้วยกล้อง จุลทรรศน์แสง.....	29
4.3	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างต่างกัน .....	31
4.4	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างต่างกัน.....	32
4.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	33
4.6	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำ.....	34
4.7	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำมัน.....	35
4.8	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในอากาศ.....	35
4.9	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส .....	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำ.....37
4.11	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำมัน.....38
4.12	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในอากาศ.....38
4.13	ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็ก AISI 4140 และเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งโดยผ่านตัวกลางที่ต่างกัน.....40
4.14	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส.....41
4.15	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส.....43
4.16	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส .....44
4.17	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส..... 45
4.18	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส .....48
4.19	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส .....49
4.20	ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....50
4.21	ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....51
4.22	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 54
4.23	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 55
4.24	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 56
4.25	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 58
4.26	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 59
4.27	โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส..... 60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	62
4.29 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	63
4.30 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส .....	65
4.31 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส .....	66
4.32 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส .....	68
4.33 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส .....	69
4.34 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส.....	70
4.35 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส.....	72
4.36 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน.....	74
4.37 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน .....	75
4.38 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที.....	78
4.39 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที.....	79
4.40 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที .....	80
4.41 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที .....	81
4.42 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที.....	83
4.43 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 60 นาที.....	84
4.44 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	85
4.45 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	86
4.46 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที .....	88
4.47 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที .....	89

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที .....	90
4.49 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที .....	93
4.50 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที.....	94
4.51 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที.....	95
4.52 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	96
4.53 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน .....	97
4.54 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที.....	99
4.55 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที.....	100
4.56 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที.....	101
4.57 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมันแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที .....	104
4.58 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที.....	105
4.59 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบอากาศแล้วอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที.....	106
4.60 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	107
4.61 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวอย่างที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	108

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการ และเหตุผล

ปัจจุบันมีการใช้เหล็กกล้าชนิด AISI 4140 และ AISI 1045 เป็นอย่างมากในเชิงงานทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ เหล็กโครงสร้างในงานก่อสร้างทุกชนิด เหล็กในงานเชื่อมโลหะ อุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ที่ใช้ในการเกษตร เป็นต้น เหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิด เป็นเหล็กกล้าประเภทไฮโปยูเทคตอยด์ โดยเหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กต่ำ คือตั้งแต่ร้อยละ 0.001 – 0.83 มีสมบัติอ่อนเหนียว มีความแข็งน้อยมาก โครงสร้างภายในเนื้อโลหะ มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์

การชุบแข็งเป็นการอบชุบด้วยความร้อน กระทำเพื่อให้เหล็กมีความแข็งด้านทานต่อการสึกหรอ การที่เหล็กกล้ามีความแข็ง จะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น การชุบแข็งจะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ โดยปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเย็นตัว ส่วนผสมของเหล็ก เป็นต้น

การชุบแข็งเป็นเพียงกระบวนการหนึ่งที่น่ามาช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่เหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 ได้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของธาตุซิลิกอน โครเมียม โมลิบดีนัม และอัตราการเย็นตัว ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งเมื่อทำการอบชุบแข็ง เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการชุบแข็งของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม กับเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ไม่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม เป็นองค์ประกอบภายหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบชุบแข็งในตัวอย่างน้ำ น้ำมัน อากาศ และการอบคืนตัว

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ความแข็ง และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ภายหลังจากชุบแข็งในตัวอย่างที่ต่างกัน คือในน้ำ น้ำมัน และอากาศ

## 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ผลการเปรียบเทียบความแข็ง และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม กับเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ไม่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม เป็นองค์ประกอบหลังการชุบแข็ง

1.4.2 ผลการเปรียบเทียบความแข็ง และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ภายหลังจากชุบแข็งในตัวกลางที่ต่างกัน คือในน้ำ น้ำมัน และอากาศ

1.4.3 ผลการเปรียบเทียบความแข็ง และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ภายหลังจากอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

## 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 ชิ้นงานที่นำมาศึกษา คือ AISI 4140 และ AISI 1045

1.5.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้อง Optical Microscopes

1.5.3 ทดสอบความแข็งโดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test) สเกล C

1.5.4 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 4140

ตารางที่ 1.1 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 4140

ผ่านการชุบน้ำ (ชิ้น)	ผ่านการชุบน้ำมัน (ชิ้น)	ผ่านการชุบใน อากาศ (ชิ้น)	อุณหภูมิ การอบคืนตัว (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	1	1	400	60
1	1	1	400	90
1	1	1	400	120
1	1	1	500	60
1	1	1	500	90
1	1	1	500	120
1	1	1	600	60
1	1	1	600	90
1	1	1	600	120

### 1.5.5 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 1045

**ตารางที่ 1.2** การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 1045

ผ่านการชุบในน้ำ (ชิ้น)	ผ่านการชุบใน น้ำมัน (ชิ้น)	ผ่านการชุบใน อากาศ (ชิ้น)	อุณหภูมิ การอบคืนตัว (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	1	1	400	60
1	1	1	400	90
1	1	1	400	120
1	1	1	500	60
1	1	1	500	90
1	1	1	500	120
1	1	1	600	60
1	1	1	600	90
1	1	1	600	120

### 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

- 1.6.1 สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.2 ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.3 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.4 ศูนย์ปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

### 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

มิถุนายน 2552 – เมษายน 2554

## 1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ตารางที่ 1.3 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	↔						
2	นำชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 มาทำการชุบแข็งในตัวกลางต่างๆ กัน คือในน้ำ ในน้ำมัน และในอากาศ		↔					
3	นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาค และนำไปทดสอบ ความแข็ง และตรวจสอบชนิดเฟสด้วย เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์				↔			
4	นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในตัวกลาง ต่างกันมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส และในระยะเวลา 60, 90 และ 120 นาที					↔		
5	ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความ แข็งแบบร็อกเวล						↔	
6	วิจารณ์ผลการทดลอง						↔	
7	สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน							↔



## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎี

#### 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอน คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณธาตุผสมอื่นๆ อยู่ในปริมาณน้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) จำกัดปริมาณธาตุผสมไว้ดังนี้ แมงกานีสไม่เกินร้อยละ 1.65 ซิลิคอนไม่เกินร้อยละ 0.6 ทองแดงไม่เกินร้อยละ 0.60 และปริมาณของฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันจะต้องไม่เกินร้อยละ 0.05 ถือได้ว่า เฉพาะธาตุคาร์บอนเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของเหล็กกล้าชนิดนี้ ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้ นอกจากคาร์บอนแล้วจะมี ซิลิคอน โครเมียม โมลิบดีนัม ส่วนกำมะถัน และฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารมลทินสามารถแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามปริมาณของคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กได้ 3 ชนิด ดังนี้ คือ

##### 2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

มีคาร์บอนน้อยไม่เกินร้อยละ 0.2 เป็นเหล็กที่อ่อนมีความแข็งแรงต่ำ สามารถรีด หรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ที่ทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง หรือรีดเป็นแผ่นใช้ในงานวิศวกรรมทั่วไป โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ กระจังรถจักรยาน สังกะสีมุงหลังคา เครื่องใช้ในครัวเรือน และในสำนักงาน บางที่เรียกเหล็กชนิดนี้ว่าเหล็กกล้าละมุน (Mild steel)

##### 2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.2-0.5 มีความแข็งแรง และมีความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่าสามารถนำไปชุบแข็ง ได้เหมาะกับการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไขควง เป็นต้น

##### 2.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 0.5 ขึ้นไป มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งแล้วจะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ ใช้ในการทำเครื่องมือ สปริงแหนบ ลูกปืน เป็นต้น

แต่ถ้าจะแบ่งตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก – คาร์บอน ดังรูปที่ 2.1 จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือเหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเทคตอยด์ และเหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮเปอร์ยูเทคตอยด์

### 2.1.4 เหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypoeutectoid)

คือเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กต่ำ คือตั้งแต่ร้อยละ 0.001 – 0.83 มีสมบัติอ่อนเหนียว มีความแข็งแรงน้อยมากโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ คือเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ ในเชิงงานทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ เหล็กโครงสร้างในงานก่อสร้างทุกชนิด เหล็กในงานเชื่อมโลหะ เป็นต้น

### 2.1.5 เหล็กกล้าคาร์บอนประเภทไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (Hypereutectoid)

คือเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.83-2.0 คาร์บอน และมีโครงสร้างภายในเนื้อเหล็ก คือเฟิร์ลไลต์ และซีเมนไทต์ มีสมบัติแข็ง เหมาะที่จะใช้งานทางด้านเครื่องมือต่างๆ เช่น ใช้ทำสากต์ ไขเลื่อย ดอกสว่าน เป็นต้น (มนัส, 2543)

สำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ เหล็กกล้าชนิด AISI 4140 และ AISI 1045 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045

ชนิด	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.04	0.15-0.30	0.80-1.10	0.15-0.25
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	-	-	-

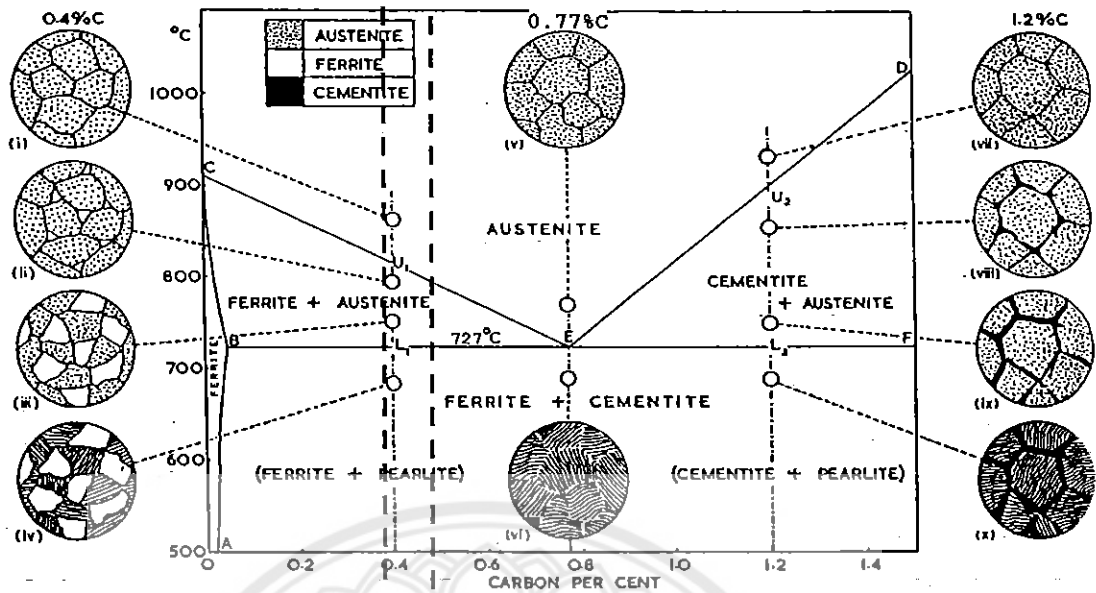
ที่มา : Cheng Wuet et al. (2542)

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณส่วนผสมของคาร์บอนในเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองนั้น สามารถแบ่งประเภทตามปริมาณคาร์บอน และแบ่งตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก และคาร์บอน ได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบการแบ่งตามปริมาณคาร์บอน และแบ่งตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก และคาร์บอนของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045

ชนิด	แบ่งตามปริมาณคาร์บอน	แบ่งตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก และคาร์บอน
4140	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	ไฮโปยูเทคตอยด์
1045	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	ไฮโปยูเทคตอยด์

ที่มา : Cheng Wuet et al. (2542)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็ก-ไฮโปยูเทคตอยด์ ไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ และเหล็กยูเทคตอยด์

ก) เหล็ก AISI 4140

ข) เหล็ก AISI 1045

ที่มา : มนัส (2533)

จากรูปที่ 2.1 เส้นการเย็นตัวที่ ก) และ ข) แสดงถึงเส้นการเย็นตัวของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ตามลำดับ

ก) เหล็กกล้าชนิด AISI 4104 ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนในโครงสร้างประมาณร้อยละ 0.38 - 0.43

ข) เหล็กกล้าชนิด AISI 1045 ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนในโครงสร้างประมาณร้อยละ 0.43 - 0.50

### 2.2 อิทธิพลของธาตุในเหล็กกล้า

การเติมธาตุต่างๆ ในเหล็กกล้าเพื่อจะปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น เพื่อลดการเสียดสีของตัวชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน เพื่อลดการกัดกร่อนของชิ้นงานในสภาวะต่างๆ เพื่อเพิ่มความเหนียวของชิ้นงาน การที่เติมธาตุในเหล็กกล้านั้นเพื่อเพิ่มสมบัติตามที่ต้องการ ในที่นี้จะศึกษาอิทธิพลของธาตุโครเมียม ซิลิกอน และโมลิบดีนัมที่เติมลงไปในเหล็กกล้า (มหิตธานุภาพ, 2548)

### 2.2.1 โครเมียม (Chromium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้นจึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้ดีขึ้น

### 2.2.2 ซิลิคอน (Silicon)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si จะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ซึ่ง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรง และทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

### 2.2.3 โมลิบดีนัม (Molybdenum)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo ปกติจะใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่นๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้ออบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้นจึงปรับปรุงสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

## 2.3 การอบชุบ

การอบชุบเหล็กด้วยความร้อน คือกระบวนการให้ความร้อน และลดความร้อนแก่เหล็กเพื่อเปลี่ยนแปลง และปรับปรุงสมบัติของเหล็กนั้นให้เหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน เช่น ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เหนียวขึ้น ต้านทานต่อการสึกหรอ แข็งขึ้น ต้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น บางครั้งการอบชุบเหล็กด้วยความร้อน จะทำให้เหล็กนั้นอ่อนลงเพื่อง่ายต่อการตบแต่งไสกลึง การอบชุบเหล็กด้วยความร้อนจึงเป็นกรรมวิธีที่มีความสำคัญกรรมวิธีหนึ่ง และใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมโลหะ และเนื่องจากเหล็กกล้าเป็นโลหะที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมโลหะ ซึ่งใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักร เครื่องยนต์ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ (มันส์, 2533)

และสำหรับการอบชุบที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ คือการชุบแข็ง และการอบคืนตัว ดังนั้นจะศึกษากระบวนการชุบแข็ง และกระบวนการอบคืนตัว

### 2.3.1 การชุบแข็ง (Hardening)

คือการอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะที่ใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาเทนไซต์ หรือ เบนไนท์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนท์ไปเป็นมาเทนไซต์ หรือเบนไนท์ ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการ คือ

- ปริมาณของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาเทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำ เหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 0.3 ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่นๆ เช่น นิเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัมจะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาเทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังตัวอย่าง เช่น เหล็กคาร์บอนร้อยละ 0.35 สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 HRC ตรงกันข้ามเหล็กคาร์บอนร้อยละ 0.02 และโครเมียมร้อยละ 10 ได้รับความแข็งภายหลังการชุบแข็ง 35 HRC

- อุณหภูมิก่อนการชุบ คืออุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ ก่อนการชุบน้ำ หรือน้ำมันอุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอ จนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์หมด เราจะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือ น้ำต่างความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมาเทนไซต์ที่ได้จะต้องมาจากออสเทนไนท์เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียส ไม่เหมือนอย่าง เช่น เฟอร์ไรต์ หรือซีเมนต์ไคต์

- อัตราการเย็นตัว เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ที่โครงสร้างจากออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาเทนไซต์ หรือเบนไนท์ จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏคำว่า อัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเทนไนท์จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ หรือเบนไนท์ แต่จะได้เฟอไรต์ หรือซอร์ไบรแทน

### 2.3.2 การอบปกติ (Normalizing)

คือการเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของเหล็กกล้า นั้นประมาณ 30 – 50 องศาเซลเซียส และให้คงที่อุณหภูมินี้ไว้ระยะหนึ่ง แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การอบปกติจะเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียว และความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้า ทำให้เกรนสม่ำเสมอ และมีขนาดละเอียดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความเค้นตกค้างภายในด้วย

### 2.3.3 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาเทนไซต์ และออสเทนไนท์ เหลือค้าง (Residual Austenite) เหล็กคาร์บอนสูงจะมี Proeutectoid Cementite กระจุกกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง สมบัติของเหล็กที่ได้ตามลักษณะที่กล่าวมาจะมี ความแข็งแรงสูง แต่จะขาดสมบัติทางด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impact Strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะใช้งาน ได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลาย ความเครียดภายในให้หมดไป หรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้มาเทนไซต์ แตกตัว ให้โครงสร้างกึ่งสมดุล คือเทมเปอร์มาเทนไซต์ ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อสมบัติของเหล็ก ดังเช่น ความแข็งแรงจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัว และ เวลาที่ใช้การอบคืนตัว เป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น  $A_1$  ภายหลังจากเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้วปล่อยให้เย็นช้าๆ ภายในเตา การเปลี่ยนแปลงของมาเทนไซต์ และ ออสเทนไนท์ เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก (80 - 200 องศาเซลเซียส) โครงสร้างมาเทนไซต์ จะแตกตัวให้ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo Cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ร้อยละ 0.25 คาร์ไบต์ชนิด เอพซิลอน (Carbide) มีสูตร  $Fe_2C$  หรือ  $Fe_2C_4$  และมีคาร์บอนประมาณ ร้อยละ 8.2 ทั้งคาร์ไบต์ และเฟอร์ไรต์ (คาร์บอนร้อยละ 0.25) จะตกผลึกชนิดละเอียด และกระจุก กระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วง อุณหภูมินี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง (200 -280 องศาเซลเซียส) โครงสร้างออสเทนไนท์ ที่ไม่สามารถ เปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ ได้ทันในขณะชุบแข็ง (Retained Austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (คาร์บอนร้อยละ 0.025) และซีเมนต์ไต์ ( $Fe_3C$ ) มีความละเอียด และกระจุกกระจายโครงสร้าง ที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับ Gainite ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม (300 - 500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดย (Pseudocubic) จะแตกตัวให้เฟอร์ไรต์ (Cubic) ที่มีคาร์บอนร้อยละ 0.025 และซีเมนต์ไต์ ส่วน คาร์ไบต์ 120 จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไต์ ( $Fe_3C$ ) โครงสร้างที่จะได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียด และ กระจุกกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจนถึง  $A_1$ ) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะ ปรับตัวเข้ากับสภาพสมดุล และมีการขยายตัวเองเฟอร์ไรต์ และซีเมนต์ไต์โตขึ้น ความแข็งแรงจะลดลง มาก โดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรต์ไดซ์ซึ่ง (Incomplete annealing)

จากการทดลองอบคืนตัวเหล็กยูเต็คตอยด์ (คาร์บอนร้อยละ 0.8) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ปรากฏได้ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งแรงภายหลังการชุบแข็ง (64 HRC) อดคืนตัวอุณหภูมิช่วงแรก 1 ชั่วโมง ได้ความแข็งแรง 60 – 64 HRC ช่วงที่สองได้ความแข็งแรง 40 – 60 HRC ช่วงที่สามความแข็งแรง 20 – 40 HRC และช่วงที่สี่เหลือความแข็งแรง 5 – 10 HRC ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบคืนตัว ออกเป็น 3 ช่วง คือ

2.3.3.1 การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ (150 - 250 องศาเซลเซียส) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายใน และปรับปรุงสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามจะรักษาระดับความแข็งแรงไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งแรงที่ได้ภายหลังการชุบแข็งเวลาที่ใช้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

2.3.3.2 การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง (350 - 450 องศาเซลเซียส) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูง และมีสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูง ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำหมอบสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์ หรือทรูสไตต์

2.3.3.3 การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง (500 – 650 องศาเซลเซียส) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และเพื่อให้เหล็กมีสมบัติทางด้านความเหนียวสูง โดยมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูงด้วยโครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟิร์ลไรต์ ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างซอร์ไบท์

### 2.3.4 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

ในที่นี้ จะกล่าวถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบแข็งเหล็กออกเป็น 2 กรณี คือ

2.3.4.1 เหล็กไฮโปยูเต็คตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น  $Ac_3$  คือสูงกว่าเส้นประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ และอยู่ในช่วง  $Ac_1$ - $Ac_3$  จะปรากฏมีเฟอไรต์เหลืออยู่บางส่วนถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ แต่เฟอไรต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคงสภาพอยู่อย่างเดิม เหล็กภายหลังการชุบจะไม่ได้ความแข็งแรงสูงเท่าที่ควร และบริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟอไรต์จะเป็นบริเวณที่อ่อนขาดสมบัติทางด้านทานต่อการเสียดสีในกรณีถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น  $Ac_3$  ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างของออสเทนไนท์ที่มีเกรนโตภายหลังจากการชุบน้ำ จะได้โครงสร้างมาเทนไซด์ที่หยาบ (Coarse martensite) ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่ง ชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกง่าย

2.3.4.2 เหล็กไฮเปอร์ยูเต็คตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น  $Ac_1$  คือจะสูงกว่าเส้นประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส เท่านั้นจะเห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปรยูเต็คตอยด์ ซีเมนต์ไวด์เหลืออยู่บางส่วนเท่านั้นที่กลายหรือสลายตัวไปเป็นออสเทนไนท์ และซีเมนต์ไวด์ ที่เหลืออยู่นี้จะกระจายอยู่ทั่วไปอยู่ในโครงสร้างของออสเทนไนท์ เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของมาเทนไซด์ โดยมีโปรยูเต็คตอยด์ซีเมนต์ไวด์แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผลดีในส่วนที่

เหล็กจะมีความแข็งแรงสูง และทนทานการเสียดสีในขณะที่ใช้งานได้ดี ทั้งนี้เพราะโปรยูเทคคอยด์ซีเมนต์-โตนต์มีความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 700-800 HB ซึ่งแข็งกว่ามาเทนไซต์ (650-700 HB) ประเด็นที่สำคัญคือจะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิดโปรยูเทคคอยด์ซีเมนต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือเส้น Ac จะไม่เกิดผลดี นอกจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นแล้ว ออสเทนไนต์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมาก จะทำให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ได้เพราะจะได้มาเทนไซต์ เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดี และยังสามารถเกิดการบิดงอ และแตกร้าวได้โดยง่าย

### 2.3.5 ตัวกลางสำหรับการชุบแข็ง

ตัวกลางที่ใช้สำหรับการชุบแข็งที่ดีโดยหลักเกณฑ์ทั่วไป จะต้องให้อัตราการเย็นตัวสูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ออสเทนไนต์แตกตัวไปเป็นเฟิร์ลไลต์ หรือโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่มาเทนไซต์ (Intermediate Structure) และที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือควรให้อัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาเทนไซต์ ซึ่งจะเป็นช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200 – 400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในชิ้นเหล็กมากนัก มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการบิดงอ หรือแตกร้าวขึ้นได้ ตัวกลางสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำ น้ำเกลือ น้ำด่าง น้ำมัน เกลือละลาย และอากาศ สำหรับตัวกลางที่จะศึกษาในการทดลองนี้ คือการเย็นตัวในน้ำ ในน้ำมัน และในอากาศ

- น้ำ เมื่อพิจารณาสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของน้ำ โดยการทดลองวัดอัตราการเย็นตัวของลูกบอลทำด้วยโลหะเงินเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ชุบในของเหลวหลายชนิดทำการวัดอัตราการเย็นตัวผลที่ได้ปรากฏว่า น้ำให้อัตราการเย็นตัวค่อนข้างต่ำในตอนต้น แต่จะให้ค่าอัตราการเย็นตัวที่สูงมาก ในช่วงที่อุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส นี่เป็นลักษณะที่ไม่ดีเพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ และจะขยายตัวเล็กน้อย จะทำให้เกิดความเครียดได้มาก อันจะเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอ และแตกร้าวง่าย ยิ่งเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูง การชุบแข็งโดยการชุบน้ำจะทำได้ น้ำเป็นสารชุบที่หาได้ง่าย และสะดวกสบายที่สุดในบรรดาสารชุบต่างๆ อัตราการเย็นตัวของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นเกือบถึงจุดเดือดของน้ำถึงร้อยละ 10 เนื่องจากไอน้ำไปปกคลุมผิวหน้าของน้ำทำให้ยากแก่การระบายความร้อน

- น้ำมัน จัดว่าเป็นของเหลวที่มีสมบัติการถ่ายเทความร้อนต่ำ ให้อัตราการเย็นตัวสูงประมาณ 200 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งไม่สูงพอสำหรับการชุบเพื่อให้ได้มาเทนไซต์ สำหรับเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กคาร์บอนต่ำยังเป็นงานชิ้นโต จะมีโอกาสได้โครงสร้างมาเทนไซต์จะเป็นไปได้ยาก น้ำมันจึงเหมาะสำหรับการชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนผสมของออสเทนไนต์ที่มีเสถียรภาพสูง และมีอัตราการเย็นตัววิกฤตช้ากว่าเกณฑ์ปกติ น้ำมันมีข้อดีอยู่ตรงที่อัตราการเย็นตัวสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดความเครียดภายในมากนัก การที่จะเพิ่มสมบัติการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมันสามารถทำได้โดยการ



เผาให้ร้อนประมาณ 50 – 80 องศาเซลเซียส น้ำมันจะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นน้ำมันที่ใช้สำหรับการชุบแข็งจะต้องเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม (Mineral oil) และมีจุดติดไฟที่สูงประมาณ 160 - 170 องศาเซลเซียส น้ำมันเป็นสารชุบที่มีสมบัติป้องกันการบิดตัวของชิ้นงานในขณะที่ชุบดีกว่า สารชุบอื่นๆ ทั้งยังลดแรงเครียดต่างๆ ภายในชิ้นงานได้ดีอีกด้วย และยังป้องกันการแตกหักของชิ้นงานชุบได้ดีกว่าสารอื่น น้ำมันพืช และน้ำมันสัตว์ ก็สามารถใช้เป็นสารชุบได้ดีกว่าสารอื่นหากแต่ว่ามันมีกลิ่นเหม็น และยังจับตัวกันเป็นยางเหนียวๆ เมื่อได้รับความร้อนดังนั้น ทั่วไปใช้น้ำมันจากธรรมชาติเป็นดีที่สุด นอกจากนั้นราคาแพง และหาง่ายอีกด้วย

- การเย็นตัวในอากาศ (Normalizing) คือการเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของเหล็กกล้า นั้นประมาณ 30 – 50 องศาเซลเซียส และให้คงที่อุณหภูมินี้ไว้ระยะหนึ่ง แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การอบปกติจะเพิ่มความเหนียว และความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้า ทำให้เกรนสม่ำเสมอ มีขนาดละเอียดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความเค้นตกค้างภายในด้วย

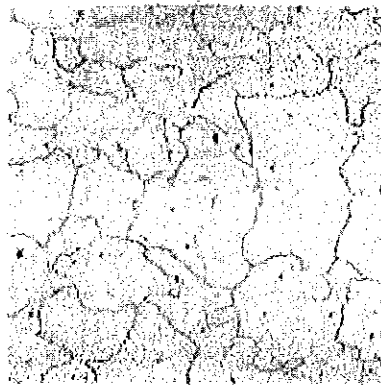
โลหะภายหลังการชุบแข็งแล้ว มักจะมีความแข็งสูง แต่จะเปราะแตกหักได้ง่ายในขณะใช้งาน เพื่อเป็นการแก้ไขข้อเสียนี้ จำเป็นต้องนำมาเผาที่อุณหภูมิต่ำเป็นการคืนสู่สภาพเดิม แต่จะไม่กระทำจนกลับคืนสภาพเดิมทั้งหมด จะคืนตัวเพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้โลหะภายหลังอบคืนตัว มีความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น เหล็กภายหลังชุบแข็งแล้วจะได้มาเทนไซด์ แต่เมื่ออบคืนตัว ความแข็งของมาเทนไซด์ จะลดลง และจะคืนตัวบางส่วนขึ้นอยู่กับเวลา และอุณหภูมิที่อบคืนตัว ทำให้ได้โครงสร้างใหม่ที่มีความเหนียว และความแข็งปานกลาง

