

การศึกษาระบบจัดสีชนิดสามวัตถุของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**THREE - BODY ABRASION WEAR OF AUSTEMPERED
DUCTILE CAST IRON**

Wattanaporn Chonhai



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in metallurgical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

การศึกษาระบบจัดชั้นนิคสามัตถุของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ฐาปนีย์ พชรวิชญ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตติคำธร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.รัตน์ บริสุทธิกุล)

กรรมการ

(อ. ดร.สงบ คำค้อ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วัฒนพร ชนไฮ : การสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของเหล็กหล่อเหนียว
ออสเทมเปอร์ (THREE – BODY ABRASION WEAR OF AUSTEMPERED
DUCTILE CAST IRON) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตกำธร,
88 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเวลาในการอบออสเตนิไทซิงที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ การชุบแข็งออสเทมเปอร์ริงในงานวิจัยนี้เริ่มจากการนำเหล็กหล่อเหนียวไปอบออสเตนิไทซิงที่ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 60 และ 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 และ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 90 และ 120 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน ตรวจสอบวิเคราะห์หาเฟสออสเตไนต์ที่ปรากฏและวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM G65 (ชนิดสามวัตถุ) และตรวจสอบพื้นผิวที่ผ่านการขัดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมทั้งทดสอบหาสมบัติทางกลทั่วไป ได้แก่ ความแข็ง และการดูดซับแรงกระแทก ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงมีค่าความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าชิ้นงานในสภาพหลังการหล่อ และค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาอบออสเตนิไทซิงนานขึ้นคือจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที ส่วนเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนิไทซิงเหมือนกันแต่ชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกันค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้นจาก 280 ไปเป็น 360 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ความแข็งมีค่าลดลงตามเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นคือจาก 60 ไปเป็น 90 และ 120 นาที เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์มากขึ้นและออสเตไนต์มีเสถียรภาพมากขึ้น ปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง สำหรับปริมาตรการสึกหรอนั้นพบว่ามีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาอบออสเตนิไทซิงนานขึ้นคือจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที โดยเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนิไทซิงสั้นคือ 30 นาที มีปริมาตรการสึกหรอมากที่สุด และพบเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph จำนวนมาก ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาการอบออสเตนิไทซิงเพียง 30 นาทีนั้นสั้นเกินไป ปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์รอบๆเกรนไฟต์และความสามารถในการชุบแข็งของออสเตไนต์จึงต่ำและไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph ได้ เมื่อชุบลงในเกลือหลอมเหลว เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ในการทดลองนี้ บางชิ้นงานมีความแข็งใกล้เคียงกันแต่มีโครงสร้างจุลภาคต่างกันทำให้มีปริมาตรการสึกหรอที่แตกต่างกันมาก เช่น ชิ้นงานที่อบออสเตนิไทซิงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 90 นาที มีโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยออสเฟอไรต์และมีบางส่วนที่เป็นเฟอร์ไรต์ ประเภท Allotriomorph และมาร์เทนไซต์ ทำให้ปริมาตรการสึกหรอมาก ส่วนชิ้นงานที่อบ ออสเตนไนท์ซึ่งที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ชุบออสเทมเปอริงที่ 280 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 120 นาทีนั้น โครงสร้างจุลภาคเกือบทั้งหมดเป็นออสเฟอไรต์จึงปริมาตรการสึกหรอจึงน้อยกว่า นอกจากนี้รูปแบบของพื้นผิวการสึกหรอบนชิ้นงานทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอ ที่เกิดขึ้นเป็นแบบรอยแตก รอยไถ และรอยเฉือน โดยพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากเกรนไฟต์ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันทุกชิ้นงานทดสอบ



สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WATTANAPORN CHONHAI : THREE – BODY ABRASION WEAR OF
AUSTEMPERED DUCTILE CAST IRON. THESIS ADVISOR :
ASSP. PROF. USANEE KITKAMTHORN, Ph.D., 89 PP.

AUSTENIZATION/AUSFERRITE/ABRASION WEAR/VOLUME LOSS

The effects of austenitizing time on abrasion wear resistance and mechanical properties of austempered ductile iron was studied. The austempering treatment was carried out by austenitizing at 900 °C for 30, 60 and 90 minutes and then quenching in salt bath at 280 °C and 360 °C for 60, 90 and 120 minutes respectively. The microstructure of austempered specimens were investigated by optical microscope. The quantitative analysis of austenite volume fractions was performed by X – ray diffraction technique. Three – body dry sand/rubber wheel abrasion wear resistance was tested according to the ASTM G65. Scanning electron microscope was also used for worn surface investigation. Mechanical properties including hardness and impact energy were determined. The results showed that the austempered specimens exhibited higher hardness and wear resistance than as – cast specimen. Hardness of austempered ductile iron increased with austenitizing time from 30, 60 to 90 minutes. The hardness tended to decrease when the austempering temperature increased from 280 to 360 °C. Furthermore, the hardness of the specimens which were austenitized at the same condition decreased with austempering time from 60, 90 to 120 minutes. This was due to the higher volume of ausferrite formed and higher stability of austenite. Therefore, the martensite volume fractions decreased with austempering time. The volume losses of specimens were found to decrease with increasing austenitizing time 30, 60 to 90 minutes. The specimens austenitized for 30 minutes

exhibited highest volume loss and lowest hardness value due to the presence of allotriomorph ferrite. Such results indicated that austenitization for 30 minutes was too short. Therefore, austenite exhibited low hardenability and thus allotriomorph ferrite formed during quenching into the molten salt. In additions, some of specimens had the same hardness value but the microstructure constituents were different. This resulted in different volume loss values. For example, the microstructure of specimen which was austenitized for 30 minutes and austempered at 280 °C for 90 minutes comprised ausferrite, martensite and some allotriomorph ferrite. The latter microstructure is soft and could cause high volume loss. The specimen which was austenitized for 90 minutes and austempered at 280 °C for 120 minutes has lower volume loss since the microstructure mainly consisted of ausferrite and there is no allotriomorph ferrite in the microstructure. Moreover, three – body abrasive worn surface revealed that the wear mechanisms involved cracking, plowing, and shearing. Cracks were found to initiate in the matrix at the graphite/matrix interface in all of specimens.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ต่างๆ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตกัาธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการ ผู้ให้ โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทางกลและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ เจ้าหน้าที่สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ เครื่องมือและเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 1 และ 6) ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำงาน วิจัยและวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการหล่อ การ เตรียมชิ้นงานทดสอบ และการทดสอบ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา และผู้ มีพระคุณ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด

วัฒนพร ชนไฮ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ซ
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย	5
2 ปรัชญ์นั้วรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 กระบวนการหุบออสเทมเปอร์ริงและการเปลี่ยนเฟสระหว่างการอบหุบ	8
2.2.1 กระบวนการหุบออสเทมเปอร์ริง	8
2.2.2 การเปลี่ยนเฟสระหว่างอบหุบออสเทมเปอร์ริง	10
2.2.3 อิทธิพลของการอบออสเตนิไทซิง	13
2.3 ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	16
2.3.1 การสึกหรอแบบขัดสี	16
2.3.1.1 การขัดสีชนิดสองวัตถุ	16
2.3.1.2 การขัดสีชนิดสามวัตถุ	16
2.3.2 ลักษณะของตัวขัดสี	18
2.3.3 กลไกการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	พฤติกรรมการศึกษาหรือแบบจำลองชนิดสามวัตถุด้วยเครื่อง Dry Sand/Rubber Wheel tester	21
2.3.5	สมบัติด้านความต้านทานการขัดสีของ เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	31
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1	บทนำ	34
3.2	วัตถุประสงค์	35
3.3	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	37
3.3.1	ชิ้นงานทดสอบการขัดสี	37
3.3.2	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	38
3.4	การอบชุบชิ้นงานทดสอบ	39
3.5	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	41
3.6	การวิเคราะห์ปริมาณเฟส	42
3.7	การตรวจสอบผิวการขัดสี	44
3.8	การทดสอบความแข็ง	45
3.9	การทดสอบแรงกระแทก	45
3.10	การทดสอบการขัดสีชนิดสามวัตถุ	45
4	ผลการทดสอบและการอภิปรายผล	47
4.1	บทนำ	47
4.2	โครงสร้างจุลภาค	47
4.3	ความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	51
4.4	ความต้านทานต่อแรงกระแทก	55
4.5	ปริมาณออสเตไนต์เหลือค้างของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	58
4.6	ความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	59
4.6.1	ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับเวลาชุบออสเทมเปอร์จริง	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2	ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็ง ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	62
4.6.3	ตรวจสอบพื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบ ความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อ เหนียวออสเทมเปอร์	68
5	บทสรุป	72
5.1	สรุปผลงานวิจัย	72
5.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	72
	รายการอ้างอิง	74
	ภาคผนวก	76
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	76
	ประวัติผู้เขียน	88

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม	2
1.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์	4
2.1	กระบวนการอบชุบออสเทมเปอร์ริง	9
2.2	การเกิดเฟอร์ไรต์รูปเข็ม	11
2.3	การเปลี่ยนเฟสในระหว่างการอบชุบออสเทมเปอร์ริง	12
2.4	กลไกการเพิ่มขึ้นของนิวเคลียสเบนดิทเฟอร์ไรต์ ในปฏิบัติการเปลี่ยนเฟสช่วงที่ 1 และ 2	14
2.5	ปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เหลือค้างหลัง ออสเทมเปอร์ริงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการ อบออสเตไนท์ซิง	15
2.6	การสึกหรอแบบขัดสีชนิดสองวัตถุ	17
2.7	การสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ	17
2.8	กรวยของการสึกหรอแบบขัดสี	25
2.9	รูปร่างของรอยการสึกหรอ	27
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับกลไกการ สูญเสียเนื้อวัสดุในการสึกหรอแบบขัดสี	28
2.11	แผนภาพการสึกหรอแบบขัดสีในช่วงการ เปลี่ยนแปลงจากรอยไถเป็นรอนเดือน	29
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ย จากการขัดสีเทียบกับแรงกดที่ใช้งาน	34
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.2	ชิ้นงาน Y-block ของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม	35
3.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม	36
3.4	รูปร่างของชิ้นงานทดสอบการขัดสี	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง 38
3.6	กระบวนการอบชุบออสเทมเปอร์ริง 39
3.7	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Olympus High Power Microscope รุ่น BX51 41
3.8	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D5005 42
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL Scanning Electron Microscopes รุ่น JSM-6010 LV 44
3.10	เครื่องทดสอบการขัดสีตัวอย่างชนิดสามวัตถุ และแผนภาพจำลองของเครื่องทดสอบ 46
4.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ที่อบออสเตนไนไทซิงด้วยเวลา 60 นาที และชุบ ออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที 48
4.2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบออสเตนไนไทซิง ด้วยเวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที จากนั้นชุบออสเทมเปอร์ริง ที่ 360 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที 49
4.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบออสเตนไนไทซิง ด้วยเวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที จากนั้นชุบออสเทมเปอร์ริง ที่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที 50
4.4	ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส 52
4.5	ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส 53
4.6	ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเทียบกับเวลาในการ ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส 56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเทียบกับเวลาในการ ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส 57
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับ เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส 60
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับ เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส 61
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการ สึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส 64
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการ สึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียว ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส 65
4.12	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่าของเหล็กหล่อเหนียว ที่อบออสเตไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบ ออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส 66
4.13	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่าของเหล็กหล่อเหนียว ที่อบออสเตไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบ ออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส 67
4.14	ลักษณะพื้นผิวการสึกหรอภายหลังทดสอบการขัดสีของ (a) เหล็กหล่อ เหนียวที่อบออสเตไนท์ซิงด้วยเวลา 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และ ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาตรการสึกหรอมากที่สุด) 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	ลักษณะพื้นผิวการสึกหรอภายหลังทดสอบการขัดสีของ (a) เหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 90 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาตรการสึกหรอมากที่สุด) 70
4.16	รอยแตกภายหลังทดสอบการขัดสีของ (a) เหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 90 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาตรการสึกหรอมากที่สุด) 71

สารบัญตาราง

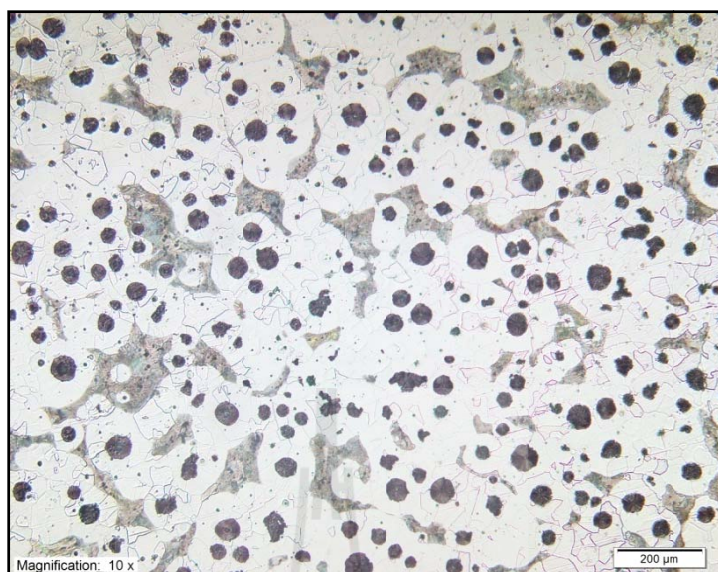
ตารางที่	หน้า
1.1	ชั้นคุณภาพและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ (A897/A897M-06) 3
2.1	ตารางการเปรียบเทียบสมบัติเหล็กของหล่อเกรไฟต์กลมกับเหล็กบางชนิด 7
2.2	การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์หลังชุบออสเทมเปอร์ริง และขนาดของเฟอร์ไรต์รูปเข็มตามอุณหภูมิและเวลาการอบออสเตไนต์ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสมทองแดง โดยใช้อุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 330 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที 15
2.3	มาตรฐาน ASTM ที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบต่าง ๆ 21
2.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอตามประเภทของการสึกหรอ 22
2.5	ประเภทการสึกหรอตามลักษณะของรอยสึกหรอและเศษจากการสึกหรอ 24
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม 36
3.2	สภาวะในการอบชุบออสเทมเปอร์ริงที่ใช้ในการทดสอบ 40
4.1	ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ 54
4.2	การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์เหลือค้างภายหลังชุบออสเทมเปอร์ริง 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อในประเทศไทยได้ดำเนินการมาเป็นระยะเวลาหลายสิบปีแล้ว แต่การพัฒนาเป็นไปอย่างล่าช้า เนื่องจากความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อที่มีคุณภาพสูงมีน้อย ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญทั้งในแง่การจ้างงาน การผลิต การส่งออกที่สามารถนำเงินตราเข้าประเทศเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศและเป็นฐานการผลิตรายใหญ่ในภูมิภาคเอเชียที่สามารถผลิตรถยนต์ได้สูงสุดของอาเซียน เหล็กหล่อเกรดไฟต์กลมนิยมใช้ในการผลิตวาล์ว ส่วนประกอบของเครื่องปั๊ม เพลลาข้อเหวี่ยง เกียร์ หรือส่วนประกอบของเครื่องยนต์และเครื่องจักรอื่นๆ เป็นต้น เพราะข้อดีทางด้านต้นทุนการผลิตและสามารถขึ้นรูปขึ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่าเหล็กชนิดอื่นๆ คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเกรดไฟต์กลมขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต (Process) และโครงสร้างพื้นของชิ้นงานหล่อเป็นหลัก โครงสร้างพื้นโดยปกติประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปริมาณและแนวโน้มการเกิดโครงสร้างทั้ง 2 ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและอัตราการเย็นตัวเป็นสำคัญ ส่วนที่เป็นอนุภาคเกรดไฟต์ทรงกลมกระจายอยู่ทั่วไปมีประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างจุลภาค เหล็กหล่อเกรดไฟต์กลมมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เหล็กหล่อเหนียว มีคุณสมบัติเชิงกลดี ใช้แทนเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ได้เป็นจำนวนมากหากไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมากนัก ในราคาต้นทุนที่ต่ำกว่า



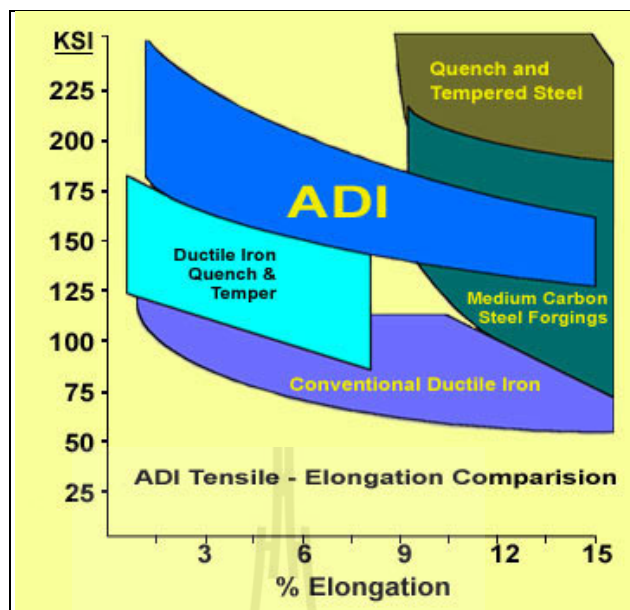
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม

เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลเพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งาน โดยกรรมวิธีอบชุบออสเทมเปอร์ เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมที่ผ่านการอบชุบออสเทมเปอร์จึงถูกเรียกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านกรรมวิธีอบชุบความร้อนด้วยการชุบแข็ง (Quenching) และการอบคืนตัว (Temper) ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 600-1000 MPa ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ให้ความต้านทานแรงดึงได้ถึง 750-1600 MPa อีกทั้งยังสามารถทนต่อแรงกระแทก แรงบิดและการขัดสีได้สูง จึงถูกนำมาใช้มากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร อาทิเช่น เฟืองท้ายรถยนต์ เฟืองเกียร์ ตัวชุดดินในรถไถและล้อเฟืองของรถเกี่ยวข้าว – นวดข้าว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบราคาผลิตภัณฑ์แล้วเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์จะถูกกว่า และไม่ด้อยกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำในด้านคุณสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 1.1 ชั้นคุณภาพและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ (A897/A897M-06)

<i>SI units</i>	<i>Tensile Strength</i> <i>Min,MPa</i>	<i>Yield Strength</i> <i>Min,MPa</i>	<i>Elongation in</i> <i>50</i> <i>min,min,%</i>	<i>Impact Energy</i> <i>J^a</i>	<i>Typical hardness</i> <i>HBW,kg/mm²</i>
Grade 750/500/11	750	500	11	110	241-302
Grade 900/650/09	900	650	9	100	269-341
Grade 1050/750/07	1050	750	7	80	302-375
Grade 1200/850/04	1200	850	4	60	341-444
Grade 1400/1100/02	1400	1100	2	35	388-477
Grade 1600/1300/01	1600	1300	1	20	402-512

ชั้นส่วนที่ต้องทนต่อการเสียดสี สามารถผลิตจากเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ได้ เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์มีโครงสร้างเป็นออสเฟอไรต์ ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ รูปเข็มแหลมและออสเตไนต์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูงซึ่งช่วยให้สามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวทั่วไป เพราะเมื่อชิ้นงานถูกขัดสีจากการใช้งานจะทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้น บริเวณผิวชิ้นงานที่ถูกขัดสี ส่งผลให้ออสเตไนต์เหลือค้างที่อยู่ในเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีความแข็งสูง ส่งผลให้ชิ้นส่วนนั้นมีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้นเมื่อนำชิ้นส่วนไปใช้งาน(M. Heydarzadeh Sohi, M. Nili Ahmadabadi, A. Bahrami Vahdat, 2004) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ได้แก่ ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาคก่อนนำไปทำอสเทมเปอร์ริง อุณหภูมิและเวลาในการออสเตไนไทซิง อัตราการเย็นตัวก่อนถึงอุณหภูมิชุบอสเทมเปอร์ริง อุณหภูมิและเวลาในการชุบอสเทมเปอร์ริง (Alan Vasko, 2009)



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่ออสเทมเปอร์ กับเหล็กหล่อเหนียว (<http://www.advancedcast.com>)

จากที่ได้กล่าวมานั้น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลทุกชนิด เมื่อมีการใช้งานย่อมเกิดการขัดสี โดยการสึกหรอแบบขัดสีเกิดขึ้นเนื่องจากการที่วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าด้วยแรงเสียดทาน เป็นผลให้เกิดรอยขีดข่วน (Scuffing) รอยไถ (Pouthing) หรือการสึกหรอบนพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนกว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นอาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง แรงที่กดลงบนหน้าสัมผัสของวัสดุ และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น (ASM Metals HandBook Volume 18) ซึ่งการขัดสีนี้ทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอ และการใช้พลังงานโดยสูญเปล่า ซึ่งแนวทางที่จะสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้คือ การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาผลิต การศึกษาสารหล่อลื่น เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นมีการสึกหรอลดลงมากหรือน้อยเท่าใดจึงมีความจำเป็นในงานนี้จึงเลือกศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ โดยการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีตัวอย่าง (ชนิดสามวัตถุ) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการชุบอบอสเทมเปอร์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ ให้ได้โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกลและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของเวลาในการอบออสเตนไนไทซิงที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวก่อนและหลังผ่านการอบชุบทางความร้อนโดยกรรมวิธีออสเทมเปอร์ริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วัสดุที่ใช้คือเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม โดยอบชุบออสเทมเปอร์ริง ด้วยการอบออสเตนไนไทซิงที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 , 60 และ 120 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยการชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิ 280 และ 360 องศาเซลเซียส แช่ทิ้งไว้ประมาณ 60 , 90 และ 120 นาที ปลอ่ยให้เย็นในอากาศ นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองของทั้งสามกลุ่มมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน ทำการตรวจสอบวิเคราะห์หาเฟสที่ปรากฏ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพื่อยืนยันโครงสร้างที่ได้ สุดท้ายทำการทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) รวมทั้งทดสอบหาสมบัติทางกลทั่วไป ได้แก่ค่าความแข็ง และการดูดซับแรงกระแทก โดยในการทดสอบจะทำซ้ำ 3 ครั้ง

1.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชุบเหล็กหล่อเหนียวด้วยกรรมวิธีออสเทมเปอร์ริงที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาค ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและสมบัติเชิงกล ได้แก่ค่าความแข็ง และการดูดซับแรงกระแทก

1.4.2 ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวก่อนและหลังผ่านการอบชุบความร้อนโดยกรรมวิธีออสเทมเปอร์ริง

1.4.3 ทราบถึงความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและสมบัติเชิงกลเหล็กหล่อเหนียวก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีออสเทมเปอร์ริง ทำให้ได้ข้อมูลสามารถตัดสินใจในการเลือก

1.4.4 เป็นแนวทางให้ทางภาคอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริงประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.4.5 ทราบแนวทางในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกลและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีโดยวิธีการออกแบบการทดลอง และเป็นข้อมูลที่จะใช้ในการทำงานวิจัยต่อไปเกี่ยวกับเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ริง

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เหล็กหล่อจัดเป็นเหล็กชนิดหนึ่งที่รู้จักกันและใช้งานอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว เหล็กหล่อคล้ายกับเหล็กกล้า (steels) ก็ตรงที่เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน และสามารถศึกษาโครงสร้างจากแผนภาพสมดุล (phase equilibrium) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนได้เหมือนกัน เพียงแต่ว่าปริมาณของคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า คือตั้งแต่ 2% โดยน้ำหนักขึ้นไปจนถึง 6.67% ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อมักมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 2.5% - 4% เหล็กหล่อมักมีคาร์บอนผสมอยู่มาก ดังนั้นจึงทำให้ขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไป คือเปราะและแตกหักง่ายเมื่อเทียบกับเหล็กกล้า การอบชุบเหล็กหล่อจึงเป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายหลังจากการอบชุบได้อย่างกว้างขวางมากกว่าโลหะอื่นๆที่ใช้ในอุตสาหกรรม(มนัส สติรจินดา, 2543)

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมเป็นวัสดุวิศวกรรมประเภทโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากสมบัติทางกลที่ดี สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยกระบวนการทางความร้อนได้ และมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้า การเปรียบเทียบสมบัติของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมกับเหล็กหล่อชนิดอื่นๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบสมบัติเหล็กของหล่อแกรไฟต์กลมกับเหล็กบางชนิด

Characteristic	Ductile Iron	Malleable Iron	Grey Iron	0.3%C Cast Iron	White Iron
Castability					
Ease of Machining					NA
Vibration Damping					
Surface Hardenability					NA
Modulus of Elasticity					NA
Impact Resistance					NA
Corrosion Resistance					
Strength/Weight					NA
Wear Resistance					
Cost of Manufacture					



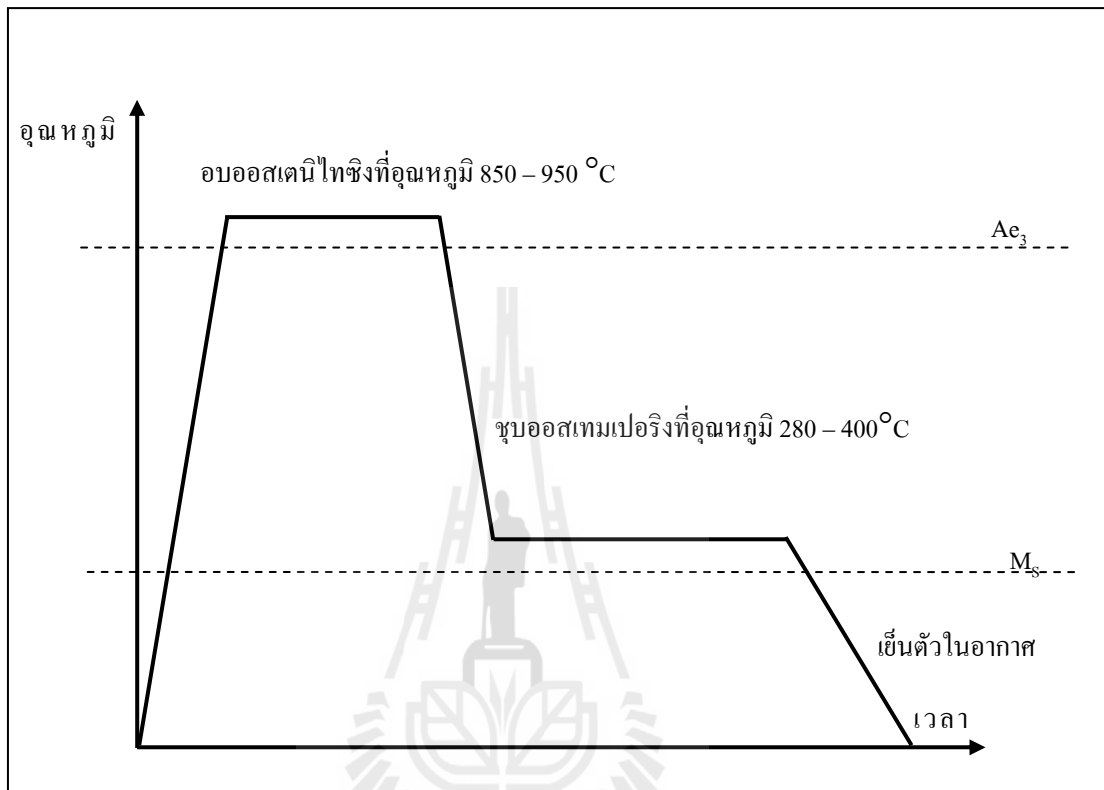
หมายเหตุ : อ้างอิงมาจาก “RioTintoIron & Titanium, Inc., Ductile Iron Data for Design Engineers, 1990”

จากข้อดีหลายๆ อย่างของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ส่งผลให้มีการนำเหล็กหล่อชนิดนี้มาทดแทนชิ้นส่วนที่แต่เดิมผลิตมาจากเหล็กกล้า เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ที่เคยผลิตจากเหล็กกล้าทึบขึ้นรูป โดยชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล กระบวนการทางความร้อนที่นิยมนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้คือการชุบแข็งทั้งชิ้นงานและการชุบแข็งผิวด้วยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การชุบแข็งโดยการทำออสเทมเปอริง เป็นอีกกระบวนการที่เพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอให้แก่ชิ้นส่วนได้ดี (Ductile Iron Society, 1990)

2.2 กระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริงและการเปลี่ยนเฟสระหว่างการอบชุบ

2.2.1 กระบวนการชุบอบสเทมเปอร์ริง

เหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอร์ริงได้จากการอบชุบทางความร้อนด้วยกระบวนการที่เรียกว่าอบสเทมเปอร์ริง (austempering) โดยนำเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ไปอบอบสเทมไนไทซิง (austenitizing) ที่ 850-950 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่โครงสร้างพื้นเดิมของเหล็กเปลี่ยนไปเป็นออสเตไนต์ ซึ่งมีเสถียรภาพ ณ อุณหภูมิสูงและมีความสามารถในการละลายของคาร์บอนสูง ในระหว่างการอบอบสเทมไนไทซิงนี้คาร์บอนจากแกรไฟต์จะแพร่ซึมเข้าไปในโครงสร้างออสเตไนต์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เม็ดแกรไฟต์ ซึ่งเดิมมีคาร์บอนต่ำเนื่องจากเคยเป็นเฟอร์ไรต์มาก่อน ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มคาร์บอนในออสเตไนต์รอบๆแกรไฟต์ได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดเฟอร์ไรต์หรือเพิร์ลไลต์ตอนชุบอบสเทมเปอร์ริง ภายหลังจากการอบอบสเทมไนไทซิงที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมแล้ว นำมาทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์เล็กน้อย เหล็กที่นำมาอบชุบจะถูกแช่ไว้ในตัวกลางที่รักษาอุณหภูมิไว้ที่ระดับนี้ได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้อ่างเกลือหลอมเหลวที่ประมาณ 280-400 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปเฟสออสเตไนต์ (γ_0) จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์รูปร่างแหลม ซึ่งการเกิดเฟอร์ไรต์ต้องมีการแพร่ของคาร์บอนไปอยู่ในออสเตไนต์รอบๆ ทำให้ออสเตไนต์มีคาร์บอนมากขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นจึงนำออกมาทำให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง สูดท้ายแล้วจะได้โครงสร้างเป็นกลุ่มเฟอร์ไรต์เข็มแหลมและออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูงพอที่จะมีเสถียรภาพหลังจากที่ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงตัวที่อุณหภูมิห้อง (มนัส สติรจินดา, 2543) ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า การชุบอบสเทมเปอร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการอบชุบอบสเทมเปอร์ริง



รูปที่ 2.1 กระบวนการอบชุบออสเทมเปอร์รีง

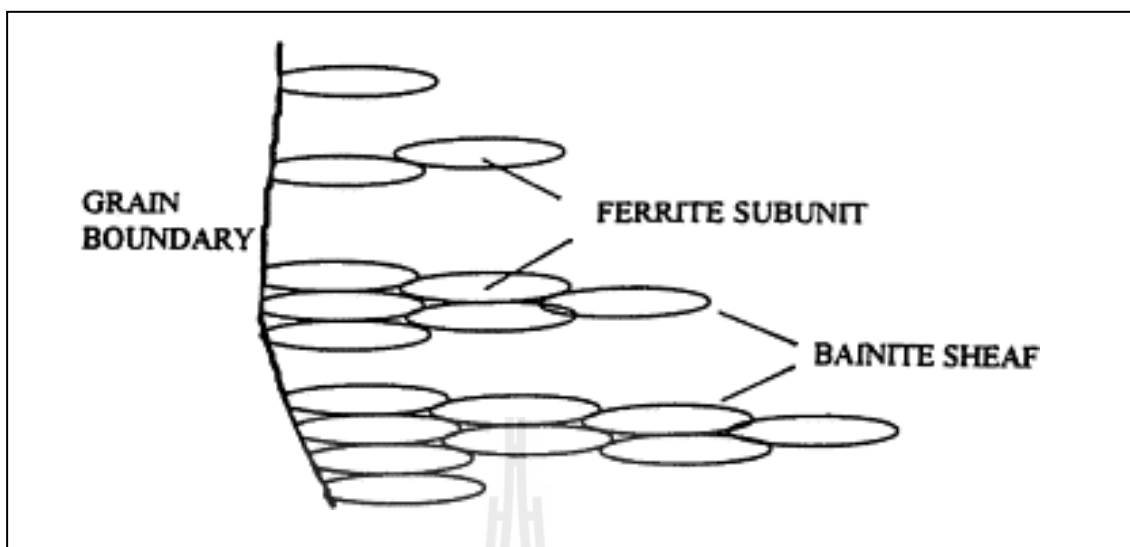
2.2.2 การเปลี่ยนเฟสระหว่างอบชุบอบสเทมเปอริง

ในระหว่างการอบชุบอบสเทมเปอริงนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเตไนต์เริ่มต้น (γ_0) ไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (α) สลับกับออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) เรียกสองโครงสร้างรวมนี้ว่า “ออสเฟอร์ไรต์” ซึ่งโครงสร้างออสเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้เหล็กหล่อเหนียวอบสเทมเปอริงมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ในระหว่างการอบชุบอบสเทมเปอริงของเหล็กหล่อเหนียวจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟส 2 ลักษณะ คือ

ช่วงแรก ออสเตไนต์เริ่มต้น (γ_0) จะเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มกับออสเตไนต์ที่มีคาร์บอนสูงขึ้น (γ_{HC}) โดยเขียนปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสได้ดังนี้



ปกติแล้วเฟอร์ไรต์จะยอมให้คาร์บอนละลายได้น้อยกว่าออสเตไนต์ ดังนั้นคาร์บอนจำนวนหนึ่งจะต้องถูกผลักไปสะสมอยู่ในออสเตไนต์รอบ ๆ เฟอร์ไรต์ที่เติบโตเป็นรูปเข็มออกไปจากบริเวณขอบเกรนไปสู่ใจกลางของเกรนจึงทำให้เกิดออสเตไนต์รอบ ๆ มีคาร์บอนสูงขึ้นมา บางครั้งเรียกเฟอร์ไรต์ที่เป็นรูปเข็มว่าเบนนิติกเฟอร์ไรต์ (Bainitic Ferrite) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ให้สมบัติทางกลที่ดีคือ ให้ความแข็งแรงและความเหนียวสูง และเรียกรวมเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลมกับออสเตไนต์เหลือค้างคาร์บอนสูงว่าออสเฟอร์ไรต์



รูปที่ 2.2 การเกิดเฟอร์ไรต์รูปเข็ม (Tszeng, 2000)

ลักษณะการเกิดออสเฟอร์ไรต์ในเหล็กหล่อคล้ายกับการเกิดเบนไนต์ในเหล็กกล้า เพียงแต่จะไม่เกิดคาร์ไบด์ภายในหรือระหว่างเฟอร์ไรต์รูปเข็ม โดยเบนไนต์จะเกิดในลักษณะเป็นข้อประกอบด้วยหน่วยเล็กๆของเฟอร์ไรต์ (subunit) ที่มีเฟสออสเตไนต์เหลือค้างคาร์บอนสูงกั้นอยู่ระหว่างกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยจะเห็นได้ว่าข้อเบนไนต์จะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มจำนวนมาก ซึ่งข้อเบนไนต์จะเริ่มเกิดขึ้นตามบริเวณขอบเกรนและโตขึ้นไปสู่ภายในเกรนของเฟสออสเตไนต์ด้วยกลไกการเกิดนิวเคลียสและการโตต่อบนพื้นผิวของเฟอร์ไรต์ที่เกิดก่อน (Tszeng, 2000)

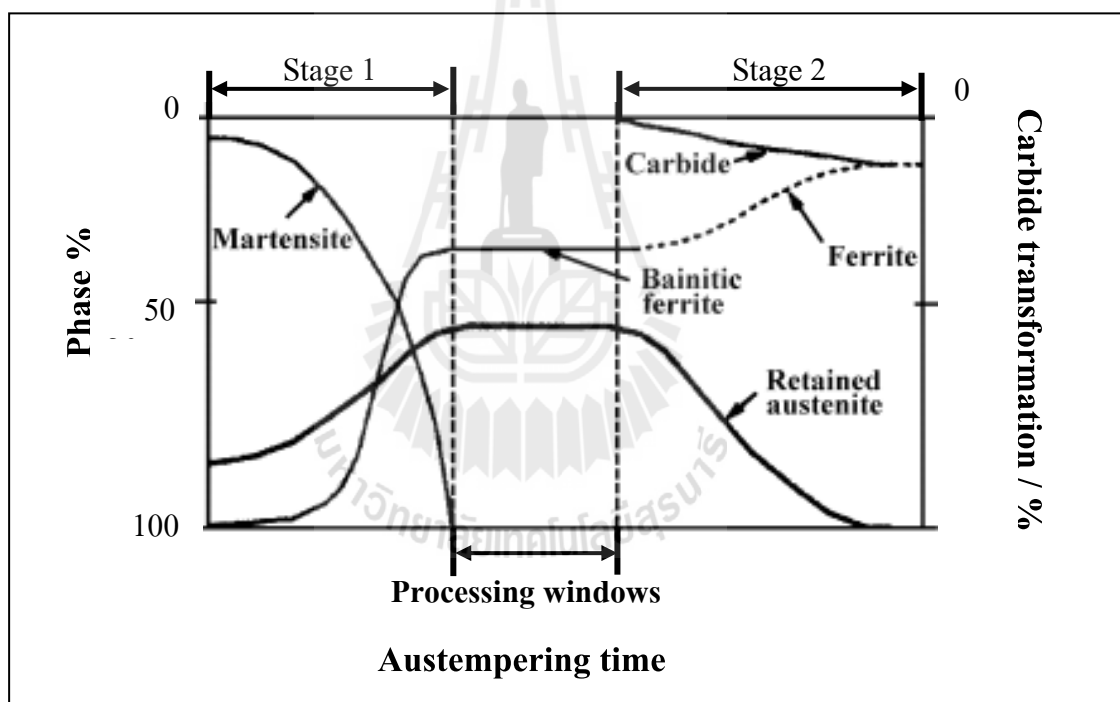
ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงออสเตไนต์คาร์บอนสูงไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ (Carbide) หรือซีเมนไทต์ (Fe_3C) ดังปฏิกิริยา



ปฏิกิริยาในช่วงที่สองนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อชุบออสเทมเปอร์ในระยะเวลาที่นานทั้งนี้ขึ้นกับธาตุผสมอื่นในออสเตไนต์ โดยคาร์ไบด์หรือซีเมนไทต์ที่เกิดจะมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กและกระจัดกระจายทั่วไปภายในออสเฟอร์ไรต์ (มนัส สกริจินดา, 2543) ปฏิกิริยาในช่วงนี้ควร

เหล็กแข็งเพราะจะส่งผลให้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้มีโครงสร้างที่เปราะและมีสมบัติเชิงกลต่ำลง

การชุบออสเทมเปอร์เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการชุบให้เหมาะสมเพื่อให้ได้โครงสร้างออสเฟอไรต์ที่มีเสถียรภาพ โดยการกำหนดกรอบการอบชุบออสเทมเปอร์ คือ ช่วงที่โครงสร้างออสเฟอไรต์มีเสถียรภาพ ซึ่งไม่ว่าเวลาในการอบชุบออสเทมเปอร์นานเท่าไร หากยังอยู่ในกรอบการอบชุบออสเทมเปอร์นี้โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จะเป็นออสเฟอไรต์ที่มีเสถียรภาพและไม่เกิดคาร์ไบด์ (Wu, Chen, and Shih, 2002); (L.C.Ching, I.C.Hsui, L.H.chen, and T.S.Lui, 2005)



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนเฟสในระหว่างการอบชุบออสเทมเปอร์ (Wu, Chen, and Shih, 2002)

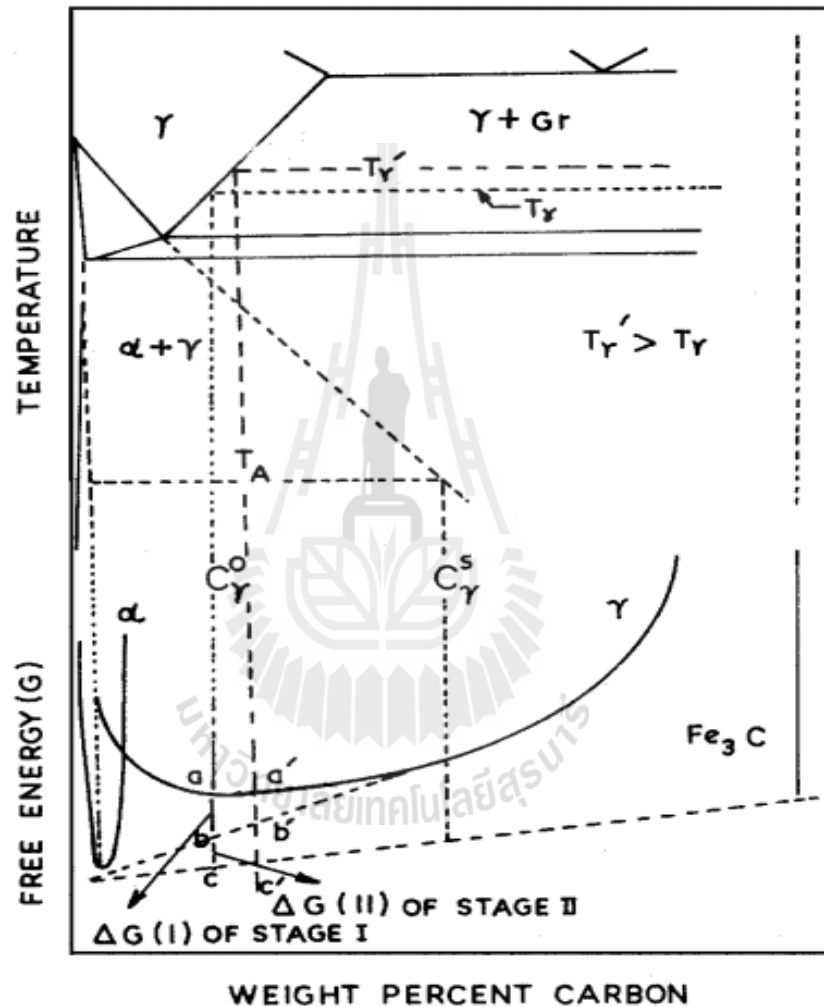
2.2.3 อิทธิพลของการอบอสเตนไนท์ซิง

กระบวนการอบอสเตนไนท์ซิงเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ให้เป็นออสเตไนต์ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกนิวเคลียสการเกิดและการโตต่อ โดยปกติแล้วโครงสร้างออสเตไนต์ในเหล็กหล่อเหนียวจะเริ่มเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟอร์ไรต์และแกรไฟต์หรือผิวสัมผัสระหว่างเฟอร์ไรต์และคาร์ไบด์ ในกรณีที่มีโครงสร้างพื้นที่เป็นเพิร์ลไลต์ การแพร่ซึมของคาร์บอนสู่ออสเตไนต์จะเกิดขึ้นโดยการสลายตัวของแกรไฟต์กลมและซีเมนไทต์ที่อยู่ในโครงสร้างเพิร์ลไลต์ตามลำดับ ขอบเขตของการแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทำอบอสเตนไนท์ซิง ปริมาณแกรไฟต์กลม โครงสร้างพื้นที่เริ่มต้น ความสามารถในการละลายของคาร์บอน ปริมาณธาตุผสม และการแยกตัวของธาตุผสมในเหล็ก (Uma Batra, S.Ray, and S.R.Prabhakar, 2003)

จากรูปที่ 2.4 อธิบายถึงกลไกการเพิ่มขึ้นของนิวเคลียสเบนิติกเฟอร์ไรต์ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสช่วงที่ 1 เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบต่ำลง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบอสเตนไนท์ซิงอยู่ที่ T_{γ} ปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้มีแรงผลักดันทางเคมี ($a' - b'$) สำหรับการเปลี่ยนเป็นเฟส $\alpha + \gamma_{HC}$ ที่มากกว่าการอบที่อุณหภูมิสูง (T_r') การที่มีแรงผลักดันทางเคมีมากขึ้นจะส่งผลกระทบในสองลักษณะคือ จำนวนนิวเคลียสเฟอร์ไรต์จะเพิ่มขึ้น หรือไปเพิ่มความแตกต่างของค่าแอกทิวิตี้ทำให้คาร์บอนแพร่ได้ดีขึ้น จึงทำให้การเกิดเป็นเบนิติกเฟอร์ไรต์เป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการอบอสเตนไนท์ซิงที่อุณหภูมิต่ำย่อมส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้น (ก่อนทำออสเทมเปอร์ริง) ลดลงและอาจทำให้การชุบออสเทมเปอร์ริงได้ผลที่ไม่ดีนัก เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์น้อยมาก ทำให้ออสเตไนต์ไม่มีเสถียรภาพ ณ อุณหภูมิห้องเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟิลล์ไรต์ได้ จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าค่า $X_{\gamma}C_{\gamma}$ ของการชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 900 องศาเซลเซียส นั้นมีค่าที่สูงกว่าที่ 850 องศาเซลเซียส (Uma Batra, S.Ray, S.R.Prabhakar, 2003) ซึ่งปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ที่อุณหภูมิการอบอสเตนไนท์ซิงต่างๆ นั้นได้มีการนำมาคำนวณโดยใช้สูตรที่นำขึ้นมาโดย Neumann

$$C_{\gamma}^0 = -0.435 + 0.335 \times 10^{-3}T_{\gamma} + 1.61 \times 10^{-6}T_{\gamma}^2 \\ + 0.006(\%Mn) - 0.11(\%Si) - 0.07(\%Ni) \\ + 0.014(\%Cu) - 0.3(\%Mo)$$

โดย C_γ คือปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ T_γ คืออุณหภูมิออสเตไนต์ไซริง และ %X คือปริมาณธาตุผสม ทั้งนี้สูตรของ Neumann ก็ได้มีการนำมาใช้โดย Kazerooni *et al.* ด้วยเช่นกัน เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้นสำหรับเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

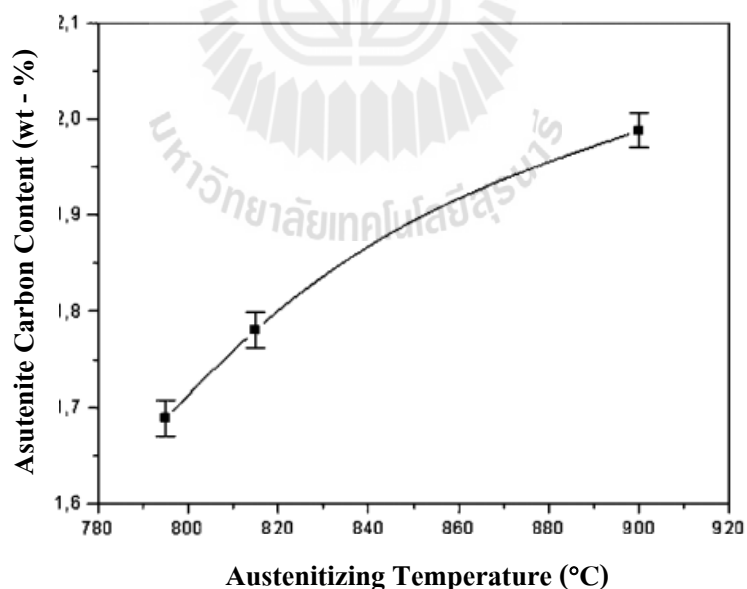


รูปที่ 2.4 อธิบายถึงกลไกการเพิ่มขึ้นของนิวเคลียสเบนดิกเฟอร์ไรต์ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟส ช่วงที่ 1 และ 2 (Uma Batra, S.Ray, and S.R.Prabhakar, 2003)

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์ภายหลังจากชุบออสเทมเปอร์ริง ขนาดของเฟอร์ไรต์รูป
เข็มตามอุณหภูมิและเวลาอบออสเตไนต์ไทซิงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ผสม
ทองแดง โดยใช้อุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 330 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที

T_γ , °C	t_γ , Min	Avg , Volume Fraction , X_γ	Avg , C_γ Wt%	Product $X_\gamma C_\gamma$	Bainitic Ferrite Particle Size , d_α , A ^o
850	60	0.25	1.6	0.4	174
850	90	0.31	1.7	0.527	108
850	120	0.33	1.8	0.594	185
900	60	0.36	1.8	0.648	190
900	90	0.37	1.7	0.629	212
900	120	0.38	1.65	0.627	239

หมายเหตุ: อ้างอิงมาจาก “Effect of Austenitization on Austempering of Copper Alloyed Ductile
Iron,” Uma Batra, S.Ray, S.R.Prabhakar , 2001, ASM International, p.600



รูปที่ 2.5 แสดงปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ที่เหลือค้างหลังออสเทมเปอร์ริง
ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบออสเตไนต์ไทซิง
(V.Kilicli and M.Erdogan ,2007)

ปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้นนั้นมีอิทธิพลต่อความมีเสถียรภาพของออสเตไนต์ในระหว่างการชุบออสเทมเปอร์ริง ดังนั้นยังมีปริมาณคาร์บอนเริ่มต้นมากเท่าไรก็จะยิ่งส่งผลกระทบต่อความเสถียรภาพของออสเตไนต์ภายหลังออสเทมเปอร์ริงตามไปด้วย รูปที่ 2.5 แสดงปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ภายหลังชุบออสเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 120 นาที เทียบกับอุณหภูมิการอบออสเตไนต์ไทซิงที่แตกต่างกัน ซึ่งปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เหลือค้างภายหลังออสเทมเปอร์ริงต่างก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบออสเตไนต์ไทซิง (V.Kilicli and M.Erdogan ,2007)

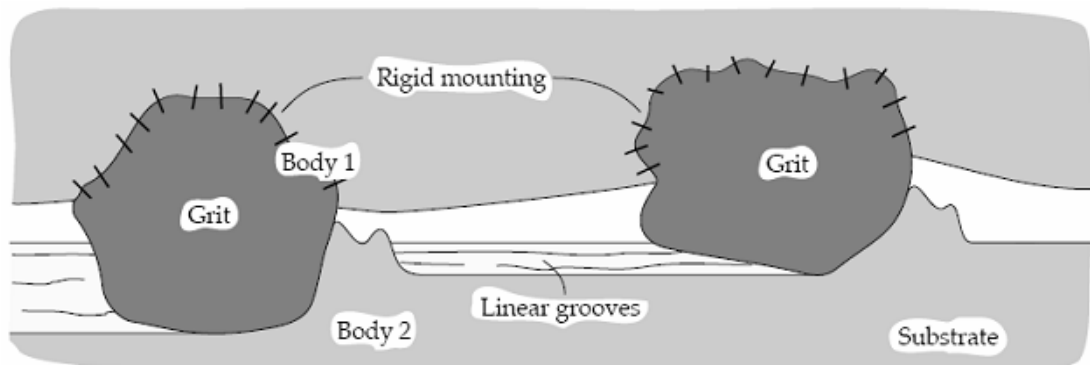
2.3 ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

2.3.1 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasion wear)

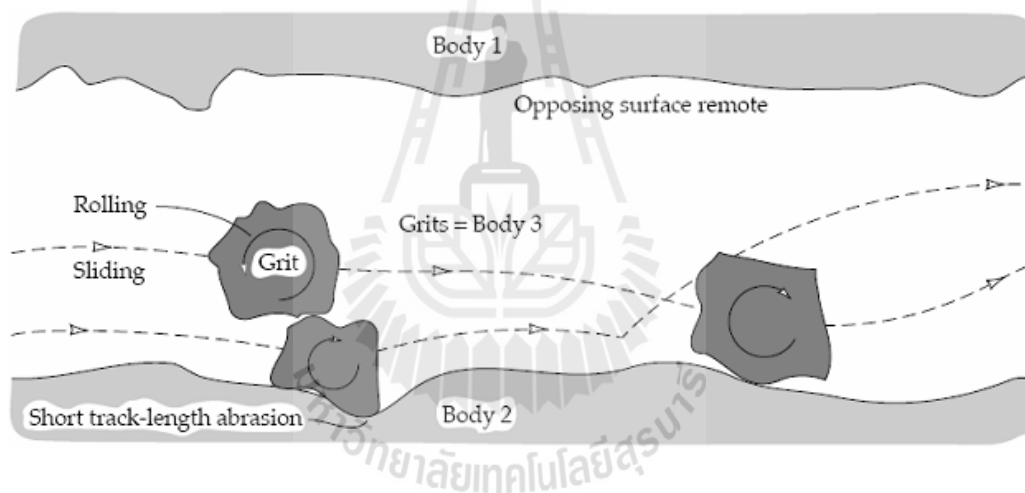
การสึกหรอแบบขัดสีเป็นความเสียหายที่มีผลกระทบที่สำคัญต่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรมมาอย่างยาวนาน และเป็นหัวข้อที่มีการให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในการศึกษากลไกการสึกหรอและวัสดุศาสตร์ เป็นที่ทราบกันดีว่ามีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ ดังนั้นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวจะทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไปได้ โดยการสึกหรอแบบขัดสีเกิดขึ้นเนื่องจากการที่วัสดุที่มีความแข็งกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความอ่อนกว่าด้วยแรงเสียดทานเป็นผลให้เกิดรอยขีดข่วน (Scuffing) รอยไถ (Ploughing) หรือการสึกหรอบนพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนกว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นอาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต่างของความแข็งแรงระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง แรงที่กดลงบนหน้าสัมผัสของวัสดุ และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยการเกิดการสึกหรอดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้สองสภาวะคือ

2.3.1.1 การขัดสีชนิดสองวัตถุ (Two Body Abrasion) สภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่อมีคู่วัตถุสองชิ้นถูกัน หรือวัตถุที่ผิวแข็งมากกว่าถูไปบนวัตถุที่ผิวอ่อนกว่า ทำให้วัตถุที่ผิวอ่อนกว่าหลุดออกมาเนื่องจากความแข็งแรงของผิวที่น้อยกว่า เช่น การทำงานของเครื่องตัดและเครื่องเจียรนัย หรือการขัดพื้นผิวด้วยกระดาษทราย ดังรูปที่ 2.6

2.3.1.2 การขัดสีชนิดสามวัตถุ (Three Body Abrasion) เกิดขึ้นเมื่อมีวัตถุแปลกปลอมมาคั่นกลางอยู่ระหว่างที่คู่วัตถุสองชิ้นถูไปมาดังรูปที่ 2.7 โดยที่เศษวัตถุชิ้นที่คั่นกลางระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองนั้นอาจเป็นวัตถุแปลกปลอมจากภายนอกหรือวัตถุที่เกิดจากความเสียหายจากการขัดสีกันระหว่างวัตถุคู่สัมผัสในตอนแรกแล้วหลุดออกมาอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองในตอนหลัง



รูปที่ 2.6 การสึกหกรอบแบบขัดสีชนิดสองวัตถุ (Ingrid, Beata, Pavel, Erika and Emil, 2009)



รูปที่ 2.7 การสึกหกรอบแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ (Ingrid, Beata, Pavel, Erika and Emil, 2009)

2.3.2 ลักษณะของตัวขัดสี (Abrasive) ของอนุภาค

ความสามารถในการขัดสีของอนุภาคเป็นตัวชี้วัดที่จะทำให้เกิดการสึกหรอแก่วัสดุที่อ่อนกว่า ซึ่งขึ้นอยู่กับ