## 2.4 โครงสร้างจุลภาค

เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กเป็นไปได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จึงกล่าวถึงเฉพาะโครงสร้างจุลภาคที่เกี่ยวข้องกับเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 และโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นหลังจากเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 ไปทำการอบชุบแข็งแล้วปล่อยให้เย็นตัวในตุ๊กกลาง ทั้ง 3 ชนิด คือ เย็นตัวในน้ำ ในน้ำมัน และในอากาศ

### 2.4.1 เฟอร์ไรต์

เฟอร์ไรต์ คือสารละลายในสภาพของของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิธรรมดาถึงประมาณ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กมากที่สุดที่ร้อยละ 0.025 บางครั้ง เฟอร์ไรต์ว่าเหล็ก ( $\alpha$  - iron ) เฟอร์ไรต์เป็นชื่อที่มาจากภาษาละตินซึ่งจะเรียกว่า เฟอร์รัม (ferrum) แปลว่า เหล็กโครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็กค่อนข้างบริสุทธิ์มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.05 มีการวางตัวอะตอมแบบ BCC (Body Centered Cubic) เป็นสารแม่เหล็ก มีสมบัติต่างๆ ไป คืออ่อน เหนียว และไม่แข็ง



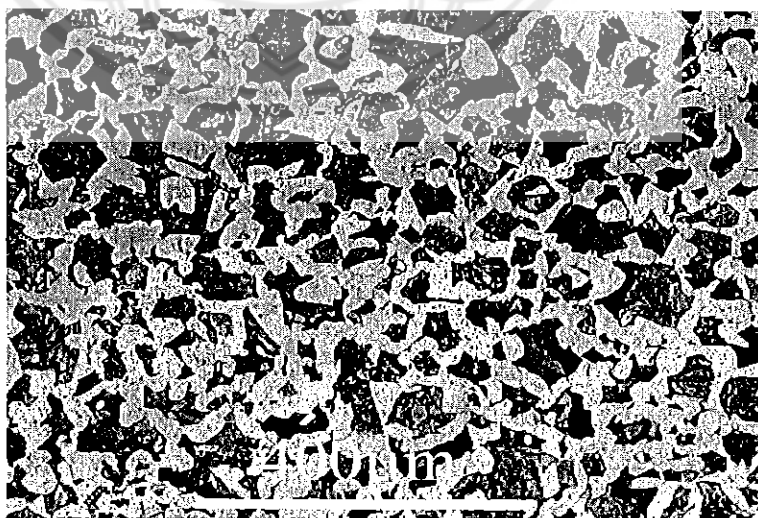
Microstructure of Ferrite

## รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาค เฟอไรต์

ที่มา : K P Shah (2551)

## 2.4.2 เฟอไรต์ และเฟิร์ลไลต์

เฟอไรต์ และเฟิร์ลไลต์ คือเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยทั่วไป และมีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่าร้อยละ 0.10 และมีโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอไรต์ และเฟิร์ลไลต์ โครงสร้างเฟิร์ลไลต์มีอยู่ 2 เฟส เกิดขึ้นสลับกัน คือเฟอไรต์กับซีเมนไทต์เมื่อส่องดูจากกล้องจุลทรรศน์หลังจากการกัดกรดแล้ว กรดจะกัดผิวหน้าของเฟิร์ลไลต์ให้มองเห็นโครงสร้างจุลภาคเป็นชั้นๆ ผืนสีดำ ถ้าเพิ่มปริมาณคาร์บอนทำให้มีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันจะยึดตัว และทนแรงกระแทกได้น้อยลง เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 0.03 จะเหมาะกับการใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โดยการผ่านการชุบแข็ง และการอบคลายก่อนนำไปใช้งาน ส่วนเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนน้อยกว่าร้อยละ 0.30 จะชุบแข็งได้ยาก โครงสร้างเฟอไรต์ที่เป็นพื้นสีขาวๆ และโครงสร้างของเฟิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำได้อย่างชัดเจน



## รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคเฟอไรต์ และเฟิร์ลไลต์

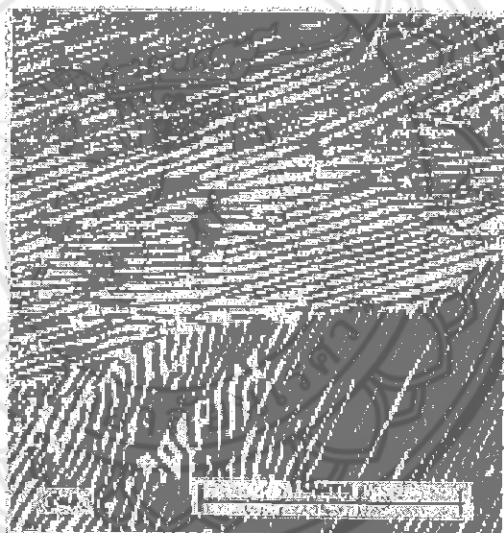
ที่มา : Harry (2540)

### 2.4.3 เพิร์ลไลต์

เพิร์ลไลต์ คือโครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนยูเต็คตอยด์ ซึ่งเกิดการรวมตัวสลับ 2 เฟส คือเฟอร์ไรต์กับซีเมนไทต์โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนอยู่มากถึงร้อยละ 0.80 คาร์บอนจะเป็นโครงสร้างของเพิร์ลไลต์มากที่สุดทั้งก่อน เพราะผลจากการเกิดปฏิกิริยาของยูเต็คตอยด์ที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส ซึ่งมีเฟอร์ไรต์ร้อยละ 0.02 ผสมกับซีเมนไทต์ร้อยละ 6.67

เพิร์ลไลต์มาจากคำว่า (Pearl) ซึ่งแปลว่า ไข่มุก เนื่องจากเมื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 400 เท่า จะมองเห็นรูปร่าง และมีแนวคล้ายไข่มุก ลักษณะที่พบมาก คือเป็นแนวแถบยาวๆ บางๆ เป็นกลุ่มก้อนสีดำ

ถ้าส่วนผสมคาร์บอนเป็นเหล็กกล้ายูเต็คตอยด์ นำมาให้ความร้อนในเตาอบสูงกว่าเส้น  $A_1$  ก็ได้โครงสร้างออสเทนไนต์แล้วทำให้เย็นอย่างช้าๆ ในเตา ออสเทนไนต์ก็จะกลายเป็นเพิร์ลไลต์ทั้งหมดลักษณะเป็นมันวาวคล้ายไข่มุก ในการกัดกรดพบว่าเพิร์ลไลต์จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ซึ่งบริเวณนั้นจะมองเห็นเป็นชั้นๆ สีดำ และมีเฟอร์ไรต์เป็นสีขาวๆ เป็นแถบกว้าง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์

ที่มา : S Paul and R Paul (2542)

### 2.4.4 มาเทนไซด์

มาเทนไซด์ คือโครงสร้างจุลภาคซึ่งไม่มีในแผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน และได้จากการนำเอาชิ้นงานที่ได้จะเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเต็คตอยด์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์กับเพิร์ลไลต์มาอบเผาแช่ไว้ในอุณหภูมิสูงเกินเส้น  $A_1$  ถึงเส้น  $A_3$  และบวกเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 30–50 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในเนื้อโลหะก็จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์นำเอาออกมาจากเตา แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ น้ำมัน ที่นิยมกันมาก คือการจุ่มลงในน้ำ โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ ได้ตามที่ต้องการ และต้องนำไปทำการอบคลายเทมเปอร์เพื่อลดความเปราะในการนำไปใช้ก่อนที่จะทำ

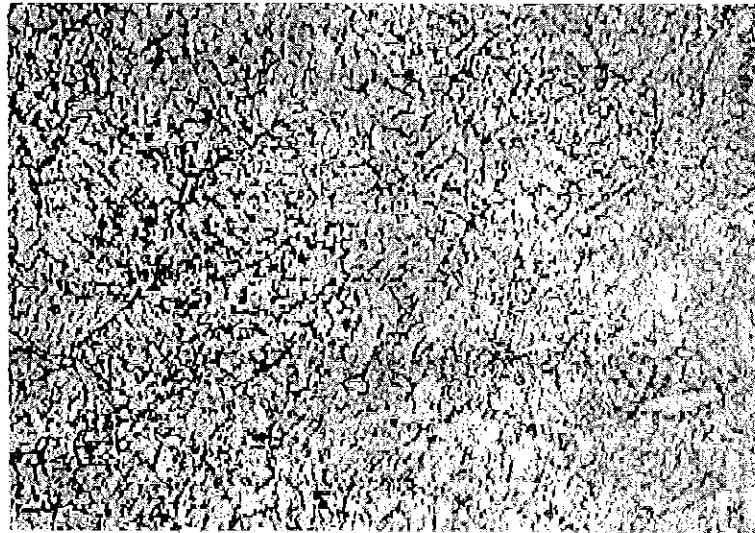
เทมเปอร์มาเทนไซด์นี้ เหมาะกับงานที่ทำงานอะไหล่ที่ต้องการให้ทนต่อการเสียดสี และทนต่อการสึกหรอได้ดี



รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคมาเทนไซด์  
ที่มา : S Paul and R Paul (2542)

#### 2.4.5 ซอร์ไบท์ (Sorbite)

ซอร์ไบท์ คือโครงสร้างที่เกิดจากออสเทนไนต์แตกตัวให้เฟอร์ไรต์ และซีเมนไตต์ เช่นเดียวกับเฟิร์สไลต์ โดยการให้กำเนิดนิวเคลียสของซีเมนไตต์ขึ้นมาก่อนบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอนที่บริเวณรอบๆ เข้ามารวมตัวเพื่อขยายตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นบริเวณที่มีอะตอมคาร์บอนต่ำ และกลายเป็นจุดที่เกิดเฟอร์ไรต์ ขึ้นมาทั้งสองด้าน และเมื่อเกิดกราฟิต์ขึ้นแล้ว จะเกิดมีการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไป ทำให้เกิดสภาพพร้อมที่จะเกิดซีเมนไตต์ขึ้นได้ทั้ง ในบริเวณข้างเคียง จะสลับกันไปดังนี้ แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงการเคลื่อนไหวของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก แลบของเฟอร์ไรต์กับซีเมนไตต์จะเกิดได้เล็กน้อยจนเราไม่สามารถดูได้จากกล้องไมโครสโคปธรรมดา ถ้าจะศึกษาโครงสร้างได้จะต้องอาศัยกล้องไมโครสโคปอิเล็กตรอน ซึ่งมีกำลังขยายได้สูงมาก สมบัติของซอร์ไบท์ จะมีความแข็งประมาณ  $350 H_b$  เมื่อเทียบกับเฟิร์สไลต์มีความแข็งประมาณ  $180 H_b$

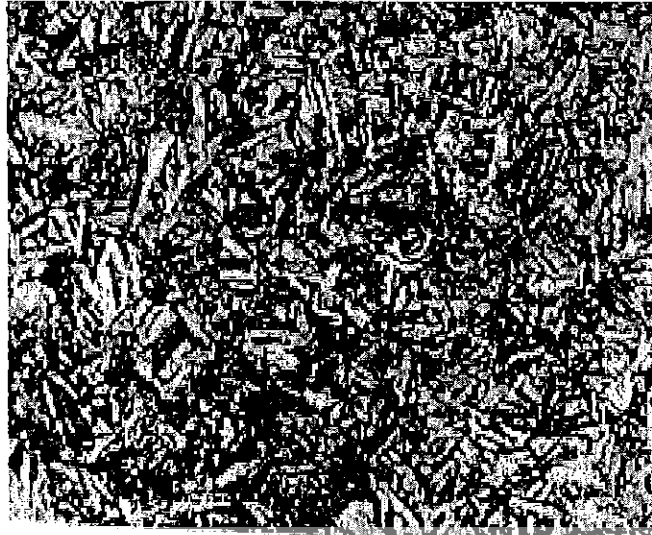


รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคซอร์ไบต์

ที่มา : Kevin al. (2550)

#### 2.4.6 เบนไนท์ หรือ ทรูสไตต์ (Bainite or Troostite)

เป็นโครงสร้างที่ได้จากออสเทนไนท์แตกตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าซอร์ไบต์ การเกิดยังคงมีกลไกคล้ายคลึงกัน คือมีการให้กำเนิดนิวเคลียส และมีการขยายตัวของเบนไนท์ จะให้กำเนิดเฟอไรต์ก่อน โดยมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางเกรนออสเทนไนท์ เมื่อเฟอไรต์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนออกไปทางด้านข้าง ทำให้เกิดบริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นอยู่ตามบริเวณข้างของเฟอไรต์ และเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงจนถึงประมาณร้อยละ 6.67 ก็จะเกิดเป็นแถบบางๆ ของซีเมนไตต์เกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง และเมื่อเฟอไรต์ขยายตัวมากขึ้นก็จะไปเกิดซีเมนไตต์บริเวณที่ห่างออกไปเป็นระยะๆ การเกิดลักษณะเช่นนี้จะเกิดได้ทั้งตามบริเวณรอบๆ เกรน และเกิดทั่วไปหมด เรียกโครงสร้างนี้ว่า เบนไนท์ ตามชื่อของ E.C. Bain (อเมริกัน) แต่อาจจะเกิดได้เป็นแห่งๆ และเป็นกลุ่ม ๆ แทรกอยู่กับโครงสร้างมาเทนไซต์ จะเรียกโครงสร้างนี้ว่าทรูสไตต์ตามชื่อของ Troost (ฝรั่งเศส) หนังสือบางเล่มจะเรียกรวมไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างเบนไนท์หรือทรูสไตต์ จะใช้เรียกเพียงอย่างเดียวว่า ทรูสไตต์ สมบัติความแข็งของเบนไนท์ และทรูสไตต์ จะมีความแข็งอยู่ระหว่าง 400 - 450 H<sub>b</sub> ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวจะสูงมากหรือน้อย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ หรือ ทรูสไตต์

ที่มา : S Paul and R Paul (2542)

## 2.5 การทดสอบความแข็ง

เป็นการวัดการต่อต้านของโลหะที่จะต้องเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นใช้วิธีกดวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็ง ทังสเตนคาไบด์ เพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปต่างๆ กัน เช่น ทำเป็นรูปกลม พีระมิด โคน หรือกรวย เมื่อมีแรงกดตัวกด (Indenter) ลงไปในวัสดุที่ทดสอบเป็นมุม 90 องศา ลงไปอย่างช้าๆ แล้ววัดรอยวัดที่เกิดขึ้น โดยการเลือกหัวกดนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างหัวกด และน้ำหนักที่ใช้ ความแข็งของโลหะจะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุนั้น (ชวลิต, 2547)

การวัดหาความแข็งเป็นการทดสอบที่ง่าย และผู้ทดสอบไม่ต้องมีความชำนาญมากนักเพราะเครื่องที่ใช้ทดสอบความแข็งจะช่วยให้ได้มาก และจะทราบผลได้อย่างรวดเร็ว

การตรวจสอบความแข็งมีหลายวิธี เช่น

- การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)
- การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)
- การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test)
- การทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore Scleroscope Hardness Test)

แต่ในที่นี้จะขอกล่าวโดยละเอียดเฉพาะการทดสอบแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)



รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล  
ที่มา : ขวลิขิต (2547)

การทดสอบแบบร็อกเวล นี้วัดได้จากความลึกที่ปรากฏบนผิวทดสอบ อันเกิดจากการกดของหัวกด (Indenter) มาตรฐาน และวัดความแข็งของชิ้นงานได้หลายสเกล เช่น สเกล A, B, C, D, E, F, G, H, K และ L เป็นต้น แต่มีการวัดบางสเกลเท่านั้นที่นิยมใช้ ซึ่งสเกลเหล่านั้น คือสเกล C และสเกล B

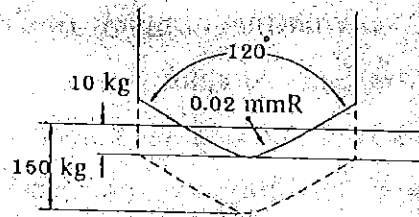
- การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล C (HRC) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยการใช้หัวกดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรมีมุมยอดเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส

- การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล B (HRB) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าทั่วไปโดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 และ 1/2 นิ้ว

สำหรับแรงกดที่ใช้ในการกดหัวนั้นจะประกอบด้วยแรง 2 แรง คือแรงกดนำ (Minor Load) และแรงกดตาม (Major Load)

แรงกดนำ หมายถึงแรงที่ใช้กดให้หัวกดสัมผัสผิวทดสอบ แรงกดนำนี้จะมีขนาดไม่มากนัก โดยจะมีขนาดผิวเพียง 10 กิโลกรัม เท่านั้น

แต่สำหรับแรงกดตามนั้น หมายถึงแรงที่ใช้ในการกดหัวกดเพื่อให้เกิดรอยกดบนผิวทดสอบจะมีขนาดเท่ากับ 140 กิโลกรัม ขนาดของแรงกดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 2.9 ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ

ที่มา : ขวลิขิต (2547)

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีขั้นตอนการปฏิบัติที่ไม่ซับซ้อนสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย ดังนี้

- วางชิ้นงานลงบนแป้นทดสอบ กดหัวลูกบอลลงบนผิวทดสอบด้วยแรงกดนำ 10 กิโลกรัม จากนั้นตั้งนาฬิกาที่เครื่องไปที่เลขศูนย์
- ตั้งแรงกดตามชนิดของโลหะที่ทำการทดสอบ โดยการดูจากตารางแรงกดแล้วลบด้วยแรงกดนำ ซึ่งแรงกดเพิ่มนี้จะทำให้หัวลูกบอลกดบนชิ้นงานทดสอบ
- นำแรงกดเพิ่มออกทำให้เหลือแรงกดนำแต่เพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นเข็มนาฬิกาจะถอยกลับ และหยุด เราจึงอ่านค่าความแข็งที่ตำแหน่งเข็มนาฬิกานั้นหยุดอยู่ ซึ่งอ่านได้อ่านค่าดังนี้ เช่น 40 HRC หมายถึงความแข็งแบบร็อกเวล 40 ด้วยสเกล C และ 85 HRB หมายถึง ความแข็งแบบ ร็อกเวล 85 ด้วย สเกล B

การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีหลักการทดสอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- ควรตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยแท่งทดสอบ (Test Block) ทุกครั้งก่อนทำงาน
- ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรทำความสะอาด และขนานกันสองด้าน
- รอยกดบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- ควรวัดค่าความแข็งอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความแข็งที่ถูกต้อง
- ค่าความแข็งที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลยจึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของรอยกดบนผิวทดสอบ



ตารางที่ 2.3 การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกด และโลหะที่ต้องการทดสอบ

สเกล	แรงกดตาม	ชนิดของหัวกด	ชนิดของวัสดุที่ต้องการทดสอบ
A	60	หัวเพชร	โลหะคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ และวัสดุที่มีความแข็งสูง
B	100	1/16" ลูกบอล	เหล็กกล้าคาร์บอน ทองเหลือง และวัสดุที่มีความแข็งปานกลาง
C	150	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง และโลหะผสมที่ผ่านการชุบแข็ง
D	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิว
E	100	1/8" ลูกบอล	เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม และแมกนีเซียมผสม
F	60	1/16" ลูกบอล	ทองเหลือง และทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน
G	150	1/16" ลูกบอล	เบริลเลียมผสมทองแดง บรอนซ์
H	60	1/8" ลูกบอล	อะลูมิเนียมแผ่น
K	150	1/8" ลูกบอล	เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม
L	60	1/4" ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อนอื่น ๆ
M	100	1/4" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
P	150	1/4" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
R	60	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
S	100	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
V	150	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L

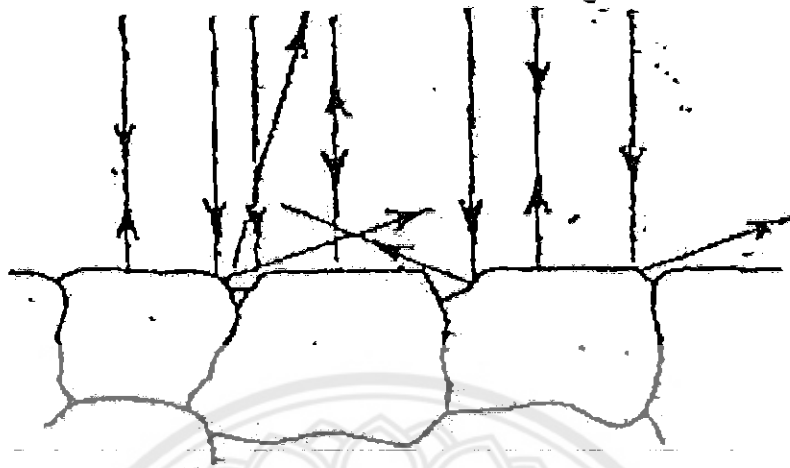
ที่มา : สนิท (2527)

## 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

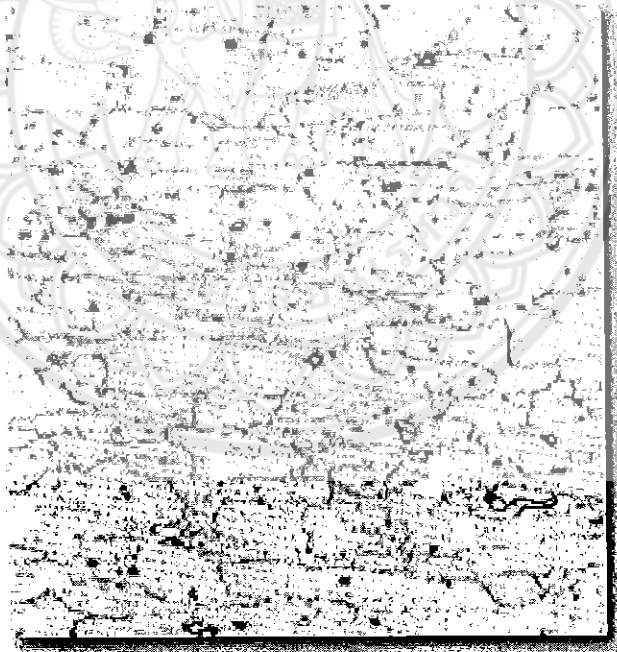
โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) คือโครงสร้างของโลหะที่มีกำลังขยายหลายเท่า การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงรูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะของเกรน ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะนั้นเพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการ เพราะวัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันการที่จะทำให้วัสดุต่างๆ สามารถนำมาใช้งานได้ตรงตามความต้องการได้นั้น เราต้องมาดูที่กระบวนการผลิตของวัสดุชนิดนั้นๆ และทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเนื่องจากโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น (ขวลิต, 2547)

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุทึบ การศึกษารูปร่างขนาด และการจัดเรียงตัวของผลึก นั้นจึงต้องตัดชิ้นงานตามแนวที่ต้องการแล้วนำไปขัดมัน กัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่นของผลึกเพราะขอบเกรนเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากที่สุด หลังจากกัดกรดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรนหันเห

ออกนอกทิศทางเดิม ดังรูปที่ 2.10 จึงเห็นขอบเกรนเป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรน  
ที่มา : ขวลิขิต (2547)



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะ  
ที่มา : ขวลิขิต (2547)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วาทัญญ และสมศักดิ์ (2546) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140 โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบชุบ และอัตราการเย็นตัวของสารชุบที่มีผลต่อความแข็งแรง ความทนต่อแรงกระแทก โมดูลัสความยืดหยุ่น เปรอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบ ผลของการทดสอบพบว่าความแข็งแรงแปรผันตรงกับอัตราการเย็นตัว และแปรผกผันกับอุณหภูมิอบชุบ และอุณหภูมิการอบคืนตัว ความทนต่อแรงกระแทกจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนตัว และอัตราการเย็นตัวของสารชุบ ความทนต่อแรงดึงแปรผกผันอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนตัว และอัตราการเย็นตัวของสารชุบ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นแปรผกผันกับอุณหภูมิการอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนตัว และอัตราการเย็นตัวของสารชุบ เปรอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิการอบชุบแต่จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิการอบคืนตัว และแปรผกผันกับอัตราการเย็นตัวของสารชุบ โครงสร้างทางจุลภาคจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนตัว และอัตราการเย็นตัวของสารชุบ

พิชญ และริม (2546) ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวของเหล็ก AISI 1045 โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัว ผลของการทดสอบพบว่าความแข็งแรงของเหล็กจะแปรผกผันกับอุณหภูมิการอบคืนตัว ความทนต่อแรงกระแทกจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของการอบคืนตัว และโครงสร้างทางจุลภาคมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบคืนตัว

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

#### 3.1 ศึกษาโครงการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- 3.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบชุบโลหะ และการชุบแข็ง
- 3.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเย็นตัวของเหล็กในน้ำมัน น้ำ และในอากาศ
- 3.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับความแข็ง และการทดสอบความแข็ง
- 3.1.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับธาตุประกอบที่มีผลต่อความแข็งของเหล็ก
- 3.1.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบคืนตัว
- 3.1.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับX-Ray Diffraction

#### 3.2 เตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาด และจำนวนที่ต้องการ

ในการทดลองใช้เหล็กกล้า 2 ชนิด คือ

- เหล็กกล้า AISI 4140
- เหล็กกล้า AISI 1045

โดยนำชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด ไปตัดให้ได้ขนาดความยาว 2 เซนติเมตร ชนิดละ 30 ชิ้นโดยที่ชิ้นงานทุกชิ้นงาน มีขนาดเท่ากัน

#### 3.3 นำชิ้นงานไปชุบแข็งตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1 นำชิ้นงานไปอบในเตาโดย

- ชิ้นงาน AISI 4140 อบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ชิ้นงาน AISI 1045 อบที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2 เมื่ออบชิ้นงานได้ตามอุณหภูมิ และเวลาที่กำหนดแล้ว นำชิ้นงานออกมาเย็นตัวในตู้กลางต่างๆ กัน นั่นคือในน้ำมัน น้ำ และอากาศ โดยมีจำนวนชิ้นงาน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การชุบแข็งชิ้นงาน

ชนิด	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ชุบในน้ำมัน (ชิ้น)	ชุบในน้ำ (ชิ้น)	ชุบในอากาศ (ชิ้น)
4140	900	1	10	10	10
1045	870	1	10	10	10

### 3.4 นำชิ้นงานไปอบคืนตัวมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.4.1 นำชิ้นงานไปอบในเตาโดย

- ชิ้นงาน AISI 4140 อบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ชิ้นงาน AISI 1045 อบที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมา แล้วโดยผ่านการชุบแข็งในตัวกลางต่างๆ กัน คือในน้ำ ในน้ำมัน และในอากาศ และนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งแล้วมาอบคืนตัว ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 4140

ผ่านการชุบน้ำ (ชิ้น)	ผ่านการชุบน้ำ น้ำมัน (ชิ้น)	ผ่านการชุบใน อากาศ (ชิ้น)	อุณหภูมิ การอบคืนตัว (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	1	1	400	60
1	1	1	400	90
1	1	1	400	120
1	1	1	500	60
1	1	1	500	90
1	1	1	500	120
1	1	1	600	60
1	1	1	600	90
1	1	1	600	120

**ตารางที่ 3.3** การอบคืนตัวชิ้นงาน ของ AISI 1045

ผ่านการชุบน้ำ (ชิ้น)	ผ่านการชุบน้ำมัน (ชิ้น)	ผ่านการชุบใน อากาศ (ชิ้น)	อุณหภูมิ การอบคืนตัว (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	1	1	400	60
1	1	1	400	90
1	1	1	400	120
1	1	1	500	60
1	1	1	500	90
1	1	1	500	120
1	1	1	600	60
1	1	1	600	90
1	1	1	600	120

### 3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค

หลังจากที่ได้ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคมาแล้ว จะนำชิ้นงานที่ได้มาศึกษาโครงสร้างจุลภาค มีขั้นตอนในศึกษาโครงสร้างจุลภาค มีดังนี้

3.5.1 นำชิ้นงานที่ทดสอบมาขัดให้ผิวของชิ้นงาน มีความเรียบ เป็นมัน โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600, 800, 1000 และ 1200

3.5.2 นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดจนเรียบเป็นมัน มาขัดด้วยจานสีกหลาด และใช้ผงขัดเงา

3.5.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยสีกหลาด โดยใช้ผงขัดมากัดสารละลายในต่อลความเข้มข้นร้อยละ 2 ในสารละลายเป็นเวลา 10-20 วินาที

3.5.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดมาล้างในน้ำสะอาด แล้วนำไปเป่าลมให้แห้ง

3.5.5 นำชิ้นงานทดสอบไปตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical Microscopes

3.5.6 ถ่ายรูปบันทึก และเก็บข้อมูล

### 3.6 การทดสอบความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งตามแบบ Rockwell แบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

3.6.1 วางชิ้นงานที่นำมาทดสอบลงบนฐานรองชิ้นงานของเครื่องทดสอบความแข็ง โดยให้ด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายหงายอยู่ด้านบน ตรวจสอบว่าผิวชิ้นงานด้านล่างสัมผัสกับฐาน รองชิ้นงานแนบสนิทหากไม่แนบสนิทค่าความแข็งที่ได้จะผิดพลาด

3.6.2 ตรวจสอบว่าหัวกดทดสอบความแข็งโพลีคาร์บอเนตหัวทดสอบ

3.6.3 เลือกตำแหน่งการทดสอบ ไม่ควรทดสอบบริเวณริมขอบชิ้นงานเพราะอาจทำให้ชิ้นงานล้มได้

3.6.4 ทำการทดสอบความแข็งตามวิธีการใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell

3.6.5 ทดสอบชิ้นงานชิ้นละ 3 ค่า โดยการทดสอบแต่ละครั้งรอยกดจะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

3.6.6 บันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ

### 3.7 นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วทั้ง 2 ชนิดคือ AISI 4140 และ AISI 1045 ผ่านตัวกลางทั้ง 3 ชนิด คือในน้ำ ในน้ำมัน และในอากาศ อย่างละ 1 ชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานมาตัดให้มีความหนา ไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร โดยที่ชิ้นงานทุกชิ้นงานมีขนาดเท่ากันทุกชิ้นงาน แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปส่งที่ ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

### 3.8 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

3.8.1 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม กับเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ไม่มีธาตุซิลิกอน โครเมียม และโมลิบดีนัม เป็นองค์ประกอบหลังการชุบแข็ง

3.8.2 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ภายหลังการชุบแข็งในตัวกลางที่ต่างกัน คือในน้ำ น้ำมัน และอากาศ

## บทที่ 4

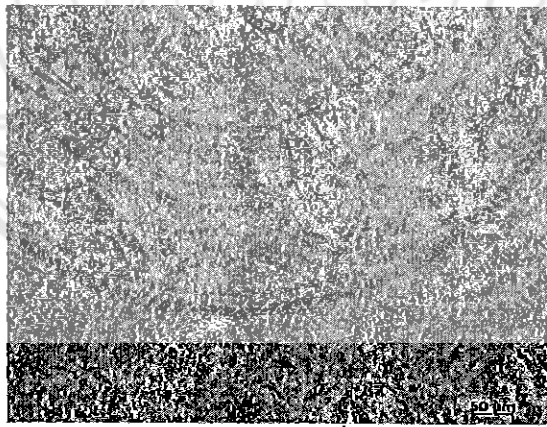
### ผลการทดลอง และวิเคราะห์

เมื่อนำเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ได้ทำการอบชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 870 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ชุบแข็งในตัวกลางต่างกัน คือชุบแข็งในน้ำ น้ำมัน และอากาศ แล้วนำไปอบคืนตัว ที่ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60, 90 และ 120 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้น ไปตรวจสอบ สามารถแบ่งผลการตรวจสอบเป็น 3 กลุ่มได้ ดังนี้

- ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็ง
- ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง
- ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว

#### 4.1 ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็ง

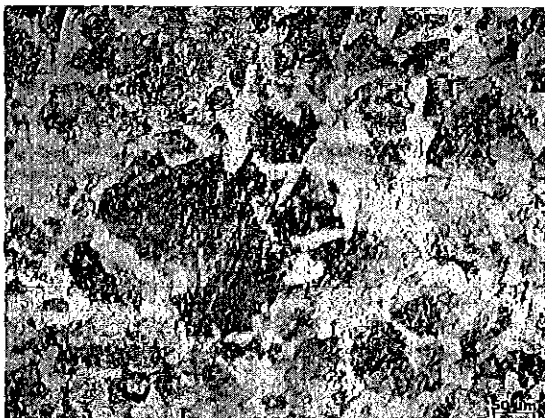
โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์แสงจะได้โครงสร้าง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นโครงสร้างที่ได้ลักษณะเป็นรูปเข็มสีขาว เล็กๆ สลับกับพื้นสีน้ำตาลโดยกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

ส่วนชิ้นงาน AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบมีโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้าง ส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะเป็น 2 เฟสเกิดขึ้นสลับกันในโครงสร้าง คือสีขาวสลับกับดำกระจายตัวทั่วไปใน โครงสร้าง โดยในส่วนของสีขาวจะอยู่บริเวณขอบเกรน ดังรูปที่ 4.2





รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ยังไม่ผ่านการอบชุบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

เมื่อเรานำชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็งมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เพราะชิ้นงาน AISI 4140 มีส่วนผสมของธาตุซิลิคอน โครเมียม และโมลิบดีนัม ผสมอยู่ในชิ้นงาน ดังตารางที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนผสมของโครงสร้างของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณคาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน ชิ้นงาน AISI 4140 มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.38-0.43 และชิ้นงาน AISI 1045 มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.43-0.50 แต่โครงสร้างทางจุลภาคจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เพราะส่วนผสมของธาตุซิลิคอน โครเมียม และโมลิบดีนัม ที่ผสมอยู่ในชิ้นงาน AISI 4140 เป็นส่วนผสมที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ บทบาทของธาตุในกลุ่มนี้จะทำให้อาณาเขตของเฟอร์ไรต์กว้างขึ้นไปทางด้านอุณหภูมิสูง จึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะที่แตกต่างจากชิ้นงาน AISI 1045

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กของเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045

ชนิด	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.04	0.15-0.30	0.80-1.10	0.15-0.25
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	-	-	-

## 4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง

จะแบ่งการตรวจสอบของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งได้ 3 วิธีการดังนี้

### 4.2.1 ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

เมื่อเหล็กกล้า AISI 4140 และ AISI 1045 ผ่านการอบชุบแข็งในตัวกลางต่างๆ กัน คือ ในน้ำ น้ำมัน และอากาศ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้ภายหลังการชุบแข็งแตกต่างกันดังนี้

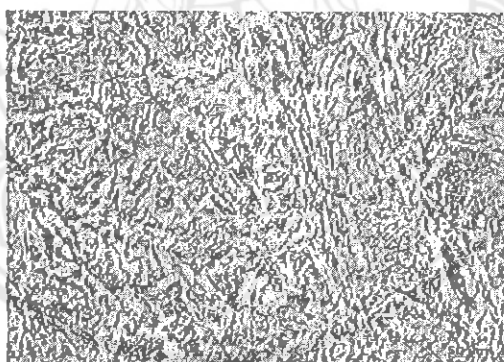
เมื่อนำชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ชุบแข็งในน้ำ ในน้ำมัน และเย็นตัวในอากาศ ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำของชิ้นงาน AISI 4140 ดังรูปที่ 4.3 ก) จะมีลักษณะที่คล้ายกับชิ้นงานที่ชุบแข็งในน้ำของ AISI 1045 ดังรูปที่ 4.4 ก) คือ โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นเข็มกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง แต่โครงสร้างทางจุลภาคในชิ้นงาน AISI 4140 จะมีลักษณะที่หยาบกว่า และเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง ส่วนในชิ้นงาน AISI 1045 มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่า ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน ของ AISI 4140 โครงสร้างที่ได้ลักษณะจะเป็นรูปเข็มสีดำเล็กๆ โดยกระจายตัวอยู่ทั่วบนพื้นสีขาวร่วมกับ โครงสร้างลักษณะโครงข่ายสีดำ ดังรูปที่ 4.3 ข) ซึ่งแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ ชุบแข็งในน้ำมัน ดังรูปที่ 4.4 ข) จะมีลักษณะประกอบด้วย 2 ส่วนในโครงสร้าง โดยบริเวณสีดำมีลักษณะเป็นเข็มเล็กๆ มีบริเวณสีขาวแทรกอยู่โดยทั่วไป ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศของ AISI 4140 ดังรูปที่ 4.3 ค) ลักษณะจะเป็น 2 ส่วน ในส่วนของสีขาวสลับกับสีดำ และใน ส่วนของมีลักษณะเป็นแท่ง ชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศของ AISI 1045 ดังรูปที่ 4.3 ค) ลักษณะ ของโครงสร้างที่ได้จะเป็น 2 เฟส สลับกันในโครงสร้าง จะพบว่ามีพื้นขาวสลับกับดำโดยมีส่วนสีขาวจะ อยู่ตามขอบเกรน จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน เมื่อให้อัตรา การเย็นตัวที่ช้าลง คือเย็นตัวในอากาศ และในน้ำมัน และเมื่อให้อัตราการเย็นตัวที่เร็ว คือเย็นตัวในน้ำ จะพบว่าโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่ แตกต่างกัน คือส่วนผสมของโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกันถึงแม้จะมีปริมาณ คาร์บอนที่ใกล้เคียงกันก็ตาม



ก)



ข)



ค)

**รูปที่ 4.3** โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างกลางต่างกัน

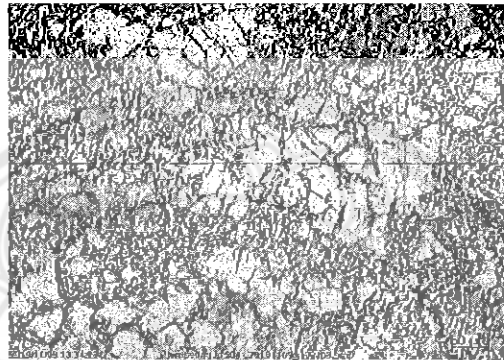
ก) เย็นตัวในน้ำ

ข) เย็นตัวในน้ำมัน

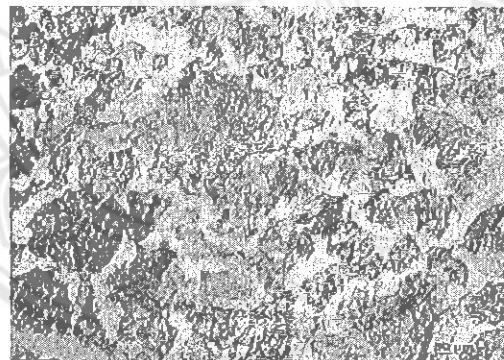
ค) เย็นตัวในอากาศอากาศ



ก)



ข)



ค)

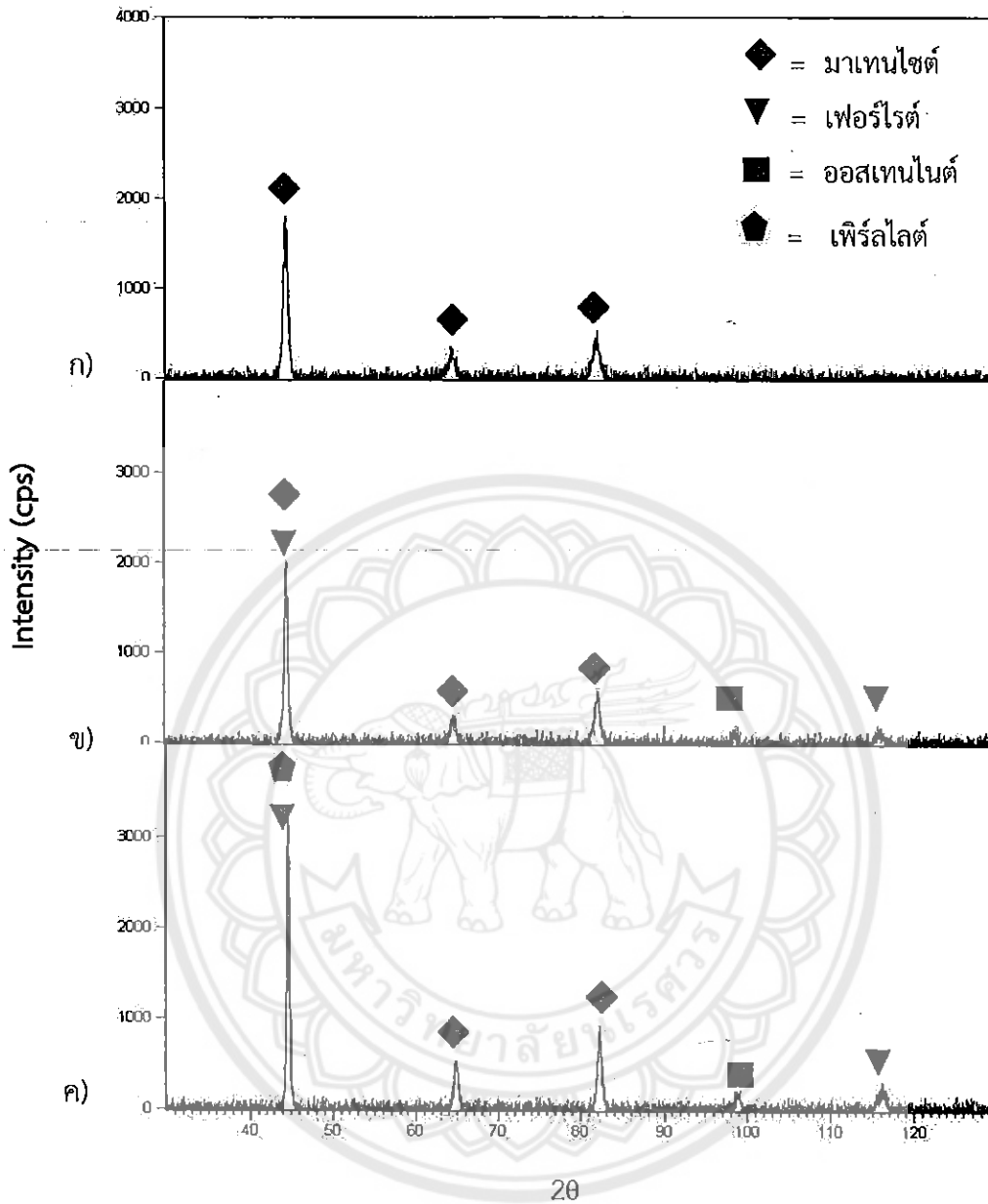
**รูปที่ 4.4** โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างต่างกัน

ก) เย็นตัวในน้ำ

ข) เย็นตัวในน้ำมัน

ค) เย็นตัวในอากาศ

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบชนิดเฟสด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



**รูปที่ 4.5** รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดย

- ชุบแข็งในน้ำ
- ชุบแข็งในน้ำมัน
- ชุบแข็งในอากาศ

จากรูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และเย็นตัวในน้ำ น้ำมัน และอากาศ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค มาเทนไซต์ เพิร์ลไลต์ เฟอไรต์ และออสเทนไนต์ โดยใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee

Powder Diffraction Standards (JCPDS) ของมาเทนไซด์ หมายเลข 044-1290 เฟิร์ลไลต์ หมายเลข 004-2475 เพอร์ไรต์ หมายเลข 006-0696 และออสเทนไนต์ หมายเลข 023-0296 ผลตรวจสอบได้ ดังรูปที่ 4.5

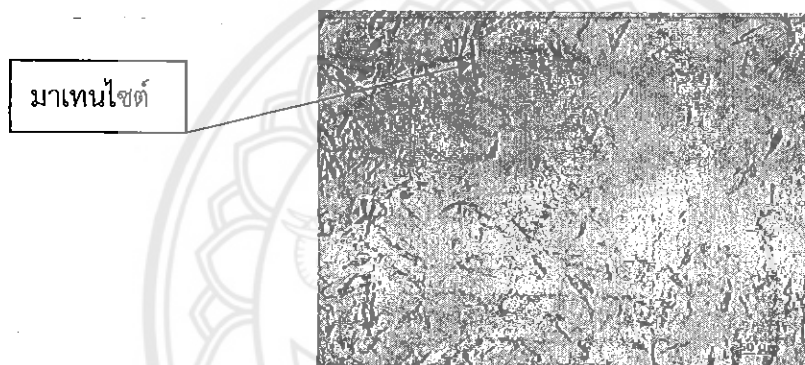
รูปที่ 4.5 ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 44.5$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 64.5$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 82.5$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซด์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำ

รูปที่ 4.5 ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเย็นตัวในน้ำมัน

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 45$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์ และเพอร์ไรต์

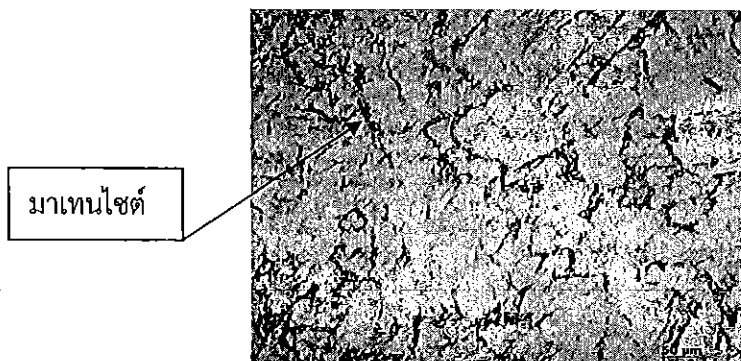
ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 66$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 86$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซด์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 104$  เป็นส่วนของเฟสออสเทนไนต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 122$  เป็นส่วนของเฟสเพอร์ไรต์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างมาเทนไซด์อยู่ด้านบน โดยมีเพอร์ไรต์ และออสเทนไนต์ เป็นพื้น ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำมัน

รูปที่ 4.5 ค) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเย็นตัวในอากาศ

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 46$  เป็นส่วนของเฟสเพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์

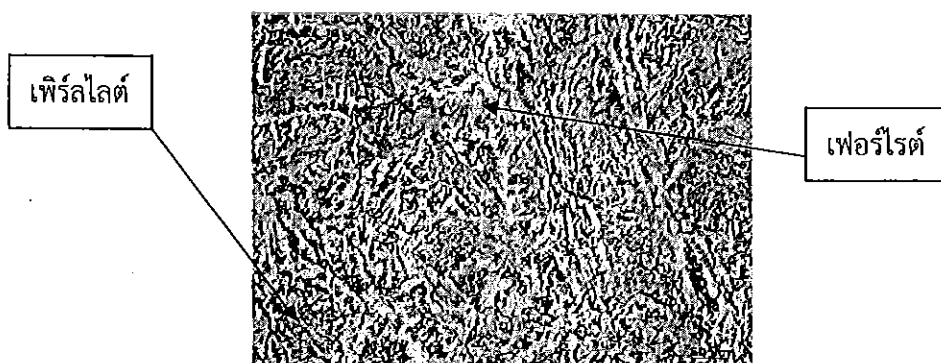
ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 68$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 87$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

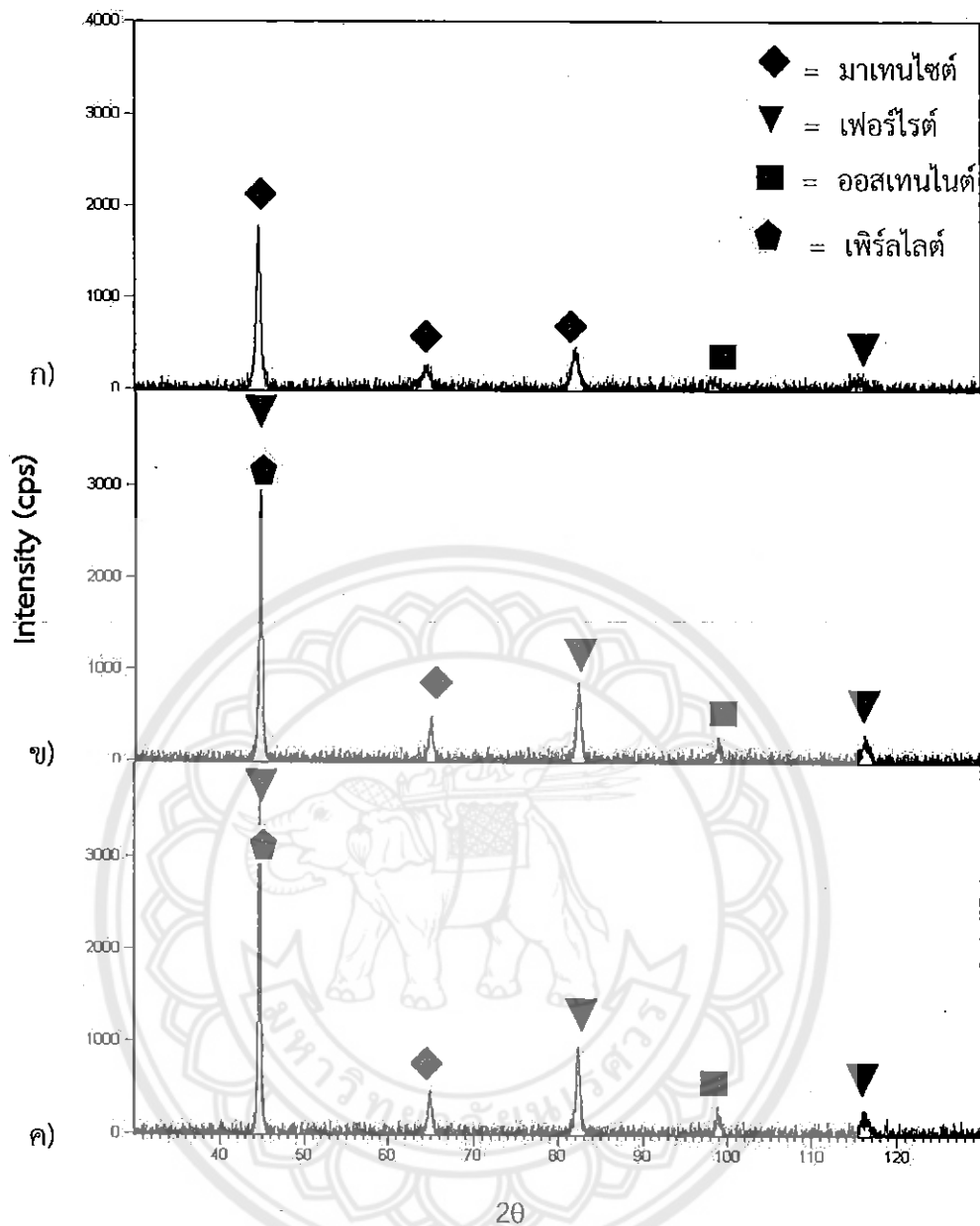
ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 105$  เป็นส่วนของเฟสออสเทนไนต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 123$  เป็นส่วนของเฟสเฟอร์ไรต์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ อยู่ด้านบน โดยที่มีมาเทนไซต์ และออสเทนไนต์ เป็นพื้น ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง ดังรูปที่ 4.1 จึงเป็นไปได้ว่าโครงสร้างของเหล็ก AISI 4140 ในห้องตลาดประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ อยู่ด้านบน โดยที่มีมาเทนไซต์ และออสเทนไนต์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทั่วไปของเหล็ก AISI 4140



รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในอากาศ



**รูปที่ 4.9** รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส โดย  
 ก) ชุบแข็งในน้ำ  
 ข) ชุบแข็งในน้ำมัน  
 ค) ชุบแข็งในอากาศ

จากรูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็ง ที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสโดย เย็นตัวในน้ำ น้ำมัน และอากาศ ประกอบด้วยโครงสร้าง มาเทนไซต์ เฟอร์ไรต์ และออสเทนไนต์ โดยใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS) ของมาเทนไซต์ หมายเลข 044-1290 เฟอร์ไรต์



หมายเลข 004-2475 เฟอไรต์ หมายเลข 006-0696 ออสเทนไนต์ หมายเลข 023-0296 ซึ่งผล  
ตรวจสอบได้ ดังรูปที่ 4.9

รูปที่ 4.9 ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 1045 ที่ผ่านการ  
ชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเย็นตัวในน้ำ

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 44.5$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

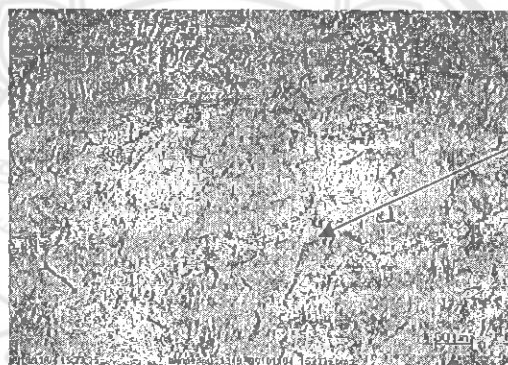
ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 64.5$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 82$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 98$  เป็นส่วนของเฟสออสเทนไนต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 106$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้าง  
มาเทนไซต์ อยู่ด้านบน โดยมีเฟอไรต์ และออสเทนไนต์ เป็นพื้น ดังรูปที่ 4.10



มาเทนไซต์

รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870  
องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำ

รูปที่ 4.9 ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 1045 ที่ผ่านการ  
ชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเย็นตัวในน้ำมัน

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 45$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์ และเฟอไรต์

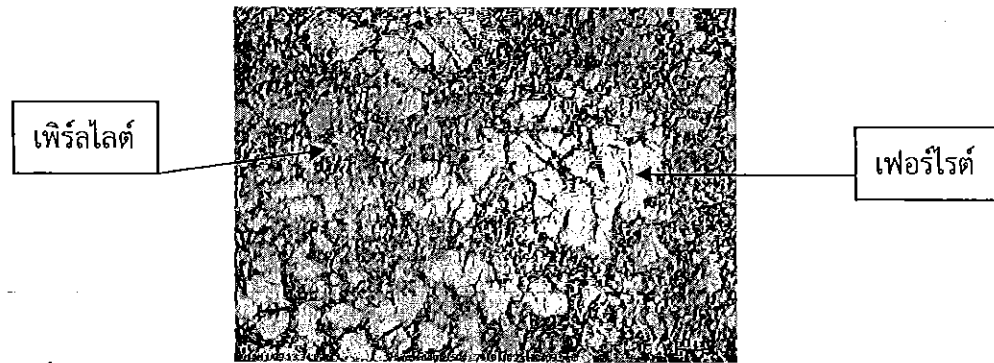
ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 66$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 84$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 101$  เป็นส่วนของเฟสออสเทนไนต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 118$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้าง  
เฟอไรต์ และเฟอไรต์ อยู่ด้านบน โดยมีมาเทนไซต์ และออสเทนไนต์ เป็นพื้น ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในน้ำมัน

รูปที่ 4.9 ค) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วนำมาเย็นตัวในอากาศ

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 46$  เป็นส่วนของเฟสเฟอริลไลต์ และเฟอไรต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 65$  เป็นส่วนของเฟสมาเทนไซต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 84$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 101$  เป็นส่วนของเฟสออสเทนไนต์