- 1) ความแข็งของอนุภาค
- 2) ความแข็งแรงหรือความทนต่อการบีบอัด
- 3) สมบัติทางกลของอนุภาคในการปะทะหรือชน เช่น ความเหนียว เป็นต้น
- 4) รูปร่างและขนาดของอนุภาค
- 5) ตัวกลางของของไหล เช่น มีอนุภาคแขวนลอยปนอยู่ในของเหลว เป็นต้น

ในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีของอนุภาคที่มีความแข็งสูงจะทำให้เกิดการสึกหรอบนผิวโลหะได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีความแข็งต่ำ นอกจากนี้ถ้าความแข็งของอนุภาคเปลี่ยนก็จะทำให้อัตราการสึกหรอเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ลักษณะความเป็นตัวขัดสีของอนุภาคจะขึ้นกับรูปร่างและความแข็งแบบแรงกดซึ่งถ้ามีรูปร่างที่เป็นมุมเหลี่ยมและความแข็งแบบแรงกดสูงจะไม่แตกง่ายจึงทำให้อัตราการสึกหรอของพื้นผิวที่ถูกอนุภาคแข็งขัดสีสูง นอกจากนี้เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง อัตราการสึกหรอจะลดลงด้วย เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนตัวได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสบริเวณผิวของชิ้นงานมีค่าต่ำกว่าสภาพแวดล้อมของการสึกหรอ คุณสมบัติ และสภาพผิวของชิ้นงานก็เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย ดังนั้นถ้าต้องการเปรียบเทียบการสึกหรอต้องทำการทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกัน เช่น ความคมให้มีขนาดของอนุภาค แรงกด ความเร็วรอบ เท่ากันสำหรับการทดสอบการเสียดสี เป็นต้น (ปนัดดา นิรนาทกล้าพงศ์ และคณะ, 2547); (ASM Metals HandBook Volume 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology)

2.3.3 กลไกการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ

กลไกการสึกหรอนี้สร้างขึ้นโดย (M.S.Bingley and S.Schnee, 2004) ซึ่งมีสมมุติฐานว่าการสูญเสียของเนื้อวัสดุเกิดจากการที่อนุภาคขัดสีตกลงไปในเนื้อวัสดุอย่างซ้ำๆ จากการเลื่อนไถลไปมาบนพื้นผิววัสดุ การกดด้วยมุมที่คมของอนุภาคขัดสีทำให้เกิดการเสียดรูปแบบพลาสติกขึ้นที่ผิววัสดุ จากนั้นอนุภาคที่เกิดจากการสึกหรอจะหลุดออกมาด้วยการม้วนตัวหรือเกิดความล้าเมื่อได้รับความเครียดในปริมาณที่มากพอ ทำให้เกิดความเสียหายขึ้น สำหรับชิ้นงานขนาดหน้าตัดของ A_s สมมุติให้ชิ้นงานมีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส และอนุภาคขัดสีที่กระจายอยู่บนหน้าตัดชิ้นงานมีขนาด d ดังนั้นจำนวนอนุภาคที่มากที่สุดที่อยู่บนหน้าตัดชิ้นงานในช่วงเวลาใดๆ คือ

$$N_p = \frac{A_s}{d^2} \quad (2.1)$$

อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด A ที่อนุภาคได้ตกลงไปในเนื้อวัสดุจะพิจารณาโดยไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของอนุภาคชนิดใด แต่ให้ขึ้นอยู่กับแรงกระทำ W และความแข็งของวัสดุ H โดย

$$A = \frac{W}{H} \quad (2.2)$$

สมมุติให้รอยกดที่เกิดจากอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปกรวยโดยมีความสูง h ดังนั้นปริมาตรของรอยกด (v) จะมีค่าเท่ากับ

$$v = \frac{Ah}{3} = \frac{Wh}{3H} \quad (2.3)$$

จากการที่อนุภาคชนิดใดเคลื่อนที่ไปบนผิววัสดุ สมมุติว่าแต่ละมุมของอนุภาคหนึ่งจะตกลงไปในเนื้อวัสดุเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้นจำนวนของรอยกดที่อยู่บนรอยสี่เหลี่ยมที่มีความยาว s จะเท่ากับ

$$I_p = \frac{sc}{\pi d} \quad (2.4)$$

โดย c คือจำนวนรอยกดที่เกิดจากแต่ละมุมของอนุภาคต่อการหมุนหนึ่งรอบของอนุภาค เพราะฉะนั้นปริมาตรของรอยกดที่เกิดขึ้นทั้งหมด (V) บนรอยสี่เหลี่ยมที่มีความยาว s คือ

$$V = \frac{Whsc}{3\pi Hd} \quad (2.5)$$

การกดแต่ละครั้งที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุจะส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกขึ้นที่ใต้พื้นผิวด้วย เมื่อสมมุติให้ปริมาณการเสียรูปที่ใต้พื้นผิว (α) มีสัดส่วนเป็นค่าหนึ่งของปริมาณการเสียรูปจากการกด และกำหนดให้เนื้อวัสดุที่หลุดออกไปมีค่าเท่ากับปริมาณการเสียรูปแบบพลาสติกหลังจากได้รับแรงกระทำจากการกดแบบซ้ำๆ จนปริมาณความเครียดเกินกว่าค่าวิกฤติ ϵ_c แล้ว สามารถหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายโดยเฉลี่ย N ได้โดยใช้สมการของ Coffin–Manson

$$N = \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} \right)^x \quad (2.6)$$

โดย ε_p คือความเครียดโดยเฉลี่ยต่อการกดหนึ่งครั้ง ส่วน x ให้ใช้ 1 เมื่อความเสียหายที่เกิดขึ้นมาจากความเครียดที่สะสมใต้พื้นผิววัสดุ และใช้ 2 เมื่อความเสียหายที่เกิดขึ้นเกิดจากความล้า และใช้ค่า 1-2 เมื่อความเสียหายทั้งสองแบบเกิดขึ้นร่วมกัน ดังนั้นอัตราการสึกหรอ (Q) ในรูปของปริมาณการสูญเสียของเนื้อวัสดุต่อความเสียหายในความยาวหนึ่งคือ

$$Q = \frac{\alpha p W h c}{3 \pi H N d} \quad (2.7)$$

โดย p คือค่าความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Archard equation

$$(Q = \frac{K W L}{H})$$

โดย W คือแรงกระทำทั้งหมด

L คือระยะทางการขัดสี

K คือสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ

ซึ่ง

$$K = \frac{\alpha p h c}{3 \pi N d} \quad (2.8)$$

โดย K คือสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ

แม้ว่าสมการ (7) และ (8) จะแสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอ Q นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคขัดสีด้วย และจากสมการ (1) พบว่าแรงกระทำต่อหนึ่งอนุภาค W แปรผกผันกับ d^2 นอกจากนี้สามารถหาแรงกระทำในแต่ละอนุภาคได้จาก

$$w = H \pi h^2 \tan^2 \beta \quad (2.9)$$

โดย β คือครึ่งหนึ่งของมุมกรวยที่เกิดจากการกด สมการ (2.9) แสดงให้เห็นว่า h^2 นั้นเป็นสัดส่วนกับแรง w ที่กระทำบนแต่ละอนุภาค ซึ่งสัดส่วน h/d (หรือก็คืออัตราการสึกหรอ (Q)) นั้นแทบจะมีค่าคงที่แม้ว่าขนาดอนุภาคจะเปลี่ยนไป จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ที่แสดงว่าเมื่อ h มีค่ามากขึ้นจะทำให้ Q เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากการที่ h เพิ่มขึ้นทำให้ K มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการที่ h เพิ่มขึ้นไม่ได้มีสาเหตุสำคัญจากแรงกระทำมีค่ามากขึ้น โดยแรงกระทำที่สูงๆ จะส่งผลให้สัดส่วนของอนุภาคที่ได้รับแรงและตกลงไปในเนื้อวัสดุเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้จากการที่แรงกระทำเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้รอยกดมีความลึกมากขึ้นที่บางตำแหน่งของการกดของแต่ละอนุภาค

2.3.4 พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัสดุด้วยเครื่อง Dry

Sand/Rubber Wheel tester

การทดสอบการสึกหรอแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 การระบุอัตราการสึกหรอจะระบุเป็นปริมาตรที่สูญเสียไปต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากปริมาตรที่สูญเสีย แรงกระทำ ระยะทางการสึกหรอ และความแข็งของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และเพื่อให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ในการทดลองจะต้องปฏิบัติตามขั้นตอนในมาตรฐานนั้นๆ อย่างเคร่งครัด

ตารางที่ 2.3 มาตรฐาน ASTM ที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอแบบต่างๆ

Designation	Standard test method for
G 65	Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus
G 105	Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests
G 75	Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)
G 98	Galling Resistance of Materials
G 99	Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
G 73	Liquid Impingement Erosion Testing
G 76	Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets
G 102	Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements
G 59	Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements

หมายเหตุ: อ้างอิงมาจาก “Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay,

2001, ASM International, p.60.

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอตามประเภทของการสึกหรอ

Wear type	K -value
Adhesive (K_{adh})	
Identical metals	10^{-2} to 10^{-7} (a)
Compatible metals	$10^{-2.5}$ to 10^{-7} (a)
Partly compatible metals	10^{-3} to 10^{-7} (a)
Nonmetals on metals or nonmetals	10^{-4} to $10^{-5.5}$ (a)
Abrasive (K_{abr})	
Two-body abrasion	$10^{-0.5}$ to $10^{-2.5}$
Three-body abrasion	$10^{-2.5}$ to 10^{-5} (b)
Corrosive (K_{corr})	10^{-2} to $10^{-5.5}$
Fretting (K_{fret})	10^{-4} to 10^{-7} (a)
(a) Depends on the extent of lubrication. (b) Depends on low or high abrasive content.	

หมายเหตุ: อ้างอิงมาจาก “Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001, ASM International, p.60.

ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอตามตารางที่ 2.4 นั้นเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบด้วยวิธีที่มีมาตรฐาน อย่างไรก็ตามค่า K สามารถเปลี่ยนแปลงหรือคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน อันเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆ อย่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอสามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการสึกหรอได้หลายๆ อย่าง ได้แก่

1) การสึกหรอของวัสดุ ในกรณีที่ทราบประเภทของการสึกหรอของวัสดุ และระยะทางการสึกหรอแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณของการสึกหรอทั้งหมด (V/d) ได้โดยคำนวณจากค่า K ในขณะที่ส่วนกลับของปริมาณการสึกหรอเรียกว่า wear factor ซึ่งเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงอายุการสึกหรอของวัสดุ (wear life)

2) ประเภทของการสึกหรอ สามารถระบุประเภทการสึกหรอโดยการนำค่า K ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับผลทดสอบมาตรฐานของค่า K ตามตาราง

3) การเลือกใช้วัสดุและระบบหล่อลื่น เมื่อทราบอัตราการสึกหรอสูงสุดที่ยอมรับได้ อายุการใช้งานที่ต้องการ และลักษณะของแรงกระทำแล้ว สามารถเลือกใช้วัสดุและระบบหล่อลื่นได้โดยพิจารณาจากค่า K

4) ใช้ในการหาลักษณะการเคลื่อนที่ สามารถหาลักษณะการเคลื่อนที่จาก

ค่า K ได้ในกรณีที่ทราบประเภทของการสึกหรอ สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นในระบบวัสดุผสม (composite)

สมการทั่วไปของการสึกหรอนั้นถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Holm และ Archard โดยปริมาตรของการสึกหรอ (V) นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางของการขัดสี (d) และแรงกระทำ (F_N) ซึ่งอธิบายได้ตามสมการ

$$V = K \frac{F_N}{H} \cdot d \quad (2.10)$$

และความลึกของรอยสึกหรอ (δ) มีค่าเท่ากับ

$$\delta = K \frac{F_N}{H} \cdot \frac{d}{A} \quad (2.11)$$

โดย A = พื้นที่สัมผัสของการสึกหรอ

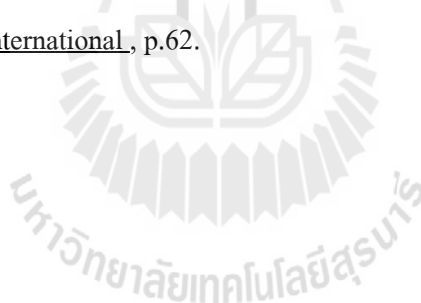
K คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ

การสึกหรอจะเริ่มเกิดจากการได้รับแรงกระทำซ้ำๆ จนเริ่มเกิดความเสียหายเป็นจุดเล็กๆ จากนั้นรอยสึกหรอจะลึกและยาวออกไปเรื่อยๆ ซึ่งความลึกและความยาวของรอยสึกหรอขึ้นอยู่กับสถานะของการสึกหรอ และเวลาที่ระบบการสึกหรอนั้นดำเนินอยู่ ลักษณะของรอยสึกหรอและเศษจากการสึกหรอสามารถบ่งบอกถึงประเภทของการสึกหรอได้ตามตารางที่ 2.5 ทั้งนี้ในทางปฏิบัติมักจะเกิดการสึกหรอมากกว่าหนึ่งประเภท ซึ่งยากต่อการระบุประเภทของการสึกหรอได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามประเภทหลักของการสึกหรอก็จะแสดงผลการสึกหรอที่ชัดเจนกว่า การศึกษาร่องรอยจากการสึกหรอเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ การศึกษาร่องรอยจากการสึกหรอสามารถทำได้ในขณะที่ระบบการสึกหรอนั้นดำเนินอยู่ หรือการทำสำเนา (replica) จากพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอแล้วนำมาวิเคราะห์ หรือแม้กระทั่งนำพื้นผิวที่สึกหรอนั้นมาศึกษาด้วยวิธีทั่วไป ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์อย่างละเอียดหรือต้องใช้กำลังขยายสูงก็สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้

ตารางที่ 2.5 ประเภทการสึกหรอตามลักษณะของรอยสึกหรอและเศษจากการสึกหรอ

Type of wear	Wear particle/debris	Wear scar/surface topography
Abrasion	Particles Flat splinters	Grooves or furrows running parallel to surface Discontinuous, if hard phase present in wear track Comet tails in low stress abrasion
Adhesion	Flakes Splinters	Sliding tails in low stress abrasion
Erosion	Thin flakes Fine particles	Pits and cavities Wave fronts Lamellar pattern
Thermal	Oxides Particles or flakes	Scale, partly or fully covering the surface Pits/cavities

หมายเหตุ: อ้างอิงมาจาก “Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001, ASM International, p.62.

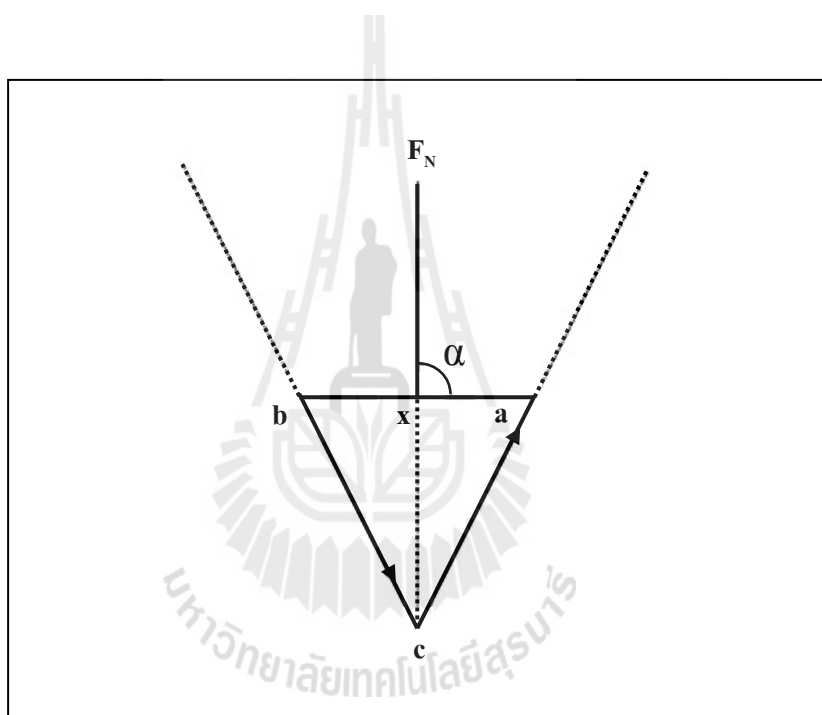


สมการทั่วไปของการสึกหรอแบบขัดสีคือ

$$\frac{V}{d} = K_{abr} \frac{F_N}{H} \quad (2.12)$$

โดย

$$K_{abr} = K \cdot \frac{a \cot \alpha}{\pi} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.8 กรวยของการสึกหรอแบบขัดสี (“Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001)

และ $\alpha = +1$ ถึง 2 โดยสมการที่ 2.12 ได้มาจากการพิสูจน์แรงของอนุภาค (F_N) หนึ่งอนุภาคที่กระทำต่อพื้นผิววัสดุด้วยมุม 2α และทำให้ผิววัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นเท่ากับ H ตามรูปที่ 2.8 โดยที่

$$\frac{bx+xa}{xc} = 2 \tan \alpha = \frac{ab}{xc} \quad (2.14)$$

โดย ab = ความยาวของรอยสึกหรอ = $2(xc) \tan \alpha$

ดังนั้น

$$H = \frac{F_N}{(ab)^2} \quad (2.15)$$

หรือ

$$\frac{F_N}{H(ab)} = ab = 2(xc)\tan\alpha = \text{wear length} = \frac{V}{d} \quad (2.16)$$

หรือ

$$\frac{V}{d} = \frac{F_N}{2H(xc)\tan\alpha} = \frac{F_N}{H} \cdot K_{abr} \quad (2.17)$$

หรือ

$$K_{abr} = K \cdot \frac{a \cot \alpha}{2H(xc)\tan\alpha} \left(\frac{\pi}{a} = 2xc \right) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.12) จะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักๆ ที่มีผลต่อการสึกหรอแบบ
ขีดสี ได้แก่

1) มุมกระทำของอนุภาค (α) มุมกระทำที่มากขึ้นจะทำให้อัตราการสึก
หรอมากขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการสึกหรอสูงสุดจะเกิดขึ้นที่มุมวิกฤต ซึ่งมุมวิกฤตจะมีค่าลดลง
เมื่อเพิ่มความแข็งให้กับตัววัสดุ

2) ระยะทางของการขีดสี (d) เมื่อระยะทางของการขีดสีมากขึ้น ย่อมทำ
ให้พื้นที่การขีดสีระหว่างอนุภาคกับพื้นผิววัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และส่งผลให้อัตราการสึกหรอ
เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

3) แรงกระทำของอนุภาค (F_N) เมื่อแรงกระทำมีค่ามากขึ้นจะทำให้การขีด
สีมีความรุนแรงขึ้นและทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น

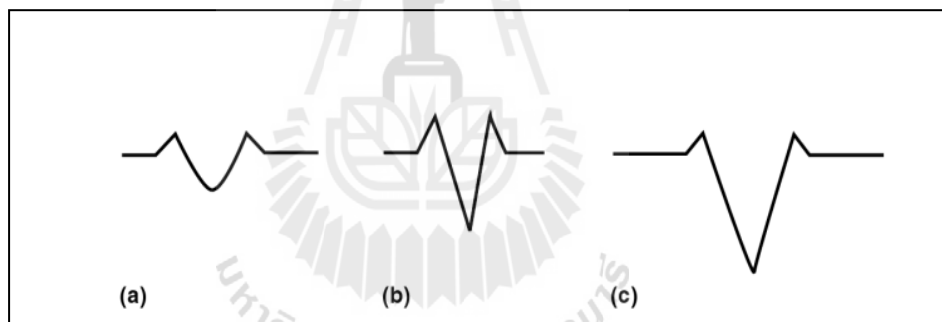
4) ความแข็งของอนุภาคขีดสี (H_a) และพื้นผิววัสดุ (H_m) ความแข็งที่มาก
ขึ้นจะทำให้วัสดุมีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราส่วนระหว่างความแข็งของ
อนุภาคขีดสี (H_a) กับความแข็งของวัสดุ (H_m) ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญที่จะบ่งบอกว่
การสึกหรอนั้นเป็นการสึกหรอแบบการสึกหรอดำหรือการสึกหรอสูง

$$H_m/H_a \geq 0.7 \text{ for low wear}$$

$$H_m/H_a \leq 0.7 \text{ for high wear}$$

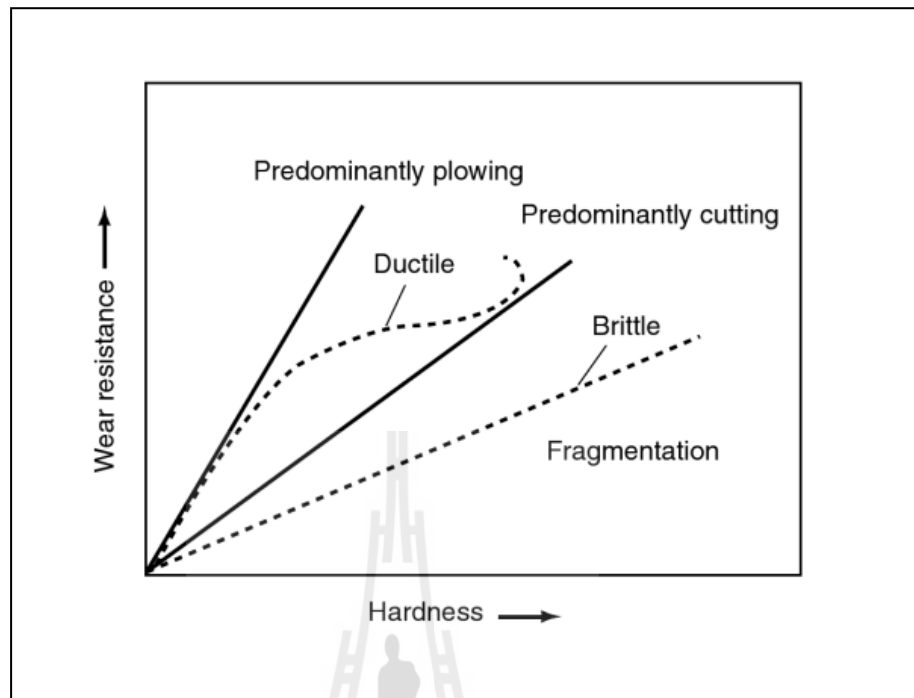
5) รูปร่างและขนาดของอนุภาคถึงแม้ว่าในสมการต่างๆ ที่กล่าวมาจะไม่มีตัวแปรที่เกี่ยวกับรูปร่างและขนาดของอนุภาค แต่โดยทั่วไปแล้วตัวแปรเหล่านี้ก็มีผลต่อกลไกการสึกหรอด้วยเช่นกัน อนุภาคที่มีรูปร่างกลมจะทำให้เกิดการสึกหรอน้อยกว่าอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมหรือมีแฉงมุม และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (μm) จะส่งผลให้กลไกการสึกหรอจากรอยตัด (cutting) เป็นรอยไถล (sliding) ซึ่งทำให้อัตราการสึกหรอลดลง

ปัจจัยต่างๆ เช่น ความแข็งของอนุภาคขัดสี มุมในการขัดสี และความแข็งของพื้นผิววัสดุ มีผลต่อกลไกการสึกหรอแบบขัดสี เนื่องจากการสูญเสียของเนื้อวัสดุสามารถเกิดจากทั้งการเสีรูปลาดาวหรือการแตกหักของวัสดุ โดยกลไกที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุมีทั้ง รอยไถ (ploughing), รอยเนียน (wedge forming) หรือรอยตัด (cutting) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของอนุภาคขัดสีและความลึกที่กินเข้าไปในเนื้อวัสดุ รูปร่างของรอยสึกหรอแบ่งออกเป็น 3 แบบตามกลไกการสูญเสียเนื้อวัสดุ โดยแสดงไว้ในภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปร่างของรอยการสึกหรอ (a) รอยไถ (ploughing), (b) รอยเนียน (wedge forming), (c) รอยตัด (cutting) (“Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001)

ในวัสดุเหนียวที่มีความแข็งต่ำมีแนวโน้มที่จะเกิดกลไกแบบรอยไถ สำหรับวัสดุที่มีความแข็งสูงขึ้นจะมีโอกาสเกิดกลไกแบบรอยตัดมากกว่า โดยจะมีช่วงความแข็งหนึ่งที่เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงกลไกการสูญเสียเนื้อวัสดุไปเป็นแบบรอยไถหรือ เป็นแบบรอยตัด ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 2.10



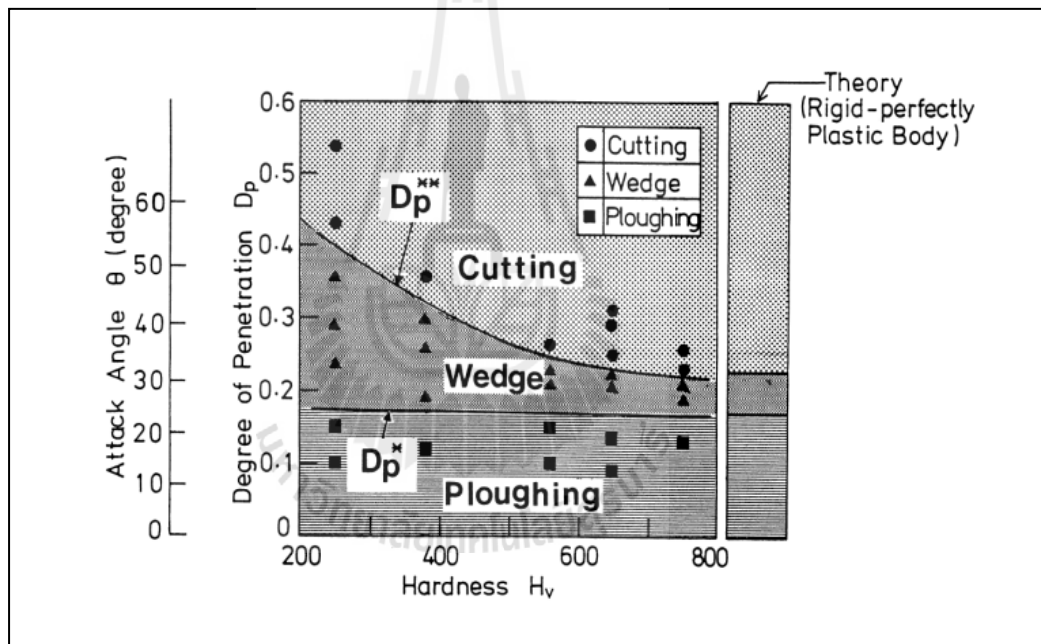
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับกลไกการสูญเสียเนื้อวัสดุในการสึกหรอแบบขัดสี โดยเส้นประเป็นเส้นแบ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุ (เหล็กกล้า) (“Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001)

ระดับการกินลึก (degree of penetration) ที่มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้กลไกการสูญเสียเนื้อวัสดุเปลี่ยนจากวัสดุที่ถูกขัดสีเกิดเป็นร่องโดยที่เนื้อวัสดุไม่ได้หลุดออกไปด้วย (ploughing) กลายเป็นเนื้อวัสดุถูกขูดติดกับปลายของตัวขัดสี (wedge forming) และเนื้อวัสดุถูกตัดและหลุดออกไป (cutting) ตามลำดับ โดยระดับการกินลึก (D_p) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความลึกของรอยสึกหรอ (h) ต่อความกว้างครึ่งหนึ่งของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุกับอนุภาคขัดสี (a)

$$D_p = \frac{h}{a}$$

รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพของการสึกหรอแบบขัดสีที่มีกลไกการสึกหรอแบบต่างๆ ตามความแข็งและระดับการกินลึก การเปลี่ยนแปลงกลไกการสึกหรอจากรอยไถไปเป็นรอยเนียน และจากรอยเนียนไปเป็นรอยตัด จะเกิดขึ้นที่จุดวิกฤตของระดับการกินลึก โดยจุดวิกฤตของระดับการกินลึก

ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากรอยไถไปเป็นรอยเฉือนนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความแข็ง แต่ในช่วงการเปลี่ยนจากรอยเฉือนเป็นรอยตัดนั้นจุดวิกฤตของระดับการกินลึกจะมีค่าลดลงเมื่อความแข็งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งดูได้จากพื้นที่กราฟของของรอยเฉือนที่ลดลง และพื้นที่ของรอยตัดเพิ่มมากขึ้นตามความแข็งที่มากขึ้น ในวัสดุเปราะนั้นจะไม่มีผลการพิจารณาผลของการเสีรูปร่าง โดยผิวสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นระหว่างตัวขัดสีและพื้นผิววัสดุจะก่อให้เกิดการแตกหักขึ้นที่พื้นผิววัสดุ และเนื้อวัสดุที่หลุดออกมาเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดสีตามที่แสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนความลึกของรอยแตกที่ขยายออกไปนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งและค่าความเค้นที่วัสดุจะทนได้ K_{Ic} (“Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001)

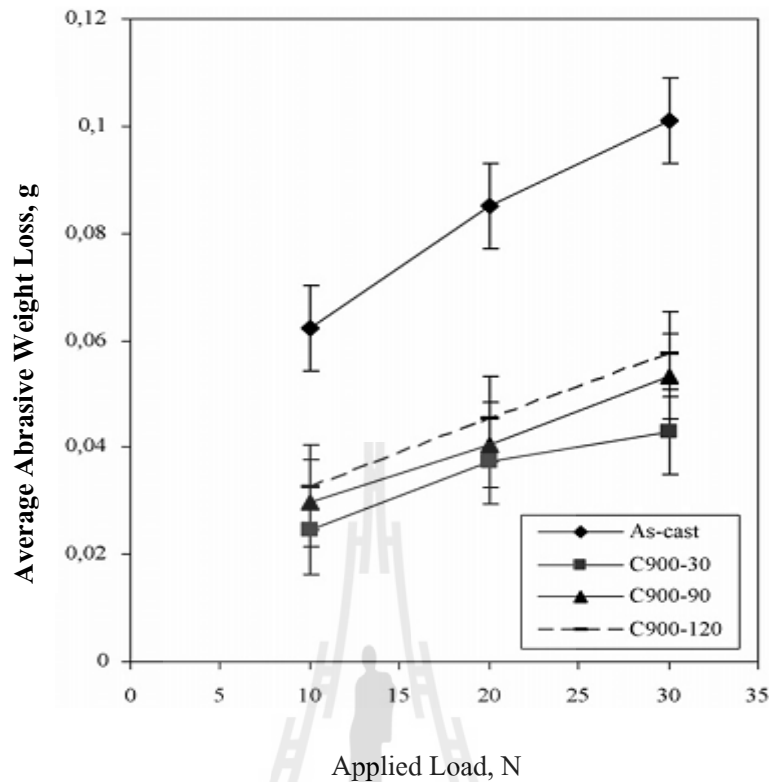


รูปที่ 2.11 แผนภาพการสึกหรอแบบขัดสี, Dp^* คือจุดวิกฤตของระดับการกินลึก (degree of penetration) ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากรอยไถ (plowing) เป็นรอยเฉือน (wedge formation) และ Dp^{**} คือจุดวิกฤตของระดับการกินลึกในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากรอยเฉือน (wedge formation) เป็นรอยตัด (cutting) (“Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention,” R.Chattopadhyay, 2001)

2.3.5 สมบัติด้านความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

(Francucci, Sikora, and Dommarco, 2008) ได้ศึกษาความต้านทานการขัดสีแบบ Dry sand/rubber Wheel ของเหล็กหล่อเหนียวที่มีส่วนผสม 3.0%Si 1.0%Cu 0.3%Ni และ 0.17%Mo ที่ชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นตามสภาวะการทดสอบของ (Yang and Putatunda, 2005) โดยอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส แล้วชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 260 280 และ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนแบบสองชั้นซึ่งงานถูกชุบลงในเตาเกลือที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นแช่ไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 280 320 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการทดสอบการขัดสีในสภาวะที่มีความเค้นต่ำ เหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบสองชั้นสามารถต้านทานการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งแบบชั้นเดียว โดยวัสดุที่มีความแข็งสูงจะสามารถต้านทานการขัดสีได้ดีกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำ แต่เมื่อนำไปทดสอบการใช้งานจริงของตัวชุดคาน ซึ่งมีความเค้นสูงกลับพบว่าวัสดุที่มีความเหนียวมากจะสามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าวัสดุที่มีความแข็งสูง

(Sahin, Erdogan, and Kilicli, 2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีการเติมธาตุผสมซึ่งมีส่วนผสม 3.42 %C, 2.63%Si และ 0.318 %Mn โดยอบออสเทนไนท์ซึ่งในช่วงที่มีโครงสร้าง 2 เฟส ($\alpha+\gamma$) ที่อุณหภูมิ 795 และ 815 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปชุบเพื่อทำออสเทมเปอร์ทั้งในอ่างเกลือที่มีอุณหภูมิ 365 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีปริมาณออสเฟอไรต์ที่แตกต่างกัน และมีการนำชิ้นงานไปทำการอบชุบแบบดั้งเดิมเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบผลการทดลองด้วย สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์แล้วพบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความแข็งมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการชุบออสเทมเปอร์สูงขึ้น โดยมีอัตราการยึดตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีกับชิ้นงานในสภาพหลังการหล่อและชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบจนได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบสองเฟสด้วย โดยพบว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบสองเฟสมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า ในขณะที่เดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ทั้งหมดยังพบว่าชิ้นงานที่มีการสึกหรอน้อยที่สุดคือชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์แบบดั้งเดิมที่มีโครงสร้างเป็นออสเฟอไรต์ทั้งหมด ส่วนชิ้นงานที่มีการสึกหรอมากที่สุดคือชิ้นงานที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น โครงสร้างสองเฟสที่มีปริมาณออสเฟอไรต์น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณออสเฟอไรต์มากขึ้นรวมไปถึงอุณหภูมิในการชุบออสเทมเปอร์ที่ลดลง



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ยจากการขัดสีเทียบกับแรงกดที่ใช้ทดสอบ

(Sahin et al., 2007)

(Quanshun Luo, Jingpei Xie, and Yanpei Song, 1994) ได้ศึกษาเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซต์เป็นวัสดุที่ทนต่อการสึกหรอแบบขัดสี โดยมีความเหนียวที่ดีกว่าเหล็กหล่อขาวมาก ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างพื้นฐานและแกรไฟต์ของวัสดุดังกล่าวที่มีต่อการสึกหรอ ได้ทดสอบทั้งในสภาวะการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสองวัตถุ (pin-on-disc) และการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ (ด้วยแรงกระแทก) ซึ่งวัสดุที่นำมาทดสอบมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซต์, มาร์เทนไซต์ที่มีออสเตไนต์เหลือค้าง และเบนไนต์ รวมทั้งมีการตรวจสอบผลของแกรไฟต์ โดยนำเหล็กกล้าคาร์บอนสูงที่มีโครงสร้างจุลภาคใกล้เคียงกันมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบด้วยการวิเคราะห์กลไกการสึกหรอโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการตรวจสอบสภาพพื้นผิวและใต้พื้นผิวที่สึกหรอ การสึกหรอแบบขัดสีชนิดสองวัตถุของวัสดุที่นำมาทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นแบบรอยแตก (microcutting) และรอยไถ (ploughing) เมื่อมีแรงกระทำแบบกระแทกกระทำจะทำ

ให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรที่พื้นผิววัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่มีโครงสร้างเป็นเบนไนท์พบว่า แกรไฟต์จะเกิดการสึกหรอแบบรวดเร็วและรุนแรง และการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุก็มีการพบรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นบริเวณขอบแกรไฟต์เช่นกัน ความต้านทานการสึกหรอของโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีมากกว่าเบนไนท์ และเนื่องจากปริมาณออสเทนไนท์เหลือค้างจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ ออสเทนไนท์ยิ่งมากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบทั้งเหล็กหล่อและเหล็กกล้ามีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้นตามไปด้วย ผลจากการสึกหรอของโครงสร้างพื้นฐานที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ขึ้นอยู่กับสภาวะการทดสอบ โดยพบว่าในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสองวัตถุ นั้นผลจากการสึกหรอของโครงสร้างพื้นฐานมีผลน้อยกว่าการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุ (ทั้งเหล็กหล่อและเหล็กกล้า) อย่างไรก็ตามเมื่อให้แรงกระทำกับชิ้นงานแล้ว พบว่าความต้านทานการสึกหรอของเหล็กหล่อจะลดลงเนื่องจากการที่มีแกรไฟต์อยู่

(Gaston Francucci, Jorge Sikora and Ricardo Dommarco, 2007) ได้ศึกษาผลของกระบวนการอบชุบออสเทมเปอริงแบบสองขั้น (two-step) ด้วยวิธีของ Putatunda โดยศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลที่มีความเกี่ยวข้องกับการสึกหรอแบบขัดสี ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือเหล็กหล่อเหนียวที่หล่อออกมาเป็นรูป Y-blocks (ASTMA 897) และฟันของหัวตัดที่มีการนำไปทดสอบโดยใช้งานจริงกับรถตัด ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบชุบออสเทมเปอริงแบบสองขั้นทำให้ปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลต่างๆดีขึ้น เช่น ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานจุดคราก ความแข็ง และความต้านทานแรงกระทำ ในการศึกษาได้แบ่งการทดสอบการสึกหรอออกเป็น 2 วิธีเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะการสึกหรอที่แตกต่างกัน โดยใช้การทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีชนิดล้อยาง (ASTM G 65) ซึ่งพบว่ากระบวนการอบชุบออสเทมเปอริงแบบสองขั้นให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าการอบชุบแบบดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตามฟันของหัวตัดที่มีการนำไปทดสอบโดยใช้งานจริงกับรถตัดนั้นให้ผลที่ตรงกันข้าม

แนวทางเบื้องต้นที่จะสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้คือ การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาผลิต การศึกษาสารหล่อลื่น เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นมีการสึกหรอลดลงมากหรือน้อยเท่าใดจึงมีความจำเป็น ดังนั้นในงานนี้จึงเลือกศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอริง โดยการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีล้อยาง (ชนิดสามวัตถุ) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบออสเทมเปอริงที่มีต่อ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอริง ให้ได้ โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกลและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอริงที่ผ่านการอบออสเทนไนท์ซิงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 30 60 และ 90 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยการชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิ 280 และ 360 องศาเซลเซียส แช่ทิ้งไว้ประมาณ 60 90 และ 120 นาที ปหล่อยให้เย็นในอากาศ เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาผลของเวลาในการอบอสเตนไนไทซิงที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี ตลอดจนสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับการปรับปรุงหรือพัฒนาสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ต่อไป

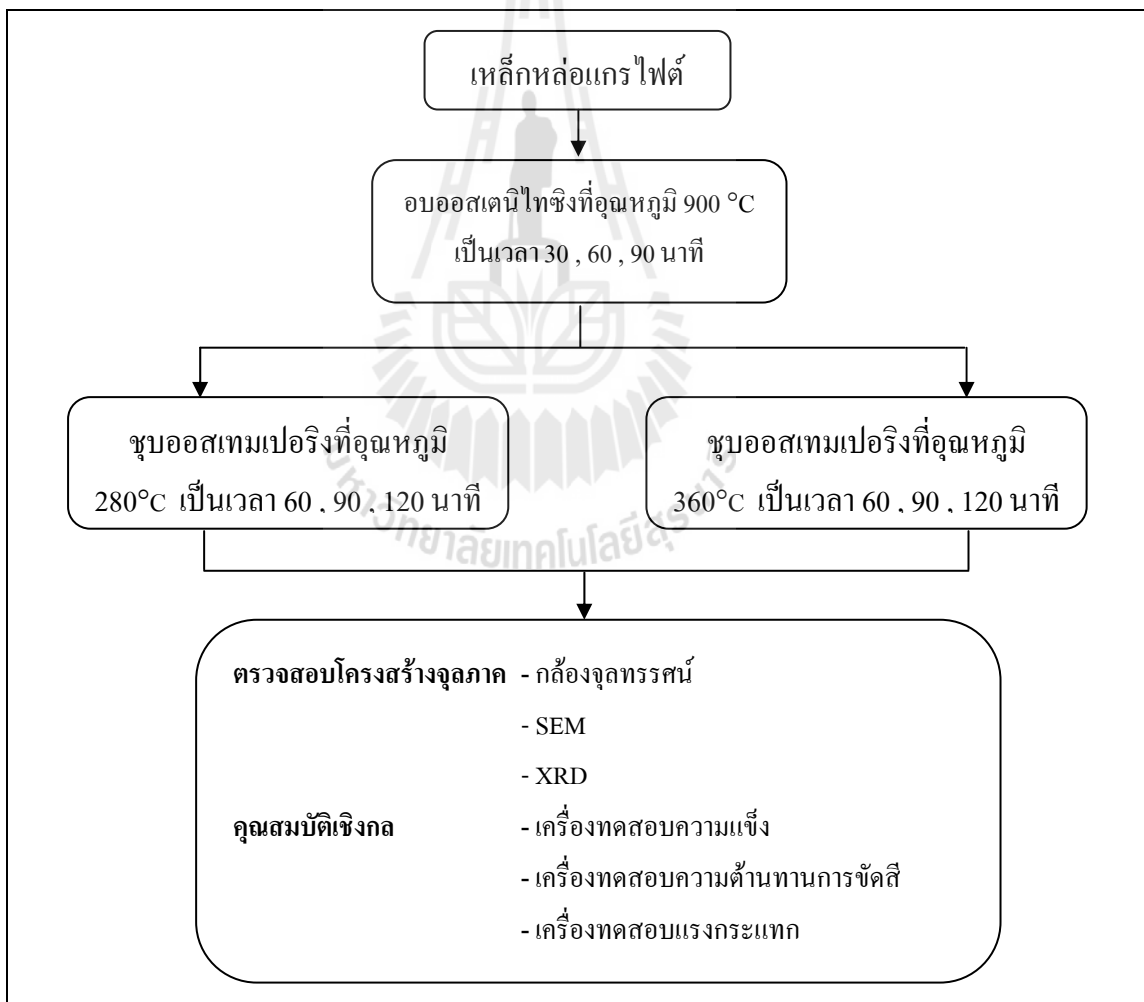


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

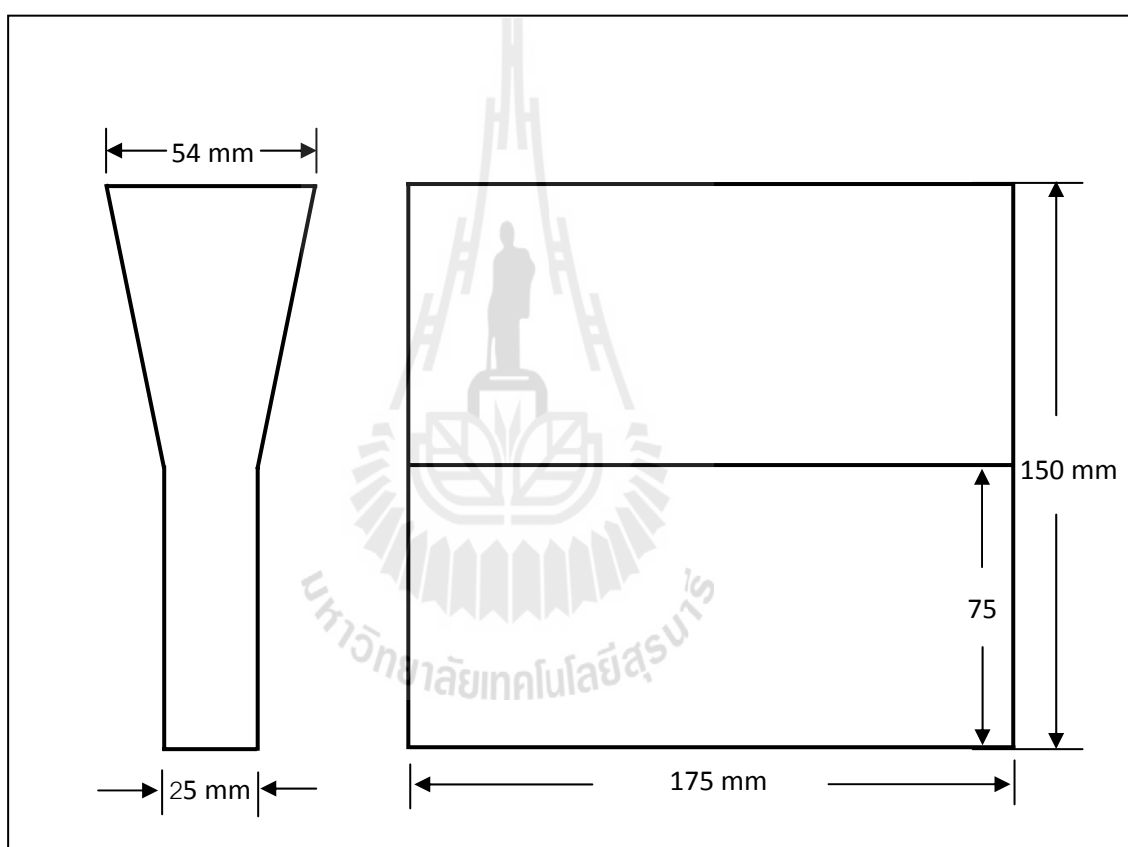
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์โดยการทดสอบขัดสีตัวอย่าง (ชนิดสามวัตถุ) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



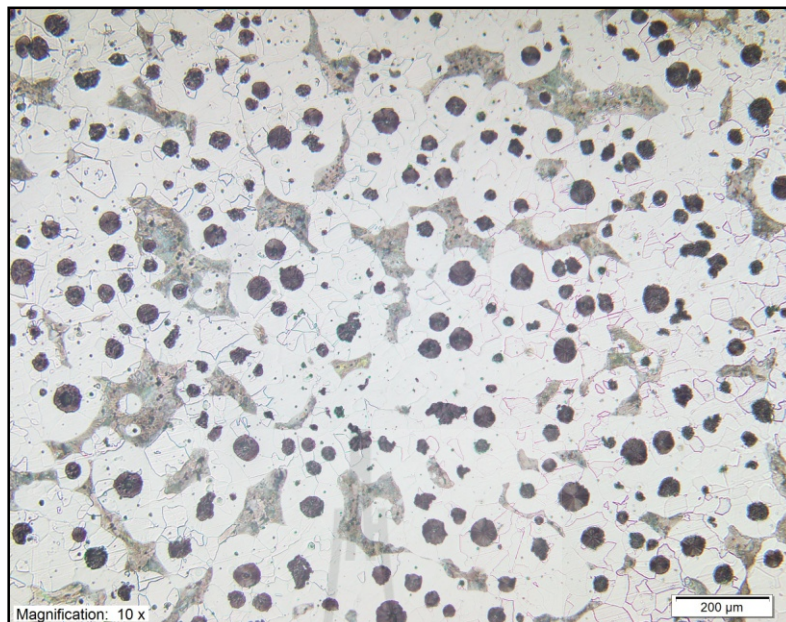
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมซึ่งมีเนื้อพื้นประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์ โดยหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน Y-blocks ขนาด 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมี ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งเหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนแกรไฟต์ประมาณ 102 เม็ดกลมต่อตารางมิลลิเมตร โครงสร้างพื้นฐานใหญ่เป็นเฟอร์ไรต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชิ้นงาน Y-block ของเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม

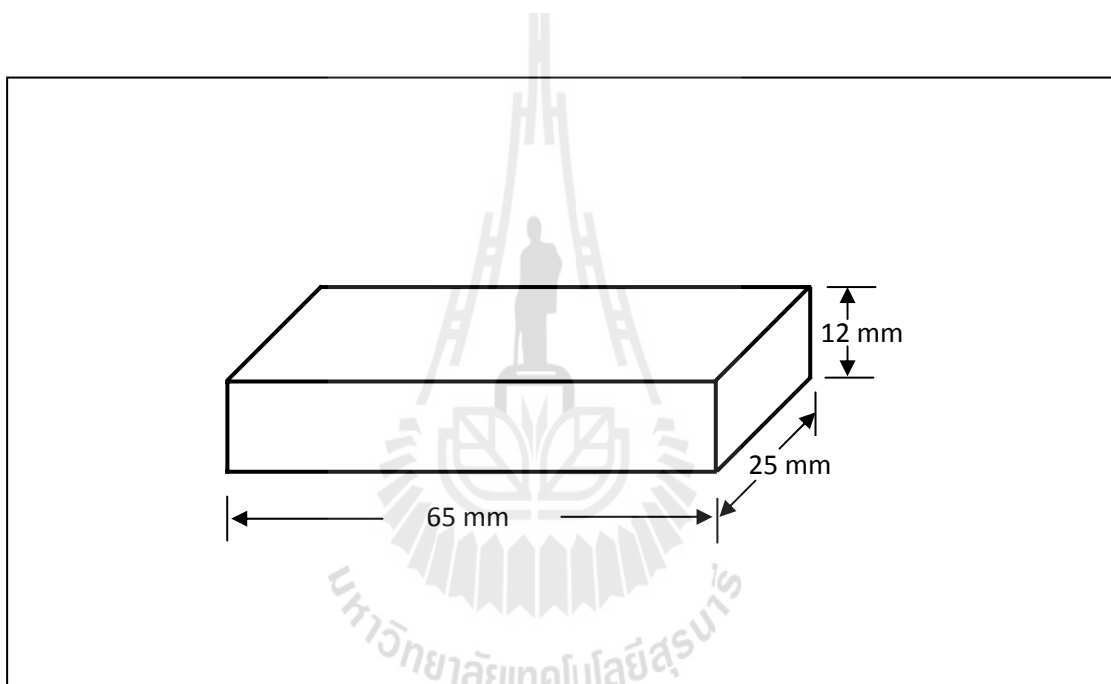
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวเกรไฟต์กลม

ส่วนผสมทางเคมี (wt %)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mg
3.44	2.662	0.035	0.031	0.009	-	0.026	0.06

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1 ชิ้นงานทดสอบการเสียดสี

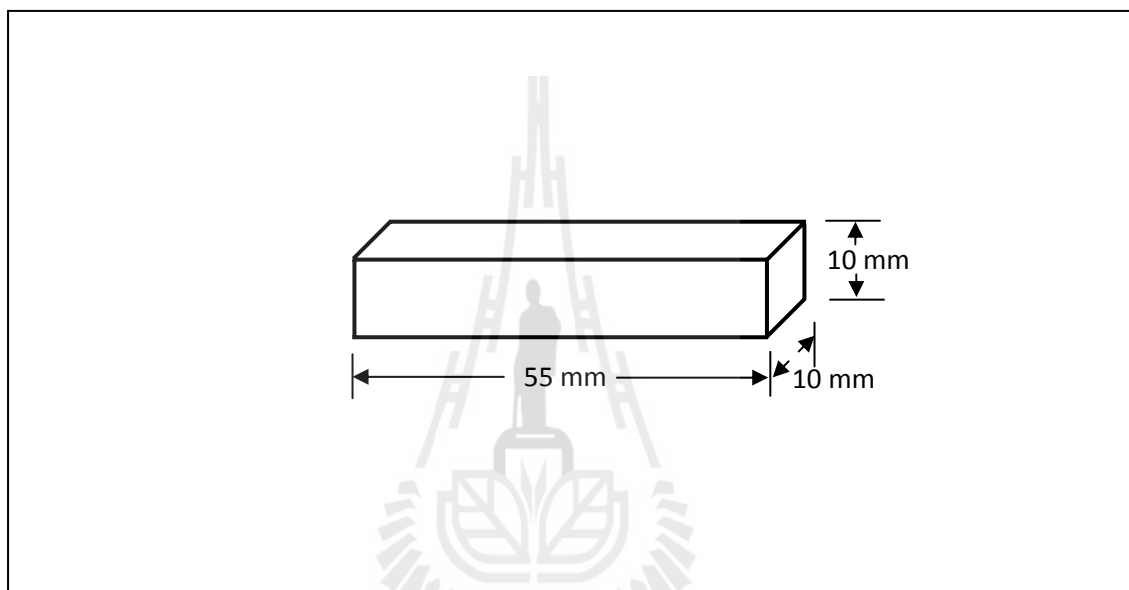
ตัดชิ้นงานหล่อด้านล่างของ Y-block ให้มีขนาด 25 x 75 x 14 มิลลิเมตร แล้วนำไปชุบออสเทมเปอร์ริงตามสภาวะการอบชุบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ภายหลังจากชุบออสเทมเปอร์ริงนำชิ้นงานไปไส ให้ได้ขนาด 25 x 75 x 13 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปเจียรนัยผิวหน้า โดยให้ชิ้นงานมีขนาดสุดท้ายเป็น 25 x 65 x 12 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และมีความเรียบผิวไม่เกิน 0.8 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบการเสียดสี

3.3.2 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

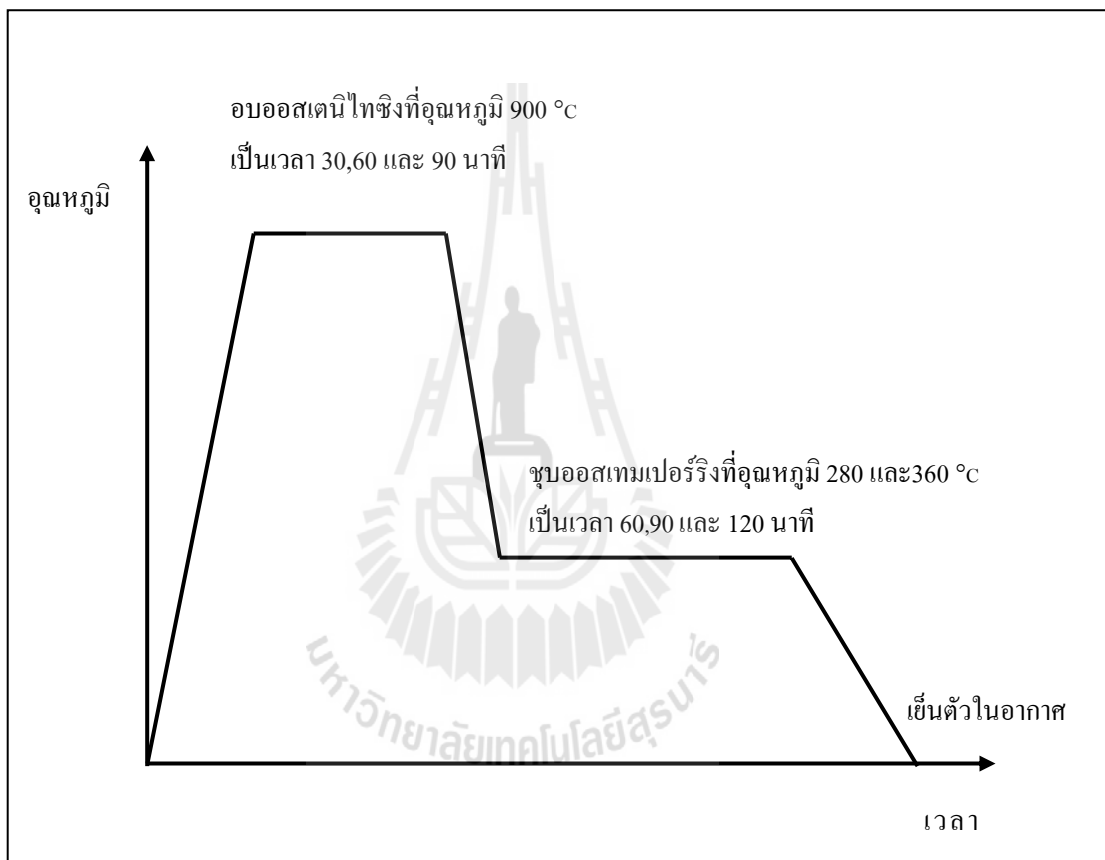
ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแบบไม่บากร่อง (Unnotched Charpy Specimens) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A327-91 โดยตัดชิ้นงานหล่อด้านล่างของ Y-block ให้มีขนาด 12 x 12 x 58 มิลลิเมตร แล้วนำไปชุบอบสเทมเปอริงตามสภาวะการอบชุบ จากนั้นไสให้ชิ้นงานมีขนาด 10 x 10 x 55 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง

3.4 การอบชุบชิ้นงานทดสอบ

สำหรับกระบวนการอบชุบอสเทมเปอร์ริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการอบอสเตนิไทซิง (austenitizing) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 , 60 และ 90 นาที แล้วชุบอสเทมเปอร์ริง (austempering) ในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 280 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60, 90 และ 120 นาที



รูปที่ 3.6 กระบวนการอบชุบอสเทมเปอร์ริง

ตารางที่ 3.2 สภาวะในการอบชุบออสเทมเปอร์ริง (austempering) ที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่างชิ้นงาน	อุณหภูมิอบออสเทนไนท์ (°C)/ เวลา(นาที)	อุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ (°C)/ เวลา(นาที)
A30-280-60	900/30	280/60
A30-280-90	900/30	280/90
A30-280-120	900/30	280/120
A30-360-60	900/30	360/60
A30-360-90	900/30	360/90
A30-360-120	900/30	360/120
A60-280-60	900/60	280/60
A60-280-90	900/60	280/90
A60-280-120	900/60	280/120
A60-360-60	900/60	360/60
A60-360-90	900/60	360/90
A60-360-120	900/60	360/120
A120-280-60	900/90	280/60
A120-280-90	900/90	280/90
A120-280-120	900/90	280/120
A120-360-60	900/90	360/60
A120-360-90	900/90	360/90
A120-360-120	900/90	360/120

หมายเหตุ : อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคือ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อนยี่ห้อ Olympus High Power Microscope รุ่น BX51 ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 จากนั้นทำการขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ แล้วกัดกรดด้วยไนตริก 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 วินาที



รูปที่ 3.7 จุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อนยี่ห้อ Olympus High Power Microscope รุ่น BX51

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณเฟส

การวิเคราะห์ปริมาณเฟสของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D5005 การเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณเฟส ตัดชิ้นงานขนาด 10 X 10 X 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 800 1000 และ 1200 แล้วขัดละเอียดด้วยอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ กัดกรดด้วยไนตริก 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 วินาที โดยการขัดละเอียดแล้วกัดกรดไนตริกจะทำซ้ำ 3 ครั้ง นำชิ้นงานวิเคราะห์ปริมาณเฟสล้างด้วยสารอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอุลตราโซนิกประมาณ 5 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
(X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Bruker
รุ่น D5005

วิธีการหาปริมาณอสเตไนต์เหลือค้าง

1. วิเคราะห์ข้อมูลดิบที่ได้ หาดำแหน่ง 2 และพื้นที่ได้กราฟ
2. คำนวณหาค่าตัวแปรจากสูตร

$$R_{\alpha}^{hkl} = \frac{1/(F/2\rho LPe^{-2M})}{v^2}$$

$$\frac{V_{\gamma}}{V_{\alpha}} = \frac{I_{\gamma}^{hkl}}{R_{\gamma}^{hkl}} / \frac{I_{\alpha}^{hkl}}{R_{\alpha}^{hkl}} = X$$

$$V_{\gamma} + V_{\alpha} = 1$$

โดย	R^{hkl}	รัศมีของคิฟแฟรคโตมิเตอร์
	LP	คือแฟคเตอร์ลอเรนซ์-โพลารีไรต์ (Lorentz Polarization factor) มุมแบรกก์ (Bragg angle)
	I^{hkl}	ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl)
	ρ	แฟคเตอร์ทวีคูณ (multiplicity factor)
	$/F/2$	แฟคเตอร์โครงสร้าง (structure factor)
	e^{-2M}	แฟคเตอร์อุณหภูมิ (temperature factor)
	v	ปริมาณของหน่วยเซลล์ (volume of the unit cell)
	V	สัดส่วนโดยปริมาตรของ α -plane (volume fraction of the α -plane)

3.7 การตรวจสอบผิวการขัดสี

การตรวจสอบผิวการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL Scanning Electron Microscopes รุ่น JSM-6010LV ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบผิวการขัดสี นำชิ้นงานทดสอบการขัดสีล้างด้วยสารอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอุลตราโซนิกประมาณ 5 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL
Scanning Electron Microscopes
รุ่น JSM-6010LV

3.8 การทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ยี่ห้อ Wilson รุ่น Dead Weight MJ โดยใช้แรงกดชิ้นงานทดสอบที่เกิดจากน้ำหนักกด 3000 กิโลกรัม และลูกบอลเหล็กกล้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10 วินาที

3.9 การทดสอบแรงกระแทก

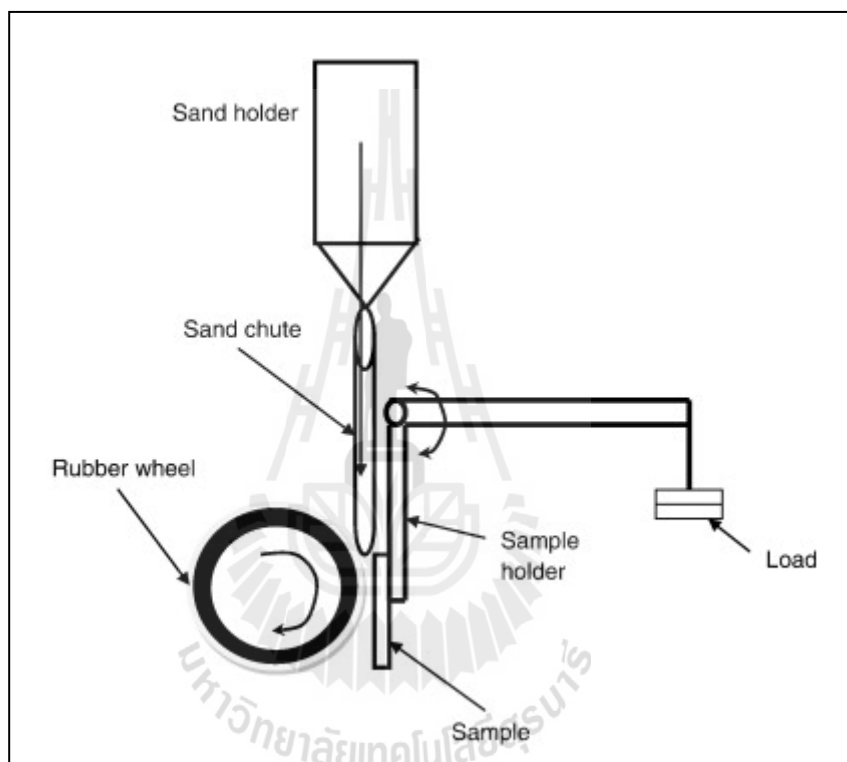
การทดสอบแรงกระแทกได้ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (Charpy Impact testing) ยี่ห้อ Denison Mayes Group โดยมีความเร็วในการเหวี่ยงที่ 5.2 เมตรต่อวินาที

3.10 การทดสอบการขัดสีชนิดสามวัตถุ

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้ทดสอบการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีตัวอย่างชนิดสามวัตถุ (dry sand rubber wheel abrasion test) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยใช้ทรายเป็นตัวขัดสีระหว่างชิ้นงานทดสอบกับล้อยางที่หมุนอยู่ ทั้งนี้ใช้แรงกดชิ้นงานที่ 130 นิวตัน (N) จากการถ่วงน้ำหนักด้วยลูกตุ้ม ล้อยางจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 228.6 มิลลิเมตร หมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีไปในทิศทางเดียวกับการไหลทราย โดยอัตราการไหลของทรายที่ 300-400 กรัมต่อนาที ซึ่งแขนของแกนที่ใช้สร้างแรงกดจะอยู่ในระนาบที่สัมผัสกับพื้นผิวของล้อยาง และแรงกดมีทิศทางตั้งฉากกับรัศมีของล้อยาง ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 10 นาที โดยมีขั้นตอนในการปฏิบัติการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมผิวชิ้นงานให้มีความหยาบไม่เกิน 0.8 ไมโครเมตร
- 2) ล้างชิ้นงานทดสอบด้วยสารอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอุลตราโซนิคประมาณ 5 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง
- 3) ชั่งชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม
- 4) ติดตั้งชิ้นงานทดสอบด้วยตัวจับชิ้นงานทดสอบ จากนั้นปรับโหลดให้เหมาะสมกับการทดสอบ
- 5) ปรับอัตราการไหลของทรายให้ไหลอยู่ในช่วง 300-400 กรัมต่อนาที แล้วทำการทดสอบ โดยการทดสอบควรให้ล้อยางเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องก่อนการทดสอบครั้งต่อไป ซึ่งสามารถใช้ล้อยางได้จนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 215.9 มิลลิเมตร ถ้าล้อยางเล็กกว่าที่กำหนดต้องทำการเปลี่ยนล้อยางใหม่

- 6) เริ่มหมุนตัวอย่างและค่อยๆ เลื่อนชิ้นงานทดสอบจนสัมผัสกับตัวอย่าง
- 7) เมื่อทำการทดสอบครบตามจำนวนรอบที่ลือหมุนแล้ว ให้เลื่อนชิ้นงานทดสอบออกมาจากตัวอย่าง หยุดการปล่อยทรายและหยุดหมุนตัวอย่าง โดยต้องวัดอัตราการไหลของทรายหลังการทดสอบด้วย
- 8) นำชิ้นงานออกและชั่งชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบการกัดสีตัวอย่างชนิดสามวัตถุ และแผนภาพจำลองของเครื่องทดสอบ

บทที่ 4

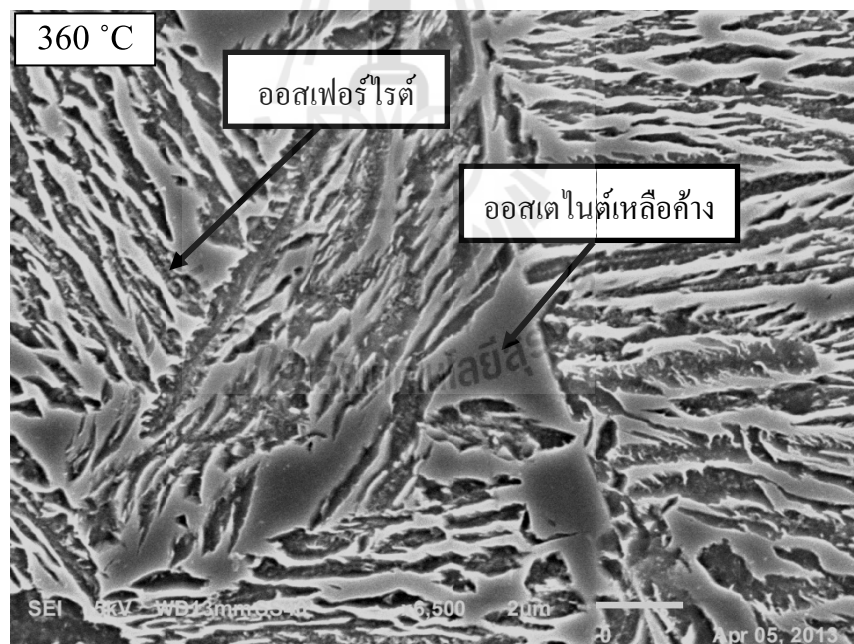
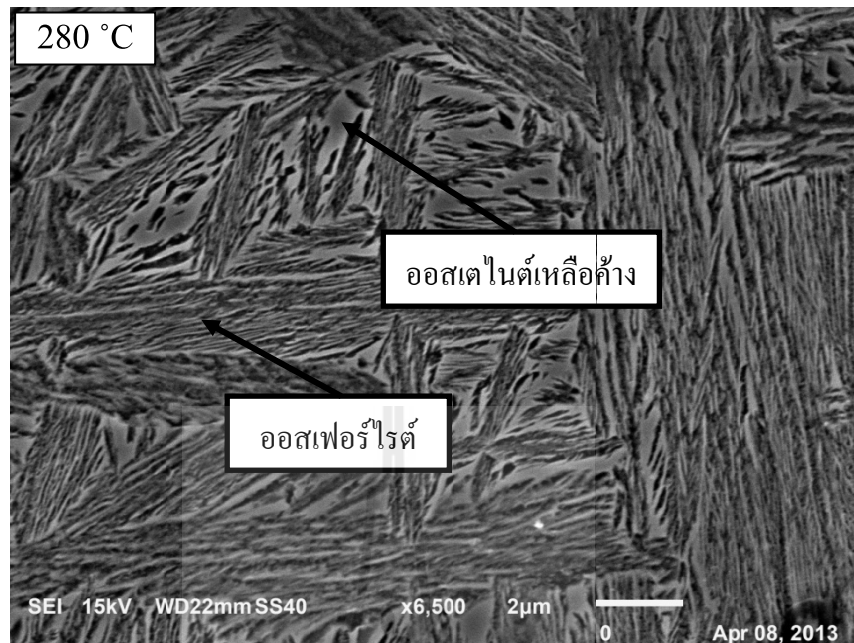
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

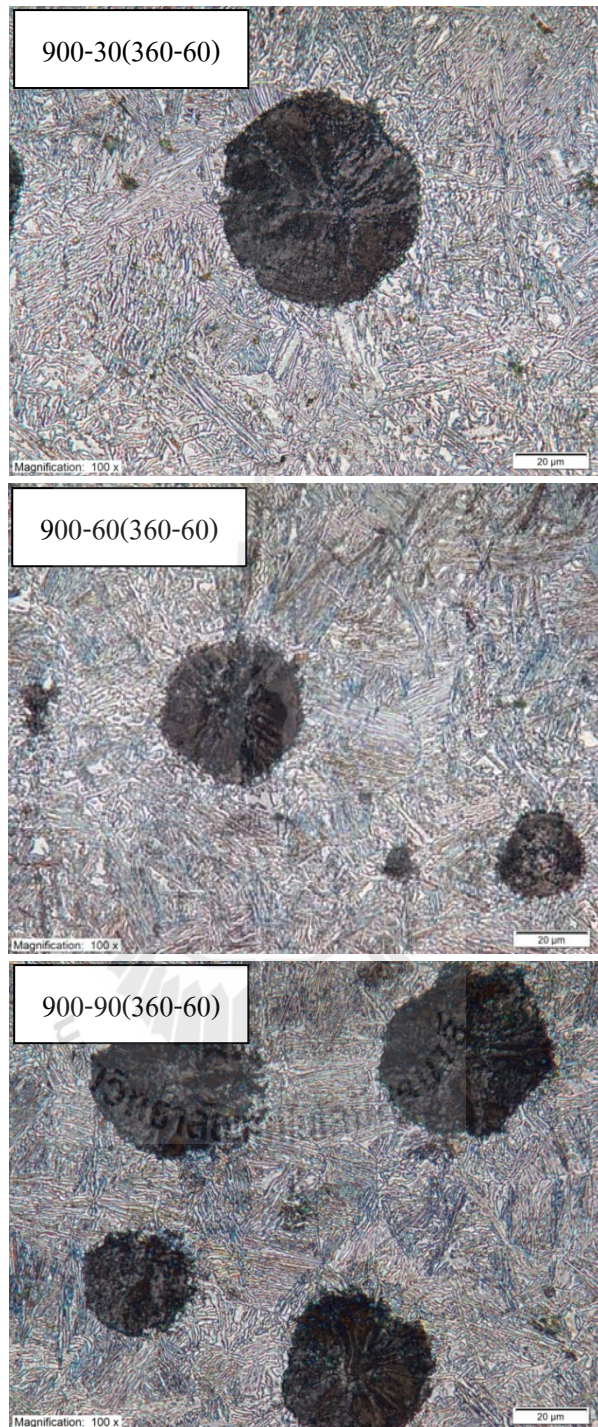
ภายหลังจากอบชุบเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ได้นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน (Optical microscope) ตรวจสอบวิเคราะห์หาเฟสที่ปรากฏโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อยืนยันโครงสร้างที่ได้ทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีล้อยาง (ชนิดสามวัตถุ) และตรวจสอบพื้นผิวที่ผ่านการขัดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รวมทั้งทดสอบหาสมบัติทางกลทั่วไป ได้แก่ ค่าความแข็ง และพลังงานดูดซับแรงกระแทก ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.2 โครงสร้างจุลภาค

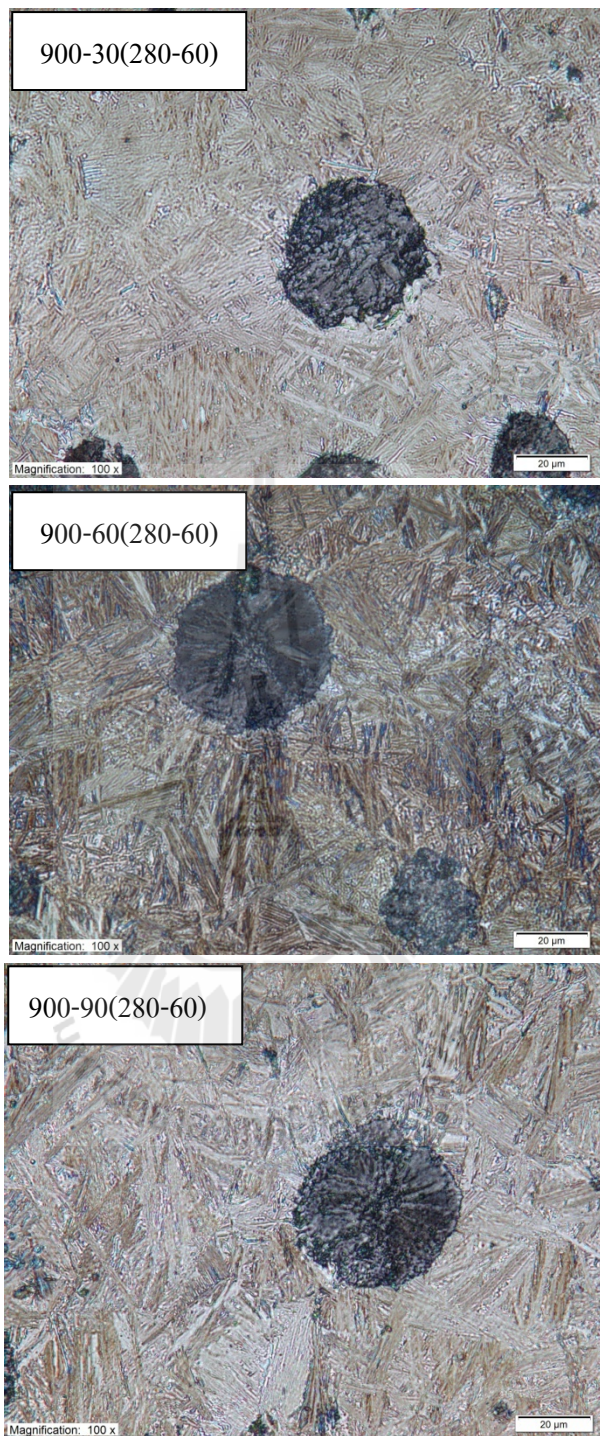
โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากอบชุบออสเทมเปอร์ประกอบด้วย แกรไฟต์กลมและโครงสร้างพื้นออสเฟอไรต์ ซึ่งในออสเฟอไรต์ประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูปเข็มแหลมและออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง จากชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ซึ่งเหมือนกันแต่ใช้เวลาในการอบออสเทมเปอร์ต่างกัน คือ 60 90 และ 120 นาทีนั้น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนพบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากอบมีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากไม่สามารถแยกแยะมาร์เทนไซต์ที่อยู่ในออสเตไนต์เหลือค้างได้ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่อบออสเทมเปอร์ซึ่งเหมือนกัน แต่อบออสเตไนต์ซึ่งต่างกัน คือ 30 60 และ 90 นาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งเป็นเวลา 30 นาทีมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยังมีกลุ่มก้อนออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Untransformed Austenite) อยู่มากอย่างเห็นได้ชัด ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลา 60 และ 90 นาทีนั้นมีความสม่ำเสมอมากกว่าเพราะปริมาณกลุ่มก้อนออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสลดลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลาเท่าๆกัน แต่อุณหภูมิการอบออสเทมเปอร์ต่างกันคือ 280 และ 360 องศาเซลเซียส เฟอไรต์รูปเข็มแหลมมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบออสเทมเปอร์สูงขึ้น โดยยังเห็นได้ชัดเจนเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทนเปอ์ที่อบออสเตไนท์ซึ่งด้วยเวลา 60 นาที และชุบออสเทนเปอ์จริงด้วยเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่เวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที จากนั้นชุบออสเทมเปอร์ที่ 360 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที

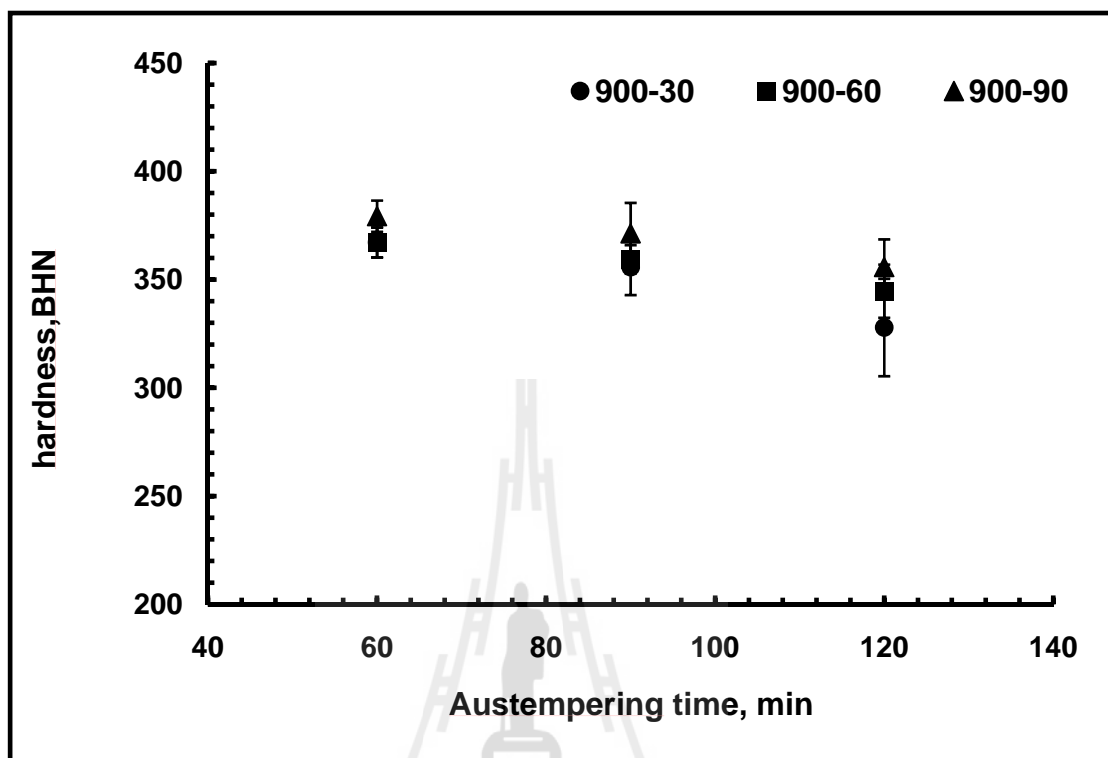


รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการอบอสเทนไนท์ซึ่งที่เวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที จากนั้นชุบอบสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที

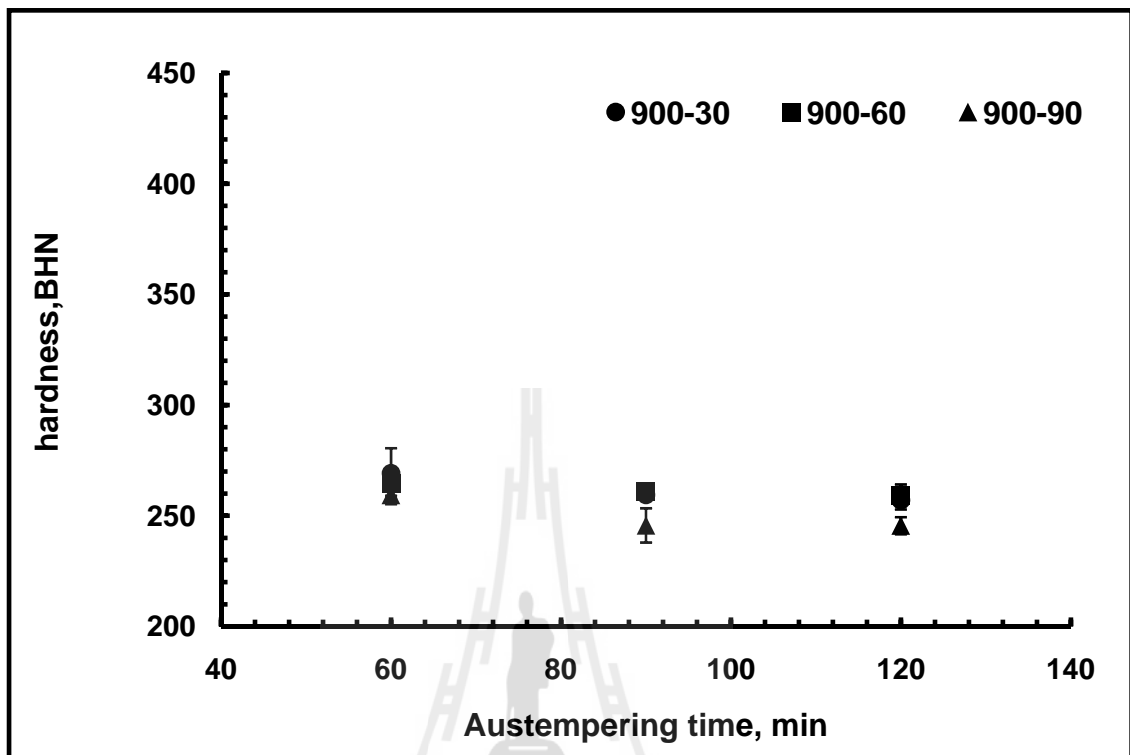
4.3 ความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงแบบบริเนลล์ โดยใช้แรงกดชิ้นงานทดสอบที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักกด 3000 กิโลกรัม และลูกบอลเหล็กกล้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการกด 10 วินาที พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการหล่อเป็น 135.75 BHN และเมื่อชุบออสเทมเปอร์ริงปรากฏค่าความแข็งแรงมีค่ามากขึ้น โดยเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้จากการอบออสเตนไนท์ซึ่งด้วยเวลา 30 60 และ 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 และ 360 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงลดลงตามเวลาการชุบออสเทมเปอร์ริงที่นานขึ้นจาก 60 เป็น 90 และ 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 - 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านออสเทมเปอร์ริงเหมือนกันแต่ใช้เวลาอบออสเตนไนท์ซึ่งต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที พบว่าค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาอบออสเตนไนท์ซึ่งที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยลดลงเมื่ออุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้นจาก 280 ไปเป็น 360 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4.1





รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งเทียบกับเวลาในการชุบอบสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

อุณหภูมิอบ ออสเตนไนท์ (°C)	เวลาอบ ออสเตนไนท์ (นาที)	อุณหภูมิชุบ ออสเทมเปอร์ริง (°C)	เวลาชุบ ออสเทมเปอร์ริง (นาที)	ค่าความแข็งแรง เฉลี่ย (BHN)
900	30	280	60	367
			90	355
			120	327
		360	60	259
			90	254
			120	245
	60	280	60	367
			90	359
			120	344
		360	60	264
			90	259
			120	256
90	280	60	379	
		90	371	
		120	355	
	360	60	269	
		90	261	
		120	259	