ยอดกราฟที่มุม  $2\theta = 118$  เป็นส่วนของเฟสเฟอไรต์

จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านชุบแข็งแล้วนำมาเย็นตัวในอากาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอไรต์ และเฟอริลไลต์ อยู่ด้านบน โดยมีมาเทนไซต์ และออสเทนไนต์ เป็นพื้น ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในอากาศ

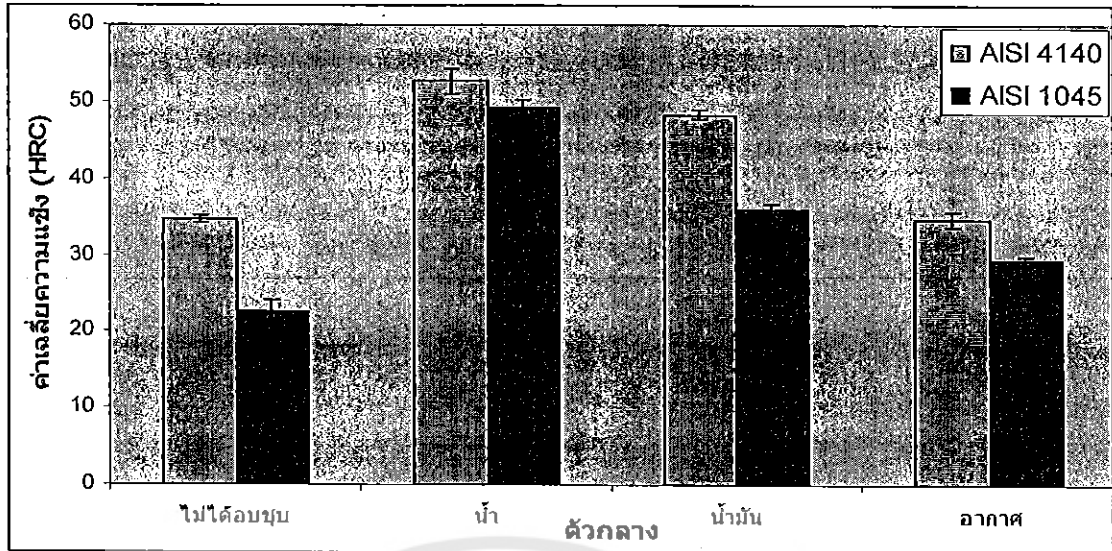
จากโครงสร้างทางจุลภาคที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน ของชิ้นงาน AISI 4104 โครงสร้างที่ได้เป็น มาเทนไซต์ แต่ AISI 1045 ได้โครงสร้างเป็น เฟอไรต์ และเฟอริลไลต์ แสดงให้เห็นว่าธาตุซิลิคอน โครเมียม และโมลิบดีนัม ที่ผสมอยู่ในชิ้นงาน AISI 4140 ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง

### 4.2.3 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็ง

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในตัวกลางต่างๆ แสดงได้ ดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำค่าความแข็งที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง และชนิดของตัวกลางในการเย็นตัวจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งทุกชิ้นมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง โดยค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ภายหลังจากชุบแข็งของเหล็ก AISI 4140 ชิ้นงานชุบแข็งในน้ำค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ 52.66 HRC ชิ้นงานที่ชุบแข็งในน้ำมันค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ 48.33 HRC ชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ คือ 34.66 HRC ส่วนค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ภายหลังจากชุบแข็งของเหล็ก AISI 1045 ชิ้นงานที่ชุบแข็งในน้ำค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ 50.33 HRC ชิ้นงานที่ชุบแข็งในน้ำมันค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ 36 HRC ชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศค่าเฉลี่ยความแข็งที่ได้ 29.33 HRC ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำของเหล็กทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน และเย็นตัวในอากาศตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้ของแต่ละชิ้นงาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเหล็กทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการชุบแข็งชนิดเดียวกัน จะพบว่าเหล็ก AISI 4140 จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งสูงกว่าเหล็ก AISI 1045 ทุกสภาวะ

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็ก AISI 4140 และเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็ง โดยผ่านตัวกลางที่ต่างกัน

ชนิด	ตัวกลาง	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)			
		ไม่ได้อบชุบ	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
AISI 4140		30	52.66	48.33	34.66
AISI 1045		21.33	50.33	36	29.33



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็ก AISI 4140 และเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็ง โดยผ่านตัวกลางที่ต่างกัน

### 4.3 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว

การอบคืนตัวของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 เพื่อลดความเครียดให้กับชิ้นงาน และเพิ่มความเหนียวให้แก่ชิ้นงาน โดยจะทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบคืนตัวที่แตกต่างกัน 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

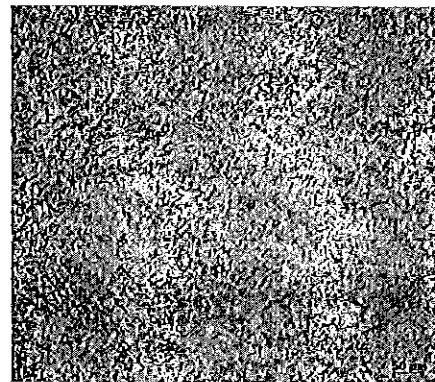
#### 4.3.1 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ที่ 400 องศาเซลเซียส

##### 4.3.1.1 โครงสร้างทางจุลภาค

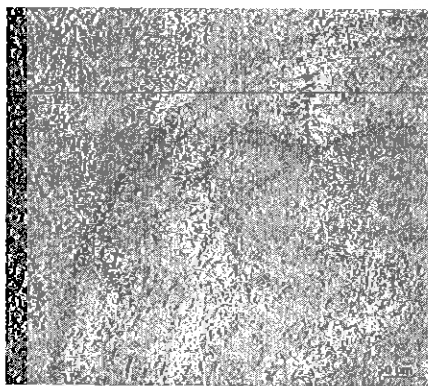
จากรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.14 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะคล้ายเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มขนาดใหญ่สีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นสีขาว เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.14 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.14 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.14 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวในระยะเวลาดังกล่าว พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ และจะมีลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กลงเรื่อยๆ กระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.14 ก)



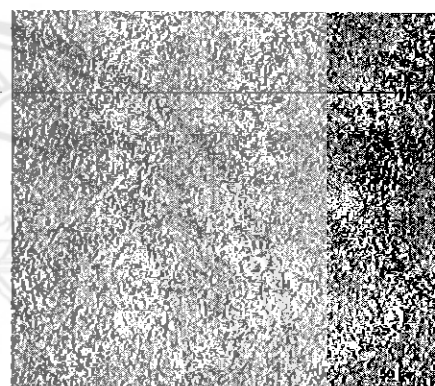
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.14** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

จากรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะที่พบพื้นจะมีสีขาว และจะพบรูปเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มใหญ่สีดำ กระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้างเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.15 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.15 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.15 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ ลักษณะของโครงสร้างจะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมากกระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.15 ก)

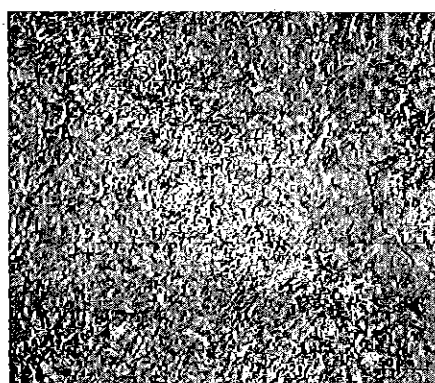
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 ที่ชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่คล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ เหมือนกัน เพราะว่าการเย็นตัวในน้ำนั้นม้ออัตราการเย็นตัวที่เร็ว โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จึงมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.16 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.16 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะจะเป็นรูปเข็มสีดำ โดยกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นสีขาว นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างเป็นโครงข่ายสีดำ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.16 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.16 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.16 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กันพบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ คือลักษณะของโครงสร้างจะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ กระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง และยังมีโครงข่ายสีขาวแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.16 ก)

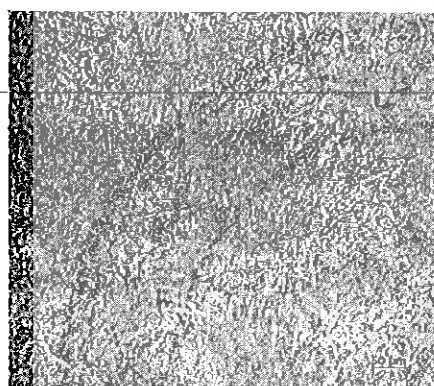
จากรูปที่ 4.17 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 1045 ที่ชุบน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.17 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน โดยบริเวณสีดำมีลักษณะเป็นเข็มเล็กๆ และมีบริเวณสีขาวแทรกอยู่เป็นหย่อมๆ โดยทั่วไป และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.17 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.17 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.17 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน คือลักษณะเป็น 2 เฟส จะแยกกันอย่างชัดเจน โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเฟิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำ และจะพบว่าในส่วนของ



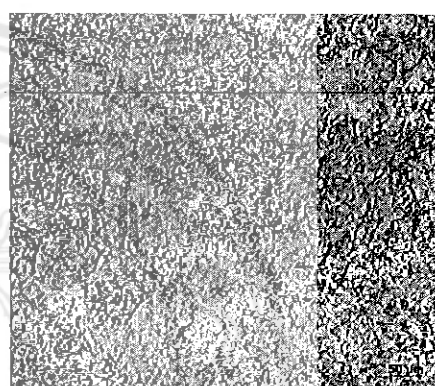
ก)



ข)



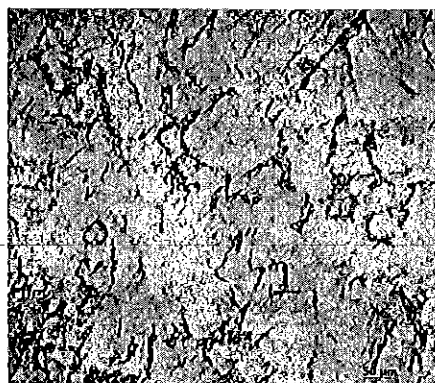
ค)



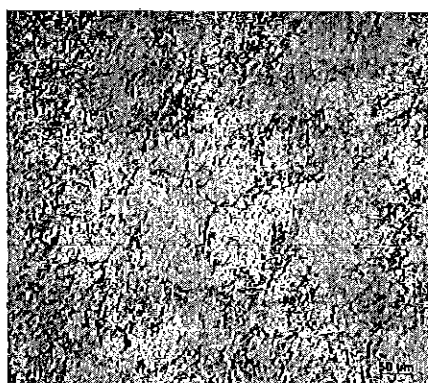
ง)

รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วบดคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

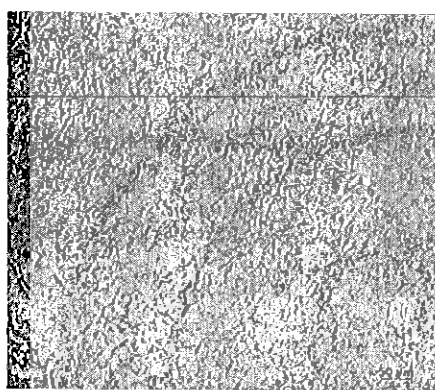
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



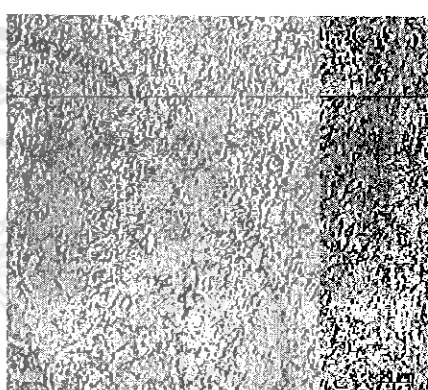
ก)



ข)



ค)

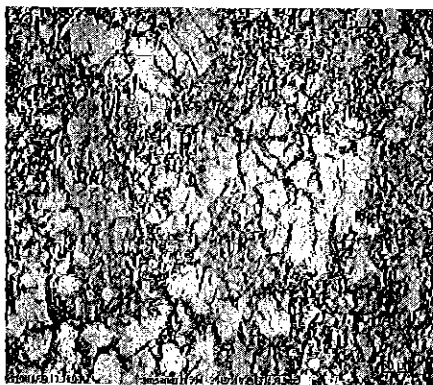


ง)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

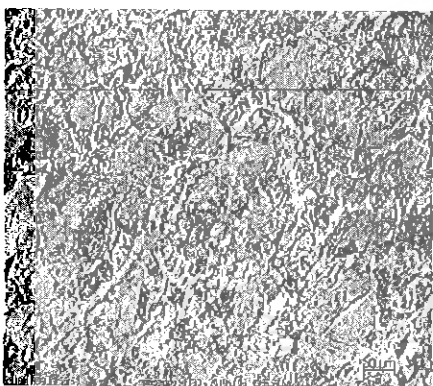




ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

ก) 0 นาที

ข) 60 นาที

ค) 90 นาที

ง) 120 นาที

สีขาวยังอยู่ตามขอบเกรน และมีเข็มแหลมๆ แทรกอยู่ในโครงสร้าง ด้วยคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง ซึ่งแตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว นอกจากนี้ในรูปที่ 4.17 ค) 90 นาที และรูปที่ 4.17 ง) 120 นาที จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.17 ข) 60 นาที

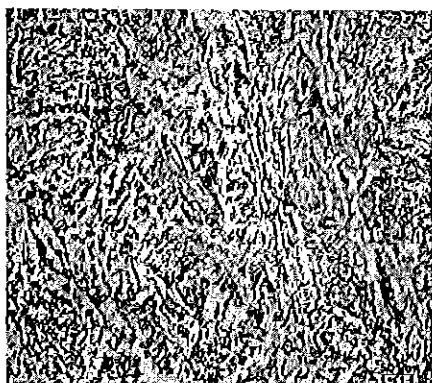
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมันที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.18 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน จากรูปที่ 4.18 ก) เป็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ โดยมีลักษณะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่ สลับกับพื้นสีดำกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.18 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.18 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.18 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆกัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน แต่ใน รูปที่ 4.18 ค) 90 นาที และรูปที่ 4.18 ง) 120 นาที จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.18 ข) 60 นาที และชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวทุกชิ้น จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.18 ก)

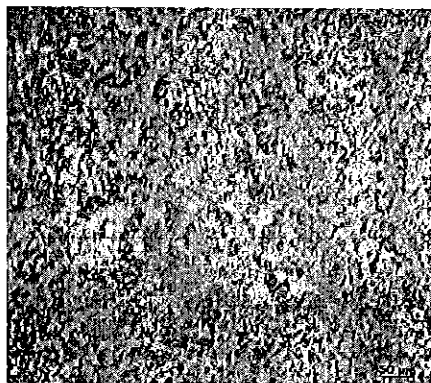
จากรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน จากรูปที่ 4.19 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว ซึ่งโครงสร้างจะประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยมีลักษณะเป็น 2 เฟส สลับกันในโครงสร้าง และจะพบว่ามีเกรนสีขาว สลับกับเกรนสีดำ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.19 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.19 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.19 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กันจะพบว่ามีโครงสร้างลักษณะคล้ายกันคือ จะมีลักษณะเป็น 2 เฟสอย่างเห็นได้ชัด โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำ จะพบว่าในส่วนของสีขาวยังอยู่ตามขอบเกรน และมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดจะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ แต่ลักษณะของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19

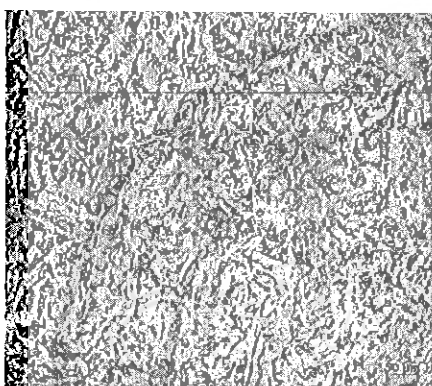




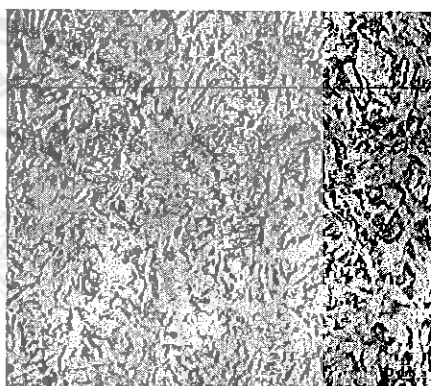
ก)



ข)



ค)



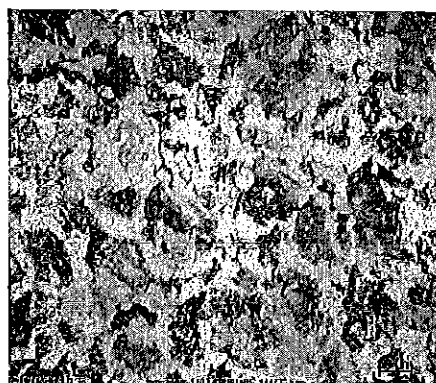
ง)

รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

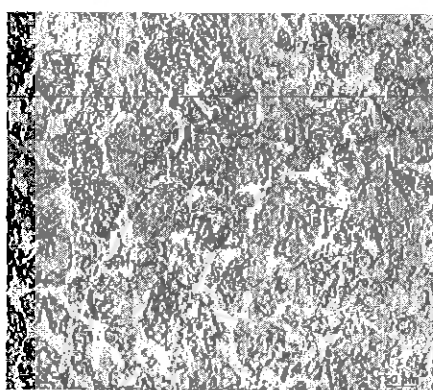
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



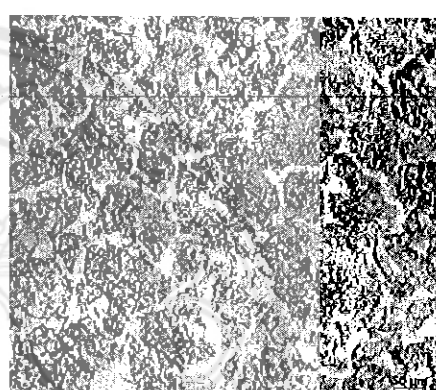
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

ก) 0 นาที

ข) 60 นาที

ค) 90 นาที

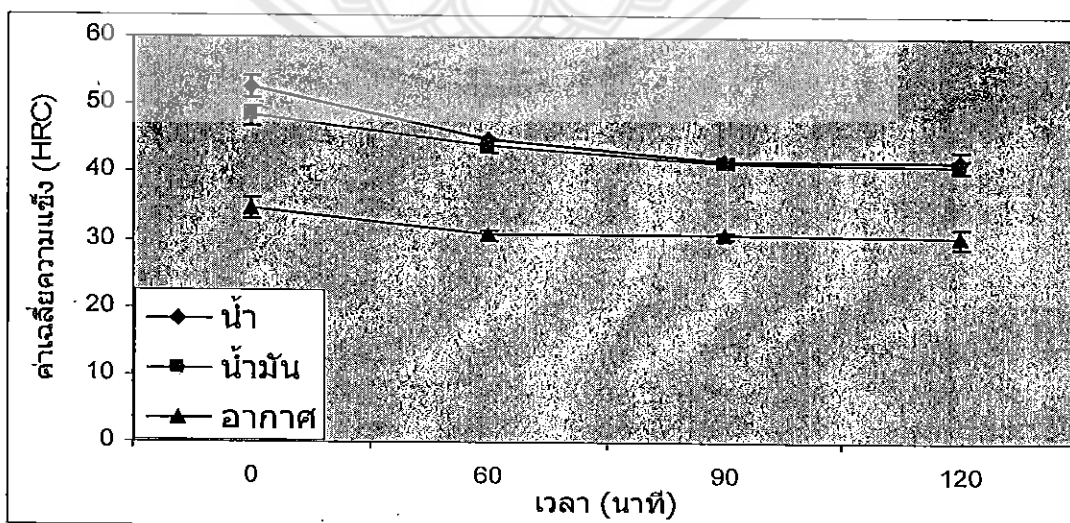
ง) 120 นาที

#### 4.3.1.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 4140 ที่อบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคืนตัวต่างกันจะได้แผนภูมิ ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ระยะเวลาการอบคืนตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำภายหลังการอบคืนตัว 45.25 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังการอบคืนตัว 44.08 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังการอบคืนตัว 31.58 HRC

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความแข็งเฉลี่ยของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่ต่างกัน

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	52.66	48.33	34.66
60	45	44	30.66
90	41.66	43	30.66
120	41.66	41	30.33
ค่าเฉลี่ย	45.25	44.08	31.58

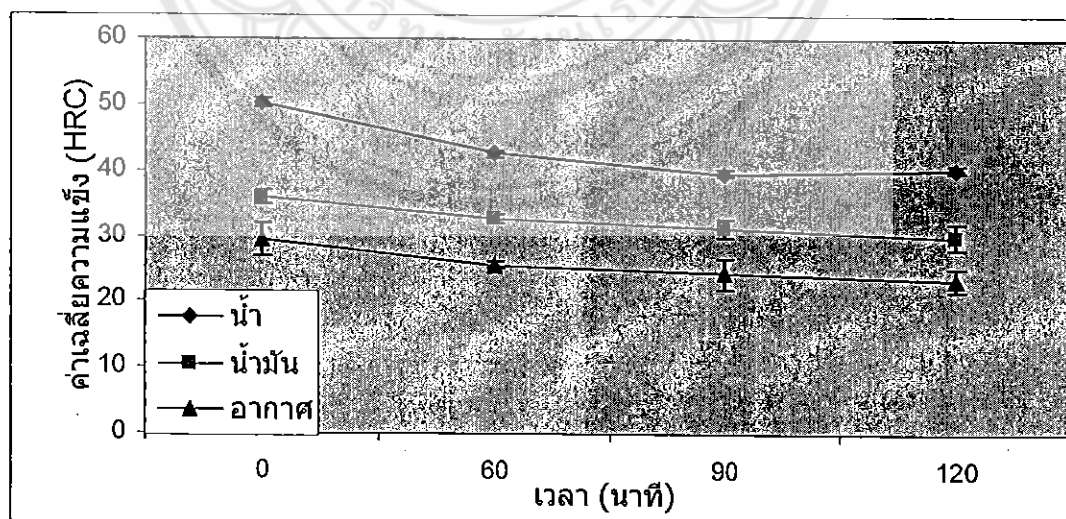


รูปที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ที่อบคืนตัวที่ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคืนตัวต่างกันจะได้ดังแผนภาพ ดังรูปที่ 4.21 จะเห็นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกันแม้ระยะเวลาการอบคืนตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำภายหลังจากการอบคืนตัว 43.24 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังจากการอบคืนตัว 32.50 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังจากการอบคืนตัว 25.66 HRC

**ตารางที่ 4.3** ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	50.33	36	29.33
60	42.66	32.66	25.66
90	39.66	31.33	24.33
120	40.33	30	23.33
ค่าเฉลี่ย	43.24	32.50	25.66



**รูปที่ 4.21** ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในตัวอย่างที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

จากค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการอบคืนตัวที่ต่างกัน คือ 60, 90 และ 120 นาที จะพบว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้จะลดลงเล็กน้อยเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน เพราะว่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในการอบคืนตัวช่วยในการลดความเครียดของชิ้นงาน ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าลดลง และชิ้นงานที่มีค่าความแข็งที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัว เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็น มาเทนไซต์ จึงมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งที่ได้จึงสูง และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่าการเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลอง ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

#### 4.3.2 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ที่ 500 องศาเซลเซียส

##### 4.3.2.1 โครงสร้างทางจุลภาค

จากรูปที่ 4.22 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.22 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะคล้ายเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มขนาดใหญ่สีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นสีขาว เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.22 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.22 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.22 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้างแต่ จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.22 ก)

จากรูปที่ 4.23 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.23 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะที่พบพื้นจะมีสีขาว และจะพบรูปเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มใหญ่สีดำกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.17 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.23 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.23 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.23 ก)

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.22 และในรูปที่ 4.23 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

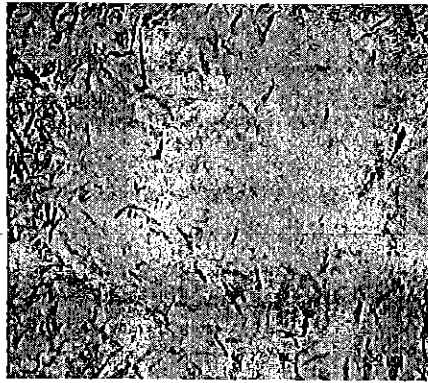


เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชั้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของทั้ง 2 ชั้นงานจะมีลักษณะที่คล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ เหมือนกัน เพราะว่าการเย็นตัวในน้ำนั้นม้ออัตราการเย็นตัวที่เร็ว โครงสร้างของทั้ง 2 ชั้นงานจึงมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

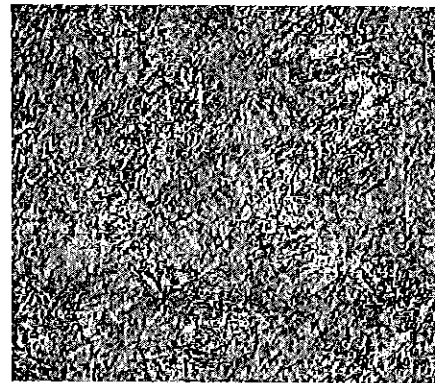
จากรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.24 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซด์ โดยมีลักษณะจะเป็นรูปเข็มสีดำโดยกระจายตัวอยู่ทั่วบนพื้นสีขาว นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างเป็นโครงข่ายสีดำ และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.24 ข) 90 นาทีดัง รูปที่ 4.24 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.24 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน จะมีลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง และมีความละเอียดกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัวโครงสร้างดังกล่าวเรียกว่าเทมเปอร์มาเทนไซด์ และยังมีโครงข่ายสีขาวแทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.25 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.25 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วนโดยบริเวณสีดำมีลักษณะเป็นเข็มเล็กๆ มีบริเวณสีขาวแทรกอยู่เป็นหย่อมๆ โดยทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.25 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.25 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.25 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันคือ ลักษณะเป็น 2 เฟส ในส่วนของเฟสสีขาวซึ่งคาดว่าจะจะเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ และในส่วนของเฟสสีดำซึ่งคาดว่าจะจะเป็นเฟสเฟิร์ลไลต์ โดยโครงสร้างมีลักษณะละเอียดกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว และโครงสร้างมีความละเอียดมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

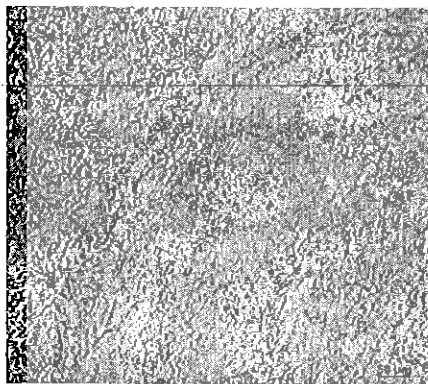
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชั้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็น เทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมัน ที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25



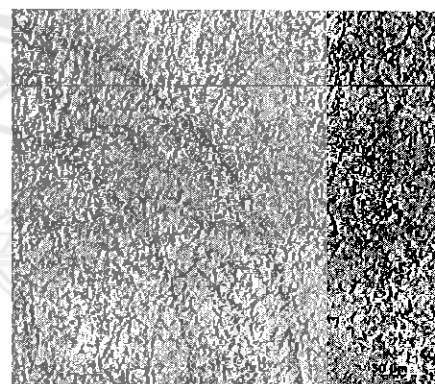
ก)



ข)



ค)



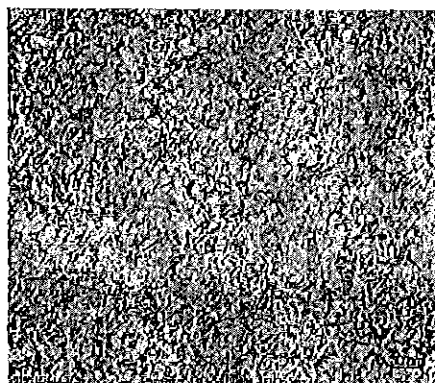
ง)