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 280 และ 360 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น การเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์เริ่มต้นไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลมและออสเตนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงยังไม่สิ้นสุด ดังสังเกตได้จากค่าความแข็งแรงที่ลดลงเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งในขณะที่ชุบออสเทมเปอร์ริง ออสเตนไนต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเฟอร์ไรต์ โดยชั้นต้นนิวเคลียสเฟอร์ไรต์มักจะเกิดรอบๆ แกรไฟต์กลม เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยที่สุดและมีซิลิคอนสูงทำให้เกิดเฟอร์ไรต์ได้ง่ายกว่า โครงสร้างออสเฟอร์ไรต์จะโตต่อไปเรื่อยๆ ในเนื้อออสเตนไนต์ หากการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอร์ไรต์

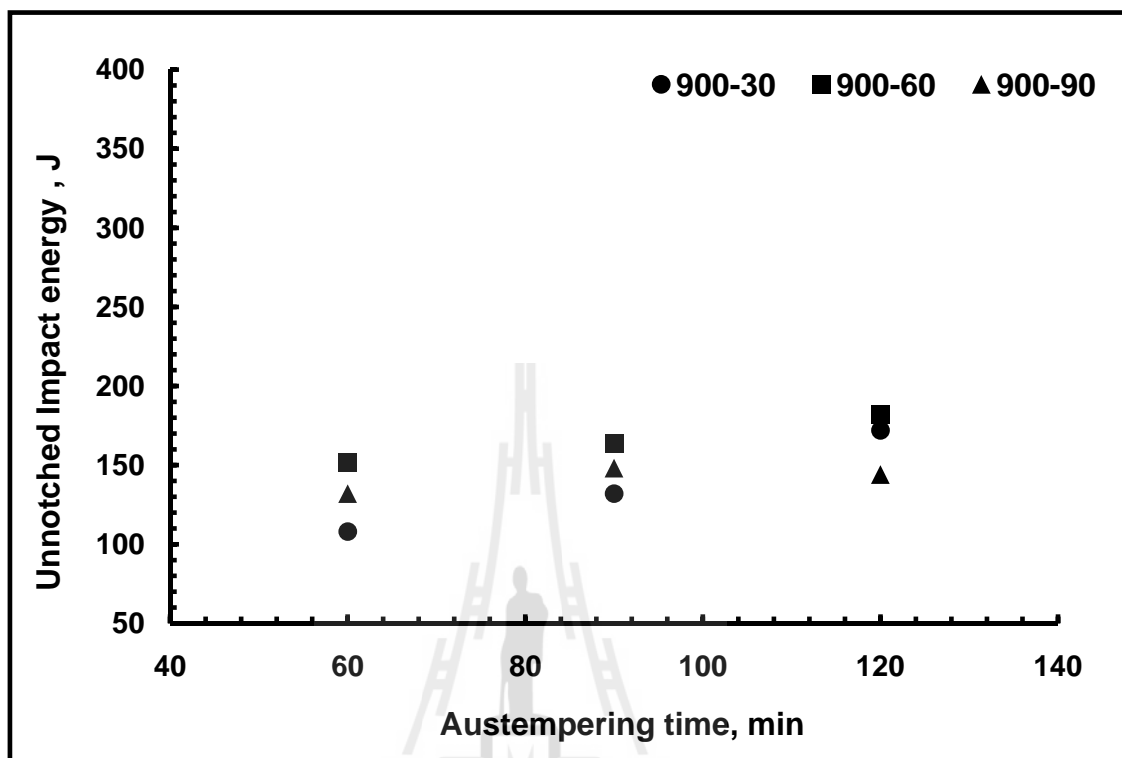
ถูกทำให้หยุดก่อนการเปลี่ยนเฟสสิ้นสุด (เวลาชুবออสเทมเปอร์ริงน้อย) ออสเตไนต์ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์มีไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ (Aranzabal et al., 1997) เมื่อเพิ่มเวลาชুবออสเทมเปอร์ริงให้นานขึ้นเป็น 120 นาที ปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลงค่าความแข็งจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้สิ่งที่สังเกตได้อีกคือค่าความแข็งหลังชুবออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 90 และ 120 นาที มีค่าความแตกต่างลดลงเมื่ออบออสเตไนต์ซึ่งนานขึ้น อาจเป็นไปได้ว่าเวลาอบออสเตไนต์ซึ่งมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้นมากขึ้น ดังนั้นด้วยเวลาในการชুবออสเทมเปอร์ริงเพียง 90 นาที ซึ่งการเปลี่ยนเฟสยังไม่สิ้นสุดปริมาณมาร์เทนไซต์ในชิ้นงานน่าจะไม่มากนัก แต่จะมีออสเตไนต์เหลือค้างมาก และเวลาชুবออสเทมเปอร์ริงมากขึ้นส่งผลให้การเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์ใกล้สิ้นสุด ซึ่งสังเกตได้จากค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันแม้เวลาชুবจะมากขึ้นก็ตาม

4.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

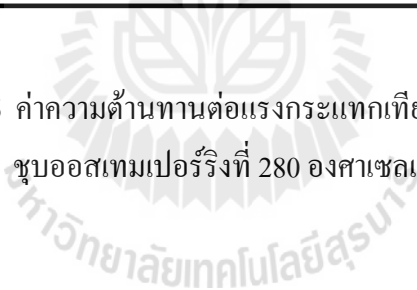
การทดสอบแรงกระแทกชุดการทดลองที่อบออสเตไนต์ซึ่งเหมือนกันแต่ชুবออสเทมเปอร์ริงต่างกัน การดูดซับพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิชুবออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้น

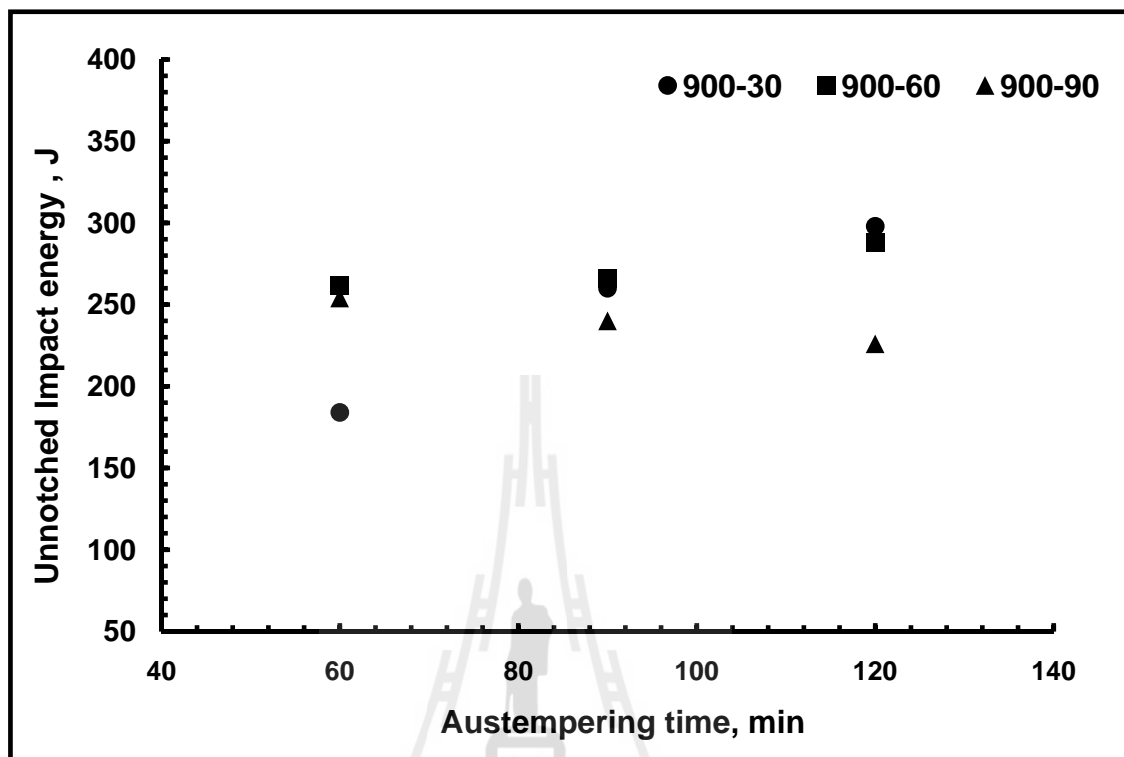
พิจารณาชুবออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้นเมื่อชুবออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น โดยพบว่าชুবออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลาสั้น 60 นาที การดูดซับพลังงานการกระแทกต่ำ เนื่องจากเวลาชুবออสเทมเปอร์ริงสั้นส่งผลให้มีมาร์เทนไซต์จำนวนมากเพราะคาร์บอนแพร่ไปในออสเตไนต์ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ และเมื่อเวลาชুবออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที พบว่าการดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้น เนื่องมาจากมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง

พิจารณาชুবออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส พบว่าเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตไนต์ซึ่งด้วยเวลาสั้นคือ 30 และ 60 นาที การดูดซับพลังงานการกระแทกสูงขึ้นหลังชুবออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น เมื่ออบออสเตไนต์ซึ่งนานที่สุดคือ 90 นาที การดูดซับแรงการกระแทกลดลงเล็กน้อยไม่แตกต่างกันมากเมื่อชুবออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเป็นช่วงเริ่มต้นเข้าสู่ปฏิกิริยาขั้นที่ 2 คือเป็นการเปลี่ยนแปลงออสเตไนต์คาร์บอนสูงไปเป็นเฟอไรต์กับคาร์ไบด์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อชুবออสเทมเปอร์ริงในระยะเวลาที่นาน ส่งผลให้ชิ้นงานเปราะและมีความต้านทานแรงกระแทกต่ำลง



รูปที่ 4.6 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเทียบกับเวลาในการ
ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4.7 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเทียบกับเวลาในการ
ชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 ปริมาณออสเตไนต์เหลือค้างของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผลึกลูกบาศก์สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากผลึกลูกบาศก์จะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีตำแหน่งมุมที่เฉพาะเจาะจง จากการตรวจสอบชิ้นงานทดสอบในกลุ่มการทดลองต่างๆสามารถหาสัดส่วนปริมาตรออสเตไนต์เหลือค้าง (X_{γ}) และปริมาณคาร์บอนโดยเฉลี่ย (C_{γ}) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์เหลือค้างภายหลังชุบออสเทมเปอร์ริง

T_{γ} (°C)	t_{γ} (min)	T (°C)	t (min)	Avg, Volume Fraction, X_{γ}	Avg, C_{γ} Wt. %	Product, $X_{\gamma} C_{\gamma}$
900	30	280	60	0.11	2.01	0.221
			90	0.15	1.84	0.276
			120	0.17	1.69	0.287
		360	60	0.26	2.05	0.533
			90	0.27	1.97	0.531
			120	0.37	1.80	0.666
	60	280	60	0.09	1.85	0.167
			90	0.10	1.86	0.186
			120	0.12	2.03	0.244
		360	60	0.31	2.10	0.651
			90	0.33	2.01	0.663
			120	0.35	1.97	0.689
	90	280	60	0.04	1.86	0.074
			90	0.08	2.00	0.160
			120	0.14	2.07	0.289
		360	60	0.08	2.35	0.188
			90	0.29	1.97	0.571
			120	0.29	1.94	0.563

4.6 ความต้านทานการกัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

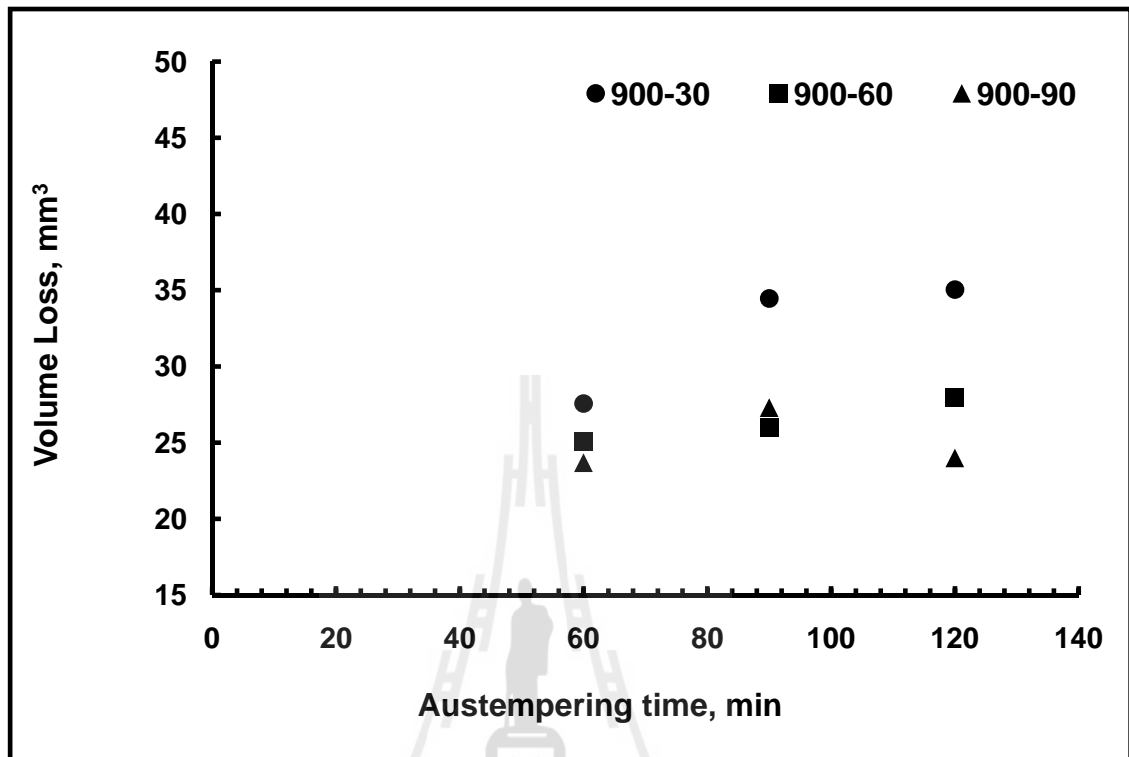
การทดสอบการกัดสีนี้ครอบคลุมถึงขั้นตอนการปฏิบัติเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานการสึกหรอแบบกัดสีสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะด้วยการทดสอบโดยใช้ทรายแห้งและล้อยาง ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อสร้างข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ผลการทดสอบการสึกหรอแบบกัดสีจะแสดงเป็นปริมาณที่หายไปในการทดสอบจากสมการ

$$Volume\ loss, mm^3 = \frac{mass\ loss\ (g)}{density\ (g/cm^3)} \times 1000 \quad (4.1)$$

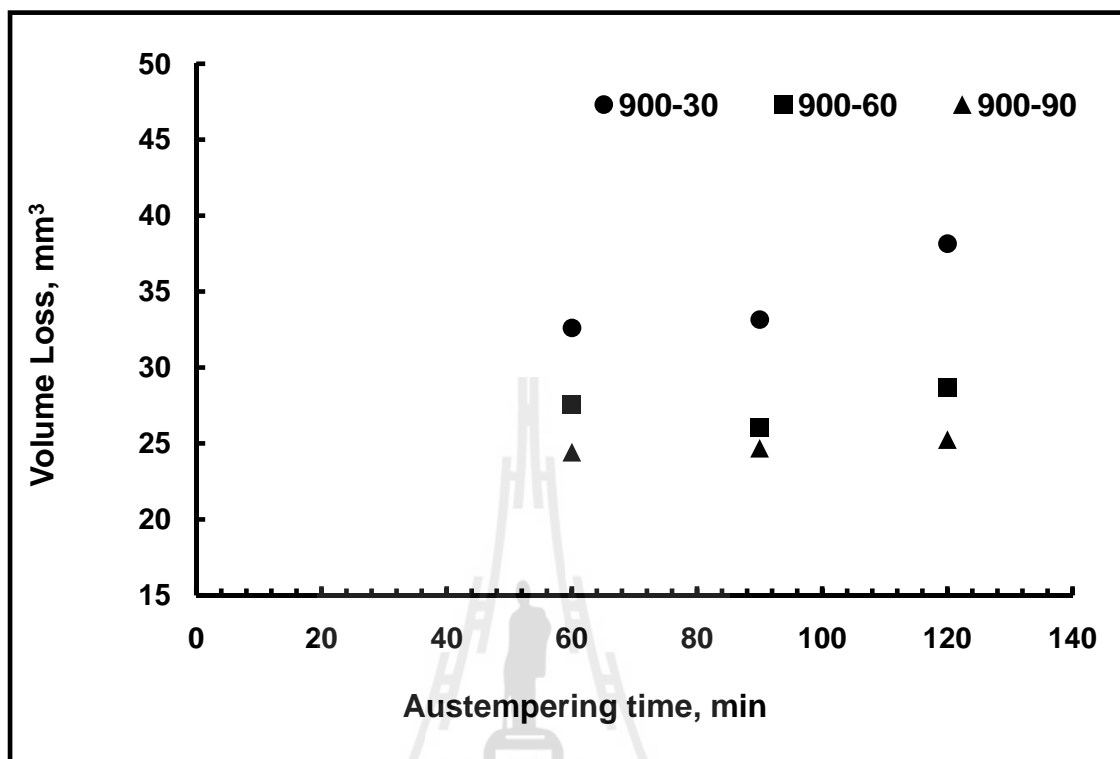
โดย	<i>Volume loss</i>	คือ	ปริมาณการสึกหรอของชิ้นงานในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร
	<i>Mass loss</i>	คือ	น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่สูญเสียหลังการทดสอบ ในหน่วยกรัม
	<i>Density</i>	คือ	ความหนาแน่นของชิ้นงานในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.6.1 ปริมาณการสึกหรอเทียบกับเวลาชุบออสเทมเปอร์ริง

ผลการทดสอบการกัดสีของเหล็กหล่อเหนียวชุดการทดลองที่อบออสเตนิไทซิงเหมือนกันแต่ชุบออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกันคือ 280 และ 360 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้น เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่อบออสเตนิไทซิงเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาที เกิดการสึกหรอมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเวลาการอบออสเตนิไทซิงสั้น ทำให้ออสเตไนต์บางส่วนมีปริมาณคาร์บอนน้อยมากและเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ประเภท Allotriomorph จำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการสึกหรอบริเวณดังกล่าว การชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที ปรากฏว่าปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าหลังการชุบออสเทมเปอร์ริงมีเฟสมาร์เทนไซต์จำนวนมากเนื่องจากคาร์บอนยังแพร่ไปในออสเตไนต์ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง และปริมาณการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น เนื่องจากปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับ
เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับ
เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส

4.6.2 ปริมาณการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์

ปริมาณการสึกหรอของชิ้นงานหลังการหล่อเป็น 57.013 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และเมื่อชุบออสเทมเปอร์จึงปรากฏว่าปริมาณการสึกหรอลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาณการสึกหรอเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้จากการอบออสเตนิไทซิง 30 นาทีให้ลักษณะแนวโน้มชัดเจน

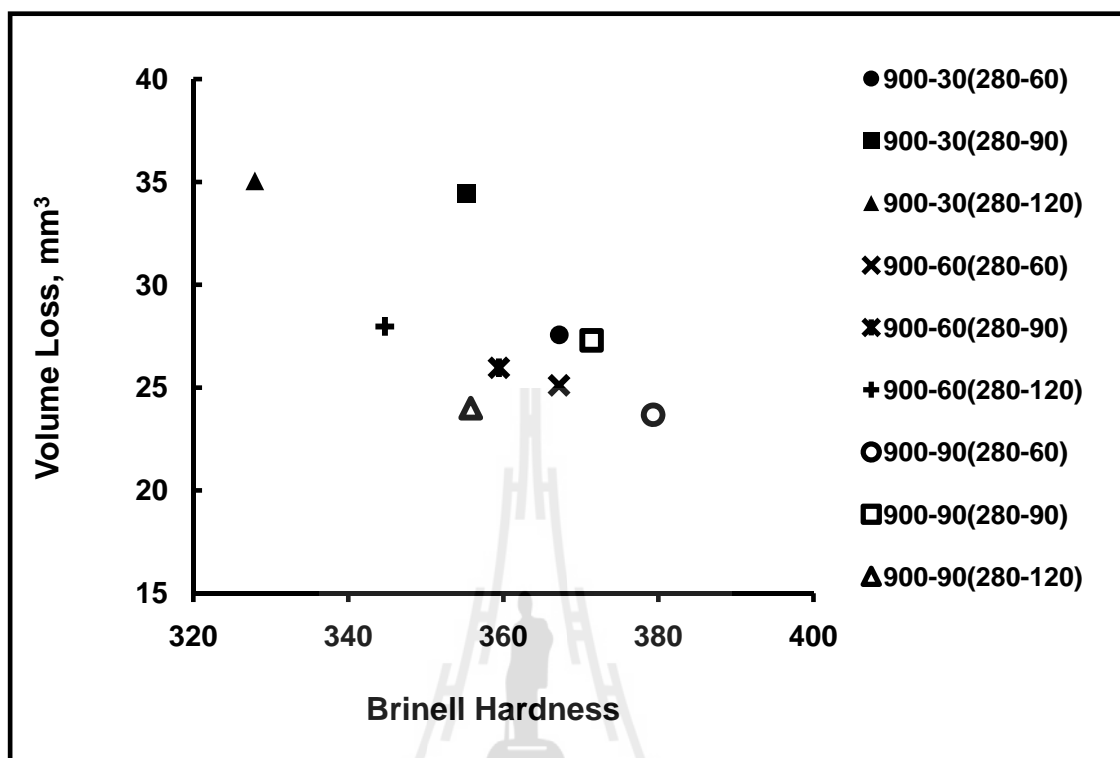
เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนิไทซิงเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาทีเกิดการสึกหรอมากที่สุดและปริมาณการสึกหรอสูงขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 เหล็กหล่อเหนียวที่ชุบออสเทมเปอร์จึง 60 นาทีพบว่ายังมีออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสอยู่มากอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และอาจเป็นไปได้ว่าเวลาการอบออสเตนิไทซิงสั้น ทำให้ออสเตไนต์บางส่วนที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยมาก และเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ประเภท Allotriomorph จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้น พบปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง อาจเป็นเพราะปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง

จากนั้นเมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนิไทซิงด้วยเวลานานขึ้นเป็น 60 นาที พบว่าปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ที่ 280 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าหลังการชุบออสเทมเปอร์จึง 60 นาที ยังคงให้เฟสมาร์เทนไซต์จำนวนมากเนื่องจากคาร์บอนยังแพร่ไปในออสเตไนต์ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ เมื่อเพิ่มเวลาชุบออสเทมเปอร์จึงให้นานขึ้น พบว่าปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง อาจเป็นเพราะปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง เมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์จึงที่ 360 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณการสึกหรอลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้น เมื่อชุบออสเทมเปอร์จึงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที ยังคงมีมาร์เทนไซต์จำนวนมาก เมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้นจาก 60 ไปเป็น 90 นาที ปริมาณการสึกหรอลดลงอาจเป็นไปได้ว่ามีมาร์เทนไซต์จำนวนมากอยู่และมีออสเตไนต์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูง และช่วยเพิ่มความต้านทานการขัดสีเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้นเป็น 120 พบว่าปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นเพราะมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง

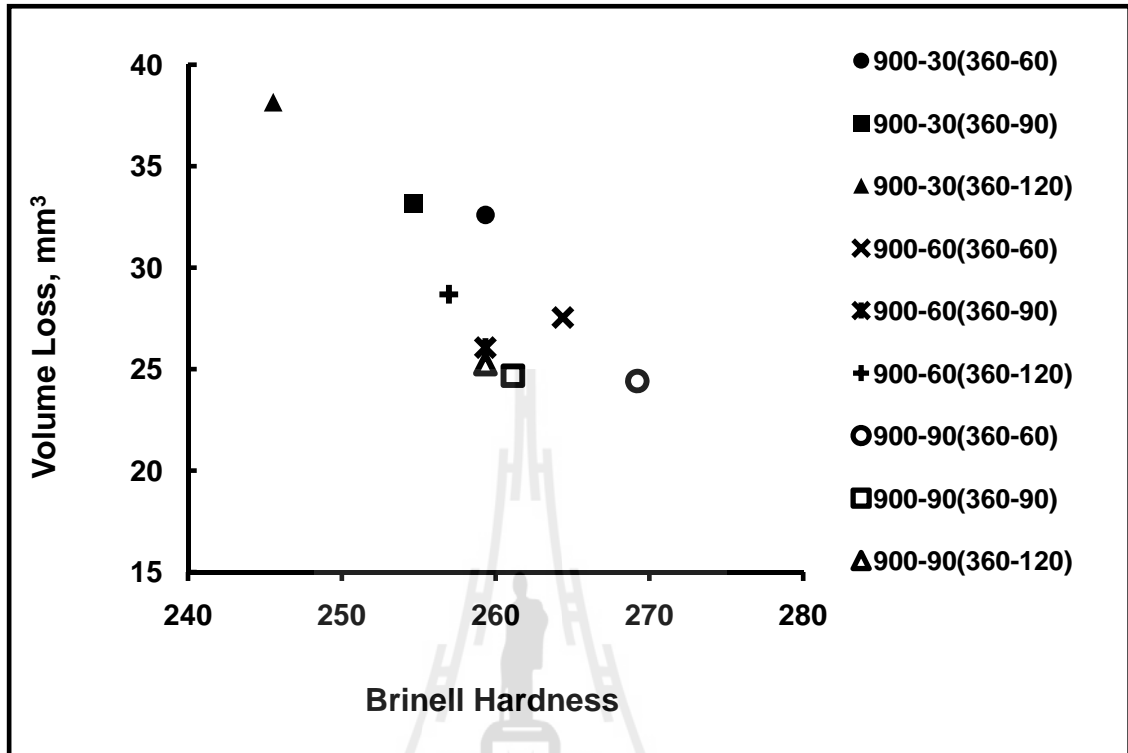
เมื่อพิจารณาเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนิไทซิงด้วยเวลานานที่สุดคือ 90 นาที ปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์จึงที่ 280 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นและลดลงตามความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อชุบออสเทมเปอร์จึงนานขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการชุบออสเทมเปอร์จึงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที อาจยังมีเฟสมาร์เทนไซต์อยู่ภายใน

โครงสร้างพื้นทำให้ด้านการสึกหรอได้ดี ต่อมาเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 60 ไปเป็น 90 นาที มีปริมาตรการสึกหรอเพิ่มขึ้น เนื่องจากเฟสมาร์เทนไซต์มีปริมาณลดลง เมื่อชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 90 ไปเป็น 120 นาที ปริมาตรการสึกหรอกลับลดลง อาจเป็นเพราะออสเตไนต์เหลือค้างที่มีคาร์บอนสูงและช่วยเพิ่มความต้านทานการขัดสีอันเนื่องมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงเมื่อได้รับความเครียดจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ เมื่อพิจารณาปริมาตรการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาตรการสึกหรอเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าชุบออสเทมเปอร์ริงเวลาสั้น 60 นาที ยังมีเฟสมาร์เทนไซต์จำนวนมากเนื่องจากคาร์บอนยังแพร่ไปในออสเตไนต์ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ เมื่อเพิ่มเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงให้นานขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที พบว่าปริมาตรการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลง อาจเป็นเพราะปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง

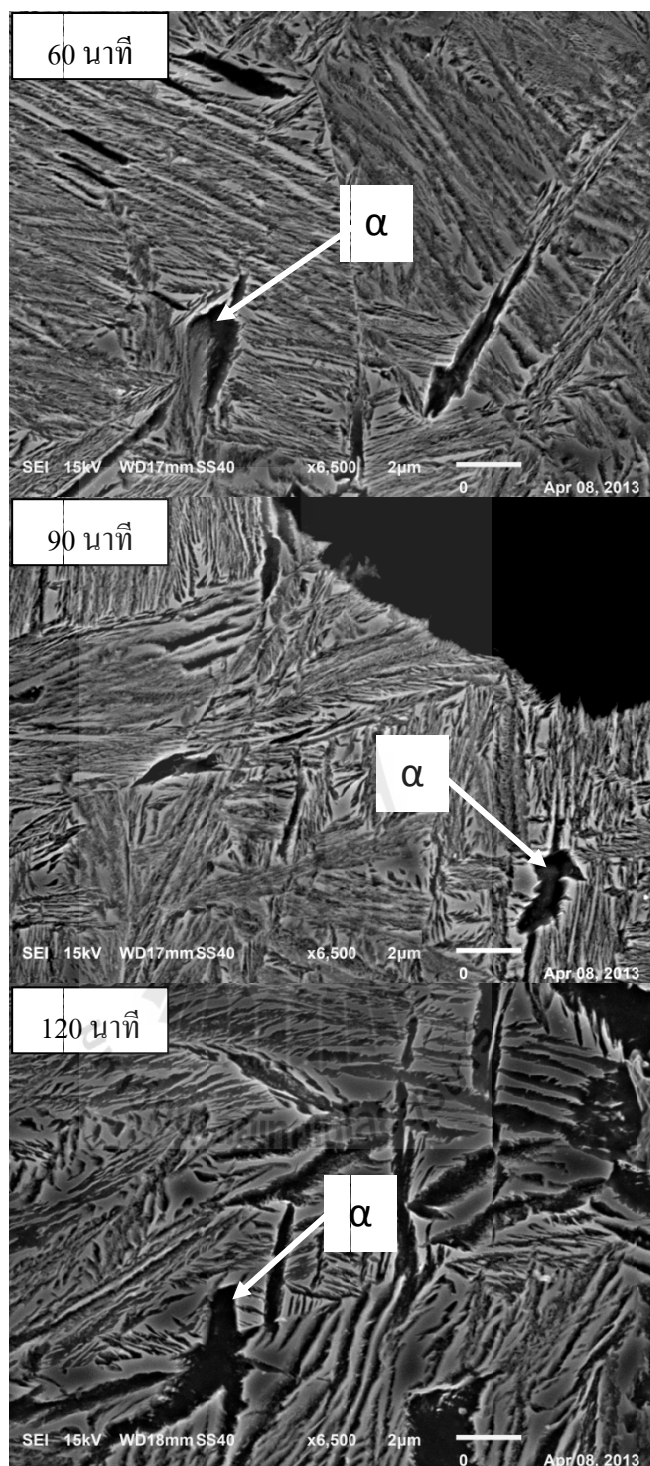
ทั้งนี้สิ่งที่สังเกตได้อีกคือเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส มีปริมาตรการสึกหรอลดลงเมื่ออบออสเตไนต์ที่นานขึ้นจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที และเมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีความแข็งใกล้เคียงกันพบว่าปริมาตรการสึกหรอไม่เท่ากัน บางชิ้นงานต่างกันมากเช่น ชิ้นงาน 900-30(280-90) กับ 900-90(280-120) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันแต่ ชิ้นที่ชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 120 นาที ปริมาตรการสึกหรอต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ชิ้นที่อบออสเตไนต์ที่นานมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากแต่ก็มีเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph มาก ทำให้ด้านทานการสึกหรอได้ไม่ดี ส่วนชิ้นที่อบออสเตไนต์ที่นานน่าจะไม่มีมาร์เทนไซต์แล้วแต่โครงสร้างพื้นทั้งหมดเป็นออสเฟอไรต์ ทำให้มีความแข็งใกล้เคียงกันกับชิ้นดังกล่าว และออสเฟอไรต์มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีดีกว่า



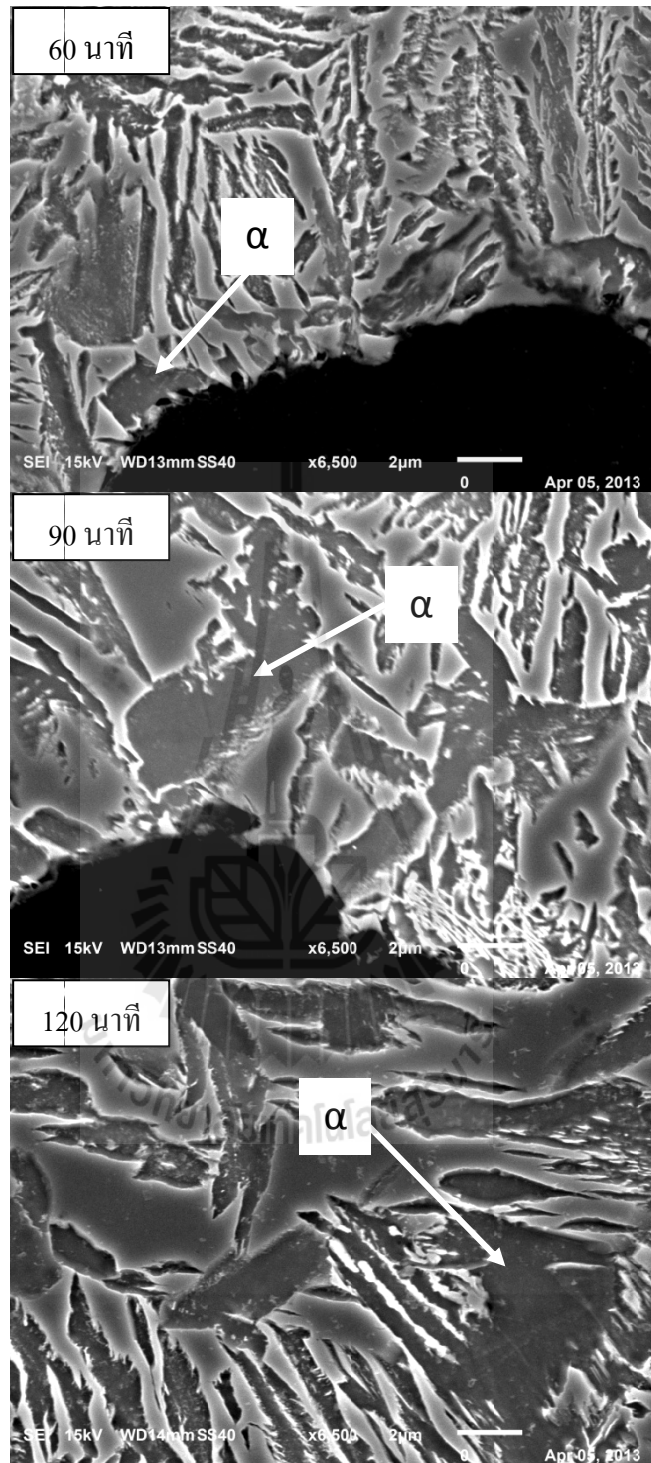
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบอสเทนเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบอสเทนเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส



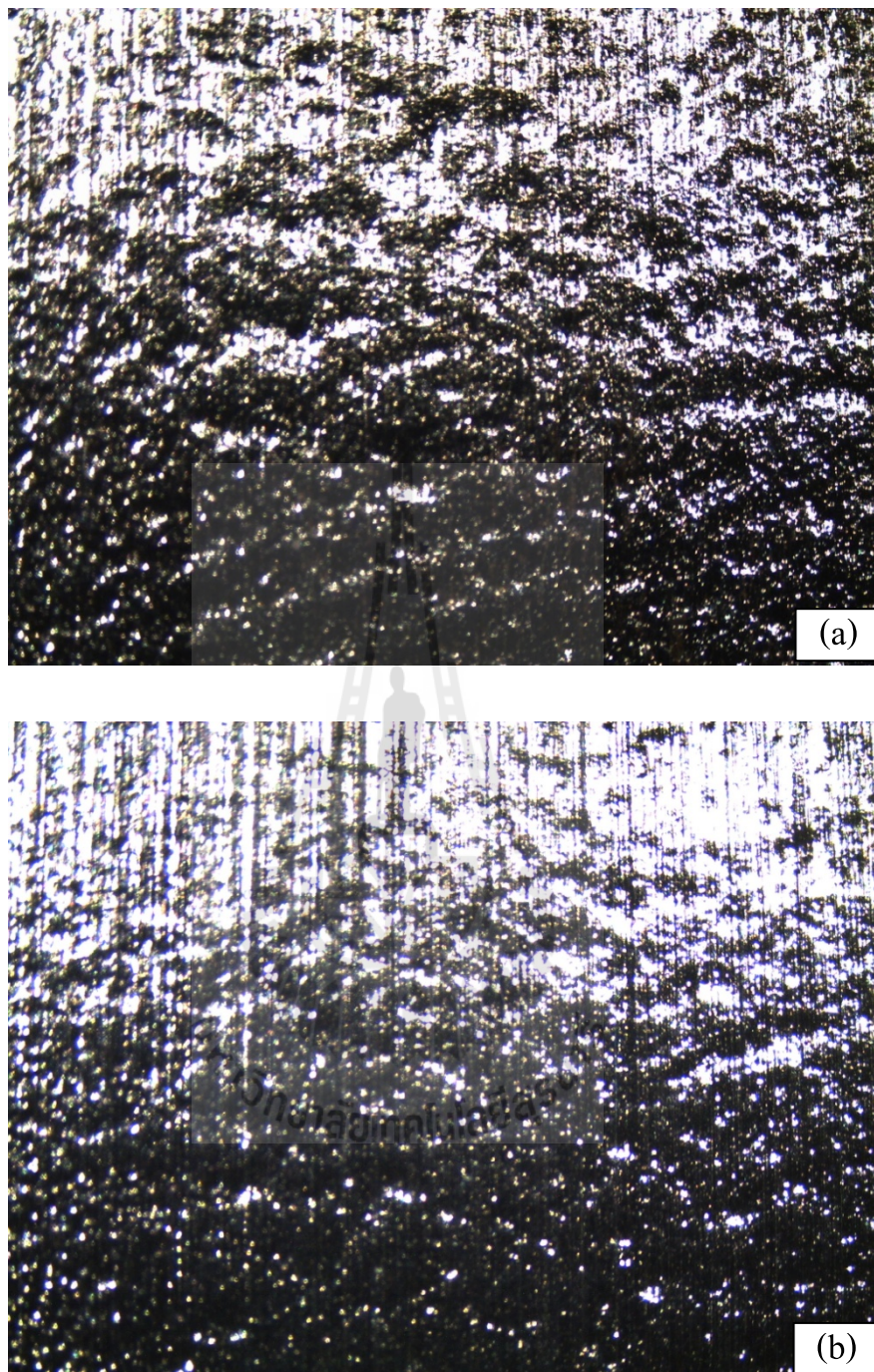
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่าของเหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนท์ซึ่ง
ด้วยเวลา 30 นาที และชุบอสเตมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส



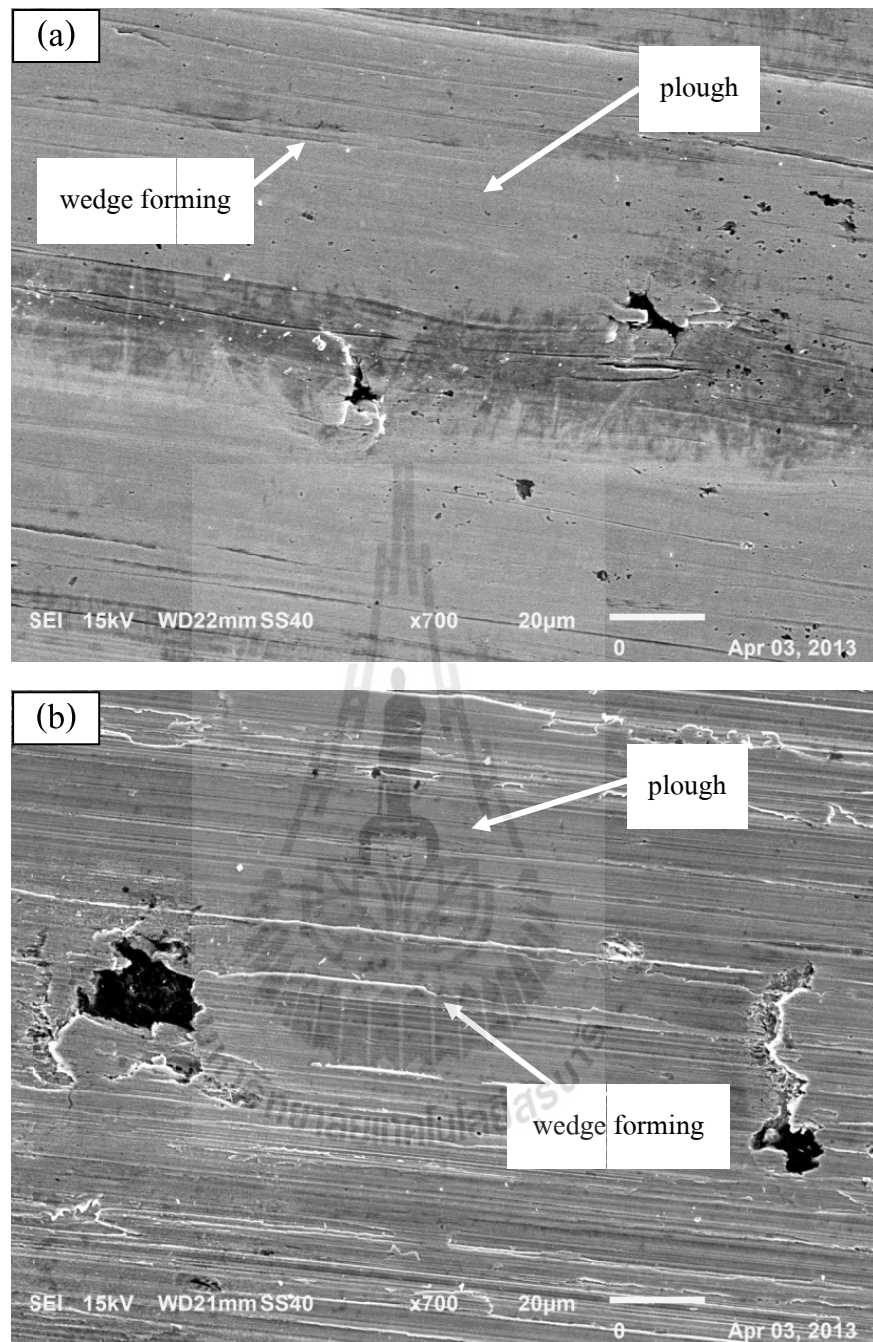
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 6500 เท่าของเหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนไนไทซิง ด้วยเวลา 30 นาที และหุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส

4.6.3 ตรวจสอบพื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานการขัดสีของ เหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ริง

ผลการทดสอบการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ริง พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการขัดสีแบบขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) มีลักษณะความเสียหายที่คล้ายกันทุกชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป และเมื่อตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุดกับมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าการทดสอบการขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) ทำให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบของรอยไถ (ploughing), รอยเนียน (wedge forming) หรือรอยตัด (cutting) ซึ่งความเสียหายดังที่กล่าวมาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณเนื้อพื้นซึ่งประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลมและอสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ โดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการสูญเสียเนื้อวัสดุสามารถเกิดได้จากการเสีรูปลาดาวหรือการแตกหักของวัสดุเนื่องจากการขัดสีกันโดยใช้ทรายเป็นตัวขัดสีระหว่างเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์กับล้อย่างที่หมุนอยู่ระหว่างการทดสอบ ดังที่กล่าวมาเมื่อทรายขัดสีกับเนื้อพื้นของเหล็กหล่อเหนียวอสเทมเปอร์ทำให้เกิดความเสียหายโดยเกิดเป็นแบบรอยไถ (ploughing) และรอยเนียน (wedge forming) เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.16 พบว่ามีรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณขอบแกรไฟต์ เมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น จึงพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากแกรไฟต์ โดย (Quanshun Luo et al,1994) มีการพบรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นบริเวณขอบแกรไฟต์จากการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุเช่นกัน



รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวการสีกหรือภายหลังทดสอบการขัดสีของ (a) เหล็กหล่อเหนียวที่อบ ออสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาณการสีกหรือน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียว ที่อบออสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาณการสีกหรือมากที่สุด)



รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวการสึกหรอภายหลังทดสอบการขัดสีของ (a) เหล็กหล่อเหนียวที่อบ ออสเทนไนท์ซิงด้วยเวลา 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียว ที่อบออสเทนไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาณการสึกหรอมากที่สุด)



รูปที่ 4.16 รอยแตกภายหลังจากทดสอบการกัดสีของ (a) เหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตนิไทซิง ด้วยเวลา 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 60 นาที (ปริมาณการสึกหรอน้อยที่สุด) และ (b) เหล็กหล่อเหนียว ที่อบอสเตนิไทซิงด้วยเวลา 30 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริง ที่ 360 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 120 นาที (ปริมาณการสึกหรอมากที่สุด)

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาความต้านทานการกัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ซึ่งได้ทดสอบการกัดสีแบบกัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์หาเฟสที่ปรากฏ และตรวจสอบพื้นผิวที่ผ่านการกัดสี รวมทั้งทดสอบหาสมบัติทางกลทั่วไป ได้แก่ ค่าความแข็ง และพลังงานดูดซับแรงกระแทก สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1.1 เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีปริมาณการสึกหรอลดลงตามเวลาอบออสเตนไนท์ซิงนานขึ้นคือจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที

5.1.2 เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนไนท์ซิงเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาที มีปริมาณการสึกหรอมากที่สุด และปริมาณการสึกหรอสูงขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์นานขึ้น

5.1.3 เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนไนท์ซิง 60 และ 90 นาที ไม่ได้มีแนวโน้มปริมาณการสึกหรอเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงอย่างชัดเจนตามเวลาชุบออสเทมเปอร์นานขึ้น

5.1.4 ชุดการทดลองที่มีค่าความแข็งเท่ากันมีปริมาณการสึกหรอไม่เท่ากัน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านสภาวะการอบชุบที่แตกต่างกัน

5.1.5 เหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ริงมีค่าความแข็ง ค่าการดูดซับพลังงานการกระแทก และค่าความต้านทานการสึกหรอแบบกัดสีสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวสภาพภายหลังการหล่อ

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

5.2.1 การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบการกัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ต้องควบคุมความเรียบผิวของชิ้นงานให้เท่ากันทุกชิ้นและมีความเรียบสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงาน ในขณะที่เริ่มต้นทดสอบ

5.2.2 การควบคุมปริมาณและการไหลของทรายในขณะทดสอบการขัดสี

ต้องควบคุมปริมาณและลักษณะการไหลของทรายขณะทดสอบการขัดสี โดยลักษณะการไหลของทรายควรไหลเป็นสายเล็กๆ และสม่ำเสมอการไหลแบบเชี่ยว (turbulent) จะทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากปริมาตรการสึกหรอได้ขึ้นอยู่กับความถี่ในการสัมผัสกันระหว่างผิวสัมผัสกับอนุภาค (ทราย)



รายการอ้างอิง

- ปนัดดา นิรนาทลำพังศ์ และคณะ. 2547. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม. ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- มนัส สติรจินดา. 2543. เหล็กหล่อ. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-ibabe, J.M., and Urcola, J.J. (1997). Influence of the Amount and Morphology of Retained Austenite on the Mechanical Properties of an Austempered Ductile Iron. **Metallurgical and materials transactions A**. A(28): 1143-1156.
- Alan Vasko. (2009). Chosen Factors Influencing Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron. **Materials Engineering**. (16): 11-14.
ASM International. pp. 60-79
- ASM Metals Handbook. (1992). Volume 18-Friction, Lubrication, and Wear Technology. **ASM International**. pp. 337-351
- Bingley, M.S., and Schnee, S. (2005). A study of the mechanisms of abrasive wear for ductile metals under wet and dry three-body conditions . **Wear**. (258): 50-61
- Blanchett, T.A., Kennedy, F.E.(1989) The Development of Transfer Films in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Stainless Steel Oscillatory Sliding, **Tribology Transactions**, (32): 371-379.
- Chattopadhyay, R. (2001). Surface Wear Analysis, Treatment, and Prevention.
- Ching, L.C., Hsui, I.C., Chen, L.H., and Lui, T.S. (2005). Effects of heat treatment on the erosion behavior of austempered ductile irons. **Wear**. (260): 783-793.
- Ductile Iron Group. (1990). Ductile Iron Data for Design Engineers. **QIT**. (4):1-44
- Francucci, G., Sikora, J., and Dommarco, R. (2008). Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process. **Material Science and Engineering**. A(485): 46-54.
- Heat treater's Guide. (1995). Practices and Procedures for Irons and Steels. **ASM International**. pp. 106-110

- Heydarzadeh Sohi, M., Nili Ahmadabadi, M., Bahrami Vahdat, A. (2004). The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI. **Journal of Materials Processing Technology**. (153–154): 203–208
- Kilicli, V., and Erdogan, M. (2007). Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures. **JMEPEG**. (20): 202-214.
- Quanshun Luo, Jingpei Xie, and Yanpei Song (1995). Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron. **Wear**. (184): 1-10
- Sahin, Y., Durak, O. (2007). Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron. **Materials and Design**. (28): 1844-1850
- Tszeng, T.C. (2000). Autocatalysis in bainite transformations. **Materials Science and Engineering**. A(293): 185-190.
- Uma Batra, Ray, S., and Prabhakar, S.R. (2003). Effect of Austenitization on Austempering of Copper Alloyed Ductile Iron. *Asm International*. (12): 597-601.
- Velez J.M., Tanaka D.K., Sinatora A., Tschiptschin A.P. (2001). Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. **Wear**. (251): 1315-1319.
- Wu, C.Z., Chen, Y.J., and Shih, T.S. (2002). Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact. **Materials Characterization**. (48): 43-54.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

**ผลของเวลาในการอบออสเทนไนท์ซึ่งต่อการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของ
เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์**
**The Effects of Austenitizing Time on Three – Body Abrasion Wear Behavior
of Austempered Ductile Iron**

วัฒนพร ชนไฮ¹ อุษณีเย์ กิตกำธร¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง
จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: f_ny@windowslive.com

Wattanaporn Chonhai¹, and Usanee Kitkamthorn¹

School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Muang, Nakhon Ratchasima 30000

E-mail: k_usanee@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเวลาในการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยเริ่มจากการนำเหล็กหล่อเหนียวไปอบออสเทนไนท์ซึ่งที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์จริงโดยชุบลงในเกลือหลอมเหลวที่ 280 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 90 และ 120 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM G65 (ชนิดสามวัตถุ) และตรวจสอบพื้นหลังการขัดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ลดลงเมื่อใช้เวลาอบออสเทนไนท์ซึ่งนานขึ้นคือจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที โดยเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเทนไนท์ซึ่ง 30 นาที มีปริมาณการสึกหรอมากที่สุด และมีความแข็งต่ำสุด ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph จำนวนมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเวลาในการอบออสเทนไนท์ซึ่งเพียง 30 นาที สิ้นเกินไป ความสามารถในการชุบแข็งจึงต่ำ และเมื่อชุบลงในอ่างเกลือจึงเกิดเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph บางส่วน เมื่อตรวจสอบพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นแบบรอยแตก รอยไถ และรอยเฉือน โดยพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากแกรไฟต์ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันทุกชิ้นงานทดสอบ

คำสำคัญ: ออสเทนไนท์ซึ่ง ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี

ABSTRACT

The effects of austenitizing time on abrasion wear resistance and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) were studied. The austempering treatment was carried out by austenitizing the ductile iron at 900 °C for 30, 60 and 90 minutes and then austempering in a salt bath at 280 °C and 360 °C for 60, 90 and 120 minutes, respectively. The microstructure of austempered specimens were investigated by optical microscope and scanning electron microscope. Brinell hardness of all samples were tested. Abrasion wear test was conducted according to ASTM G65 three – body dry sand/rubber wheel abrasion testing. Scanning electron microscope was also used for worn surface investigation. The results showed that volume losses of ADI decreased with increasing austenitizing time from 30, 60 to 90 minutes. The specimens austenitized for 30 minutes exhibited highest volume loss and lowest hardness value due to the presence of allotriomorph ferrite. Such results indicated that austenitization for 30 minutes was too short. Therefore, austenite exhibited low hardenability and thus allotriomorph ferrite formed during quenching into the molten salt. Moreover, three – body abrasive worn surface revealed the wear mechanisms involve cracking, plowing and shearing. Cracks were found to initiate in the matrix at the graphite/matrix interface in all of specimens.

Keyword: austenitizing, ausferrite, abrasive wear

1. บทนำ

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลเพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งาน โดยการรมวิธืออบออสเทมเปอร์เหล็กหล่อแกรไฟต์กลที่ผ่านการอบชุบออสเทมเปอร์จะถูกเรียกว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการรมวิธืออบชุบความร้อนด้วยการชุบแข็ง (Quenching) และการอบคืนตัว (Temper) ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 600-1000 MPa ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ให้ค่าความต้านทานแรงดึง 750-1600 MPa อีกทั้งสามารถทนต่อแรงกระแทก แรงบิดและการขัดสีได้สูง[1] จึงถูกนำมาใช้มากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร อาทิเช่น เฟืองท้ายรถยนต์ เฟืองเกียร์ ตัวชุดดินในรถไถและล้อเฟืองของรถเกี่ยวข้าว – นวดข้าว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาผลิตภัณฑ์แล้วเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์จะถูกกว่า และไม่ด้อยกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำในด้านคุณสมบัติเชิงกล โดยโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ประกอบไป

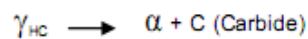
ด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลมสลับกับออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง หรือที่เรียกกันว่า ออสเฟอร์ไรต์ (ausferrite) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสจากออสเตไนต์เริ่มต้น (γ_c) ไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลม (α) กับออสเตไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) โดยในระหว่างการอบออสเทมเปอร์ของเหล็กหล่อเหนียวจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟส 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 ออสเตไนต์เริ่มต้น (γ_c) เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลม (α) กับออสเตไนต์ที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC})



หากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 นั้นสูงพอ เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวจะคงเป็นออสเตไนต์เหลือค้าง แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนไม่สูงพอเช่น ใช้เวลาในการอบออสเทมเปอร์ไม่นานเมื่อชิ้นงานเย็นจะเกิดมาร์เทนไซต์

ชั้นที่ 2 ออสเตไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์



โดยปฏิกิริยาชั้นที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ชุบออสเทมเปอร์ริงนานเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวด้วย

เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการขัดสี โดยการสึกหรอแบบขัดสีเกิดขึ้นจากการที่วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าด้วยแรงเสียดทานเป็นผลให้เกิดการสึกหรอบนพื้นผิววัสดุ [2] และเนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์มีโครงสร้างเป็นออสเฟอไรต์ที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์เหลือค่างคาร์บอนสูงซึ่งเฟสออสเตไนต์เหลือค่างนี้ช่วยให้สามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเหนียวทั่วไป เพราะเมื่อชิ้นงานถูกขัดสีจากการใช้งานจะทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานที่ถูกขัดสี ส่งผลให้ออสเตไนต์เหลือค่างที่อยู่ในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง (strain-induced martensite) ส่งผลให้ชิ้นส่วนนั้นมีความต้านทานการสึกหรอได้ดีขึ้นระหว่างใช้งาน [3] โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ ได้แก่ 1) ส่วนผสมทางเคมี 2) โครงสร้างจุลภาคก่อนนำไปชุบออสเทมเปอร์ริง 3) อุณหภูมิและเวลาในการอบออสเตไนท์ซิง 4) อัตราการเย็นตัวก่อนถึงอุณหภูมิชุบออสเทมเปอร์ริง 5) อุณหภูมิและเวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริง และ 6) ปริมาณธาตุผสมที่อยู่ในเนื้อเหล็ก [4]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้ให้ความสนใจไปที่ผลของเวลาในการอบออสเตไนท์ซิงต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ เนื่องจากเวลาอบ

ออสเตไนท์ซิงต่างกันส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์เริ่มต้น (γ_0) ต่างกัน

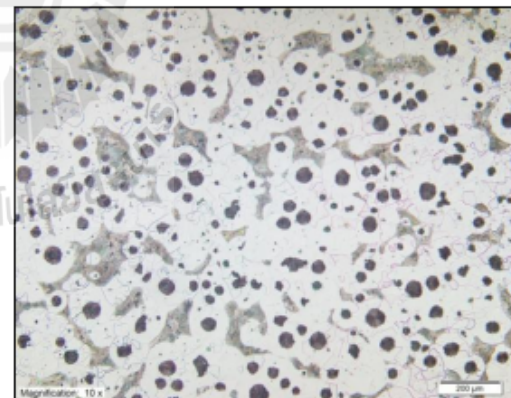
2. วิธีการทดลอง

2.1 วัตถุประสงค์

การทดลองนี้ใช้เหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลมที่มีส่วนผสมทางเคมีดังในตารางที่ 1 และมีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ดังรูปที่ 1 โดยหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน Y-blocks ขนาด 1 นิ้ว และ ชั่งเหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนแกรไฟต์เฉลี่ย 102 เม็ด/กลมต่อตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
3.44	2.66	0.03	0.03	0.009	0.026	0.06



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวแกรไฟต์กลม

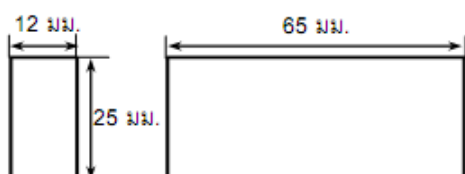
2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบการขัดสี โดยตัดชิ้นงานหล่อจากด้านล่างของ Y-blocks เพื่อเตรียมขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบการขัดสีให้มีขนาดเริ่มต้น 25 x 75 x 14 มม. เพื่อนำไปอบชุบออสเทมเปอร์ริงก่อนที่จะกลึงไสจนได้ขนาดสุดท้ายเป็น 25 x 65 x 12 มม.