รูปที่ 4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่แข็งในชุบน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

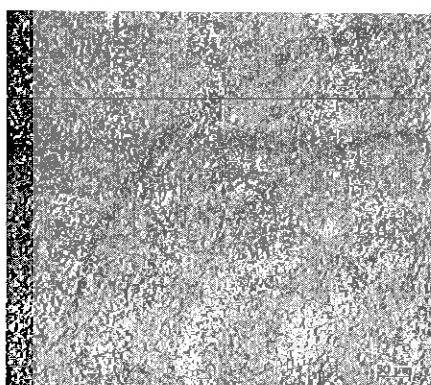
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



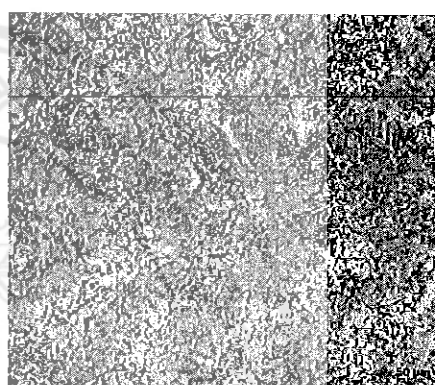
ก)



ข)



ค)



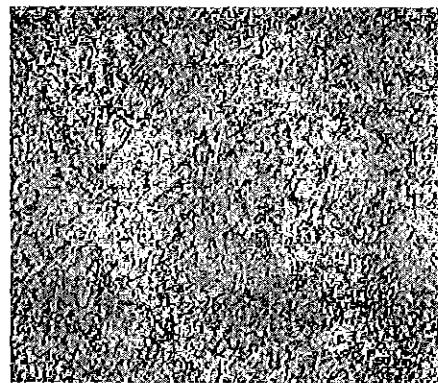
ง)

รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

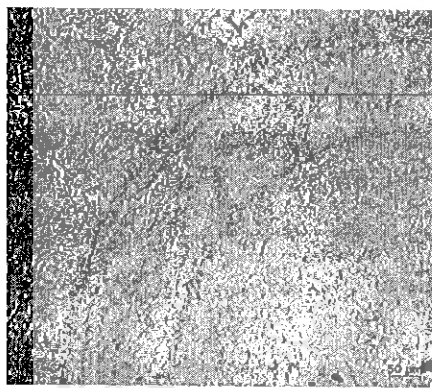
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



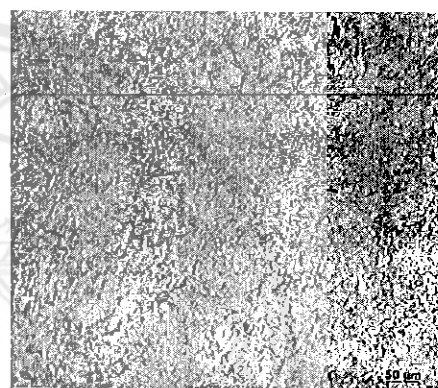
ก)



ข)



ค)



ง)

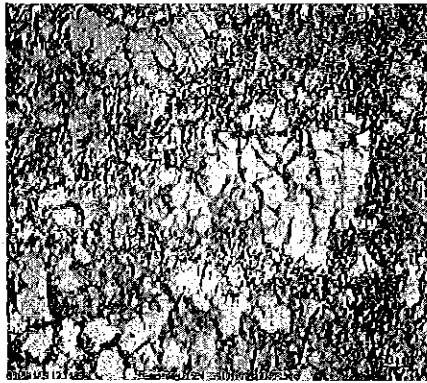
**รูปที่ 4.24** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมันแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

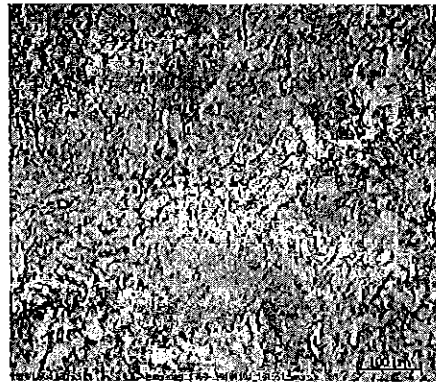
จากรูปที่ 4.26 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.26 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ โดยมีลักษณะจะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.26 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.26 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.26 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน ลักษณะจะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่ สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน แต่ในรูปที่ 4.26 ค) 90 นาที และรูปที่ 4.26 ข) 60 นาที จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.26 ก)

จากรูปที่ 4.27 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.27 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ สลับกันในโครงสร้าง คือจะพบว่ามีเกรนสีขาวสลับกับเกรนสีดำ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.27 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.27 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.27 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กันพบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยเฟสของเฟอร์ไรต์เป็นบริเวณสีขาวๆ และในเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นบริเวณชั้นๆ สีดำ บริเวณเกรนสีขาวจะมีขนาดเล็กลง เมื่อระยะเวลาของการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น

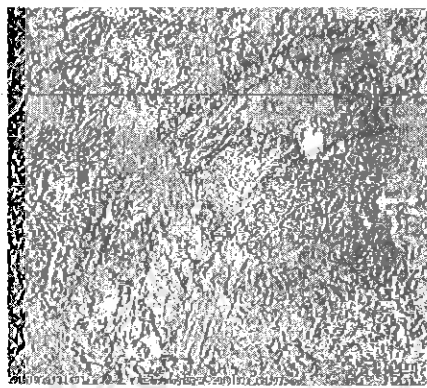
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะที่เหมือนกันเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ แต่ลักษณะของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27



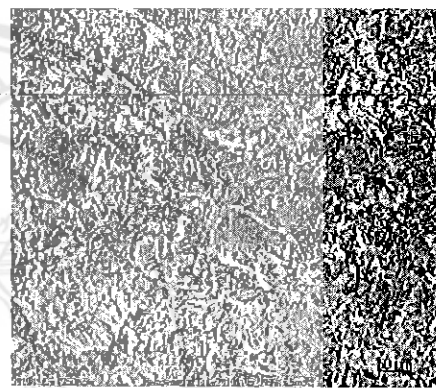
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.25** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500

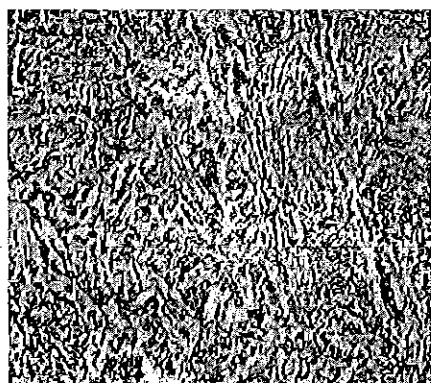
องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

ก) 0 นาที

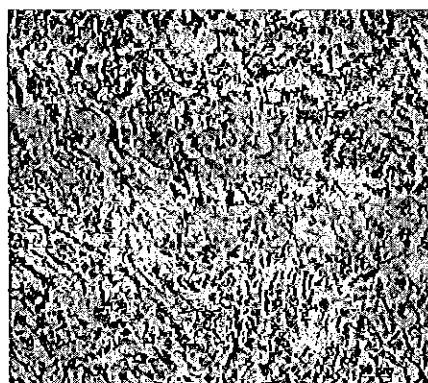
ข) 60 นาที

ค) 90 นาที

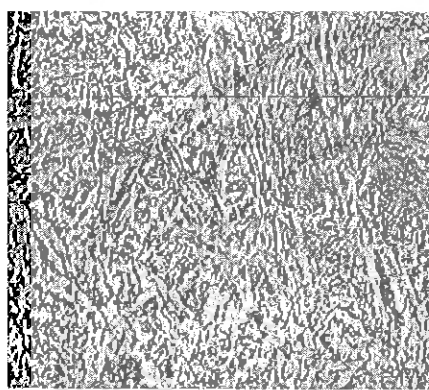
ง) 120 นาที



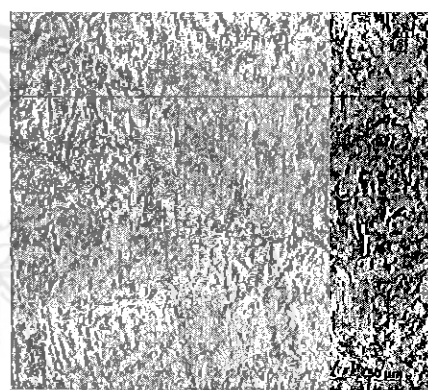
ก)



ข)



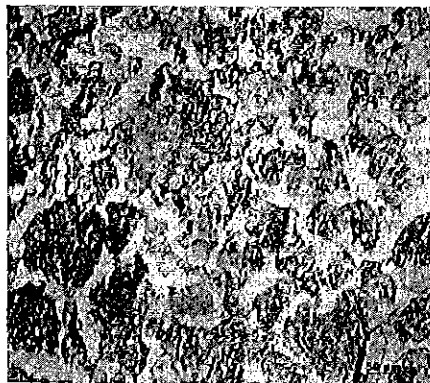
ค)



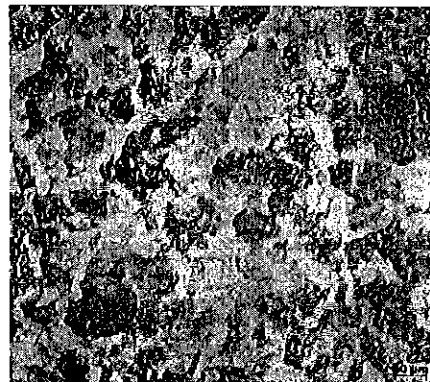
ง)

รูปที่ 4.26 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

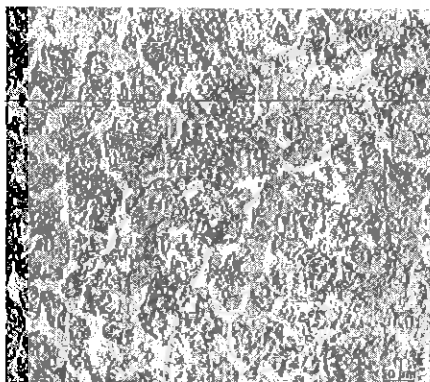
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



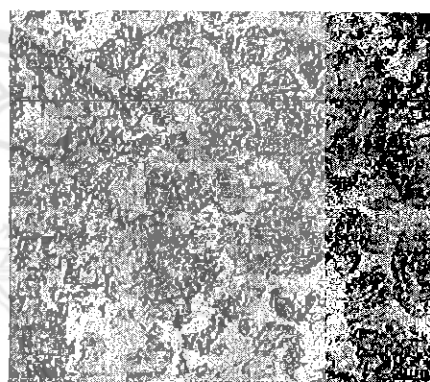
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.27 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศแล้วนำมาอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

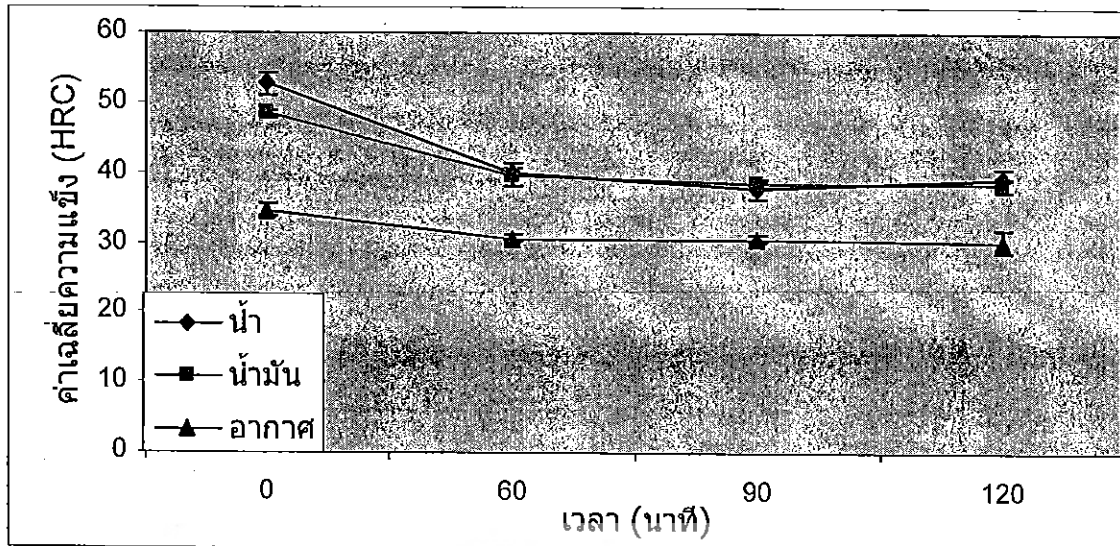


#### 4.3.2.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 500 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคืนตัวต่างกันจะได้แผนภูมิ ดังรูปที่ 28 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกันแม้ระยะเวลาการอบคืนตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำภายหลังจากการอบคืนตัว 42.33 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังจากการอบคืนตัว 41.16 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังจากการอบคืนตัว 31.58 HRC

**ตารางที่ 4.4** ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

เวลา (นาที)	ตัวกลาง	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
		น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0		52.66	48.33	34.66
60		40	39.66	30.66
90		37.66	38.33	30.66
120		39	38.33	30.33
ค่าเฉลี่ย		42.33	41.16	31.58

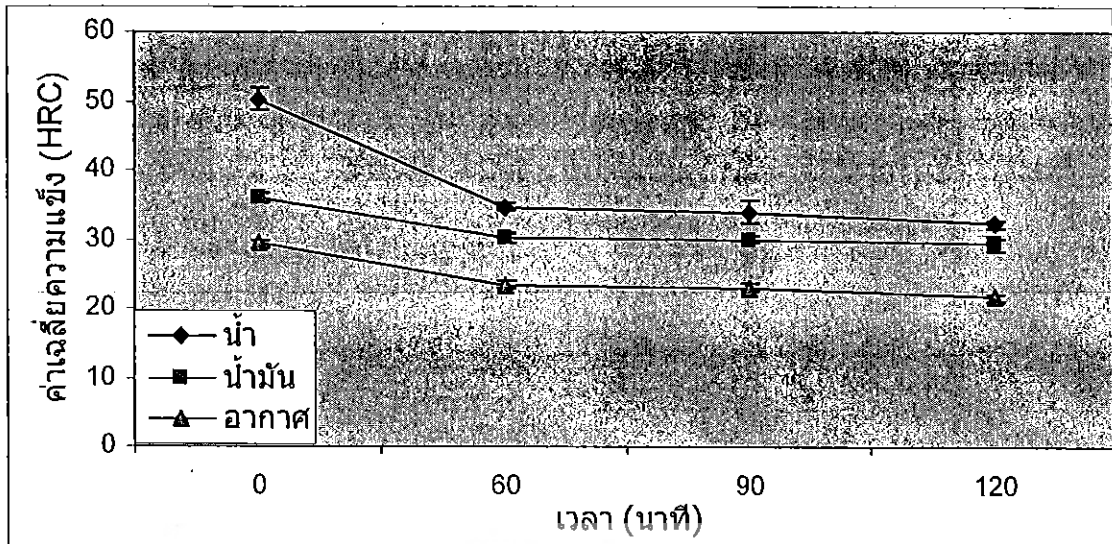


รูปที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคั้นตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคั้นตัวที่ 500 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคั้นตัวต่างกันจะได้แผนภูมิ ดังรูปที่ 29 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคั้นตัวมีค่าใกล้เคียงกันแม้ระยะเวลาการอบคั้นตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำ ภายหลังการอบคั้นตัว 37.83 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังการอบคั้นตัว 31.40 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังการอบคั้นตัว 24.33 HRC

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคั้นตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

		ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
		น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
เวลา (นาที)	ตัวกลาง			
	0	50.33	36	29.33
	60	34.66	30.33	23.33
	90	34	30	23
	120	32.33	29.33	21.66
	ค่าเฉลี่ย	37.83	31.40	24.33



รูปที่ 4.29 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

จากค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการอบคืนตัวที่ต่างกัน คือ 60, 90 นาที และ 120 นาที จะพบว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงที่ได้จะลดลงเล็กน้อยเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน เพราะว่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในการอบคืนตัวช่วยในการลดความเครียดของชิ้นงาน ค่าความแข็งแรงที่ได้จึงมีค่าลดลง และชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัว เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็นมาเทนไซต์ จึงมีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งแรงที่ได้จึงสูง และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่า การเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลอง ค่าความแข็งแรงที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

### 4.3.3 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ที่ 600 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.1 โครงสร้างทางจุลภาค

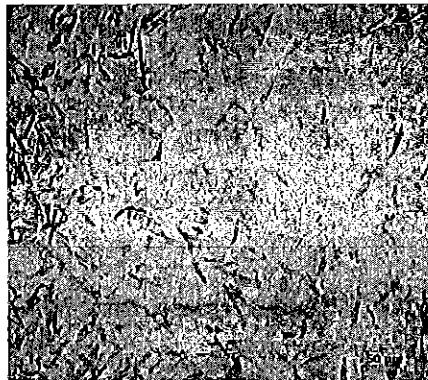
จากรูปที่ 4.30 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน รูปที่ 4.30 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะคล้ายเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มขนาดใหญ่สีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นสีขาว และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.30 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.30 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.30 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆกัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ ลักษณะจะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมาก

กระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.30 ก)

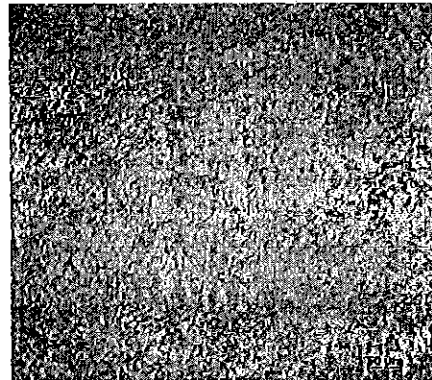
จากรูปที่ 4.31 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.31 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะที่พบพื้นจะมีสีขาว และจะพบรูปเข็มเล็กๆ สลับกับเข็มใหญ่สีดำกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.31 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.31 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.31 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ ลักษณะจะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ ที่ละเอียดมากกว่ากระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.31 ก)

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 ที่ชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่คล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ เหมือนกัน เพราะว่าการเย็นตัวในน้ำนั้นม้อัตราการเย็นตัวที่เร็วโครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จึงมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31

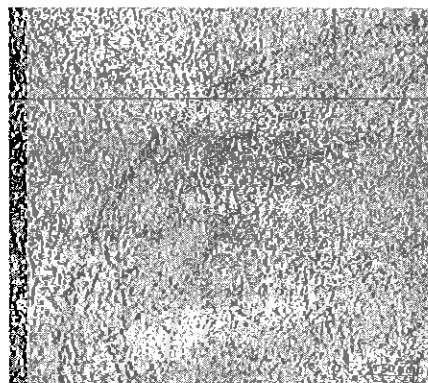
จากรูปที่ 4.32 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.32 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสมาเทนไซต์ โดยมีลักษณะจะเป็นรูปเข็มสีดำโดยกระจายตัวอยู่ทั่วบนพื้นสีขาว ลักษณะของเข็มจะใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างเป็นโครงข่ายสีดำ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.32 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.32 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.32 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้างมีความละเอียดกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างดังกล่าวเรียกว่า เทมเปอร์มาเทนไซต์ และยังมีโครงข่ายสีขาวแทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง



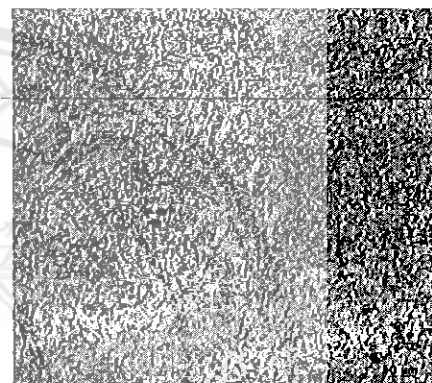
ก)



ข)



ค)



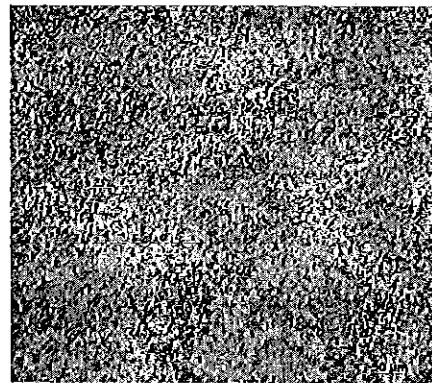
ง)

รูปที่ 4.30 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

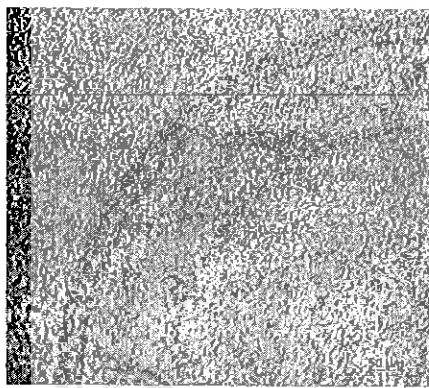
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



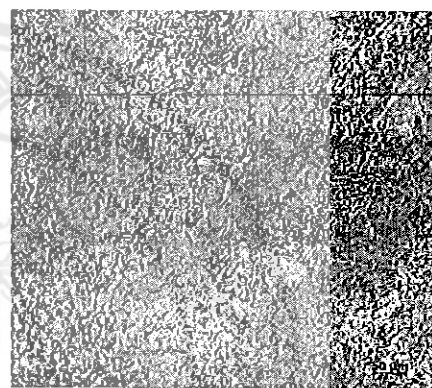
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.31 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

ก) 0 นาที

ข) 60 นาที

ค) 90 นาที

ง) 120 นาที

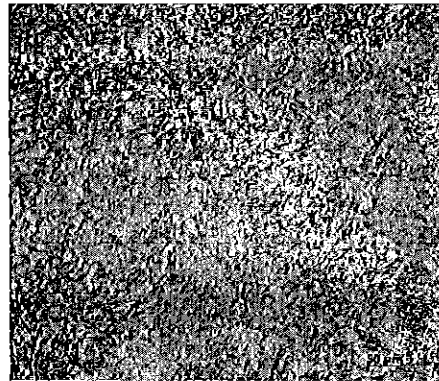
จากรูปที่ 4.33 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.33 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน โดยบริเวณสีดำมีลักษณะเป็นเข็มเล็กๆ มีบริเวณสีขาวแทรกอยู่เป็นหย่อมๆ โดยทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.33 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.33 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.33 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน ลักษณะเป็น 2 เฟส โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง โดยในเฟสสีขาวซึ่งคาดว่าจะเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสสีดำซึ่งคาดว่าจะเป็นเฟสเพิร์ลไลต์ โดยโครงสร้างมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว และโครงสร้างมีความละเอียดมากขึ้นเมื่อเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดจะแตกต่างกันเพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมันที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33

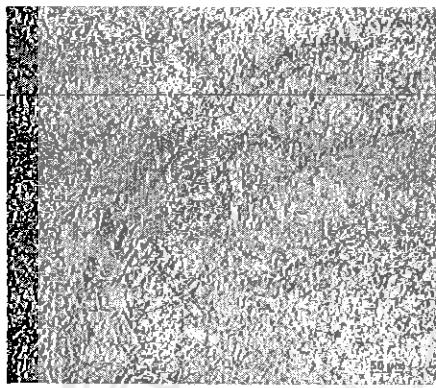
จากรูปที่ 4.34 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในเวลาต่างกัน รูปที่ 4.34 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยมีลักษณะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.34 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.34 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.34 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน ลักษณะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่ สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน แต่ใน รูปที่ 4.34 ค) 90 นาที และ รูปที่ 4.34 ง) 120 นาที จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.34 ข) 60 นาที และจะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.34 ก)



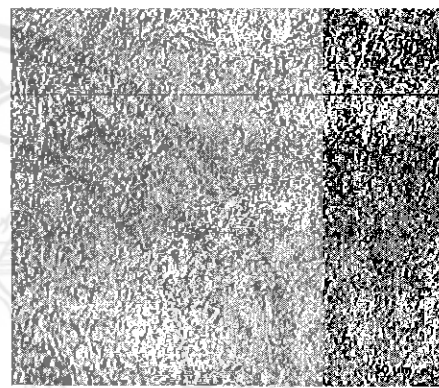
ก)



ข)



ค)



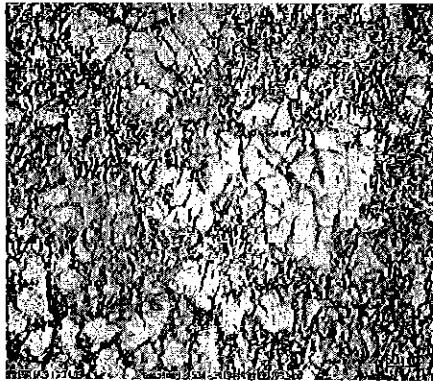
ง)

**รูปที่ 4.32** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 600

องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

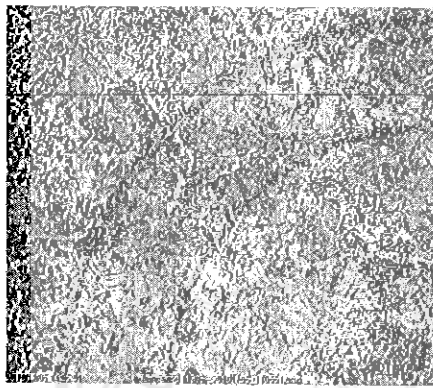




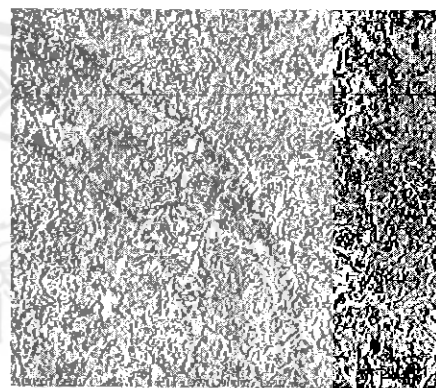
ก)



ข)



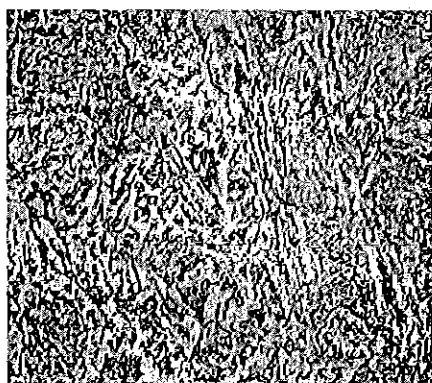
ค)



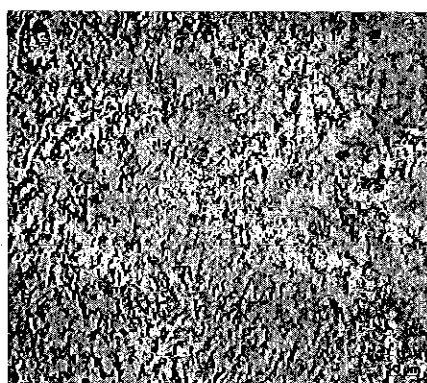
ง)

**รูปที่ 4.33** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

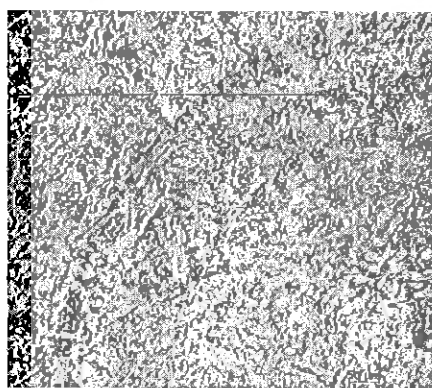
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที



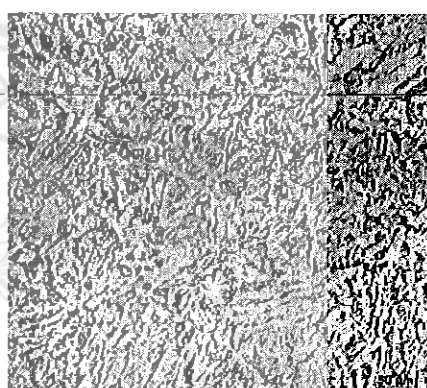
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.34** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 600

องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

ก) 0 นาที

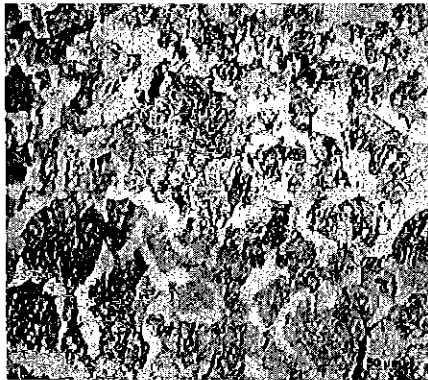
ข) 60 นาที

ค) 90 นาที

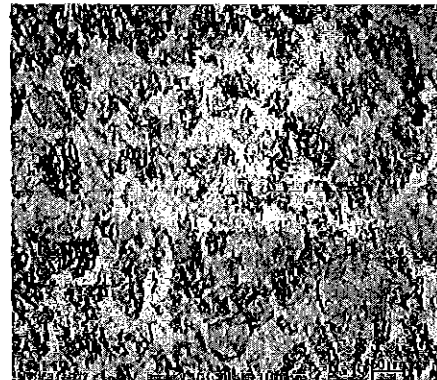
ง) 120 นาที

จากรูปที่ 4.35 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่างกัน ดังรูปที่ 4.35 ก) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนตัว โครงสร้างประกอบด้วยเฟส เฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ สลับกันในโครงสร้างคือจะพบว่า โครงสร้างมีเกรนสีขาวสลับกับเกรนสีดำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่เวลา 60 นาที ดังรูปที่ 4.35 ข) 90 นาที ดังรูปที่ 4.35 ค) และ 120 นาที ดังรูปที่ 4.35 ง) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลาต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นบริเวณสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นบริเวณชั้นๆ สีดำ บริเวณสีขาวจะมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

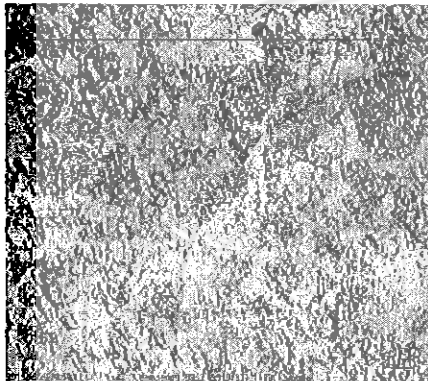
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้ระยะเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็น เฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะที่เหมือนกันเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ แต่ลักษณะของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35



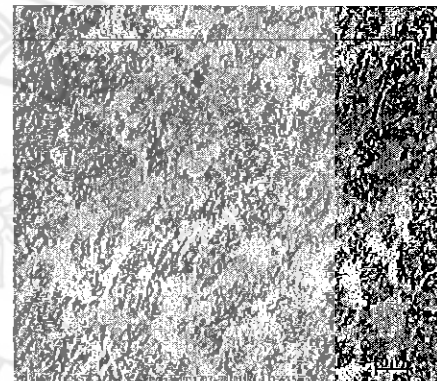
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.35** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา

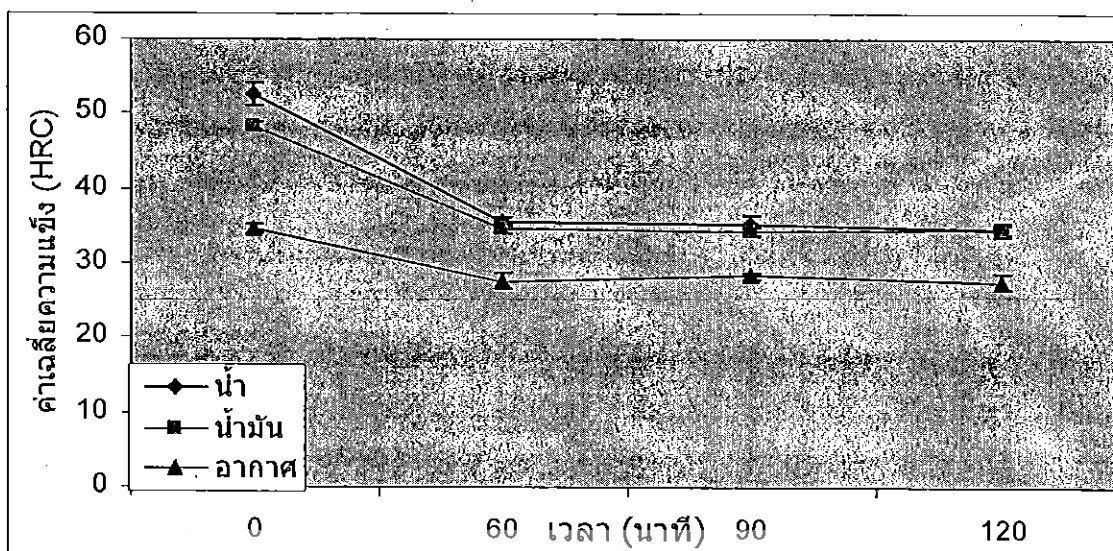
- ก) 0 นาที
- ข) 60 นาที
- ค) 90 นาที
- ง) 120 นาที

#### 4.3.3.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 4140 ที่อบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคืนตัวต่างกันจะได้แผนภูมิ ดังรูปที่ 4.36 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกันแม้ระยะเวลาการอบคืนตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำภายหลังจากอบคืนตัว 39.60 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังจากอบคืนตัว 38.60 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังจากอบคืนตัว 29.60 HRC

**ตารางที่ 4.6** ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่ต่างกัน

เวลา (นาที)	ตัวกลาง	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
		น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0		52.66	48.33	34.66
60		35.66	34.66	27.66
90		35.33	34.33	28.33
120		34.66	34.66	27.66
	ค่าเฉลี่ย	39.60	38.00	29.60

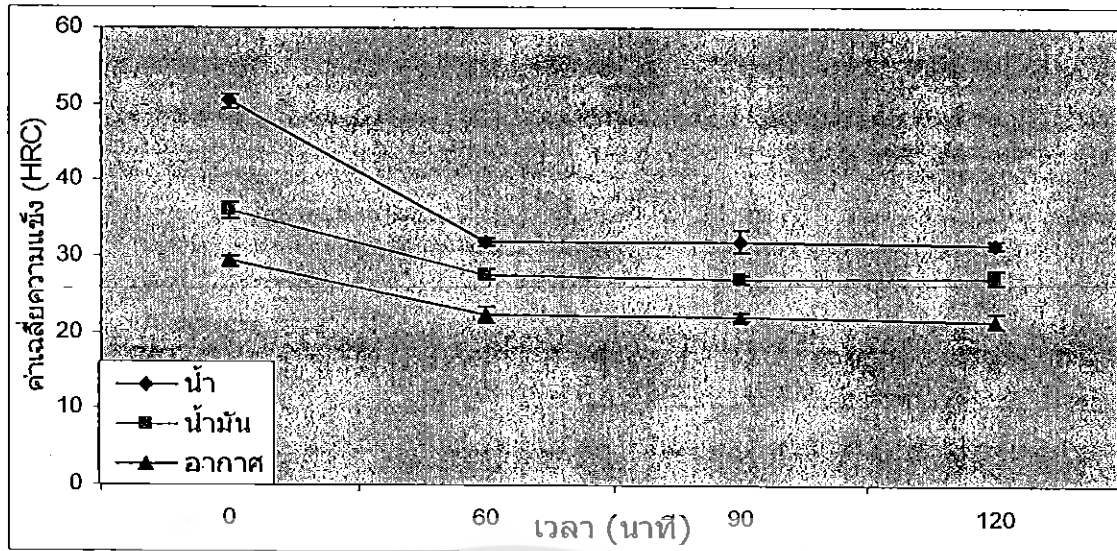


รูปที่ 4.36 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ที่อบคืนตัวที่ 600 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่สัมพันธ์เวลาอบคืนตัวต่างกันจะได้แผนภูมิ ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวมีค่าใกล้เคียงกันแม้ระยะเวลาการอบคืนตัวต่างกัน โดยค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบน้ำภายหลังการอบคืนตัว 36.50 HRC ชิ้นงานที่ชุบน้ำมันภายหลังการอบคืนตัว 29.50 HRC และชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศภายหลังการอบคืนตัว 23.83 HRC

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่แตกต่างกัน

		ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
		น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
เวลา (นาที)	ตัวกลาง			
	0	50.33	36	29.33
	60	32	27.66	22.33
	90	32	27	22
	120	31.66	27.33	21.66
	ค่าเฉลี่ย	36.50	29.50	23.83



รูปที่ 4.37 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคั้นตัวที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในตัวกลางที่ต่างกัน และในเวลาที่ต่างกัน

จากค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคั้นตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการอบคั้นตัวที่ต่างกัน คือ 60, 90 และ 120 นาที จะพบว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการอบคั้นตัวที่เพิ่มขึ้นค่าความแข็งที่ได้จะลดลงเล็กน้อยเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน เพราะว่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการอบคั้นตัวเพิ่มขึ้น แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในการอบคั้นตัวช่วยในการลดความเครียดของชิ้นงาน ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าลดลง และชิ้นงานที่มีค่าความแข็งที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคั้นตัว เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็นมาเทนไซต์ จึงมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งที่ได้จึงสูง และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่า การเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลอง ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

สรุปการเปรียบเทียบการอบคั้นตัวของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่อุณหภูมิเท่ากัน ในตัวกลางต่างกัน แต่ระยะเวลาในการอบคั้นตัวต่างกัน ตามระยะเวลาที่ได้เลือกใช้ ในการทดลองนี้ คือ 60, 90 และ 120 นาที ผลที่ได้จากการทดลองโครงสร้างทางจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงานไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าระยะเวลาที่เลือกใช้ในการอบคั้นตัวยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับโครงงานเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140 ของนายวทีญญู อรรถภาเวช นายสมศักดิ์ โพธิสุวรรณ และนางสาวสุภัก จำรัสทอง และยังสอดคล้องกับโครงงานของเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคั้นตัวของเหล็ก AISI 1045 ของนายพิชญ ลอ และนายริม บุญปอง

### 4.3.4 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที

#### 4.3.4.1 โครงสร้างทางจุลภาค

จากรูปที่ 4.38 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆกัน เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.38 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.38 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.38 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ ละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.38 ค) และรูปที่ 4.38 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.38 ข) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว รูปที่ 4.38 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า และสม่ำเสมอมากกว่า

จากรูปที่ 4.39 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆกัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.39 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.39 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.39 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.39 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.39 ข) และรูปที่ 4.39 ค) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว รูปที่ 4.39 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีโครงสร้างที่ละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่คล้ายกันคือโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ เหมือนกัน เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้น เพราะว่าการอบคืนตัวจะช่วยลดความเครียดภายในชิ้นงาน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานพยายามปรับตัวให้เกิดสมดุลมากที่สุด โครงสร้างที่ได้จึงมีลักษณะที่ละเอียดขึ้น

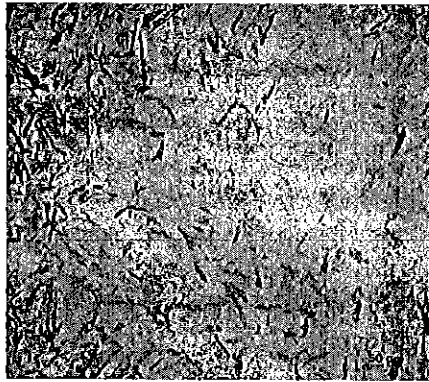
จากรูปที่ 4.40 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆกัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.40 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.40 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.40 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆโดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง แต่ใน รูปที่ 4.40 ค) และรูปที่ 4.40 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.40 ข) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว



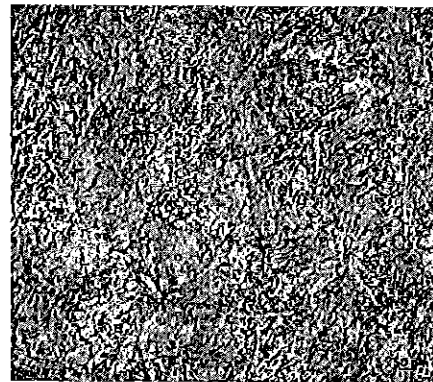
ดังรูปที่ 4.40 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีโครงสร้างละเอียด และสม่ำเสมอกว่า โครงสร้างลักษณะเป็นโครงข่ายสีดำจะหายไปภายหลังการอบคืนตัว

จากรูปที่ 4.41 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆกัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.41 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.41 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.41 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอไรต์ และเพิร์ลไลต์ ลักษณะเป็น 2 เฟสจะแยกกันอย่างชัดเจน โดยเฟสเฟอไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำจะ พบว่าในส่วนของสีขาวจะอยู่ตามขอบเกรน และมีเข็มแหลมๆ แทรกอยู่ในโครงสร้างด้วยคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง แต่ใน รูปที่ 4.41 ข) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.41 ค) และรูปที่ 4.41 ง) และจะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.41 ก)

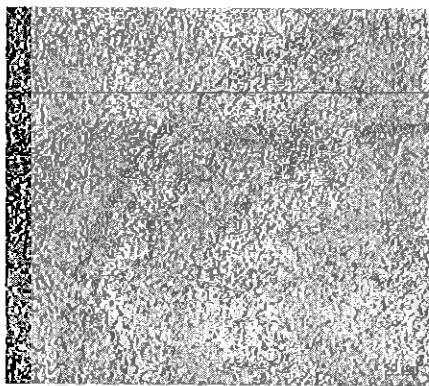
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 ที่ชุบแข็งในน้ำมันแล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของ ทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอไรต์ และ เพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมันที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41



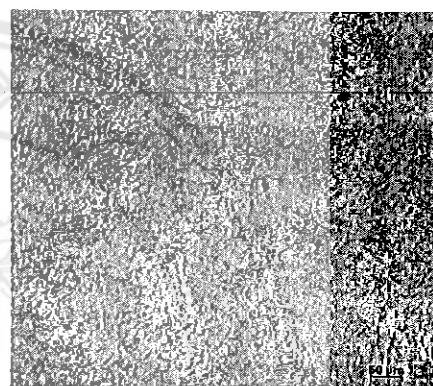
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.38** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวระยะเวลา

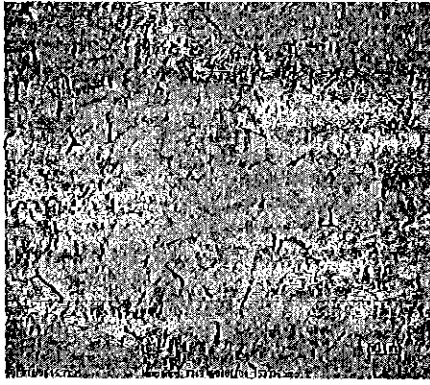
60 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

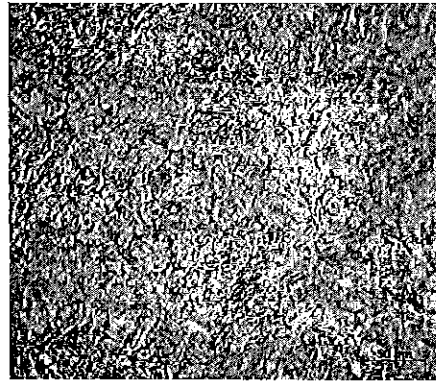
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

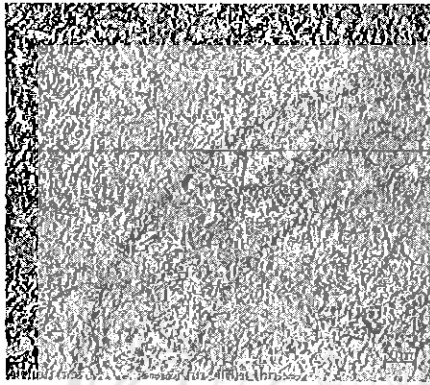
ง) 600 องศาเซลเซียส



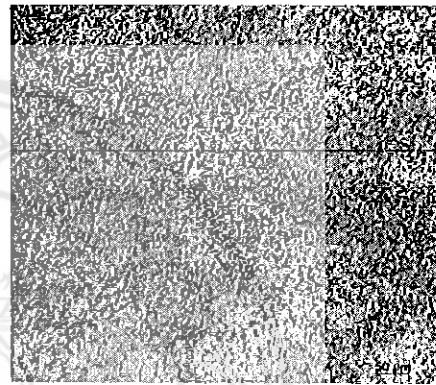
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.39** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวระยะเวลา

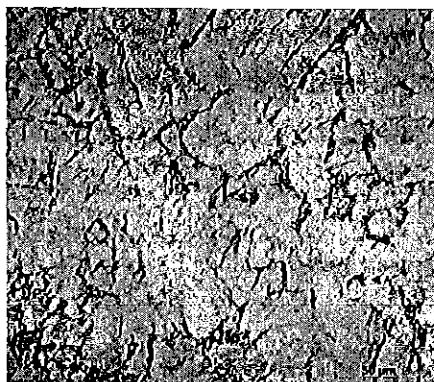
60 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

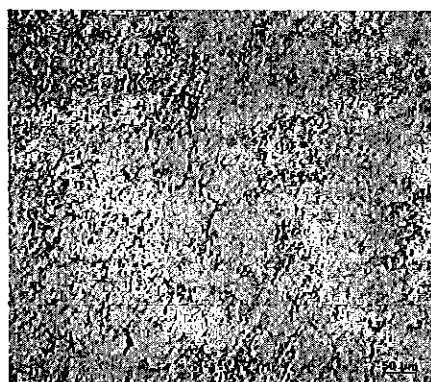
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

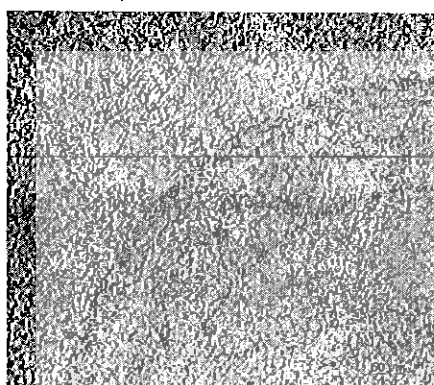
ง) 600 องศาเซลเซียส



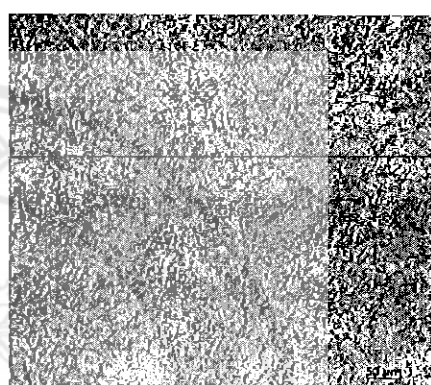
ก)



ข)



ค)



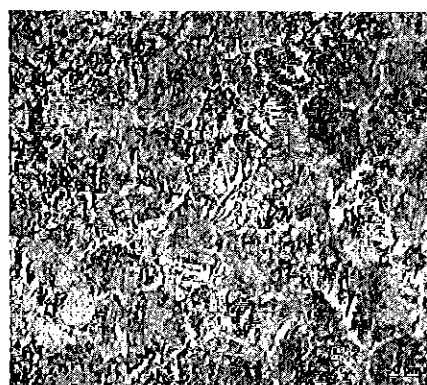
ง)

**รูปที่ 4.40** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ

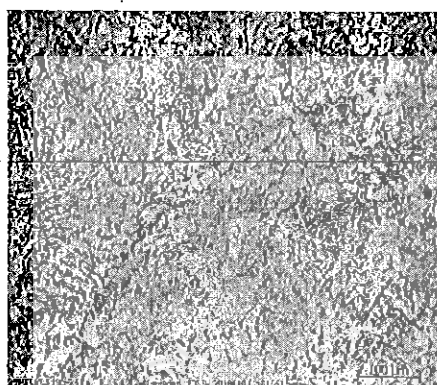
- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส



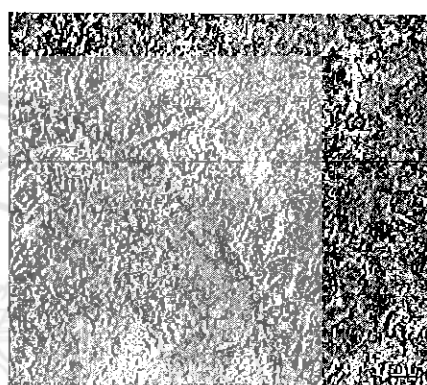
ก)



ข)



ค)



ง)

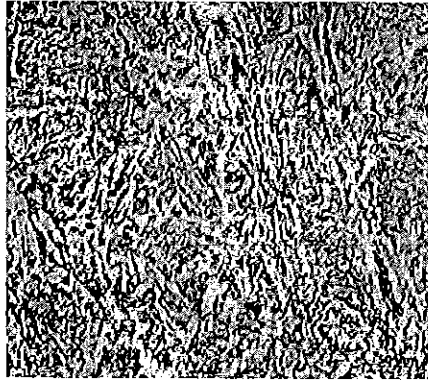
**รูปที่ 4.41** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ

- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส

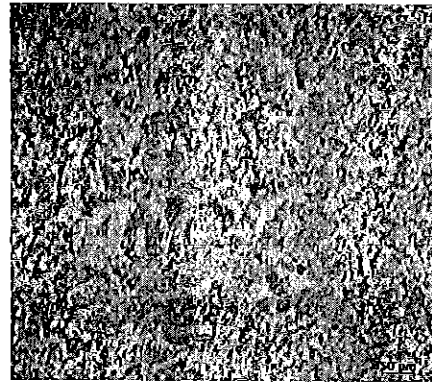
จากรูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.42 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.42 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.42 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ลักษณะจะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยเป็นเฟสเฟอร์ไรต์สลับกับเพิร์ลไลต์ แต่ไม่ได้แยกตัวกันชัดเจนในลักษณะเป็นเกรน แต่ใน รูปที่ 4.42 ค) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.42 ข) และรูปที่ 4.42 ง) และชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวทุก ชิ้น จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.42 ก)

จากรูปที่ 4.43 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วย อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.43 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.43 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.43 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยเฟส เฟอร์ไรต์จะเป็นบริเวณที่มีสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นบริเวณชั้นๆ สีดำ และบริเวณสีขาวจะมี ขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

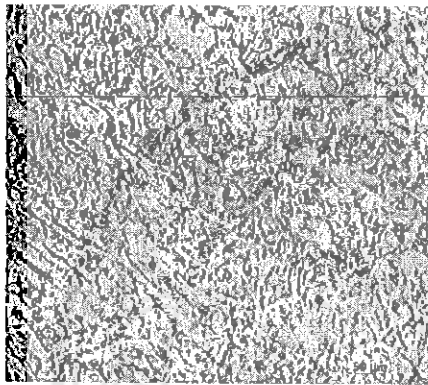
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทาง จุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามอุณหภูมิในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้าง ทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืน ตัวที่ระยะเวลา 60 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ แต่ลักษณะ การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการ เย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43



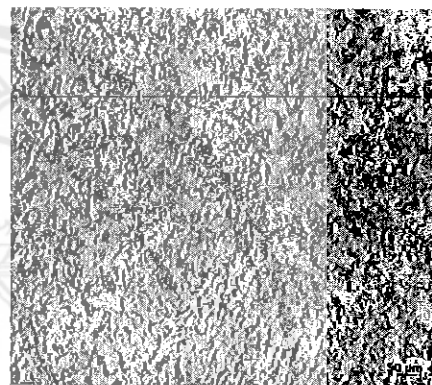
ก)



ข)



ค)



ง)

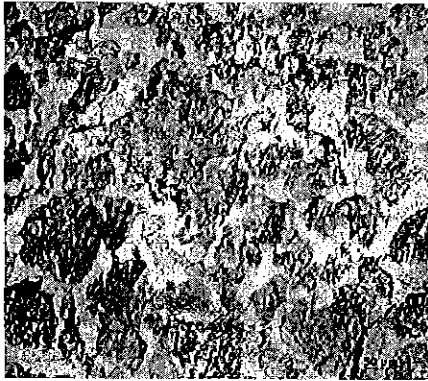
**รูปที่ 4.42** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

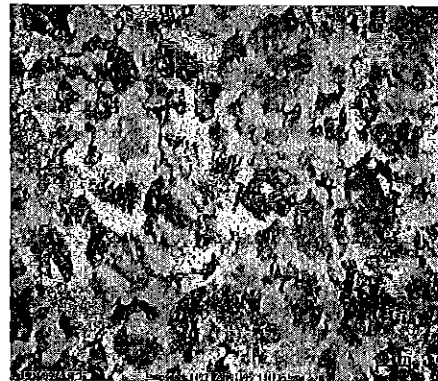
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

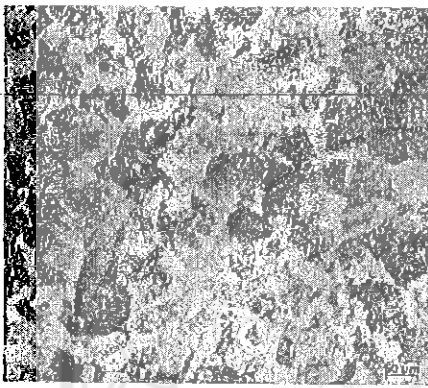
ง) 600 องศาเซลเซียส



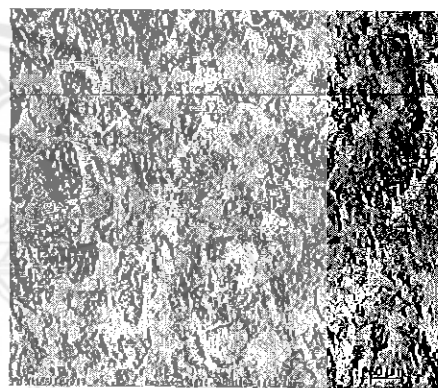
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.43** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคั้นตัว  
ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคั้นตัว

ข) 400 มิลลิกรัม

ค) 500 มิลลิกรัม

ง) 600 มิลลิกรัม

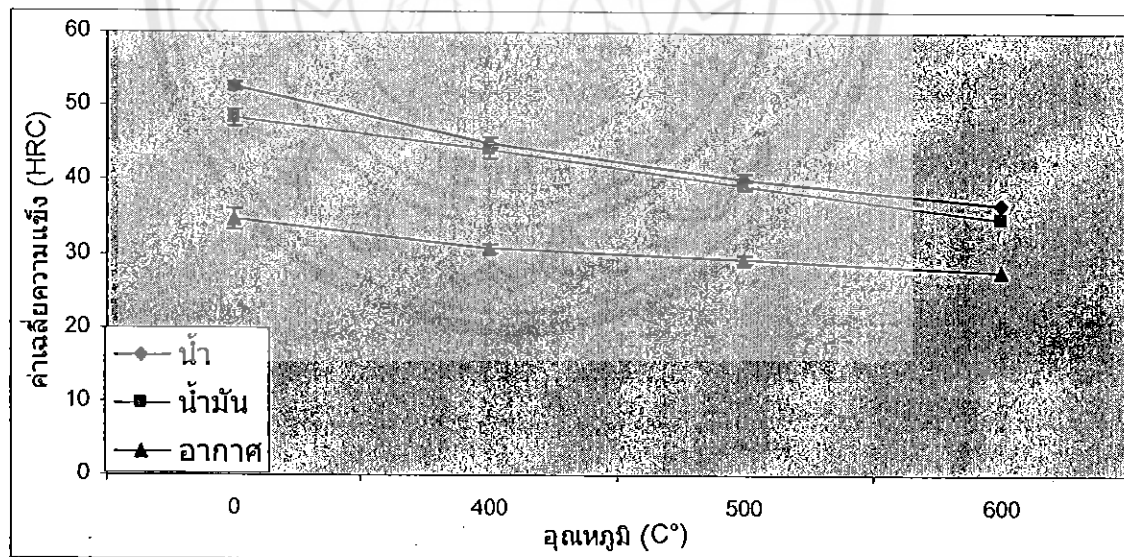


#### 4.3.4.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 60 นาที

จากตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 4140 อบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่อบคืนตัวจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.44 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที

อุณหภูมิ อบคืนตัว (C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	52.66	48.33	34.66
400	45	44	30.66
500	40	39.33	29.33
600	36.66	34.66	27.66

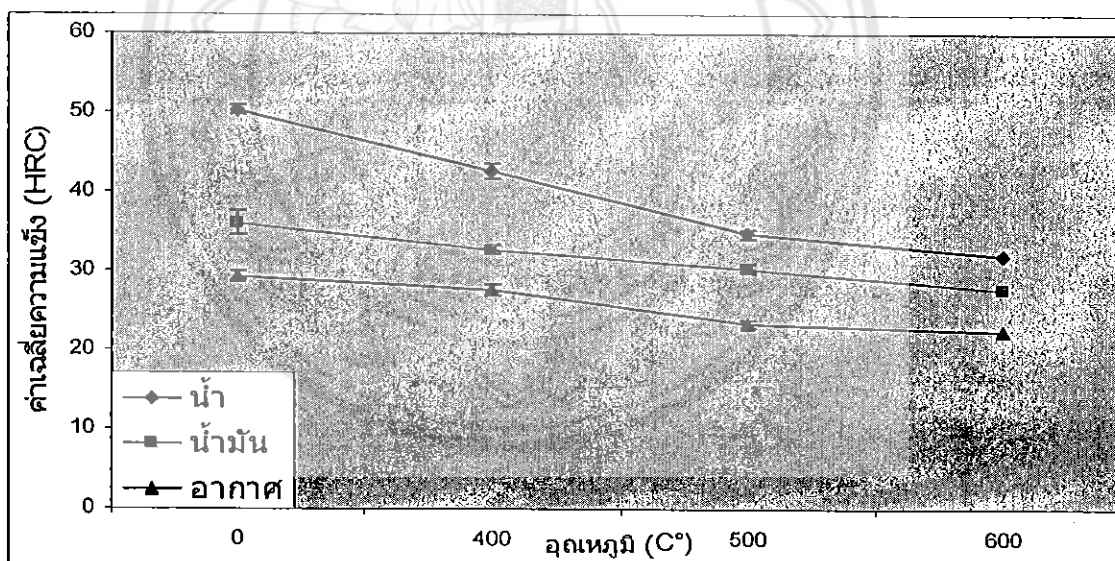


รูปที่ 4.44 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ออบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่อบคืนตัวต่างกันจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.45 จะเห็นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 60 นาที

ตัวกลาง อุณหภูมิ อบคืนตัว(C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	50.33	36	29.33
400	42.66	32.66	27.66
500	34.66	30.33	23.33
600	32	27.66	22.33



รูปที่ 4.45 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน

จากค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงที่ได้จะลดลงเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45 ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด คือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัว

เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็นมาเทนไซด์ จึงมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งที่ได้จึงสูง และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่าการเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลองค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

#### 4.3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที

##### 4.3.5.1 โครงสร้างทางจุลภาค

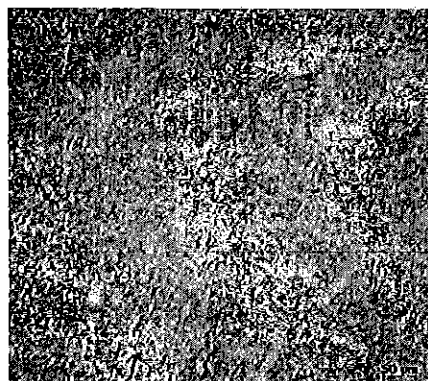
จากรูปที่ 4.46 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.46 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.46 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.46 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กๆ และละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.46 ค) และรูปที่ 4.46 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.46 ข) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.46 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีลักษณะละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า

จากรูปที่ 4.47 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.47 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.47 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.47 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กละเอียดมาก กระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.47 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.47 ข) และในรูปที่ 4.47ค) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.47 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีโครงสร้างที่ละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า

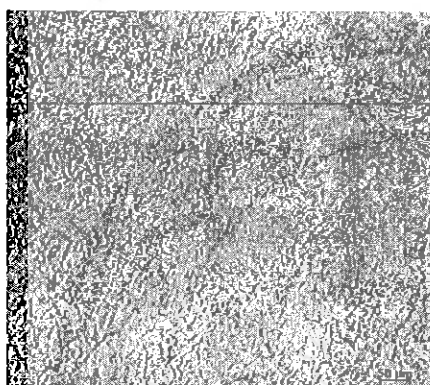
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.46 และรูปที่ 4.47 ที่ชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ ต่างกัน คืออุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานจะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้น ตามอุณหภูมิที่เพิ่มในการอบคืนตัว โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่คล้ายกันโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ เหมือนกัน เพราะว่าการเย็นตัวในน้ำนั้นอัตราการเย็นตัวที่เร็วโครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงานจึงมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.46 และรูปที่ 47



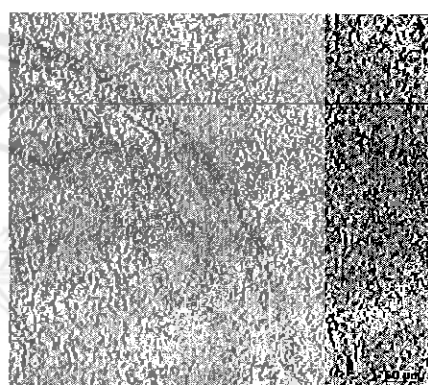
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.46** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวระยะเวลา

90 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

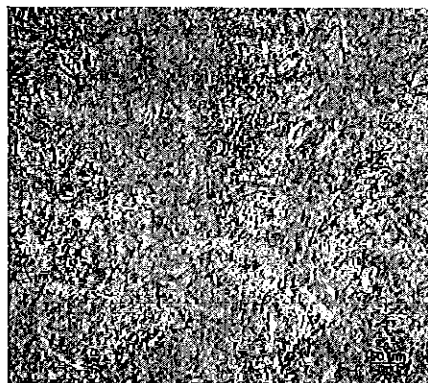
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

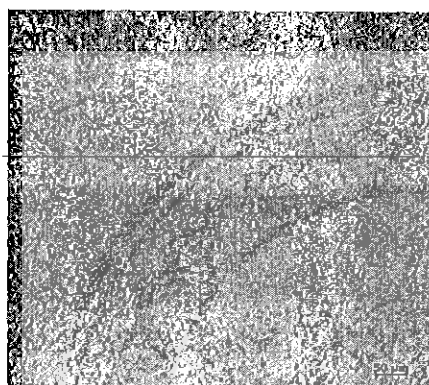
ง) 600 องศาเซลเซียส



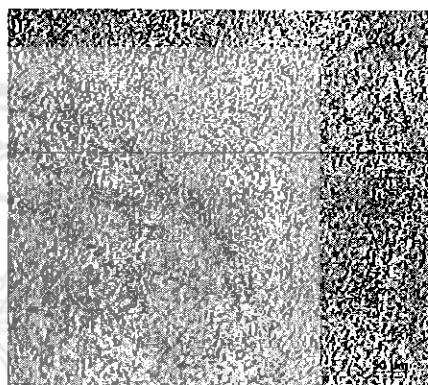
ก)



ข)



ค)



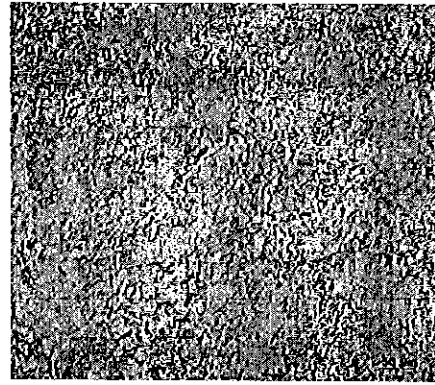
ง)

**รูปที่ 4.47** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ

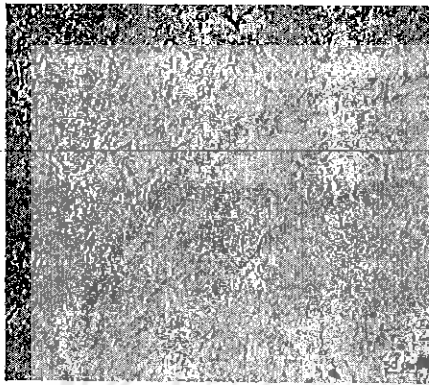
- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส



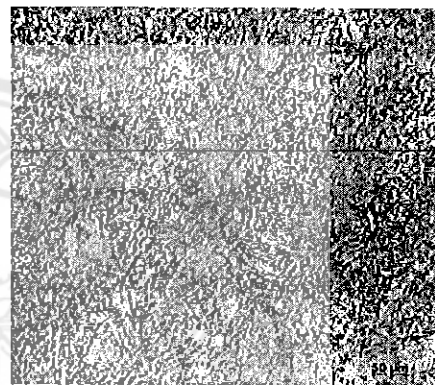
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.48** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

ง) 600 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.48 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.48 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.48 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.48 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง แต่ใน รูปที่ 4.48 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่ารูปที่ 4.48 ข) และรูปที่ 4.48 ค) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.48 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีโครงสร้างที่ละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า นอกจากนี้โครงสร้างที่เป็นลักษณะโครงข่ายสีดำหายไปหลังจากการอบคืนตัว

จากรูปที่ 4.49 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.49 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.49 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.49 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ลักษณะเป็น 2 เฟส จะแยกกันอย่างชัดเจน โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำ จะพบว่าในส่วนของสีขาวจะอยู่ตามขอบเกรน และมีเข็มแหลมๆ แทรกอยู่ในโครงสร้างด้วยคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง แต่ใน รูปที่ 4.49 ข) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.49 ค) และในรูปที่ 4.49 ง) และจะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน ที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.49ก)

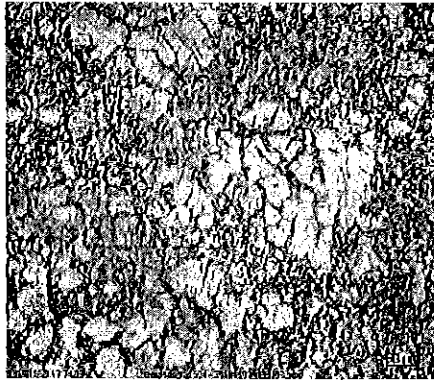
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของ ทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมันที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49

จากรูปที่ 4.50 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.50 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.50 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.50 ง) ที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ ลักษณะจะเป็นเข็มสี่ขาขนาดใหญ่ สลับกับพื้นที่กระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยเป็นเฟอร์ไรต์สลับกับเฟิร์ลไลต์ แต่ไม่ได้แยกตัวกันชัดเจนในลักษณะเป็นเกรน แต่ใน รูปที่ 4.50 ค) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เล็กน้อยเมื่อมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.50 ข) และใน รูปที่ 4.50 ง) และชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนทุกชิ้น จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.50 ก)

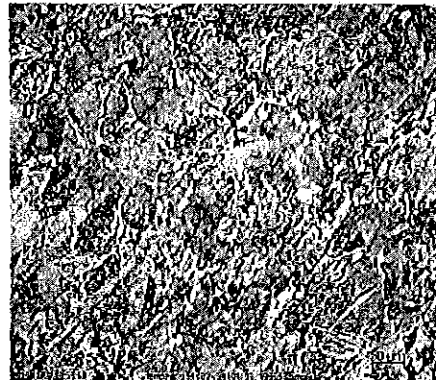
จากรูปที่ 4.51 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.51 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.51 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.51 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นบริเวณสีขาวๆ และในเฟสของเฟิร์ลไลต์เป็นบริเวณชั้นๆ สีดำ บริเวณสีขาวจะมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะเวลาการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.51 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามอุณหภูมิในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ แต่ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด แตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.51

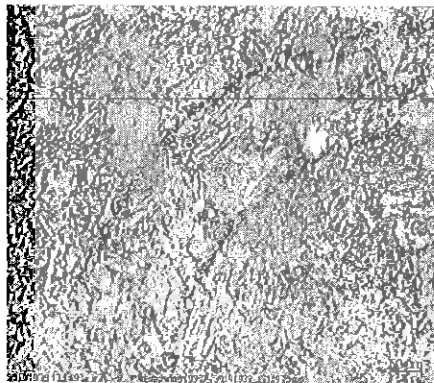




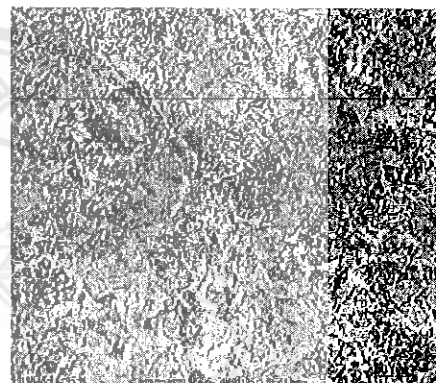
ก)



ข)



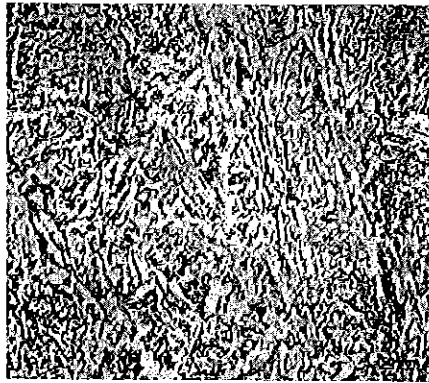
ค)



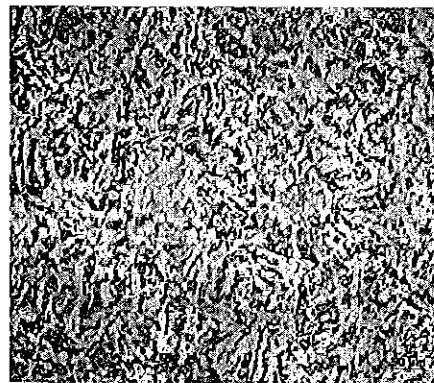
ง)

**รูปที่ 4.49** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ

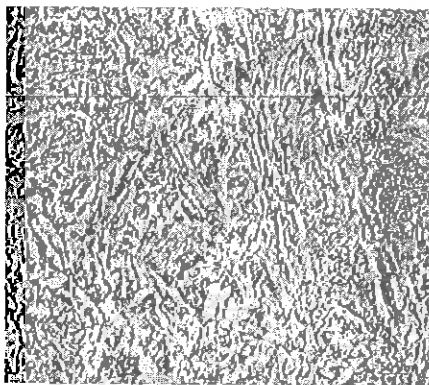
- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส



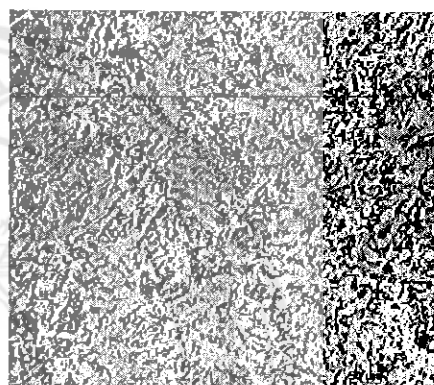
ก)



ข)



ค)



ง)

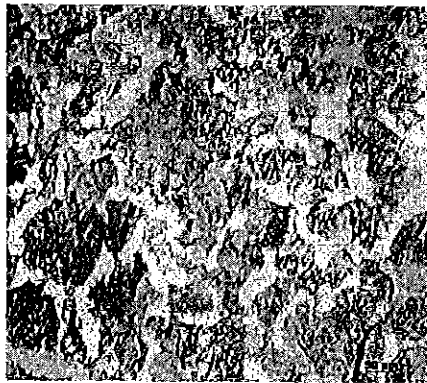
รูปที่ 4.50 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

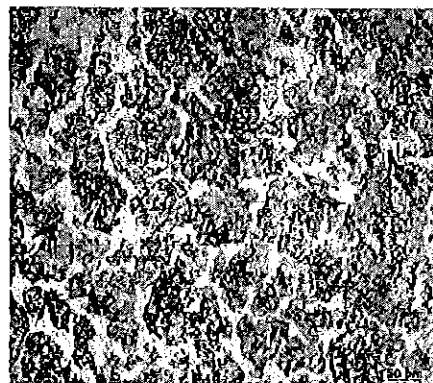
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

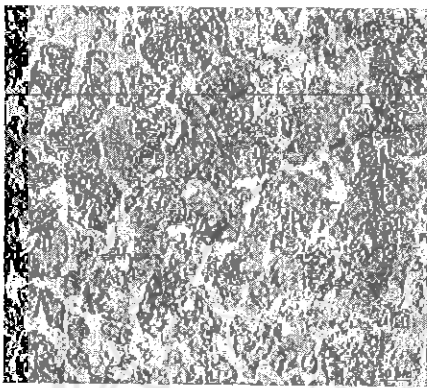
ง) 600 องศาเซลเซียส



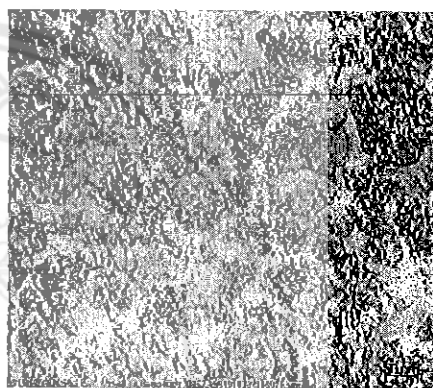
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.51 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคินตัว  
ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ

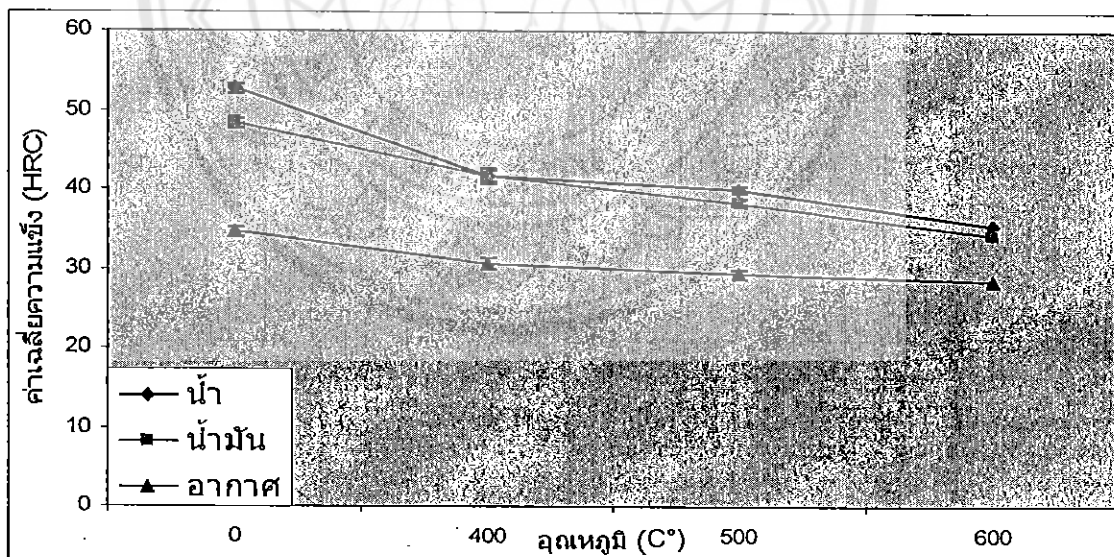
- ก) ไม่อบคินตัว
- ข) 400 มิลลิกรัม
- ค) 500 มิลลิกรัม
- ง) 600 มิลลิกรัม

#### 4.3.5.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 90 นาที

จากตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 4140 ที่อบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาที่อบคืนตัวจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.52 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 90 นาที

อุณหภูมิ อบคืนตัว (C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	52.66	48.33	34.66
400	41.66	41.66	30.66
500	40	38.33	29.33
600	35.33	34.33	28.33

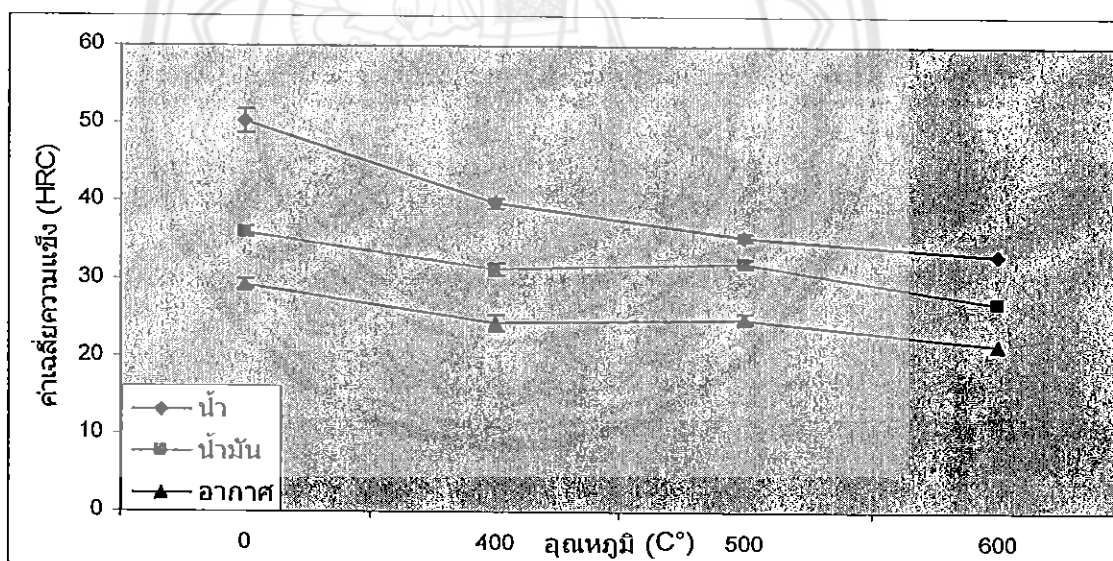


รูปที่ 4.52 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ที่อบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาอบคืนตัวจะได้ดังแผนภาพ ดังรูปที่ 4.53 จะเห็นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวจะมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 90 นาที

อุณหภูมิ อบคืนตัว (C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	50.33	36	29.33
400	39.66	31.33	24.33
500	35.33	32	25
600	33	27	21.66



รูปที่ 4.53 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน

จากค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงที่ได้จะลดลงเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.53 ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัว

เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็นมาเทนไซด์ จึงมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งที่ได้จึงสูง ชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่าการเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลอง ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

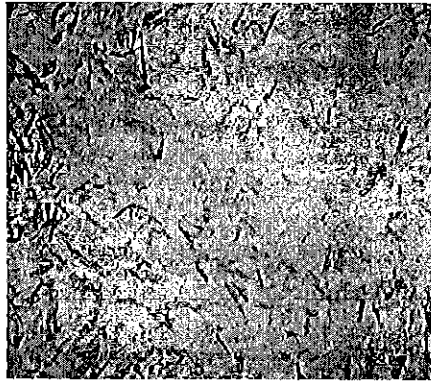
#### 4.3.6 ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที

##### 4.3.6.1 โครงสร้างทางจุลภาค

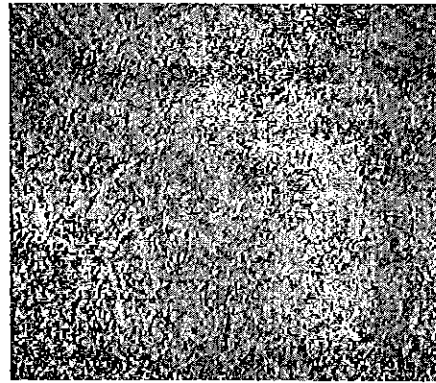
จากรูปที่ 4.54 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.54 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.54 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.54 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กๆ ละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.54 ค) และใน รูปที่ 4.54 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.54 ข) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนชิ้นงานที่ไม่อบคืนตัว ดังรูปที่ 4.54 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีลักษณะที่ละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า

จากรูปที่ 4.55 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.55 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.55 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.55 ง) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มจะเล็กละเอียดมากกระจายตัวทั่วไป และมีในส่วนของสีขาวแทรกอยู่ในโครงสร้างบ้าง แต่ใน รูปที่ 4.55 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.55 ข) และรูปที่ 4.55 ค) เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.55 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวจะมีลักษณะที่ละเอียด และสม่ำเสมอมากกว่า

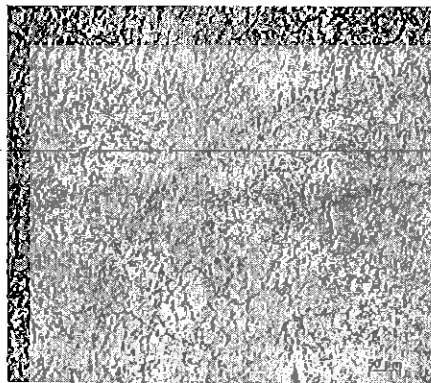
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.54 และรูปที่ 4.55 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นโครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้น ตามอุณหภูมิที่เพิ่มในการอบคืนตัว โครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ เหมือนกัน เพราะว่าการเย็นตัวในน้ำนั้นอัตราการเย็นตัวที่เร็วโครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงานจึงมีลักษณะดังรูปที่ 4.54 และรูปที่ 4.55



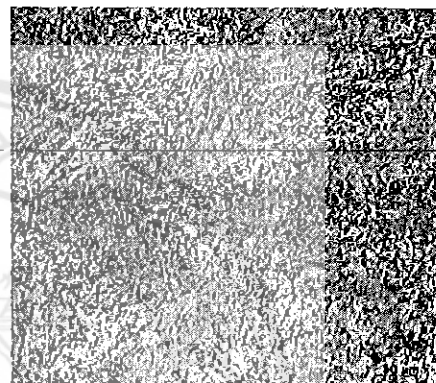
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.54** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาบดคั้นตัวระยะเวลา

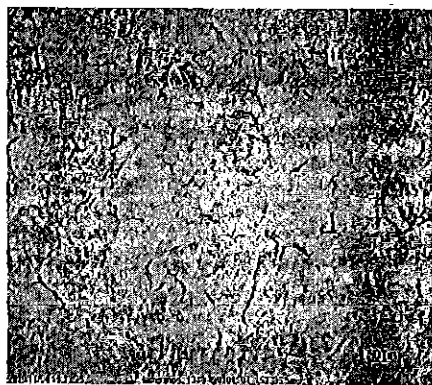
120 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคั้นตัว

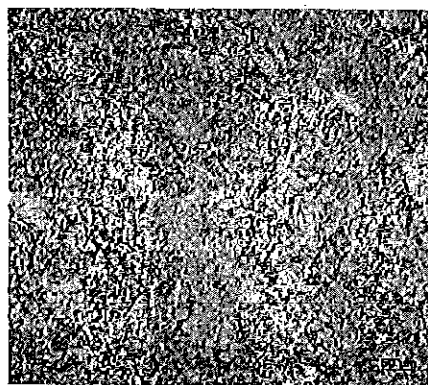
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