- 4 -

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2556

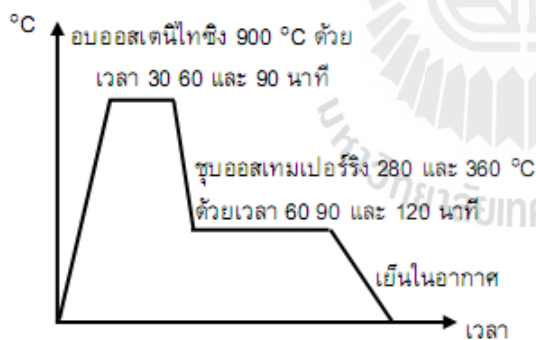
ดังรูปที่ 2 และขัดผิว ซึ่งงานมีความเรียบผิวประมาณ 0.8 ไมโครเมตร



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการขัดสี

2.3 การอบชุบ

การอบชุบออสเทมเปอร์ริงประกอบด้วยการอบออสเทนิไทซิ่งที่ 900 °C เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยการชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่ 280 °C และ 360 °C แข็งทั้งไว้ประมาณ 60 90 และ 120 นาที แล้วยกขึ้นปล่อยให้เย็นในอากาศ ดังแสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพกระบวนการอบออสเทมเปอร์ริง

2.4 การทดสอบ

ภายหลังจากการอบชุบออสเทมเปอร์ริงได้นำชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบวิเคราะห์หาเฟสที่ปรากฏโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพื่อยืนยันโครงสร้างที่ได้ ทดสอบความต้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) ดังแสดงในรูปที่ 4 และหา

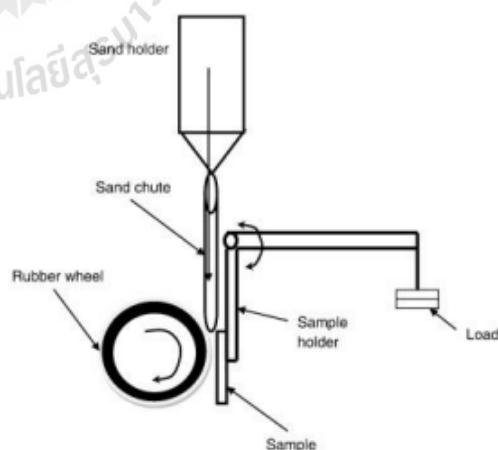
สมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความแข็ง และค่าการดูดซับแรงกระแทก

2.4.1 การทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งในการวิจัยนี้เป็นเครื่องวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์ ยี่ห้อ Wilson รุ่น Dead Wilson MJ โดยใช้แรงกดชิ้นงานทดสอบที่เกิดจากน้ำหนักกด 3000 กิโลกรัม และลูกบอลเหล็กกล้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกด 10 วินาที

2.4.2 การทดสอบการขัดสีชนิดสามวัตถุ

การวิจัยได้ทดสอบการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีล้อย่างชนิดสามวัตถุ (dry sand rubber wheel abrasion test) ดังรูปที่ 4 โดยใช้ทรายขนาด 50 mesh เป็นตัวขัดสีระหว่างชิ้นงานทดสอบกับล้อย่างที่หมุนอยู่ ใช้แรงกดชิ้นงานที่ 130 นิวตัน ล้อย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 226.8 มม. หมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีในทิศทางเดียวกับการไหลของทราย โดยอัตราการไหลของทรายอยู่ถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 300-400 กรัมต่อนาที ระยะเวลาในการทดสอบ 10 นาที

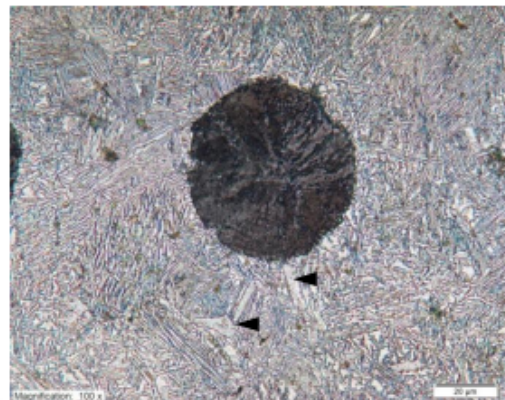


รูปที่ 4 ภาพจำลองเครื่องทดสอบการขัดสีล้อย่างชนิดสามวัตถุ

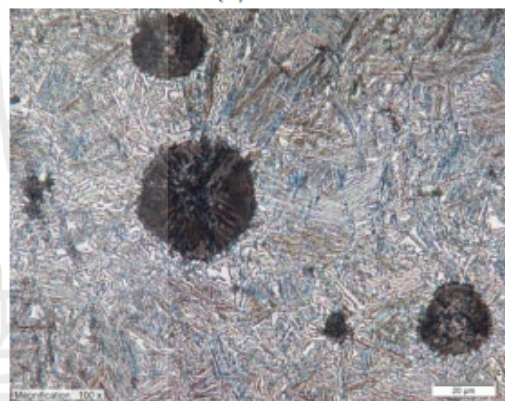
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างจุลภาค

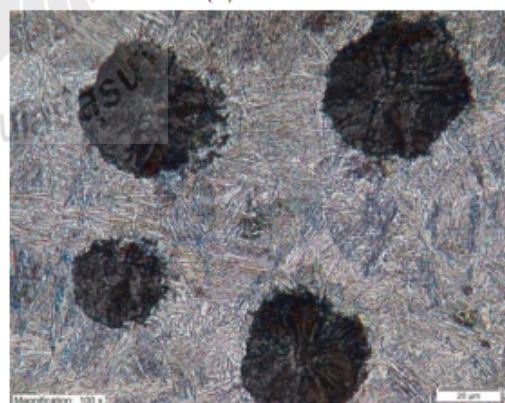
โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากชุบออสเทมเปอร์ริงประกอบด้วย แกรไฟต์กลมและโครงสร้างเฟอไรต์รูปเข็มแหลมและออสเตไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง จากชุดการทดลองที่อบออสเตไนท์ซึ่งเหมือนกันแต่ใช้เวลาในการชุบออสเทมเปอร์ริงต่างกัน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนพบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากชุบออสเทมเปอร์ริงมีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคที่ไม่สามารถแยกแยะมาร์เทนไซต์ที่อยู่ในออสเตไนต์เหลือค้างได้ (resolution limit) แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่ชุบออสเทมเปอร์ริงเหมือนกัน แต่ออบออสเตไนท์ซึ่งต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ซึ่งเป็นเวลาสั้น ๆ คือ 30 นาทีมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 5(ก) เนื่องจากยังมีกลุ่มก้อนสีขาวอยู่มาก ซึ่งอาจเป็นออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Untransformed Austenite) ผสมกับเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph ออสเตไนต์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสบางส่วนกลายเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ซึ่งด้วยเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปริมาณกลุ่มก้อนสีขาวลดลงและเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชิ้นงานที่อบออสเตไนท์ซึ่งด้วยเวลาเท่าๆกัน แต่อุณหภูมิการชุบออสเทมเปอร์ริงต่างกันคือ 280°C และ 360°C เฟอไรต์รูปเข็มแหลมมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงสูงขึ้น โดยยังเห็นได้ชัดเจนเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) 30 นาที



(ข) 60 นาที

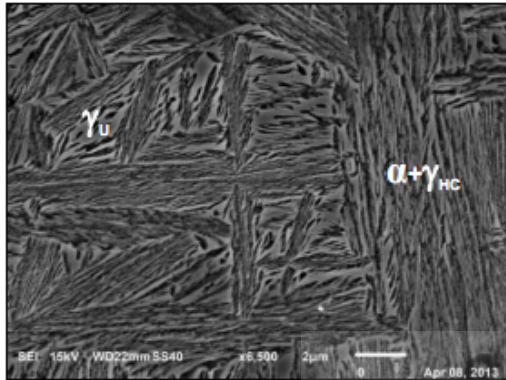


(ค) 90 นาที

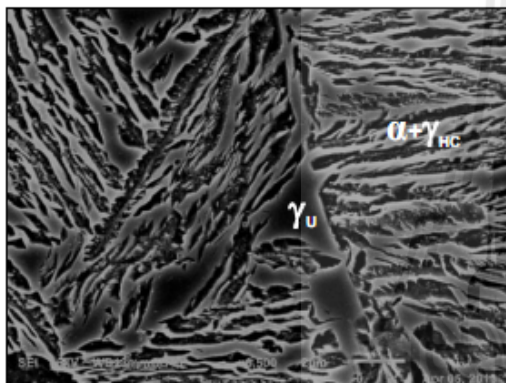
รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตไนท์ซึ่งด้วยเวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที และชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที (ลูกศรชี้ตัวอย่างของกลุ่มก้อนสีขาว)

- 6 -

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2556



(ก) 280 °C



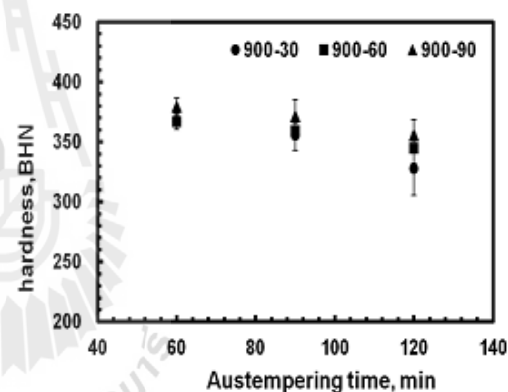
(ข) 360 °C

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิ 280 °C และ 360 °C เป็นเวลา 60 นาที และชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลา 60 นาที (γ_u คือ ออสเตไนต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส ส่วน $\alpha+\gamma_{Hc}$ คือออสเฟอไรต์)

3.2 ความแข็ง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 280 °C และ 360 °C เป็นเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น การเปลี่ยนเฟสจากออสเตไนต์เริ่มต้นไปเป็นออสเฟอไรต์ยังไม่สิ้นสุด ดังสังเกตได้จากค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์นานขึ้น ซึ่งในขณะที่ชุบออสเทมเปอร์ ออสเตไนต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเฟอไรต์ โดยในช่วงเริ่มต้นนิเวศลิสเฟอไรต์มักจะเกิดรอบๆ แกรไฟต์กลมก่อนเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยที่สุดและมีซิลิคอนสูงทำให้เกิดเฟอไรต์ได้ง่ายกว่า โครงสร้างออสเฟอไรต์จะโตต่อไปเรื่อยๆ ในเนื้อ

ออสเตไนต์ หากการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเฟอไรต์ถูกทำให้หยุดก่อนการเปลี่ยนเฟสสิ้นสุด (เวลาชุบออสเทมเปอร์สั้น) ออสเตไนต์ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์เมื่อเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในออสเตไนต์มีไม่เพียงพอที่จะทำให้ ออสเตไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้องได้ [5] เมื่อเพิ่มเวลาชุบออสเทมเปอร์ให้มากขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ออสเตไนต์ที่ยังไม่เปลี่ยนเฟสลดลง และออสเตไนต์ในออสเฟอไรต์ก็มีคาร์บอนสูง จึงมีเสถียรภาพแม้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในโครงสร้างจุลภาคจึงมีปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง ค่าความแข็งจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความแข็งกับเวลาชุบออสเทมเปอร์ที่ 280 °C

3.3 ความต้านทานการขัดสี

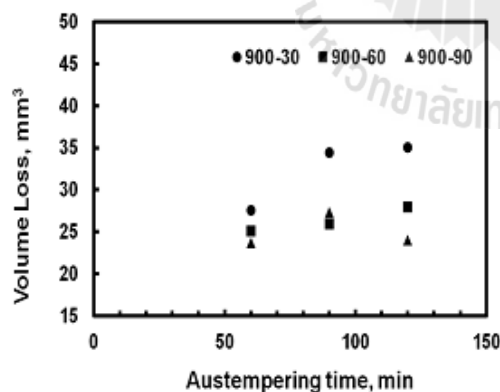
3.3.1 ปริมาณการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่ได้จากการอบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิต่างกัน

ผลการทดสอบการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวชุดการทดลองที่อบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิ 280 °C และ 360 °C แสดงในรูปที่ 8 และ 9 พบว่าปริมาณการสึกหรอไม่ได้แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่อบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลาสั้น คือ 30 นาที (วงกลม ●) พบว่าเกิดการสึกหรอมากที่สุด ซึ่งเป็นไปได้ว่าเวลาอบออสเตไนท์ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลาสั้นทำให้ออสเตไนต์เริ่มต้นบางส่วนมี

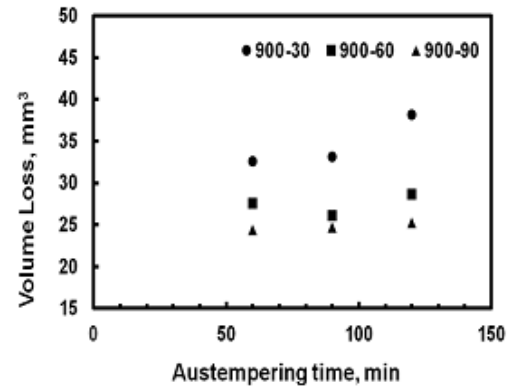
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2556

- 7 -

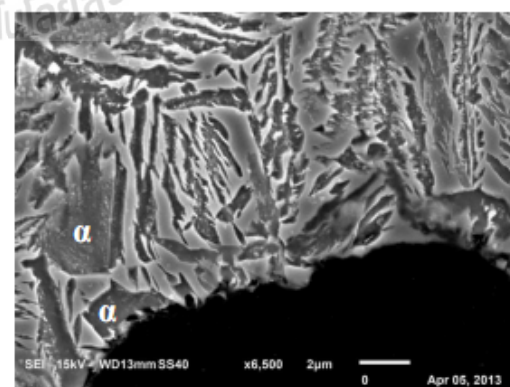
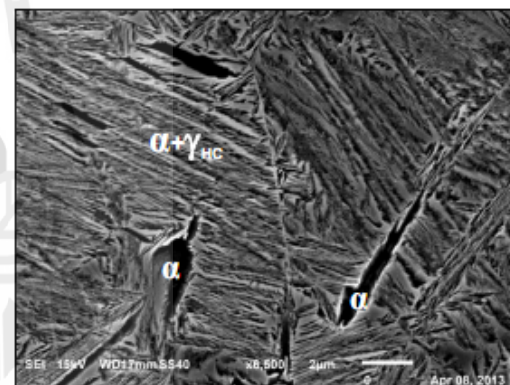
ปริมาณคาร์บอนน้อย ความสามารถในการชุบแข็งจึงต่ำและเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph ระหว่างที่ชุบซึ่งงานลงในอ่างเกลือดังแสดงในรูปที่ 10 เฟอไรต์ประเภทดังกล่าวนี้มีความแข็งต่ำ จึงส่งผลให้เกิดการสึกหรอได้ง่าย และยังพบว่าในชุดการทดลองที่อบออสเทนไนท์ซึ่งเป็นเวลาสั้นนี้ เมื่อชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลาเพียง 60 นาที ปรากฏว่าปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าหลังการชุบออสเทมเปอร์ริงมีเฟสมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นจำนวนมากเนื่องจากคาร์บอนแพร่ไปในออสเทนไนต์ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อใช้เวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น พบว่าปริมาณการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณมาร์เทนไซต์ลดลง เมื่อพิจารณาชุดที่อบออสเทนไนท์ซึ่งนานขึ้นเป็น 60 นาที (■) และ 90 นาที (▲) ปริมาณการสึกหรอลดลง เนื่องจากเวลาอบออสเทนไนท์ซึ่งนานขึ้น ออสเทนไนต์เริ่มต้นมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น จึงไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph และพบว่าปริมาณการสึกหรอก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้นแต่ไม่มากนัก



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280°C



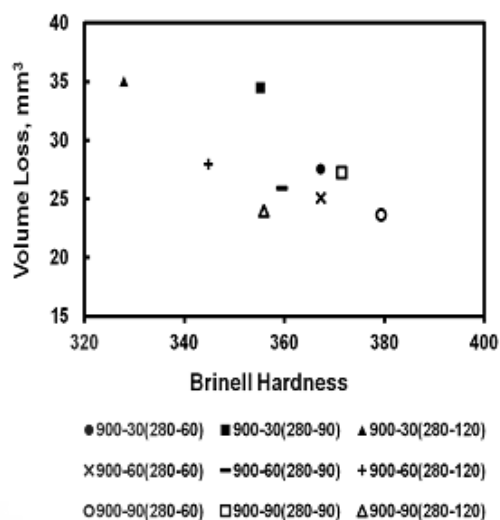
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360°C



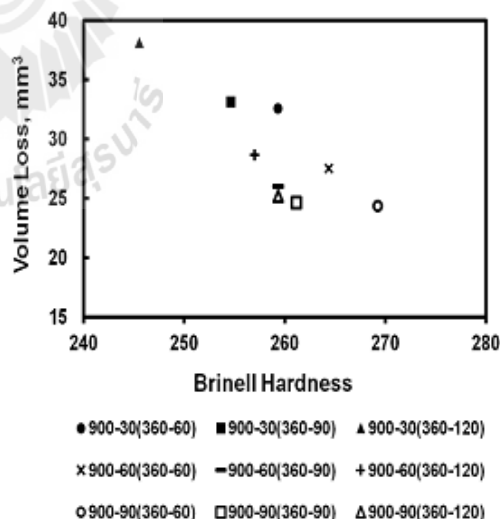
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเทนไนท์ซึ่งด้วยเวลา 30 นาทีแล้วชุบออสเทมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที (α คือ เฟอไรต์ประเภท Allotriomorph)

3.3.2 ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับความแข็ง

เมื่อนำเอาค่าปริมาตรการสึกหรอของทุกชิ้นงานมาพล็อตตามค่าความแข็งของแต่ละชิ้นพบว่า ปริมาตรการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความแข็งลดลง และยังพบว่าเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเตนไนท์ซิงสั้นคือ 30 นาที เกิดการสึกหรอมากที่สุดและปริมาตรการสึกหรอสูงขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาชุบออสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ในเหล็กหล่อเหนียวที่อบออสเตนไนท์ซิงด้วยเวลา 30 นาที พบว่ายังมีออสเตไนต์บางส่วนเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่อุดมหมู่มีห้อง และเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph จำนวนมาก และเมื่ออบออสเตนไนท์ซิงนานขึ้น พบว่าปริมาตรการสึกหรอลดลง เนื่องจากออสเตไนต์เริ่มต้นมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น จึงไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph ทั้งนี้สิ่งที่สังเกตได้อีกคือชุดการทดลองที่แม้จะมีความแข็งใกล้เคียงกัน แต่ก็พบว่าปริมาตรการสึกหรอไม่เท่ากัน บางชิ้นงานต่างกันมากเช่น ชิ้นงานอบที่ออสเตนไนท์ซิง 30 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 °C ด้วยเวลา 90 นาที (■) กับชิ้นงานอบออสเตนไนท์ซิง 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280 °C ด้วยเวลา 120 นาที (Δ) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นที่อบออสเตนไนท์ซิง 90 นาที ให้ปริมาตรการสึกหรอต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่อบออสเตนไนท์ซิงสั้น (30 นาที) มีปริมาณมาร์เทนไซต์มากแต่ก็มีเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph อยู่ด้วย ทำให้ต้านทานการสึกหรอได้ไม่ดี ส่วนชิ้นงานที่อบออสเตนไนท์ซิงนาน (90 นาที) ไม่มีเฟอไรต์ประเภท Allotriomorph และมาร์เทนไซต์แล้ว แต่โครงสร้างพื้นทั้งหมดเป็นออสเฟอไรต์ ทำให้มีความแข็งใกล้เคียงกันกับชิ้นดังกล่าว และโครงสร้างจุลภาคออสเฟอไรต์ที่เฟสออสเตไนต์มีคาร์บอนสูงนั้นมีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีดีกว่าโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างเฟอไรต์ Allotriomorph กับออสเฟอไรต์ที่เฟสออสเตไนต์ไม่เสถียรจึงเกิดเป็นมาร์เทนไซต์



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 280°C



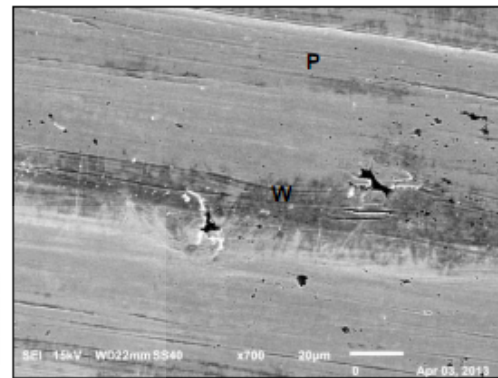
รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบออสเทมเปอร์ริงที่ 360°C

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ.2556

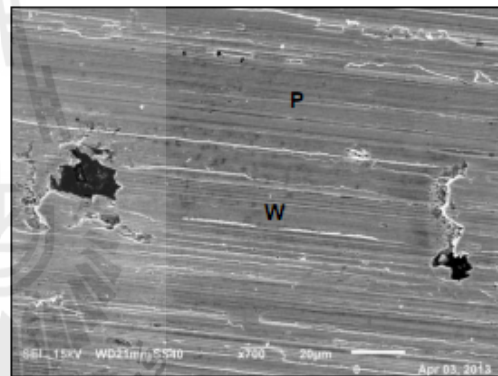
- 9 -

3.3.3 พื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบ ความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวออสเทม เปอร์

เมื่อตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการขัดสีแบบขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคปพบว่า มีลักษณะความเสียหายที่คล้ายกันทุกชิ้นงาน และเมื่อตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุดกับมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าการทดสอบการขัดสีล้อย่าง (ชนิดสามวัตถุ) ทำให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบของรอยไถ (ploughing), รอยเขื่อน (wedge forming) ซึ่งความเสียหายดังกล่าวมาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณเนื้อพื้นซึ่งประกอบไปด้วยเฟอไรต์รูปเข็มแหลมและออสเทนไนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ โดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการสูญเสียเนื้อวัสดุเกิดได้จากการเสีรูปถาวรหรือการแตกหักของวัสดุเนื่องจากการขัดสีกันโดยใช้ทรายเป็นตัวขัดสีระหว่างเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์กับล้อย่างที่หมุนอยู่ระหว่างการทดสอบ เมื่อสังเกตจากรูปที่ 14 พบว่ามีรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณขอบแกรไฟต์ เมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น จึงพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากแกรไฟต์ โดย Quanshun Luo et al. [6] มีการพบรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นบริเวณขอบแกรไฟต์จากการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุเช่นกัน



(ก)



(ข)

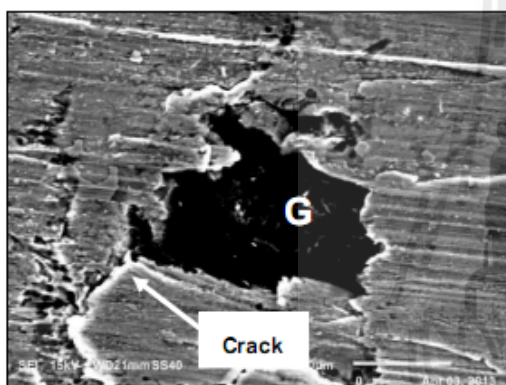
รูปที่ 13 พื้นผิวการสึกหรอภายหลังทดสอบการขัดสีของ
(ก) 900-90(280-60) และ (ข) 900-30(360-120) ที่
กำลังขยาย 700 เท่า (P-รอยไถ W-รอยเขื่อน)

- 8 -

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2556



(ก) 280 °C



(ข) 360 °C

รูปที่ 14 รอยแตกภายหลังทดสอบการขัดสีของ (ก)
900-90(280-60) และ (ข) 900-30(360-120) ที่
กำลังขยาย 2700 เท่า

4. สรุปผลการทดลอง

1. เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่มีปริมาณการสึกหรอลดลงตามเวลาอบออสเทนไนท์ซึ่งนานขึ้นคือจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที
2. เหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ที่อบออสเทนไนท์ซึ่งเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาที มีปริมาณการสึกหรอมากที่สุด และปริมาณการสึกหรอสูงขึ้นตามค่าความแข็งที่ลดลงหรือเมื่อเวลาอบออสเทมเปอร์ซึ่งนานขึ้น
3. ชุดการทดลองที่มีค่าความแข็งเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแต่กลับมีปริมาณการสึกหรอไม่เท่ากันเนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันภายหลังจากผ่านสภาวะการอบชุบที่แตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สติรจินดา.เหล็กหล่อ. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543.
- [2] ASM Metals Handbook, "Volume 18-Friction, Lubrication, and Wear Technology," ASM International. pp. 337-351, 1992.
- [3] Heydarzadeh Sohi, M., Nili Ahmadabadi, M., Bahrami Vahdat, A., "The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI," Journal of Materials Processing Technology., (153-154): 203-208, 2004.
- [4] Alan Vasko., "Chosen Factors Influencing Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron," Materials Engineering., (16): 11-14, 2009.
- [5] Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-babe, J.M., and Urcola, J.J., "Influence of the Amount and Morphology of Retained Austenite on the Mechanical Properties of an Austempered Ductile Iron," Metallurgical and materials transactions A., A(28): 1143-1156, 1997.
- [6] Quanshun Luo, Jingpei Xie, and Yanpei Song, "Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron," Wear., (184): 1-10, 1999

ประวัติผู้เขียน

นางสาววัฒนพร ชนไฮ เกิดวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดขอนแก่น บิดาชื่อ นายวิษณุ ยังกง มารดาชื่อนางชนิสรา พันธุ์สุวรรณาคี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม จังหวัดสมุทรปราการ ในปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย ชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ ในปีการศึกษา 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโลหการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2549

ปีการศึกษา 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างการศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการโลหการเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ณ สถาบันการศึกษาเดิม (ปีการศึกษา 2551-2553) และได้มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากบทความวิจัย “ การศึกษาห่อแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของเหล็กหล่อเหนียวออสเทมเปอร์ “ ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (อยู่ระหว่างดำเนินการส่งไปตีพิมพ์ที่วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

วัฒนพร ชนไฮ อุษณีย์ กิตกำจร. (2556). การสักหรอบแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของเหล็กหล่อเหนียว
ออสเทมเปอร์. (อยู่ระหว่างดำเนินการส่งไปตีพิมพ์ที่วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ)