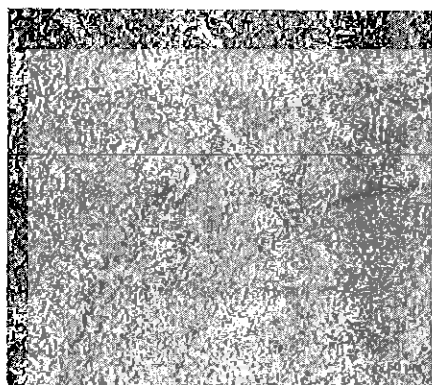
ง) 600 องศาเซลเซียส



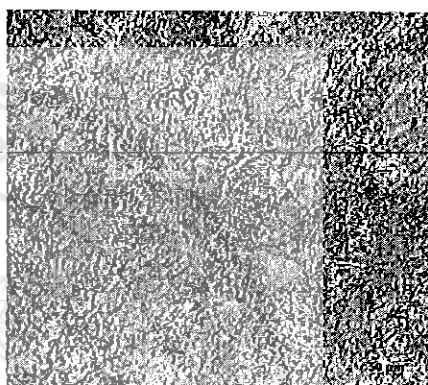
ก)



ข)



ค)



ง)

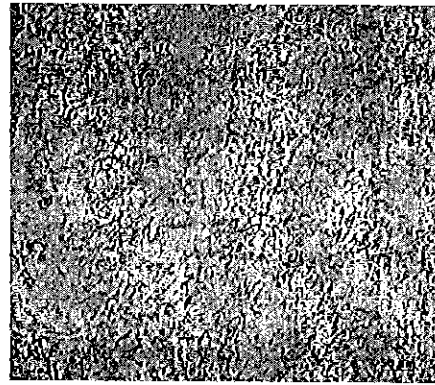
รูปที่ 4.55 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำ แล้วนำมาอบคืนตัวระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ

- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส

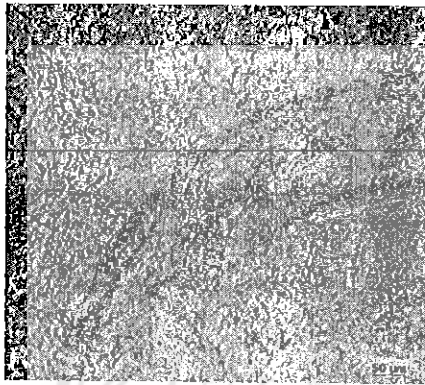




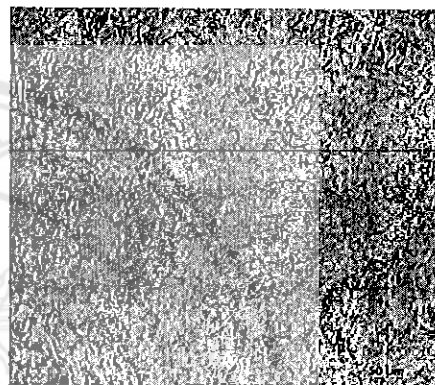
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.56 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

ง) 600 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.56 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.56 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.56 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.56 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ กันพบว่า มีโครงสร้างคล้ายกัน โดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ ลักษณะคล้ายรูปเข็มเล็กๆ โดยกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง แต่ใน รูปที่ 4.56 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า รูปที่ 4.56 ข) และรูปที่ 4.56 ค) และเมื่อมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.50 ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว จะมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ละเอียด และสม่ำเสมอว่า นอกจากนี้โครงสร้างในลักษณะที่เป็นโครงข่ายสีดำหายไปภายหลังการอบคืนตัว

จากรูปที่ 4.57 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวด้วย อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.57 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.57 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.57 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิที่ต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกันโดยโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ ลักษณะเป็น 2 เฟส จะแยกกันอย่างชัดเจน โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเฟิร์ลไลต์เป็นพื้นเป็นชั้นๆ สีดำ จะพบว่าในส่วนของสีขาวจะอยู่ตามขอบเกรน และมีเข็มแหลมๆ แทรกอยู่ในโครงสร้างด้วย แต่ใน รูปที่ 4.57 ข) จะมีลักษณะละเอียดกว่าเล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.57 ค) และรูปที่ 4.57 ง) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.57 ก)

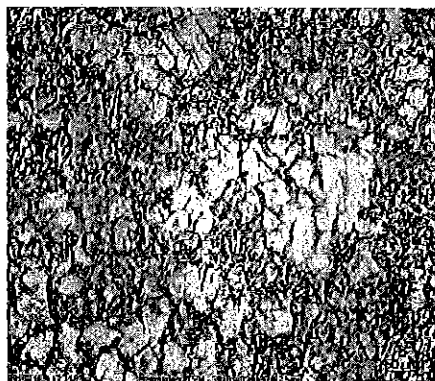
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ในรูปที่ 4.56 และรูปที่ 4.57 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของ ทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้เป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเฟิร์ลไลต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกันเพราะว่าตัวกลางในการเย็นตัวเป็นน้ำมันที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.56 และรูปที่ 4.57

จากรูปที่ 4.58 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.58 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.58 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.58 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่

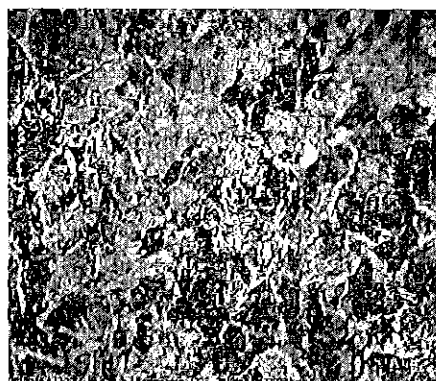
อุณหภูมิที่ต่างๆ กัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ ลักษณะจะเป็นเข็มสีขาวขนาดใหญ่สลับกับพื้นสีดำกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยเฟสเฟอร์ไรต์สลับกับเพิร์ลไรต์ แต่ไม่ได้แยกตัวกันชัดเจนในลักษณะเป็นเกรน แต่ใน รูปที่ 4.58 ค) จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เล็กน้อยเมื่อมาเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.58 ข) และรูปที่ 4.58 ง) และชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวทุกชิ้น จะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.58 ก)

จากรูปที่ 4.59 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.59 ข) 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.59 ค) และ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.59 ง) ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิที่ต่างๆ พบว่ามีโครงสร้างที่คล้ายกัน โครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ คือ ลักษณะเป็น 2 เฟส อย่างเห็นได้ชัด โดยเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นพื้นสีขาวๆ และเฟสของเพิร์ลไรต์เป็นพื้น ซ้ำๆ สีดำ บริเวณสีขาวจะมีลักษณะเล็กกลวง เมื่อระยะเวลาการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านการ อบคืนตัวทุกชิ้นจะมีลักษณะที่ละเอียดกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว ดังรูปที่ 4.59 ก)

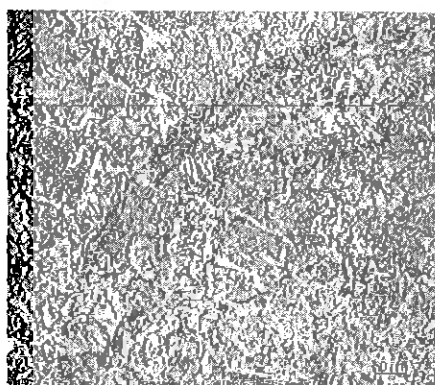
จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ใน รูปที่ 4.58 และรูปที่ 4.59 ที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงาน จะมีลักษณะที่ละเอียดขึ้นตามอุณหภูมิในการอบคืนตัวที่ เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะเป็น เฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือเป็นโครงสร้าง ของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไรต์ แต่ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแตกต่างกัน เพราะว่าตัวกลาง ในการเย็นตัวเป็นอากาศที่มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในน้ำ และในน้ำมัน และ ส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างทางจุลภาคของทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะ การจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.58 และรูปที่ 4.59



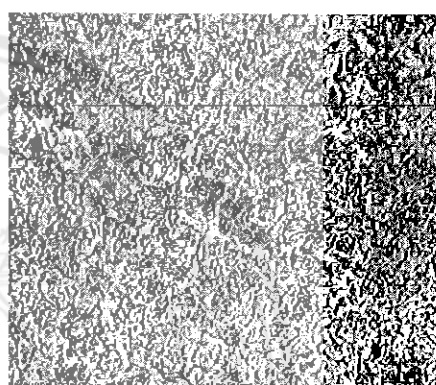
ก)



ข)



ค)



ง)

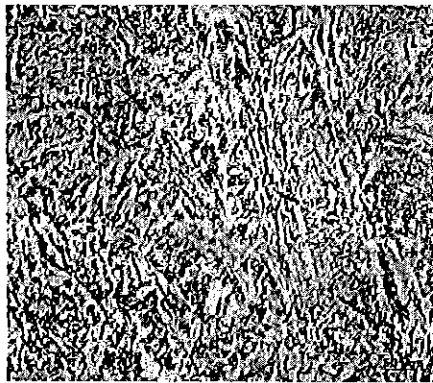
**รูปที่ 4.57** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่ชุบแข็งในน้ำมัน แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

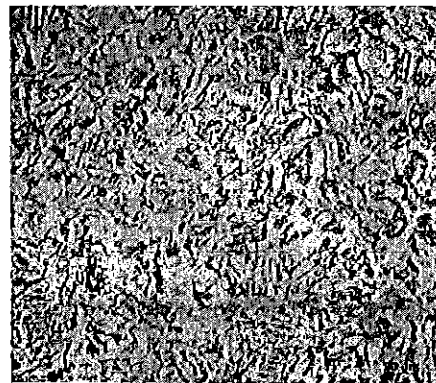
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

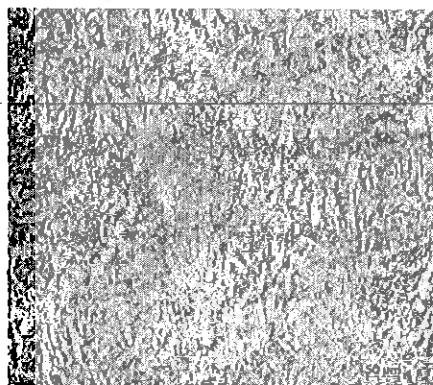
ง) 600 องศาเซลเซียส



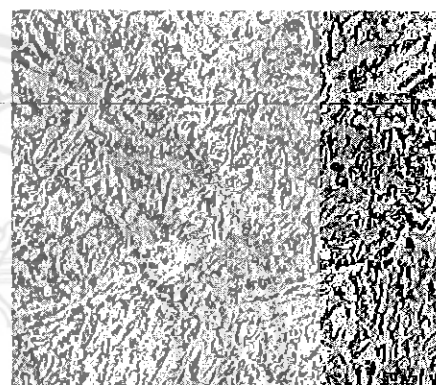
ก)



ข)



ค)



ง)

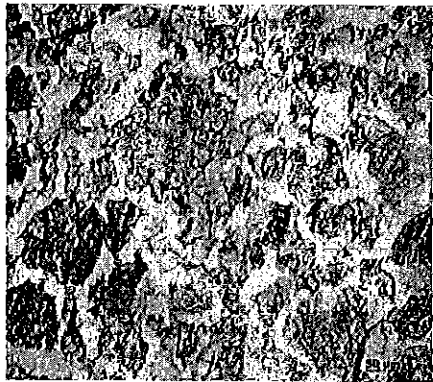
รูปที่ 4.58 โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 4140 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ

ก) ไม่อบคืนตัว

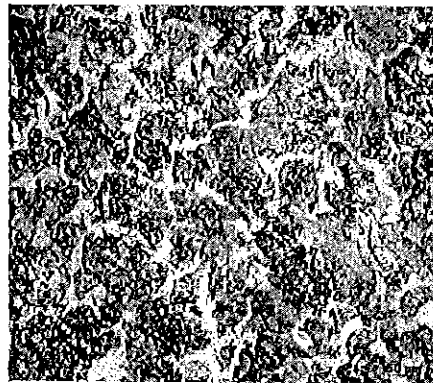
ข) 400 องศาเซลเซียส

ค) 500 องศาเซลเซียส

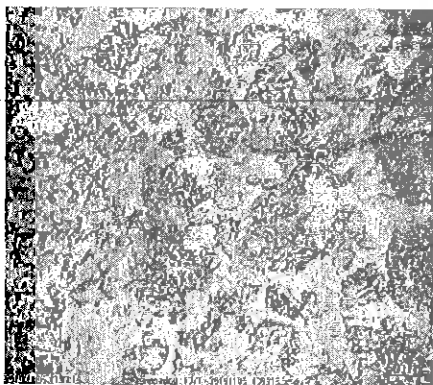
ง) 600 องศาเซลเซียส



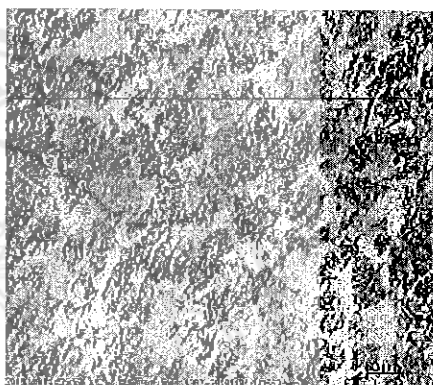
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 4.59** โครงสร้างทางจุลภาคของ AISI 1045 ที่เย็นตัวในอากาศ แล้วนำมาอบคืนตัว  
ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ

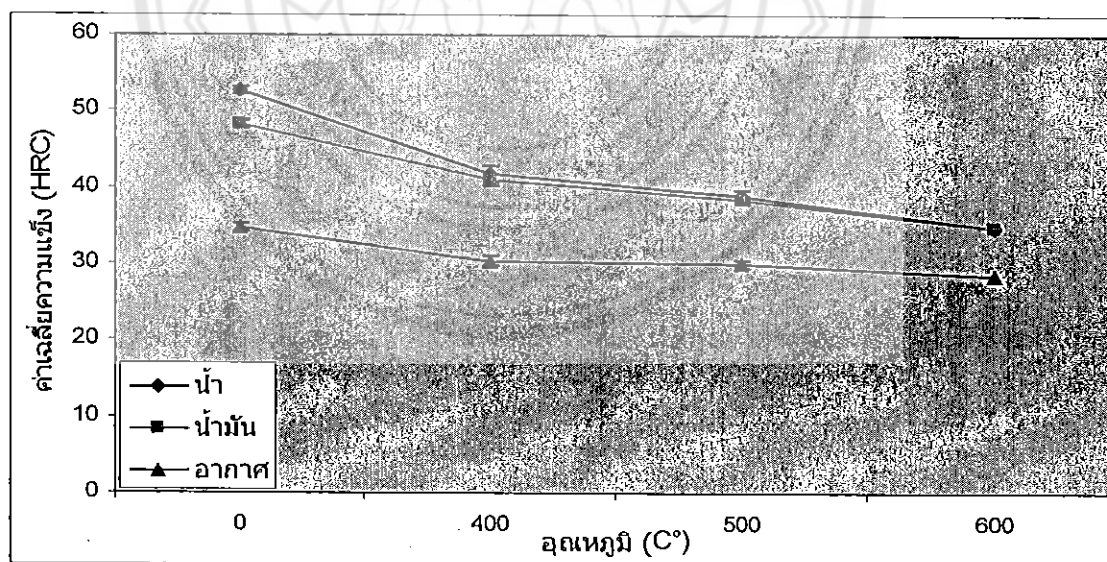
- ก) ไม่อบคืนตัว
- ข) 400 องศาเซลเซียส
- ค) 500 องศาเซลเซียส
- ง) 600 องศาเซลเซียส

#### 4.3.6.2 ผลความแข็งของ AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นระยะเวลา 120 นาที

จากตารางที่ 4.13 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน AISI 1045 ที่อบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยดังกล่าวกับเวลาอบคืนตัวจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.60 จะเห็นค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัว และเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 120 นาที

ตัวกลาง อุณหภูมิ อบคืนตัว (C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	52.66	48.33	34.66
400	41.66	41	30.33
500	39	38.33	30
600	34.66	34.66	28.33

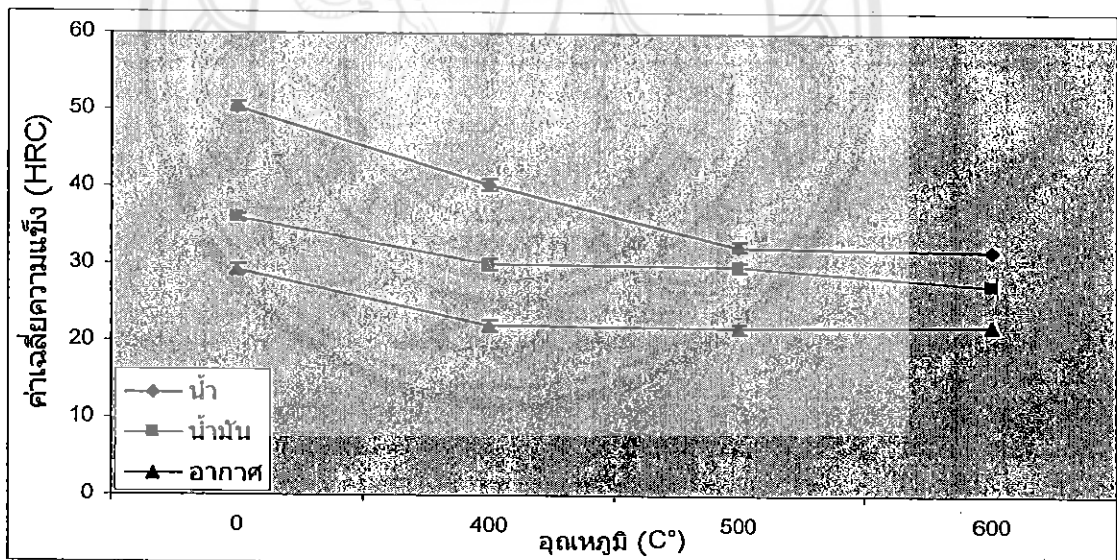


รูปที่ 4.60 ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน AISI 1045 ที่อบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที และเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดังกล่าวกับเวลาอบคืนตัวจะได้แผนภาพ ดังรูปที่ 4.61 จะเห็นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานภายหลังการอบคืนตัวจะมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวเป็นเวลา 120 นาที

อุณหภูมิ อบคืนตัว (C°)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรง (HRC)		
	น้ำ	น้ำมัน	อากาศ
0	50.33	36	29.33
400	40.33	30	22
500	32.33	29.66	21.66
600	31.66	27.33	22



รูปที่ 4.61 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็ก AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที ในตัวกลางที่ต่างกัน และในอุณหภูมิที่ต่างกัน



จากค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่ระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้จะลดลงเหมือนกันทั้ง 2 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.60 และรูปที่ 4.61 ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งที่สูงที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งในน้ำแล้วนำมาอบคืนตัว เพราะว่าชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำโครงสร้างที่ได้เป็นมาเทนไซด์ จึงมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วค่าความแข็งที่ได้จึงสูง และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ เพราะว่า การเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้าที่สุดในตัวกลางที่นำมาทดลอง ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าที่ต่ำที่สุด

สรุปการเปรียบเทียบการอบคืนตัวของชิ้นงาน AISI 4140 และ AISI 1045 ที่ผ่านการอบชุบแข็งในตัวกลางต่างๆ ที่ใช้ ระยะเวลาในการอบคืนตัวเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกันตามอุณหภูมิที่ได้เลือกใช้ในการทดลองนี้ คือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการทดลองโครงสร้างละเอียดขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งลดลงตามระยะเวลาในการอบคืนตัวที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของการอบคืนตัวจะพยายามทำให้ โครงสร้างเกิดสมดุลเกิดขึ้นในโครงสร้าง เพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน เพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงาน และลดความเครียดภายในชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกันเมื่อให้ตัวกลางการการเย็นตัวที่ต่ำ เพราะว่าโครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวจึงทำให้โครงสร้างแตกต่างกัน และส่วนผสมของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิด แตกต่างกันจึงมีผลทำให้โครงสร้างของทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับโครงการงานเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140 ของนายวาทัญญู อรรถาเวช นายสมศักดิ์ โพธิ์สุวรรณ และนางสาวสุภัค จำรัสทอง และยังสอดคล้องกับโครงการงานของเรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวของเหล็ก AISI 1045 ของนายพิชญ์ ลอ และนายริม บุญปอง

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาการปัจจัยในการชุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และค่าความแข็งของ เหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 หลังการอบชุบในน้ำ น้ำมัน และอากาศ ได้ข้อสรุปดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน แต่ใน เหล็ก AISI 4140 มีธาตุโครเมียม ซิลิกอน และโมลิบดีนัม ซึ่งเป็นธาตุที่เพิ่มเสถียรภาพให้แก่เฟอร์ไรต์ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคก่อนการชุบแข็งของ AISI 4140 มีการกระจายตัวของเฟอร์ไรต์ปะปนอยู่ กับเฟิร์ลไลต์ทั่วทั้งโครงสร้าง ส่วนเหล็ก AISI 1045 ที่ไม่มีธาตุดังกล่าวผสมอยู่ พบว่าโครงสร้าง เฟอร์ไรต์จะอยู่บริเวณขอบเกรนของเฟิร์ลไลต์

5.1.2 จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคภายหลังการชุบแข็งของชิ้นงานเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 เมื่อชุบแข็งในน้ำจะได้โครงสร้างเป็นมาเทนไซต์เหมือนกัน เพราะว่าการชุบแข็งในน้ำให้อัตราการเย็นตัวที่เร็วโครงสร้างของทั้ง 2 ชิ้นงาน จึงมีลักษณะคล้ายกัน ส่วนเมื่อชุบแข็งในน้ำมัน AISI 4140 ได้โครงสร้างมาเทนไซต์ ในขณะที่เหล็ก AISI 1045 ได้เพียงโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็ก AISI 4140 ได้รับอิทธิพลจากธาตุโครเมียม ซิลิกอน และโมลิบดีนัม ส่วนการเย็นตัวในอากาศโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กทั้ง 2 ชนิด ได้โครงสร้างคล้ายกัน โดยได้โครงสร้างเป็นเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ เพราะว่าการเย็นตัวในอากาศมีอัตราการเย็นตัวที่ช้า โครงสร้างที่ได้ ภายหลังการชุบแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของตัวกลางในการชุบแข็ง ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดให้อัตราการเย็นตัวแตกต่างกัน โดยน้ำให้อัตราการเย็นตัวเร็วที่สุด รองลงมา น้ำมัน และอากาศตามลำดับ

5.1.3 จากการศึกษาค่าเฉลี่ยความแข็งภายหลังการชุบแข็งของเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 ชิ้นงานที่ชุบแข็งในน้ำของชิ้นงาน AISI 4140 มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่สูงกว่า AISI 1045 เล็กน้อย ส่วนค่าเฉลี่ยความแข็งภายหลังการชุบแข็งในน้ำมันชิ้นงาน AISI 4140 มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงาน AISI 1045 เพราะที่ชิ้นงาน AISI 4140 ส่วนค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานภายหลังการเย็นตัวในอากาศชิ้นงาน AISI 4140 มีค่าเฉลี่ยความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงาน AISI 1045 ซึ่งสอดคล้องตาม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้ของแต่ละชิ้นงาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเหล็กทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการชุบแข็งชนิดเดียวกัน จะพบว่าเหล็ก AISI 4140 จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งสูงกว่าเหล็ก AISI 1045 ทุกสภาวะ

5.1.4 จากการศึกษาการอบคืนตัวภายหลังการชุบแข็งของเหล็ก AISI 4140 และ AISI 1045 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบคืนตัวส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กทั้ง 2 ชนิด โดยเหล็กทั้ง 2 ชนิด ภายหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการอบคืนตัวแตกต่างกัน ผลของโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และเมื่อภายหลังการอบคืนตัวที่ระยะเวลา

เดียวกัน แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคั้นตัวแตกต่างกัน โครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จะแตกต่างกัน ในทุกสภาวะการทดลอง ส่วนค่าความแข็งที่ภายหลังจากการอบคั้นตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการอบคั้นตัวแตกต่างกัน ค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อภายหลังการอบคั้นตัวที่ระยะเวลาเดียวกัน แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคั้นตัวแตกต่างกัน ค่าความแข็งที่ได้จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยในการชุบแข็งในน้ำจะมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมัน และอากาศตามลำดับ ในทุกสภาวะการทดลอง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเพิ่มอุณหภูมิในการอบคั้นตัว เพื่อที่จะได้เห็นความแตกต่างของผลการทดลองที่ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรเพิ่มระยะเวลาในการอบคั้นตัว เพื่อที่จะได้เห็นความแตกต่างของผลการทดลองที่ใช้ระยะเวลาในการอบคั้นตัวชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## 5.3 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 ในการขัดชิ้นงานเพื่อส่งดูโครงสร้างทางจุลภาคควรระมัดระวังในการขัดชิ้นงาน เพราะว่าถ้าใช้แรงกดชิ้นงานมากเกินไปอาจจะทำให้กระดาษทรายที่ใช้ในการขัดชิ้นงานขาดได้ และทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แนวทางการแก้ปัญหาในการขัดชิ้นงานไม่ควรใช้แรงในการกดมากเกินไป ควรมีความระมัดระวังในการทำงาน และไม่ควรเหม่อลอยในการทำงาน

5.3.2 เตาที่ใช้ในการทดลอง ควรใช้เตาเครื่องเดียวกันในการทดลองทั้งหมด เพราะว่าถ้าไม่ใช้เตาเครื่องเดียวกันโครงสร้างทางจุลภาค และค่าความแข็งที่ได้ อาจเกิดการผิดพลาดได้

## เอกสารอ้างอิง

ชาวลิต เชียงกุล. (2547). **โลหะวิทยา** (พิมพ์ครั้งที่5). กรุงเทพฯ ฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

รองศาสตราจารย์มนัส สติรจินดา. (2533). **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**, กรุงเทพฯ ฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

รองศาสตราจารย์มนัส สติรจินดา. (2543). **เหล็กกล้า** (พิมพ์ครั้งที่ 5)

อิทธิพลของธาตุในเหล็กกล้า สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม 2552, จาก [www.machiney.igetweb.com](http://www.machiney.igetweb.com)

Cheng Wuet et al., (2542) **Alloy Steel aisi 4140** สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก [http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy\\_steels/show\\_alloy.cfm?id=aisi\\_4140&prop=all&page\\_title=aisi%204140](http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_steels/show_alloy.cfm?id=aisi_4140&prop=all&page_title=aisi%204140)

Cheng Wuet et al., (2542) **Carbon Steel aisi 1045** สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก [http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?id=aisi\\_1045&prop=all&page\\_title=aisi%201045](http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?id=aisi_1045&prop=all&page_title=aisi%201045)

Kevin et al., (2550) **Materials** สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552, จาก [http://www.physicsarchives.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=596](http://www.physicsarchives.com/index.php?option=com_content&view=article&id=596)

S Paul and R Paul. (2542) **material microstructure** สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552, จาก <http://www.sudeshnapaul.com/material.science/microstructure.html>

K P Shah, (2551) **Micro-constituents/Structures** สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552, จาก <http://practicalmaintenance.net/?p=1315>

Harry Bhadeshia. (2540) **Steel Microstructure** สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552, จาก [http://www.cml.postech.ac.kr/2008/Steel\\_Microstructure/SM2.html](http://www.cml.postech.ac.kr/2008/Steel_Microstructure/SM2.html)

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายเสริมศักดิ์ พลคร  
ภูมิลำเนา 75 หมู่ 5 ต. ซับเปิบ อ. วังโป่ง  
จ. เพชรบูรณ์

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชนแดนวิทยาคม  
จ. เพชรบูรณ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : dear\_mate@hotmail.com



ชื่อ นายปิยพงษ์ กิ่งเส็ง  
ภูมิลำเนา 78/1 หมู่ 12 ต. หล่มเก่า อ. หล่มเก่า  
จ. เพชรบูรณ์

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหล่มเก่า  
พิทยาคม จ. เพชรบูรณ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: tum-ringnoi@hotmail.com